

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Вплив теплового режиму світлодіодного джерела світла на
надійність і довговічність**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТс-41

спеціальності 141

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

_____ Бугрій В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Філюк Я.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Вакуленко О. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Тарасенко М. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Тарасенко М. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 08 » лютого 2022 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Бугрію Вадиму Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вплив теплового режиму світлодіодного джерела світла на надійність і довговічність

Керівник роботи ... Філюк Ярослав Олександрович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 1 » лютого 2022 року № 4/7-76

2. Термін подання студентом завершеної роботи 18 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи _____

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик О. Я., к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Вакуленко О. О., ст. викладач кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 08 лютого 2022 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	26.02.2021	
2	Аналітичний розділ	31.03.2021	
3	Проектно-конструкторський розділ	16.04.2021	
4	Розрахунковий розділ	30.04.2021	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	14.05.2021	
6	Висновки	31.05.2021	
7	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2021	
8	Оформлення графічної частини	14.06.2021	

Студент

(підпис)

Бугрій В.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Філюк Я.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2022.

Стор.63; рис. 37; табл.4; креслень 15; джерел 18; додатків -.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Вплив теплового режиму світлодіодного джерела світла на надійність і довговічність».

Мета кваліфікаційної роботи полягає у дослідженні та виборі теплових режимів напівпровідникових джерел світла на основі кристалів із InGaN з люмінофорним покриттям, при прискорених випробуваннях на надійність та довговічність.

Проведений теоретичний та експериментальний аналіз теплового режиму напівпровідникових джерел світла.

Методами ступінчастих випробувань при підвищених температурах і підвищених струмах визначено енергії активації процесів деградації світлового потоку, прямої напруги, зворотного струму і колірної температури. Показано, що отримані значення енергії активації при ступінчастих електричних випробуваннях вище, ніж при температурних ступінчастих випробуваннях і мають величину 0,7-0,73 еВ і 0,6-0,65 еВ відповідно.

Встановлено, що при прискорених випробуваннях при фіксованій температурі корпусу +85 і прямому струмі 350 мА коефіцієнт прискорення збільшується в процесі випробувань в 1,5-1,7 рази через 1000 годин.

Показано, що за результатами прискорених випробувань напівпровідникових джерел світла при температурі корпусу +85 °С протягом 2000 годин, можна визначити середній термін служби, що становить близько 300000 годин.

Ключові слова: тепловий режим, напівпровідникові джерела світла, прискорені випробування.

ЗМІСТ

Реферат	3
Вступ	6
1 Аналітичний розділ	8
1.1 Процеси виділення та відведення тепла у напівпровідникових джерелах світла	8
1.2 Методи вимірювання температури кристалів напівпровідникових джерел світла	14
1.3 Висновки до розділу	18
2 Проектно–конструкторський розділ	19
2.1 Напівпровідникові джерела світла типу КИПД	19
2.2 Методи дослідження електричних і фотометричних параметрів і режимів роботи напівпровідникових джерел світла	23
2.2.1 Методи вимірювань вольт-амперних та вольт-фарадних характеристик	23
2.2.2 Вимірювання теплового опору напівпровідникових джерел світла	25
2.2.3 Методика виміру спектральних характеристик	27
2.3 Обладнання для випробувань на надійність та довговічність	28
2.4 Методи випробувань на надійність та довговічність	30
2.4.1 Рекомендації щодо проведення випробувань	30
2.5 Вимірювання температури переходу по довжині хвилі максимуму спектра випромінювання	31
2.6 Висновки до розділу	37
3 Розрахунковий розділ	38
3.1 Прискорені випробування напівпровідникових джерел світла	38
3.2 Характерні види відмов напівпровідникових джерел світла при прискорених випробуваннях	44
3.3 Прогноз довговічності напівпровідникових джерел світла на основі результатів прискорених випробувань	50
3.4 Висновки до розділу	53
4 Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	54

4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок	54
4.2 Вимоги пожежної безпеки при гасінні електроустановок	56
4.3 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху	58
Загальні висновки	61
Перелік посилань	62

ВСТУП

Актуальність роботи. Напівпровідникові джерела світла - оптичні прилади, що перетворюють електричну енергію в немонохроматичне випромінювання білого світла, знаходять широке застосування в пристроях автоматики, системах передачі та відображення інформації, телеметрії, медицини, а також світлотехнічних пристроях.

Останнім часом найбільшу увагу привертають напівпровідникові джерела білого світла на основі кристалів гетероструктур GaN-GaInN, покритих люмінофором. Значення їх світлової віддачі досягли значень близько 130 лм/Вт у промисловості та 180 лм/Вт – у дослідницьких лабораторіях, крім того, важливими їх перевагами є: низьке енергоспоживання та великий термін служби. За умови дотримання рекомендованих виробником електричних та теплових режимів термін служби пристроїв на їх основі може досягати 10-15 років. При такій високій довговічності натурні випробування напівпровідникових джерел світла стають нерентабельними, зважаючи на їх високу тривалість і трудомісткість і тому актуальним стає розробка прискорених методів випробувань. Прискорені випробування дозволяють за короткий час визначити середній час напрацювання джерела світла та зробити достовірний довгостроковий прогноз. Як правило, процес прискорення досягається за рахунок збільшення температури або прямого струму під час випробувань. Але для того, щоб коректно вибрати режими випробувань, необхідно виявити основні теплові процеси та області тепловиділення і точно визначити параметри:

- температура корпусу, температура активної області кристала та температура люмінофора при випробуваннях;
- енергія активації процесу деградації;
- коефіцієнт прискорення при гранично-допустимих температурах та щільності струму.

Виходячи з вищесказаного, можна сформулювати три основні напрямки у цій роботі:

1. визначення граничних робочих характеристик напівпровідникових джерел світла;

2. розробка методів вимірювання температури кристалів джерел світла у процесі експлуатації та випробувань;

3. вивчення процесів деградації напівпровідникових випромінюючих структур та люмінофора.

Мета роботи: дослідження та вибір теплових режимів напівпровідникових джерел світла на основі кристалів із InGaN з люмінофорним покриттям, при прискорених випробуваннях на надійність та довговічність.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання

1. досліджувати процеси виділення тепла у елементах джерела світла;

2. дослідити вплив температури кристала на основні електричні та фотометричні характеристики;

3. розробити методи вимірювання температури кристалів у процесі випробувань з похибкою не більше ніж $\pm 5^{\circ}\text{C}$;

4. встановити взаємозв'язки між температурою, часом випробувань та процесами деградації параметрів джерела світла;

5. розробити методики прискорених випробувань напівпровідникових джерел світла, при виборі як прискорюючі фактори струму та температури;

6. розробити модель прогнозування довговічності з урахуванням результатів прискорених випробувань.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Процеси виділення та відведення тепла у напівпровідникових джерелах світла

При роботі джерела далеко не вся електрична енергія, що підводиться до нього, витрачається на випромінювання. Значна її частина (60-80%) виділяється як тепла. Температура рп переходу, що відповідає температурі активної області кристалічних ґрат, є дуже важливим параметром світлодіода, т.к. від неї залежить внутрішній квантовий вихід випромінювання [1-16], а робота світлодіода за підвищених температур призводить до значного зниження терміну його служби. Висока температура може призвести до деформації корпусу приладу. Очевидно, якщо не вжити належних заходів щодо відведення зайвого тепла, світлодіод працюватиме ненадійно або навіть вийде з ладу. Саме тому багато виробників не наважуються на серійний випуск джерел світла з розсіюваною потужністю більше 3 Ватт [13,16]. Місцями виділення тепла всередині джерела є контакти, зовнішні шари та активна область.

Перехід електрона з n-області в р-область викликає охолодження n-області. Кількість тепла, що відноситься в одну секунду становить:

$$Q - n \approx 0.24 I_F (\phi k - U_F), \quad (1.1)$$

де/г-прямий струм через перехід; ϕk -контактна різниця потенціалів; U_F - Пряме падіння напруги на переході. В області рп переходу електрони рекомбінують. Рекомбінація супроводжується виділенням енергії:

$$Q_n^+ \approx 0,24 I_F (E_g), \quad (1.2)$$

δE_g -ширина забороненої зони. Частина енергії випромінюється у вигляді світла $P_{\text{изл}}$ і виходить за межі кристала, але частина світла поглинається у напівпровідниковому матеріалі та на контактах. Сумарна кількість тепла, що виділяється в рп переході дорівнює:

$$\Delta Q_{\text{тепла}} \approx Q_n^+ - Q_n^- - P_{\text{изл}} \approx 0,24 (1 - \eta) I_F U_F, \quad (1.3)$$

Температура $T_{пер}$ переходу ЦД ($T_{пер}$) визначається сумою температури навколишнього середовища (T_a) та твори теплового опору (R_{j-a}) на потужність розсіювання (P_d):

$$T_{пер} = (T_a + (R_{j-a} * P_d)), \quad (1.4)$$

Теплове опір R_{j-a} складається з декількох складових, основними є: тепловий опір перехід-корпус R_{j-p} (тепловий опір від активної області кристал до місця «паяння» корпусу до радіатора) та теплового опору радіатора R_{h-a} [9]. Типове розташування світлодіода в корпусі К2 на друкованій платі показано на рисунку 1.1.

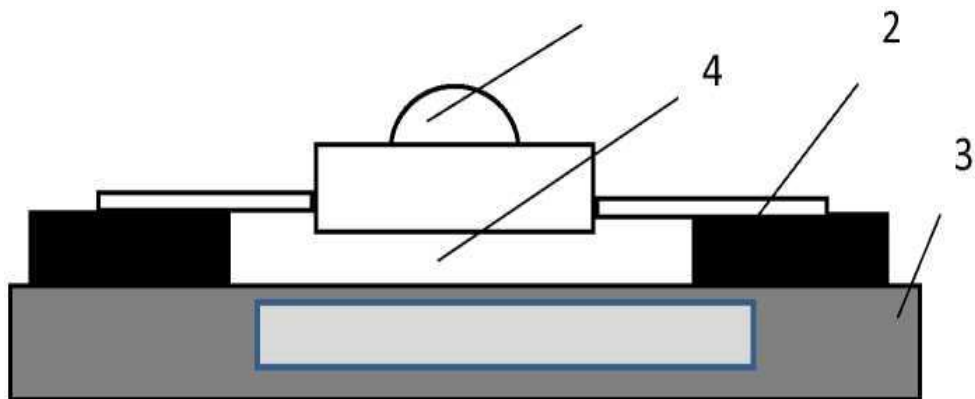


Рисунок 1.1 – Варіант розташування джерела світла на друкованій платі. 1-джерело світла; 2-контактні майданчики; 3-друкована плата; 4-теплопровідна паста

Для поліпшення тепловідведення простір між корпусом та платою заповнюють теплопровідною пастою.

На рис 1.2 представлена за електротепловою аналогією схема відведення тепла від джерела світла.

Тепловий опір R_{j-p} є паспортизованою величиною.

Загальний тепловий опір складається з ряду послідовно і паралельно включених теплових опорів.

$$R_{j-a} = R_{j-p} + 0,5R_{p-h} + R_{h-a}, \quad (1.5)$$

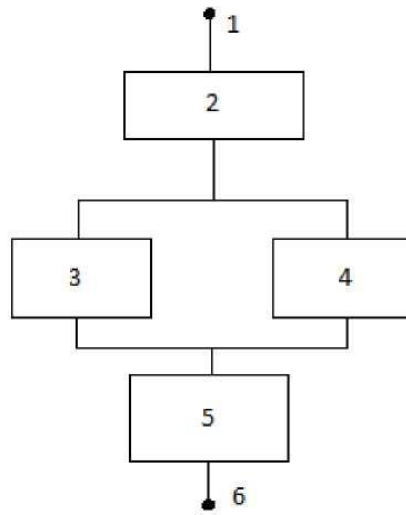


Рисунок 1.2 - Теплова модель джерела. 1 - температура переходу (T_j); 2 – тепловий опір перехід-корпус (R_{j-p}); 3, 4 – тепловий опір корпус-контактний пристрій (R_{p-h}); 5 - тепловий опір плати (R_{h-a}); 6-температура навколишнього середовища (T_a)

Для більш точної оцінки теплового опору необхідно враховувати тепловідведення з поверхні корпусу в навколишнє середовище.

Виділення електричної потужності активної області структури призводить до її розігріву. Особливістю, що ускладнює моделювання, є дія різних механізмів теплового зворотного зв'язку у структурах приладу, що призводять до зміни вихідного розподілу джерел тепла у структурі. В результаті розподілу температури, щільності струму та потужності стають неоднорідними [10] (рисунок 1.3).

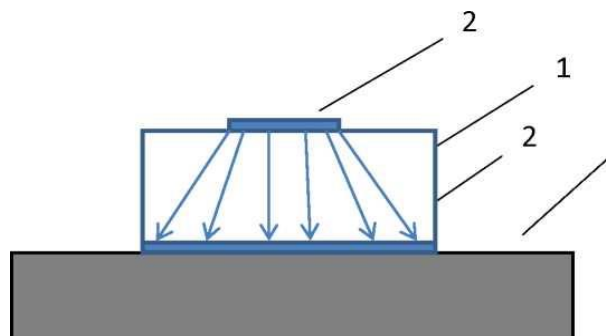


Рисунок 1.3 – Неоднорідний розподіл щільності струму та тепла у кристалі напівпровідникового джерела світла. 1 кристал; 2-контактні майданчики; 3-тепловідведення

З метою зменшення ступеня локалізації струму електричні контакти

виконують у вигляді гребінки, як це робить фірма OSRAM OptoSemiconductors[4].

Вигляд такого кристала представлений на рисунках 1.4 та 1.5.

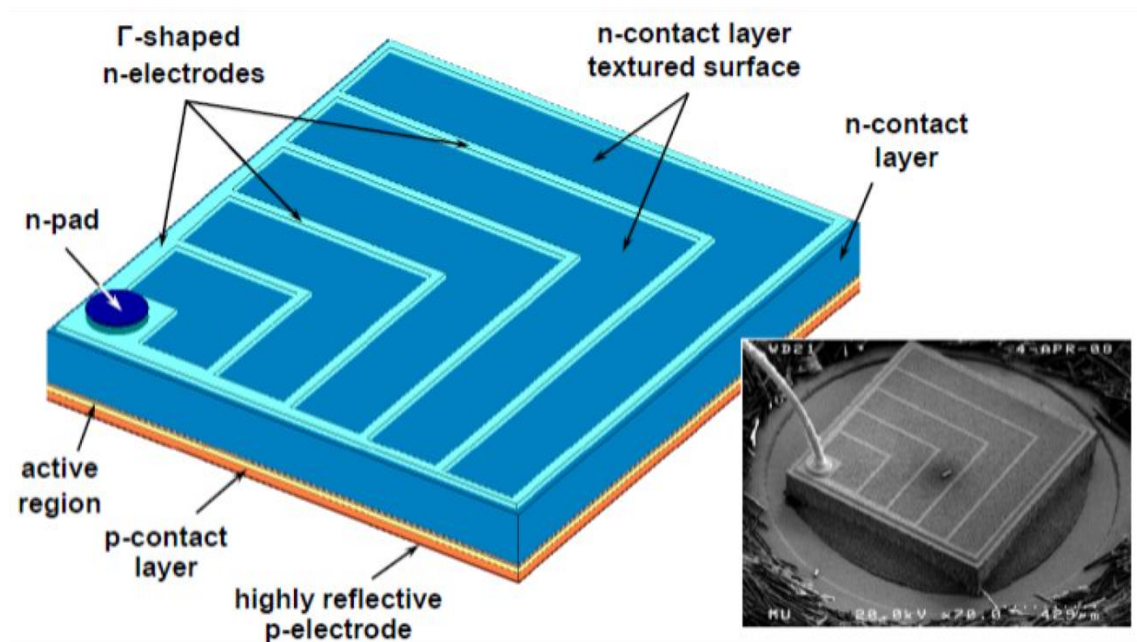


Рисунок 1.4 – Геометрія електричних контактів кристала (розміром 1·1 мм)

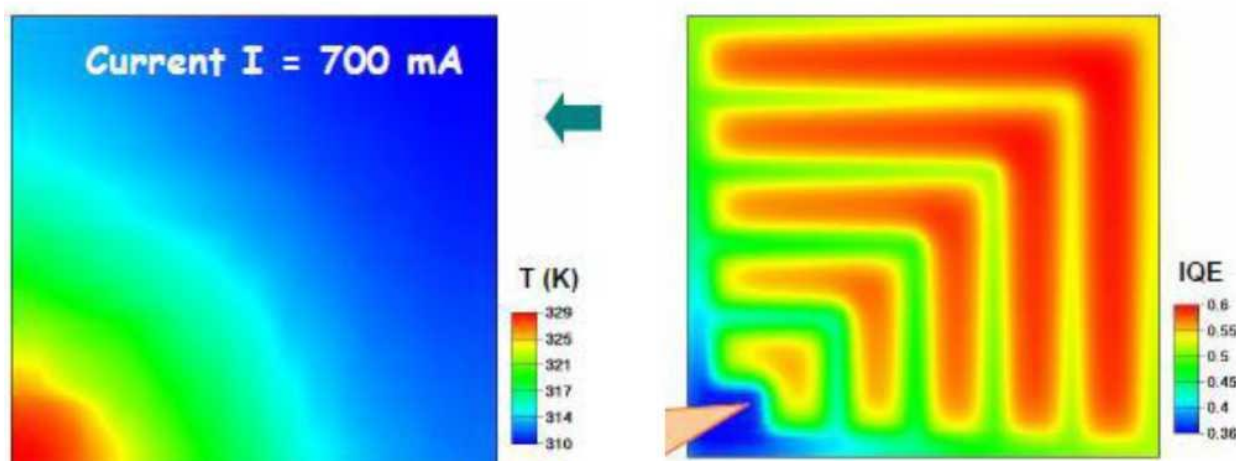


Рисунок 1.5 - Результати моделювання розподілу температури та щільності струму площею кристала

Як випливає з результатів моделювання, за рахунок неоднорідного розподілу щільності струму в електродній системі виникає надлишковий перепад температур кристалу, що досягає в даному випадку 20К.

