

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Г. Є. Монастирський

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

(код і назва)

на тему: Дослідження електричних та оптичних характеристик світлодіодів

Виконав: студент 4 курсу, групи ФФ-01

Ільчук Юлія Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Іванова В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант 2.3 Prof. Dr. Ulrich T. Schwarz

(номер розділу)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант 3 доцент, д.ф.-м.н. Монастирський Г. Є.

(номер розділу)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

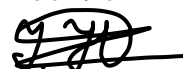
Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент



(підпис)

Національний Технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий Фізико-технічний інститут
Кафедра прикладної фізики

Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський)
Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

Завідувач кафедри

Монастирський Г. Є.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на бакалаврську роботу студенту

Ільчук Юлії Миколаївній

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

1. Тема роботи: Дослідження електричних та оптичних характеристик світлодіодів, науковий керівник роботи _____ доцент, к.т.н. Іванова В. В. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ травня 2024 р №

2. Термін подання студентом роботи « ____ » _____ червня 2024 р.

3. Об'єкт дослідження: сині, зелені, червоні та інфрачервоні світлодіоди з піковими довжинами хвиль 455 нм, 525 нм, 620 нм та 940 відповідно

4. Предмет дослідження: Електричні та оптичні характеристики світлодіодів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Вивчення теоретичного обґрунтування особливостей електричних і оптичних характеристик, експериментальне дослідження вольт-амперної характеристики, оптичної потужності випромінювання (LOR) та спектру, обрахунків фактора ідеальності, аналіз отриманих даних та їх інтерпретація, виявлення джерел відхилень характеристик світлодіодів різних кольорів: RGB та ІЧ

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 15 аркушів А4

7 Орієнтовний перелік публікацій: 42 Міжнародна Конференція з Електроніки та Нанотехнологій (ELNANO) *Abnormal Ideality Factor and LED Noise Correlation*, XXI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених *Оцінка сторонніх джерел шуму при вимірюванні шумових характеристик світлодіодів*;

8 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2	Prof. Dr. Ulrich T. Schwarz		
3	Prof. Dr. Ulrich T. Schwarz		
3	доцент, д.ф.-м.н. Монастирський Г. Є.		

9 Дата видачі завдання « _____ » _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання бакалаврської роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Опрацювання літератури за темою		
2.	Написання літературного огляду		
3.	Проведення вимірювань		
4.	Написання другої частини дипломної роботи		
5.	Підготовка тез		
6.	Виступ на конференції		
7.	Написання третьої частини дипломної роботи		
8.	Написання висновків		
9.	Підготовка доповіді та презентації		
10.	Подання роботи на рецензування		
11.	Подання роботи до захисту		

Студент

(підпис)

Ю. М. Ільчук

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник роботи

(підпис)

В. В. Іванова

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Темою роботи є дослідження електричних та оптичних характеристик RGB (red, green, blue) та інфрачервоних світлодіодів (СД). У якості основного об'єкту було взято 4 види світлодіодів: сині, зелені, червоні та інфрачервоні з піковими довжинами хвиль 455 нм, 525 нм, 620 нм та 940 відповідно.

Метою роботи є оцінка електричних та оптичних характеристик світлодіодів, а також перевірка наявних моделей їх опису.

Робота складається з 3 основних розділів та висновків. Перший розділ присвячено теоретичному огляду наявних моделей поведінки електричних та оптичних характеристик світлодіодів, а також опису механізмів, що спричиняють зміни даних характеристик. Наведено деякі елементи опто- та квантової електроніки, зокрема, опис вольт-амперної характеристики (ВАХ) світлодіодів, рівняння ідеальної ВАХ, відхилення від ідеальної характеристики, фактор ідеальності світлодіодів та опис процесів, що призводять до даних відхилень та різних значень фактору ідеальності. Крім того, наведено опис різних видів ефективності, а також підхід до спектрального аналізу випромінювання СД.

Другий розділ присвячено опису експериментальної установки та методиці вимірювання й обробки експериментальних даних. У третьому розділі наведено результати експерименту і їх якісний аналіз як загальний, так і для кожного виду світлодіодів окремо.

Ключові слова: *електричні властивості, оптичні властивості, властивості світлодіодів, вольт-амперна характеристика, фактор ідеальності, RGB світлодіоди, інфрачервоні світлодіоди, світлова потужність випромінювання, спектр.*

SUMMARY

The subject of this work is the study of the electrical and optical properties of RGB (red, green, blue) and infrared LEDs. The main object is 4 types of samples: blue, green, red, and infrared with peak wavelengths of 455 nm, 525 nm, 620 nm, and 940 nm, respectively.

