

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ ТА
БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

«Дослідження впливу температури навколишнього середовища на
експлуатаційні та світлотехнічні характеристики LED ламп»

Виконав: студент VI курсу

групи Ен – 61 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Герасимів Р.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник: Марущак Я.Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент:

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Левонюк В. Р.

(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ ” 2025_ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Герасимів Роман Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження впливу температури навколишнього середовища на експлуатаційні та світлотехнічні характеристики LED ламп»

керівник роботи д.т.н., професор Марущак Я.Ю.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 140 / к - с від 28.02.2025 р.

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЗАЛЕЖНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ

3 СТАБІЛІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,5	Гошко М.О., старший викладач			
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<u>1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ</u>	28.02.2025 – 1.05.2025	
2	<u>2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЗАЛЕЖНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ</u>	2.05.2025 – 1.08.2025	
3	<u>3 СТАБІЛІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ</u>	2.08.2025 – 1.10.2025	
4	<u>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</u>	2.10.2025 – 1.11.2025	
5	<u>5 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ</u>	2.11.2025 – 1.12.2025	
6	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	2.12.2025 – 6.12.2025	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	7.12.2025 – 11.12.2025	

Студент Герасимів Р.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Марущак Я.Ю.

УДК 631.01

Герасимів Роман Михайлович. Дослідження впливу температури навколишнього середовища на експлуатаційні та світлотехнічні характеристики LED ламп. Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ІМ. С.З.ГЖИЦЬКОГО, 2025 р. 62 с. текстової частини, 10 таблиць, 14 рисунків, 33 джерела.

В даній кваліфікаційній роботі було розглянуто питання впливу температури навколишнього середовища на експлуатаційні та світлотехнічні характеристики LED ламп, а також було розроблено методику досліджень, проведені експериментальні дослідження світлотехнічних характеристик світлодіодних ламп. На базі експериментальних досліджень був проведений аналіз даних та запропоновані рекомендації щодо вибору ламп. Також було розраховано енергетичну ефективність.

**ВПЛИВ КОЛИВАНЬ TEMПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО
СЕРЕДОВИЩА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДНИХ ЛАМП,
ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДНИХ ЛАМП, ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ.**

ВСТУП

Світлодіодні джерела світла (LED) на сьогодні посідають провідне місце серед сучасних технологій штучного освітлення, що зумовлено їх високою енергоефективністю, тривалим терміном служби та малими габаритами. Завдяки цим перевагам світлодіоди широко застосовуються не лише у побутовому освітленні, а й у таких сферах, як телекомунікації, медична техніка, авіаційні системи, промислова електроніка та приладобудування. Разом з тим, ефективність та стабільність роботи світлодіодів значною мірою визначаються умовами теплового режиму.

Температура є одним із ключових зовнішніх факторів, що впливає на спектральні характеристики світлодіодів, зокрема на положення пікової довжини хвилі випромінювання, рівень світлового потоку та ширину спектра. Підвищення температури призводить до виникнення теплового дрейфу спектрального максимуму, зниження світлової ефективності, зміни кольорових координат та прискореного деградування напівпровідникової структури. Такі явища є критичними для систем, у яких вимагається стабільність спектральних параметрів, зокрема в медичній візуалізації, спектроскопічних методах аналізу та прецизійних освітлювальних установках.

Актуальність даного дослідження обумовлена зростаючими вимогами до надійності та стабільності світлодіодних освітлювальних систем, особливо за умов змінної температури навколишнього середовища або інтенсивного тепловиділення під час роботи. Вивчення температурної залежності спектральних характеристик світлодіодів дозволяє підвищити точність їх моделювання, покращити прогнозування експлуатаційних параметрів та оптимізувати проектування LED-систем, орієнтованих на стабільну та довготривалу роботу.

Метою даної магістерської роботи є дослідження впливу температури на спектральні характеристики світлодіодів різних типів, а також розроблення рекомендацій щодо їх ефективного застосування в умовах температурної нестабільності.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачається розв'язання таких

основних завдань:

- аналіз фізичних механізмів формування спектра випромінювання світлодіодів;
- дослідження впливу температури на електронні та спектральні властивості LED-пристроїв;
- узагальнення та порівняльний аналіз наукових даних щодо світлодіодів різних спектральних діапазонів (синіх, білих, червоних тощо).

Об'єктом дослідження є напівпровідникові світлодіодні джерела світла.

Предметом дослідження є зміна спектральних характеристик світлодіодів у температурному діапазоні від кімнатних до підвищених значень.

У роботі застосовуються такі методи дослідження: спектроскопічні вимірювання, температурні випробування, методи статистичного аналізу експериментальних даних, а також огляд і узагальнення сучасних наукових публікацій з обраної тематики.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ

1.1. Фізичні принципи генерації випромінювання та їх залежність від температури

Світлодіод (англ. *Light Emitting Diode*, LED) є твердотілим напівпровідниковим електронним приладом, у якому світлове випромінювання виникає внаслідок явища електролюмінесценції, тобто випромінювання світла при протіканні електричного струму. Функціональною основою світлодіода є р–п перехід, сформований двома областями напівпровідникового матеріалу, легованими домішками з різним типом електропровідності. При цьому n-область характеризується підвищеною концентрацією електронів, тоді як р-область містить надлишок дірок.

У разі прикладання до р–п переходу прямої напруги відбувається інжекція електронів з n-області в р-область, а дірок — у протилежному напрямку. У вузькій активній зоні світлодіода здійснюється рекомбінація носіїв заряду, в результаті якої відбувається випромінювання фотонів. Енергія цих фотонів є близькою до енергії забороненої зони напівпровідникового матеріалу (*bandgap*, E_g), що визначає спектральні характеристики світлодіода.

Енергія випроміненого фотона визначається:

$$E_{\text{фотона}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

де, h — стала Планка (6.626×10^{-34} Дж·с), c — швидкість світла (3×10^8 м/с), λ — довжина хвилі випромінювання.

Звідси:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (1.2)$$

Із наведеного співвідношення випливає, що збільшення ширини забороненої зони призводить до зменшення довжини хвилі випромінювання, що відповідає

короткохвильовій частині спектра (наприклад, синьому світлу). Водночас зменшення E_g зумовлює зміщення випромінювання у довгохвильову область спектра.

Ширина забороненої зони E_g є однією з ключових характеристик напівпровідникового матеріалу, оскільки саме вона визначає енергію фотонів, які випромінюються в процесі рекомбінації носіїв заряду. Для світлодіодів значення E_g безпосередньо пов'язане з довжиною хвилі випромінювання відповідно до співвідношення (1.2).

Підвищення температури призводить до зростання інтенсивності теплових коливань атомів кристалічної ґратки напівпровідника, що пов'язано з активізацією фононних процесів. Це, у свою чергу, спричиняє ослаблення ковалентних зв'язків між атомами, збільшення міжатомних відстаней та зменшення енергії, необхідної для переходу електронів з валентної зони до зони провідності. Сукупність цих факторів обумовлює зменшення ширини забороненої зони E_g зі зростанням температури.

Залежність ширини забороненої зони від температури може бути описана емпіричним рівнянням Варшні.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1.3)$$

де, $E_g(T)$ — ширина забороненої зони при температурі T , $E_g(0)$ — ширина забороненої зони при 0К, α , β — сталові параметри Варшні для даного матеріалу.

Зменшення значення E_g при нагріванні світлодіода призводить до зсуву максимуму спектра випромінювання в бік більших довжин хвиль, що проявляється у зміні кольору світіння в сторону червонішого відтінку.

Однією з ключових характеристик спектральних параметрів світлодіодного випромінювання є ширина спектра на піввисоті, або *Full Width at Half Maximum* (FWHM). Даний показник відображає ступінь спектральної чистоти та рівень монохроматичності світлового випромінювання. Чим менше значення FWHM, тим більш вираженим та стабільним є колір світла, що має особливе значення для

фотометричних вимірювань, медичних технологій, а також оптичних і комунікаційних систем, де необхідна висока точність спектральних параметрів.

FWHM визначається як різниця між двома значеннями довжини хвилі, при яких інтенсивність спектрального випромінювання становить 50 % від максимального значення.

$$FWHM = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (1.4)$$

Підвищення температури світлодіодного кристалу, як правило, супроводжується розширенням спектра випромінювання, що проявляється у збільшенні значення FWHM. Дане явище обумовлене сукупністю фізичних процесів, пов'язаних зі зміною енергетичного стану напівпровідникової структури.

Зі зростанням температури зростає енергія теплових коливань атомів кристалічної ґратки, що призводить до розширення енергетичних рівнів у зонах провідності та валентній зоні. Особливо вираженим цей ефект є в області локалізованих енергетичних станів, характерних для багатьох гетероструктурних світлодіодів. Унаслідок цього рекомбінація носіїв заряду відбувається в ширшому енергетичному діапазоні, що безпосередньо спричиняє розширення спектра випромінювання.

У значної кількості світлодіодів, зокрема на основі матеріалів InGaN та AlGaInP, присутні локалізовані енергетичні стани, зумовлені неоднорідністю складу напівпровідникового матеріалу (наприклад, флуктуаціями концентрації індію). За низьких температур випромінювання переважно формується за рахунок глибоко локалізованих станів. Однак зі зростанням температури стає можливою участь у процесі рекомбінації менш локалізованих і більш високоенергетичних рівнів, що додатково призводить до розтягування спектра, переважно в довгохвильовій області.

Високі температури також активують фононні процеси, зокрема взаємодію носіїв заряду з фононами кристалічної ґратки. Це викликає розширення енергетичного розподілу електронів, зменшення ймовірності прямої радіаційної рекомбінації та підвищення фонового рівня випромінювання в спектрі, що

сукупно сприяє збільшенню FWHM.

Для світлодіодів, що працюють без системи температурної стабілізації, залежність ширини спектра від температури часто має лінійний або квазі-лінійний характер.

$$FWHM(T) = FWHM_0 + k \cdot T \quad (1.5)$$

де, $FWHM_0$ — ширина спектру при кімнатній температурі, k — температурний коефіцієнт розширення спектру, $[nm/^\circ C]$, T — температура.

Типові значення k для InGaN-світлодіодів становлять $0.05\text{--}0.2\text{ nm/}^\circ C$.

Для синіх LED (450–470 nm) FWHM збільшується з 18 nm ($25\text{ }^\circ C$) до 24 nm ($85\text{ }^\circ C$); Для червоних AlGaInP LED FWHM зростає з 22 nm до 30–35 nm у тому ж температурному діапазоні; У випадку білих світлодіодів підвищення температури призводить не лише до розширення основного спектра випромінювання, але й до зміни співвідношення компонентів люмінофора, що додатково погіршує кольорову стабільність.

Зростання температури та відповідне збільшення ширини спектра випромінювання світлодіодів має низку негативних наслідків для їх практичного застосування. Насамперед знижується спектральна чистота світла, що проявляється у втраті кольорової насиченості. Це є критичним фактором для LED-дисплеїв, систем декоративного та архітектурного освітлення, а також для оптичних фільтраційних систем. Крім того, розширення спектра призводить до колірної нестабільності, оскільки змінюється співвідношення спектральних компонентів і спостерігається зміщення відтінку світла у теплішу або холоднішу область.

У системах світлового зв'язку, зокрема у технологіях *Visible Light Communication* (VLC), збільшення FWHM погіршує спектральне розділення каналів, що негативно впливає на швидкість та надійність передачі даних. У спектроскопічних і метрологічних застосуваннях розширення спектра призводить до зниження точності визначення пікової довжини хвилі через розмиття максимуму випромінювання. Сукупність наведених факторів суттєво обмежує використання світлодіодів у високоточних та науково-критичних системах за

відсутності ефективної температурної стабілізації.

1.2. Спектральні параметри світлодіодів як функція температури

З підвищенням температури відбувається зменшення ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу, що зумовлює зниження енергії випромінюваних фотонів і, відповідно, зміщення максимуму спектра випромінювання в область більших довжин хвиль. Дане явище відоме як температурний червоний зсув (red-shift) і є характерним для більшості світлодіодних структур.

Величина температурного зсуву пікової довжини хвилі істотно залежить від матеріалу активного шару світлодіода, а також від його кристалічної структури та технологічних особливостей виготовлення. Для різних напівпровідникових сполук температурний коефіцієнт зміщення має відмінні значення, що узагальнено та наведено в таблиці 1.1.

Одним із визначальних параметрів, які характеризують ефективність роботи світлодіода, є інтенсивність випромінювання, тобто кількість світлової енергії, що генерується пристроєм за одиницю часу. В умовах реальної експлуатації, особливо за тривалої роботи або за підвищених температур навколишнього середовища, спостерігається помітне зниження інтенсивності світлового випромінювання світлодіодів. Це явище пов'язане як із зростанням нерекombінаційних втрат у напівпровідниковій структурі, так і з погіршенням умов тепловідведення від кристалу, що в сукупності негативно впливає на світлову ефективність LED-пристроїв.

Основними причинами зменшення інтенсивності світлового випромінювання світлодіодів при підвищенні температури є комплекс термічно активованих процесів, що відбуваються в напівпровідниковій структурі.

Одним із визначальних чинників є зниження внутрішньої квантової ефективності (*Internal Quantum Efficiency*, IQE), яка характеризує частку інжектованих носіїв заряду (електронів і дірок), що беруть участь у радіаційній рекомбінації з утворенням фотонів. За умов підвищеної температури активуються нерекombінаційні механізми, зокрема безвипромінювальна рекомбінація через

дефекти кристалічної ґратки, а також рекомбінація Аугера, при якій енергія електронно-діркового переходу передається іншому носієві заряду без випромінювання світла. Крім того, спостерігається явище термічного згасання (*thermal quenching*), за якого теплова енергія гасить збуджений стан носіїв, не дозволяючи відбутися випромінюванню фотона.

Зі зростанням температури також збільшується темновий струм у р–п переході світлодіода. Це свідчить про зростання частки енергії, яка витрачається на фонові теплові процеси, а не на генерацію світла, що додатково знижує світлову віддачу пристрою. В умовах високої температури носії заряду можуть дифундувати за межі активної області, де радіаційна рекомбінація практично відсутня, що ще більше зменшує кількість корисно випромінених фотонів.

У результаті перелічених процесів інтенсивність світлового випромінювання $I(T)$ демонструє експоненційну або квазі-лінійну залежність зі зростанням температури. Експериментальні дані для типових світлодіодів на основі InGaN свідчать про зниження інтенсивності на 20–30 % при підвищенні температури від 25 °C до 85 °C. Для червоних світлодіодів на основі AlGaInP втрати можуть досягати 50 % у тому ж температурному діапазоні, тоді як для ультрафіолетових UV-A світлодіодів температурна чутливість є меншою, але стає помітною за температур вище 100 °C.

