

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Дмитро ТАТАРЧУК
«__» _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
на тему: «Вплив температури на спектральні характеристики
світлодіодів»**

Виконала:
студентка IV курсу, групи ДП-12
Шленчак Анастасія Ярославівна

Керівник: асист.каф.МЕ, доктор філософії, б/з,
Шевлякова Ганна Вікторівна

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.т.н.,
Обухова Тетяна Юріївна

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,
Діденко Юрій Вікторович

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студентці

Шленчак Анастасії Ярославівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Вплив температури на спектральні характеристики світлодіодів»

Керівник роботи: асист.каф.МЕ, доктор філософії, б/з, Шевлякова Ганна

Вікторівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи : LED-модулі на основі InGaN, AlGaInP, GaN/AlGaIn;
спектрометричне обладнання; інтегруюча сфера; система температурного
контролю (елемент Пельтьє); стабілізоване джерело струму; технічна
документація LED-випромінювачів; температурний діапазон досліджень:
20–100 °C; інтервал струму: 5–20 мА.

4. Зміст роботи: 1) Аналіз літератури щодо температурного впливу на світлодіоди
різного типу; 2) Опис фізичних механізмів температурної нестабільності спектру;
3) Дослідження спектральних характеристик світлодіодів при змінній температурі;

- 4) Аналіз методів термостабілізації та рекомендації щодо їх використання.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):
презентація до захисту роботи.
6. Дата видачі завдання 24 березня 2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення теми, постановка мети та завдань, аналіз літературних джерел	24.03.2025	
2	Написання теоретичної частини, формування структури роботи, опис фізичних основ	26.04.2025	
3	Розробка методики дослідження, проведення експерименту, збір спектральних даних	05.05.2025	
4	Обробка результатів, написання висновків, оформлення роботи, підготовка до захисту	26.05.2025	

Студентка: _____

Анастасія ШЛЕНЧАК

Керівник: _____

Ганна ШЕВЛЯКОВА

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена аналізу впливу температури на спектральні характеристики світлодіодів різних типів. Актуальність теми зумовлена широким впровадженням LED-технологій у прецизійних галузях, таких як медицина, мікроскопія, спектроскопія, агротехнології, де стабільність спектра випромінювання є критично важливою для точності функціонування систем.

У першому розділі досліджено фізичні основи формування випромінювання у світлодіодах, вплив температури на ширину забороненої зони та відповідні зсуви пікової довжини хвилі (температурний червоний зсув). Проаналізовано зміну таких параметрів як FWHM (повна ширина спектру на піввисоті), інтенсивність випромінювання, спектральна стабільність у LED на основі матеріалів InGaN, AlGaInP, GaN/AlGaIn, зокрема у синіх, червоних, ультрафіолетових та білих світлодіодах.

У другому розділі описано методологію дослідження спектральних характеристик LED в умовах змінної температури. Розглянуто конструкцію вимірювальних установок: спектрометри, інтегруючі сфери, джерела стабілізованого струму, охолоджувальні платформи на базі Пельтьє-елементів. Наведено алгоритм калібрування та збору спектральних даних, а також методи математичної обробки результатів (включаючи апроксимацію функціями Гауса та Voigt, побудову залежностей $\lambda(T)$, $I(T)$, $\text{FWHM}(T)$).

У третьому розділі зосереджено увагу на методах стабілізації спектральних характеристик LED при зміні температури. Детально розглянуто пасивні методи: тепловідвід за допомогою радіаторів, металізованих друкованих плат (MCPCB), графітових фольг і термопрокладок. Проаналізовано активні методи: керування температурою за допомогою термоелектричних охолоджувачів, систем PID-регулювання, зворотного зв'язку через температурні сенсори. Наведено приклади реалізації таких підходів у комерційних і наукових LED-модулях.

Ключові слова: світлодіод, термостабілізація, ширина спектра (fwhm), спектроскопія.

ABSTRACT

The bachelor's thesis is devoted to the analysis of the influence of temperature on the spectral characteristics of various types of light-emitting diodes (LEDs). The relevance of the topic is driven by the widespread adoption of LED technologies in precision fields such as medicine, microscopy, spectroscopy, and agrotechnology, where the stability of the emission spectrum is critically important for the accurate functioning of systems.

The first chapter explores the physical principles of light emission in LEDs, the influence of temperature on the bandgap width, and the resulting shifts in peak wavelength (thermal red shift). Changes in parameters such as FWHM (Full Width at Half Maximum), emission intensity, and spectral stability are analyzed for LEDs based on InGaN, AlGaInP, and GaN/AlGaN materials, particularly in blue, red, ultraviolet, and white light-emitting diodes.

The second chapter describes the methodology for investigating the spectral characteristics of LEDs under varying temperature conditions. It includes a review of experimental setups: spectrometers, integrating spheres, stabilized current sources, and Peltier-based thermal control platforms. The calibration process and spectral data acquisition algorithm are presented, along with mathematical data processing techniques (including Gaussian and Voigt approximations, and plotting dependencies such as $\lambda(T)$, $I(T)$, and $\text{FWHM}(T)$).

The third chapter focuses on methods for stabilizing the spectral characteristics of LEDs during temperature variations. Passive methods are discussed in detail: heat dissipation using radiators, metal-core printed circuit boards (MCPCB), graphite foils, and thermal interface pads. Active methods are also analyzed: temperature regulation using thermoelectric coolers, PID controllers, and feedback systems with thermal sensors. Practical examples of such methods implemented in commercial and scientific LED modules are provided.

Keywords: led, thermal stabilization, spectral width (fwhm), spectroscopy.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ	10
1.1. Фізичні принципи генерації випромінювання та їх залежність від температури	10
1.2. Спектральні параметри світлодіодів як функція температури	13
1.3. Особливості різних типів світлодіодів	16
1.4. Практичне значення температурної стабільності спектральних характеристик світлодіодів.	19
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЗАЛЕЖНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ СВІТЛОДІОДІВ	25
2.1. Спектроскопічні методи вимірювання.	25
2.2. Математична обробка результатів спектроскопії.	30
РОЗДІЛ 3. СТАБІЛІЗАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ	35
3.1. Пасивні методи термостабілізації.	36
3.2. Активні методи термостабілізації.	38
3.3. Електронні методи компенсації температурного зсуву спектру. ..	42
3.4. Стратегія стабілізації спектральних характеристик світлодіодів.	43
ВИСНОВКИ	46
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	47

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

LED — Light Emitting Diode — світлодіод

PWM — Pulse Width Modulation — широтно-імпульсна модуляція

PID — Proportional-Integral-Derivative — пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

NTC — Negative Temperature Coefficient — терморезистор з негативним температурним коефіцієнтом

MCPCB — Metal Core Printed Circuit Board — друкована плата на металевій основі

TEC — Thermoelectric Cooler — термоелектричний охолоджувач (елемент Пельтьє)

RGB — Red Green Blue — три основні кольори світлодіодів

ВСТУП

Світлодіоди (LED) сьогодні є однією з найпоширеніших технологій штучного освітлення завдяки їх високій енергоефективності, довговічності та компактності. Вони використовуються у великій кількості галузей — від побутового освітлення до телекомунікацій, медицини, авіації та промислової електроніки. Однак, попри численні переваги, робота світлодіодів суттєво залежить від температурних умов.

Температура є одним з основних зовнішніх чинників, що впливає на спектральні характеристики світлодіодів — зокрема на довжину хвилі випромінювання, інтенсивність та ширину спектру. Високі температури можуть спричинити тепловий дрейф пікової довжини хвилі, зменшення світлової ефективності, зміщення кольору та зниження надійності пристроїв. Це особливо критично в системах, що потребують стабільного спектрального випромінювання — таких як медична візуалізація, спектроскопія або прецизійні системи освітлення.

Актуальність даного дослідження зумовлена зростаючими вимогами до надійності світлодіодних систем, особливо в умовах змінної температури довкілля або інтенсивного тепловиділення. Аналіз температурної залежності спектральних характеристик дозволяє покращити моделювання, прогнозування та проектування LED-рішень, що відповідають вимогам стабільної роботи.

Метою даної роботи є дослідження впливу температури на спектральні характеристики світлодіодів різних типів та надання рекомендацій щодо їх використання в умовах температурної нестабільності.

Основні завдання дослідження: Розглянути фізичні принципи формування спектру випромінювання світлодіодів. Провести аналіз впливу температури на електронні та спектральні властивості LED. Проаналізувати наукові дані світлодіодів різного кольору (синій, білий, червоний тощо).

Об'єктом дослідження є напівпровідникові світлодіоди.

Предметом дослідження виступають спектральні характеристики світлодіодів у температурному діапазоні від кімнатних до підвищених значень.

Методи дослідження включають спектроскопічні вимірювання, температурне тестування, статистичний аналіз, а також огляд і узагальнення сучасних наукових публікацій.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ

1.1. Фізичні принципи генерації випромінювання та їх залежність від температури

Світлодіод (англ. Light Emitting Diode, LED) — це тверdotілий напівпровідниковий прилад, в якому відбувається електролюмінесценція — випромінювання світла під дією електричного струму. Основою LED є р-n перехід двох областей напівпровідника, легованих домішками різної провідності: n-область містить надлишок електронів, р-область — дірок.

Коли до р-n переходу прикладається пряма напруга, електрони інжектуються з n-області в р-область, а дірки — у зворотному напрямку. У вузькій активній зоні відбувається рекомбінація електронів і дірок, в результаті якої виникає фотон з енергією, близькою до забороненої зони (bandgap, E_g) напівпровідника.[3]

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:

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

Таким чином, чим вища ширина забороненої зони, тим коротша довжина хвилі (наприклад, синій колір), і навпаки.