The aim of the work is to evaluate the electrical and optical characteristics, as well as to verify the existing models describing the corresponding characteristics.

The paper consists of 3 main sections and conclusions. The first section is devoted to a theoretical review of the existing models of the behavior of the electrical and optical characteristics of LEDs, as well as a description of the mechanisms behind changes in these characteristics. Some elements of opto- and quantum electronics are presented, in particular, the approach to describe the I-V characteristic of LEDs, the ideal I-V characteristic, deviations from the ideal characteristic, the ideality factor of LEDs, and a description of the processes leading to these deviations and different values of the ideality factor. In addition, a description of various types of efficiency is given, as well as an approach to the spectral analysis of LED radiation.

The second section is devoted to the description of the experimental setup and the methodology for measuring and processing the experimental data. The third section presents the results of the experiment and their qualitative analysis, both in general and for each type of LED separately.

Keywords: *electrical properties, optical properties, LED properties, I-V characteristic, ideality factor, RGB LEDs, infrared LEDs, light output power, spectrum.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	6
1.1. Електричні властивості світлодіода	6
1.1.1. Принцип роботи світлодіода та його ВАХ	6
1.1.2. Відхилення від ідеальної ВАХ	9
1.1.3. Фактор ідеальності.	11
1.2. Оптичні властивості	15
1.2.1. Ефективність	15
1.2.2. ABC - модель	17
1.2.3. Спектр випромінювання	18
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	19
2.1. Вимірювання електричних характеристик.	19
2.2. Вимірювання оптичних характеристик	21
2.3. Методика обробки експериментальних даних.	23
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	24
3.1. Загальні особливості RGB світлодіодів	24
3.1.1. Сині світлодіоди.	25
3.1.2. Зелені світлодіоди	27
3.1.3. Червоні світлодіоди	28
3.2. Інфра-червоні світлодіоди	30
РОЗДІЛ 4. ВИСНОВКИ	34
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	36
ДОДАТКИ	40
Додаток А. Код файлу програми macros.py.	40

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВАХ - Вольт-Амперна Характеристика

СД - світлодіод

SRH - Shockley-Read-Hall

TAT - Trap-assisted tunneling

CB - conduction band

VB - valence band

BTBT - band-to-band tunneling

SQW - single quantum well

MQW - multy quantum well

IQE - internal quantum efficiency

EQE - external quantum efficiency

LOP - Light output power

QCSE - Quantum-confined Stark effect

ВСТУП

Світлодіоди відомі як найбільш енергоефективна технологія освітлення протягом останніх 15-20 років. Вони мають широке застосування в різних галузях техніки, науки, медицини, побуту, тощо. Основними перевагами світлодіодів є висока ефективність, довгий термін служби, малі розміри, низьке енергоспоживання, безпека, екологічність та можливість керування колірними параметрами світла.

Для забезпечення відповідності вимогам споживачів, після завершення упаковки кожен світлодіод має проходити тест оптичних та електричних характеристик[1]. Зокрема, для електричних властивостей це вольт-амперна характеристика, для оптичних - це ват-амперна характеристика або світлова потужність та спектр випромінювання. Коефіцієнт ідеальності є параметром, який відображає відхилення вольт-амперної характеристики реального світлодіода від ідеального р-n-переходу.

Вимірювання коефіцієнта ідеальності дозволяє оцінити якість світлодіодів, виявити механізми, які вказують на дефекти та недосконалості структури. Таким чином у поєднанні з аналізом оптичних характеристик, можна отримати комплексне бачення про роботу світлодіода, в тому числі про джерела недосконалості його структури та зборки чіпу, що дозволяє розробляти нові технології для усунення дефектів світлодіодів, а отже для збільшення їх ефективності та терміну служби. Тому пошук оптимальних підходів для характеристики світлодіодів залишається актуальним.

Завданням даної дипломної роботи було експериментальне дослідження електричних та оптичних характеристик світлодіодів. Дослідження фактора ідеальності є одним з можливих засобів аналізу недосконалості структури активної області і може бути використано для подальших технологічних вдосконалень та розвитку нових технологій виготовлення та експлуатації світлодіодів.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1. Електричні властивості світлодіода

1.1.1. Принцип роботи світлодіода та його ВАХ

Світлодіоди - це напівпровідникові джерела некогерентного оптичного випромінювання, принцип дії яких заснований на явищі електролюмінесценції при інжекції неосновних носіїв заряду через гомо- або гетеро- р-п-перехід. (Рис. 1.1-1.2)[2]

