

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Оптичні та електричні характеристики технологія сучасних потужних
світлодіодів
(тема)

Виконала:
студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1
Кучер Є.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна
техніка»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма «Мікро та наноелектроніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. МЕЕПП Бендеберя Г. М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри МЕЕПП

(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
 Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна техніка»
(код і повна назва)
 Тип програми освітньо-професійна
 Освітня програма «Мікро та наноелектроніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Кучеру Євгену Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Оптичні та електричні характеристики технологія сучасних потужних світлодіодів затверджена наказом університету від 26 травня 2025 р. № 414Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Технології і конструкції світлодіодів 2. Характеристики світлодіодів. 3. Обладнання для дослідження світлодіодів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Технології і конструкції світлодіодів _____

2. Характеристики світлодіодів. _____

3. Обладнання для дослідження світлодіодів

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

1. Презентація – 9 слайдів. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	26.05.2025	
2	Огляд розвитку технологій і конструкцій	27.06.2025	
3	Параметри і характеристики світлодіодів	30.05.2025	
4	Методи покращення параметрів и обладнання	03.06.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки	06.06.2025	5
6	Рецензування, нормоконтроль	09.06.2025	
7	Захист роботи	16.06.2025	

Дата видачі завдання 26 травня 2025 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ ст. викладач Бендеберя Г.М. _____
(підпис) (посада, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 40 сторінок, 13 рисунків, 8 джерел посилення, 2 додатки.

СВІТЛОДІОД, ТЕХНОЛОГІЯ,, ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ, ВИМІРЮВАННЯ

Мета роботи – дослідження технології, конструктивних рішень і можливостей покращення параметрів світлодіодів.

Об'єкт дослідження – світловипромінюючі діоди

Метод дослідження – аналіз літературних джерел та інтернет ресурсів.

Актуальність роботи пов'язана з широким застосуванням енергоефективних світлодіодних випромінювачів для вирішення наукових, виробничих, комунальних та побутових завдань, тому питання підвищення надійності і стабільності параметрів світлодіодів, що пов'язано з конструктивними і технологічними рішеннями, є важливими.

В представленій роботі проведено короткий огляд технології створення LED; технологічних і конструктивних методів, спрямованих на покращення їх параметрів та характеристик; зазначено фактори, що впливають на деградацію параметрів LED і шляхи їх усунення; звернуто увагу на можливості застосування імпульсного режиму LED у деяких промислових застосуваннях; наведено приклад обладнання для вимірювання параметрів LED.

Результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 40 pages, 13 figures, 8 references, 2 appendices.

LED, TECHNOLOGY, , RESEARCHPARAMETERS, MEASUREMENT

The purpose of the work is to study technology, design solutions, and possibilities for improving LED parameters.

The object of research is light-emitting diodes

The research method is the analysis of literary sources and Internet resources.

The relevance of the work is associated with the widespread use of energy-efficient LED emitters to solve scientific, industrial, municipal and household problems, therefore the issues of increasing the reliability and stability of LED parameters, which is associated with design and technological solutions, are important.

The presented work provides a brief overview of the technology for creating LEDs; technological and design methods aimed at improving their parameters and characteristics; factors affecting the degradation of LED parameters and ways to eliminate them are indicated; attention is paid to the possibilities of using the pulsed mode of LEDs in some industrial applications; an example of equipment for measuring LED parameters is given.

The results of the work can be used in the educational process.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ LED СТРУКТУР.....	10
2 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ І НАПРЯМКИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ.....	16
2.1 Основні характеристики LED.....	16
2.2 Методи підвищення ефективності.....	18
3 ІМПУЛЬСНИЙ РЕЖИМ ЖИВЛЕННЯ LED.....	25
3.1 Світлотехнічні та температурні параметри UV-LED при імпульсному живленні.....	25
3.2 Аналіз характеристик потужних LED в різних режимах Експлуатації.....	28
4 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СВІТЛОДІОДІВ.....	35
ВИСНОВКИ.....	38
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИПАННЯ.....	39
ДОДАТОК А.....	41
ДОДАТОК Б.....	42

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

E_g - ширина забороненої зони;

λ – довжина хвилі випромінювання;

λ_{\max} - довжина хвилі випромінювання у максимумі спектральної
характеристики;

АО - активна область;

ВАХ - вольт-амперна характеристика;

ВТАХ - ват-амперна характеристика;

ПГС - подвійна гетероструктура;

ККД - коефіцієнт корисної дії;

КРС - квантово-розмірна структура;

ПК - персональний комп'ютер;

ПЗ - програмне забезпечення;

РБВ - розподілені брэгівські відбивачи;

LED – світловипромінюючий діод;

UV – ультрафіолетовий.

ВСТУП

Основою для створення енергоефективних світлодіодів монохроматичних світлодіодів в УФ та синьо-зеленій області спектру та світлодіодів білого світіння є напівпровідникові матеріали на основі нітридів 3 групи. Вказані потужні LED застосовуються в системах освітлення, в різних приладах та пристроях для систем дезінфекції середовищ і поверхонь, полімеризації в хімічній промисловості та медицині для візуалізації інформації. Велика ширина забороненої зони дає можливість використовувати їх за високих температур і під радіаційним впливом. Розвиток технології необхідних матеріалів стримувався кількома факторами:

- труднощами отримання об'ємних монокристалів нітридів відомими методами, які зазвичай застосовуються для виробництва монокристалів інших напівпровідників через їх високі температури плавлення, високу леткість азоту при цьому та його низьку розчинність у розплаві сполуки;

- у цих матеріалах не вдавалося отримати електропровідність р-типу, а концентрація електронів у з'єднаннях n-типу була надто великою.

- не вдавалося виростити монокристалічні епітаксійні плівки нітридів на підкладках інших матеріалів.

Проблему синтезу монокристалічних плівок нітридів з регульованим рівнем домішки було вирішено з появою технології, яка тепер широко застосовується і нагадує технологію «кремній на сапфірі» (КНС). У цьому методі на чужорідну підкладку, наприклад монокристалічний сапфір, спочатку наносився тонкий шар аморфного AlN або GaN при низькій температурі, а потім проводиться рекристалізація відпалом при високій температурі. При вирішенні другої проблеми, пов'язаної зі стабільною провідністю р-типу, пов'язаної з утворенням водневих комплексів з акцепторами. то ці комплекси руйнують опроміненням електронами або відпалом за високої температури.

Незважаючи на досягнуті результати, технологія сполук на основі нітридів продовжує удосконалюватися з урахуванням досягнень матеріалознавства та нових конструктивних рішень. Крім технологічних аспектів виробництва, на потужність, ефективність, термін служби світлодіодних структур впливають питання, пов'язані з експлуатацією: режиму живлення, температури тощо.

1 РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ LED СТРУКТУР

Одним із пріоритетних напрямків розвитку оптоелектроніки є створення енергоефективних випромінювачів в ультрафіолетовій та синьо-зеленій областях спектру, а також удосконалення структур LED+люмінофор білого світіння.

Завдяки своїм електрофізичним властивостям структури на основі твердих розчинів нітриду галію застосовуються в різних областях мікроелектроніки: випромінювачах короткохвильової частини спектру (ультрафіолетові, сині, зелені), у діодах Шоттки, силових НВЧ-транзисторах. Максимуми спектру випромінювання в гетероструктурних світлодіодах першого покоління на основі нітриду галію та його твердих розчинів (нітриду галію – індія InGaN і нітриду галію – алюмінію AlGaN) відповідали довжинам хвиль синій (від 451 нм до 486 нм), сине – зеленої (від 506 нм до 521 нм) області спектру.

Спочатку для отримання плівок нітрид галію (GaN) застосовували реакцію рідкого галію з аміаком, яка відбувається при підвищеній температурі на підкладці з сапфіру (Al_2O_3). Дослідження отриманих плівок показали, що їх вихідна провідність без додаткового легування була n-типу. Для отримання провідності p-типу з метою створення p-n-переходу використовували цинк, проте при необхідних досить високих концентраціях Zn плівки нітриду галію виявляли діелектричні властивості. Перші серійні світлодіоди на основі GaN являли собою МДП-структури, що випромінювали в блакитній (475 нм) та зеленій областях спектру. Цинк у промисловій технології замінили магнієм. Це дозволило отримати структури зі спектрами випромінювання у блакитній та фіолетовій (430 нм) області. Однак слід зазначити, що створені плівки, леговані магнієм, не мали діркової провідності, і також виявляли діелектричні властивості, тому люмінесценція в них відбувалася або за рахунок інжекції

неосновних носіїв, або за рахунок ударної іонізації у діелектричних шарах структури у сильному електричному полі.