Ширина забороненої зони E_g є однією з найважливіших характеристик напівпровідникового матеріалу, оскільки саме вона визначає енергію фотона, що

випромінюється при рекомбінації носіїв заряду. Для світлодіодів E_g безпосередньо пов'язана з довжиною хвилі випромінювання через співвідношення (1.2). [7] Під впливом температури у кристалічній решітці напівпровідника зростає амплітуда коливань атомів (фонони), що призводить до: зменшення енергії ковалентного зв'язку між атомами; розширення міжатомних відстаней; зменшення енергії переходу електрона з валентної зони до зони провідності.

Ці явища викликають зменшення ширини забороненої зони E_g зі зростанням температури

При підвищенні температури відбувається розширення коливань кристалічної ґратки, що призводить до зменшення ширини забороненої зони E_g . Це явище описується 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 E_g при нагріванні спричиняє *зсув піку випромінювання в довшу хвилю* (червоніший відтінок).

Одним із важливих параметрів спектральних характеристик світлодіода є ширина спектра на піввисоті (англ. Full Width at Half Maximum, FWHM), яка відображає спектральну чистоту та кольорову монохроматичність випромінювання. Чим вузьчий спектр (менше FWHM), тим чіткіший та стабільніший колір світла, що критично для точних фотометричних, медичних або комунікаційних застосувань.

Параметр FWHM визначається як відстань між точками спектра, де інтенсивність випромінювання дорівнює 50% від максимальної:

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

Підвищення температури призводить до розширення спектру випромінювання LED, тобто до зростання значення FWHM. Це зумовлено низкою факторів:

Зі зростанням температури зростає коливальна енергія атомів у кристалічній решітці. Це призводить до розмазування енергетичних станів у зонах провідності та валентній зоні, особливо в області локалізованих енергетичних рівнів у гетероструктурах.[2] Внаслідок цього електрони рекомбінують не з одного чіткого рівня, а з певного енергетичного діапазону — спектр випромінювання стає ширшим.

У багатьох LED (особливо InGaN/AlGaInP) наявні локалізовані стани через коливання складу (наприклад, змінна концентрація індію). При низьких температурах випромінювання відбувається переважно з найглибших станів. Але зі зростанням температури активуються вищі (менш локалізовані) рівні, що додатково розтягує спектр у довгохвильову сторону.

Високі температури сприяють активації фононних процесів, зокрема взаємодії носіїв заряду з фононами.[6] Це призводить до: розширення енергетичного розподілу електронів; зменшення ймовірності прямої рекомбінації; зростання фонового рівня випромінювання в спектрі.

У світлодіодах без термостабілізації FWHM може зростати лінійно або квазі-лінійно з температурою:

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

де, $FWHM_0$ — ширина спектру при кімнатній температурі, k — температурний коефіцієнт розширення спектру, [нм/°C], T — температура.

Типові значення k для InGaN-світлодіодів становлять 0.05–0.2 нм/°C.

Для синіх LED (450–470 нм) FWHM збільшується з 18 нм (25 °C) до 24 нм (85 °C); Для червоних AlGaInP LED FWHM зростає з 22 нм до 30–35 нм у тому ж температурному діапазоні; Для білих LED спостерігається не лише розширення

основного спектра, а й зміна співвідношення компонент люмінофора, що ще більше впливає на кольорову стабільність.[9]

Зростання температури і відповідне розширення спектра випромінювання світлодіодів (збільшення FWHM) має низку важливих негативних наслідків для практичного використання LED. Насамперед відбувається зниження спектральної чистоти випромінювання, що призводить до погіршення кольорової насиченості світла. Це особливо критично для LED-дисплеїв, систем кольорового освітлення та оптичних фільтрів. Другою важливою проблемою є колірна нестабільність: при розширенні спектру змінюється співвідношення кольорових компонент, у результаті чого світло зміщується у тепліший або холодніший відтінок. У системах світлового зв'язку (наприклад, VLC або LED-комунікації) погіршується спектральне розділення каналів, що знижує ефективність передачі даних. Нарешті, у спектроскопічних вимірюваннях збільшення FWHM призводить до втрати точності визначення пікової довжини хвилі, оскільки максимум спектра стає розмитим або нечітким. Усі ці ефекти обмежують застосування світлодіодів у високоточних або науково-критичних системах при відсутності температурної стабілізації.

1.2. Спектральні параметри світлодіодів як функція температури

Зі зростанням температури ширина забороненої зони напівпровідника зменшується, що призводить до зменшення енергії фотона та відповідного зсуву пікової довжини хвилі випромінювання в довшу хвилю. Цей ефект називається температурним червоним зсувом (red-shift). Температурний коефіцієнт такого зсуву залежить від матеріалу активного шару (Табл. 1.1.)

Одним з ключових параметрів, що визначають ефективність світлодіода, є інтенсивність випромінювання — тобто кількість світлової енергії, що випромінюється пристроєм за одиницю часу. У реальних умовах експлуатації, особливо при тривалій роботі або підвищених температурах навколишнього

середовища, спостерігається помітне зниження інтенсивності випромінювання світлодіодів.

Таблиця 1.1. Температурні коефіцієнти зсуву пікової довжини хвилі λ_{peak} для світлодіодів різного типу [30]

Тип LED	Матеріал	$\Delta\lambda/\Delta T$ (нм/°C)
InGaN (червоні)	InGaN/GaN	0.072
AlGaInP (червоні)	AlGaInP	0.14
InGaN (зелені)	InGaN/GaN	0.09
InGaN (сині)	InGaN/GaN	0.05
UV-A (365–405 нм)	GaN / AlGaIn	0 (мінімальний)

Основні причини зменшення інтенсивності при нагріванні такі: Зниження квантової ефективності (IQE) Внутрішня квантова ефективність (IQE, *Internal Quantum Efficiency*) визначає, яка частка інжектованих носіїв (електронів і дірок) призводить до випромінювання фотона. При зростанні температури відбувається активація: нерепродуктивних (безвипромінювальних) рекомбінацій через дефекти кристалу; рекомбінацій Аугера, коли енергія переходу не випромінюється, а передається іншому носієві; термічного згасання (quenching) — теплова енергія гасить збуджений стан, не даючи фотону народитися.

При підвищенні температури зростає темновий струм у р-п переході. Це означає, що частина енергії витрачається на фонові (теплові) процеси, що знижує світлову віддачу.

В умовах високої температури носії заряду (електрони і дірки) можуть дифундувати за межі активної зони, де не відбувається рекомбінація з випромінюванням. Це ще більше знижує кількість корисних фотонів.

Інтенсивність світлового випромінювання $I(T)$ має тенденцію експоненційного або квазі-лінійного зменшення зі зростанням температури. В експериментах для типових InGaN-світлодіодів фіксують: падіння інтенсивності на 20–30% при нагріванні з 25 °C до 85 °C; для червоних AlGaInP LED — навіть до 50% втрат при аналогічному нагріванні; для UV-A LED — чутливість нижча, але також помітна при температурі вище 100 °C. [1]

Зі зростанням температури ефективність випромінювання LED швидко падає через термічно-активовані механізми поглинання енергії. Зокрема, зменшується внутрішня квантова ефективність через активацію неметалевих центрів рекомбінації. Внаслідок цього інтегральна інтенсивність (яскравість) LED за незмінного струму знижується. Наприклад, у високих температурних умовах IQE може зменшуватись в кілька разів; згідно зі спостереженнями, вище 50 K (для MQW InGaN-LED) інтенсивність падає особливо різко через посилену нерепродуктивну рекомбінацію.

Для білих LED, які складаються з синього кристалу InGaN, GaN та фосфорного перекривного шару, температура впливає на співвідношення синьої та фосфорної компонент. При нагріванні синя компонента зміщується в червону область (через зсув самого синього LED) і зменшується її інтенсивність, а енергія частково перейде на теплові коливання фосфора. Це призводить до зниження корельованої колірної температури (світло стає «теплішим»). У деяких роботах зафіксовано помітне зниження CCT при підвищенні температури світлодіода. Водночас, за спеціальної конструкції (наприклад, при відмінній тепловій розкладці) зміщення CCT може бути невелике. Так, у недавньому дослідженні для схеми синій LED+YAG-фосфор загалом спостерігалася лише незначна зміна колірної температури (4650 K) за 60 хв витримки при 3 А – навіть при зсуві синього піку 2 нм. Нижче на рисунку 1.1. наведено еталонний приклад: при нагріванні синього LD-випромінювача (456 до 458 нм за 60 хв) CCT білого світла майже не змінилася.