Загалом зі зростанням температури ефективність світлового випромінювання LED-пристроїв суттєво зменшується внаслідок посилення термічно активованих механізмів втрат енергії. Передусім це пов'язано зі зниженням внутрішньої квантової ефективності через активацію неметалевих центрів рекомбінації. За незмінного робочого струму це призводить до зменшення інтегральної інтенсивності випромінювання, тобто яскравості світлодіода. Для багатошарових InGaN-світлодіодів із квантовими ямами (MQW) різке падіння інтенсивності часто спостерігається вже за температур вище 50 K, що пояснюється різким зростанням нереконбінаційних процесів.

Для білих світлодіодів, конструктивно реалізованих на основі синього кристалу InGaN або GaN із фосфорним конверсійним шаром, температурний вплив має додаткову особливість. Під час нагрівання зменшується інтенсивність

синьої складової випромінювання, а її спектральний максимум зміщується в довгохвильову область. Частина енергії також витрачається на теплові коливання фосфора, що призводить до зміни співвідношення між синьою та жовтою компонентами. Унаслідок цього спостерігається зниження корельованої колірної температури (CCT), тобто світло набуває більш «теплого» відтінку.

У наукових дослідженнях зафіксовано, що за певних умов конструктивного виконання світлодіода, зокрема за ефективного тепловідведення, зміна CCT може бути незначною. Так, для системи типу «синій LED + YAG-фосфор» у деяких експериментальних роботах спостерігалось лише незначне відхилення корельованої колірної температури (близько 4650 K) протягом 60 хвилин роботи при струмі 3 А, навіть за наявності спектрального зсуву синього піку приблизно на 2 нм. Типовий приклад такої температурної стабільності наведено на рисунку 1.1, де показано, що при нагріванні синього світлодіодного випромінювача з 456 до 458 нм протягом години CCT білого світла залишається практично незмінною.

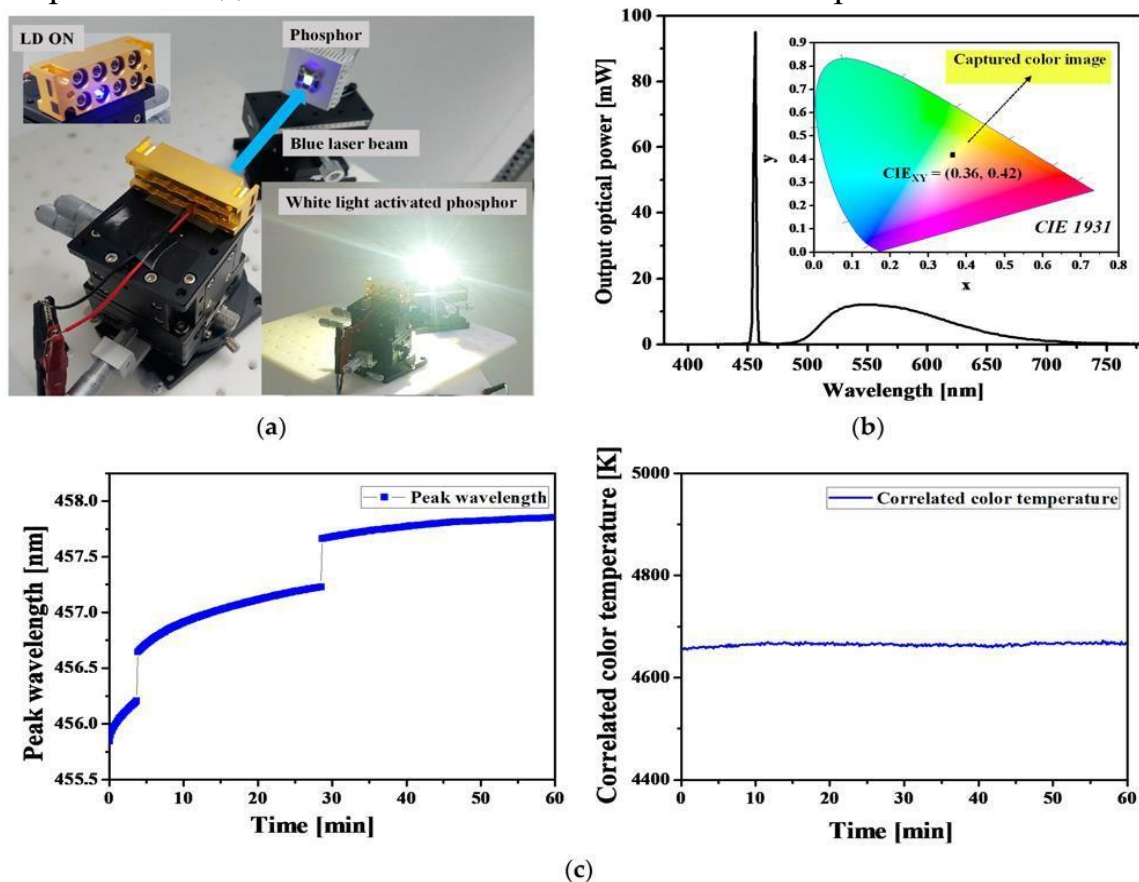


Рисунок 1.1 – Приклад експериментальних даних для білої LED-системи (синій LD + YAG-фосфор): зміна пікової λ синього LD з 455.8 до 457.8 нм за 60 хв (лівий графік) та стабільність корельованої колірної температури (4650 K, правий графік) .[29]

1.3 Особливості різних типів світлодіодів

Світлодіоди з різною довжиною хвилі випромінювання виготовляються на основі різних напівпровідникових структур, які відрізняються матеріальним складом, шириною забороненої зони, типом гетероструктури та тепловими характеристиками. Зазначені відмінності суттєво впливають на поведінку світлодіодів за умов зміни температури, зокрема на стабільність пікової довжини хвилі, величину спектральної ширини, інтенсивність випромінювання та загальну ефективність світловіддачі.

Температурна чутливість світлодіодів значною мірою визначається фізичними властивостями матеріалів активного шару та особливостями рекомбінаційних процесів у напівпровідниковій структурі. Найбільш поширеними на практиці є світлодіоди на основі гетероструктур InGaN/GaN, які використовуються для синього та зеленого спектральних діапазонів, світлодіоди на базі AlGaInP, характерні для червоного та жовтого випромінювання, а також структури GaN/AlGaIn, що застосовуються для формування ультрафіолетового випромінювання. Окрему групу становлять білі світлодіоди, у яких світловий потік формується шляхом спектральної конверсії випромінювання синього світлодіода за допомогою фосфорного шару, як показано на рисунку 1.2.

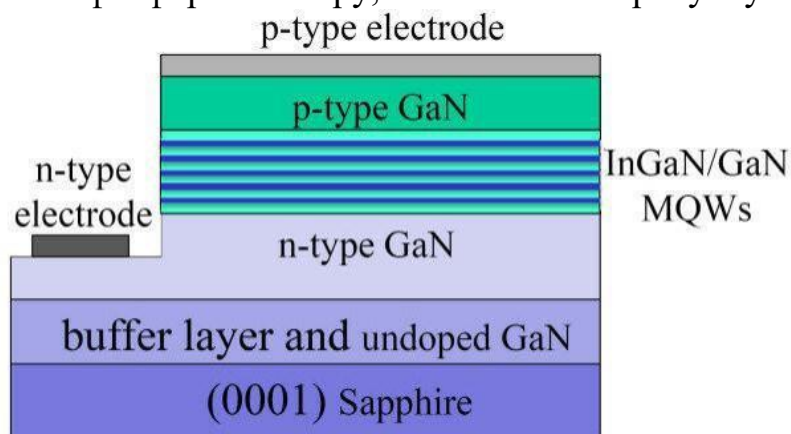


Рисунок 1.2. – Схематична структура світлодіодів InGaN/GaN MQW.[30]

Світлодіоди на основі гетероструктур InGaN/GaN широко використовуються для формування синього, зеленого, а в окремих випадках і червоного спектральних діапазонів випромінювання. Довжина хвилі світла, що генерується

такими світлодіодами, визначається концентрацією індію в активному шарі: зі збільшенням його вмісту ширина забороненої зони зменшується, що спричиняє зміщення спектра випромінювання у довгохвильову область. Світлодіоди цієї групи характеризуються порівняно високою термічною стабільністю, а температурний зсув пікової довжини хвилі зазвичай перебуває в межах 0,03–0,06 нм/°C для синього та зеленого випромінювання.

Важливою перевагою InGaN-гетероструктур є використання багат шарових квантових ям (MQW), які забезпечують ефективну локалізацію носіїв заряду в активній області та зменшують імовірність їх рекомбінації через дефектні рівні. Це дозволяє зберігати відносно високу внутрішню квантову ефективність (IQE) навіть за умов підвищеної температури, що вигідно відрізняє InGaN-світлодіоди від багатьох інших типів LED. Водночас для червоних InGaN-світлодіодів, які потребують високої концентрації індію, виникають проблеми з механічною та термічною стабільністю кристалічної ґратки, що суттєво обмежує їх ефективність та довговічність.

На відміну від InGaN, світлодіоди на основі сполук AlGaInP (алюміній-галій-індій-фосфід) застосовуються переважно для генерації червоного, оранжевого та жовтого випромінювання. Їх основною перевагою є висока світлова ефективність за кімнатної температури. Проте термічна стабільність AlGaInP-світлодіодів є значно нижчою. Температурний коефіцієнт зсуву пікової довжини хвилі для таких структур зазвичай становить близько 0,14 нм/°C, що майже вдвічі перевищує відповідні значення для InGaN-світлодіодів.

Крім того, зі зростанням температури у AlGaInP-світлодіодах різко знижується інтенсивність випромінювання внаслідок посилення нерекombінаційних процесів, зокрема рекомбінації через дефектні рівні та термічно активовані пастки. Це призводить до швидкого падіння внутрішньої квантової ефективності, особливо в умовах недостатнього тепловідведення. У зв'язку з цим світлодіоди на основі AlGaInP є ефективними переважно в системах із жорстко контрольованим тепловим режимом.

Окрему категорію становлять ультрафіолетові світлодіоди, що працюють у спектральному діапазоні 365–405 нм і базуються на напівпровідникових

структурах GaN та AlGaN. Завдяки значній ширині забороненої зони ($E_g \approx 3,4\text{--}4,1$ eV) такі світлодіоди характеризуються високою термічною стабільністю спектральних параметрів. Експериментальні дослідження свідчать, що пікова довжина хвилі UV-A світлодіодів практично не змінюється зі зростанням температури, що робить їх особливо придатними для медичних, біологічних та аналітичних застосувань. Водночас підвищення температури все ж призводить до зниження ефективності випромінювання через зменшення IQE, хоча спектральні характеристики залишаються відносно стабільними. Порівняно зі світлодіодами видимого діапазону, UV-LED мають нижчий зовнішній квантовий вихід, проте значно кращу спектральну стабільність.

Білі світлодіоди, які на сьогодні домінують у системах загального освітлення, зазвичай реалізуються у вигляді комбінації синього світлодіода на основі InGaN та фосфорного шару (наприклад, YAG:Ce), який частково перетворює синє випромінювання в жовту спектральну компоненту. Сумарне випромінювання цих складових сприймається оком як біле світло. Температурна поведінка таких систем є складною, оскільки змінам піддаються як спектральні характеристики синього світлодіода, так і ефективність люмінесценції фосфору.

Зі зростанням температури спектральний максимум синьої компоненти зміщується у довгохвильову область, а ефективність фосфорного шару зменшується внаслідок теплових втрат. У результаті спостерігається зниження корельованої колірної температури (CCT), тобто біле світло набуває більш «теплого» відтінку. У добре спроектованих світлодіодних системах із ефективним тепловим менеджментом ці зміни можуть бути незначними (менше 2 нм спектрального зсуву), тоді як у масових виробках без належної теплової компенсації часто фіксується істотний дрейф CCT.

Таким чином, спектральні характеристики світлодіодів різних типів демонструють специфічну температурну поведінку, що визначається фізичними властивостями використовуваних матеріалів, рівнем дефектності, типом гетероструктури та наявністю люмінофорних компонент. Найвищу спектральну стабільність мають ультрафіолетові світлодіоди UV-A, дещо нижчу — сині та зелені світлодіоди на основі InGaN, тоді як найменш стабільними є світлодіоди

AlGaInP. Білі світлодіоди, як складні гібридні системи, демонструють помірну спектральну стабільність, яка значною мірою залежить від конструктивного виконання та ефективності тепловідведення. Вибір типу світлодіода для конкретного застосування повинен враховувати зазначені особливості, особливо у випадках, коли стабільність спектра, кольору або інтенсивності випромінювання є критично важливою.

1.4 Практичне значення температурної стабільності характеристик світлодіодів

Світлодіоди є базовими елементами сучасних світлотехнічних систем і дедалі активніше застосовуються в галузях, де до джерел випромінювання висуваються підвищені вимоги щодо стабільності та відтворюваності параметрів. Одним із визначальних чинників, що впливає на якість та надійність роботи світлодіодних систем, є температурна стабільність їх спектральних характеристик. Під цим поняттям розуміють здатність світлодіода зберігати незмінними пікову довжину хвилі випромінювання, ширину спектра на піввисоті (FWHM), а також інтенсивність світлового потоку за умов зміни температури кристала або навколишнього середовища. У багатьох практичних застосуваннях саме ці параметри безпосередньо визначають точність, достовірність і ефективність функціонування всієї системи.

Однією з найбільш критичних сфер щодо температурної стабільності світлодіодів є медична візуалізація. Світлодіодні джерела світла широко використовуються в медичних освітлювальних приладах, ендоскопічних системах, установках для фототерапії новонароджених, хірургічному освітленні, а також у спектроскопічних діагностичних системах для аналізу шкіри, тканин і крові. У дерматологічній діагностиці або при виявленні новоутворень навіть незначна зміна спектра випромінювання може призвести до зниження контрастності зображення або до спотворення передачі кольору біологічних тканин. Температурно зумовлений зсув спектра, що супроводжується зміною корельованої колірної температури (CCT), може впливати як на суб'єктивну візуальну оцінку лікаря, так і на чутливість вимірювальних приладів у заданому

спектральному діапазоні.

Особливо жорсткі вимоги до стабільності спектра висуваються у фототерапії неонатальної жовтяниці, де лікувальний ефект досягається випромінюванням у вузькому діапазоні довжин хвиль поблизу 460 нм. Зміщення пікової довжини хвилі внаслідок нагрівання світлодіода може зменшити ефективність фотохімічних процесів і, відповідно, знизити терапевтичний ефект, що робить контроль температурного режиму світлодіодного джерела принципово важливим.

Не менш значущою є температурна стабільність світлодіодів у сфері прецизійного наукового освітлення, зокрема в оптичній мікроскопії (особливо флуоресцентній), спектроскопії, системах аналізу зображень і фотометричних вимірюваннях. У флуоресцентній мікроскопії збудження люмінофорів відбувається у вузькому спектральному діапазоні, тому навіть незначне зміщення довжини хвилі світлодіодного випромінювання може призвести до неповного збудження флуоресцентних міток, зниження інтенсивності сигналу або появи помилок у спектральному аналізі.