Дослідники під керівництвом Ісаму Акасакі вдалося отримати світлодіод на основі GaN із шаром р-типу провідності. Активація стабільних акцепторів магнію проводилася під час опромінення легованих плівок GaN потоком електронів. Додаткове легування р шару GaN дозволяє активувати глибокі акцепторні домішки. Це дозволило створювати GaN-структури з р-n-переходом, що важливо як для оптоелектроніки, так й у технології мікроелектроніки загалом. Зараз на основі легованих магнієм GaN структур виробляються LED і напівпровідникові лазерні діоди, що випромінюють в короткохвильовій області видимого спектру.

Перший нітрид-галлієва структура з р-n-переходом на сапфіровій підкладці випромінювала в UV та синій частині спектру, а її ефективність становив близько 1%.

Подальший розвиток технологія LED GaN – структур отримала із переходом на гетероструктури. Були отримані перші світлодіоди блакитного і зеленого світіння на основі гетероструктур GaN/In(Al)GaN, коли розробили технологію синтезу нітриду галію методом металорганічної газофазної епітаксії (MOCVD) і використовували більш відповідний для цієї технології спосіб активації домішки магнію – високотемпературний відпал. Енегоефективність таких LED досягла 10%. Дослідниками фірми Nichia була також показана можливість створення світлодіодів білого світіння на основі кристалів GaN, що випромінюють у синьому діапазоні, з нанесеним на їх поверхню люмінофором для перетворення випромінювання кристала в зелено-помаранчевій області спектру,

Незважаючи на відносно високий квантовий вихід, перші структури зарекомендувалися значною кількістю домішок та дефектів, які знижували їхню ефективність. При малих прямих струмах у спектрах синіх LED виявлялася тунельна смуга в сильних електричних полях активної області, викликаних флуктуаціями потенціалу і кулонівськими полями домішок.

Подібні тунельні складові виявлялися і у ВАХ. При зворотному зміщенні рівному приблизно $3E_g$, в структурах LED синього світіння відбувався пробій і ударна іонізація, з яких відбувалося випромінювання. У спектрах спостерігалася широка смуга в діапазоні енергії квантів від 2,2 до 2,3 еВ, що відповідало так званій «жовтій смузі» дефектів у GaN, яка пов'язана з донорноакцепторними парами та/або подвійними донорами. З розвитком технології концентрація точкових дефектів та дислокацій знижувалася.

В даний час багато фірм виробляють кристали на основі структур з нітриду галію синього кольору світіння, вирощених на підкладках із сапфіру (Al_2O_3). Їх ККД становить величину від 40 до 45%.

Для зниження вартості підкладок дослідники знайшли альтернативу, яка передбачає використання підкладок з карбіду кремнію (SiC). Дослідження з вирощування GaN структур на SiC підкладках розпочала компанія Cree. З 2005 р. компанії Nichia та Cree забезпечували понад 80% світового виробництва кристалів синього та зеленого світіння, причому Cree використовує для вирощування підкладки із SiC, а Nichia – сапфірові підкладки.

У SiC майже на порядок більша теплопровідність ніж у сапфіру (3,8 Вт/см·К проти 0,3 Вт/см·К). Це значно покращує відведення тепла від р-n-переходу (активна область), що особливо важливо для кристалів з робочими струмами більшими ніж 100 мА. Кристалічна ґратка політипу карбіду кремнію 6H-SiC краще узгоджена з нітридом галію, порівняно з підкладкою Al_2O_3 . Неузгодженість ґрат GaN і SiC дорівнює 1:0,967, тобто. становить приблизно 3,3%. Для постійних ґрат GaN і Al_2O_3 різниця становить 1:1,148, т.е. е. приблизно 14,8%. Схематично це представлено (рисунок 1.1).

Внаслідок меншого неузгодження постійних ґраток підкладки та синтезованого матеріалу концентрація дефектів у структурі значно знижується, що призводить до зростання квантового виходу. Оскільки карбід кремнію – напівпровідник, це дає можливість створювати на його основі кристали з вертикальним механізмом протікання струму для зниження опору структури і робочої напруги.

У процесі постростової обробки через маску стравлюється частина SiC-підкладки товщиною до 35 мкм для формування оптичної системи, що забезпечує збирання світлового потоку з поверхні. Це полегшує покриття структури кристала люмінофором при виробництві LED білого світіння.

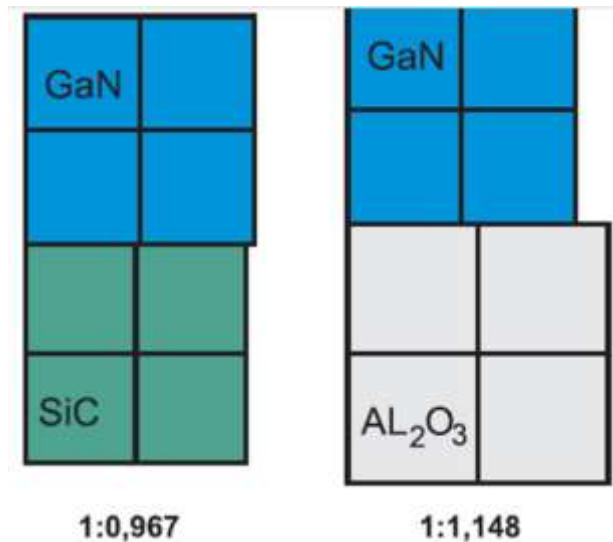
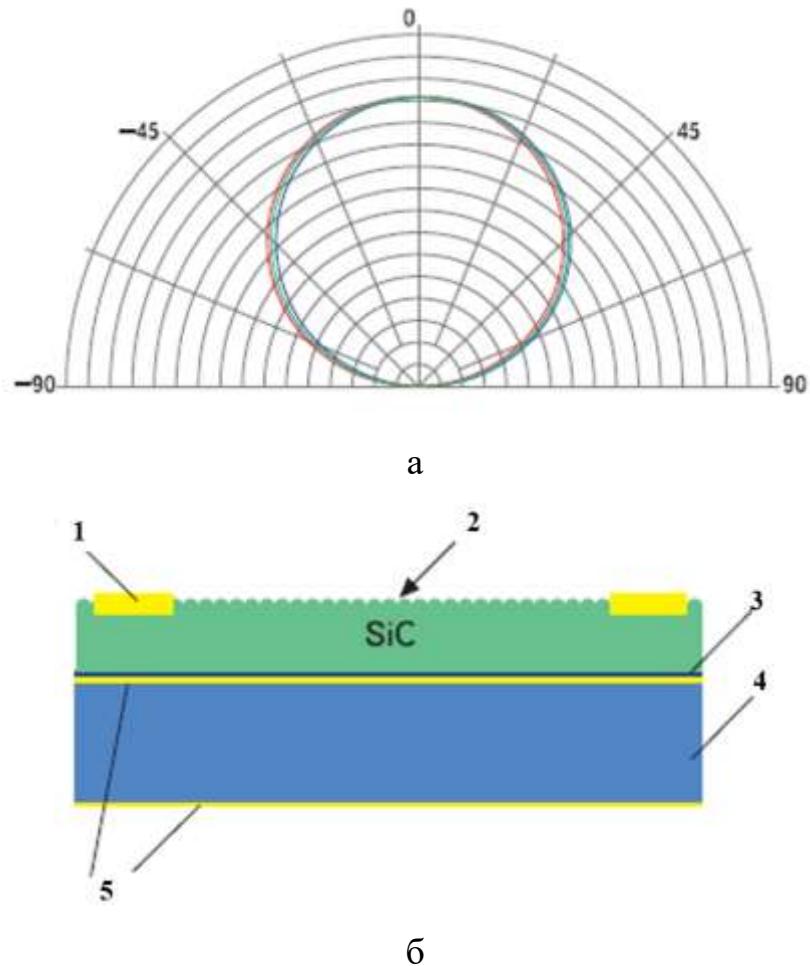


Рисунок 1.1 - Схема незгодженості кристалічних ґрат GaN-структур на підкладках: а - SiC; б- Al₂O₃

Застосування нової конструкції контактної системи дозволило збільшити площу корисної поверхні випромінювання до 90%, а паралельне з'єднання перемичок контактів катода додатково знизило втрати на електропровідність при підвищених значеннях щільності струму вдвічі. Зазначені технологічні особливості, що застосовуються в процесі зростання і особливо при постростових операціях, дозволили цій серії кристалів демонструвати високу ефективність. Квантовий вихід випромінювання кристалів розмірами 0,3×0,3 мм становив від 55 до 75%, а кристалів розміром 1,0×1,0 мм типове значення квантового виходу становить від 40 до 55%. За рахунок вертикального механізму протікання струму та зміни конструкції контактної системи вдалося знизити пряме падіння напруги на кристалі на 20% за номінального струму в порівнянні з виробами інших виробників.

Технологія "lift-off", яку використовують ряд виробників LED нітридних структур на сапфірових підкладках, дозволяє від'єднувати вирощені структури від підкладки. Це у свою чергу знижує щільність дислокацій у прикордонному шарі через неузгодженість параметрів кристалічних ґраток GaN і Al₂O₃, а це призводить до зниження частки безвипромінювальної рекомбінації.