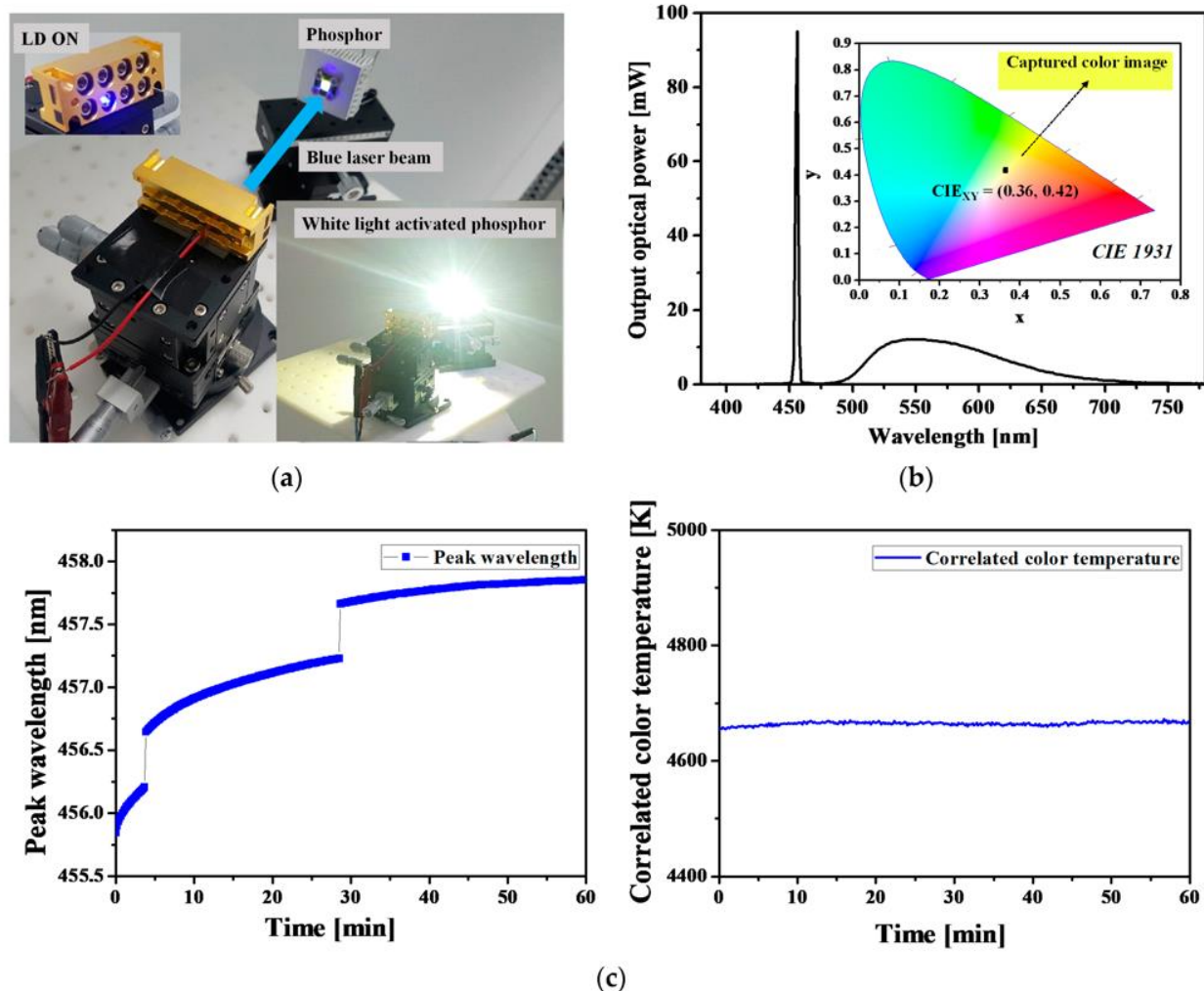


Рис. 1.1. – Приклад експериментальних даних для білої LED-системи (синій LD + YAG-фосфор): зміна пікової λ синього LD з 455.8 до 457.8 нм за 60 хв (лівий графік) та стабільність корельованої колірної температури (4650 К, правий графік) .[29]

1.3. Особливості різних типів світлодіодів

Світлодіоди різного кольору випромінювання базуються на різних напівпровідникових структурах, що відрізняються за матеріальним складом, шириною забороненої зони, типом гетероструктури та термічними властивостями. Ці особливості істотно впливають на поведінку LED при зміні температури, зокрема на стабільність пікової довжини хвилі, ширину спектру, інтенсивність

випромінювання та ефективність світловіддачі. Найпоширенішими типами є світлодіоди на основі InGaN/GaN, AlGaInP, GaN/AlGaN для ультрафіолетового випромінювання, а також білі світлодіоди з використанням фосфорного покриття (рис. 1.2.).

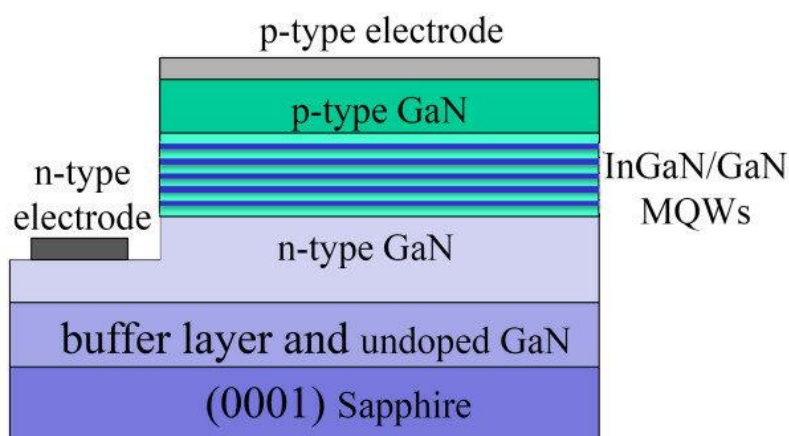


Рис. 1.2. – Схематична структура світлодіодів InGaN/GaN MQW.[30]

Світлодіоди на основі InGaN/GaN широко застосовуються для генерації синього, зеленого і частково червоного випромінювання.[4] Колір випромінювання визначається вмістом індію в активному шарі: збільшення його концентрації зменшує ширину забороненої зони, що призводить до зсуву спектру у червону сторону. Світлодіоди цієї групи характеризуються відносно високою термостабільністю: температурний зсув піку випромінювання зазвичай становить 0.03–0.06 нм/°C для синього та зеленого світла. Однією з переваг InGaN-гетероструктур є наявність квантових ям (MQW), що забезпечують локалізацію носіїв заряду й зменшують імовірність їх рекомбінації через дефекти. Це забезпечує вищу внутрішню квантову ефективність (IQE) при нагріванні порівняно з іншими типами LED. Проте для червоних InGaN-світлодіодів, які потребують високого вмісту індію, виникають проблеми зі стабільністю кристалічної решітки, що обмежує їх ефективність.

На відміну від InGaN, світлодіоди на основі AlGaInP (алюміній-галій-індій-фосфіду) генерують випромінювання в червоній, оранжевій та жовтій частинах спектра.[12] Основною перевагою AlGaInP-світлодіодів є висока світлова

ефективність при кімнатній температурі, однак термостабільність таких джерел світла є низькою. Температурний коефіцієнт зсуву пікової довжини хвилі у них зазвичай сягає $0.14 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ — майже удвічі більше, ніж у InGaN-світлодіодів. Крім того, при підвищенні температури істотно знижується інтенсивність випромінювання через посилення нерепродуктивних рекомбінацій, зокрема через дефектні рівні та термоактивовані пастки. Це зумовлює швидке падіння IQE, особливо при поганому тепловідведенні. Таким чином, AlGaInP-світлодіоди є ефективними лише за контрольованих термічних умов.

Окрему групу становлять ультрафіолетові світлодіоди, які працюють у діапазоні 365–405 нм і базуються на GaN та AlGaN. Завдяки високій ширині забороненої зони ($E_g \approx 3.4\text{--}4.1 \text{ eV}$), такі структури є дуже термостабільними. Дослідження показують, що пікова довжина хвилі UV-A LED практично не змінюється з температурою, що робить їх ідеальними для застосування в медичних та аналітичних приладах. Проте зростання температури все одно знижує ефективність випромінювання через зменшення IQE, хоча спектральні характеристики залишаються стабільними. У порівнянні з видимими світлодіодами, UV-LED мають нижчий зовнішній квантовий вихід, але значно кращу спектральну стабільність.[10]

Білі світлодіоди, що сьогодні домінують у загальному освітленні, зазвичай реалізуються як комбінація синього світлодіода (InGaN) та фосфорного шару (наприклад, YAG:Ce), який частково перетворює синє світло у жовте. Спільне випромінювання цих двох компонент візуально створює біле світло. Ці системи мають складну температурну поведінку, оскільки зміні піддаються як синя компонента (через зміну E_g в InGaN), так і ефективність люмінесценції фосфору. Зі зростанням температури синій пік зміщується у червону сторону, а ефективність фосфорного шару зменшується внаслідок теплових втрат.[5] Це призводить до зменшення корельованої колірної температури (CCT) — біле світло стає "теплішим". У добре спроектованих LED-системах, де реалізовано оптимальний тепловий менеджмент, ці зміни можуть бути незначними (менше 2 нм зміщення

спектру), проте в масових виробках без теплової компенсації спостерігається суттєвий дрейф CCT.[11]

Таким чином, спектральні характеристики світлодіодів різного типу мають специфічну температурну поведінку, що визначається фізичними властивостями матеріалів, рівнем дефектності, типом гетероструктури та наявністю люмінофорів. Найвищу спектральну стабільність демонструють UV-A світлодіоди, хорошу — сині та зелені InGaN, а найнижчу — AlGaInP-світлодіоди. Білі LED, як складні гібридні системи, демонструють помірну стабільність, яка сильно залежить від якості конструкції та тепловідведення. Вибір типу світлодіода для конкретного застосування повинен враховувати ці особливості, особливо у випадках, коли стабільність кольору, спектра або інтенсивності має критичне значення.

1.4. Практичне значення температурної стабільності спектральних характеристик світлодіодів.