У багатоканальних освітлювальних системах, що використовують кілька світлодіодів різного спектрального діапазону (наприклад, RGB або комбінації видимого та ультрафіолетового випромінювання), нестабільність характеристик одного з каналів порушує баланс освітлення та ускладнює коректну інтерпретацію кольорової інформації. Це особливо критично для кількісного аналізу зображень, де результати залежать від стабільності та повторюваності спектральних параметрів джерела світла.

Крім того, у фотометричних та калібрувальних установках світлодіодні джерела повинні забезпечувати стабільний спектр випромінювання протягом тривалого часу. Температурні коливання, що спричиняють зміну спектральних характеристик LED, можуть призвести до систематичних похибок вимірювань і зниження відтворюваності результатів, що є неприпустимим у метрологічних застосуваннях (рис. 1.3).

Отже, температурна стабільність спектральних і енергетичних характеристик світлодіодів має ключове практичне значення для широкого кола застосувань — від медицини та наукових досліджень до високоточних вимірювальних систем.

Забезпечення стабільної роботи LED за різних теплових умов вимагає не лише правильного вибору типу світлодіода, але й ефективного теплового менеджменту, оптимальної конструкції корпусу та застосування методів температурної компенсації. Саме ці аспекти визначають надійність, точність і довговічність сучасних світлодіодних систем.

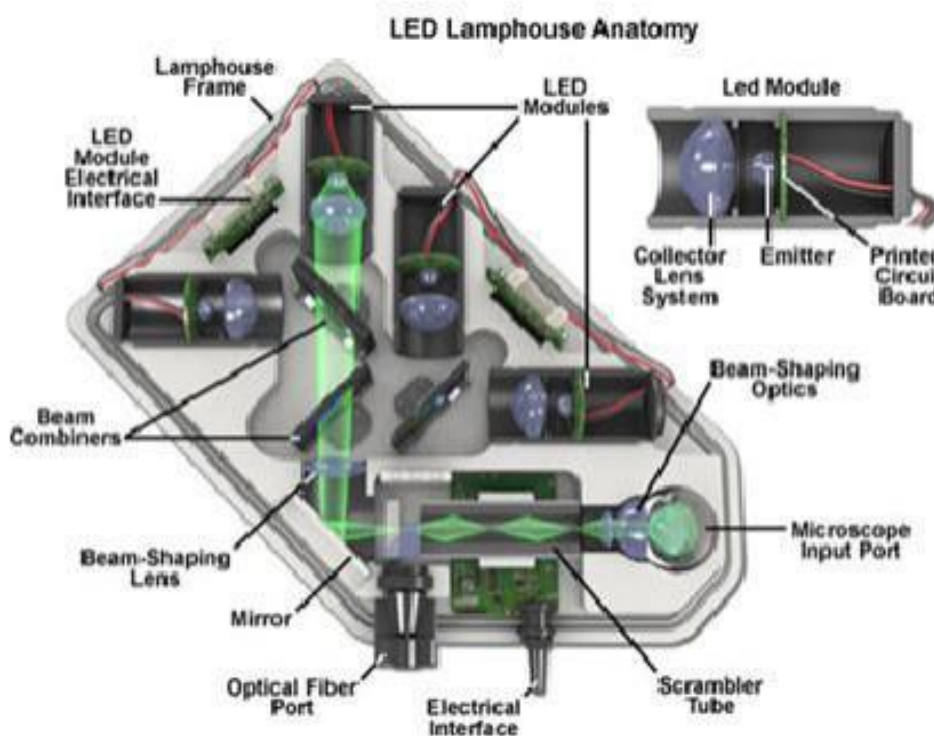


Рисунок 1.3 – Модульний LED-корпус Colibri для мікроскопії. Освітлювач містить змінні світлодіодні модулі для збудження флуорофорів у всьому спектрі, забезпечуючи високий контраст і широкий динамічний діапазон.[27]

У агропромисловості світлодіоди активно застосовуються для керованого фотосинтетичного освітлення у теплицях та вертикальних фермах (рис. 1.4). Рослини мають високу спектральну чутливість у вузьких діапазонах — зокрема, до червоного світла (~ 660 нм) і синього (~ 450 нм). Будь-яке зміщення пікової довжини хвилі, спричинене нагріванням LED, може знизити ефективність фотосинтезу, що безпосередньо впливає на ріст рослин, врожайність і якість продукції. Крім того, зменшення інтенсивності випромінювання внаслідок

підвищення температури призводить до необхідності збільшувати тривалість підсвічування або підвищувати енергоспоживання, що економічно не вигідно.

У сфері музейного освітлення та збереження культурної спадщини стабільність спектра світлодіодів є ключовим фактором для точності передачі кольору експонатів та мінімізації негативного впливу світла на чутливі матеріали. Температурні зміни, що спричиняють зсув спектра, можуть змінити відтінок освітлення та збільшити ризик фотохімічних ушкоджень, особливо при використанні UV-фільтрів або LED з обмеженим ультрафіолетовим випромінюванням.

В аерокосмічних системах, автомобільній електроніці та військових оптоелектронних приладах, де світлодіоди працюють у широкому діапазоні температур, спектральна стабільність визначає точність візуалізації, орієнтації та передачі світлових сигналів. Наприклад, у інфрачервоних LED-датчиках та системах нічного бачення зміни температури безпосередньо впливають на ефективність сприйняття та передачі сигналу. У таких умовах критично важлива автоматизована температурна компенсація, а самі світлодіоди повинні виготовлятися з максимально термостабільних матеріалів.

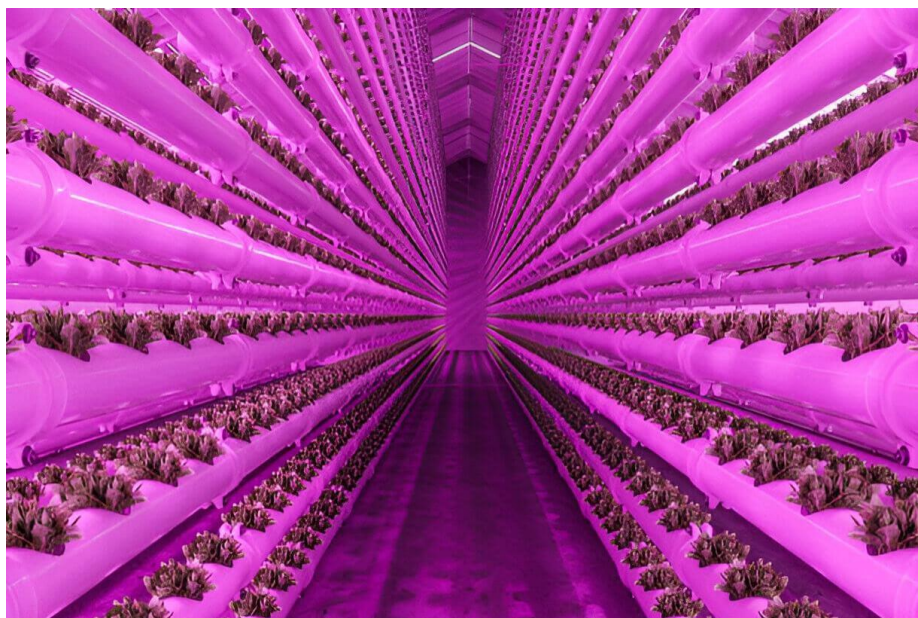


Рисунок 1.4 – Типова система спектроскопії, яка складається з джерела світла, оптичного волокна, спектографа та детектора.[31]

Також особливе значення має стабільність спектрального профілю у системах видимого світлового зв'язку (VLC, Visible Light Communication), які використовують швидку модуляцію світлового потоку LED (рис. 1.5). Нестабільність спектра може призводити до перехрещення каналів у багатоканальних конфігураціях, наприклад при застосуванні WDM (wavelength division multiplexing), що негативно впливає на швидкість передачі даних, точність декодування та загальну ефективність комунікації.

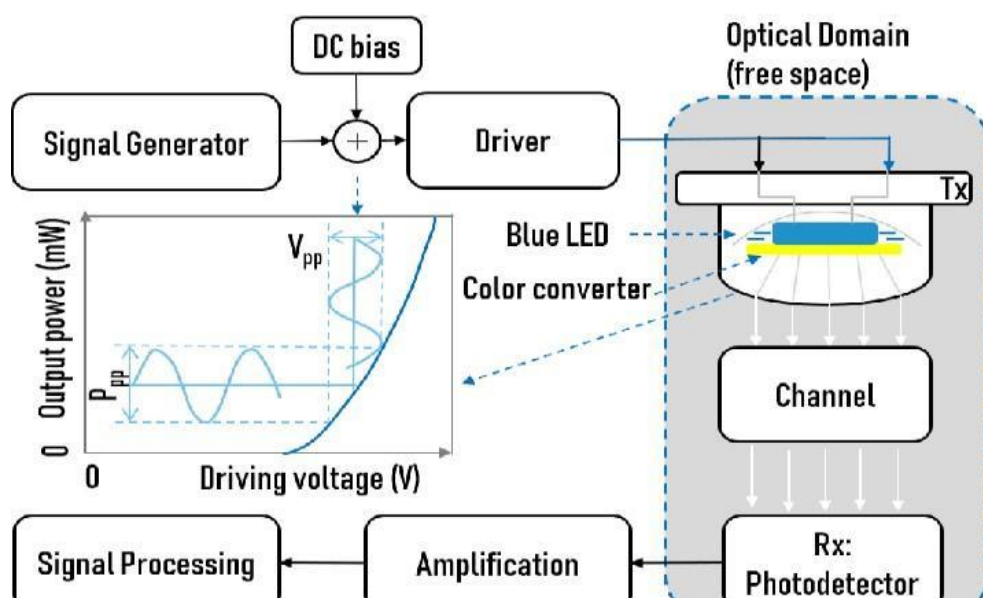


Рисунок 1.5 – Схема системи видимого світлового зв'язку (VLC).

Зображення демонструє принцип роботи VLC-системи, де зміна спектра світлодіода через температуру може спричинити інтерференцію між каналами та зниження швидкості передачі даних.[32]

У професійній фотографії, телебаченні та спеціалізованих системах візуалізації (наприклад, у кіно, телестудіях або наукових зйомках) навіть незначне зміщення корельованої колірної температури (CCT) потребує постійної калібровки обладнання, що ускладнює робочий процес. У побутових пристроях автоматичний баланс білого (AWB) може частково компенсувати зміни спектра, проте в умовах наукових або документальних зйомок точність передачі кольору є критичною. Особливо це стосується освітлювальних панелей для макрозйомки, спектрального фільтраційного аналізу та спостережень змінного спектра у таких

галузях, як астрономія або біологія.

З огляду на вищевказане, можна стверджувати, що температурна стабільність світлодіодів є не лише теоретичною характеристикою, а й практичною вимогою для багатьох сфер, що базуються на оптоелектронних технологіях. Саме тому сучасні LED-системи часто оснащуються активними або пасивними системами термостабілізації, вбудованими сенсорами температури, регуляторами струму та іншими засобами компенсації. Вибір конкретного методу стабілізації залежить від необхідного рівня точності, температурного діапазону роботи, вартості та призначення системи.

Таким чином, проведений аналіз спектральної стабільності світлодіодів є ключовим етапом при їх застосуванні у високоточних, наукових, медичних, промислових і комунікаційних системах. Цей аналіз дозволяє не лише мінімізувати похибки, а й сформулювати технічні вимоги до терморегуляторів, систем контролю та відбору світлодіодів, оптимізуючи проєктування сучасних освітлювальних приладів та технологій нового покоління.

Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено комплексне дослідження фізичних основ генерації випромінювання світлодіодів та впливу температури на їх спектральні характеристики. Було встановлено, що основним фактором, який визначає пікову довжину хвилі випромінювання LED, є ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу. З підвищенням температури ширина забороненої зони зменшується, що спричиняє температурний червоний зсув (red-shift) пікової довжини хвилі.

Показано, що температура істотно впливає також на ширину спектра (FWHM) і інтенсивність випромінювання. Зі збільшенням температури спостерігається розширення спектра, спричинене термодинамічними процесами у зонній структурі матеріалу та активацією вищих локалізованих енергетичних станів. Інтенсивність світлового потоку зменшується через зростання частки нерепродуктивних рекомбінацій, ефект Аугера та теплове згасання збуджених станів.

Був проведений порівняльний огляд світлодіодів на основі різних матеріалів

(InGaN, AlGaInP, GaN, AlGaInP), що продемонстрував: найвищу спектральну стабільність мають ультрафіолетові LED, сині та зелені InGaN-світлодіоди демонструють добру стабільність, тоді як червоні AlGaInP є найбільш чутливими до температурних змін. Білий світлодіод із люмінофорним покриттям показує помірну стабільність, оскільки температура впливає як на синю складову, так і на ефективність фосфорного шару.

Отримані результати дозволяють сформулювати основні фізичні закономірності впливу температури на спектральні характеристики світлодіодів, що є необхідними для правильного вибору типу LED та оптимального проектування оптоелектронних систем, які працюють в умовах змінної температури.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЗАЛЕЖНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ

2.1 Методологія та засоби дослідження характеристик світлодіодів

Для вивчення спектральних характеристик світлодіодів при різних температурах застосовують методи оптичної спектроскопії. Класична вимірювальна система складається з джерела світла (у даному випадку світлодіода), оптичного входу (наприклад, щілини або оптичного волокна), дисперсійного елемента (дифракційної ґратки) та детектора з матрицею (зазвичай CCD або CMOS), як показано на рисунку 2.1.[13]

Світловий потік від LED через коліматор або інтегруючу сферу надходить у спектрограф, де ґратка розкладає випромінювання за довжиною хвилі. На фокальній площині спектрографа встановлений CCD-детектор, який фіксує інтенсивність світлового потоку як функцію довжини хвилі. Використання мультипиксельних матриць дозволяє швидко зчитувати спектр без механічного переміщення ґратки. Оптичні волокна забезпечують зручне перенесення світла від досліджуваного приладу до спектрометра.

Для оцінки температурної залежності спектра світлодіода необхідний термостат (кріостат або термоелемент типу Пельтьє), який підтримує задану температуру приладу та стабільність теплового режиму.