Крім цього, виробництво та експлуатація джерел світла завжди супроводжується появою макродефектів, тобто відхилень електрофізичних або теплофізичних параметрів локальної області структури від номінальних значень, більших за допустимий рівень. Наявність дефектів призводить до появи

локальних перегрівів та перерозподілу щільності струму та потужності у структурі [1,7].

Зі зростанням температури інтенсивність випромінювання напівпровідникових джерел світла зменшується. Причинами є:

- безвипромінювальна рекомбінація через глибокі домішкові рівні;
- рекомбінація на поверхні;
- втрата носіїв у бар'єрних шарах гетероструктур;
- зниження квантової ефективності люмінофора;
- збільшення опору омичних контактів.

Стаціонарна інтенсивність люмінесценції пов'язана з температурою співвідношенням:

$$(I_{\Phi}^{-1}) \sim 1 + \frac{\nu_0}{\nu_1} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1.6)$$

де ν_0 – частота безвипромінювальних переходів; ν_1 – частота випромінювальних переходів; k – постійна Больцмана.

Температурну залежність інтенсивності випромінювання описують наступною залежністю[1]:

$$I = I|_{300K} \cdot \exp\left(-\frac{T-300}{T_1}\right), \quad (1.7)$$

де T_1 – характеристична температура кристала. Переважно, щоб характеристична температура була досить високою, оскільки відповідає слабка температурна залежність.

Світлодіоди мають свої, індивідуальні, залежності інтенсивності випромінювання від температури. На рис 1.6 як приклад показана залежність світлового потоку білого світлодіода CreeXLamp XR-E від температури кристала при струмі 350 мА [13].

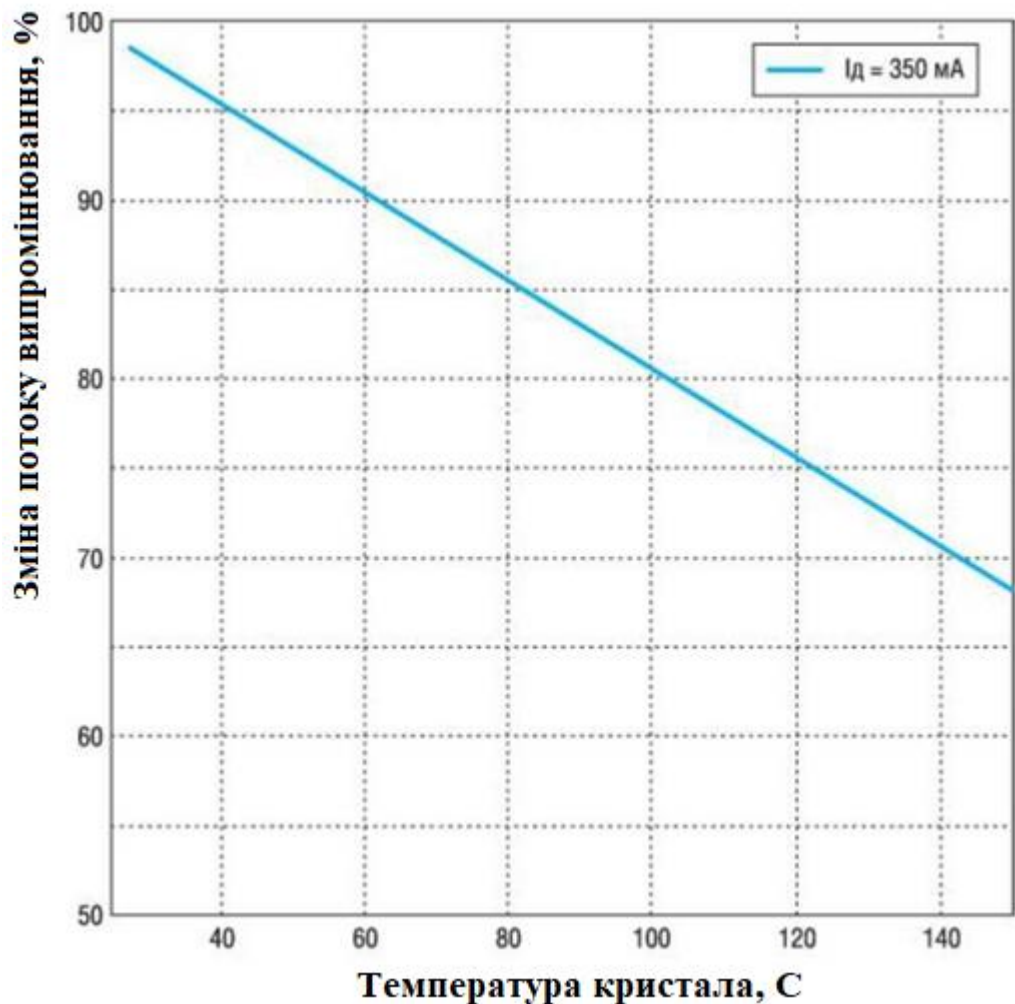


Рисунок 1.6 - Відносна зміна світлового потоку джерела світла CreeXLamp XR-E в залежності від температури кристала

Температура р-п переходу відчутно впливає як інтенсивність випромінювання, а й спектральні характеристики випромінювання. Так, зі зростанням температури спостерігається збільшення довжини хвилі, що відповідає максимуму спектральної густини енергетичної яскравості [1]. Енергія кванта відповідного максимуму люмінесценції $E_{\text{макс}}$ змінюється з температурою і зсувається при нагріванні практично так само, як ширина забороненої зони E_g , тобто виконується співвідношення:

$$\frac{dE_{\text{макс}}}{dT} \approx \frac{dE_g}{dT}. \quad (1.8)$$

Це може спричинити відчутну зміну колірної температури та індексу кольору [7].

1.2 Методи вимірювання температури кристалів напівпровідникових джерел світла

Як випливає з вищесказаного, важливим завданням стає точне вимірювання робочої температури кристала джерела світла в області р-переходу.

Існують різні методи визначення температури кристалів [13,25-31]:

- раманівська спектроскопія;
- вимірювання порогової напруги;
- вимірювання коефіцієнта відображення методом фототермічної мікроскопії;
- за спектрами електролюмінесценції;
- за спектрами фотолюмінесценції;
- вимірювання усунення довжини хвилі піку випромінювання;
- вимір зміни півширини максимуму спектра випромінювання;
- вимірювання зсуву прямого падіння напруги;
- щодо зміни інтенсивності світіння;
- за величиною зворотного струму;
- вимірювання величини низькочастотних шумів.

Більшість цих методів непрямі, оскільки температура переходу визначається за вимірюваними електричними параметрами. Найбільше застосування знайшли методи, що ґрунтуються на використанні вольт-амперної характеристики рп переходу [12].

Термочутливими параметрами для вимірювання температури в діодах є зворотний струм рп переходу і пряме падіння напруги на рп переході. Зворотний струм діода складається з декількох компонентів: струму витoku, що характеризується поверхневими енергетичними станами та струму, що визначається генерацією та рекомбінацією носіїв в області просторового заряду рп переходу. Аналізуючи окремі складові

зворотного струму рп переходу можна дійти висновку у тому, що вони, крім теплового струму, або рiсi чи слабко залежить від температури. Тому при тих температурах, за яких діоди експлуатуються, зворотний струм представлений в основному тепловим струмом, який майже не залежить від напруги, і дорівнює :

$$J_s = T^{(3+\frac{\gamma}{2})} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right), \quad (1.9)$$

де γ -постійна.

Таким чином, J_s залежить від температури експонентно.

Залежність прямого падіння напруги на р-п переході від температури можна отримати з виразу для вольт-амперної характеристики р-п переходу

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{eU_f}{n_{ideal} \cdot kT}\right) - 1 \right), \quad (1.10)$$

де J_s – щільність струму насичення. Для невідроджених напівпровідників у режимі прямого зміщення $U_f \gg kT/e$ справедливе співвідношення[5]:

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{d}{dT} \left[\frac{n_{ideal} \cdot kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{J_f}{J_s}\right) \right], \quad (1.11)$$

Щільність струму насичення залежить від значень коефіцієнтів дифузії та часу життя електронів та дірок, ефективної щільності станів на краях валентної зони та зони провідності, а також від ширини забороненої зони. Слід зазначити, що перераховані параметри залежить від температури рп- переходу. Таким чином, залежність прямої напруги світлодіода від температури має вигляд [1,5]:

$$\frac{dU_f}{dT} = \frac{eV_f - E_g}{eT} + \frac{1}{e} \cdot \frac{dE_g}{dT} - \frac{3k}{e}, \quad (1.12)$$

За допомогою цих залежностей може бути визначений температурний коефіцієнт напруги (ТКН), що визначається похідною термочутливого параметра за температурою. Розмір ТКН різних типів діодів змінюється не більше від 1 до 3,5 мВ·К⁻¹[12].

У загальному випадку процес вимірювання температури напівпровідникових приладів з використанням термочутливих параметрів складається з двох послідовних операцій: калібрування термочутливого параметра та вимірювання термочутливого параметра залежно від потужності тепловиділення в приладі. Обидві операції здійснюються в імпульсному режимі, коли вимірювальний струм подається на прилад в режимі коротких і рідкісних імпульсів (з великою шпаруватістю). Останнє необхідно, щоб вимірювальний струм не викликав помітної зміни температури приладу. Калібрування термочутливого параметра проводиться в термостаті, куди міститься напівпровідниковий прилад. Температура всіх елементів однакова і вважається

рівною температурі термостата. Залежність термочутливого параметра від температури термостата визначається при протіканні через напівпровідниковий пристрій лише імпульсного вимірювального струму. Результати вимірювань оформляються у вигляді калібрувальних графіків залежності термочутливого параметра від температури термостатування. Після калібрування переходять до операції вимірювання термочутливого параметра в робочому режимі. При цьому він визначається вже температурою розігріву приладу за рахунок його тепловиділення. Це дає можливість визначати температуру переходу T_j через падіння напруги за допомогою виразу [1]: Після калібрування переходять до операції вимірювання термочутливого параметра в робочому режимі. При цьому він визначається вже температурою розігріву приладу за рахунок його тепловиділення. Це дає можливість визначати температуру переходу T_j через падіння напруги за допомогою виразу [1]: Після калібрування переходять до операції вимірювання термочутливого параметра в робочому режимі. При цьому він визначається вже температурою розігріву приладу за рахунок його тепловиділення. Це дає можливість визначати температуру переходу T_j через падіння напруги за допомогою виразу [1]:

$$T_j = T_0 + \frac{U_T - U_0}{K_V}, \quad (1.13)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, U_T та U_0 – падіння напруги, що вимірюються при реперному струмі при температурах T і T_0 , K_V – температурний коефіцієнт, який був знайдений шляхом попередньої градування конкретного типу приладу [15-17].

Принцип залежності термочутливого параметра від температури може порушуватися для деяких термочутливих параметрів, вплив на величину яких нерівномірність температури, що виникає при власному розігріві напівпровідникового кристала.

Методика вимірювання температури в діодах за величиною зворотного струму використовується рідко через складність його вимірювання та незадовільну точність її результатів. Для потужних діодів при хорошому відводі тепла від корпусу результат вимірювання температури зворотного струму може відрізнятись від істинної температури рп переходу в 1,5 - 2 рази. Це пояснюється тим, що цей термочутливий параметр дає результат вимірювання температури,

усередненої об'єму напівпровідникового кристала, в якому він вимірюється. На характер усереднення впливає головним чином розподіл температури обсягом кристала. Пряме падіння напруги як термочутливий параметр набуло найбільш широкого поширення для вимірювання температури в діодах внаслідок своїх переваг перед зворотним струмом переходу. По перше, параметр напруга(U_f) при постійному струмі (IF) лінійно залежить від температури у великому інтервалі зміни всіх типів напівпровідникових приладів, що мають рп перехід. По-друге, температурні збільшення напруги U_f порівняно легко вимірюються. Усі представлені вище методи визначення температури активної області кристала мають у сукупності наступні недоліки [11]:

- методи є контактними, що не дозволяє діагностувати світлодіоди, що включені в електричні ланцюги пристроїв (комп'ютери, світлодіодні лампи, табло або матриці);
- методи неможливо з високою точністю визначити реальну температуру активної області, оскільки вимірюється «усереднена» температура по кристалу.

Більш перспективними є безконтактні оптичні методи вимірювання температури, що ґрунтуються на температурному градуванні довжини хвилі в максимумі випромінювання «еталонного» джерела світла [11]. Поданий спосіб складається з наступних етапів: «еталонне» джерело поміщають у термостат. За необхідної температури термостата після досягнення температурної рівноваги системи «термостат-джерело» реєструється залежність значення довжини хвилі в максимумі спектра випромінювання від температури кристала. Отримана залежність дозволяє визначити температуру активної області зразків, близьких за своїми робочими параметрами до еталонного. Можливо визначити температуру кристала використовуючи довгохвильову частину спектра випромінювання світлодіода.

Великий інтерес представляють методи вимірювання температури поверхні елементів джерела світла шляхом реєстрації теплового ІЧ-випромінювання. При використанні цього методу можна отримати наочну картину розподілу температур. Аналіз характеру ІЧ-випромінювання дозволяє судити як про розподіл струму, так і про наявність прихованих дефектів, які можуть призвести

до виходу з ладу в процесі експлуатації [12,13]. Чутливість, що дозволяє здатність та швидкодія інфрачервоних радіометрів багато в чому залежить від використовуваного приймача випромінювання. Фотоелектричні приймачі, що застосовуються в термографії, характеризуються такими параметрами: порогом чутливості до потоку випромінювання; величиною вихідного сигналу; інерційністю приймача. Найбільш поширеними є приймачі на основі германію легovanого золотом або міддю [13].

1.3 Висновки до розділу

1. Незважаючи на високу внутрішню квантову ефективність сучасних напівпровідникових джерел світла, значна частина електричної потужності перетворюється на тепло, що призводить до інтенсивного нагрівання активної області кристала.

2. Розподіл тепла в активній області неоднорідно, що пов'язано з локалізацією щільності струму в обсязі кристала, а також на поверхні поблизу омічного контакту. Існуючі методи вимірювань не дають повної інформації про розподіл температури по кристалу та люмінофору.

3. Термін служби напівпровідникових джерел світла перевищує 100000 годин, тому особливого значення набувають прискорених методів випробувань на надійність і довговічність. Так як в основі більшості прискорених випробувань покладено принцип температурного прискорення, то особливе значення набуває безперервного контролю температури в процесі випробувань і визначення точного значення енергії деградації.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Напівпровідникові джерела світла типу КИПД

Однокристальні джерела світла типу КИПД154А92, КИПД154Г92 призначені для створення світлотехнічних виробів для систем освітлення, контролю та сигналізації. Їх виготовляють у металополімерному корпусі, придатному як для ручного поверхневого монтажу, так і для автоматизованого поверхневого монтажу .

Характеристики різних типів джерел світла:

- КИПД 154 А92-Б1, КИПД 154 Б92-Б1 -Кольорова температура 4750 -8000К, світло біле холодне;
- КИПД 154 А92-Б2, КИПД 154 Б92-Б2 -Кольорова температура 3700 -4750К, світло біле нейтральне;
- КИПД 154 А92-Б3, КИПД 154 Б92-Б3 - Колірна температура 2600 - 3700К, світло біле тепле.

Світловий потік при прямому струмі 350 мА: - КИПД 154 А92-Б1: 60-150 лм.

Світловий потік при прямому струмі 60 мА: - КИПД 154 Г92-Б1: 10-25 лм.

Пряме постійне падіння напруги при прямому струмі 350 мА: - КИПД 154 А92-Б1 - КИПД 154 А92-Б2 - КИПД 154 А92-Б3 -не більше 3,6В.

Пряме постійне падіння напруги при прямому струмі 60 мА: - КИПД 154 Г92-Б1 не більше 3,4В. Кут випромінювання за рівнем 0,5-125-145 °.

На рис 2.1 представлений зовнішній вигляд напівпровідникового джерела світла КИПД 154А92-Б2, габаритний креслення представлений рис 2.2.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд напівпровідникового джерела світла КИПД 154А92-Б2

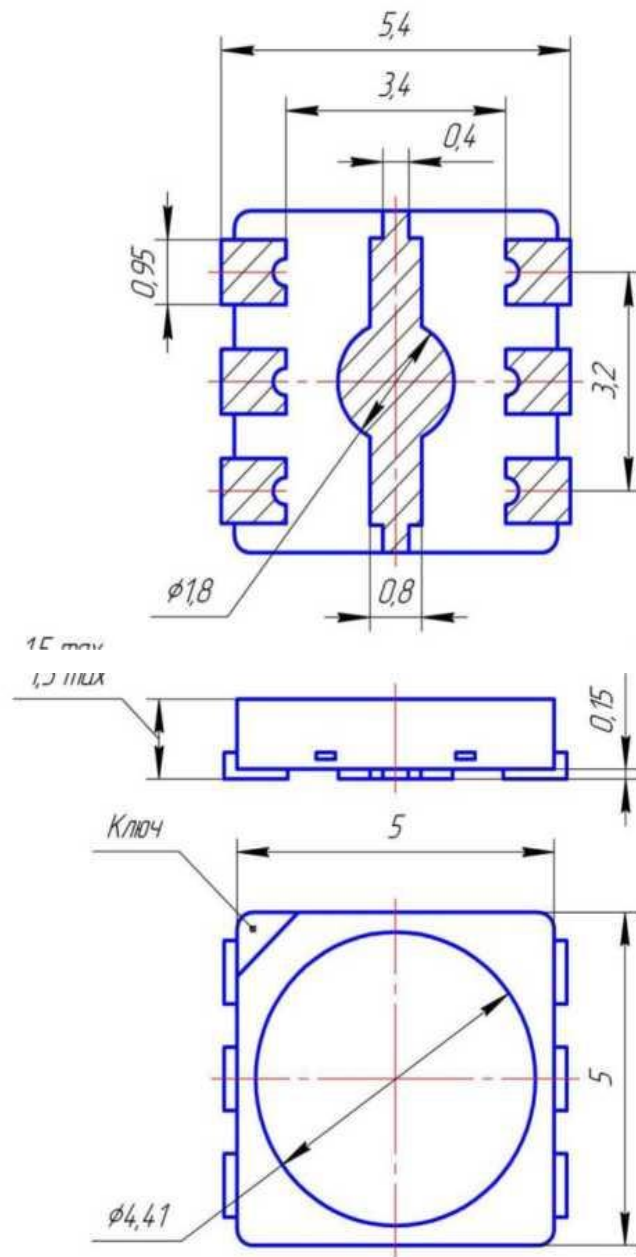


Рисунок 2.2 - Габаритне креслення джерела світла КІПД 154 А92-Б2 корпус типу 5050-1

Особливістю корпусу 5050-1 є наявність металевої вставки, що істотно знижує тепловий опір кристал-корпус. Для виробів типу КІПД 154Г92 використовувався пластмасовий корпус без металевої вставки (рис.2.3)



Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд джерела світла КИПД154Г92 у пластмасовому корпусі 5050-2

У корпусі розташований кристал на основі системи GaN-InGaN розміром 1x1 мм (КИПД 154A92), або 0,5x0,5 мм (КИПД 154 Г92, на поверхню якого наноситься шар жовто-зеленого люмінофора типу ФЛЖ-7).