1 - антиконтакти; 2 – оптична система; 3 - InGaN; 4 – Si підкладка; 5 – металізація AuSn

а – діаграма спрямованості; б - структура

Рисунок 1.2 – Схема кристала Cree EZ-1000 серії EZBright

Відсутність підкладки дозволяє покращити відведення тепла від активної області та знизити тепловий опір кристала LED. З іншого боку,

технологія «lift-off» дозволяє використовувати сапфірову підкладку повторно, тобто. знизити собівартість виробів.

Застосування «lift-off» технології дозволило підвищити квантовий вихід GaN структур, вирощених на підкладках із Al_2O_3 , до 60%.

Технологія виробництва нітрид-галієвих структур розвивається стрімко. Це пояснює швидкий розвиток характеристик LED білого світіння, які замінюють джерела освітлення на основі ламп розжарювання та люмінесцентні.

2 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ І НАПРЯМКИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

2.1 Основні характеристики LED

Найважливішою характеристикою світлодіодів є ефективність перетворення електричної енергії в світлову. Фактично вона являє собою коефіцієнт корисної дії світлодіода.

$$\eta \approx \frac{\hbar\omega_{\max}}{eU_{\text{роб}}} \eta_e, \quad (2.1)$$

де $\hbar\omega_{\max}$ – енергія фотона, що відповідає максимуму спектра випромінювання;
 $U_{\text{роб}}$ – зовнішня напруга.

Одним з основних факторів ефективності LED є його структура і тип переходу, що використовується в ній. Застосування гетероструктур дозволяє підвищити ефективність перетворення світлодіода у кілька разів. Значення зовнішнього квантового виходу η_e визначатиметься внутрішнім квантовим виходом люмінесценції η_i , коефіцієнтом інжекції η_I та оптичною ефективністю виведення світла η_o :

$$\eta_e = \eta_i \eta_I \eta_o. \quad (2.2)$$

Внутрішній квантовий вихід люмінесценції η_i є співвідношенням ймовірностей випромінювальної ($\tau_{\text{вип}}$) та безвипромінювальної ($\tau_{\text{бв}}$) рекомбінацій:

$$\eta_i = (1/\tau_{\text{вип}}) / (1/\tau) = \tau / \tau_{\text{вип}} = \tau_{\text{бв}} / (\tau_{\text{бв}} + \tau_{\text{вип}}). \quad (2.3)$$

Він залежить від зонної структури напівпровідника, концентрації та типу легуючих домішок, від ступеня досконалості кристалічної структури матеріалу. Для реалізації структури світлодіода необхідно, щоб швидкість рекомбінації випромінювання перевищувала швидкість безвипромінювальної. Тому для створення світлодіодів необхідні напівпровідники з прямою структурою енергетичних зон, у яких ймовірності випромінювальних переходів значно вищі, ніж у непрямозонних напівпровідниках. Зазвичай випромінювальна рекомбінація переважає тільки в одній з областей (n- або p-), що прилягають до p-n-переходу. Тому p-n-перехід у світлодіоді має забезпечувати переважну інжекцію неосновних носіїв заряду в ту область, де η_i максимальний. Коли активної області з високим η_i відповідає p-область матеріалу, тоді коефіцієнт інжекції η_I є відношенням електронного струму I_e до прямого загального струму I , що протікає через p-n-перехід:

$$\eta_I = I_e / I = I_e / (I_e + I_p). \quad (2.4)$$

Найкращі умови для односторонньої інжекції створюються в гетеропереході, де відбувається переважна інжекція із широкозонної області до вузькозонної.

Коефіцієнт виведення світла η_o залежить від процесів поширення світла в активному матеріалі, його відбиттям і поглинанням на межах розділу шарів, у тому числі наявністю повного внутрішнього відбиття. Величина η_o є оптичною ефективністю виходу генерованого активною областю структури світлодіоду у зовнішнє середовище через велику величину показника заломлення n напівпровідника в межах критичного кута:

$$\theta_{кр} = \arcsin (n^{-1}). \quad (2.5)$$

Якщо знехтувати поглинанням усередині діода, то частка випромінювання, що може бути виведено з планарного світлодіода через його верхню межу при падінні на неї світлової хвилі, становить величину:

$$\eta_0 = \frac{\sin^2 \theta_{rp}}{4} T \approx \frac{1}{n(n+1)^2}, \quad (2.6)$$

де T - коефіцієнт прозорості матеріалу.

Коефіцієнт виведення світла η_0 можна збільшити, підвищуючи критичний кут $\theta_{кр}$ і знижуючи відбиття в межах вихідного кута. змінюючи діаграму спрямованості випромінювання світлодіода.

2.2 Методи підвищення ефективності

Сучасні LED створюються з урахуванням подвійних гетероструктур (ПГС). Для підвищення ефективності виведення випромінювання із структури застосовуються різні методи, зокрема інтерференційні дзеркала. На рис.2.1,а показана LED структура, синтезована на низькоомній n^+ - підкладці. Така підкладка необхідна для досягнення мінімальних резистивних втрат, рівномірного розподілу густини струму та зниження теплового опору. Однак сильне легування призводить до зростання самопоглинання випромінювання LED. До того ж, у ряді випадків ширина забороненої зони матеріалу підкладки може виявитися меншою за енергію фотонів, які випромінюються. а матеріал підкладки непрозорий для випромінювання світлодіода. Для зниження поглинання фотонів підкладкою застосовують інтерференційні дзеркала, звані також розподіленими бреггівськими відбивачами (РБВ). Для створення РБВ вирощуються шари напівпровідникових сполук з різними показниками заломлення, що чергуються, що задовольняють умові: $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4$. Інтерференція, що виникає при багаторазовому відбитті від меж шарів, дає

максимум відбиття і мінімум прозорості для випромінювання з довжиною хвилі λ . Слід зазначити, що РБВ відбиває фотони, але не перешкоджає переміщенню носіїв заряду крізь підкладку. Це дозволяє наносити електрод катода на нижню поверхню інтерференційного дзеркала

Випромінювальна частина LED є ПГС, активна область якої може містити квантоворозмірні структури. Виведення випромінювання відбувається через широкозонний p - матеріал емітера і другу багатошарову інтерференційну структуру з функцією покриття, що просвітлює, і задовольняє умові інтерференції для максимуму прозорості: $n_1d_1 = n_2d_2 = \lambda/2$.

Для створення омичного контакту перед напиленням металу на структуру наносять високолегований p⁺ - шар.

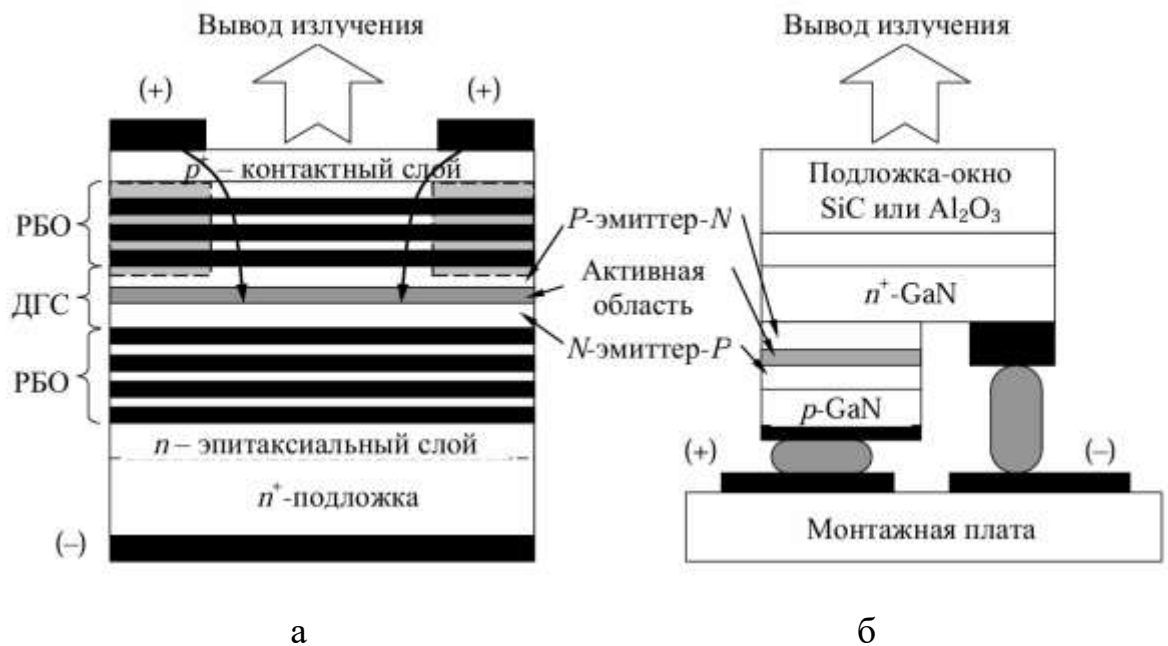
Для зниження поглинання світла у верхньому електричному контакті кільцевої форми, бічні області напівпровідника аморфізують іонним бомбардуванням для підвищення питомого опору и витискання струму в центральну частину структури. Замість бомбардування можна також використовувати контакти спеціальної форми: у вигляді перехрестя, точки и т. п

Оскільки нітридні LED вирощуються на підкладках з іншого матеріалу, що часто мають діелектричні властивості, то наносити негативний контакт на зворотній стороні структури в них не можна.