Основними компонентами установки є спектрометр із чутливою матрицею, система підтримки температури світлодіода та джерело стабілізованого струму. Зокрема, застосовують:

- **Спектрометр** – портативний або лабораторний спектрограф з CCD- або CMOS-детектором, який охоплює діапазон довжин хвиль досліджуваного світлодіода (наприклад, 350–900 нм). Важливими характеристиками є спектральна роздільна здатність (приблизно 0.1–1 нм) та можливість вибору часу інтеграції (від мілісекунд до секунд). Деякі системи передбачають автоматичну компенсацію темного сигналу матриці (dark-spectrum correction).
- **Система температурного контролю** – термокамера або міні-

кріостат із охолодженням/обігрівом на основі Peltier-елемента. Приклади пристроїв: пелтьєр-кріостат із температурним діапазоном приблизно від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ або рідкоазотний кріостат із діапазоном до $-150\dots+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температуру біля світлодіода контролюють термopарою або іншим датчиком, забезпечуючи стабільність та автоматичний моніторинг.[14]

Джерело живлення – стабілізоване джерело струму (Source Measure Unit, SMU). Для проведення точних експериментальних вимірювань застосовують спеціалізовані електропостачальні модулі, які працюють у режимі постійного струму (CC). У цьому режимі пристрій підтримує заданий струм світлодіода за різних навантажень, що забезпечує стабільність випромінювання. Наприклад, SMU здатен подавати струм від мікроампер до десятків міліампер при напрузі до 20 В, що покриває більшість стандартних LED.

Інтегруюча сфера використовується для вимірювання сумарного світлового потоку світлодіода. Вона дозволяє збирати випромінювання у всі напрямки і подавати його у спектрометр. Проте для дослідження температурної залежності часто достатньо вимірювати спектр безпосередньо від LED.

Також до складу установки входять комп'ютер із програмним забезпеченням для збору спектральних даних, оптичні фільтри (щоб уникнути насичення детектора), кабелі, термоблоки для надійного кріплення зразка та інші допоміжні елементи.

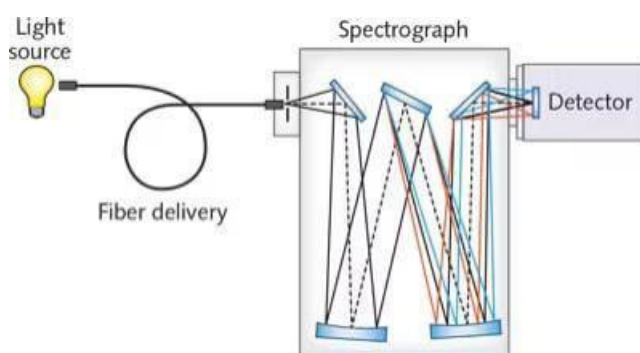


Рисунок 2.1 – Типова система спектроскопії, яка складається з джерела світла, оптичного волокна, спектографа та детектора.[32]

Алгоритм експериментальної процедури для спектроскопічних вимірювань зазвичай включає такі етапи:

1. **Підготовка установки.** Світлодіод фіксують у тримачі або

розташовують у термокамері/кріостаті.[15] Підключають стабілізоване джерело струму та спектрометр. Якщо застосовується інтегруюча сфера, світлодіод розміщують на її вході, а випромінювання через оптичне волокно подають на спектрометр, що забезпечує більш стабільні вимірювання інтенсивності.

2. Калібрування приладів. Перед початком експерименту спектрометр проходить калібрування. Зокрема, перевіряють та налаштовують відповідність довжин хвиль за допомогою еталонних спектрів (наприклад, ртутної або неонові лампи), які мають відомі лінії випромінювання по всьому спектру. Це дозволяє точно прив'язати пікселі CCD-матриці до довжин хвиль.[25] Інтенсивну калібрування проводять за допомогою сертифікованої лампи (зазвичай волфрамової), спектр якої відомий та підтверджений NMI/NIST.[8] Така процедура забезпечує корекцію чутливості по всьому спектру та дозволяє вимірювати відносні або наближені до абсолютних значення інтенсивності. Також на цьому етапі визначають і фіксують темновий спектр (при відсутності випромінювання) для подальшого віднімання від виміряного сигналу.

3. Установка параметрів вимірювання. Через світлодіод подають стабілізований струм (з SMU) і очікують стабілізації джонту, щоб температура пристрою вирівнялася.[24] Одночасно в термостабілізаторі задають початкову температуру (наприклад, мінімальну або необхідну для тестування). Після цього дають час на досягнення теплової рівноваги між світлодіодом та навколишнім середовищем.

Збір спектральних даних. На кожній встановленій температурі проводять вимірювання спектра випромінювання світлодіода.[16] Для підвищення точності отримують кілька послідовних спектрограм і усереднюють їх, одночасно віднімаючи темновий сигнал. Час інтеграції детектора підбирають так, щоб уникнути насичення матриці — пікова інтенсивність має залишатися нижче порогу детектора. Всі спектри зберігають разом із зазначенням температурних умов і струму, поданого на діод.

Після завершення вимірювань при одній температурі змінюють температуру на наступну, підвищуючи або знижуючи її з фіксованим кроком (наприклад, 5–10 °C). Після стабілізації нового теплового режиму повторюють зйомку

спектрів.[17] Таким чином формують серію даних при різних температурах у заданому діапазоні.

Обробка спектрів включає витяг ключових характеристик. Пікову довжину хвилі λ_{peak} визначають за максимумом інтенсивності спектра, використовуючи або безпосередній пошук пікової точки, або аппроксимацію форми піка (наприклад, гаусівське чи лоренцівське наближення) для підвищення точності.

Ширину спектра (FWHM) визначають як різницю довжин хвиль між точками, де інтенсивність дорівнює половині піка. Якщо спектр складний за формою, його можна аппроксимувати функцією і обчислити FWHM з цієї аппроксимації. Інтенсивність оцінюють або як інтеграл під спектральною кривою (радіантний потік у вибраному діапазоні), або як висоту пікового максимуму. Вимірювання за інтегралом більш стабільне щодо шуму, проте для деяких аналізів зручно розглядати саме пікову інтенсивність.[23]

Далі на основі зібраних даних будують графіки залежностей $\lambda_{peak}(T)$, FWHM(T) та I(T). Зазвичай криву $\lambda_{peak}(T)$ апроксимують лінійною залежністю у робочому температурному діапазоні, хоча фізично пікова довжина хвилі визначається рівнянням Варшні для ширини забороненої зони і може змінюватися нелінійно при великому діапазоні температур. Зі збільшенням температури λ_{peak} зростає, що відповідає ефекту червоного зсуву.[18]

Подібно, FWHM(T) можна апроксимувати лінією або поліномом, оскільки ширина спектра зазвичай незначно збільшується з підвищенням температури через термодинамічне розширення спектрального розподілу. Залежність I(T) часто описується експоненційною або логарифмічною функцією: зі зростанням температури інтенсивність випромінювання значно падає через зменшення радіаційної ефективності світлодіода.

Отримані значення температурних коефіцієнтів, наприклад нахил λ_{peak} у нм/°C, порівнюють із літературними даними та використовують для подальшого моделювання характеристик світлодіодів.

Під час математичної обробки даних спектрів слід коригувати криві на фоновий рівень, компенсувати можливі зсуви через неточний нуль спектрометра та усереднювати результати кількох вимірювань для зменшення випадкових

похибок. За необхідності застосовують фільтрування шуму або поліноміальне згладжування спектрів.[22]

Основними джерелами похибок є:

- **Помилки термодатчика та нерівномірність прогріву світлодіода.** Вони призводять до невизначеності у визначенні фактичної температури кристала. Для зменшення цієї похибки забезпечують щільний тепловий контакт діода з термостатом і використовують калібровані термопари.

- **Похибки струму живлення (дрейф джерела).** Нестабільний струм може спотворювати порівняння спектрів при різних температурах.[19] Рекомендується контролювати струм через високоомні резистори або вбудовані датчики SMU.

- **Оптичні похибки.** До них належать спотворення форми спектра через недосконалості оптичної системи (розсіяння другого порядку, шум CCD-матриці, нестабільність інтеграції). Зокрема, темновий струм детектора, що змінюється з часом і температурою, слід віднімати (dark-current subtraction).[20] Також варто враховувати пропускну здатність щілини та розсіяння в ґратці, яке може збільшувати виміряну FWHM.

Якість вимірювань критично залежить від калібрування приладів: спектрометр періодично перевіряють за еталонними джерелами газового розряду (Hg, He, Ne) з відомими спектральними лініями. Для калібрування інтенсивної характеристики застосовують еталонні лампи, наприклад кварцові галогенові, сертифіковані НМІ за радіометричним спектром.[21] Це дозволяє отримати коефіцієнт корекції чутливості приладу як функцію довжини хвилі. Також виконують темнове калібрування – вимір фонового сигналу з відключеним LED.

- **Сигнальна обробка.** Похибки можуть виникати через дискретизацію даних (кількість біт АЦП), усереднення спектрів, інтерполяцію. Для зменшення флуктуацій прийнято накопичувати кілька спектрів і брати середнє. При аналізі FWHM важливо враховувати спектральну роздільну здатність приладу: якщо FWHM спектра близька до апаратної роздільної здатності, точність виміру знижується.

Загалом, для отримання достовірних залежностей $\lambda(T)$, $I(T)$ і $FWHM(T)$

необхідно суворо дотримуватися калібрувальних процедур і контролювати стабільність усіх складових установки. Такий підхід мінімізує систематичні помилки та дозволяє коректно інтерпретувати температурну поведінку спектральних характеристик світлодіодів.

Окрім спектроскопічних вимірювань окремих світлодіодних елементів, у межах даної роботи було проведено експериментальні дослідження світлотехнічних та електричних характеристик серійних світлодіодних ламп при різних умовах живлення та температури навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє оцінити температурний вплив не лише на окремий LED-кристал, але й на завершений світлотехнічний виріб з урахуванням драйвера, тепловідведення та конструктивних особливостей корпусу.

Дослідження проводилися при двох значеннях температури навколишнього середовища — 7°C та 16°C , що відповідає типовим умовам експлуатації освітлювальних приладів у неопалюваних або частково опалюваних приміщеннях (склади, сходові клітки, підвальні приміщення), а також у житлових приміщеннях у перехідні сезони року. Обрані температури дозволяють проаналізувати вплив навіть відносно невеликої зміни температури на параметри світлодіодних ламп, що є актуальним з практичної точки зору.

Живлення ламп здійснювалося змінною напругою в діапазоні 200–250 В. Вибір цього інтервалу обумовлений нормативними вимогами до електричних мереж змінного струму. Згідно з діючими стандартами, допустиме відхилення напруги у побутових електромережах становить $\pm 10\%$ від номінального значення 220 В, що відповідає інтервалу приблизно 198–242 В. Розширення діапазону до 250 В дозволяє додатково оцінити роботу ламп у граничних режимах та перевірити стабільність їх характеристик при підвищеній напрузі.

Під час експерименту для кожної температури та кожного значення напруги вимірювалися наступні параметри:

- освітленість E , лк;
- коефіцієнт пульсації світлового потоку K_p , %;
- сила струму споживання I , А;
- повна споживана потужність P , Вт;

- світлова віддача η , лм/Вт.

Вимірювання проводилися після встановлення сталого теплового режиму лампи, що дозволяло мінімізувати вплив перехідних процесів. Отримані експериментальні дані використовувалися для подальшого аналізу залежностей світлотехнічних і електричних характеристик від напруги живлення та температури навколишнього середовища.

2.2 Математична обробка результатів

Математична обробка результатів експерименту виконувалася на основі даних, отриманих під час вимірювання світлотехнічних та електричних характеристик світлодіодних ламп при різних значеннях температури та напруги живлення. Основною метою обробки було виявлення закономірностей зміни параметрів освітлення та енергоспоживання в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Для кожної температури (7 °C та 16 °C) будувалися залежності освітленості, коефіцієнта пульсації, струму та повної потужності від прикладеної напруги в діапазоні 200–250 В. Це дозволило оцінити стабільність роботи драйвера лампи, а також чутливість світлових характеристик до коливань напруги живлення.

Світлова віддача лампи визначалася як відношення світлового потоку до споживаної потужності. У разі, якщо світловий потік визначався через освітленість, використовувалося співвідношення, що враховує геометрію вимірювання та відстань до джерела світла (формула залишається без змін і наведена нижче у підрозділі).

При дослідженні впливу температури на характеристики світлодіодів важливо не лише візуально оцінювати спектри, але й застосовувати кількісні методи аналізу. Це дозволяє отримати точні дані про поведінку джерела випромінювання при різних температурних умовах та формалізувати зміни у вигляді математичних моделей. На відміну від загального опису спектральних параметрів у попередньому розділі, тут представлено систематизований підхід до цифрової обробки експериментальних спектрів.

Цифровий аналіз передбачає роботу з масивами спектральних даних за

допомогою алгоритмів визначення ключових точок, згладжування та оцінки похибок. Кожен спектр подається у вигляді масиву точок $\{(\lambda_i, I_i)$, де λ_i — довжина хвилі, а I_i — відповідна інтенсивність.

Для визначення пікової довжини хвилі використовується пошук глобального максимуму:

$$\lambda_{peak} = \lambda_j, \text{ де } I_j = \max(I_i) \quad (2.1)$$

Обчислення ширини спектра проводиться за допомогою інтерполяційних методів для визначення точок, де інтенсивність знижується до 50% від максимуму:

$$FWHM = \lambda_2 - \lambda_1, I(\lambda_{1,2}) = 0.5 \cdot I_{peak} \quad (2.2)$$

Також аналізується симетричність спектра за допомогою асиметричного коефіцієнта:

де λ_{left} і λ_{right} — положення половинної інтенсивності зліва і справа від піка відповідно.

Для зниження впливу шумів та об'єктивного порівняння кривих випромінювання застосовуються математичні моделі. Найчастіше використовуються гаусівська, логарифмічно-нормальна та функція Voigt.

Гаусівська модель:

$$I(\lambda) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.4)$$

де λ_0 — пікова довжина хвилі, σ — параметр, пов'язаний з шириною:

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2} \cdot \sigma. \quad (2.5)$$

Логнормальна модель:

$$I(\lambda) = I_0 \cdot \exp\left[\frac{-(\ln(\lambda) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2.6)$$

де μ і σ — параметри логарифмічного нормального розподілу.

Функція Voigt:

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\lambda')L(\lambda - \lambda')d\lambda' \quad (2.7)$$

де G — гаусівська, L — лоренцівська функції. Voigt-функція найточніше описує спектри, що мають складні профілі з комбінованими механізмами розширення.

Вибір функції апроксимації здійснюється за критерієм найменшої квадратичної помилки або коефіцієнтом детермінації R^2 .

Температура впливає на спектральні характеристики через зміну ширини забороненої зони E_g в матеріалі світлодіода. Цей ефект описується рівнянням Варшні:

$$Eg(T) = Eg(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.8)$$

Оскільки довжина хвилі обернено пропорційна енергії кванта, положення спектрального піка також змінюється.

Для практичного аналізу використовується температурний коефіцієнт зміни довжини хвилі:

$$kT = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T}, [\frac{\text{нм}}{^\circ\text{C}}] \quad (2.9)$$

Цей параметр є основним критерієм температурної стабільності джерела світла.

Хемометрія поєднує математичні та статистичні підходи для обробки багатовимірних спектральних даних. Один з найефективніших методів — аналіз головних компонент (PCA). Він дозволяє зменшити розмірність спектральних даних і виділити головні осі варіації:

$$T = X \cdot P^T + E \quad (2.10)$$

де X — матриця спектрів, P — навантаження, T — координати у просторі головних компонент, E — залишки.