Граничні характеристики експлуатації джерел світла:

- максирисьно допустимий постійний прямий струм-500 мА;
- максирисьно допустима постійна зворотна напруга 5;
- максирисьно допустимий імпульсний прямий струм при $f = 1$ кГц, $Q = 10$ - 700 мА;
- підвищена робоча температура корпусу +85оС;
- знижена робоча температура корпусу –60оС;
- температура паяння 235 ± 5 оС;
- допустиме значення потенціалу статичної електрики 2000;
- напрацювання до відмови 50000 год;
- тепловий опір рп -корпус - 30 оС/Вт;
- маса не більше 0,6 г.

Відносний спектральний розподіл потужності випромінювання представлено рис 2.4.

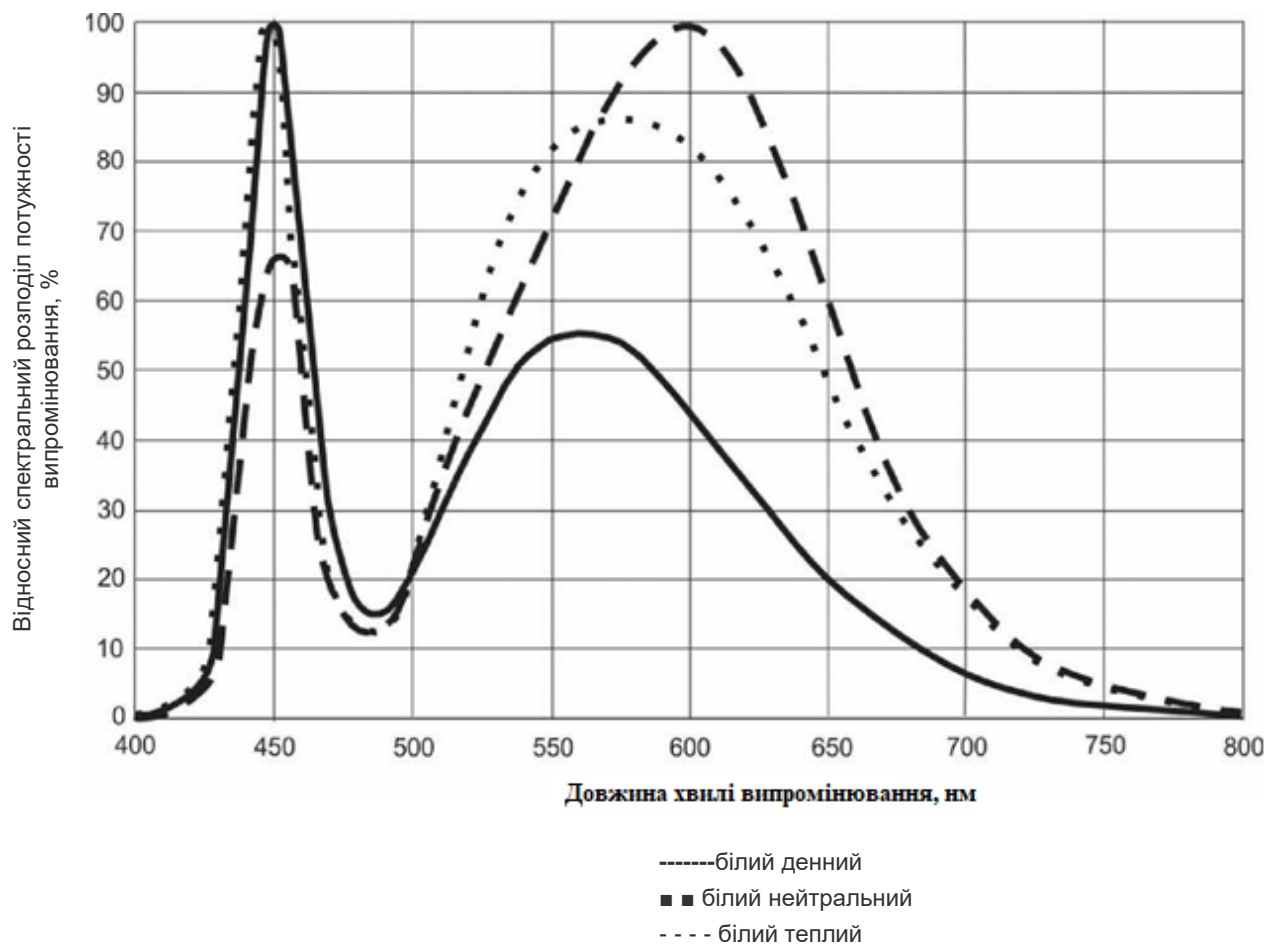


Рисунок 2.4 – Спектр випромінювання джерела світла

Рекомендований спосіб монтажу виробу на друкованій платі представлений рис 2.5.



Рисунок 2.5 - Рекомендований спосіб монтажу виробу на друкованій платі (тепловідведення)

2.2 Методи дослідження електричних і фотометричних параметрів і режимів роботи напівпровідникових джерел світла

2.2.1 Методи вимірювань вольт-амперних та вольт-фарадних характеристик

В даній роботі дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) та вольт-фарадних характеристик (ВФХ) джерел проводилися за допомогою автоматизованого комплексу «Метроном-03».

Технічні характеристики комплексу "Метроном-03":

- напруга до структури - від -10 до +10 В з кроком 600 мкВ;
- діапазон вимірюваних ємностей - 0.5...4000 нФ;
- діапазон коректно вимірюваних струмів – від 1 до 103 нА;
- похибка вимірювання у всіх діапазонах – менше 1%;
- чутливість вимірювача ємності – менше 0,01 нФ;
- чутливість вимірювача струму – 0,1 нА.

Загальний вид комплексу представлено рис 2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд комплексу «Метроном-03»

На рис 2.7 представлені типові вольт-амперні характеристики (ВАХ) досліджуваних джерел світла за різних температур.

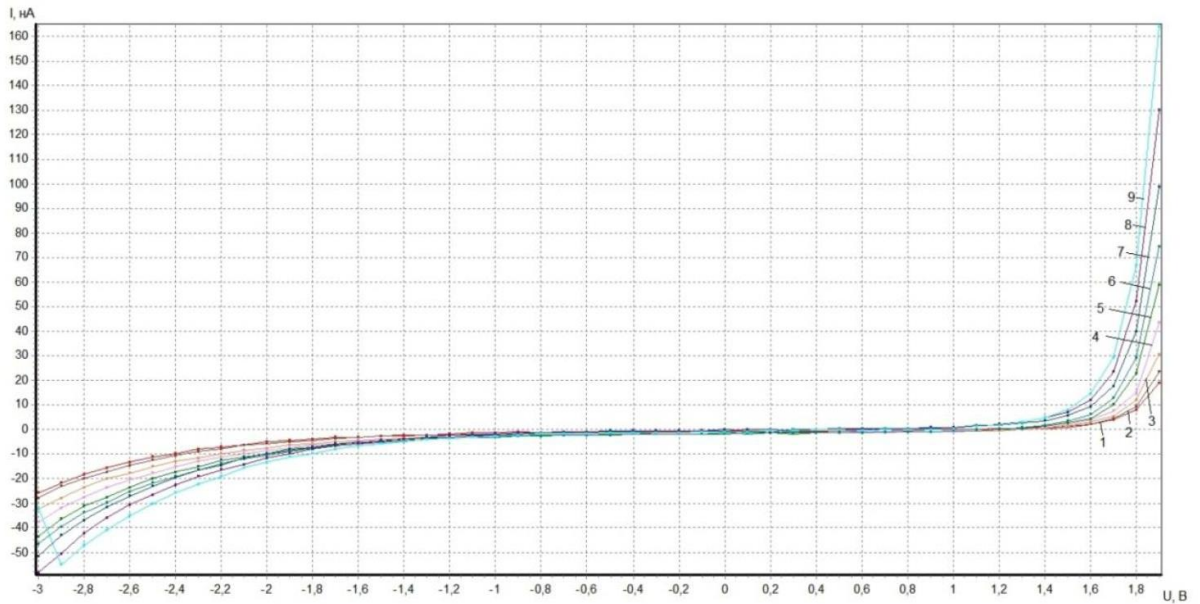


Рисунок 2.7 – ВАХ залежно від температури. 1 – ВАХ при $T = 250\text{C}$; 2 – ВАХ при $T = 300\text{C}$; 3 – ВАХ при $T = 400\text{C}$; 4 – ВАХ при $T = 500\text{C}$; 5 – ВАХ при $T = 600\text{C}$; 6 – ВАХ при $T = 700\text{C}$; 7 – ВАХ при $T = 800\text{C}$; 8 – ВАХ при $T = 900\text{C}$; 9 – ВАХ при $T = 1000\text{C}$

На рис 2.8 представлені типові вольт-фарадні показники того ж джерела при різних температурах.

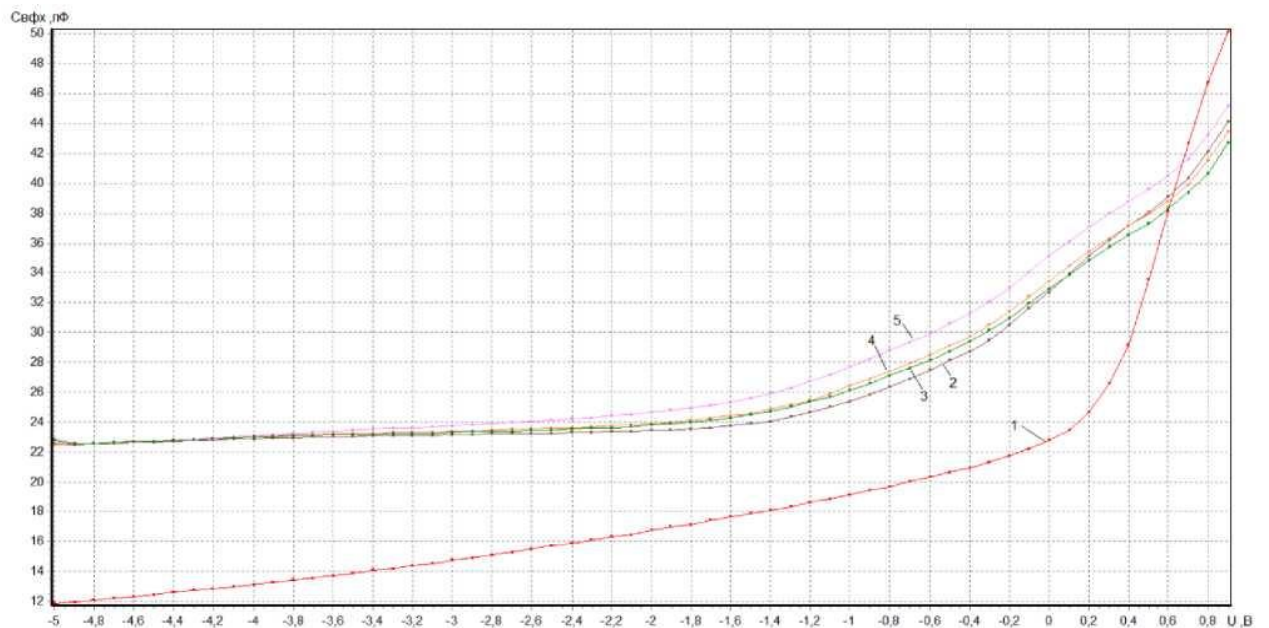


Рисунок 2.8 – Вольт – фарадні характеристики експериментальних зразків.

Вольт-фарадні характеристики використовувалися під час аналізу процесів деградації напівпровідникових джерел світла після випробувань.

2.2.2 Вимірювання теплового опору напівпровідникових джерел світла

Для дослідження теплових характеристик напівпровідникових джерел світла використовувалася установка УТС розроблена на кафедрі. Установка призначена для вимірювання теплового опору рп перехід - зовнішнє середовище світлодіодів у корпусах типу 5050. УТС є автоматичним приладом, що складається з електронного блоку, комірки вимірювального, перетворювача інтерфейсу RS485/RS232 (далі буфер) і комп'ютерної програми.

Основні технічні характеристики установки наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Основні технічні характеристики

Найменування	Значення величини
Величина струму, що гріє, мА	від 5 до 1500
Величина вимірювального струму, мА	2,1
Діапазон вимірювання напруги на рп-переході (при гріючому струмі), В	від 0,5 до 20
Діапазон вимірювання напруги на рп-переході (при вимірювальному струмі), В	від 0 до 4,9
Діапазон вимірювання температури, °С	від 0 до 150
Потужність, Вт, не більше	100
Габаритні розміри, мм, не більше	
- електронного блоку	230x155x240
- вимірювального осередку	190x150x160
- буфера	140x35x125

Зовнішній вигляд установки представлений рис 2.9.

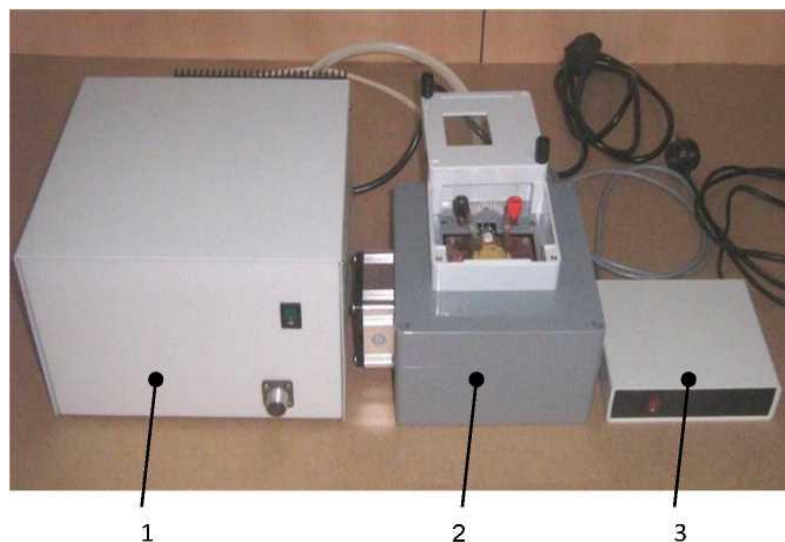


Рисунок 2.9 – Установка для вимірювання теплового опору. 1 - електронний блок, 2 - вимірювальний осередок, 3 – буфер

Установка складається з електронного блоку, вимірювального осередку та буфера для зв'язку з комп'ютером. Електронний блок здійснює такі функції:

- формування та видача у вимірювальний осередок гріючого та вимірювального струмів;
- вимірювання напруги на рп переході при гріючому та вимірювальному струмі;
- вимірювання температури робочого столика вимірювального осередку;
- керування нагріванням робочого столика;
- управління вентилятором обдування радіатора, на якому встановлено робочий столик.

Вимірювання теплового опору здійснюється так:

1. Електронний блок включає вентилятор, подає на досліджуваний світлодіод заданий струм, (I_{Γ}) і здійснює постійний вимірювання температури робочого столика. При встановленні постійної температури на робочому столику здійснюється вимірювання напруги на світлодіоді. У комп'ютері відображається виміряна температура робочого столика (T_1) і напруга.

2. Електронний блок перемикається з режиму гріючого струму на вимірювальний. Час перемикання менше 100 наносекунд. Через 1 мікросекунду, з інтервалом 1 мікросекунду, проводиться 5 вимірів напруги на світлодіоді. Припускаючи експонентний закон охолодження р-п переходу, екстраполюється напруга до $U(\tau_3 = 0)$.

3. Через світлодіод подається вимірювальний струм. Вмикається вентилятор і вмикається нагрівання столика. Під час нагрівання вимірюється напруга на світлодіоді. При $U=U(\tau_3 = 0)$ вимірюється і передається на комп'ютер температура робочого столика (T_2).

4. Тепловий опір визначається за такою формулою:

$$R_T = (T_2 - T_1) / (I_{\Gamma} * U_{\Gamma} - P_1) , \quad (2.1)$$

де R_T - тепловий опір р-п-перехід - зовнішнє середовище; P_1 – потужність випромінювання світлодіода. Середньоарифметичне з 10 запам'ятованих температур передається на комп'ютер (t_p). Комп'ютер видає на екран монітора такі значення:

- температура рп – переходу (t_p);
- перегрів ($t_p - t_0$);
- тепловий опір R_T .

Похибка вимірювань теплового опору вбирається у $\pm 10\%$.