Контакти в таких структурах роблять з однієї сторони, однак на різних рівнях (рис. 2.1,б). На підкладці з сапфіру або карбиду кремнія після буферного шару вирощується товстий шар n⁺ GaN, до якого надалі буде приєднаний катод, потім ПГС з активною областю, що містить квантові ями, і шар p-GaN для анода.

Оскільки у сапфірових підкладок низька теплопровідність, для зниження теплового опору світлодіодні структури часто встановлюють перевернутим монтажем – p-областю вниз («flipchip» технологія). В цьому випадку випромінювання виводиться через прозору підкладку.

Інжекційна люмінесценція спричинена рекомбінацією нерівноважних носіїв заряду. Таке випромінювання часто називають рекомбінаційним. Однак внесок у люмінесценцію робить лише випромінювальна рекомбінація, коли надмірна енергія рекомбінуючих частинок виділяється у вигляді фотона. Безвипромінювальна рекомбінація розігріває кристалічну ґратку, вона небажана та знижує ефективність світлодіода.



а – з інтерференційними дзеркалами (розподіленими бреггівськими відбивачами; б – flip-chip монтування [4].

Рисунок 2.1 - Структури світлодіодів

Повна кількість випромінювальних переходів за одиницю часу в одиниці обсягу пропорційна добутку концентрації вільних дірок p і електронів n :

$$\Phi = Vnp, \quad (2.7)$$

де постійна V залежить від швидкості рекомбінації R_0 і власної концентрації носіїв заряду в напівпровіднику n_i відповідно до співвідношення:

$$B = R_0/n_i^2 \quad (2.8)$$

Швидкість рекомбінації пов'язана з показником поглинання k_ω співвідношенням:

$$R_0(\omega) = \frac{\omega^2 n^2 k_\omega}{\pi^2 c^2 \frac{\hbar\omega}{e^{kT-1}}} \quad (2.9)$$

Для дозволених прямих міжзонних переходів k_ω пропорційний кореню з енергії:

$$k_\omega \sim (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \quad (2.10)$$

Після підстановки виразів (2.8) – (2.10) в (2.7), отримуємо формулу для визначення спектру власної люмінесценції для переходів зона – зона:

$$\Phi_\omega \approx \Phi_0 \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{E_g} \right)^{0.5} \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g}{kT} \right). \quad (2.11)$$

Таким чином, спектр випромінювання LED визначається трьома основними факторами:

- коефіцієнт Φ_0 ,
- шириною забороненої зони E_g ,
- температурою T .

Коефіцієнт Φ_0 визначає потужність випромінювання світлодіода в максимумі спектральної характеристики. Потужність випромінювання залежить від кількості випромінювальних рекомбінаційних переходів, яка у свою чергу залежить від ймовірності таких переходів, внутрішньої квантової ефективності та концентрації носіїв заряду в активній області.

Концентрація електронів залежить від інтенсивності інжекції у структурі, тобто. від прямого струму $I_{пр}$. Таким чином, змінення коефіцієнту Φ_0 відповідає ват-амперній характеристиці LED. Загальний хід ват-амперної характеристики LED представлений на рисунку 2.2. При малих струмах потужність випромінювання світлодіода лінійно збільшується зі зростанням струму. Відхилення від лінійності обумовлено самонагріванням кристала, що збільшує частку безвипромінювальної рекомбінації. Це, у свою чергу, призводить до додаткового нагрівання, що при подальшому збільшенні струму може викликати температурне гасіння люмінесценції і повне припинення випромінювання, а в деяких випадках до виходу LED з ладу.

Ширина забороненої зони E_g визначає розташування спектра випромінювання. В ідеальному LED спектральна характеристика починається з енергії, що дорівнює ширині забороненої зони, а максимум спектру знаходиться на відстані $kT/2$ від E_g . У реальних LED завжди є рівні всередині забороненої зони, що пов'язані з наявністю домішок та дефектів, тому випромінювання виникає при енергіях менших за E_g , а максимум спектру приблизно відповідає E_g .

Істотний вплив на спектр випромінювання LED надає температурна залежність ширини забороненої зони матеріалу, яка призводить до зростання довжини хвилі максимуму випромінювання при зростанні T . Збільшення температури може дати не тільки довкілля, але й резистивні втрати прямого струму через структуру.

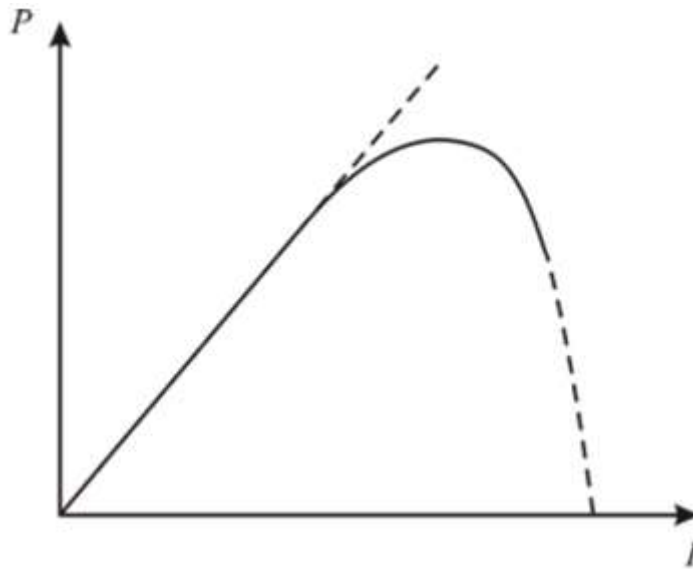


Рисунок 2.2 – Ватт-амперна характеристика світлодіода

У разі застосування квантово-розмірних структур при створенні LED довгохвильова межа випромінювання залежить не від E_g , а від мінімальної відстані між рівнями розмірного квантування. При збільшенні прямого струму на розтошувння максимуму спектральної характеристики в цьому випадку впливає не тільки самонагрів, а й квантоворозмірні ефекти, перерозподіл носіїв між рівнями та наявність хвостів щільностей станів, що не рідко призводять до зсуву максимуму спектра у зворотному напрямку по відношенню до температурної зміни E_g .

Більшість LED короткохвильового діапазону створюються на основі нітридів з використанням КРС, тому при низьких струмах у таких структурах спостерігається короткохвильовий зсув максимальної довжини хвилі випромінювання. Формула (2.11) показує, що ширина спектра пропорційна kT . Таким чином, зі збільшенням температури відбувається розширення спектральної характеристики LED.

Характеристики світлодіодів можуть з часом погіршуватися. Зазвичай деградація LED позначається поступовим зниженням потужності випромінювання при тривалій експлуатації.

Деградація може бути пов'язана з кількома причинами:

- міграцією неконтрольованих домішок металів (Na, Cu, Au) в електричному полі LED та пов'язаним із цим збільшенням концентрації центрів безвипромінювальної рекомбінації у p-n-переході;

- переходом центрів випромінювальної рекомбінації до центрів безвипромінювальної рекомбінації (переходи атомів домішки з вузлів у міжвузля);

- внутрішньою напругою поблизу p-n-переходу;

- поверхневими ефектами, пов'язаними з хімічними реакціями на поверхні структури;

- тепловими деформаціями кристалічної ґратки.

Вплив усіх цих факторів може бути знижений удосконаленням технології, Час деградації залежить від конструкції структури LED, її технології, матеріалів, що використовуються [4]..

Уповільнити деградацію та збільшити термін експлуатації світлодіода можна також змінивши режим його живлення з постійного на імпульсний, що зменшує нагрівання активної області.

3 ІМПУЛЬСНИЙ РЕЖИМ ЖИВЛЕННЯ LED

3.1 Світлотехнічні та температурні параметри UV-LED при імпульсному живленні

У деяких галузях виробництва, наприклад, проведенні фотохімічних реакцій або фотокаталітичного очищення із застосуванням світлодіодів для отримання потрібного ефекту, необхідно підвищувати оптичну потужність випромінювання. В цьому випадку перехід від безперервного режиму роботи до імпульсного є ефективним технічним рішенням задачі. Застосуванням методу потребує урахування пов'язаних між собою параметрів випромінювання, а саме: частоти, шпаруватості, тривалості імпульсу та імпульсного струму.