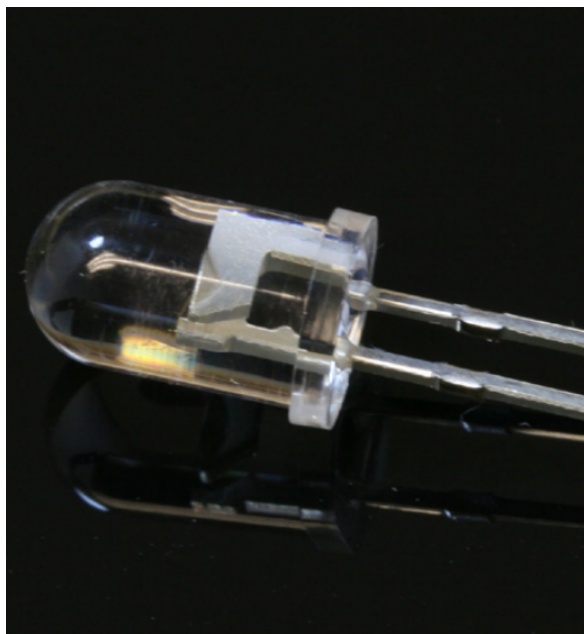


Рис. 1.1. потужний інфрачервоний світлодіод [3]

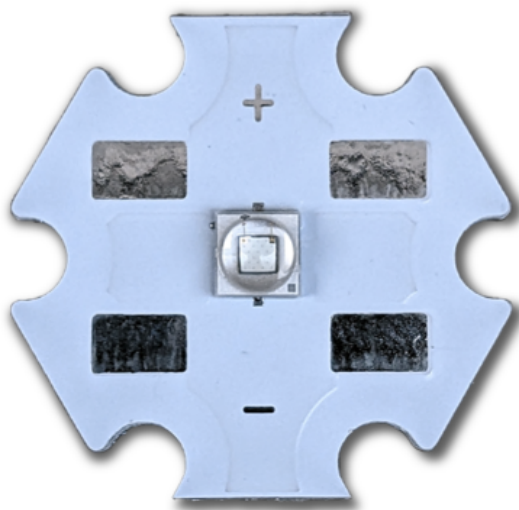


Рис. 1.2. потужний синій світлодіод [4]

Найефективнішим методом електричного збудження є інжекція основних носіїв заряду через р-п перехід у прямому напрямку. При зміщенні р-п переходу в прямому напрямку потенціальний бар'єр знижується на eV , електрони інjektуються у р-область, а дірки - у п-область, поблизу р-п-переходу створюється нерівноважний розподіл носіїв заряду, як це показано на рис.1.3. В результаті

область поблизу р-п переходу збіднюється на вільні носії. Ця область відома як область збіднення[2].

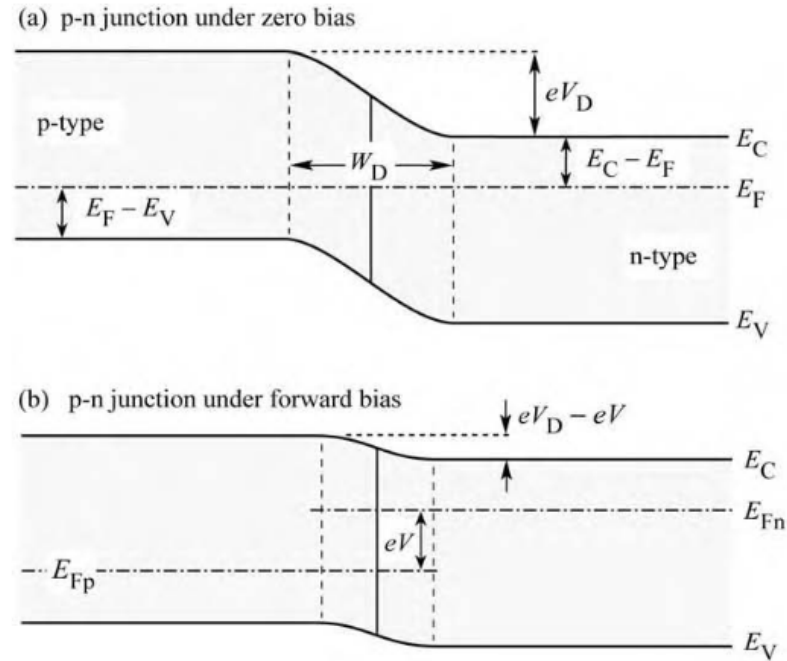


Рис. 1.3. р-п-перехід при а) нульовому зміщенні б) прямому зміщенні

За відсутності вільних носіїв, в області збіднення залишається тільки заряд від іонізованих донорів і акцепторів. Ці домішки утворюють область просторового заряду, тобто донори на стороні n-типу і акцептори на стороні р-типу. Область просторового заряду створює електричне поле, протилежно напрямлене до зовнішнього електричного поля. Напруга, створена цим полем, задається формулою:

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1.1)$$

де N_A і N_D - концентрації акцепторів і донорів відповідно, а n_i - власна концентрація власних носіїв у напівпровіднику. Ця напруга являє собою бар'єр, який повинні подолати вільні носії, щоб досягти нейтральної області з протилежним типом провідності.