2.2.3 Методика виміру спектральних характеристик

Для дослідження спектральних характеристик та колірної температури напівпровідникових джерел світла використовували волоконні спектрометри типу USB2000 та Avantes. З можливістю комп'ютерної обробки результатів вимірювань та з наступним розрахунком колірної температури та індексу кольору.

Спектральний діапазон вимірювань від 190 нм до 900 нм з роздільною здатністю по спектру близько 1 нм. Схема вимірювань спектрометром USB2000 представлена на рис 2.10.

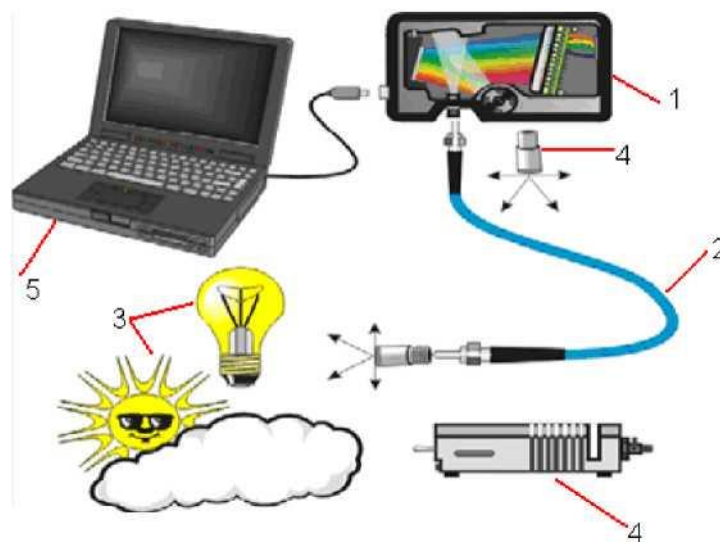


Рисунок 2.10 – Схема для вимірювання спектра випромінювання джерела світла: 1 – спектрометр USB2000; 2 – світловоди; 3 – еталонні джерела світла; 4 – напівпровідникові джерела світла; 5 - комп'ютер

Для більш точних вимірів використовувався спектральний комплекс Avantes з фотоприймачем, що охолоджується (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 - Загальний вид системи для дослідження спектральних та колірних характеристик світлодіодів на основі блоку Avantes

2.3 Обладнання для випробувань на надійність та довговічність

Для проведення випробувань виробів електронної техніки та матеріалів на вплив знижених та підвищених температур під електричним навантаженням відповідно до вимог стандартів: ГОСТ 20.57.40681, ГОСТ РВ20.57.416-8, а також вітчизняних та міжнародних стандартів: МЭК 88-2-2-74 (ГОСТ 28200-89) 747-11, ГОСТ 20.57.406-81, ОСТ 11 0730В-83 використовують спеціальні камери (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Камера КТХ-0,08-01

Камера має такі характеристики :

- діапазон температури всередині камери – 60 – +155оС;
- коливання температури обсягу камери ± 2 оС;
- корисний об'єм камери – 80 дм³.

Камера забезпечує:

- завдання та контроль режимів випробувань зі ступінчастою або циклічною зміною режимів;
- формування та індикацію режимів та результатів функціонування;
- видачу результатів вимірювання параметрів та довідкову інформацію аварійного та фактичного стану випробувань.

Для введення в простір робочої камери вимірювальних приладів, сигнальних проводів, що живлять, на лівій стінці камери розташований прохідний отвір. У камері забезпечується можливість проведення випробувань за програмами, що самостійно задаються користувачем. Управління охолоджувачем та електронагрівачем здійснює електронний температурний контролер. Як датчики температури використовуються термоелектричні перетворювачі. Також для випробувань використовувалося стандартне обладнання ВАТ НДІВП: випробувальні стенди, джерела живлення, контактні пристрої.

2.4 Методи випробувань на надійність та довговічність

2.4.1 Рекомендації щодо проведення випробувань

При випробуваннях та вимірюваннях електричних параметрів джерела світла необхідно використовувати тепловідведення, що забезпечує температуру корпусу джерела світла відповідно до режиму випробувань. Площа поверхні тепловідведення має бути не менше 8 см^2 на 1 Вт потужності споживаної джерелом. Вимірювання постійної прямої напруги $I_{\text{пр}}$ проводять за ГОСТ 25024.3 в режимах та умовах, зазначених у технічних умовах. Похибка вимірювання постійної прямої напруги не більше $\pm 5 \%$ із ймовірністю 0,95. Визначення колірної температури світлодіода виробляють за допомогою спектрокалориметр ТКА-ВД. Похибка виміру - $\pm 10 \%$. Колірна температура джерела повинна відповідати значенням, встановленим у технічних умовах. Відхилення вимірюваної колірної температури на величину похибки вимірювання не є ознакою бракувань. Визначення координат групи кольоровості проводять за ГОСТ 25024.7 за допомогою спектрокалориметра ТКА-ВД. Похибка вимірювання координат групи кольоровості (x, y) – не більше $\pm 0,01$. Відхилення виміряних значень координат групи кольоровості від норм на величину похибки виміру не є ознакою бракувань. Вимірювання світлового потоку Φ_v проводять за допомогою фотометричного блоку, виконаного на основі фотометричної кулі. Вимірювання проводять із використанням контрольних світлодіодів. Вимірювання можуть проводитися як при постійному, так і при імпульсному струмі живлення, що визначається швидкодією приладу (обладнання), що вимірює фотострум. Перед початком вимірювання світлового потоку Φ_v проводять градування фотометричної кулі за трьома контрольними світлодіодами з колірною температурою, що відрізняється від колірної температури випробуваних світлодіодів не більше ніж на величину $\pm 500 \text{ K}$. Довірча межа похибки результату вимірювання світлового потоку становить $\pm 15 \%$ при довірчій 0,95. Випробування безвідмовності проводять при температурі середовища $85 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ при робочому струмі. Похибка утримання електричного режиму випробувань $\pm 5\%$. Контроль працездатності світлодіодів у процесі випробування проводять перевіркою їхньої світності. Час витримки після закінчення випробування перед вимірюванням

параметрів-критеріїв придатності – не менше 1 год.

Випробування на довговічність проводять у норриських кліматичних умовах протягом 100000 год. Допускається проводити прискорені випробування за температури навколишнього середовища 85 °С з коефіцієнтом прискорення - $K=25$. Перевірку працездатності світлодіодів проводять через кожен добу контролем їхньої світності. Після закінчення випробувань світлодіоди витримують у норриських кліматичних умовах не менше 1 години, проводять зовнішній огляд та вимірюють параметри-критерії придатності.

2.5 Вимірювання температури переходу по довжині хвилі максимума спектрального випромінювання

Використання як термочутливий параметр прямого падіння напруги може вносити істотні похибки у визначення точного значення температури, так як основний внесок у величину падіння напруги можуть давати омичні контакти, а не сама активна частина кристала. Крім того, необхідність наявності електричного контакту створює труднопереборні проблеми при вимірюванні температури джерел світла в процесі прискорених випробувань. Тому при контролі температури кристалів джерел світла переважними є безконтактні методи вимірювання, наприклад, використовуючи як термозалежний параметр спектр випромінювання [1,2].

Відомо, що форма спектра рекомбінаційного випромінювання у напівпровідниковому матеріалі може бути описана виразом [1,2]:

$$I(h\nu) = B(h\nu - \Delta E_g)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.2)$$

де $I(h\nu)$ - інтенсивність випромінювання; h -постійна Планка; ν -частота коливань фотонів; B – постійна, яка розраховується за формулою:

$$B = \frac{2q^2 m_r^{3/2}}{nch^2 m_c}, \quad (2.3)$$

де m_c – ефективна щільність електронів; m_r - наведена ефективна маса електрона та дірки; n -показник заломлення. Форма діапазону (рис.2.13) залежить від температури. Так інтенсивність випромінювання змінюється за експонентному

закону:

$$I(h\nu) \sim \sqrt{E - \Delta E_g} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (2.4)$$

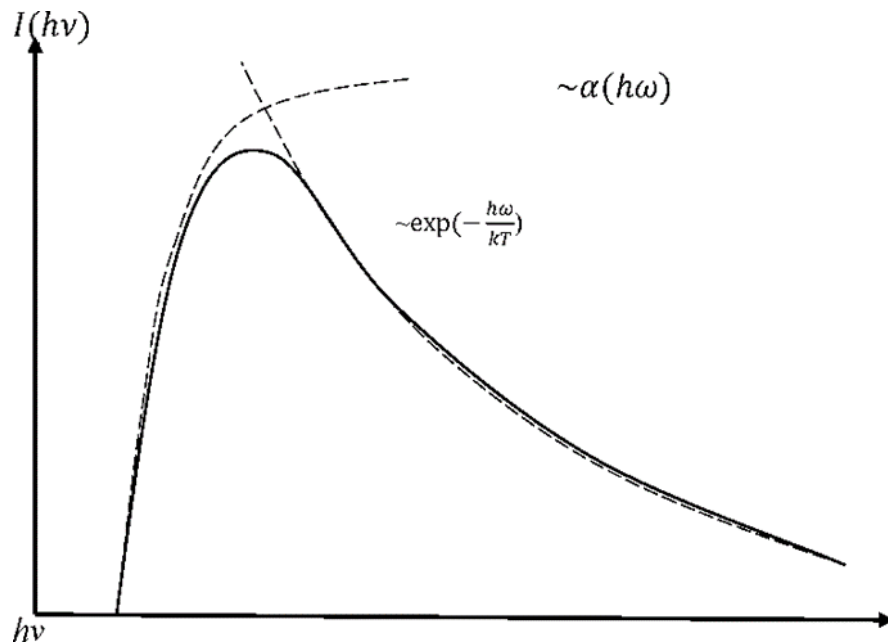


Рисунок 2.13 – Типовий спектр люмінесценції напівпровідникового матеріалу

При збільшенні температури спектр випромінювання так само поширюється, яке максимум зсувається у бік низьких енергій. Ширина спектру на рівні 0,5 від максимального значення, так само залежить від температури і дорівнює:

$$\Delta E_{0.5} \approx 1,8kT \quad \text{або} \quad \Delta \lambda_{0.5} \approx \frac{1,8 kT \lambda^2}{hc}, \quad (2.5)$$

Але подібна температурна залежність справедлива лише гомопереходу. Для гетероструктури GaN-GaInN з множинними квантовими ямами залежність форми спектра від температури обумовлена зміною ефектиної ширини забороненої зони ΔE_g^* , у найпростішому випадку, яка визначається як:

$$\Delta E_g^* = \Delta E_g(\text{InGaN}) + E_{c1} + E_{v1} + \sum_i \Delta E_i \quad (2.6)$$

де $\Delta E_g(\text{InGaN})$ – ширина забороненої зони InGaN; E_{c1} і E_{v1} - положення перших рівнів розмірного квантування для електронів та дірок у ямах; під знаком суми містяться інші види вкладів у ефективну ширину зони внаслідок деформації п'єзоелектрів, кулоновської взаємодії електронів та дірок та інші. Всі параметри,

що входять у формулу, залежать від температури, і отже дають свій внесок у форму і ширину спектра випромінювання.

Для гетероструктури GaN-GaN з множинними квантовими ямами температурна залежність напівширини лінії випромінювання має наступний вид $\Delta E_{0,5} \approx 6,8kT$, причому розширення спектра відбувається переважно у бік менших енергій (великих довжин хвиль). Підвищення температури доквілля неоднозначно впливає зміну величини зовнішнього квантового виходу. Так залежність світлового потоку від температури світлодіода без люмінофора можна описати за допомогою відомої формули:

$$I(t) = I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right), \quad (2.7)$$

де T_c - характеристична температура кристала (для GaN $T_c=1600$ K). Згідно з експериментальними даними, температурний коефіцієнт для світлового потоку становить близько 1-1,5 % на кожні 10 °C перегріву.

За наявності люмінофора температурна залежність виходу люмінесценції описується формулою Мотта:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_\alpha}{kT}\right)}, \quad (2.8)$$

де A - константа гасіння; E_α -здається енергія активації гасіння люмінесценції; η_0 – квантовий вихід люмінесценції при кімнатній температурі.

Температурна залежність світлового потоку для світлодіода з люмінофором може мати вигляд:

$$I(t) = I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \left(\frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_\alpha}{kT}\right)}\right), \quad (2.9)$$

На рис 2.14 представлена температурна залежність спектрів випромінювання напівпровідникових джерел білого світла на основі гетероструктур InGaN/GaN типу КИПД 154А92. Перетворення синього світла кристала в жовто-червоний проводилося за допомогою люмінофора на основі суміші ітрій- та гадоліній-алюмінієвого гранату легованого церієм типу ФЛЖ-7.

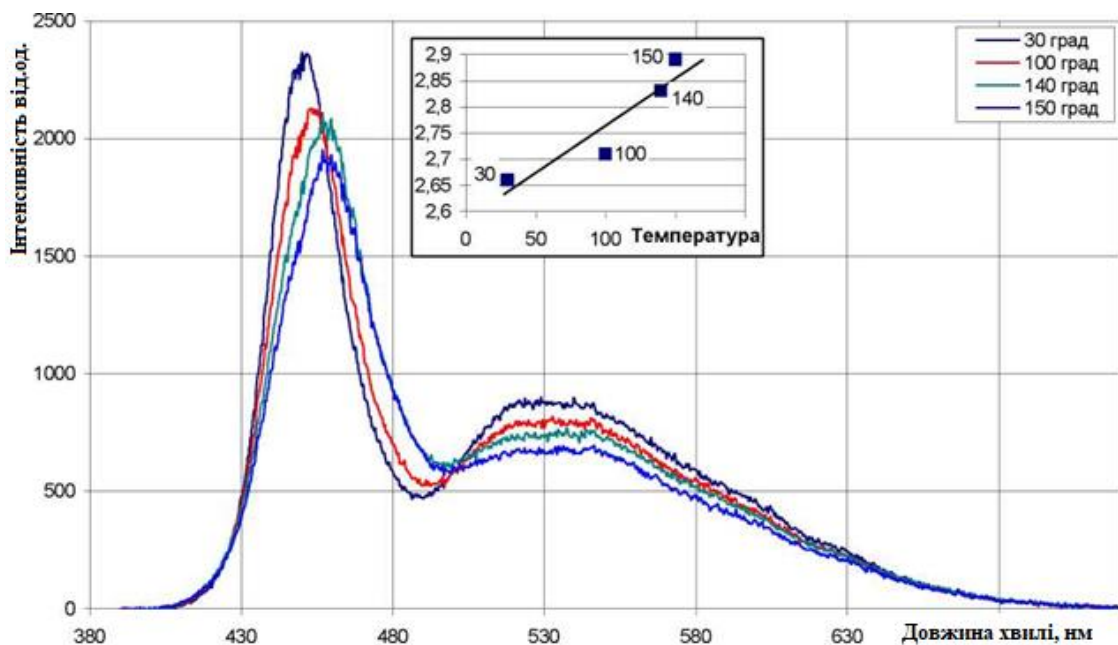


Рисунок 2.14 – Залежність спектрів випромінювання напівпровідникового джерела світла; на вставці представлена температурна залежність відношення максимумів спектрів випромінювання кристала, на довжині хвилі 450-455 нм та люмінофора на довжині хвилі 530 нм

Як впливає із залежностей, збільшення температури призводить як до зменшення інтенсивності люмінесценції, так і до зсуву максимумів випромінювання у бік довших хвиль. Причому зі збільшенням температури зміна інтенсивності люмінесценції кристала та люмінофора відбувається з різними швидкостями, що пов'язано з відмінностями в енергії активації температурного гасіння люмінесценції. Крім того є деякі відмінності та механізми температурного гасіння. Механізми температурного гасіння електролюмінесценції у гетероструктурах InGaN/GaN докладно описані у науково-технічній літературі.

Отже, температурну залежність півширини спектру можна використовувати для контролю температури активної області. Для цього необхідно провести калібрування спектру, проводячи вимірювання за кількох значень температури кристала. На практиці це реалізується шляхом вимірювання термостата в імпульсному і безперервному режимах при одному значенні прямого струму. Дуже важливим є імпульсний режим вимірювань, що виключає процес саморозігріву джерела. Тому вимірювання проводять при тривалості імпульсів порядку 1 мкс і шпаруватості не менше 1000. На рис 2.15 показані залежності півширини спектра від температури для імпульсного струму для двох джерел

синього світла, виробництва ВАТ «НИИПП» (Росія) та фірми SemiLed (Китай) у пластмасовому корпусі типу 5 (без тепловідведення).

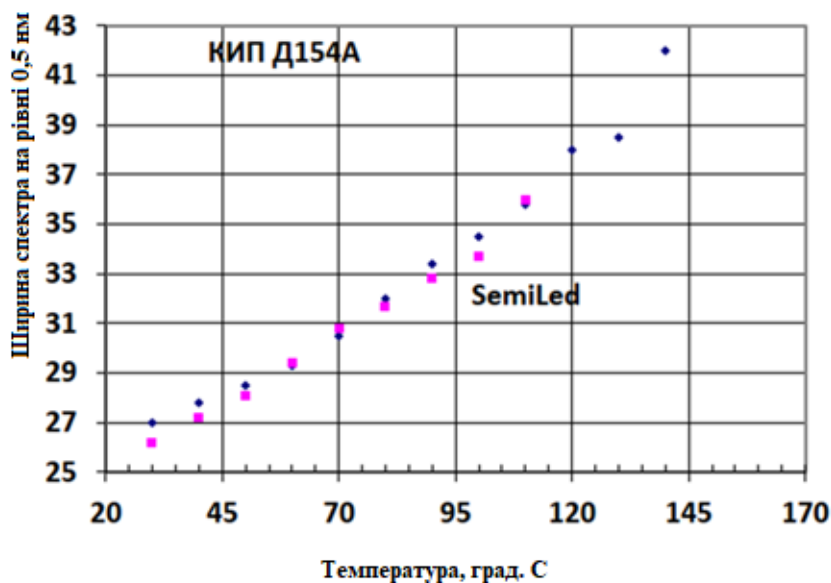


Рисунок 2.15 - Залежність півширини спектра на рівні 0,5 від температури для двох типів джерел світла, при імпульсному струмі 350 мА

На рис 2.16 представлені виміряні залежності перепаду температур кристал-корпус джерел світла КИПД154А92 та КИПД154Г92 при різних значеннях робочого струму.