Світлодіоди є основою сучасних джерел світла і дедалі ширше використовуються в системах, що вимагають високої стабільності випромінювання. Одним із ключових параметрів, які визначають якість роботи LED у таких системах, є спектральна стабільність — здатність світлодіода зберігати незмінні спектральні характеристики в умовах змінної температури. Це включає стабільність пікової довжини хвилі випромінювання, ширини спектра (FWHM) та інтенсивності світлового потоку. У багатьох випадках від цих параметрів безпосередньо залежить точність, достовірність та ефективність функціонування системи загалом.

Однією з найбільш чутливих до температурної стабільності сфер є медична візуалізація, де світлодіоди використовуються в медичних лампах, системах ендоскопії, фототерапії новонароджених, хірургічному освітленні та спектроскопічних приладах для діагностики шкіри, тканин або крові. Наприклад, при використанні LED в дерматологічній діагностиці або при виявленні новоутворень змінений спектр може знижувати контрастність або викликати

некоректне відображення кольору тканин. Температурне зміщення спектра, яке змінює CCT (корельовану колірну температуру), може вплинути на візуальну оцінку лікаря або змінити чутливість приладу в певному спектральному діапазоні. У фототерапії для лікування неонатальної жовтяниці важливо витримати точну довжину хвилі (близько 460 нм), і її зсув при нагріванні LED може знижувати ефективність лікування.

У сфері прецизійного наукового освітлення, зокрема в мікроскопії (особливо флуоресцентній), спектроскопії, аналізі зображень і фотометрії, стабільність світлодіодного джерела критична для відтворюваності результатів. Наприклад, флуоресцентні барвники збуджуються у вузькому спектрі — навіть незначне зміщення довжини хвилі може призвести до неправильного збудження, ослаблення сигналу або помилкового спектрального аналізу. У мікроскопії, що використовує декілька LED-каналів (наприклад, RGB або UV), нестабільність спектра однієї компоненти змінює баланс освітлення та інтерпретацію кольору. Також у фотометричних калібрувальних установках необхідно, щоб LED-джерело мало стабільний спектр, що гарантує повторюваність вимірювань (рис. 1.3.).

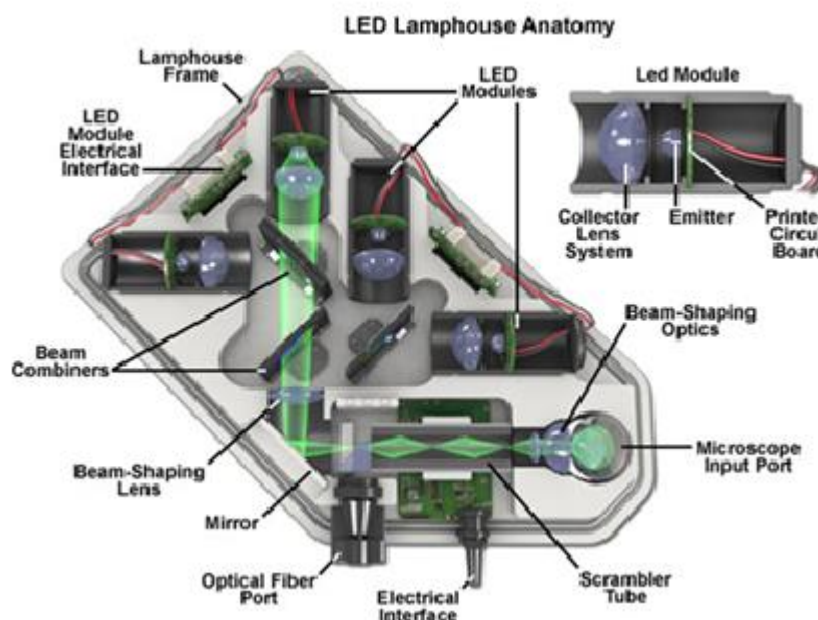


Рис. 1.3. – Модульний LED-корпус Colibri для мікроскопії. Освітлювач містить змінні світлодіодні модулі для збудження флуорофорів у всьому спектрі, забезпечуючи високий контраст і широкий динамічний діапазон.[27]

У агропромисловості LED-світлодіоди використовуються для керованого фотосинтетичного освітлення у теплицях і вертикальному землеробстві (рис. 1.4.). Рослини мають спектральну чутливість до певних ділянок світла — зокрема до червоного (660 нм) та синього (450 нм) випромінювання. Якщо через нагрівання світлодіода пікова довжина хвилі зміщується, ефективність фотосинтезу зменшується, що впливає на врожайність, ріст і якість продукції. Крім того, зниження інтенсивності випромінювання внаслідок нагрівання LED означає необхідність або збільшення тривалості підсвічування, або збільшення енергоспоживання, що економічно невигідно. [33]

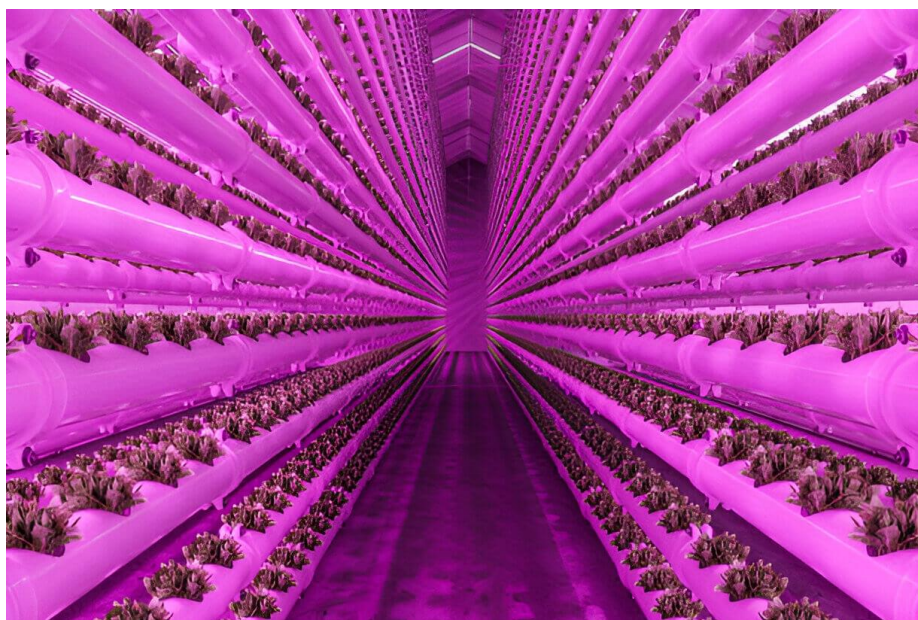


Рис. 1.4. – Типова система спектроскопії, яка складається з джерела світла, оптичного волокна, спектографа та детектора.[31]

У музейному освітленні та галузі збереження культурної спадщини стабільність спектра необхідна для забезпечення точності передачі кольору експонатів і зменшення впливу на матеріали (особливо у випадках, коли застосовуються UV-фільтри або LED з мінімізованим ультрафіолетовим компонентом). Температурне зміщення спектра може змінити відтінок освітлення або призвести до посиленого фотоокислення чутливих матеріалів.

В аерокосмічних системах, автомобільній електроніці, військових оптикоелектронних приладах, де світлодіоди працюють у режимах екстремальних температур, спектральна стабільність LED визначає точність візуалізації, орієнтації, передачі сигналів. Наприклад, в інфрачервоних LED-датчиках та системах нічного бачення температура безпосередньо впливає на ефективність сприйняття або передачі світлового сигналу. Температурна компенсація у таких системах повинна бути автоматизованою, а матеріали LED — максимально термостабільними. [34]

Також важливими є системи видимого світлового зв'язку (VLC, Visible Light Communication), які базуються на швидкій модуляції світлового потоку від LED (рис. 1.5.). Тут критично важливо, щоб спектральний профіль випромінювання залишався стабільним, інакше можуть виникати накладки каналів у багатоканальних системах (наприклад, при використанні WDM – wavelength division multiplexing). Це викликає зниження швидкості передачі, помилки у декодуванні та зменшення ефективності комунікації.

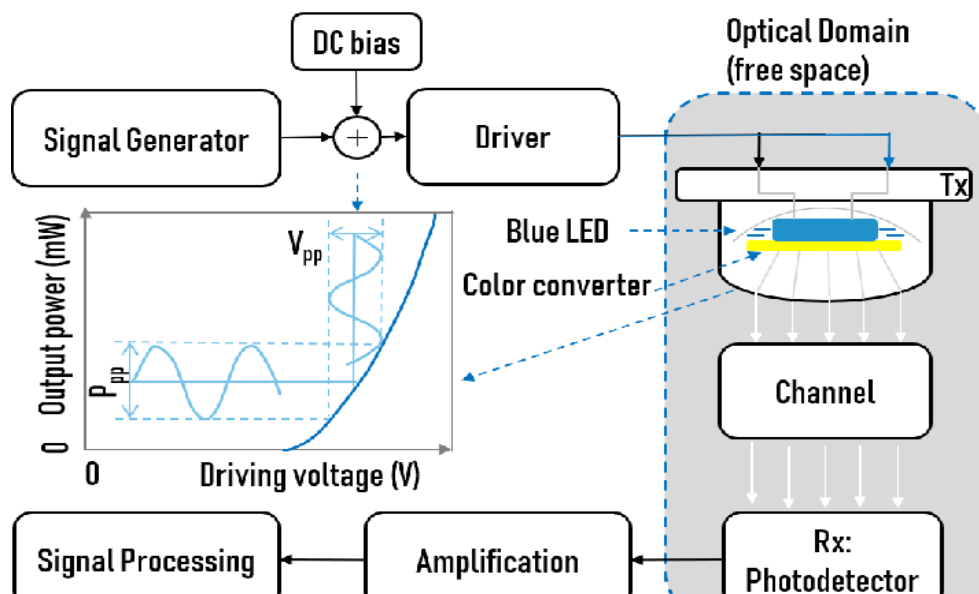


Рис. 1.5. – Схема системи видимого світлового зв'язку (VLC).