Були проведені дослідження світлотехнічних та температурних параметрів UV-LED NSHU591A, NSHU551A фірми “Nichia Corporation” в імпульсному режимі при підвищеному робочому струмі. Основні технічні параметри світлодіодів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні параметри UV світлодіода NSHU591A [5]

Пряме падіння напруги, В	Прямий струм, мА	Максимальна потужність випромінювання, мВт	Максимальна робоча температура, °С
4	25	8,5	100

У дослідженні з'ясувалась залежність потужності випромінювання (W) світлодіодів від значень прямого імпульсного струму (I) та падіння напруги (U) одиночного імпульсу при різній його тривалості (t).

Дослідження проводились з використанням піроелектричної головки для вимірювання оптичної потужності; тепловізора FLIR SC7000 для визначення температурного розподілу; цифрового осцилографа; генератора імпульсів та джерела живлення.

Результати вимірювань оптичної потужності випромінювання наведено на рисунку 3.1.

Схема з'єднання приладів представлена рисунку 3.2.

<i>t, мс</i>	<i>U, В</i>	<i>I, мА</i>	<i>E, мкДж</i>	<i>W, мВт</i>
0,5	4	60	4,25	8,5
	12	75	4,45	8,9
	27	89	4,75	9,5
1	4	62	9,3	9,3
	12	83	10,1	10,1
	27	84	10,7	10,7
5	4	47	49	9,8
	12	75	53	10,6
	27	80	55,5	11,1

Рисунок 3.1 – Результати дослідження UV світлодіода NSHU591A [5]

З'ясувалося, що зі збільшенням тривалості імпульсу від 0,5мс до 5 мс і напруги від 4В до 27 В, відбулося 30% збільшення потужності імпульсу (з 8,5 до 11,1 мВт). Були вивчені зміни температури кристалів світлодіодів. Спостереження показали такі результати:

По-перше, у безперервному режимі при $U = 3,5$ В і $I = 25$ мА кристал нагрівається до температури $T \approx 80$ °С. Температурне поле світлодіода, зафіксоване тепловізором, показано рисунку 1.6.

По-друге, в імпульсному режимі при $U = 4$ В, $I = 80$ мА і зміні тривалості імпульсу від 1 до 5 мс температура кристала зростає з 24 до 31 °С.

По-третє для $U = 8 \text{ В}$, $I = 0,32 \text{ А}$ і $t = 0,55 \text{ мс}$ потужність імпульсу становить 9 мВт, а температура кристала дорівнює $65 \text{ }^\circ\text{С}$.

По-четверте, для $U = 20 \text{ В}$, $I = 1,6 \text{ А}$ і $t = 0,2 \text{ мс}$ температура кристала перевищує максимально допустиму, що призводить до виходу його з ладу.

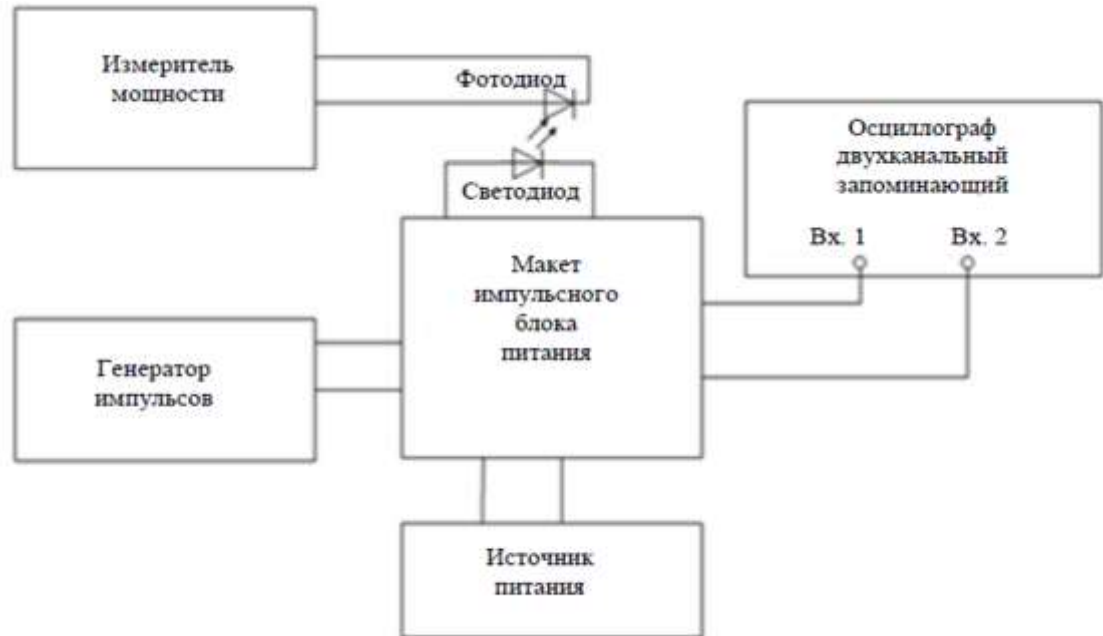


Рисунок 3.2 – Схема з'єднання приладів для дослідження UV світлодіода NSHU591A [5]

Таким чином, у імпульсному режимі живлення можна підвищити потужність випромінювання без зайвого перевищення температури, що руйнує світлодіод. При цьому параметри імпульсів (частота, шпаруватість та тривалість) підбираються під технічне завдання [5].

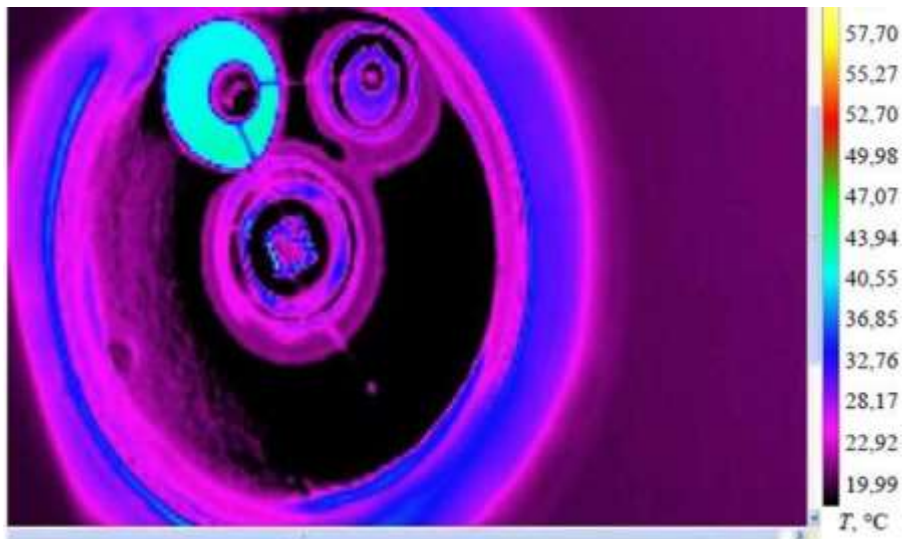


Рисунок 3.3 – Температурне поле UV світлодіода NSHU591A .[5]

3.2 Аналіз характеристик потужних LED в різних режимах експлуатації

Виробники LED структур тестують пластини з чіпами після епітаксійних процесів в імпульсному режимі, використовуючи зонди, тепловідвідну поверхню та імпульс живлення тривалістю від 10 до 20 мс. Така методика вимірювань не визначає реального значення квантового виходу, особливо при великій імпульсній щільності струму, оскільки не дозволяє повністю прибрати нагрівання активної області.

Далі наведено результати дослідження залежності потужності випромінювання (P) від щільності струму (J) для світлодіодів зеленого та синього спектру на основі гетероструктур InGaN та для світлодіодів на основі гетероструктур AlGaInP червоного та жовтого кольору в імпульсному режимі живлення, який виключає нагрівання області р n-переходу кристала. Значення P фіксувалися в кінці імпульсу струму тривалістю 1 і 10 мкс з частотою повторення імпульсів 1 кГц і 100 Гц відповідно. На рисунку 3.4 наведено розрахункові значення температури перегріву області р n-переходу в наприкінці імпульсу ΔT_{J-A} (різниця між температурою активної області кристалів T_J і температурою навколишнього середовища T_A), . Вимірювання проводилися при $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ у діапазоні щільностей струму J від 10 до 250

A/cm^2 . На рисунку наведено значення квантового виходу потужності випромінювання R_p для різних типів LED структур різного кольору світіння, різних виробників і виготовлених на різних підкладках. Величини R_p наведені щодо щільності струму $J = 20 \text{ A}/\text{cm}^2$, що відповідає прямому струму 160 мА через кристал Cree C-470XB900 та 15 мА через кристал C460MB290-E1000. ефективність яких у таких режимах наближається до максимальної. Отримані величини квантового виходу потужності демонструють ступінь досконалості LED структури щодо досягнення максимального значення квантового виходу.