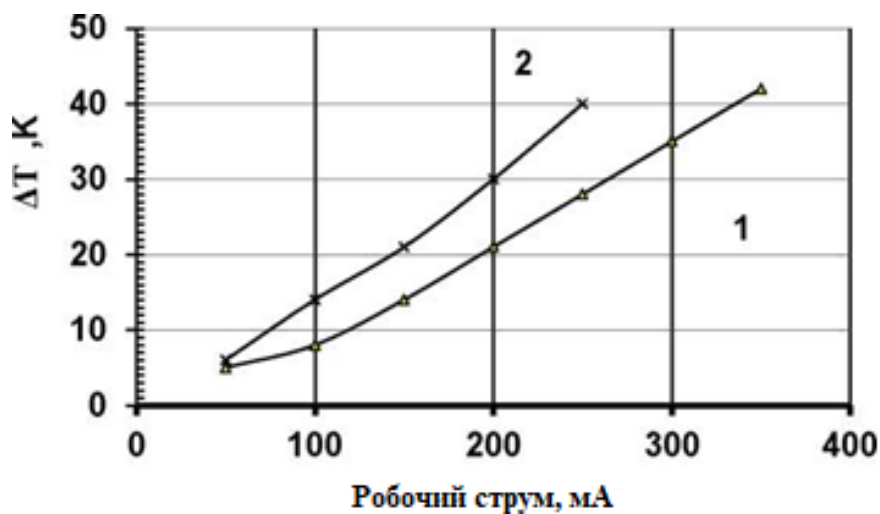


Рисунок 2.16 - Залежність перепаду температур ΔT активної області кристал-навколишнє середовище від робочого струму, де 1-КИП 154А92 в корпусі 5050-1; 2- КИПД 154Г92 в корпусі 5050-2, ($T_{cp} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$)

Результати вимірювань довжини хвилі в максимумі спектра випромінювання при різних температурах наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Залежність довжини хвилі максимуму діапазону від температури корпусу

	I = 100мА							
T, °C	35	45	55	65	75	85	95	105
λ_{max} , нм	451,9	452,6	453,4	454	454,7	455,3	456,1	456,9

За отриманими результатами збудували калібрувальну залежність температури від довжини хвилі в максимумі $T = f(\lambda_{max})$, представлену на рис 2.17.

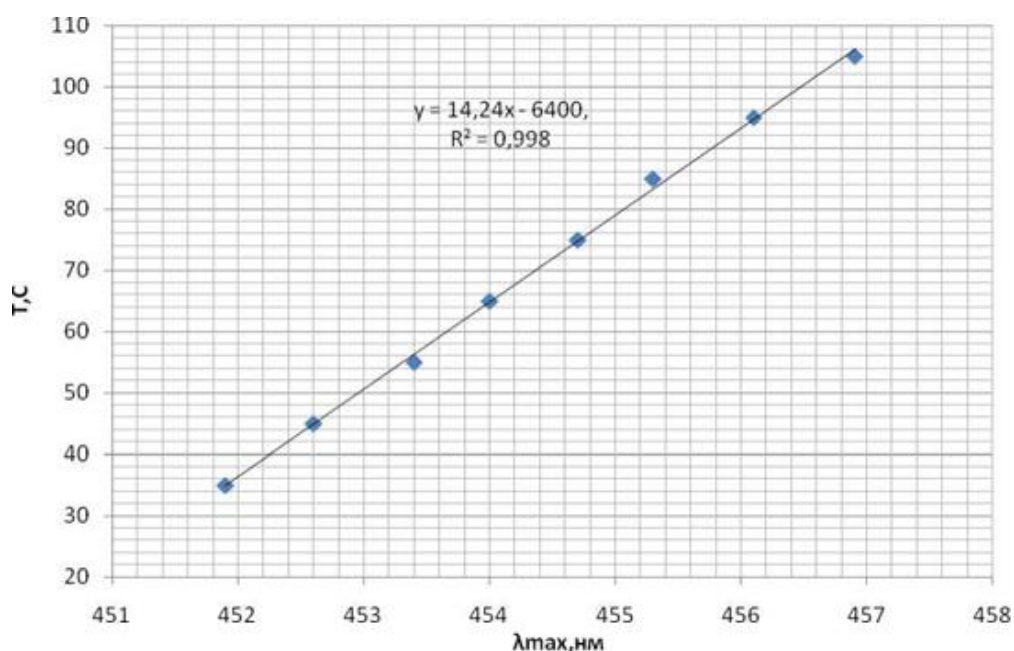


Рисунок 2.17 – Температурна залежність довжини хвилі в максимумі спектра випромінювання

Після апроксимації отриманих експериментальних точок отримали лінійну залежність, що описується рівнянням:

$$T_{p-n} = 14,24 \cdot \lambda_{max} - 6400, \quad (2.10)$$

Таким чином, можна визначити температуру рп-переходу, знаючи залежність представлену у формулі (2.10) та довжину хвилі в максимумі спектра випромінювання.

2.6 Висновки до розділу

Кількість тепла, що виділяється в кристалі, нелінійно залежить від споживаної електричної потужності. Тепловий опір кристала визначається як геометричними і теплофізичними характеристиками кристала і корпусу, а й є функцією робочого струму в кристалі.

При визначенні теплового опору потужних провідникових джерел білого світла необхідно враховувати частку тепла, що виділяється в люмінофорному покритті. Температура кристала джерела світла нелінійно збільшується у разі підвищення температури корпусу.

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Прискорені випробування напівпровідникових джерел світла

Однією з найважливіших параметрів напівпровідникових джерел світла є його довговічність. Середній термін служби повинен бути не менше ніж 100 000 годин, а освітлювальних систем на їх основі не менше ніж 35 000 годин. Критерієм відмови виробу є зниження сили світла на 30 % або їх повний вихід з ладу через руйнування, крім того, для оцінки довговічності можуть бути використані зміни та інших параметрів, наприклад, вольтамперної характеристики або колірної температури [18,]. За такої високої передбачуваної довговічності натурні випробування стають не рентабельними, зважаючи на їх високу тривалість і трудомісткість і тому актуальним стає розробка прискорених методів випробувань.

В даний час для прогнозування довговічності виробів напівпровідникової електроніки залишається практично єдиний спосіб - проведення прискорених випробувань в умовах більш високих навантажень, при цьому старіння прискорюється, а деградація параметрів відбувається так само, як і в звичайному режимі роботи. Отримані результати екстраполюють на нормальні умови експлуатації. Це дозволяє за відносно короткий термін вивчити період старіння виробу через взаємозв'язок механізмів відмов з часом їх прояву.

Практика експлуатації та досвід прискорених випробувань показали, що залежність довговічності від температури описується логарифмічно нормальним розподілом із зростаючою функцією інтенсивності відмов.

Питання надійності напівпровідникових джерел світла є найважливішим для подальшого розширення їх виробництва та застосування. Одну з основних ролей щодо надійності джерел світла грає деградація параметрів кристала. Крім того, для джерел білого кольору важливим питанням є деградація люмінофора та системи кристал-люмінофор загалом. Це і визначає вибір трьох основних проблем та відповідних напрямів досліджень:

1. необхідність визначення граничних показників джерел світла;
2. необхідність вивчення деградації випромінюючих структур;

3. необхідність вивчення деградації люмінофора.

Метою таких досліджень є вивчення механізмів та закономірностей процесів деградації напівпровідникових гетероструктур у процесі експлуатації. І найважливішим результатом цих досліджень має бути розробка математичних моделей деградації з урахуванням всіх складових енергії активації.

Важливим самостійним завданням є оцінка фактичної надійності, тобто. встановлення кількісних показників надійності готових виробів. На всіх етапах розвитку оптоелектроніки основним методом експериментальної оцінки надійності були натурні випробування готових виробів. При цьому оцінка надійності полягає у проведенні випробувань та наступній статистичній обробці результатів випробувань (відмов) для визначення кількісних показників надійності.

У міру вдосконалення виробів натурні випробування на надійність стають недостатньо ефективними, а часто й недоцільними. Виникають проблеми як економічного, але суто технічного характеру, т.к. утруднюється аналіз причин відмов. Сучасне виробництво досягло такого рівня розвитку, коли надійність напівпровідникових джерел світла у процесі експлуатації характеризується інтенсивністю відмов $A=10^{-5} - 10^{-6}$ год.⁻¹. За такого рівня надійності для випробувань практично неможливо сформулювати обсяг вибірки, що забезпечує накопичення статистично достовірної інформації про кількість відмов протягом прийняттого часу натурних випробувань. Необхідною складовою методів оцінки надійності СД є аналіз відмов. Вимоги до надійності - ГОСТ 11630:

Напрацювання джерела світла на відмову $t_n - 100000$ год. Середній світловий потік Φ_v після 100000 годин роботи – 30 % значення при прийманні і поставці. Груповий показник безвідмовності - інтенсивність відмов λ при випробуванні протягом напрацювання в режимах та умовах допустимих ТУ за допустимої ймовірності $P_x = 0,6$ повинен бути не більше 10^{-7} 1/год.

Прискорені випробування проводили при підвищеній температурі корпусу +85 °С як при номінальному струмі, так і при його подвоєній величині. У процесі випробувань періодично через 240 годин (10 діб) контролювалася температура кристала. Також кожні 240 годин випробування переривалися для контролю основних параметрів світлодіодів, при температурі корпусу +45 °С. Це значення

температури корпусу є базовим в оцінці коефіцієнта прискорення та часу випробувань.

Для розрахунку коефіцієнта форсування (K_y) керувалися формулою:

$$K_y = \frac{T_y^H}{T_y^\Phi} = \left(\frac{J_\Phi}{J_{\text{ном}}} \right)^m \cdot \exp \frac{\Delta E}{K} \left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\theta_\Phi} \right), \quad (3.1)$$

де T_y^H - гама відсотковий наробіток до відмови, встановлений у технічних вимогах, год.; T_y^Φ - час випробувань при підвищеній температурі навколишнього середовища, год.; $J_{\text{ном}}$, θ_H - струм споживання та температура р-п переходу для номінального електричного режиму, встановленого в ТУ та номінальної температури корпусу (радіатора); J_Φ , θ_Φ - струм споживання (А) та температура р-п переходу для електричного режиму та підвищеної температури корпусу (радіатора), прийнятих для режиму прискорених випробувань.

Струм споживання випромінювачів є постійною величиною як при нормальній температурі навколишнього середовища, так і при підвищеній.

Виходячи з вищесказаного, вираз (1) набуде вигляду:

$$K_\Phi = \exp \frac{\Delta E}{K} \left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\theta_\Phi} \right), \quad (3.2)$$

де ΔE – значення енергії активації, визначається експериментально. θ_H і θ_Φ задаються технічними вимогами (45 °С та 85 °С, відповідно).

На рис 3.1 представлений зовнішній вигляд пристроїв, що використовуються для випробувань: кільця з плакованого алюмінію, закріплені на тепловідвідному радіаторі, які розміщуються в термокамері. Електроживлення підводиться до кожного виробу індивідуально, а температура кілець контролюється термопарами. На рис 3.2 показаний сегмент кільця з розпаяними на ньому випробуваними джерелами світла, при такій конструкції вважаємо, що температура кільця не відрізняється від температури основи корпусу.

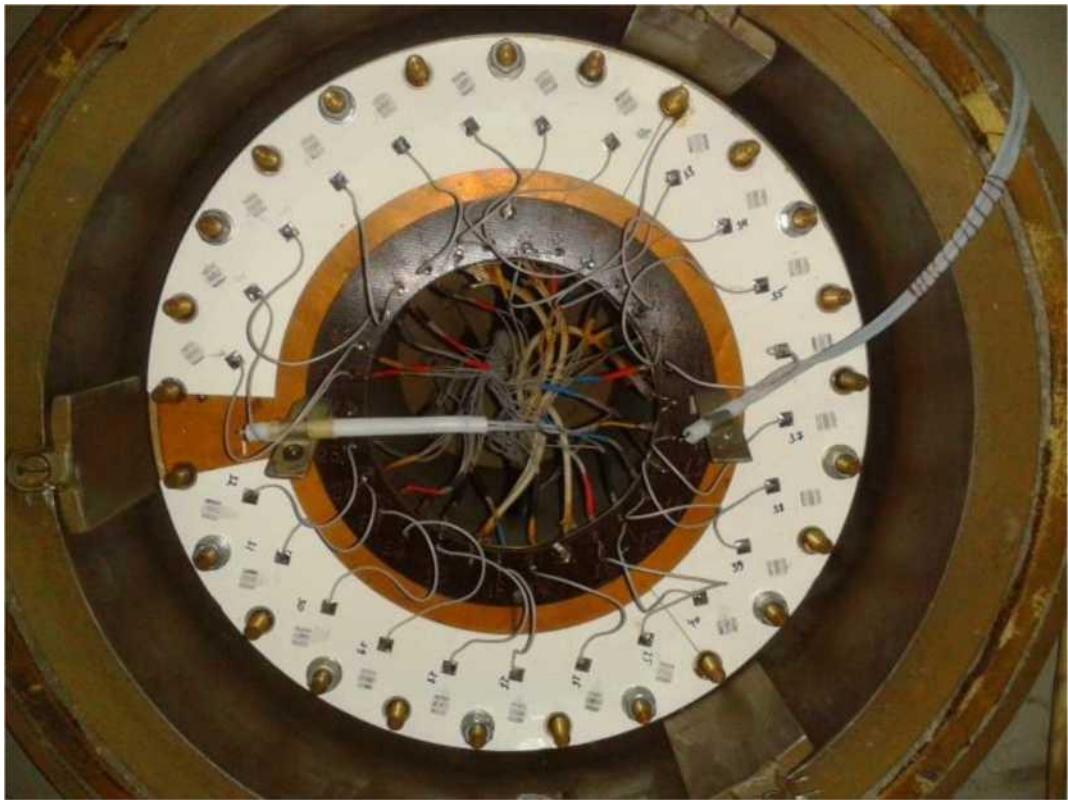


Рисунок 3.1 - Зовнішній вигляд пристроїв для прискорених випробувань, розміщених у термокамері

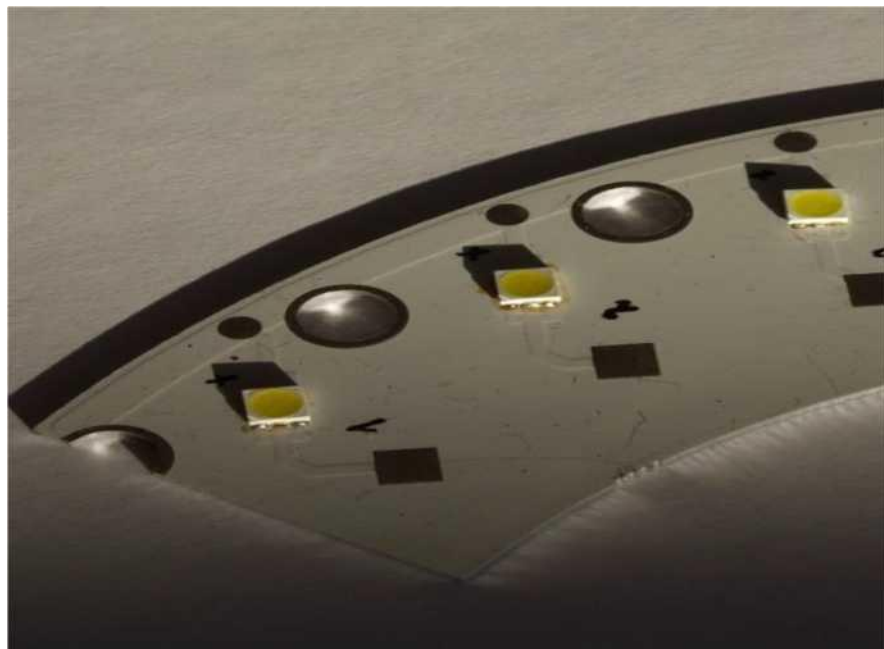


Рисунок 3.2 - Приклад розташування джерел світла у корпусі 5050-1 на кільцевому тепловідводі

Необхідна температура кільця під час випробувань забезпечується термостабілізованим тепловідведенням з поверхнею не менше 8 см^2 на 1 Вт потужності, яка споживається світлодіодом. Електрична схема включення

світлодіодів під час проведення випробувань наведено рис 3.3.