При подачі напруги зсуву на р-п перехід, напруга буде падати в області збіднення. Ця область є високоомною через те, що вона збіднена вільними носіями. Тому зовнішнє зміщення зменшує бар'єр р-п переходу для прямого зміщення,

електрони і дірки інжектуються в область з протилежним типом провідності, і потік струму збільшується. Носії дифундують в області з протилежним типом провідності, де вони зрештою рекомбінують, випромінюючи фотон.[5]

Рівняння, що описує вольт-амперну характеристику діода з p-n переходом, називається рівнянням Шоклі. Рівняння Шоклі для діода з площею поперечного перерізу A має вигляд:

$$I = qA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_A}} \right) \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) \quad (1.2)$$

де $D_{n,p}$ і $\tau_{n,p}$ - константи дифузії електронів і дірок та часи життя неосновних носіїв електронів і дірок відповідно.

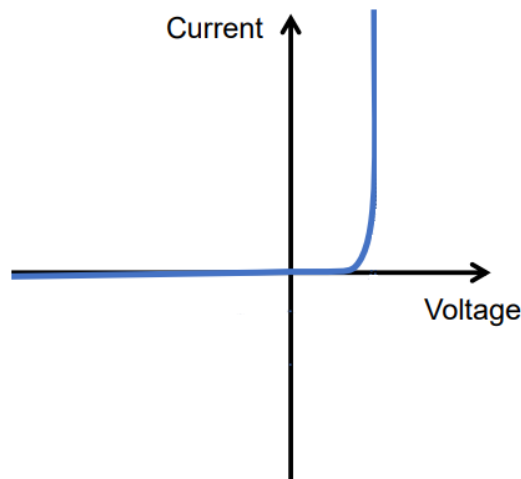


Рис. 1.4. Графік ідеальної вольт-амперної характеристики за рівнянням Шоклі[6]

В умовах зміщення, струм діода насичується і відповідний струм насичення задається коефіцієнтом перед експоненціальною функцією в рівнянні Шоклі. Тоді вольт-амперна характеристика діода може бути записана у вигляді:

$$I = I_s \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right), \text{ де } I_s = qA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_A}} \right) \quad (1.3)$$

В умовах прямого зміщення, коли $V \gg kT/q$, а отже $[\exp(qV/kT) - 1] \approx \exp(qV/kT)$. Використовуючи рівняння 1.1-1.2, рівняння Шоклі можна переписати

як:

$$I = qA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right) \left(\exp \frac{q(V - V_D)}{kT} - 1 \right) \quad (1.4)$$

Експонента експоненціальної функції в рівнянні 1.4 ілюструє, що струм сильно зростає, коли напруга на діоді наближається до $V \approx V_D$. Напруга, при якій струм сильно зростає, називається пороговою напругою, і ця напруга задається формулою $V_{th} \approx V_D$ [5].

1.1.2. Відхилення від ідеальної ВАХ

Рівняння Шоклі дає очікувану теоретичну I-V характеристику ідеального р-п переходу. Для опису ж експериментально виміряних характеристик використовується наступне рівняння:

$$I = I_s \left(\exp \frac{qV}{n_{ideal} kT} - 1 \right) \quad (1.5)$$

де n_{ideal} - коефіцієнт ідеальності діода. Для ідеального діода фактор ідеальності має значення одиниці ($n_{ideal} = 1.0$).

Часто світлодіод має небажані або паразитні опори. Паразитні опори бувають послідовними і паралельними, послідовний опір може бути викликаний надмірним контактним опором або опором нейтральних ділянок. Паралельний опір може бути викликаний будь-яким каналом, який обходить р-п перехід. Цей обхід може бути викликаний дефектами активної області р-п переходу або поверхневими станами.

Вольт-амперна характеристика діода, задана рівнянням Шоклі, повинна бути модифікована для того, щоб врахувати паразитні опори. Припустимо, що до світлодіода підключено шунт з опором R_p (паралельно ідеальному діоду) і послідовним опором R_s (послідовно з ідеальним діодом і шунтом), як показано на рисунку 1.5.