Кристали		Площа р-n-перехода, cm^2	Підложка	Активна область	ΔT_{J-A} , різниця між температурою активної області кристалів (T_J) і температурою оточуючої середовища (T_A), К		Квантовий вихід потужності випромінювання R_p	
Виробник	Колір				1 мкс (величина струму в імпульсі, мА)	10 мкс (величина струму в імпульсі, мА)	$J = 20 \text{ A}/\text{cm}^2$	$J = 200 \text{ A}/\text{cm}^2$
Cree C460MB290-E1000	Синій	$5,8 \times 10^{-4}$	SiC	Наверху	–	–	1	0,62
Cree C460XT290-D119-A	Синій	$6,2 \times 10^{-4}$	SiC	Внизу	1 (120мА)	–	1	0,65
Cree C-470XB900	Синій	$8,1 \times 10^{-3}$	SiC	Внизу	0,15 (1400 мА)	1,5 (1400 мА)	1	0,71
Cree C-460EZR260	Синій	$1,2 \times 10^{-3}$	SiC	Внизу	0,9 (250мА)	2,3 (250 мА)	1	0,63
Shinghai	Синій	$1,06 \times 10^{-1}$	Al_2O_3	Наверху	12,3 (300 мА)	–	1	0,48
BridgeLux BKO2424C455-1	Синій	$4,9 \times 10^{-3}$	Al_2O_3	Наверху	1,4 (1000 мА)	2,7 (1000 мА)	1	0,51
Epistar ES-CEBLV40A-M	Синій	$5,1 \times 10^{-2}$	Si	Наверху	1,2 (1000 мА)	2,3 (1000 мА)	1	0,68
Epistar ES-CEBH915	Синій	$1,16 \times 10^{-1}$	Si	Наверху	3,6 (250мА)	–	1	0,6
Cree C527XT290-S0100-A	Зелений	$6,2 \times 10^{-4}$	SiC	Внизу	1 (120мА)	–	1	0,56
Cree C527MB290-E1000	Зелений	$5,8 \times 10^{-4}$	SiC	Наверху	–	–	1	0,48
Cree C-527XB900	Зелений	$8,1 \times 10^{-3}$	SiC	Внизу	0,15 (1400 мА)	1,5 (1400 мА)	1	0,6
BridgeLux BKO2424C530-3	Зелений	$4,9 \times 10^{-3}$	Al_2O_3	Наверху	1,8 (1000 мА)	3,2 (1000 мА)	1	0,63
Epistar ES-CEGH915	Зелений	$1,16 \times 10^{-1}$	Si	Наверху	3,6 (250мА)	–	1	0,47
Epistar ES-CEGH912	Зелений	$9,0 \times 10^{-4}$	Si	Наверху	–	–	1	0,5
Epistar ES-SAHR840	Красний	$6,5 \times 10^{-1}$	Si	Наверху	3,4 (1200 мА)	4,7 (1200 мА)	1	0,99
Epistar ES-SAYL840	Жовтий	$6,5 \times 10^{-1}$	Si	Наверху	3,4 (1200 мА)	4,7 (1200 мА)	1	1,08

Рисунок 3.4 – Розрахункові значення температури області р-n-переходу в кінці імпульсу ΔT_{J-A} та квантовий вихід оптичної потужності.[5]

За результатами також можна зробити висновок, наскільки важливий тепловідведення для підвищення ефективності світлодіода в цілому або кристала зокрема.

На Рисунку 3.5 представлені конструкції світловипромінюючих кристалів компанії Cree, на підкладках SiC з активною областю знизу (Cree C-470XB900) та з активною областю зверху (Cree C460MB290-E1000). У цих структур різний тепловий опір р-n-перехід – кристалотримач ΔT_{J-A} .

Відмінності визначаються не тільки різною локалізацією активної області гетероструктури кристала щодо кристалотримача і площею електричних контактів, але й істотною відмінністю теплопровідності сполучуючих елементів для кріплення кристала. Зазвичай зстосовується або струмопровідний клей на епоксидній основі, або евтектичний металевий сплав, теплопровідність яких різняться майже у десять разів.

Використовуючи розрахунки та дані рисунку 3.4, можна побудувати типові залежності відносної величини квантової ефективності потужності випромінювання $R_p = P_J / P_{20}$ (P_J - значення при густині струму J , P_{20} - значення при густині струму $J = 20 \text{ A/cm}^2$).

На рисунку 3.6 представлена залежність квантової ефективності від щільності струму для LED на основі кристалів Cree C460XT290-O119-A синього кольору та кристалів Cree C527XT290-S0100-A зеленого кольору.

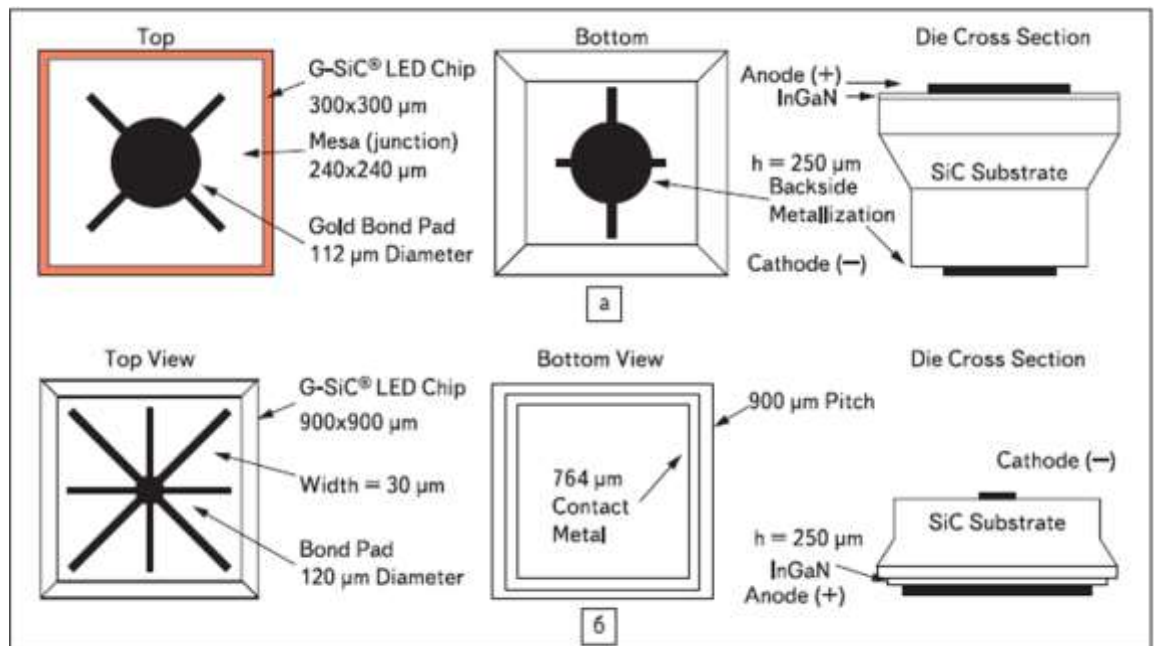


Рисунок 3.5 – Конструктивне виконання світловипромінюючих кристалів фірми Cree: а – Cree C470XB900; б - C460MB290-E1000 .[6]

Графіки (рис. 3.7) зміни максимальної сили світла наведені для порівняння і показують, що в імпульсному режимі живлення відбувається

перерозподіл світлового потоку в межах діаграми спрямованості. За відсутності перерозподілу характеристики $R_p(J)$ та $I_v(J)$ були б однаковими. У LED зеленого кольору спостерігається більша крутість зниження R_p зі зростанням J , ніж у синіх. Можливо, у цих структурах порізно розподіляється спектр випромінювання зі зміною прикладеного електричного поля, оскільки йдеться про бар'єрні структури.