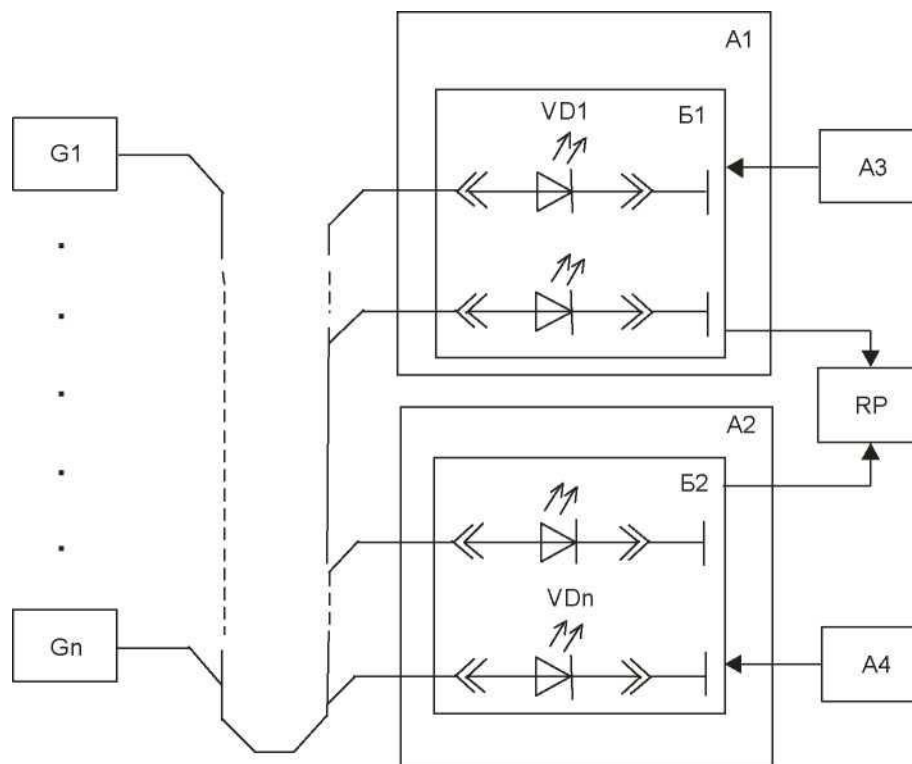


Рисунок 3.3 – Електрична схема включення джерел світла при випробуваннях: А1, А2 – термостат; А3, А4 – регулятор температури тепловідведення; Б1, Б2 – тепловідведення; RP - вимірювач температури (МИТ 8.10); G1-Gn – стабілізатори струму; VD1-VDn - випробувані вироби

Результати прискорених випробувань КИПД154А92 та КИПД154Г92 представлені на рисунках 3.4 та 3.5. Як впливає з графічного матеріалу, у процесі випробувань спостерігається зменшення світлового потоку виробів та збільшення прямого падіння напруги та колірної температури. Як було показано в розділі 3.1, ці зміни обумовлені фізико-хімічними процесами, з різною енергією активації, що здається. Найважливішим із цих процесів є зміна світлового потоку. З проведених випробувань слід, що зменшення світлового потоку при прискорених випробуваннях можна приблизно апроксимувати експонентою і описати експоненційним законом деградації у вигляді:

$$\Phi(t) = \Phi(0) \exp(-at), \quad (3.3)$$

де $\Phi(0)$, $\Phi(t)$ - світловий потік до та після випробувань; t – час випробувань, год; a - коефіцієнт деградації, для цієї партії виробів КИПД154А92 має величину $2,55 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$.

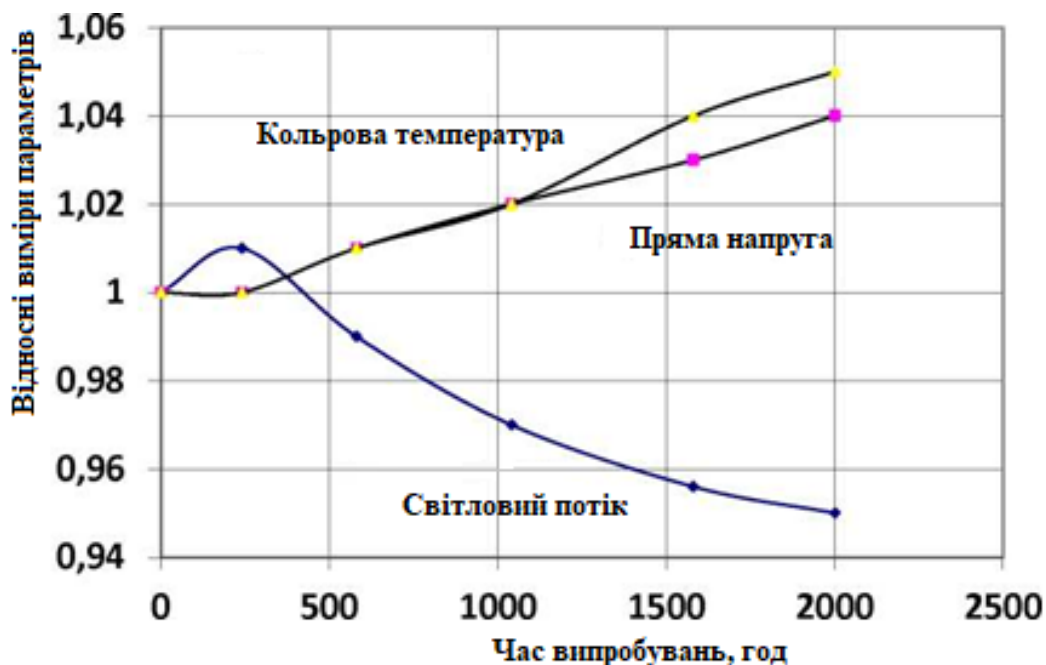


Рисунок 3.4 - Зміна параметрів джерела світла КІПД154А92 у процесі випробувань при струмі 350 мА та температурі корпусу 85 °С

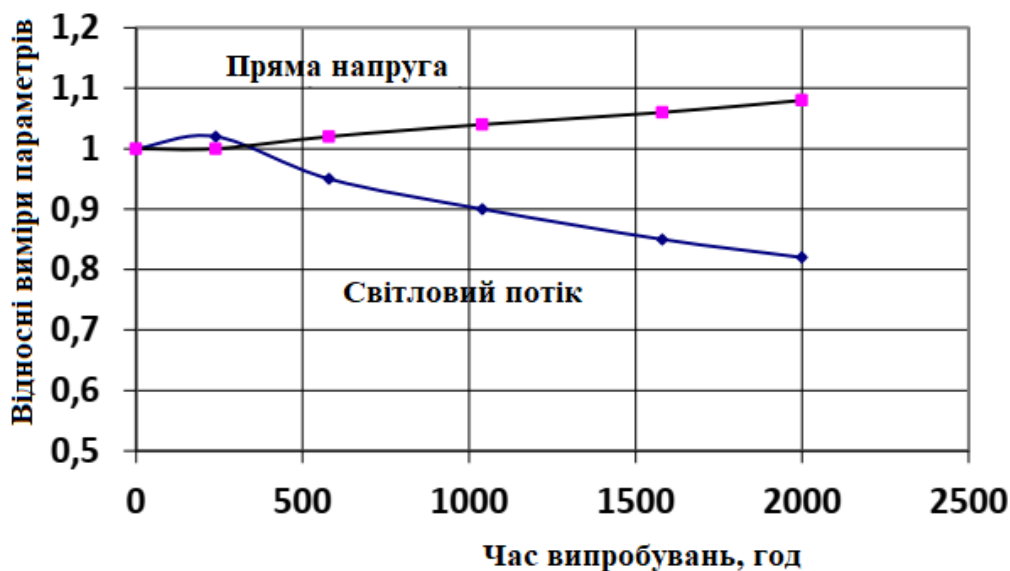


Рисунок 3.5 - Зміна параметрів джерела світла КІПД154Г92 у корпусі 5050-2 у процесі випробувань при температурі корпусу 85 °С

Одночасно зі зниженням світлового потоку при випробуваннях спостерігалось збільшення колірної температури світлодіода на 15-20 %, що пов'язано, з погляду, з деградаційними процесами в люмінофорному покритті. Ці зміни легко фіксуються за допомогою оптичного мікроскопа.

Найважливішим чинником, що впливає результати прискорених випробувань, є зростання температури кристала у процесі випробувань. Зростання температури обумовлено як зменшенням внутрішньої і зовнішньої квантової

ефективності світлодіода, так і збільшенням падіння напруги при постійному струмі випробувань. Таким чином, відбувається збільшення теплої потужності, що виділяється в кристалі, за час випробувань у 2000 годин на 10-15%, що призводить, відповідно, до підвищення температури кристала в кінці випробувань. На рис 3.6 представлені результати вимірювання температури кристала світлодіодів у процесі прискорених випробувань.

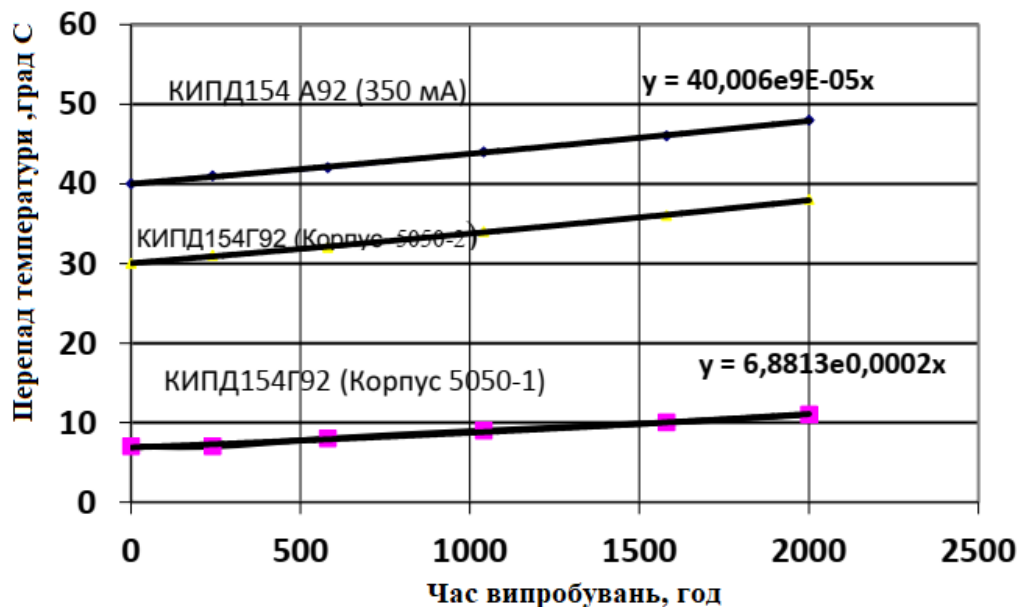


Рисунок 3.6 - Зміна перепаду температур кристал-корпус у процесі прискорених випробувань

Отримані результати свідчать, що коефіцієнт прискорення не є величиною постійної, а збільшується в 1,2-1,7 рази до кінця випробувань.

3.2 Характерні види відмов напівпровідникових джерел світла при прискорених випробуваннях

Чітке визначення основного виду відмови напівпровідникового джерела світла є критичним місцем при прискорених випробуваннях. Загальноприйнятим критерієм поступової відмови джерела є падіння вихідного світлового потоку 30% від вихідної величини. Але існують ще деякі механізми раптових відмов, які також можуть ініціювати вихід світлодіодів через різку зміну величини прямого струму або спектру світіння.

Основним джерелом раптових відмов напівпровідникових джерел світла є порушення електричного контакту. Причинами обривів електричних кіл є недостатня міцність зварних з'єднань у місцях контактів різнорідних матеріалів, хімічна, електрична, механічна руйнація металевих тонкоплівкових провідників, дефекти складання мікросхем. У таблиці 3.1 наведено статистику відмов напівпровідникових джерел світла типу КИПД-154А при прискорених випробуваннях, що проводяться у 2011-2015 роках.

Таблиця 3.1 - Види відмов напівпровідникових джерел світла під час прискорених випробувань

Вид відмови	Частка відмов, %	Енергія активації, еВ
Зниження світлового потоку на 30 %	71	0,65-0,75
Збільшення прямої напруги	15	0,8-1,1
Обрив	4	0,35
Коротке замикання	7	0,3
кольорова температура	3	1-1,2

Короткі замикання в електричних ланцюгах обумовлені в основному дефектами фотолітографії, виникненням каналів з інверсною електропровідністю, дефектами кристалічних ґрат напівпровідникового кристала, дефектами складання. Подібні відмови мають місце як у джерелах білого світла, так і синього, без люмінофорного покриття. На рис 3.7 представлено характерну відмову джерел світла, для наочності, без люмінофора - обрив золотого дроту.

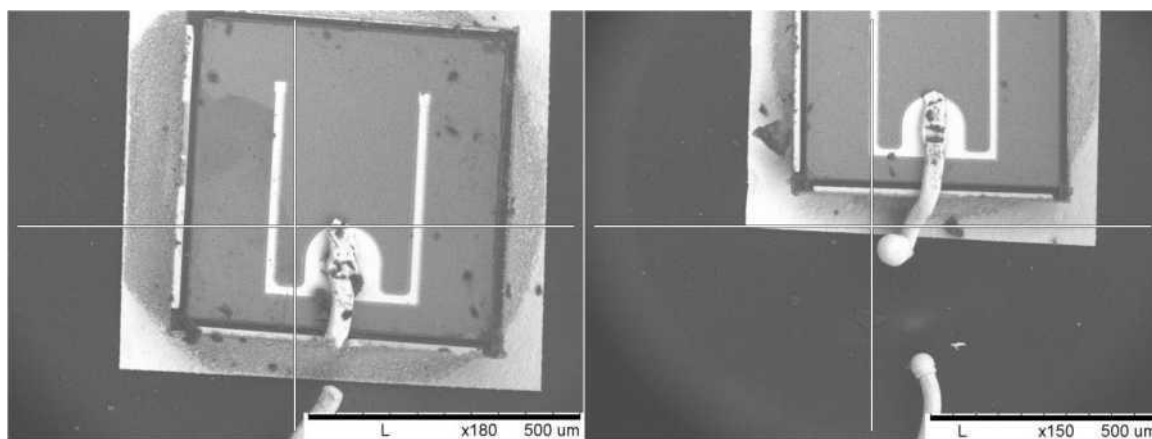


Рисунок 3.7 - Обрив золотого дроту (ліворуч), його оплавлення (праворуч) внаслідок перевищення струму

Наступний вид відмов – це збільшення опору електродів.

Деградація електродів у світлодіодах переважно має місце на електроді р-області. Основна причина деградації електрода полягає у дифузії металу у внутрішню область, так звана периферійна дифузія напівпровідника. Дифузія посилюється зі збільшенням інжектованого струму та температури. На жаль, вибрати відповідний матеріал для омичного контакту до р-області світлодіодів InGaN/GaN досить складно через велику ширину забороненої зони GaNp-типу. Електрод повинен мати менший коефіцієнт взаємної дифузії складових, інженери іноді застосовують бар'єрний шар для придушення ефектів електроміграції. Електроди з деяких матеріалів, таких як прозорий провідний оксид індія-олова (ІТО), або металів, що відбивають (срібло) схильні до таких проблем як електроміграція і термічна нестабільність.

Цей вид відмов представлений рис 3.8.

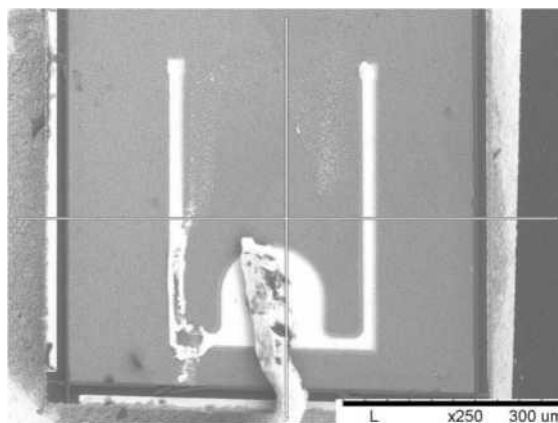


Рисунок 3.8 – Деградація омичного контакту світлодіода

Теплова деградація через неоптимальне тепловідведення домінує в джерелах світла в перші 10000 годин роботи, або ж у перші 100 годин при прискорених випробуваннях. Значна теплова потужність, що виділяється, вимагає ретельного монтажу кристала в корпус і корпуси на радіатор, за допомогою припою або теплопровідного клею. Якщо пори в припої створюють умови для недостатнього відведення тепла, гарячі точки, що виникають, призводять до теплової деградації та відказу типу «короткого замикання» (Рисунок 3.9).

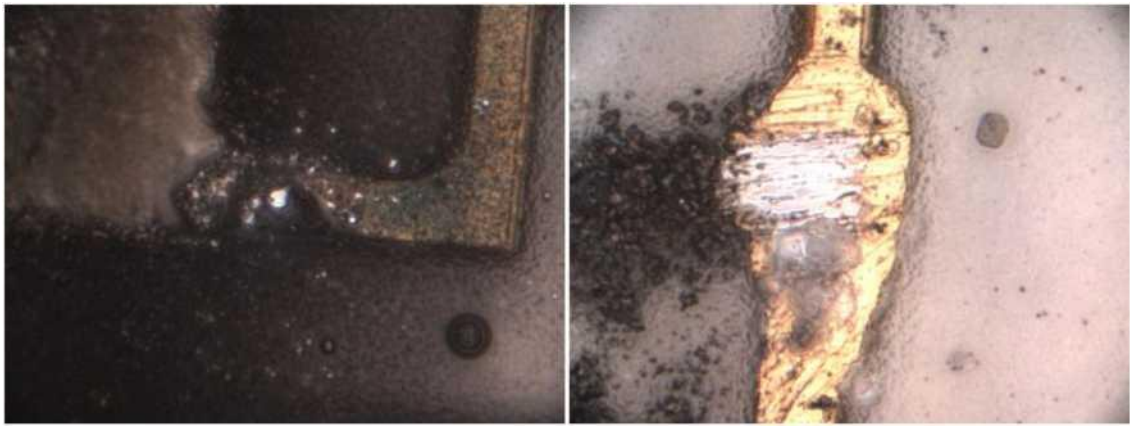


Рисунок 3.9 - Вигорання частини омичного контакту у виробках типу КИПД 154А92 внаслідок порушення теплового режиму

У початковій стадії освоєння виробництва джерел світла спостерігалася поява відмов, внаслідок пробою р-переходу під контактним майданчиком, у місці термокомпресійного приварювання золотого дроту. (Рисунок 3.10) На наш погляд, цей тип відмов обумовлений неоптимальним вибором режимів термокомпресійного зварювання: тиску та температури. В результаті чого в підконтактній області за рахунок високого тиску створювалися високі механічні напруги, що призводять до появи мікротріщин.