Ще одним методом є часткові найменші квадрати (PLS), який дозволяє встановлювати залежність між спектральними характеристиками та змінним параметром, наприклад температурою.

Метод 2D-COS використовується для аналізу динамічних змін спектрів під дією зовнішніх факторів. Він розділяє варіації на синхронні та асинхронні компоненти, що дає змогу визначити, які спектральні ділянки реагують одночасно, а які — із затримкою. Цей підхід широко застосовується для глибокого вивчення температурної поведінки світлодіодних спектрів.

Розрахунок похибок проводиться для кожного параметра окремо. Для пікової довжини хвилі та інтенсивності враховуються як апаратні похибки, так і похибки цифрової апроксимації. Типові значення: $\pm 0,5$ нм для λ_{peak} і $\pm 3\%$ для I_{max} .

Також визначаються інтервали довіри для залежностей $\lambda(T)$, $I(T)$ і $\text{FWHM}(T)$, що дозволяє порівнювати результати різних серій експериментів.

Цифрова обробка спектральних характеристик створює основу для вибору світлодіодів із високою термостабільністю, калібрування систем стабілізації та проектування оптичних пристроїв із жорсткими вимогами до довжини хвилі. На відміну від описових розділів, цей підхід забезпечує кількісний аналіз та слугує відправною точкою для подальшої інженерної оптимізації.

2.3 Експериментальне дослідження характеристик



Рисунок 2.2 - Загальний вигляд лабораторного стану



Рисунок 2.3 - Досліджувані джерела світла



Рисунок 2.4 Вимірювальна апаратура

Аналіз по кожній лампі

1. Light Master 11W

Таблиця 2.1 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Light master 11W при $T = 7,4$

U, V	F, Lx (T= 7,4)	P, %		I, A	P, W	S, Lx/W
200	234	0,8		0,095	19	12,31579
210	221	1,1		0,0925	19,425	11,37709
220	214	0,9		0,0925	20,35	10,51597
230	214	1,2		0,09	20,7	10,33816
240	210	0,9		0,0875	21	10
250	202	1		0,0825	20,625	9,793939

Таблиця 2.2 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Light master 11W при $T = 16,2$

U, V	F, Lx (T= 16,2)	P, %		I, A	P, W	S, Lx/W
200	202	1,2		0,095	19	10,63158
210	202	1,2		0,0925	19,425	10,39897
220	193	1		0,09	19,8	9,747475
230	193	1,3		0,09	20,7	9,323671
240	193	1		0,0875	21	9,190476
250	193	1,1		0,0875	21,875	8,822857

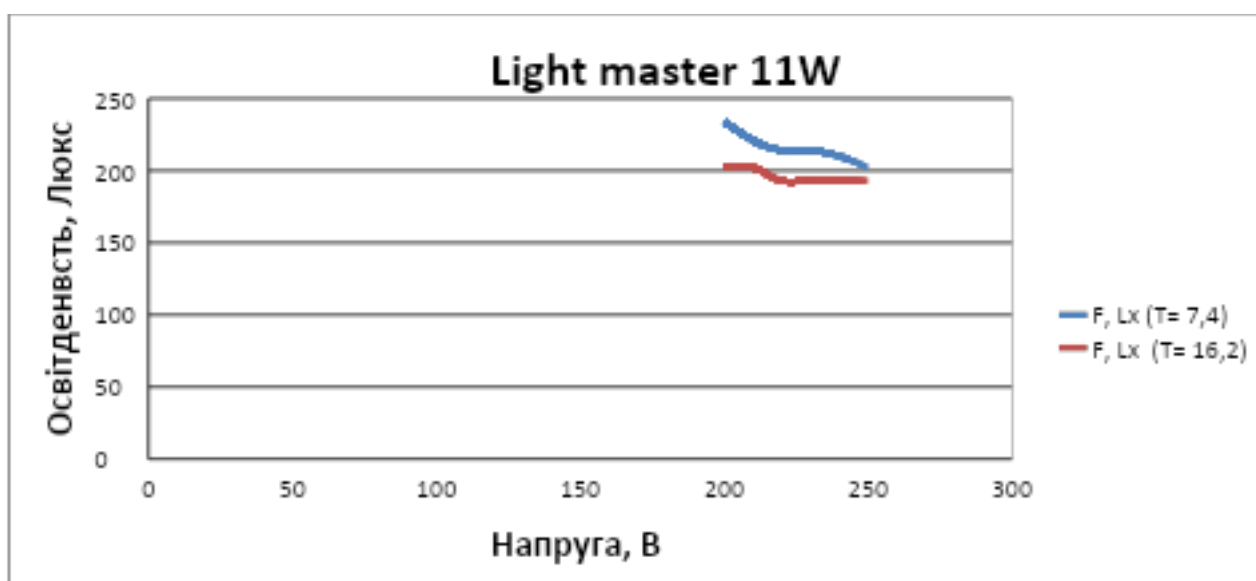


Рисунок 2.5 - Залежність освітленості при різних температурах від напруги для Light master 11W

Light Master 11W

- Вплив температури: Лампа демонструє значну залежність від температури. При низькій температурі ($T=7.4^{\circ}\text{C}$) максимальна освітленість становить 234 Lx. При підвищенні температури до $T=16.2^{\circ}\text{C}$, максимальна освітленість падає до 202 Lx. Це падіння яскравості на $\sim 13.6\%$.
- Вплив напруги: Зі збільшенням напруги (U) від 200В до 250В спостерігається парадоксальне падіння освітленості (з 234 до 202 Lx при низькій температурі).
- Ефективність (S): Ефективність різко падає зі зростанням напруги. Найкращий показник — 12.3 Lx/W при 200В.

2. Horoz 10W

Таблиця 2.3 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Horoz 10W при $T = 8.3$

U, V	F, Lx ($T=8.3$)	P, %		I, A	P, Wt	S, Lx/Wt
200	245	1		0,0875	17,5	14
210	245	1		0,085	17,85	13,72549
220	238	1,1		0,0825	18,15	13,11295
230	234	0,75		0,0825	18,975	12,33202
240	234	1		0,0825	19,8	11,81818
250	234	0,7		0,08	20	11,7

Таблиця 2.4 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Horoz 10W при $T = 16.2$

U, V	F, Lx ($T=16.2$)	P, %		I, A	P, W	S, Lx/W
200	224	0,87		0,0875	17,5	12,8
210	224	0,8		0,085	17,85	12,54902
220	211	1		0,0825	18,15	11,62534
230	211	1,24		0,0825	18,975	11,11989
240	211	1,1		0,08	19,2	10,98958
250	203	0,9		0,08	20	10,15

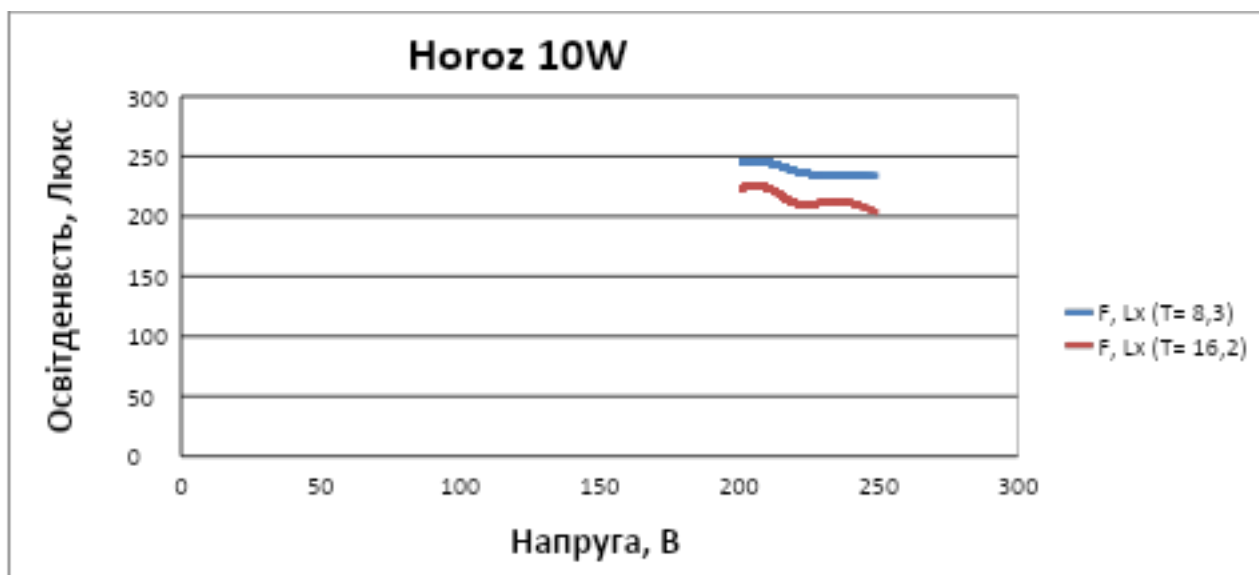


Рисунок 2.6 - Залежність освітленості при різних температурах від напруги для Horoz 10W

Horoz 10W

- Вплив температури: Лампа дуже чутлива до нагріву. При $T=8.3^{\circ}\text{C}$ потік досягає 245 Lx, а при $T=16.2^{\circ}\text{C}$ знижується до 224 Lx.
- Вплив напруги: Аналогічно попередній, при зростанні напруги з 200В до 250В освітленість зменшується (з 245 до 234 Lx при низькій T).
- Ефективність (S): Лампа показує високу ефективність, досягаючи 14 Lx/W при 200В, що є одним із найкращих результатів серед протестованих зразків⁸.

3. Maxus 10W

Таблиця 2.5 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Maxus 10W при $T= 8.3$

U, V	F, Lx (T= 3,3)	P, %		I, A	P, Wt	S, Lx/Wt
200	248	0,8		0,075	15	16,53333
210	235	0,8		0,075	15,75	14,92063
220	228	1		0,0725	15,95	14,29467
230	224	1,3		0,0725	16,67	13,43328
240	224	1,2		0,07	16,8	13,33333
250	224	1,1		0,07	17,5	12,8

Таблиця 2.6 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Maxus 10W при $T= 16.2$

U, V	F, Lx (T= 16,2)	P, %		I, A	P, W	S, Lx/W
------	-----------------	------	--	------	------	---------

200	214	1,2		0,0775	15,5	13,80645
210	214	1,1		0,075	15,75	13,5873
220	214	1,3		0,0725	15,95	13,41693
230	206	0,8		0,0725	16,675	12,35382
240	206	1,2		0,07	16,8	12,2619
250	202	1,3		0,07	17,5	11,54286

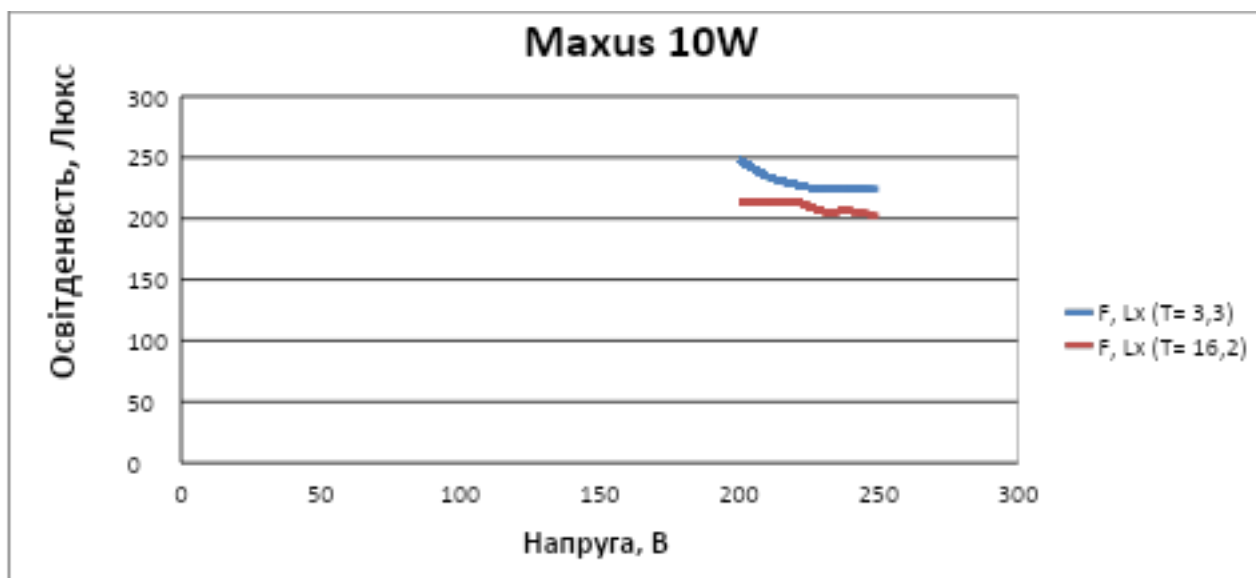


Рисунок 2.7 - Залежність освітленості при різних температурах від напруги для Maxus 10W

Maxus 10W

- Вплив температури: Лампа показала найвищі абсолютні значення освітленості при низьких температурах ($T \approx 3.3^\circ\text{C}$ згідно таблиці) — 248 Lx. При нагріванні до 16.2°C яскравість падає до 214 Lx.
- Вплив напруги: Спостерігається стабільне зниження освітленості при підвищенні напруги (248 $\rightarrow$ 224 Lx).
- Ефективність (S): Це найбільш ефективна лампа в тесті. Максимальна світловіддача становить 16.53 Lx/W, що значно вище конкурентів.