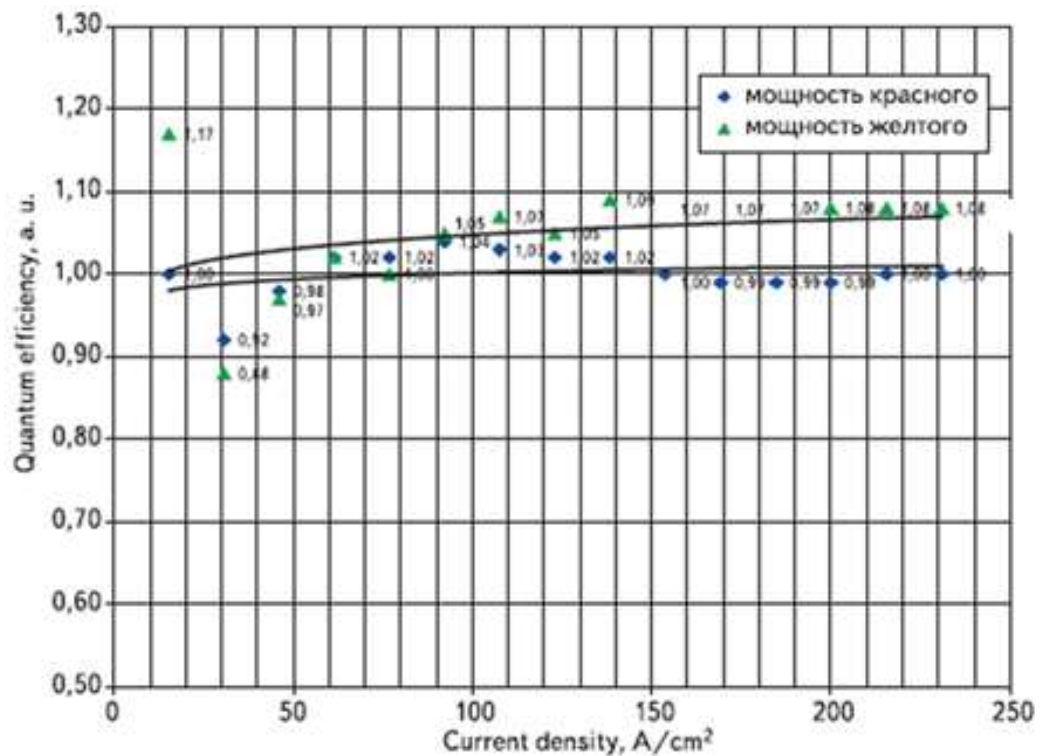


Рисунок 3.6 – Залежність відносних значень квантової ефективності потужності випромінювання R_p від щільності струму J світлодіодів на основі AlGaInP. [6]

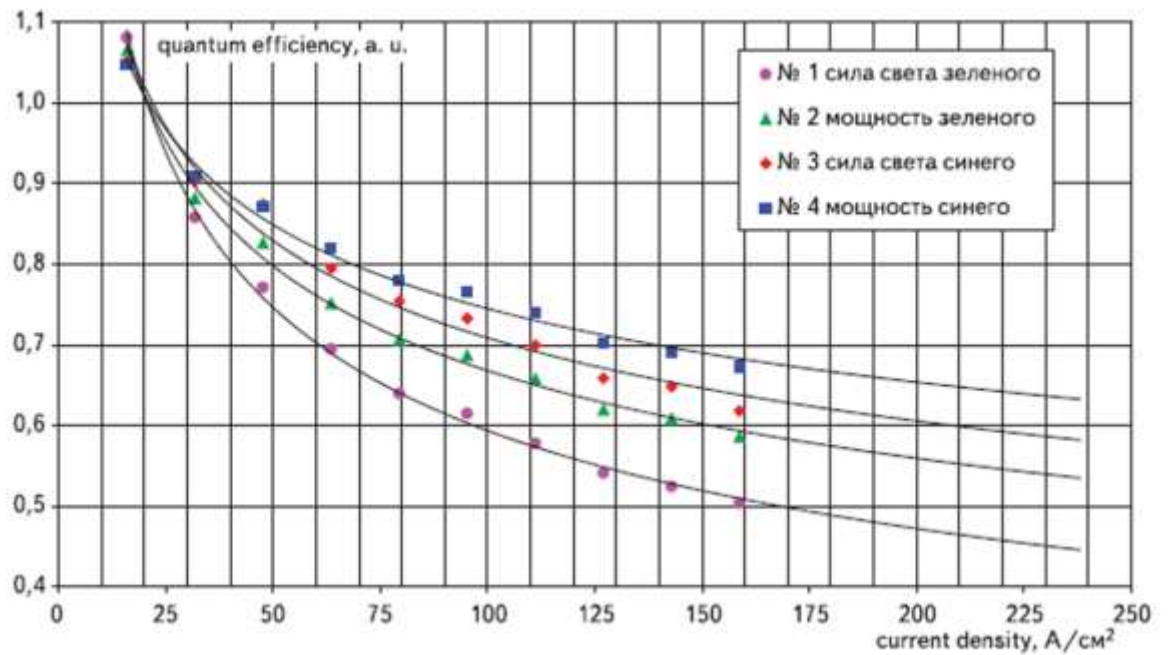


Рисунок 3.7 - Залежність відносних значень квантової ефективності потужності випромінювання R_P від щільності струму для LED зеленого та синього кольору на підкладці SiC .[6]

Відсутність розігріву активної області значно збільшує ефект короткохвильового зсуву всієї спектральної характеристики випромінювання. На рисунку 3.8 показано залежність квантового виходу однотипних кристалів при вимірюванні в імпульсному та безперервному режимах.

Червона і синя криві показують результати вимірювання R_P в безперервному в межах рекомендованих виробником значень режимі, з нагріванням при відповідній J , зелена - в імпульсному режимі. Дві кривих, отриманих з урахуванням розігріву активної області, майже збігаються, незважаючи на відмінність в конструкції. Зелена лінія на графіку показує, наскільки відрізняється залежність $R_P(J)$ однакових кристалів без нагріву. Кристалічної ґратки підкладок.

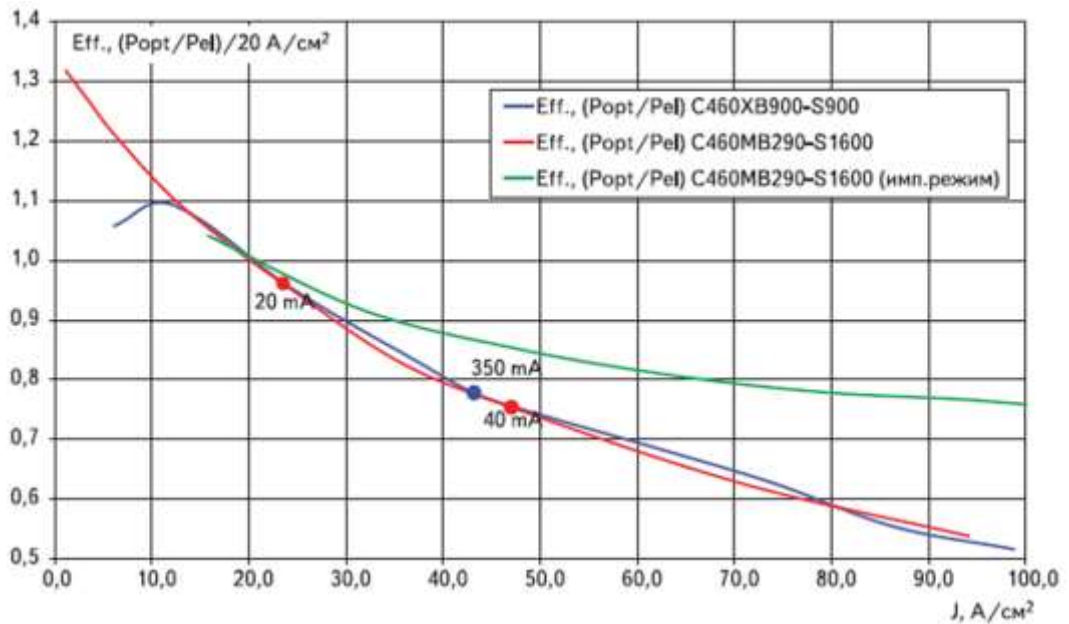


Рисунок 3.8 – Залежність квантової ефективності від щільності струму випромінюючих кристалів AlGaInN на підкладці SiC компанії Cree. [6]

В LED червоного і жовтого кольорів на основі гетероструктур AlGaInP зміни R_p зі збільшенням J в діапазоні від 10 до 250 A/cm^2 практично відсутні (рисунок 3.8).

У червоних LED жовтих спостерігається більше зниження R_p зі зростанням J , ніж у LED жовтого світіння.