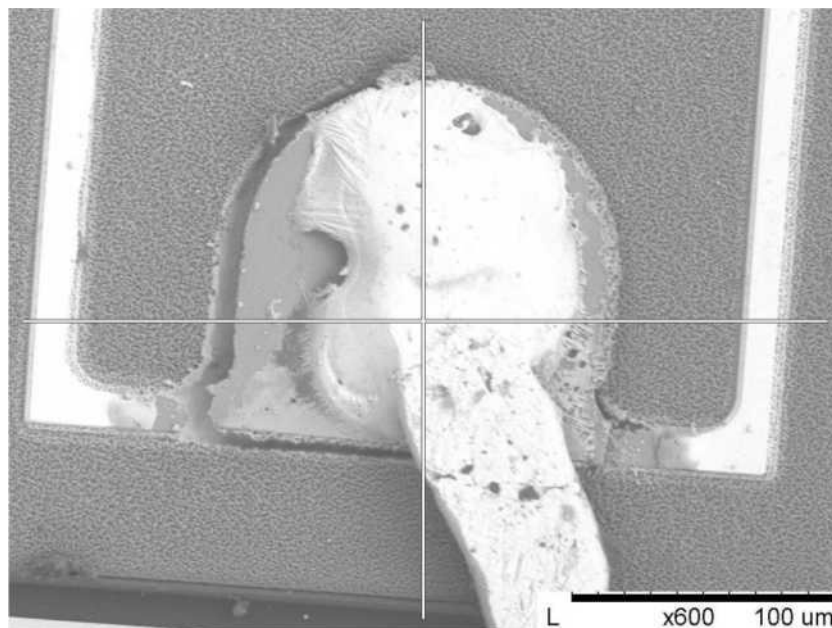


Рисунок 3.10 - Пробій p-області кристала під контактним майданчиком

Основними причинами параметричних відмов джерел світла, що виражаються в більшості випадків у зміні величини світлового потоку і прямого падіння напруги на рп переході, є фізико-хімічні процеси всередині кристала.

1. об'ємні, пов'язані з явищами напівпровідникового кристалі;
2. поверхневі, зумовлені явищами на межі розділу кристал-люмінофорне покриття;

3. об'ємні, пов'язані з процесами у люмінофорному покритті.

Випромінювання світла у світлодіоді відбувається в результаті рекомбінації інжектованих носіїв активної області. Зародження та зростання дислокацій, як преципітація вузлових атомів, призводить до деградації внутрішньої частини цієї області. Ці процеси можуть здійснитися лише за наявності дефекту кристалічної структури; висока щільність інжектованого струму, розігрів через інжектований струм і струм витоку, а також світло, що випускається, прискорюють розвиток дефекту. Вибір матеріалу з якого виготовлений світлодіод має значення, оскільки система AlGaAs/GaAs набагато чутливіша до цього механізму відмови, ніж $\text{CuTeMnGaAs (P)/InP}$.

Система InGaN/GaN (для світлодіодів блакитного та зеленого випромінювання) нечутлива до цього виду дефектів. В активних областях можуть зустрічатися прості рп переходи, вбудовані гетероструктури та множинні квантові ями. На межі розділу таких структур неминучі зміни хімічного складу чи навіть параметрів ґрат. При високому рівні інжекції хімічні компоненти можуть мігрувати електроміграції в інші області. Структурні зміни породжують кристалічні дефекти на кшталт дислокацій і точкових дефектів, які поведуться як невипромінюючі центри, що перешкоджають природній рекомбінації випромінюючої і в результаті генерують додаткове тепло всередині активного шару. Помітна деградація вольт-амперної характеристики починається перші 100 годин роботи. Передбачається, що це пов'язано з дифузійним перерозподілом домішок в активній ділянці структури під дією прямого струму, що проходить через кристал. У деяких випадках в області мікрострумів 10^{-4} - 10^{-3} А відбувалося зниження інтенсивності випромінювання, що ймовірно обумовлено зростанням частки безвипромінювальної рекомбінації.

Однією з причин діодів, що відмовляються від випромінювання, є деградація люмінофора на основі іттрій алюмінієвого гранату легованого церієм. Причин зниження квантової ефективності кілька:

Перша причина пов'язана з гасінням люмінесценції за рахунок дифузії

кисню в кристалічні грати.

Люмінофори, що застосовуються у виробництві СД білого світіння, є жовтими, зеленими та оранжевими порошками, що складаються безпосередньо з кристалів діаметром $\sim 6 - 9$ мкм алюмо-іттрієвого гранату $((Y_{1-a}Gd_a)_3(Al_{1-b}Ga_b)_5O_{12}, Ce^{3+}$ (YAG)), та силікатні люмінофори на основі SrCaSiN. Люмінофори стійкі до температурного впливу до 1280 С, але можуть окислюватися та вбирати вологу.

Друга причина пов'язана з перерозподілом кристалічної фази за товщиною люмінесцентного покриття на основі кремній-органічного компаунду. Це призводить до зменшення квантової ефективності, порушення співвідношення кольорів і порушення кутової діаграми спрямованості випромінювання.

При тривалій роботі світлодіодів, залитих еластичним компаундом або гелем, можливе осадження кристалів люмінофора на напівпровідниковий кристал, що призводить до зміни колірних характеристик джерела. Також можливе вигоряння частинок люмінофора і з їх осадженням на поверхню кристала, що призводить до зміни значення колірної температури. У другому випадку підвищується щільність частинок на поверхні кристала і випромінювання синього кольору проходить через люмінесцентний компаунд істотно менше, знижується спектральна складова синього випромінювання щодо спектральної складової жовтої (люмінофора), відбувається перевідображення випромінювання в чіп, зростає значення колірної температури, знижується значення світлового потоку. На рис 3.11 наведено фотографію деградації люмінофорного покриття.

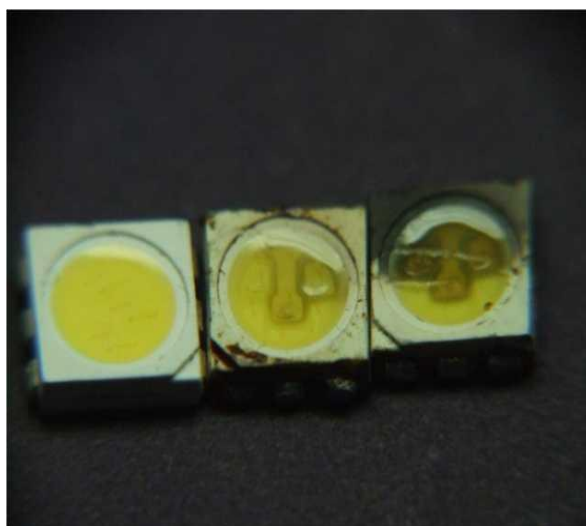


Рисунок 3.11 – Зміна структури люмінофорного покриття при ступінчастих випробуваннях

Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що при термообробці у структурі люмінофорного покриття з'являються різного типу дендритні утворення (рисунок 3.12), які можуть призвести до зниження його квантової ефективності.

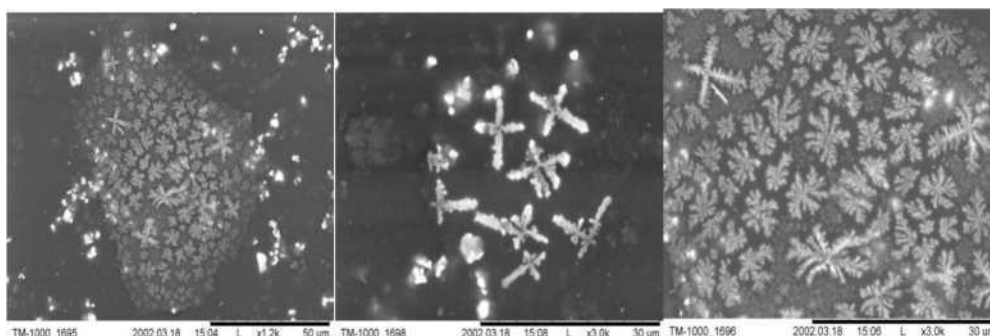


Рисунок 3.12 – Зміна структури люмінофорного покриття на основі ФЛЖ-7 після термічної обробки при 140 °С

3.3 Прогноз довговічності напівпровідникових джерел світла на основі результатів прискорених випробувань

Оцінка часу напрацювання на відмову та Y -ресурсу напівпровідникових світлодіодів за результатами прискорених випробувань за фіксований час становить складне технічне завдання. Для коректної інтерпретації результатів випробувань і подальшого їх перенесення на реальні умови експлуатації потрібно точно знати коефіцієнт прискорення, і крім того, приблизний хід зміни параметрів у період часу більше часу випробувань в 1000-2000 годин.

Проведений аналіз виробів показав, що зниження світловіддачі джерел світла відбувається, в основному, після 6 тис. годин експлуатації в нормальних умовах, і немає надійних і несуперечливих способів передбачення поведінки світлодіодів після проходження цього рубежу. Щоб при екстраполяції ослаблення світлового виходу отримати достовірні статистичні дані для реальних умов, не достатньо інформації, отриманої в ході тестування за час менше 6 тис. годин, тому час випробувань доводиться збільшувати до 20-30 тис. годин. У світовій практиці прийнято рішення при проведенні екстраполяції погіршення світлового виходу виключати дані, отримані на початку експлуатації пристрою, оскільки вони формують на кривій горб, викликаний деяким збільшенням світловіддачі на

початку роботи та подальшим її природним зниженням (рисунок 3.13). Це дозволяє отримати коректніше уявлення кривої погіршення світловіддачі. Використовуючи концепцію стандарту LM-80 та пропозиції технічного комітету TM-21, ми провели песимістичну оцінку довговічності світлодіодів, тобто часу, коли світловий потік діода знизиться на 30 %.

В основі методики покладено експоненціальну екстраполяцію залежності світлового потоку світлодіода від часу при фіксованій температурі випробувань:

$$\Phi(t) = V \exp(-\alpha t), \quad (3.3)$$

де $\Phi(t)$ - світловий потік; t -поточний час випробувань; α – швидкість зміни світлового потоку; V – передекспоненційний множник.

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T_s}\right), \quad (3.4)$$

де E_a -здається енергія активації; A -постійна; k_B -постійна Больцмана; T_s – температура випробувань.

Час (L_{70}), при якому світловий потік світлодіода знижується на 30%, визначається за такою формулою:

$$L_{70} = \frac{\ln(100 \times \frac{B_0}{p})}{\alpha}, \quad (3.5)$$

де B_0 - величина максимального значення світлового потоку у процесі випробувань, відносні одиниці; p -заданий відсоток від вихідної світлової віддачі, у разі $p=70\%$. На рисунку 3.13 представлено два варіанти екстраполяції результатів прискорених випробувань КИПД154А92 при температурі корпусу +85°C. Перший варіант екстраполяції за даними випробувань протягом 1000 годин. Другий варіант екстраполяції за даними отриманими протягом випробувань від 1000 годин до 2000 годин.

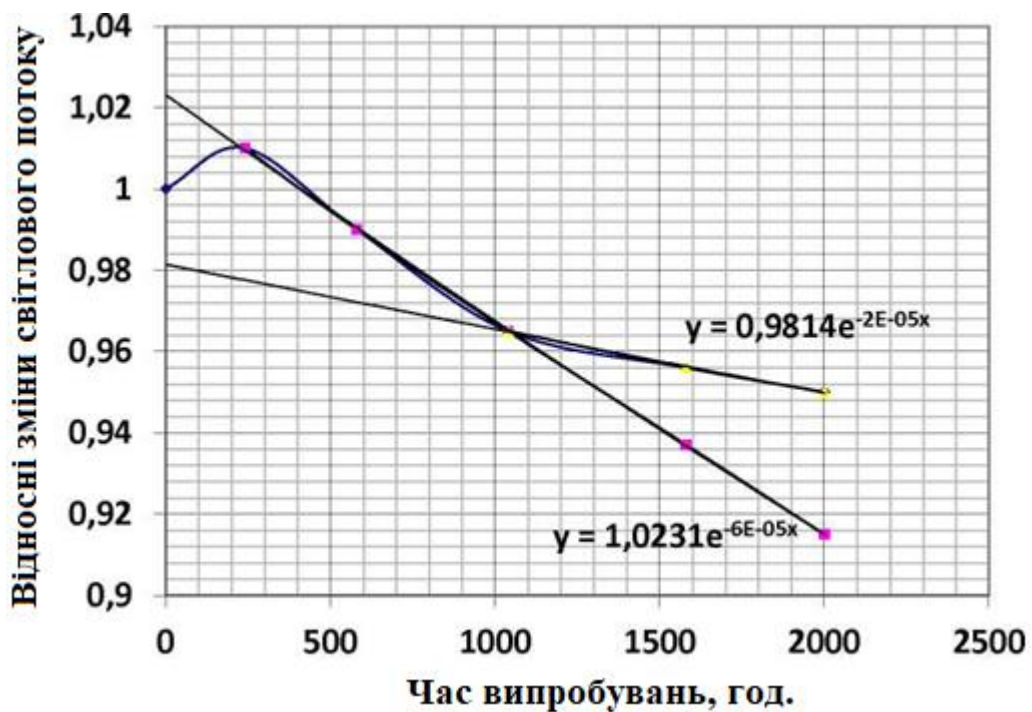


Рисунок 3.13 - Приклад екстраполяції результатів прискорених випробувань джерела світла КИПД154А92 у корпусі 5050-1

Як випливає з залежностей, екстраполяція даних отриманих при випробуваннях від 1000 до 2000 годин дає більш достовірні значення. Розрахунок за методикою LM-80 дає такі значення довговічності:

- 1) за температури корпусу +85°C термін служби 18800 годин;
- 2) при температурі корпусу +45°C термін служби 305000 годин;
- 3) при гамма-процентному напрацюванню до відмови $\gamma=90$ % термін служби світлодіода складе 30000 годин.

На рис 3.14 представлені результати прискорених випробувань світлодіодів КИПД154А92 у пластмасовому корпусі 5050-2. З результатів випливає, що довговічність світлодіода більшою мірою залежить від температури кристала, а не температури корпусу. Температура кристала в корпусі 5050-2 на 30-40°C вище, ніж у корпусі 5050-1, що призводить до різкого збільшення швидкості деградації.

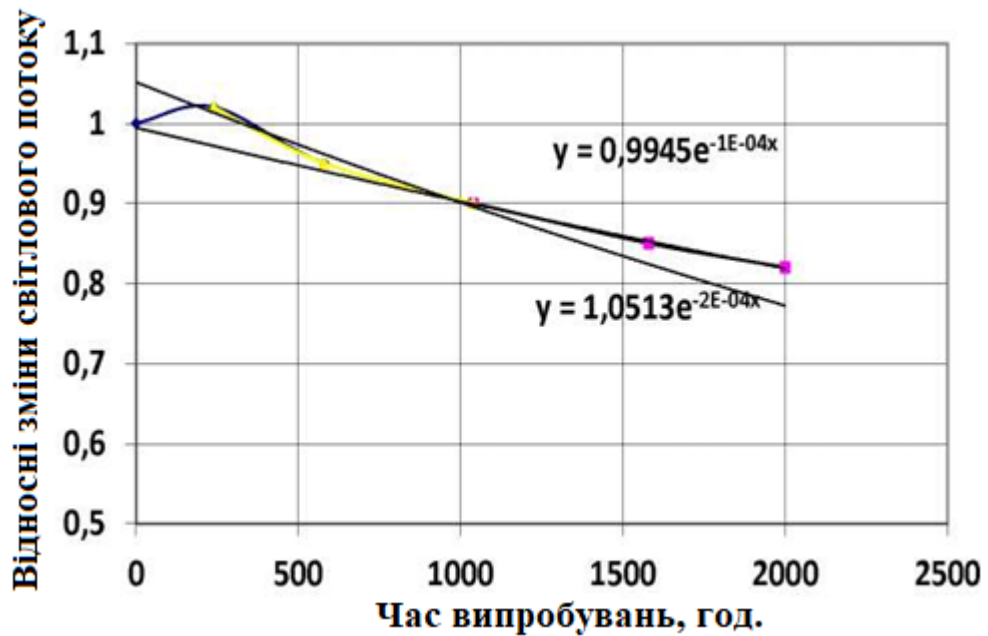


Рисунок 3.14 - Зміна параметрів джерела світла КИПД154Г92 у корпусі 5050-2 у процесі випробувань при температурі корпусу 85°C

Розрахований за методикою LM-80 термін служби при +85°C становитиме близько 5000 годин, а при +45°C близько 200000 годин, що недостатньо для забезпечення надійної роботи світлодіода.

3.4 Висновки до розділу

1. Методами ступінчастих випробувань, при підвищених теплових та електричних навантаженнях, визначена енергія активації процесів деградації напівпровідникових джерел світла.
2. Проведено аналіз основних типів відмов при прискорених випробуваннях.
3. За результатами прискорених випробувань, з використанням рекомендацій LM-80 проведено оцінку середнього терміну служби напівпровідникових джерел світла.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок

При дослідженні систем живлення електроустановки трансформаторних підстанцій оглядаються без зняття з них напруги, на віддалі від струмоведучих частин. Дефекти виявляються візуально – оглядом і на слух. Право одноособового огляду електроустановки має черговий із кваліфікаційною групою не нижче III або адміністративно-технічний працівник, що має V групу в установках напругою вище 1000 В і IV групу в електроустановках напругою нижче 1000 В.

При оглядах діючих електроустановок не можна проходити за огороження, знімати їх і входити в камери розподільних пристроїв, що не мають бар'єрів. При необхідності дозволяється працівникові з кваліфікаційною групою не нижче IV увійти за огороження, але за умови, що струмоведучі частини недоступні, тобто нижні фланці ізоляторів знаходяться від сталі на відстані більше 2 м, а необгороджені струмоведучі частини - на відстані більше 2,75 м при напрузі 35 кВ і 3,5 м при напрузі 110 кВ.

При менших відстанях входити за огороження можна тільки в присутності другої особи, що має кваліфікаційну групу не нижче III, і за умови, що струмоведучі частини знаходяться на відстані зазначеному в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Допустимі відстані від місця проведення робіт до струмоведучих частин у залежності від їх напруги

Номінальна напруга електроустановки, кВ	Допустима відстань, м
до 15	0,7
від 15 до 35	1,0
від 35 до 110	1,5
154	2
220	2,5
330	3,5
400 і 500	4,5

Вимкнення і зміни в електричних схемах РЕМ здійснюються тільки за розпорядженням або з відома чергового персоналу, у керуванні або підпорядкуванні якого знаходиться устаткування. При пожежах, нещасних випадках або при стихійних лихах негайно потрібно вимикати

електроустаткування без узгодження, з послідуочим записом у оперативному журналі.