4. EuroLamp 9W

Таблиця 2.7 - Експериментальне дослідження характеристик лампи EuroLamp 9W при $T = 1.5$

U, V	F, Lx (T=1,5)	P, %	I, A	P, W	S, Lx/W
200	134	0,6	0,065	13	10,30769
210	130	1,2	0,065	13,65	9,52381
220	130	1,1	0,0625	13,75	9,454545
230	130	1	0,0625	14,375	9,043478
240	129	1	0,06	14,4	8,958333

250	129	1	0,06	15	8,6
-----	-----	---	------	----	-----

Таблиця 2.8 - Експериментальне дослідження характеристик лампи EuroLamp 9W при $T = 16.2$

U, V	F, Lx ($T = 16,2$)	P, %	I, A	P, W	S, Lx/W
200	121	1	0,065	13	9,307692
210	121	1	0,0625	13,125	9,219048
220	121	1,1	0,0625	13,75	8,8
230	121	1	0,06	13,8	8,768116
240	121	1	0,06	14,4	8,402778
250	121	1,2	0,0575	14,375	8,417391

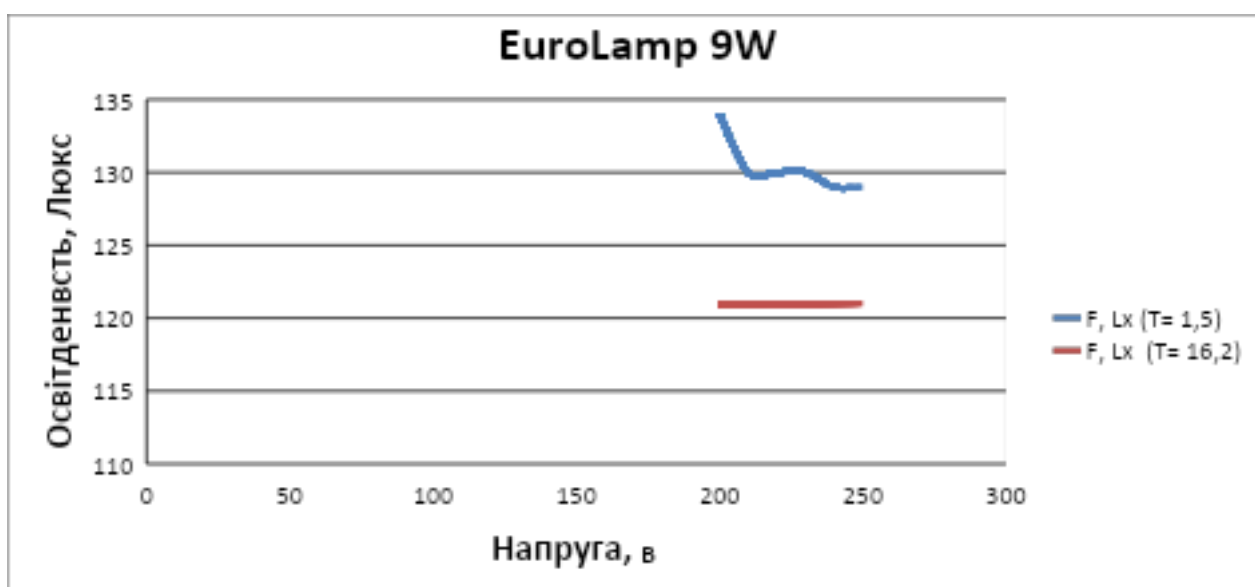


Рисунок 2.8 - Залежність освітленості при різних температурах від напруги для EuroLamp 9W

EuroLamp 9W

- Вплив температури: Ця лампа є найменш потужною за світловим потоком. При $T = 1.5^{\circ}\text{C}$ видає максимум 134 Lx, а при $T = 16.2^{\circ}\text{C}$ — 121 Lx.
- Вплив напруги: На відміну від інших, при вищій температурі (16.2°C) лампа тримає стабільну освітленість (121 Lx) майже у всьому діапазоні напруг 200-250В, лише трохи коливаючись.
- Ефективність (S): Найнижча серед усіх зразків — максимум 10.3 Lx/Wt.

5. Luxray 11W

Таблиця 2. 9 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Luxray 11W при $T = 4.6$

U, V	F, Lx (T=4,6)	P, %	I, A	P, W	S, Lx/W
200	230	1	0,09	18	12,77778
210	222	1,2	0,0875	18,375	12,08163
220	217	0,7	0,0875	19,25	11,27273
230	217	1,2	0,085	19,55	11,09974
240	217	0,9	0,085	20,4	10,63725
250	210	1	0,085	21,25	9,882353

Таблиця 2.10 - Експериментальне дослідження характеристик лампи Luxray 11W при T= 16.2

U, V	F, Lx (T=16,2)	P, %	I, A	P, W	S, Lx/W
200	210	0,8	0,09	18	11,66667
210	210	1,1	0,0875	18,375	11,42857
220	210	0,7	0,0875	19,25	10,90909
230	206	1	0,085	19,55	10,53708
240	206	0,7	0,085	20,4	10,09804
250	198	0,7	0,085	21,25	9,317647

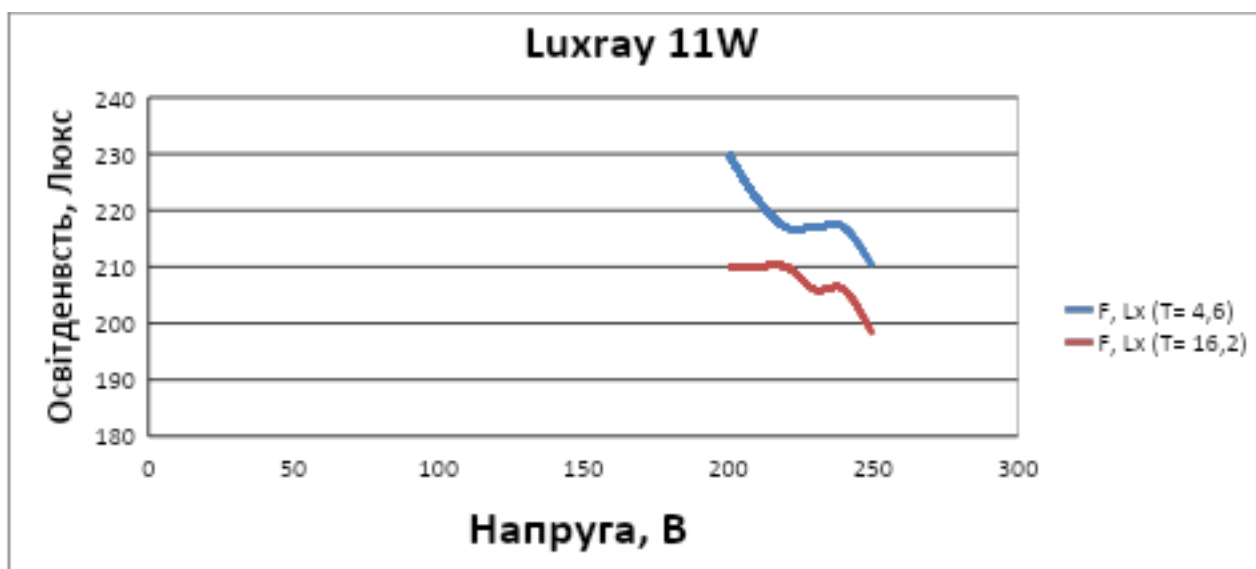


Рисунок 2.9 - Залежність освітленості при різних температурах від напруги для Luxray 11W

Luxray 11W

- Вплив температури: При T=4.6C освітленість становить 230 Lx, при T=16.2C падає до 210 Lx.
- Вплив напруги: Помітне зниження яскравості при підвищенні напруги (з 230 до 210 Lx при низькій T).
- Ефективність (S): Середні показники, максимум 12.77 Lx/W

2.4 Вплив градієнта температури на загальну світлову ефективність світлодіодних модулів

Наявність різниці у температурі окремих світлодіодів модуля суттєво впливає і на його загальну ефективність. При підвищеній температурі ефективність світлового випромінювання світлодіодів знижується через збільшення частки безвипромінювальних рекомбінацій. Це означає, що більша частина спожитої енергії не перетворюється на світло, а розсіюється у вигляді тепла. У результаті зменшуються загальний світловий потік модуля та ефективність використання енергії.

Для різних значень температурного коефіцієнта зниження світлового потоку β були отримані залежності відносного світлового потоку Φ світлодіодного модуля, середня температура світлодіодів якого має стандартне відхилення σ . На рис. 2.10 видно, що при $\sigma = 20$ К зниження світлового потоку може складати 0,01 від початкового, тобто близько 1%. Зі збільшенням σ відбувається помітне зменшення Φ , що свідчить про негативний вплив градієнта температури у світлодіодному модулі. До того ж, чим більше температурний коефіцієнт β , тим стрімкіше знижується відносний світловий потік світлодіодів, що вказує на підвищення чутливості матеріалу до температурних коливань.

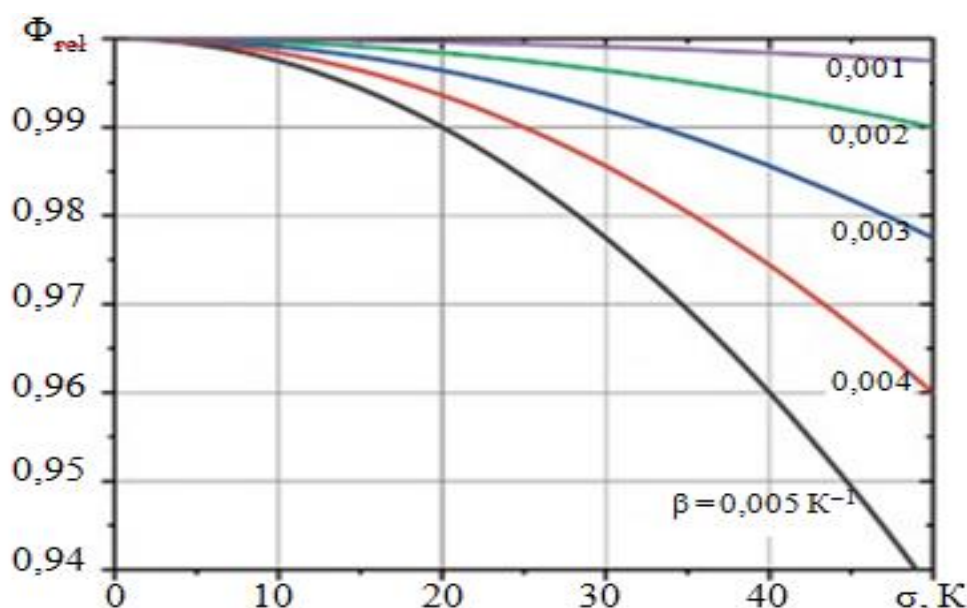


Рисунок 2.10. Залежність відносного світлового потоку від стандартного відхилення температури світлодіодів для різних значень температурного коефіцієнта β (у K^{-1})

Загальні висновки до розділу

Таким чином, описана методика є надійним інструментом для оцінки стабільності світлодіодних джерел випромінювання в умовах змінного температурного середовища, а також дозволяє зіставляти різні типи LED за параметрами спектральної стабільності.

1. Оборнена залежність від температури

У всіх 5 зразках чітко простежується тенденція: чим нижча температура навколишнього середовища, тим яскравіше світить лампа.

- Це пояснюється фізикою напівпровідників: при нагріванні кристала збільшується кількість безвипромінювальних рекомбінацій, що знижує ККД світлодіода (т.зв. температурне гасіння).

2. Парадокс "Напруга — Освітленість"

В усіх таблицях спостерігається цікавий ефект: при підвищенні вхідної напруги (U) від 200В до 250В:

- Споживана потужність (P, W) зростає.
- Але освітленість (F, Lx) падає або залишається незмінною.

- Висновок: Драйвери цих ламп при вищій напрузі працюють менш ефективно, виділяючи надлишкову енергію у вигляді тепла, що додатково нагріває діоди і знижує їх яскравість. Найвигідніший режим роботи для цих ламп — близько 200-210В.

3. Рейтинг ефективності (Lx/W)

На основі параметра S (Світлова віддача) можна сформувати рейтинг якості досліджених ламп (від найкращої до найгіршої):

1. Maxus 10W (~16.5 Lx/W) — безумовний лідер.
2. Horoz 10W (~14.0 Lx/W).
3. Luxray 11W (~12.8 Lx/W).
4. Light Master 11W (~12.3 Lx/W).
5. EuroLamp 9W (~10.3 Lx/W) — аутсайдер тесту, дає найменше світла на витрачений Ват.

3 СТАБІЛІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ

Температурна поведінка спектру світлодіода визначається двома основними фізичними механізмами:

1. **Зменшення ширини забороненої зони напівпровідника (E_g):** при підвищенні температури атоми кристалічної решітки коливаються інтенсивніше, що зменшує енергетичний бар'єр для переходу електронів з валентної зони до зони провідності. Внаслідок цього ширина забороненої зони зменшується, і пікове випромінювання зміщується у бік довших хвиль (ефект red shift). Для InGaN-світлодіодів цей зсув зазвичай складає 0,1–0,3 нм/°C і має майже лінійний характер.

2. **Зниження квантової ефективності та зростання рекомбінаційних втрат:** із підвищенням температури збільшується ймовірність некорисної рекомбінації носіїв заряду (наприклад, через дефекти кристалічної решітки), що призводить до зменшення яскравості та зміни форми спектра. У результаті часто спостерігається одночасне зниження інтенсивності і розширення спектра (збільшення FWHM).

Для синього InGaN-світлодіода ($\lambda \approx 460$ нм) типові температурні зміни такі:

- зсув спектрального піку до +15 нм при підвищенні температури від 25 °C до 85 °C;
- зниження інтенсивності до 25 %;
- розширення FWHM на 5–8 нм.

Такі зміни можуть критично впливати на якість зображення в оптичних системах, точність кольоропередачі та ефективність збудження флуорофорів у флуоресцентній мікроскопії.

У білих світлодіодах температурні коливання спектра призводять до:

- зміни корельованої колірної температури (CCT), наприклад, зі 5000 K до 4300 K;
- зниження індексу кольоропередачі (CRI) на 5–10 одиниць;
- появи зеленого або рожевого відтінку через порушення балансу

білого.

3.1 Пасивні методи термостабілізації

Пасивні методи стабілізації спектральних характеристик світлодіодів забезпечують їхню надійну роботу у широкому температурному діапазоні без використання електроживлення чи складних систем керування. Вони базуються на оптимізації теплового дизайну, підборі матеріалів із високою теплопровідністю та раціональному розташуванні елементів модуля. Основна мета — зменшити нагрів активної області та ефективно відводити тепло від р-n переходу, стабілізуючи температуру і мінімізуючи зсув пікової довжини хвилі.

Ключовим елементом пасивного охолодження є **радіатори**, виготовлені з металів з високою теплопровідністю, таких як мідь і алюміній. Мідні радіатори ($\approx 390 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) забезпечують високу ефективність, але є важкими та дорогими, тоді як алюмінієві ($\approx 220 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) легші й дешевші, що робить їх поширеними у серійному виробництві. Геометрія радіатора (ребра, порожнисті канали, багатогранні структури) збільшує площу теплообміну та покращує природну конвекцію.

Для зменшення теплового опору між світлодіодом і радіатором застосовують **термоінтерфейсні матеріали**:

- **Термопасти** (на основі ZnO , Al_2O_3 , SiO_2 або срібла), що заповнюють мікронерівності;

Термопрокладки (наприклад, Bergquist Gap Pad) з теплопровідністю 2–6 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, зручні у монтажі;

Графітові фольги (наприклад, Panasonic PGD), з анізотропною теплопровідністю до 1600 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в площині, але з нижчою провідністю вздовж товщини. Важливу роль відіграє конструктивна оптимізація **друкованих плат**. У LED-системах використовують металізовані плати (MCPCB) з алюмінієвим або мідним сердечником під мідними доріжками, що дозволяє ефективно розподіляти тепло та зменшувати локальний перегрів кристалу. Такі плати широко застосовуються у професійних прожекторах та медичних джерелах світла.

Ще одним пасивним підходом є **природна вентиляція корпусу** за

принципом "димової труби" (chimney effect), що забезпечує циркуляцію повітря і покращує охолодження модуля без додаткових енергозатрат.