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

У фотографії, телебаченні та системах візуалізації для професійного використання (наприклад, у кіно, телестудіях або під час наукових зйомок) навіть незначне зміщення ССТ призводить до потреби в постійній калібровці обладнання, що ускладнює процес зйомки. Якщо у звичайному споживчому пристрої AWB (автоматичний баланс білого) може частково компенсувати зміни спектра, то в науковій або документальній зйомці точність кольору є критичною. Особливо це стосується освітлювальних панелей для макрозйомки, фільтраційного аналізу або спостережень змінного спектра (в астрономії, біології тощо).

Усі ці приклади свідчать про те, що температурна стабільність світлодіодів є не лише теоретичним аспектом, але й практично важливою вимогою для багатьох галузей, які базуються на оптикоелектронних технологіях. З цієї причини сучасні LED-системи часто обладнуються активними або пасивними системами термостабілізації, вбудованими сенсорами температури, регуляторами струму та іншими засобами компенсації. Вибір конкретного підходу залежить від вимог до точності, температурного діапазону, вартості та призначення системи.

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

Висновки до розділу 1

У даному розділі проведено комплексний аналіз фізичних основ генерації випромінювання світлодіодів та впливу температури на їхні спектральні характеристики. Було встановлено, що ключовим фактором, який визначає довжину хвилі випромінювання LED, є ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу. При підвищенні температури ширина забороненої

зони зменшується, що призводить до температурного червоного зсуву пікової довжини хвилі.

Також показано, що температура суттєво впливає на ширину спектра (FWHM) та інтенсивність випромінювання. Зокрема, зі зростанням температури спостерігається розширення спектра внаслідок термодинамічних процесів у зонній структурі та активації вищих локалізованих станів. Інтенсивність випромінювання зменшується через підвищення частки невиконувальних рекомбінацій, ефект Аугера, а також теплове згасання збуджених станів.

Проведено порівняльний огляд світлодіодів на основі різних матеріалів (InGaN, AlGaInP, GaN, AlGaInP) та продемонстровано, що найвищу спектральну стабільність мають ультрафіолетові LED, тоді як червоні світлодіоди на основі AlGaInP є найбільш чутливими до температурних впливів. Окремо розглянуто поведінку білих світлодіодів із люмінофорним шаром, де додаткову роль у зміні спектру відіграє температура фосфора.

Отримані результати дозволяють сформулювати основні фізичні закономірності температурного впливу на спектр LED, які необхідні для оптимального вибору типу світлодіода при проектуванні оптоелектронних систем, що працюють в умовах нестабільної температури.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЗАЛЕЖНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ СВІТЛОДІОДІВ

2.1. Спектроскопічні методи вимірювання.

Для дослідження спектральних характеристик світлодіодів при різних температурах використовують оптичну спектроскопію. Класична система вимірювання спектра складається з джерела світла (в даному випадку – світлодіода), оптичного входу (наприклад, щілини чи оптичного волокна), дисперсійного елемента (дифракційної ґратки) та детектора з матрицею (зазвичай CCD чи CMOS), як показано на рисунку 2.1.[13] Світловий потік від світлодіода через коліматор чи інтегруючу сферу вводиться в спектрограф, де ґратка розкладає випромінювання за довжиною хвилі. На фокальній площині спектрографа розташований CCD-детектор, який фіксує інтенсивність випромінювання як функцію довжини хвилі. Завдяки мультипіксельним матрицям можна швидко зчитувати спектр без механічного руху ґратки. Оптичні волокна часто застосовують для гнучкого перенесення світла від приладу до спектрометра. Для дослідження температурної залежності спектру світлодіода потрібен термостат (кріостат або термоелемент типу Пельтьє), який забезпечує задану температуру приладу та стабілізацію теплового режиму.

Основними складовими установки є спектрометр з відповідною чутливою матрицею, система підтримки температури світлодіода та джерело стабілізованого струму. Зокрема, застосовують:

Спектрометр – портативний чи лабораторний спектрограф із CCD- (або CMOS-) детектором і діапазоном вимірюваних довжин хвиль, що охоплює випромінювання досліджуваного світлодіода (наприклад, 350–900 нм). Важливою характеристикою є спектральна роздільна здатність (наприклад, порядку 0.1–1 нм) та можливість вибору часу інтеграції (від мілісекунд до секунд). У деяких системах

передбачена автоматична компенсація темнового сигналу матриці (dark-spectrum correction).

Система температурного контролю – термокамера або міні-кріостат з охолодженням/обігрівом Peltier-елементом. Похідні приклади пристроїв: пелтьєр-кріостат з температурним діапазоном приблизно від -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$ або рідкоазотний кріостат з діапазоном до $-150\dots+200^{\circ}\text{C}$. Температуру в безпосередній близькості від світлодіода контролюють термopарою або іншим датчиком, забезпечуючи стабілізацію та автоматичний моніторинг температури.[14]

Джерело живлення – стабілізоване джерело струму (джерело-міра, Source Measure Unit, SMU). Для точних вимірювань використовують спеціалізовані електропостачальні модулі, які працюють у режимі постійного струму (CC). У цьому режимі прилад підтримує заданий струм LED під різними навантаженнями, що необхідно для стабільного випромінювання. Наприклад, SMU може забезпечувати струм від мікроампер до десятків міліампер при напрузі до 20 В, що охоплює більшість типових LED-світлодіодів.

Інтегруюча сфера – для вимірювання сумарного світлового потоку LED. Інтегруюча сфера дозволяє збирати випромінювання у всі напрямки та подавати його у спектрометр. Однак при аналізі температурної залежності зазвичай достатньо прямого вимірювання спектра світлодіода. Комп'ютер із програмним забезпеченням збору спектра, оптичні фільтри (для уникнення насичення детектора), кабелі, термоблоки для кріплення зразка тощо.

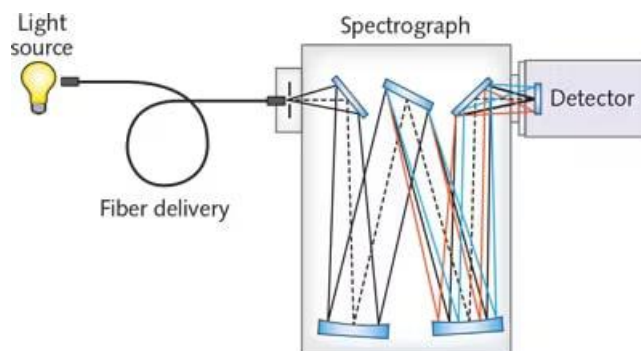


Рис. 2.1. – Типова система спектроскопії, яка складається з джерела світла, оптичного волокна, спектографа та детектора.[32]

Алгоритм експериментальної процедури типовий для спектроскопічних вимірювань:

Підготовка установки: Фіксують світлодіод у держаку або вводять його у термокамеру/кріостат.[15] Підключають джерело струму і спектрометр. Якщо використовується інтегруюча сфера, світлодіод розташовують на вході сфери, а від неї оптичним волокном світло подають на спектрометр (це дає стабільніші вимірювання інтенсивності).

Калібрування приладів: Перед вимірюванням проводять калібрування спектрометра. Зокрема, перевіряють і налаштовують довжини хвиль за еталонними спектрами (наприклад, випромінюванням ртутної або неонові лампи). Такі газові розряди мають відомі лінії випромінювання у всьому діапазоні спектра і використовуються для прив'язки пікселів CCD-матриці до довжин хвиль.[25] Інтенсивну калібрування спектрометра здійснюють за допомогою стандартної лампи (зазвичай каліброваної волфрамової лампи), спектр якої відомий і сертифікований NIM (NMI/NIST).[8] Це дозволяє отримати корекцію чутливості по всьому спектру та вимірювати відносно абсолютні значення інтенсивності. Також у цей час визначають та фіксують темновий спектр (з припиненим випромінюванням) для подальшого віднімання від виміряного сигналу.

Установка параметрів вимірювання: Задають постійний струм через світлодіод (із SMU) та очікують стабілізації джонту світлодіода (щоб його температура стабілізувалася).[24] Одночасно в термостабілізаторі встановлюють

початкову температуру (наприклад, найнижчу або яку необхідно протестувати). Дається час на вирівнювання температури світлодіода та довкілля.

Збір спектрів: На кожній встановленій температурі вимірюють спектр випромінювання світлодіода.[16] При цьому беруть кілька послідовних спектрограм (щоб усереднити шум) та усувають темновий сигнал. Час інтеграції детектора вибирають таким, щоб спектр не був перевантажений (пікова інтенсивність нижче порогу насичення). Записують усі спектри, фіксуючи температурні умови та струм через діод.

Після закінчення вимірів при одній температурі, змінюють температуру на наступну (підвищуючи чи знижуючи з кроком 5–10 °C або іншим стабільним кроком). Знову чекають стабілізації температури та повторюють зйомку спектрів.[17] Так поступово отримують серію спектральних даних при різних температурах в необхідному діапазоні.

Після збору даних кожний спектр обробляють для витягання характеристик:

Пікова довжина хвилі λ_{peak} знаходиться за максимумом інтенсивності спектру. Це можна зробити пошуком найбільшої точки спектрального розподілу або апроксимацією піка (наприклад, гаусівське чи лоренцівське наближення для підвищення точності).