Розпорядження вважається виконаним після того, як черговий повідомить особисто або телефоном черговому диспетчерові енергосистеми мереженого району, черговому інженерові, тобто особі, що дала розпорядження. Керуватися показами приладів та повідомленнями осіб не оперативного персоналу про виконання розпорядження не можна.

Особа, що віддає розпорядження про переключення, обов'язково перевіряє послідовність операцій за оперативною схемою. Черговий, який отримав розпорядження, зобов'язаний повторити його і записати в оперативний журнал.

За оперативною схемою або макетові цей черговий намічає порядок операції. Якщо переключення виконують дві особи, то перша особа є старшою, роз'ясняє другій (виконавцю) завдання і послідовність його виконання.

В електроустановках напругою вище 1000 В, не обладнаних повністю блокованими від неправильних операцій роз'єднувачів, складні переключення проводяться за бланками. В бланку переключень виконується запис усіх операцій про увімкнення і вимкнення електрообладнання точно у тій послідовності, у якій ці операції повинні виконуватись.

Прості переключення на одному електричному приєднанні і переключення в електроустановках повністю обладнаних блокуванням роз'єднувачів від неправильної операції, можуть виконуватися без бланків.

Бланки переключень заповнює і підписує черговий який є безпосереднім виконавцем. Старший черговий контролюючий виконання операцій, перевіряє бланк і також його підписує. Старший черговий зачитує зміст операції виконавець повторює прочитане і приступає до виконання. Старший контролює дії виконавця і відразу відзначає в бланку виконання операції. При сумніві в правильності операцій робота припиняється до в'яснення правильного порядку переключень. Якщо черговий робить переключення одноосібно, то він зачитує послідовність операцій вказаних у бланку телефоном старшому черговому який віддав розпорядження. Цей черговий є контролюючою особою.

Дозвіл на переключення виконавець зобов'язаний одержати телефоном безпосередньо перед їх виконанням. Приєднання вмикають або вимикають з допомогою вимикачів.

Роз'єднувачі необхідно вмикати ривком. Якщо при цьому виникає дуга, то ножі необхідно довести до кінця. У протилежному випадку зворотний хід ножа викличе виникнення дуги й нещасний випадок. Вимикати роз'єднувачі треба, навпаки, повільно, особливо в початковий момент. Якщо з'явиться дуга при відході ножів від губок, то роз'єднувач необхідно увімкнути назад.

Роз'єднувачі відключають (включають) у діелектричних рукавицях. Роз'єднувачі з пофазним керуванням і з вертикальним розташуванням – у діелектричних рукавицях, з використанням ізолюючих штанг і стоячи на ізолюючій підставці. Старшим може бути черговий, що має не меншу ніж IV кваліфікаційну групу. Прості перемикання на одному електричному приєднанні дозволяється виконувати оперативному персоналу, що має не нижче ніж IV кваліфікаційну групу, одноосібно.

Перевіряти відсутність напруги, накладати й знімати переносні заземлення дозволяється не менш ніж двом виконавцям.

4.2 Вимоги пожежної безпеки при гасінні електроустановок

При дослідженні систем живлення було виявлено що кабель, прокладений в землі чи в трубах відкрито, може при пошкодженні стати причиною пожежі.

Пожежа може виникнути внаслідок загоряння гарячих матеріалів, що знаходяться в кабельній споруді, при електричному розряді кабелю чи в момент випробувань, чи при ремонтних роботах із – за недотримання заходів пожежної безпеки.

В електричних мережах необхідно виконувати наступні вимоги пожежної безпеки при гасінні електроустановок:

1) допускається гасіння пожежі водяними потоками на невимкнених електроустановках напругою до 10 кВ, відкритих тільки для огляду електрика. При цьому опору заземляють, а електрик – працює в

діелектричних ботах та рукавицях. Не допускається гасіння пожеж ручними засобами ;

2) забороняється гасіння пожежі усіма видами пін з допомогою ручних засобів в електроустановках під напругою, так як піна і розчини піноутворювачів мають велику електропровідність. Тільки в окремих випадках при спеціальному закріпленні піногенераторів і надійному їх заземленні, а також заземленні насосів пожежних машин, дозволяється гасити пожежу повітряно – механічною піною в електроустановках напругою до 10 кВ, які знаходяться під напругою;

3) при пожежі трансформатор вимикається з обох сторін, після чого одразу ж приступають до його гасіння будь – якими засобами (повітряно – механічною піною, розпиленою водою, вогнегасниками). При гасінні пожежі в трансформаторах, які встановлені в приміщеннях , необхідно прийняти заходи щодо попередження розповсюдження пожежі через вентиляційні та інші канали. Вентиляція в приміщенні в цей період може умикатись тільки з вказівки пожежного підрозділу;

4) при загорянні кабелів необхідно при наявності стаціонарної системи пожежегасіння (повітряно – механічною піною, розпиленою водою) включити її в роботу. При гасінні горючих кабелів напругою вище 1000 В у кабельному тунелі, пожежник який працює з пожежним стволом, повинен направляти потоки води через дверний люк, не заходячи при цьому в відсік з горючими кабелями. Одночасно з гасінням пожежі кабелів потрібно прийняти заходи з швидкого зняття з них напруги;

5) щити управління станцій чи підстанцій напругою до 0,4 кВ являються найбільш важливою частиною електроустановок, тому найбільшу увагу при гасінні пожежі приділяється збереженню на них встановленої апаратури;

б) при загорянні кабелів, проводів і апаратів на панелях щитів управління оперативний персонал повинен зняти напругу з панелей, не допускаючи переходу вогню на сусідні панелі. В цьому випадку застосовують вуглекислотні вогнегасники чи брометиллові, а також порошкові вогнегасники.

4.3 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху

Для того, щоб зрозуміти всю складність проблем загрози ЕМІ і заходів щодо захисту від неї, необхідно коротко розглянути історію вивчення цього фізичного явища і сучасний стан знань у цій області.

Те, що ядерний вибух буде обов'язково супроводжуватися електромагнітним випромінюванням, був ясно фізикам-теоретикам ще до першого випробування ядерного пристрою в 1945 році. Під час проводилися в кінці 50-х - початку 60-х років ядерних вибухів в атмосфері і космічному просторі наявність ЕМІ було зафіксовано експериментально. Однак кількісні характеристики імпульсу вимірювалися в недостатній мірі, по-перше, тому що була відсутня контрольна-вимірювальна апаратура, здатна реєструвати надзвичайно потужне електромагнітне випромінювання, що існує надзвичайно короткий час (мільйонні частки секунду), по-друге, тому що в ті роки в радіоелектронній апаратурі використовувалися виключно електровакуумні прилади, які рідко схильні до впливу ЕМІ, що знижувало інтерес до його вивчення.

Створення напівпровідникових приладів, а потім і інтегральних схем, особливо пристроїв цифрової техніки на їх основі, і широке впровадження засобів в радіоелектронну військову апаратуру примусили військових фахівців з іншого оцінити загрозу ЕМІ. З 1970 року питання захисту зброї і військової техніки від ЕМІ стали розглядатися міністерством оборони США як що мають вищу пріоритетність.

Механізм генерації ЕМІ полягає в наступному. При ядерному вибуху виникають гамма і рентгенівське випромінювання і утвориться потік нейтронів. Гамма-випромінювання, взаємодіючи з молекулами атмосферних газів, вибиває з них так звані комптонівські електрони. Якщо вибух здійснюється на висоті 20-40 км., То ці електрони захоплюються магнітним полем Землі і, обертаючись відносно силових ліній цього поля створюють струми, що генерують ЕМІ. При цьому поля ЕМІ когерентно підсумовуються у напрямі до земної поверхні, тобто

магнітне поле Землі виконує роль, подібну фазованою антеною грат. В результаті цього різко збільшується напруженість поля, а отже, і амплітуда ЕМІ в районах південніше і на північ від епіцентру вибуху. Тривалість даного процесу з моменту вибуху від 1 - 3 до 100 *нс*.

На наступній стадії, що триває приблизно від 1 *мкс* до 1 *з*, ЕМІ створюється комптонівськими електронами, вибитими з молекул багато разів відображеним гамма-випромінюванням і за рахунок непружного зіткнення цих електронів з потоком що випускаються при вибуху нейтронів. Інтенсивність ЕМІ при цьому виявляється приблизно на три порядки нижче, ніж на першій стадії.

На кінцевій стадії, що займає період часу після вибуху від 1 *з* до декількох хвилин, ЕМІ генерується магнітогідродинамічним ефектом, породжуваним збуреннями магнітного поля Землі струмопровідних вогняною кулею вибуху. Інтенсивність ЕМІ на цій стадії вельми рідка і становить декілька десятків вольт на кілометр.

Найбільшу небезпеку для радіоелектронних засобів представляє перша стадія генерування ЕМІ, на якій відповідно до закону електромагнітної індукції через надзвичайно швидкого наростання амплітуди імпульсу (максимум досягається на 3 - 5 *нс* після вибуху) наведеної напруга може досягати десятків кіловольт на метр на рівні земної поверхні, плавно знижуючись в міру віддалення від епіцентру вибуху.

Амплітуда напруги, що наводяться ЕМІ в провідниках, пропорційна довжині провідника, що перебуває в його полі, і залежить від його орієнтації щодо вектора напруженості електричного поля.

Так, напруженість поля ЕМІ в високовольтних лініях електропередачі може досягати 50 *кВ/м*, що призведе до появи в них струмів силою до 12 *тис.А*.

ЕМІ генеруються і при інших видах ядерних вибухів - повітряному і наземному. Теоретично встановлено, що в цих випадках його інтенсивність залежить від ступеня асиметричності просторових параметрів вибуху. Тому повітряний вибух з точки зору генерації ЕМІ найменш ефективний. ЕМІ наземного вибуху буде мати високу інтенсивність, проте вона швидко зменшується в міру віддалення від епіцентру.

Ідеальною захистом від ЕМВ стало б повне укриття приміщення, в якому розміщена радіоелектронна апаратура, металевий екран.

Разом з тим ясно, що практично забезпечити такий захист у ряді випадків неможливо, тому що для роботи апаратури часто потрібно забезпечити її електричну зв'язок із зовнішніми пристроями. Тому використовуються менш надійні засоби захисту, такі, як струмопровідні сітки або плівкові покриття для вікон, стільникові металеві конструкції для повітрозабірників і вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, які розміщуються по периметру дверей і люків.

Більш складною технічною проблемою вважається захист від проникнення ЕМІ в апаратуру через різні кабельні вводи. Радикальним вирішенням цієї проблеми міг би стати перехід від електричних мереж зв'язку до практично не схильним до дії ЕМІ волоконно-оптичних. Однак заміна напівпровідникових приладів у всьому спектрі виконуваних ними функцій електронно-оптичними пристроями можливо тільки у віддаленому майбутньому. Тому в даний час засобів захисту кабельних вводів найбільш широко використовуються фільтри, в тому числі волоконні, а також іскрові розрядники, металлоокисні варистори і високошвидкісні зенеревські діоди.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі можна зробити наступні висновки:

1. Проведений теоретичний та експериментальний аналіз теплового режиму напівпровідникових джерел світла у корпусі типу 5050 показав, що:

-Теплове опір не є величиною постійної, а залежить як від щільності струму, так і від температури корпусу;

-спектр випромінювання кристала і люмінофора (інтенсивність, довжина хвилі та ширина спектра) має високу чутливість до зміни температури кристала і може бути використаний для її безконтактного контролю, як у процесі експлуатації джерел світла, так і при їх прискорених випробуваннях;

-Максимум температури в напівпровідниковому джерелі світла знаходиться на поверхні люмінофорного покриття, який на 10-15 °С перевищує температуру кристала;

-в процесі випробувань, при постійній температурі корпусу, температура кристала зростає з часом за рахунок зменшення величини світлового потоку і збільшення частки теплової потужності, що виділяється.

2. Методами ступінчастих випробувань при підвищених температурах і підвищених струмах визначено енергії активації процесів деградації світлового потоку, прямої напруги, зворотного струму і колірної температури. Показано, що отримані значення енергії активації при ступінчастих електричних випробуваннях вище, ніж при температурних ступінчастих випробуваннях і мають величину 0,7-0,73 еВ і 0,6-0,65 еВ відповідно.

3. Встановлено, що при прискорених випробуваннях при фіксованій температурі корпусу +85 і прямому струмі 350 мА коефіцієнт прискорення збільшується в процесі випробувань в 1,5-1,7 рази через 1000 годин.

4. Показано, що за результатами прискорених випробувань напівпровідникових джерел світла при температурі корпусу +85 °С протягом 2000 годин, можна визначити середній термін служби, що становить близько 300000 годин.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шуберт Ф. Світлодіоди / Ф. Шуберт / Пер. з англ. за ред. А.Е. Юновича – 2-ге вид. - М: ФІЗМАТЛІТ, 2008.
2. Берг Ф. Світлодіоди / Ф. Берг, П. Дін / Пер. з англ. за ред. А.Е. Юновича. - М: Мир, 1979. - 686 с.
3. Коган Л.М. Напівпровідникові світловипромінюючі діоди/Л.М. Коган. - М: Енергоатоміздат, 1983. - 210 с.
4. ILLUMINATOR. BEST OF THE BEST 2008: Альманах. - М: Центр Світлодизайну Illuminator, 2008. - вип. 1. – 160 с.
5. Зі С. Фізика напівпровідникових приладів, у 2-х книгах/С. Зі. - М: Мир, 1984. - 456 с.
6. Нойкін Ю.М. Фізичні основи оптичного зв'язку/Ю.М. Нойкін, П.В. Махно// Електронний навчальний посібник. - Ростов-на-Дону. – 2011. – 4.1.4.
7. Никифоров С.Г. Проблеми, теорія та реальність світлодіодів / С.Г. Никифоров// Компоненти та технології. – 2005. – №5. – С. 176 – 185.
8. Никифоров С.Г. Чому світлодіоди не завжди працюють так, як хочуть їхні виробники? / С.Г. Никифоров// Компоненти та технології. – 2005. – №7. – С. 16 – 24.
9. Особливості конструювання потужних білих світлодіодів/В.С. Абрамов, С.Г. Никифоров, В.П. Сушков, А.В. Шишов // Світлодіоди та лазери. – 2003. – № 1-2.
10. Рожанський І.В. Аналіз причин падіння ефективності електролюмінесценції світлодіодних гетроструктур AlGaInN за великої щільності струму накачування / І.В. Рожанський, Д.А. Закгейм. – ФТП. – 2006. – Т. 40. – Вип. 7. - С. 861 - 867.
11. Спектри люмінесценції, ефективність та колірні характеристики світлодіодів білого світіння на основі рп-гетроструктур InGaN/GaN, покритих люмінофорами / М.Л. Бадгутдінов, Є.В. Коробов, Ф.А. Лук'янов, А.Е. Юнович // Фізика та техніка напівпровідників. – 2006. – №6(40). – С.758 – 763.
12. Миранович В. Потужні світлодіоди: Особливості застосування, проблеми та методи вирішення / Миранович В., Філоненко І. // Електронні

компоненти. – 2007. – №6. – С.45-49.

13. Закгейм А.Л. Дослідження теплових процесів у потужних InGaN/GaN фліп-чип світлодіодах з використанням інфрачервоної тепловізійної мікроскопії / О.Л. Закгейм, Г.Л. Куришев, М.Р. Мізіров // ФТП – 2010. – Т. 44. – вип. 3. – С.390-396.

14. Світлодіоди „теплого“ білого світіння на основі р- та гетероструктур типу InGaN/AlGaIn/GaN, покритих люмінофорами з ітрій-гадолінієвих гранатів / Н.П. Социн, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, С.С. Широков, А.Е. Юнович // Фізика та техніка напівпровідників. – 2009 – том 43. – вип. 5. – С.700-707.

- Модульна багатофункціональна оптоволоконна спектрометрична система / А.І.Андрєєв, С.В.Мухін, В.В.Некрасов, В.А.Нікітенко, А.В.Пауткіна. за ред. проф., д.ф.-м.н. Нікітенко В.О. та доцента, к.ф.-м.н. Некрасова В.В. – Москва, 2008. – 365 с.

15. Вплив джоулевого розігріву на квантову ефективність та вибір теплового режиму потужних блакитних InGaN/GaN світлодіодів / О.О. Єфремов, Н.І. Бочкарьова, Р.І. Горбунов, Д.А. Лавринович, Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархін, Ю.Г. Шретер // ФТП – 2006. – Т.40. - Вип.5. - С.621-627.

- Никифоров С.Г. Температура у житті та роботі світлодіодів (частина 1) / С.Г. Никифоров // Компоненти та технології. -2005. - № (9-10). – С.48-54. // Температура у житті та роботі світлодіодів (Частина 2) // Компоненти та технології. 2006. – №1. – С.18-23.

16. Temperature and current dependences of electroluminescence from InGaN/GaN multiple quantum wells / Lee Jiunn-Chyi, Wu Ya-Fen, Wang Yi-Ping, NeeTzer-En // J. Cryst. Growth. – 2008. – Т.310; #23. – С.5143 – 5146.

17. Гончарова Ю.С. Прискорені випробування напівпровідникових джерел світла на довговічність / Ю.С. Гончарова, І.Ф. Гаріпов, В.С. Солдаткін // Доповіді Томського державного університету систем управління та радіоелектроніки. – 2013. – №2(28) – С. 51-53.

18. Ходаков А.М. Математичне моделювання теплоелектричних процесів у структурах напівпровідникових виробів із дефектами. Автореферат дис. к.ф.-м.н., Ульяновськ, УТУ, 2010.