Приклад реалізації: на рисунку 3.1 показано світлодіоди серії Cree XP-G3 із інтегрованими алюмінієвими підкладками та високоефективними тепловідводами, що підтримують стабільну температуру навіть при щільному компонуванні.

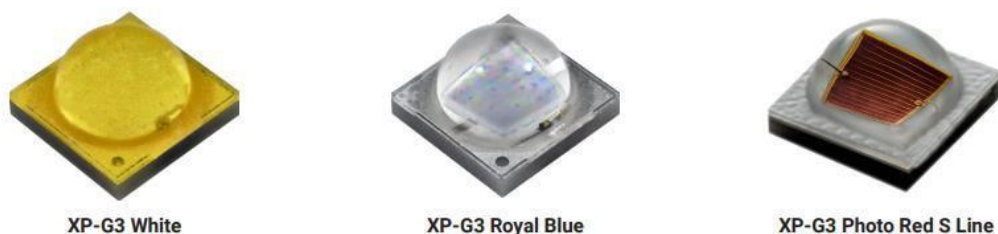


Рис. 3.1. – Серія світлодіодів Cree XP-G3.[25]

COB-модулі Bridgelux Vero SE оснащені металевою основою для тепловідведення та дозволяють гнучко підбирати зовнішній радіатор залежно від умов експлуатації (рис. 3.2). При температурах навколишнього середовища до 50 °C такі модулі здатні працювати без додаткового охолодження.



Рис. 3.2. – COB-модулі Bridgelux Vero SE різних розмірів.[24]

Модулі оснащені металевою підкладкою з високою теплопровідністю та інтегрованими кріпильними отворами для монтажу на радіатори. Завдяки ефективному тепловідведенню вони можуть працювати без активного охолодження при температурах довкілля до +50 °C. У мікроскопічних освітлювачах, таких як ZEISS Colibri, використовуються MCPCB із наскрізними термоканалами, що проходять через алюмінієвий корпус, для поліпшення теплового розподілу. Правильний вибір матеріалів, теплових інтерфейсів та

конструкції тепловідведення є ключовим для забезпечення стабільності спектральних характеристик LED при змінних умовах навколишнього середовища

3.2 Активні методи термостабілізації

Активна термостабілізація передбачає використання керованих систем охолодження, які не лише відводять тепло, а й підтримують робочу температуру світлодіода у заданих межах. На відміну від пасивних рішень, ці системи використовують зворотний зв'язок, мікроконтролери та енергоактивні елементи, що дозволяє в реальному часі стабілізувати оптичні характеристики світлодіода.

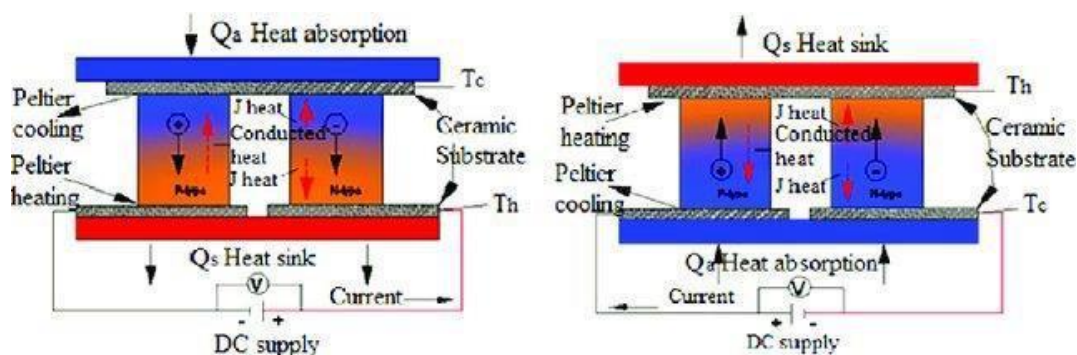


Рис. 3.3. – Принципова схема ефекту Пельтьє для охолодження та нагрівання.[26]

1. Термоелектричне охолодження (елементи Пельтьє)

Елементи Пельтьє використовують ефект Пельтьє: при проходженні струму через контакт двох різних матеріалів одна сторона охолоджується, інша нагрівається. Це забезпечує високу точність стабілізації температури (до $\pm 0,1$ °C) та можливість охолодження нижче температури навколишнього середовища.

Переваги:

- Висока точність температурної стабілізації;
- Можливість охолодження нижче температури навколишнього середовища;
- Компактність, відсутність рухомих частин;
- Легка інтеграція в мікроскопічні системи.

Недоліки:

- Високе енергоспоживання;
- Необхідність додаткового відведення тепла з гарячої сторони;
- Складність управління (потрібен цифровий ПІД-контур).

У практичних системах Пельтьє часто поєднують із датчиками температури та цифровим ПІД-регулятором для прецизійного керування. Наприклад, у мікроскопічних освітлювачах ZEISS Colibri 7 кожен кольоровий LED-канал оснащений Пельтьє-модулем із замкненим цифровим контролем температури, що забезпечує стабільність спектру при тривалій роботі.

2. Температурно-керовані драйвери

Цей підхід передбачає регулювання струму світлодіода залежно від його температури за допомогою терморезистора NTC та мікроконтролера або аналогової схеми. При перевищенні порогової температури струм зменшується, знижуючи теплове навантаження.

Переваги:

- Простота та низька вартість реалізації;
- Відсутність активного охолодження для систем середньої потужності;
- Можливість плавного контролю яскравості.

Недоліки:

- Зниження світлової потужності через обмеження струму;
- Менша точність стабілізації;
- Повільна реакція у випадку аналогових схем без адаптивної логіки.

Такі драйвери ефективно працюють у поєднанні з МСРСВ та термопрокладками для систем із змінними умовами експлуатації.

3. Примусове повітряне охолодження

Метод передбачає створення повітряного потоку над радіатором або LED-модулем за допомогою вентилятора або мініатюрного компресора. Контур керується мікроконтролером у відповідь на сигнали термодатчика.

Переваги:

- Висока ефективність тепловідведення;
- Простота конструкції;
- Можливість адаптивного регулювання швидкості охолодження.

Недоліки:

- Наявність рухомих частин (шум, пил, обслуговування);
- Обмежена довговічність у складних умовах.

У промислових LED-прожекторах вентилятор працює разом із термодатчиком і контролером, що регулює швидкість обертання залежно від температури, забезпечуючи оптимальний режим роботи.

4. Рідинне охолодження

Найефективніший метод відведення тепла, що передбачає циркуляцію охолоджуючої рідини через водоблок, радіатор та насос. Використовують дистильовану воду, гліколеві суміші або діелектричні рідини.

Переваги:

- Максимальна ефективність тепловідведення (>150 Вт);
- Можливість роботи у герметичних корпусах;
- Висока стабільність температури навіть при динамічних навантаженнях.

Недоліки:

- Складність та висока вартість системи;
- Потреба в герметичності та контролі витоків;
- Регулярне обслуговування.

Рідинне охолодження застосовується у лабораторних еталонних джерелах світла та військових пристроях із високим тепловим навантаженням.

Управління активними системами

Ключовим елементом є мікропроцесорне або мікроконтролерне керування (STM32, ATmega, ESP32), що реалізує:

- Зчитування сигналів термодатчиків (термопари, NTC, цифрові датчики);
- Обчислення температурної похибки;
- PID-регулювання елементів охолодження (вентилятор, Пельтьє, насос);
- Аварійне вимкнення при перегріві.

У складних системах можливе логування даних, адаптивне моделювання

температурного режиму та самонавчання системи охолодження.

Висновок: Активні методи термостабілізації підвищують точність і надійність світлодіодних систем, особливо у високоточних застосуваннях. Їх ефективність максимальна при комбінуванні з якісними пасивними рішеннями — радіаторами, МСРСВ та термопрокладками, що формує збалансовану систему управління температурою світлодіодного модуля.

3.3 Електронні методи компенсації температурного зсуву спектру

Окрім конструктивних і пасивних рішень, одним із ефективних підходів до стабілізації спектральних характеристик світлодіодів є електронна компенсація. Вона ґрунтується на активному контролі температури LED та регулюванні електричних параметрів для корекції спектральних зсувів, викликаних нагрівом р-п переходу.

Контроль температури

Для вимірювання температури використовуються:

- **NTC-терморезистори** (наприклад, B57891M0104J000, EPCOS);
- **Цифрові сенсори температури** (DS18B20, TMP102);
- **Термопари типу К** для промислових застосувань.

Сенсори встановлюють близько до кристала або на теплопровідну основу для швидкого відгуку системи.

Обробка даних

Центральний елемент системи — мікроконтролер, який опитує сенсори, обробляє дані та формує керуючий сигнал. Приклади МК:

- STM32F103 (низьке енергоспоживання, багато периферії);
- ESP32 (з вбудованим Wi-Fi/Bluetooth для дистанційного моніторингу);
- Arduino Nano/Uno для простих лабораторних систем.

Регулювання параметрів LED

Керування струмом світлодіода здійснюється:

- Через широтно-імпульсну модуляцію (PWM) для зміни середнього струму;
- Через аналоговий сигнал DAC, що формує напругу на драйвері струму

(наприклад, TI TPS92512 підтримує обидва режими).

Алгоритмічна компенсація

Складніші системи застосовують PID-регулятор, який враховує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові температурного відхилення. Це забезпечує м'яке регулювання без перерегулювання.

Поєднання точного температурного моніторингу, гнучкого керування струмом та алгоритмічної обробки дозволяє досягти стабільного спектрального випромінювання LED незалежно від змін навколишнього середовища, що робить електронну компенсацію критично важливою для високоточних оптичних систем.

3.4 Стратегія стабілізації спектральних характеристик світлодіодів

Дослідження впливу температури на спектр світлодіодів показало, що найбільше змінюється довжина хвилі максимуму випромінювання ($\lambda_{\max}$) та ефективність світловіддачі. Для стабільної роботи у широкому температурному діапазоні потрібен комплексний підхід до термостабілізації.

Основні елементи стратегії

○ Матеріали з високою теплопровідністю

Використовують теплопровідні підкладки на основі алюмінію або міді.

- Застосовують тепловідвідні траси та наскрізні отвори для покращення теплопереносу від кристала LED.

2. Комбіновані системи охолодження

- **Пасивне:** масивні радіатори з великою площею поверхні (анодований алюміній або мідь).

- 3. **Активне:** вентилятори або термоелектричні модулі (Пельтьє), що підтримують стабільну температуру з точністю ± 1 °C.

Точне вимірювання температури

- Використовують цифрові сенсори (DS18B20 або аналогічні) розташовані біля активної області LED.
- Можливе дублювання сигналу аналоговими NTC-терморезисторами для швидкого зворотного зв'язку.

4. Динамічне керування LED

- Мікроконтролери зчитують дані сенсорів і регулюють струм або напругу.
- Ефективними є **PID-регулятори**, що дозволяють плавно та точно підтримувати спектр при зміні температури.

5. Компенсаційні моделі

- При відомій температурній залежності спектру можна застосовувати табличну або аналітичну компенсацію.
- Мікроконтролер змінює робочий струм або активує додаткові канали (для багатоканальних LED або RGB-матриць) для стабілізації спектру.

6. Реальна перевірка стабільності спектру

- Для високоточних застосувань (спектрофотометри, оптичні датчики) використовують еталонні сенсори або мініатюрні спектрометри для автоматичного калібрування LED у реальному часі.

Системний підхід, що об'єднує **теплові, електронні та алгоритмічні методи**, забезпечує стабільність спектральних характеристик світлодіодів при змінній температурі. Така інтегрована стратегія дозволяє створювати LED-модулі з високою надійністю та точністю оптичних вимірювань, незалежно від конкретного типу світлодіода.

Висновок до розділу

У розділі проведено систематичний аналіз методів стабілізації спектральних характеристик світлодіодів при змінних температурах та розроблено комплексну стратегію, що поєднує матеріальні, апаратні та алгоритмічні підходи. Показано, що жоден метод окремо не забезпечує достатню точність і стабільність спектру в умовах експлуатації. Водночас інтеграція пасивного охолодження, активної термокомпенсації та програмного керування дозволяє підтримувати довжину хвилі максимуму випромінювання в межах допустимого допуску.

Запропонована стратегія передбачає застосування високотеплопровідних підкладок, ефективного відведення тепла, точного контролю температури та динамічного керування електричними параметрами світлодіодів з урахуванням температурних змін. Особлива увага приділена алгоритмічній компенсації спектрального зсуву, що критично для прецизійних оптичних систем.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз стану охорони праці на підприємстві

Система управління охороною праці (СУОП)– це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових безпечних і високопродуктивних умов праці. Створення цієї системи здійснюється шляхом послідовного визначення мети і об'єкта управління, завдання і заходів щодо охорони праці, функцій і методів управління, побудови організаційної структури управління, складання нормативно-методичної документації. Головна мета управління охороною праці є створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням .

Заходи для забезпечення створення СУОП:

- розробити і затвердити на підприємстві положення про організацію управління охорони праці;
- щорічно оформляти наказ про призначення осіб відповідальних за стан охорони праці в галузях і на ділянках, а також безпечне використання об'єктів підвищеної небезпеки (котлів і посудин, що працюють під тиском, експлуатація вантажопідійомних машин, газового господарства, пестицидів);
- оформлення наказу про визначення персональних обов'язків з охорони праці усіх спеціалізацій, керівників ділянок та інших службових осіб;
- щорічне проведення паспортизації умов праці, технічних засобів безпеки і технічного стану робочих місць;
- складання планів роботи з охорони праці, комплексне, річне і оперативне планування;
- організація заходів матеріально і морального стимулювання щодо охорони праці;
- впровадження державних, галузевих стандартів, а також розроблення на їх основі стандартів підприємства;

- проведення розслідування і вивчення причин травм, пожеж їх аналіз і облік, а також розробка заходів щодо їх застосування;
- вивчення узагальнення, впровадження передового досвіду з охорони праці;
- організація аудиту охорони праці, лабораторні дослідження умов праці, оцінку технічного стану виробничого плану, атестація робочих місць.

Суб'єктом управління в СУОП на підприємстві в цілому є керівник, а в цехах, на виробничих дільницях і в службах – керівники відповідних структурних підрозділів і служб. Організаційно - методичну роботу по управлінню охороною праці, підготовку управлінських рішень і контроль за їх своєчасною реалізацією здійснює служба охорони праці підприємства, що підпорядкована безпосередньо керівнику підприємства. Суб'єкт управління аналізує інформацію про стан охорони праці на структурних підрозділах підприємства та приймає рішення спрямовані на проведення фактичних показників охорони праці у відповідність з нормами. Об'єктом управління СУОП є діяльність структурних підрозділів та служб підприємства по забезпеченню безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виробничих дільницях, цехах та підприємства в цілому.