Ширина спектру (FWHM) вимірюється як різниця довжин хвиль між двома точками, де інтенсивність дорівнює половині піку. Якщо спектр має складну форму, можна апроксимувати його криву й обчислити FWHM з фітваної функції.

Інтенсивність вимірюють або як інтеграл під кривою спектра (радіантний потік у певному діапазоні) або як висоту пікового максимуму. Вимірювання за інтегралом більш стійке до шуму, але іноді аналізують саме пікову інтенсивність.[23]

Далі будують графіки залежностей $\lambda_{\text{peak}}(T)$, FWHM(T) і I(T). Зазвичай крива $\lambda_{\text{peak}}(T)$ апроксимується лінійною залежністю в робочому діапазоні температур, хоча фізично пікова довжина хвилі приблизно визначається рівнянням Варшні для ширини забороненої зони і змінюється нелінійно при широкому діапазоні температур. Зі збільшенням температури λ_{peak} зростає (червоніє).[18] Аналогічно

можна спробувати апроксимувати $\text{FWHM}(T)$ лінією або поліномом: зазвичай ширина спектра незначно зростає з T через термо-розширення спектрального розподілу. Залежність $I(T)$ часто має експоненційну або логарифмічну форму: із підвищенням температури I суттєво спадає (збільшення T зменшує радіаційну ефективність світлодіода). Отримані параметри температурних коефіцієнтів (наприклад, наклон λ_{peak} в $\text{nm}/^\circ\text{C}$) порівнюють із літературними значеннями та враховують у подальшому моделюванні.

При математичній обробці даних необхідно коригувати криві на фоновий рівень, вирівнювати можливі зсуви з-за неточного відліку нуля спектрометра та усереднювати результати декількох вимірів для зменшення випадкових помилок. За потреби застосовують фільтрування шуму або поліноміальне згладжування до спектрів.[22]

Головними джерелами похибок у вимірюваннях є:

Похибка термодатчика і нерівномірність температури світлодіода призводять до невизначеності в реєстрації фактичної температури кристала. Для зменшення цієї похибки забезпечують щільний тепловий контакт діода з термостатом і використовують калібровані термопари.

Похибки встановленого струму (дрейф живлення) можуть спотворювати порівняння спектрів при різних температурах.[19] Рекомендується вимірювати та контролювати струм джерела за допомогою високоомних резисторів або вбудованих датчиків SMU.

До них належать спотворення форми спектра через недосконалості оптичної системи (розсіяння від стрічок другого порядку, шум від CCD-матриці, нестабільність інтеграції). Зокрема, існує темновий струм детектора, який змінюється з часом і температурою матриці; його слід віднімати (dark-current subtraction).[20] Також необхідно враховувати пропускну здатність щілини та розсіяння в ґратці, що може розмивати спектр, збільшуючи вимірний FWHM.

Якість вимірювань критично залежить від калібрування приладів. Спектрометр підлягає періодичній перевірці довжини хвилі: використовують еталонні джерела газового розряду (Hg, He, Ne) з відомими спектральними лініями.

Для калібрування інтенсивної характеристики спектрометра застосовують еталонні лампи (наприклад, кварцову галогенову лампу, калібровану за радіометричним спектром НМІ).[21] Це дозволяє отримати корекційний коефіцієнт чутливості приладу як функцію довжини хвилі. Також виконують темнове калібрування – вимір фоновому сигналу з відключеним LED.

Сигнальна обробка: Належать до неї похибки через цифрове дискретизацію (кількість біт АЦП), усереднення спектрів, інтерполяцію даних тощо. Для зниження флуктуацій прийнято накопичувати декілька спектрів і брати середнє. При аналізі FWHM важливо враховувати роздільну здатність приладу: якщо FWHM спектра подібний до апаратної роздільної здатності, то вимір може бути неточним.

Загалом, для отримання достовірних залежностей $\lambda(T)$, $I(T)$, $\text{FWHM}(T)$ необхідно чітко дотримуватися калібрувальних процедур і контролювати стабільність усіх частин установки. Такий підхід дозволяє мінімізувати систематичні помилки та забезпечити коректну інтерпретацію температурної поведінки спектральних характеристик світлодіодів.

2.2. Математична обробка результатів спектроскопії

Під час дослідження термічного впливу на характеристики світлодіодів важливо не лише якісно візуалізувати спектри, але й застосувати кількісні методи аналізу. Це дозволяє отримати точну інформацію про поведінку джерела випромінювання в різних температурних умовах і формалізувати ці 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 обробку масивів спектральних даних за допомогою алгоритмів пошуку 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:

$$A = \frac{\lambda_{peak} - \lambda_{left}}{\lambda_{right} - \lambda_{peak}}, \quad (2.3)$$

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:

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

Цей параметр є основним критерієм температурної стабільності джерела світла.

Хеометрія 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.

Інший метод — часткові найменші квадрати (PLS) — дозволяє встановити зв'язок між спектром і параметром, що змінюється (наприклад, температурою).

Метод 2D-COS дозволяє аналізувати динамічні зміни у спектрах при впливі зовнішнього фактора. Він розділяє зміни на синхронні та асинхронні компоненти, даючи змогу простежити, які спектральні ділянки реагують одночасно, а які — з затримкою.

Цей метод застосовується у сучасних дослідженнях для глибокого аналізу температурної поведінки спектрів.

Розрахунок похибок проводиться для кожного параметра окремо. Для пікової довжини хвилі та інтенсивності враховується як апаратна похибка, так і похибка цифрової апроксимації. Типові значення похибок: ± 0.5 нм для λ_{peak} ; $\pm 3\%$ для I_{max}

Також будуються інтервали довіри для залежностей $\lambda(T)$, $I(T)$, $\text{FWHM}(T)$, що дозволяє порівнювати результати між різними серіями вимірювань.

Результати цифрової обробки спектральних характеристик формують основу для вибору світлодіодів у термостабільних пристроях, калібрування моделей стабілізації та проектування оптичних приладів із фіксованими вимогами до довжини хвилі. Саме цей розділ, на відміну від описових попередніх частин роботи, дозволяє перейти до кількісного рівня аналізу та подальшої інженерної оптимізації.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було детально розглянуто загальну методику дослідження температурної залежності спектральних характеристик світлодіодів, що базується на використанні спектроскопічного аналізу випромінювання. Розглянуто типові структурні компоненти експериментальної системи: спектрометри, джерела живлення, термостабілізатори (зокрема з Пельтьє-елементами), інтегруючі сфери та допоміжні засоби, які забезпечують стабільні та відтворювані умови вимірювання.

Описано типові процедури збору спектральних даних при змінній температурі, зокрема вимірювання пікової довжини хвилі, ширини спектру (FWHM) та відносної інтенсивності випромінювання. Показано, що побудова температурних залежностей $\lambda(T)$, FWHM(T) та $I(T)$ потребує точного контролю параметрів та коректного калібрування вимірювального обладнання. Також окреслено основні джерела похибок, які можуть суттєво впливати на достовірність результатів.

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.

РОЗДІЛ 3. СТАБІЛІЗАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ПРИ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ

Температурна залежність спектру світлодіода зумовлена двома ключовими фізичними механізмами:

Зменшення ширини забороненої зони напівпровідника (E_g): при підвищенні температури атоми кристалічної решітки коливаються сильніше, що зменшує енергетичний бар'єр для переходу електрона з валентної зони до зони провідності. Це призводить до зменшення ширини забороненої зони (E_g) і, відповідно, до зсуву спектрального максимуму випромінювання у бік довших хвиль (red shift). Цей ефект має приблизно лінійний характер: для світлодіодів на основі InGaN характерне зменшення на 0.1–0.3 нм/°C.

Зменшення квантової ефективності та рекомбінаційні втрати: при підвищенні температури зростає ймовірність некорисної рекомбінації носіїв заряду (наприклад, через дефекти кристалічної решітки), що призводить до зменшення яскравості та зміни форми спектра. Часто спостерігається не лише зниження інтенсивності, а й розширення спектра (збільшення FWHM).

Для синього світлодіода ($\lambda \approx 460$ нм) на основі InGaN типова температурна залежність становить: зсув спектрального піку: до +15 нм при підвищенні температури з 25°C до 85°C; зниження інтенсивності: до 25%; розширення FWHM: на 5–8 нм.[28]

Це може критично вплинути на якість зображення в оптичних системах, точність кольоропередачі у візуалізаційних застосуваннях та ефективність збудження флуорофорів у флуоресцентній мікроскопії.

У білих світлодіодах спектральні зміни призводять до: зсуву корельованої колірної температури (CCT) — наприклад, з 5000 K до 4300 K; погіршення індексу кольоропередачі (CRI) — падіння на 5–10 одиниць; появи зеленого чи рожевого відтінку (порушення балансу білого).

3.1. Пасивні методи термостабілізації

Пасивні методи стабілізації спектральних характеристик світлодіодів є основою забезпечення їхньої надійної роботи у широкому діапазоні температур. Ці методи не потребують електричного живлення або складної керованої системи й базуються виключно на оптимізації теплового дизайну, виборі матеріалів з високою теплопровідністю, а також геометричному компонуванні елементів освітлювального модуля. Основна мета — зменшити нагрів активної області світлодіода і забезпечити відведення тепла від р-п переходу, стабілізуючи його температуру та мінімізуючи зміщення пікової довжини хвилі випромінювання.