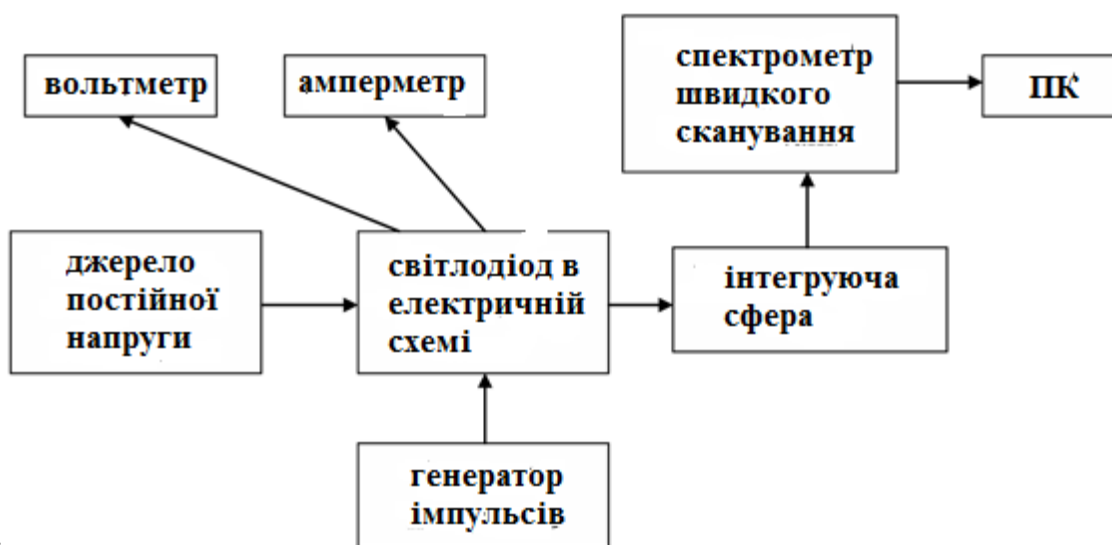
В жовтих LED виявляється незначне зростання R_p в діапазоні щільностей струму від 10 A/cm^2 до 250 A/cm^2 . Суттєво слабшими ці змінення помітні також при тепловій дії струму. Слід зазначити велику перевагу структур на основі AlGaInP, що мають значний запас з ефективності, зниження якої не відбулося навіть при живленні імпульсним струмом щільністю 300 A/cm^2 . Цю особливість можна використовувати при проектуванні випромінювачів з великою імпульсною оптичною потужністю.

У ході дослідження було встановлено, що імпульсні методики вимірювань, що не нагрівають кристали, дозволяють достовірно оцінювати квантовий вихід випромінювання LED структури та його залежність від густини струму.

Така методика поділяє вплив на змінення квантового виходу, що пов'язаний з неідеальністю епітаксимальної структури, і зниження квантового виходу, через локальний перегрів активної області структури кристалу світлодіода. Дослідження показують, що в червоних і жовтих LED із підвищенням щільності струму немає зниження квантового виходу, на відміну від синіх. [6]

4 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СВІТЛОДІОДІВ

Блок-схема обладнання для дослідження світлодіодів наведена на рисунку 4.1. Її основою є спектрометр USB4000 швидкого сканування виробництва OceanOptics. Він дає можливість досліджувати спектри випромінювання у видимій та ближній інфрачервоній областях (від 345 до 1000 нм). Вимірювання відбуваються з використанням інтегруючої сфери у якій розміщують світлодіод. Випромінювання LED по оптичному волокну передається на спектрометр, де перетворюється на електричний сигнал, а потім надходить на ПК з програмним забезпеченням SpectraSuite



с

Рисунок 4.1 - Блок-схема обладнання для дослідження світлодіодів

Обладнання дозволяє вимірювати спектральні характеристики та ВАХ, отримувати з них залежності від струму довжини хвилі в максимумі випромінювання, ефективності та інші,.

Електрична схема контролює на світлодіоді сигнал потрібної форми, амплітуди та тривалості. Установка дозволяє визначати абсолютні значення ефективності, світловіддачі, потужності, яскравості. Система живлення, що

містить генератор прямокутних імпульсів та блок живлення, дає можливість досліджувати характеристики LED у безперервному та імпульсному режимі. Реєстрація електричних характеристик світлодіодів проводиться вимірювальним блоком, що містить вольтметр, амперметр та осцилограф. Вимірювання спектральних характеристик забезпечується ПК з програмним забезпеченням SpectraSuite. По-перше, SpectraSuite забезпечує 1) колориметричні дослідження:

- відбитий і випромінюваний колір;
- діаграма кольоровості CIE x, з додатковою кривою Планка (лінією кольоровості чорного тіла);
- колірні простори;
- індекс кольору (CRI);
- корельована колірна температура (К, CCT) та ін.

По-друге, SpectraSuite виконує спектрорадіометричні вимірювання:

- спектральне опромінення ($\text{мкВт}/\text{см}^2 \text{ нм}$);
- спектральний потік ($\text{мкВт}/\text{нм}$, при використанні інтегруючої сфери);
- інтегральне спектральне опромінення ($\text{мкВт}/\text{см}^2$, межі інтегрування визначаються користувачем);
- спектральна енергія випромінювання ($\text{мкДж}/\text{см}^2 \text{ нм}$);
- інтегральна спектральна енергія випромінювання ($\text{мкДж}/\text{см}^2$, інтегрування в межах, що визначаються користувачем);
- Інтенсивність опроміненості за логарифмічною шкалою (дБм).

По-третьє, SpectraSuite дозволяє проводити фотометричні вимірювання:

- люмінесцентний потік (лм, при використанні інтегруючої сфери);
- люмінесценція (лк);
- Інтенсивність люмінесценції (кд).

Таким чином, використання оптоволоконного спектрофотометра швидкого сканування OceanOptics USB4000 з ПЗ SpectraSuite надає можливість визначити основні параметри світлодіодів:

а) дослідження спектральних характеристик LED кристалів, дискретних світлодіодів, LED ламп, та дослідження впливу на них зміни прямого струму, температури та інших факторів. Діапазони змінення параметрів:

- довжина хвилі випромінювання від 345 до 1000 нм.;
- сила прямого струму: від 10^{-8} до 3 А;
- постійна напруга від 0 до 60 В,

б) дослідження абсолютних величин потужності, яскравості та інтенсивності із застосуванням методу інтегруючої сфери;

в) визначення зовнішнього квантового виходу, світловіддачі та ефективності для LED різного типу, світлодіодних ламп;

г) дослідження залежності від величини прямого струму і температури потужності, довжини хвилі в максимумі та інших параметрів, перерахованих у пунктах 2 і 3, побудова ват-амперних та інших характеристик.

д) визначення температури активної області LED, світлодіодних кристалів, дослідження залежності температури активної області від величини прямого струму;

є) визначення теплового опору LED, що мають різні корпуси та визначення;

ж) визначення температурної стабільності довжини хвилі та інтенсивності в максимумі випромінювання;

з) проведення деградаційних випробувань LED та виробів на їх основі у заданому струмовому та температурному режимі;

к) визначення колірної температури та інших колірних характеристик білих світлодіодів. [7]

ВИСНОВКИ

В представленій роботі проведено огляд розвитку технології створення світлодіодів на основі нитридів галію і алюмінію, зокрема потужних. Відзначено технологічні і конструктивні методи, спрямовані на подолання проблем покращення їх параметрів та характеристик.

Зазначено фактори, що впливають на деградацію параметрів LED і шляхи їх усунення.

Звернуто увагу на можливість змінення режиму живлення LED на імпульсний для збільшення його пікової потужності випромінювання, що є важливим у деяких промислових застосунках, як наприклад: при проведенні фотохімічних реакцій, фотокаталітичному очищенні поверхонь в системах для дезинфекції середовищ тощо.

Наведено приклад обладнання і його можливості щодо вимірювання параметрів LED випромінювачів в різних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Экспертное мнение: полупроводниковые материалы в электронике [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/misis/articles/384811/> (дата звернення 26.05.2025)
2. Шуберт, Ф. Светодиоды [Текст] / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. - 2-е изд. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008 - 496 с.
URL: https://www.elec.ru/files/2019/10/02/Svetodiody_2008.pdf. (дата звернення 26.05.2025)
3. Тарасов, С.А. Квантовая и оптическая электроника [Текст]: лабораторный практикум / С.А. Тарасов, А.В. Соломонов. - СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. - 60 с.
4. Пихтин, А.Н. Квантовая и оптическая электроника [Текст] / А.Н. Пихтин. - СПб. : Абрис, 2012. - 656 с.
5. Исследование оптической мощности излучения и температуры чипа UV-светодиода в импульсном режиме [Текст] / Ю.Н. Ведерников, И.А. Ермаков, Б.П. Папченко и др. // Изв. вузов. Приборостроение. - 2013. - Т. 56. - № 9. - С. 1-4.
6. Никифоров, С. Особенности определения квантового выхода светодиодов на основе AlGaInN и AlGaInP при различной плотности тока через излучающий кристалл [Текст] / С. Никифоров, А. Архипов // Компоненты и технологии. - 2008. - № 1. - С. 83-85.
7. Менькович, Е. А. Тест-система определения параметров светодиодов и быстрой диагностики их качества [Текст] / Е.А. Менькович, С.А. Тарасов, И.А. Ламкин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. – 2012. - Вып. 10. - С. 17-23.

8. Бендеберя Г.Н., Бондаренко И.Н., Маковская Е.Г. Исследование температурных зависимостей характеристик излучения мощных светодиодов

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-opticheskoy-moschnosti-izlucheniya-i-temperature-chipa-uf-svetodioda-v-impulsnom-rezhime>