Згідно Закону України „Про охорону праці” фінансування охорони праці здійснюється власником підприємства. Працівник не несе ніяких витрат на заходи щодо охорони праці. У господарстві створенні фонди охорони праці відповідно до Положення про державний, галузеві, регіональні фонди охорони праці та фонди охорони праці.

Власники підприємства визначає порядок управління фондами підприємства, призначає відповідальних за це осіб. Кошти фондів підприємства використовуються на виконання комплексних заходів, що забезпечують досягнення встановлених нормативів з охорони праці, а також на подальше підвищення рівня охороною праці на виробництві відповідно до визначеного переліку.

Фінансування профілактичних заходів з охорони праці, виконання загальнодержавної, галузевих та регіональних програм поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, інших державних програм, спрямованих

на запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням, передбачається, поряд з іншими джерелами фінансування, визначеними законодавством, у державному і місцевих бюджетах, що виділяються окремим рядком. Фінансування заходів по охороні праці здійснюється у відповідності нормам і зображено у таблиці 4. 1.

Таблиця 4. 1 - Фінансування заходів з охорони праці

Показники	Рік	
	2024	2025
Загальні витрати по господарству, грн.:	1922	2150
- на ЗІЗ	620	755
- на лікувально-профілактичне оздоровлення	1302	1495

Виходячи з даних таблиці 4.1 можна зробити висновок, що фінансування охорони праці за останні роки збільшується на 15%, це пов'язано із збільшенням реалізованої продукції, оскільки щорічно від суми реалізованої продукції господарство виділяє 0,8% коштів на фінансування заходів з охорони праці. Отже, згідно чинного законодавства ця сума не повинна бути меншою 0,5%.

Аналіз умов праці, побуту і профілактики травматизму дозволяє виявити причини і визначити закономірності їх виникнення. На основі такої інформації розробляються заходи та засоби щодо профілактики виробничого травматизму. Для аналізу виробничого травматизму застосовують такі основні методи: статистичний, топографічний, монографічний, економічний, метод анкетування, метод експертних оцінок.

На основі даних показників визначають динаміку виробничого травматизму, професійної та загальної захворюваності за відповідний період, яка дозволяє оцінити стан охорони праці на підприємстві, правильність обраних напрямків щодо забезпечення здорових та безпечних умов праці.

Таблиця 4. 2 - Аналіз умов праці та травматизму

Показники	2023	2024	2025
Середньомісячна кількість працівників, чол	324	335	352
Число потерпілих з втратою працездатності, чол	2	1	1

Число потерпілих з смертельним наслідком, чол	-	-	-
Кількість днів непрацездатності, днів	80	40	35
Показник частоти травматизму	6,17	2,99	2,84
Показник важкості травматизму	40	40	35
Показник непрацездатності	246,9	119,4	99,43

У господарстві на відповідному рівні організовані всі виробничі процеси та побут працівників для підвищення продуктивності праці. Для безпечної роботи персоналу з працівниками проводяться інструктажі по охороні праці. На кожному об'єкті та на робочих місцях розміщено інструктажі з вимогами техніки безпеки.

Для профілактики виробничого травматизму у господарстві впроваджують нові технології які сприяють охороні праці. На відповідних об'єктах впроваджують автоматичні блокуючі пристрої, створюють місцеву вентиляцію і систему кондиціонування повітря, освітлення окремих робочих місць на даний момент перебуває у належному стані, за рахунок модернізації освітлювального обладнання. Аналіз стану виробничого травматизму проводиться щорічно і за остання три роки наведені у таблиці 5.2.

4.2 Розробка заходів щодо покращення стану охорони праці

Розрізняють такі основні заходи щодо покращення стану охорони праці у господарстві:

- обладнати кабінет з охорони праці, з метою ефективного навчання персоналу, встановити необхідні плакати, стенди;
- удосконалення нормативної бази з питань охорони праці;
 - укомплектування щитів пожежної безпеки ящиками з піском і необхідним інвентарем;
- встановлення відсутності освітлювальних приладів, покращення освітленості робочих місць;
- відновлення заземлення корпусів та відновити пошкоджену ізоляцію струмоведучих частин електроустановок;
- забезпечення працівників ЗІЗ ;

- покращити природу і при необхідності створити штучну вентиляцію;
- професійний добір працівників з окремих професій;
- провести паспортизацію та атестацію необхідних робочих місць.

4.3 Пожежна безпека

Правовою основою діяльності в галузі пожежної безпеки є Конституція, Закон України „Про пожежну безпеку”, та інші закони, постанови, укази.

Попередження розповсюдження пожеж, в основному забезпечується пожежною безпекою будівель і споруд і забезпечується; правильним вибором необхідного ступеня вогнестійкості будівель та споруд, розташування приміщень з урахуванням вимог пожежної безпеки, встановлення протипожежних перешкод, проектування шляхів евакуації. Згідно діючого законодавства відповідальність за утримання промислового підприємства у належному протипожежному стані покладається безпосередньо на керівника підприємства.

Власником розробленні комплексні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки, розробленні та затвердженні положення, інструкції, інші нормативні акти, що діють в межах підприємства, здійснює постійний контроль за їх додержанням, забезпечено додержання протипожежних вимог приписів і постанов органів державного пожежного нагляду, утримання в справному стані засобів протипожежного захисту, пожежну безпеку, обладнання та інвентар.

Для запобігання пожежам на складах нафтопродуктів останні зберігають у спеціально обладнаних резервуарах, які встановлені на фундаментах. Усі заправні ємності заземлені, а вся територія нафтоскладу обнесена земляним валом.

5 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Таблиця 5.1 - Освітленість ламп при різних температурах при напрузі 230В

Марка лампи	$F_1, Lx (T=1,5)$	$F_2, Lx (T=16)$	$\Delta F, Lx$	$\Delta F, \%$
EuroLamp 9W	130	121	9	7.4
Luxray 11W	217	206	11	5.3
Light master 11W	213	193	20	10.4
Horoz 10W	234	211	23	10.9
Maxus 10W	224	206	18	8.7
			$\Delta F_{cp}, \%$	8.5

Як бачимо з таблиці, в середньому з ростом температури навколишнього середовища, освітленість зменшується на 8,5%.

Тобто забезпечивши тим чи іншим способом термостабілізацію, ми зможемо збільшити рівень освітлення від 5 до 10%, або відповідним чином зменшити потужність ламп на відповідне значення при заданому рівні освітлення.

Для спрощення розрахунків та більшої наочності розрахуємо експлуатаційні затрати ламп для 50000год.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Оборнена залежність від температури

У всіх 5 зразках чітко простежується тенденція: чим нижча температура навколишнього середовища, тим яскравіше світить лампа.

- Це пояснюється фізикою напівпровідників: при нагріванні кристала збільшується кількість безвипромінювальних рекомбінацій, що знижує ККД світлодіода (т.зв. температурне гасіння).

2. Парадокс "Напруга — Освітленість"

В усіх таблицях спостерігається цікавий ефект: при підвищенні вхідної напруги (U) від 200В до 250В:

- Споживана потужність (P, W) зростає.
- Але освітленість (F, Lx) падає або залишається незмінною.
- Драйвери цих ламп при вищій напрузі працюють менш ефективно, виділяючи надлишкову енергію у вигляді тепла, що додатково нагріває діоди і знижує їх яскравість. Найвигідніший режим роботи для цих ламп — близько 200-210В.

3. Рейтинг ефективності (Lx/W)

На основі параметра S (Світлова віддача) можна сформувати рейтинг якості досліджених ламп (від найкращої до найгіршої):

Maxus 10W (~16.5 Lx/W) — безумовний лідер.

Horoz 10W (~14.0 Lx/W).

Luxray 11W (~12.8 Lx/W).

Light Master 11W (~12.3 Lx/W).

EuroLamp 9W (~10.3 Lx/W) — аутсайдер тесту, дає найменше світла на витрачений Ват.

Було здійснено систематизований аналіз методів стабілізації спектральних характеристик світлодіодів при змінній температурі, а також розроблено комплексну інженерну стратегію, що об'єднує матеріальні, апаратні та алгоритмічні підходи.

Натомість, інтеграція пасивного охолодження, активної температурної компенсації та програмного управління дозволяє створити надійну систему з можливістю підтримки довжини хвилі максимуму випромінювання в межах допустимого допуску.

Запропонована стратегія передбачає використання високотеплопровідних підкладок, ефективного відведення тепла, точного температурного моніторингу та динамічного керування електричними параметрами світлодіодів з урахуванням температурних змін.

Результатом цього розділу стало формування обґрунтованого підходу, який може бути адаптований до різних класів LED-систем — від наукових лабораторних приладів до сенсорних пристроїв в аграрному або медичному секторі. Таким чином, розділ 3 закладає підґрунтя для практичного впровадження стабільних світлодіодних джерел випромінювання з прогнозованими спектральними параметрами навіть у складних термічних умовах.

Як бачимо з таблиці, в середньому з ростом температури навколишнього середовища, освітленість зменшується на 8,5%.

Тобто забезпечивши тим чи іншим способом термостабілізацію, ми зможемо збільшити рівень освітлення від 5 до 10%, або відповідним чином зменшити потужність ламп на відповідне значення при заданому рівні освітлення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Li C. та ін. Recent Progress in Wide-Bandgap III-Nitride Ultraviolet Photodetectors // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Vol. 23, № 15. – P. 8243. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/15/8243>.
2. Yu Y. та ін. Emerging Roles and Mechanisms of Ultraviolet C Radiation in Disease Prevention and Therapy // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, № 9. – P. 8331. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/9/8331>.
3. Wilson J., Hawkes J. Optoelectronics: An Introduction. – 5th ed. – London: Prentice Hall, 1998. – 559 с.
4. Graeme J. Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions. – New York: McGraw-Hill, 1995. – 252 с.
5. Mottaleb Hossain M., Zarkesh-Ha P., Hayat M. M. Linear mode CMOS compatible p-n junction avalanche photodiode. – October, 2015. – 198 с.
6. Jiang H., Yu P. K. L. Equivalent Circuit Analysis of Harmonic Distortions in Photodiode // IEEE Photonics Technology Letters. – 1998. – Vol. 10, № 11. – P. 1608–1610.
7. Haraoubia B. Optical Properties of Si, Ge, GaAs, GaSb, InAs, and InP at Elevated Temperatures. – 1st ed. – Amsterdam: Elsevier Science, 2018. – 360 с.
8. Betta G. F. Advances in Photodiodes. – InTechOpen, 2017. – 478 с.
9. Michael F. Ultimate Electronics: Practical Circuit Design and Analysis. – 2017. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ultimateelectronicsbook.com/>.
10. PHOTODETECTOR PERFORMANCE PARAMETERS. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/photodetector-performance-parameters>.

11. SI Photodiodes. – HAMAMATSU Photonics. – 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_kspd9001e.pdf.
12. PIN Photodetector Characteristics for Optical Fiber Communication. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95046662-pin-photodetector-characteristics-for-optical-fiber-communication>.
13. Photodiode. – Wikipedia. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>.
14. Photodiode Characteristics and Applications. – OSI Optoelectronics. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.osioptoelectronics.com/media/pages/knowledgebase/b954012b64-1675100541/an-photodiode-parameters-and-characteristics.pdf>.
15. PHOTODETECTORS. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studytronics.weebly.com/photodetector-ldr.html>.
16. Chhajed S. та ін. Temperature dependence of electroluminescence in InGaN-based LEDs // Applied Physics Letters. – 2007. – Vol. 91, № 19. – P. 191109. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.2809361>.
17. Poppe A., Farkas G., Horvath G. Electrical, thermal and optical characterization of power LED assemblies // arXiv preprint arXiv:0709.1815. – 2007. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/0709.1815>.
18. Oaya R. O. Thermal tuning of light-emitting diode wavelength as an implication of the Varshni equation // arXiv preprint arXiv:2005.04496. – 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2005.04496>.
19. Reifegerste F., Lienig J. Modelling of the Temperature and Current Dependence of LED Spectra // Journal of Light & Visual Environment. – 2008. – Vol. 32, № 3. – P. 288–294. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jlve/32/3/32_3_288/article.
20. Zhang Y. та ін. Study of temperature sensitive optical parameters and junction temperature of InGaN-based LEDs // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89,

№ 24. – P. 241118. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coefs.charlotte.edu/yzhang47/files/2014/04/InGaN-LED-temperature-APL.pdf>.

21. Li C. та ін. Wave-shaped temperature dependence characteristics of the electroluminescence peak energy in a green InGaN-based LED grown on silicon substrate // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, Article number: 129. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-57008-3>

22. Chou H.-Y., Yang T.-H. Dependence of Emission Spectra of LEDs upon Junction Temperature and Driving Current // Journal of Light & Visual Environment. – 2008. – Vol. 32, № 2. – P. 83–88. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/250139383_Dependence_of_Emission_Spectra_of_LEDs_upon_Junction_Temperature_and_Driving_Current.

23. Pant N. та ін. Origin of the injection-dependent emission blueshift and linewidth broadening of III-nitride light-emitting diodes // arXiv preprint arXiv:2209.12757. – 2022. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2209.12757>.

24. Bridgelux Inc. Bridgelux Vero® SE Array Design Guide // Application Note AN120. – 2021. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.bridgelux.com/sites/default/files/resource_media/AN120%20Bridgelux%20Vero%20SE%20Array%20Design%20Guide.pdf

25. New Energy LLC. XPG3 LED Modules – Data Sheet. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://new-energyllc.com/wp-content/uploads/NewEnergy_XPG3-Modules_DataSheet.pdf

26. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 486–503. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/260029369_A_review_of_thermoelectrics_research_-_Recent_developments_and_potentials_for_sustainable_and_renewable_energy_applications

27. Zeiss Microscopy Online Campus. Light-Emitting Diodes. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/leds.html>
28. ScienceDirect. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431114000854>
29. Tsonev D., Hristov I., Stamenov I. et al. Optical and Electrical Characteristics of High-Power LEDs for Smart Lighting Applications // Electronics. – 2024. – Vol. 13, № 22. – P. 4336. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/22/4336>
30. Ichikawa M., Kishino K., Kikuchi A. Short-wavelength light-beam in situ monitoring growth of InGaN/GaN green LEDs by MOCVD // Journal of Crystal Growth. – 2003. – Vol. 248, Issues 1–4. – P. 556–561. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/225085172_Short-wavelength_light_beam_in_situ_monitoring_growth_of_InGaNGaN_green_LEDs_by_MOCVD
31. LED Lighting in Vertical Agriculture // AgriTech Digest. – 2023. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://agritechdigest.com/led-lighting-in-vertical-agriculture/>
32. Altinkaya M.A., Bozoklu M. Effect of Temperature on Optical and Electrical Characteristics of Red and Green InGaN-based LEDs // Heliyon. – 2025. – Vol. 11, № 5. – Article e12472. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025012472>
33. Spectral sensors enable horticultural SSL to increase crop yields for indoor farming // Buildings.com. – 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.buildings.com/building-systems-on/lighting/article/55257909>