Одним із ключових елементів пасивного охолодження є радіатори. Вони виготовляються з металів із високою теплопровідністю — зазвичай алюмінію або міді. Мідні радіатори мають теплопровідність близько $390 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, що забезпечує надзвичайно ефективне охолодження, проте вони є важкими та дорогими. Алюміній має нижчу теплопровідність (приблизно $220 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), однак значно легший і дешевший, що робить його основним матеріалом у серійному виробництві. Форма радіатора також має значення: ребра, порожнисті канали, багатогранні структури дозволяють збільшити площу теплообміну і покращити природну конвекцію.

Для забезпечення ефективного теплового контакту між світлодіодом і радіатором використовуються термоінтерфейсні матеріали. Це можуть бути:

Термопасти — суміші на основі оксиду цинку (ZnO), оксиду алюмінію (Al_2O_3), діоксиду кремнію (SiO_2) або срібла. Вони заповнюють мікронерівності між поверхнями, знижуючи тепловий опір.

Термопрокладки — готові м'які листи (наприклад, Bergquist Gap Pad), які мають теплопровідність $2\text{--}6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ і забезпечують зручність у монтажі та повторному використанні.

Графітові фольги — тонкі пластини з високоанізотропною теплопровідністю, наприклад Panasonic PGD Graphite Sheet. Вони здатні передавати тепло в площині до $1600 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, але мають значно нижчу провідність у напрямку товщини.

Окрему увагу заслуговує конструктивна оптимізація друкованих плат. У LED-системах часто застосовують металізовані друковані плати (MCPCB), де підшаром під мідною доріжкою є алюмінієвий або мідний сердечник. Така плата ефективно розподіляє тепло від кристалу по всій площі модуля, зменшуючи локальне перегрівання. MCPCB використовуються в багатьох високоякісних джерелах світла, зокрема у професійних LED-прожекторах і медичному освітленні.

Ще одним важливим пасивним підходом є забезпечення природної вентиляції корпусу пристрою. Завдяки вентиляційним отворах, виконаним за принципом "димової труби" (chimney effect), досягається природна циркуляція повітря, що прискорює охолодження модуля без додаткових витрат енергії.

Приклади реалізації пасивних методів:

На рисунку 3.1. зображені світлодіоди серії Cree XP-G3, оснащені інтегрованими алюмінієвими підкладками та високоефективними тепловідводами, які дозволяють підтримувати температуру в межах робочого діапазону навіть за щільного компонування.

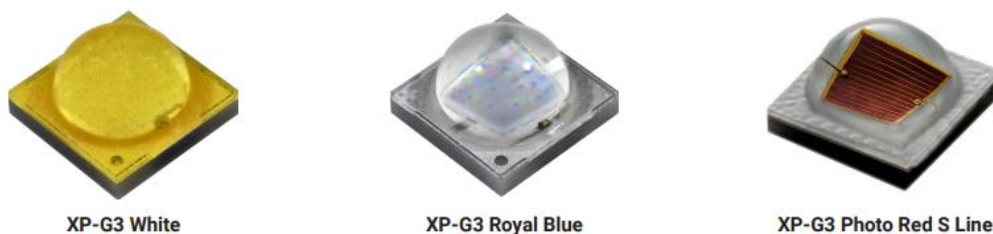


Рис. 3.1. – Серія світлодіодів Cree XP-G3.[25]

COB-модулі Bridgelux Vero SE містять металеву тепловідвідну основу та допускають гнучкий вибір зовнішнього радіатора залежно від умов експлуатації (рис. 3.2.). При температурах навколишнього середовища до 50 °C вони можуть працювати без додаткового охолодження.



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

Модулі оснащені металевою підкладкою з високою теплопровідністю та інтегрованими отворами для кріплення до радіаторів. Завдяки ефективному тепловідведенню, пристрої можуть працювати без активного охолодження при температурах довкілля до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У мікроскопічних освітлювачах типу ZEISS Colibri використовуються МСРСВ у поєднанні з наскрізними термоканалами, що проходять через алюмінієвий корпус для кращого тепловідведення.

Правильний вибір матеріалів, теплових інтерфейсів та геометрії тепловідведення є критично важливим етапом у проєктуванні світлодіодних систем із стабільними спектральними характеристиками при змінній температурі навколишнього середовища.

3.2. Активні методи термостабілізації

Активна термостабілізація включає в себе керовані системи охолодження, які не лише відводять надлишкове тепло, але й підтримують робочу температуру світлодіода в заданих межах. На відміну від пасивних рішень, ці методи базуються на використанні зворотного зв'язку, мікропроцесорного керування та енергоактивних пристроїв. Вони дозволяють в режимі реального часу реагувати на зміну теплового режиму кристалу, стабілізуючи його оптичні характеристики.

Термоелектричне охолодження (елементи Пельтьє). Термоелектричні модулі (елементи Пельтьє) є одним з найефективніших активних способів охолодження. Принцип їх дії ґрунтується на ефекті Пельтьє — виникненні теплового потоку при протіканні електричного струму через контакт двох різних провідників або напівпровідників (рис. 3.3.). Один бік модуля охолоджується, а другий нагрівається. Це дозволяє дуже точно підтримувати стабільну температуру світлодіода, компенсуючи як внутрішній нагрів, так і зміни температури довкілля.

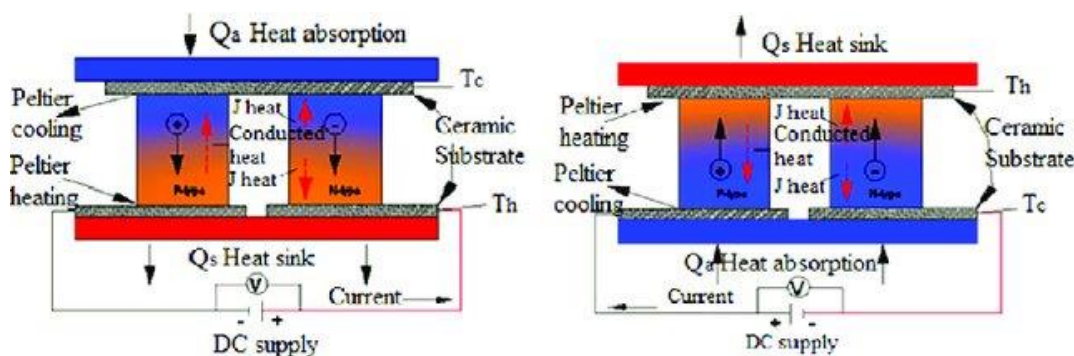


Рис. 3.3. – Принципова схема ефекту Пельтьє для охолодження та нагрівання.[26]

Перевагами Пельтьє-охолодження є: Висока точність стабілізації температури (до $\pm 0,1$ °C); Можливість охолодження нижче температури навколишнього середовища; Компактність та відсутність рухомих частин; Високий ступінь інтеграції в мікроскопічних системах.

Недоліки: Високе енергоспоживання (низька ефективність при великих теплових потоках); Необхідність у відведенні тепла з гарячої сторони (вимагає додаткового радіатора або примусового охолодження); Складність управління (необхідна точна термостабілізація з боку контролера). У більшості практичних реалізацій модулі Пельтьє поєднуються з датчиками температури (термопарами або цифровими сенсорами) і цифровим ПІД-регулятором, що дозволяє здійснювати прецизійне керування температурним режимом світлодіодного елемента.

у системах мікроскопічного освітлення ZEISS Colibri 7 для кожного окремого кольорового LED-каналу реалізоване охолодження через Пельтьє-елемент із замкненим цифровим контуром контролю температури, що забезпечує

спектральну стабільність навіть при багатогодинному безперервному використанні.

Температурно-керовані драйвери (із компенсацією струму) Іншим поширеним підходом до активної стабілізації є використання джерел струму зі зворотним зв'язком по температурі. Основним елементом є терморезистор негативного температурного коефіцієнта (NTC), який вимірює температуру довкола світлодіода. При перевищенні певного порогу мікроконтролер або аналогова схема зменшує струм живлення, тим самим знижуючи теплове навантаження на LED-кристал.

Переваги: Простота реалізації та низька вартість компонентів; Відсутність потреби в активному охолодженні для систем середньої потужності; Можливість реалізації плавного контролю яскравості залежно від температури.

Недоліки: Зниження світлової потужності як наслідок обмеження струму; Менша точність температурної стабілізації порівняно з охолодженням; Повільна реакція при використанні аналогових схем без адаптивної логіки.

У комбінації з MCPCB та термопрокладками такі драйвери часто використовуються у LED-освітлювальних системах, що експлуатуються в умовах змінного клімату або інтенсивного використання.

Примусове повітряне охолодження. Даний метод полягає в примусовому створенні повітряного потоку над джерелом тепла — як правило, радіатором, до якого прикріплено світлодіодний модуль. Основним елементом є вентилятор або мініатюрний компресор, керований мікроконтролером у відповідь на сигнал термодатчика. Ефективність такого охолодження може в кілька разів перевищувати природну конвекцію, особливо при високих теплових навантаженнях (>20 Вт).

Переваги: Висока продуктивність при відносно простій конструкції; Відносно низька вартість у порівнянні з рідинним охолодженням; Можливість гнучкого керування потужністю охолодження залежно від умов.

Недоліки: Наявність рухомих частин (потреба в обслуговуванні, шум, пил); Обмежена довговічність компонентів у складних середовищах.

у LED-прожекторах промислового призначення вентилятор працює разом з температурним датчиком, а контролер адаптує швидкість обертання залежно від температури, забезпечуючи оптимальний режим роботи світлодіодів.

Рідинне охолодження. Цей метод є найпродуктивнішим з точки зору тепловідведення, хоча й найскладнішим у реалізації. Рідинне охолодження передбачає наявність: герметичного контуру з циркуляційним насосом; радіатора для відведення тепла; водоблока, який безпосередньо контактує з теплоемісійною частиною світлодіода. Системи можуть працювати з дистильованою водою, гліколевими сумішами або діелектричними охолоджуючими рідинами (наприклад, 3M Fluorinert).

Переваги: Максимальна ефективність тепловідведення (>150 Вт); Можливість застосування у герметичних корпусах, де відсутня вентиляція; Висока стабільність температури навіть при динамічних навантаженнях.

Недоліки: Складність і вартість системи; Потреба в герметичності, контролі витоків та регулярному обслуговуванні.

Рідинне охолодження застосовується в лабораторних еталонних джерелах світла для калібрування оптичних приладів, а також у військових пристроях, де світлодіоди працюють у замкнутому середовищі з підвищеними температурними навантаженнями.

Ключовим елементом усіх активних систем є мікропроцесорне або мікроконтролерне управління. Типові мікросхеми: STM32, ATmega, ESP32, які реалізують: зчитування сигналів із термодатчиків (термопари, NTC, цифрові сенсори типу DS18B20); обчислення похибки температури; PID-регулювання охолоджуючого елемента (вентилятор, модуль Пельтьє, насос); аварійні алгоритми вимкнення при перегріві або несправності системи охолодження.

У більш складних випадках використовуються інтерфейси логування даних, системи самонавчання або адаптивне моделювання температурних режимів залежно від умов експлуатації.

Таким чином, активні методи термостабілізації дозволяють суттєво підвищити надійність і точність роботи світлодіодних пристроїв у широкому

спектрі високоточних застосувань. Їх ефективність найбільш повно розкривається при поєднанні з високоякісними пасивними рішеннями — радіаторами, МСРСВ, термопрокладками, що у сукупності формує збалансовану систему температурного менеджменту світлодіодного модуля.

3.3. Електронні методи компенсації температурного зсуву спектру

Окрім конструктивних та пасивних рішень, одним із найефективніших підходів до стабілізації спектральних характеристик світлодіодів є використання електронних засобів компенсації. Ці методи базуються на активному контролі температури та керуванні електричними параметрами LED з метою компенсації спектральних зсувів, викликаних нагрівом р-п переходу, що є головним джерелом тепла у світлодіоді.

Основні принципи електронної компенсації. Для контролю температури використовуються: NTC-терморезистори (наприклад, B57891M0104J000 від EPCOS); цифрові сенсори температури (DS18B20, TMP102); термопари типу К для промислових застосувань.

Ці сенсори встановлюють у безпосередній близькості до кристала LED або на теплопровідну основу, що забезпечує швидкий відгук.

Обробка температурних даних: Центральним елементом системи є мікроконтролер. Наприклад: STM32F103 (ARM Cortex-M3), популярний завдяки низькому енергоспоживанню і великій кількості периферії; ESP32 — має вбудований Wi-Fi та Bluetooth для дистанційного моніторингу; Arduino Nano або Uno для простих лабораторних застосувань. МК опитує сенсори, виконує обчислення з урахуванням коефіцієнтів температурної компенсації та формує керуючий сигнал.

Регулювання параметрів LED: Керування може здійснюватись: Через широтно-імпульсну модуляцію (PWM), яка змінює середній струм на світлодіоді; Через ЦАП (DAC), що формує аналогову напругу для драйвера струму. Наприклад,

драйвер Texas Instruments TPS92512 підтримує керування як по PWM, так і аналоговим сигналом, що робить його зручним для реалізації зворотного зв'язку.

Алгоритмічна компенсація: У більш складних системах використовується PID-регулятор, який враховує пропорційну, інтегральну та диференціальну складову відхилення температури. Це дозволяє уникнути «перерегулювання» та забезпечити м'яке керування.

Усі ці системи доводять, що електронна компенсація є не лише можливою, а й необхідною умовою для застосування світлодіодів у високоточному обладнанні. Саме поєднання температурного моніторингу, гнучкого керування струмом та алгоритмічної обробки дозволяє реалізувати стабільне випромінювання незалежно від умов навколишнього середовища.

3.4. Стратегія стабілізації спектральних характеристик світлодіодів

У процесі вивчення впливу температури на спектральні характеристики світлодіодів було з'ясовано, що найбільш суттєвої зміни зазнає довжина хвилі максимуму випромінювання ($\lambda_{\max}$), яка зростає зі збільшенням температури, а також ефективність світловіддачі. Для забезпечення стабільної роботи світлодіодів у широкому діапазоні температур необхідно впроваджувати комплексні підходи до термостабілізації.

Ключовими компонентами стратегії термостабілізації є наступні:

Матеріали з високою теплопровідністю. Необхідно використовувати теплопровідні підкладки, які мають малий тепловий опір і забезпечують ефективне відведення тепла від кристалу світлодіода. Найкращим вибором є підкладки на основі алюмінію або міді з тепловідвідними трасами та наскрізними отворами для посилення теплового переносу.

Оскільки теплове навантаження є основним фактором зміни спектральних характеристик, необхідно застосовувати комбіновані системи охолодження. Пасивне охолодження реалізується через масивні анодовані алюмінієві або мідні радіатори з великою площею поверхні. Активне охолодження передбачає

використання вентиляторів або термоелектричних модулів (елементи Пельтьє), які дозволяють підтримувати сталу температуру з точністю до ± 1 °C навіть при значних коливаннях зовнішнього середовища.

Обов'язковим компонентом є високоточне вимірювання температури р-п переходу світлодіода. Це може бути реалізовано за допомогою інтегрованих цифрових сенсорів (наприклад, DS18B20 або аналогічних), розміщених якомога ближче до активної області. Додатково доцільно передбачити аналогові NTC-терморезистори для дублювання сигналу і реалізації швидкого аналогового зворотного зв'язку.

Для підтримання стабільності спектру необхідно реалізовувати системи динамічного керування світлодіодом на основі зворотного зв'язку. Для цього доцільно використовувати мікроконтролери, які отримують дані з температурних сенсорів та керують струмом або напругою живлення. Найефективнішими є PID-регулятори, які дозволяють плавно і точно коригувати параметри роботи LED у відповідь на зміну температури.

У разі, якщо характер температурної залежності спектру відомий заздалегідь, можна реалізувати табличну або аналітичну модель компенсації. Наприклад, при кожному циклі опитування температури, мікроконтролер може змінювати робочий струм або активувати компенсаційні канали (у разі використання багатоканального LED або RGB-матриць), щоб зберегти стабільність спектральної відповіді

Для високоточних застосувань (спектрофотометри, оптичні датчики) доцільно використовувати оптичні еталонні сенсори або мініатюрні спектрометри, які дозволяють проводити реальну перевірку стабільності спектру й автоматично калібрувати вихід світлодіода в реальному часі.

Запропонована система не залежить від конкретного типу світлодіода, а базується на загальних фізичних принципах — зокрема, на необхідності зниження температурного впливу на р-п перехід та активну зворотну компенсацію зміни спектральної характеристики. Важливо, що всі елементи цієї стратегії можна реалізувати на рівні лабораторного або серійного пристрою з використанням стандартних компонентів.

Таким чином, системний підхід до термостабілізації спектру LED, який об'єднує теплові, електронні та алгоритмічні методи, є ефективним рішенням для забезпечення стабільності спектру в умовах змін температури навколишнього середовища. Саме впровадження такої інтегрованої стратегії дозволить реалізувати світлодіодні модулі з високою надійністю та точністю оптичних вимірювань.

Висновок до розділу 3

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. Було показано, що жоден із методів у ізоляції не здатен забезпечити достатню точність та стабільність спектру в умовах експлуатації. 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. Особлива увага приділена компенсації спектрального зсуву шляхом алгоритмічного коригування, що особливо важливо для прецизійних оптичних застосувань.

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.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи було проведено теоретичний аналіз фізичних процесів, що визначають спектральні характеристики світлодіодів, а також методологічний огляд способів дослідження їхньої температурної залежності. Показано, що зміна температури безпосередньо впливає на ширину забороненої зони напівпровідникового матеріалу, що призводить до зсуву пікової довжини хвилі випромінювання в довшу сторону, тобто до так званого червоного зсуву.

Встановлено, що підвищення температури також викликає розширення спектра (зростання FWHM) та зменшення інтенсивності світлового потоку через активацію нерадіаційних механізмів рекомбінації. Проведене порівняння спектральної чутливості світлодіодів на основі різних матеріалів (InGaN, AlGaInP, GaN/AlGaIn) показало, що ультрафіолетові світлодіоди мають найвищу термостабільність, а червоні – найменшу.

У роботі було також систематизовано методику дослідження температурної залежності спектральних характеристик LED, розглянуто будову експериментальних систем, типи спектрометрів, особливості калібрування, алгоритми аналізу спектральних даних. Акцентовано увагу на важливості контролю похибок та точності температурного моніторингу.

Отримані результати можуть бути використані при виборі світлодіодів для оптичних і сенсорних систем, які працюють в умовах нестабільної температури, а також як основа для подальших експериментальних досліджень спектральної стабільності напівпровідникових джерел світла.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

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. Haraoubais 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. Osaya 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-om/lighting/article/55257909>
34. Light-Emitting Diodes in Airfield Lighting Applications // Federal Aviation Administration, Office of Aerospace Medicine. – 2022. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/media/Light-Emitting%20Diodes%20in%20Airfield%20Lighting%20Applications.pdf