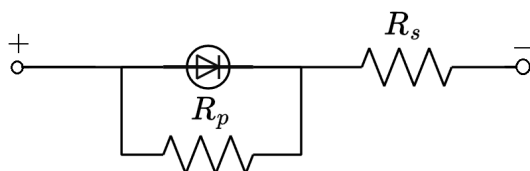


Рис. 1.5. Еквівалентна схема паразитних опорів

В такому випадку вольт-амперна характеристика I-V діода зі прямозміщеним р-п переходом має вигляд:

$$I - \frac{V - IR_s}{R_p} = I_s \left(\exp \frac{q(V - IR_s)}{n_i kT} \right) \quad (1.6)$$

Для $R_p \rightarrow \infty$ і $R_s \rightarrow 0$ це рівняння зводиться до рівняння Шоклі[5]. Вплив послідовного і паралельного опору показано на рис. 1.6.

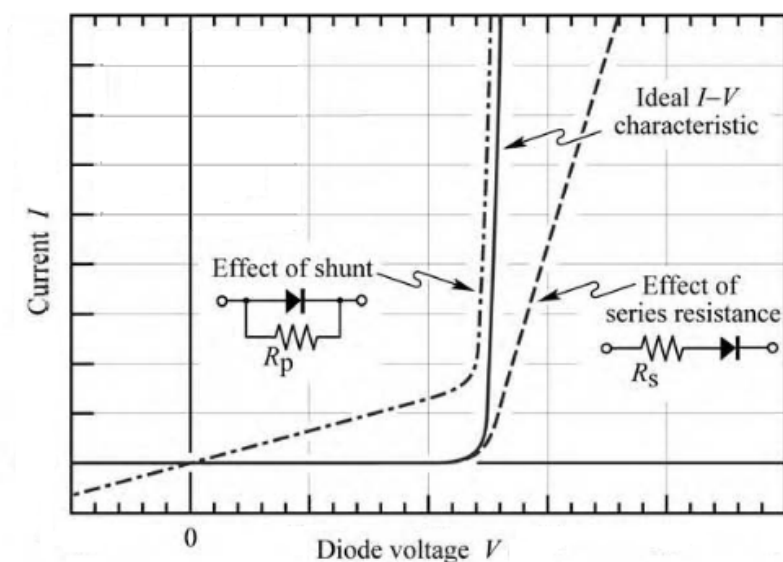


Рис. 1.6. Вплив послідовного та паралельного опору на вольт-амперну характеристику [5]

При високій напрузі, припущення, що вся напруга падає в області збіднення, стає сумнівним. При рівнях струму, коли IR_s стає порівнянним з V , падіння прикладеної напруги зменшується до $V_J = V - IR_s$ [7]. Як наслідок, можемо спостерігати таку поведінку вольт-амперної характеристики, як показано на рис.1.7.

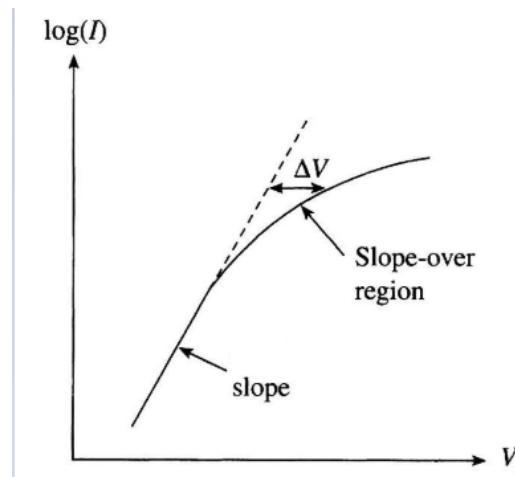


Рис. 1.7. Вплив послідовного опору при високій напрузі[7]

1.1.3. Фактор ідеальності

Фактор ідеальності світлодіода - це параметр, який вказує наскільки діод відповідає рівнянню ідеального діода (див. рівняння 1.5) і є також параметром, який визначає тип домінуючого механізму рекомбінації, коли діод працює при прямому зміщенні.

У контексті ідеального діода з коефіцієнтом ідеальності близьким до одиниці $n_{ideal} \approx 1$, вільний електрон із зони провідності безпосередньо рекомбінує з вільною діркою у валентній зоні і випромінює енергію у вигляді фотонів. Згідно з теорією Шоклі-Ріда-Холла (SRH)[8], рекомбінація вільного електрона і дірки через дефект у забороненій зоні має коефіцієнт ідеальності $n_{ideal} \approx 2$. Ця рекомбінація не є випромінювальною[9]. Схематичне зображення відповідних видів рекомбінації наведено на рисунку 1.8.

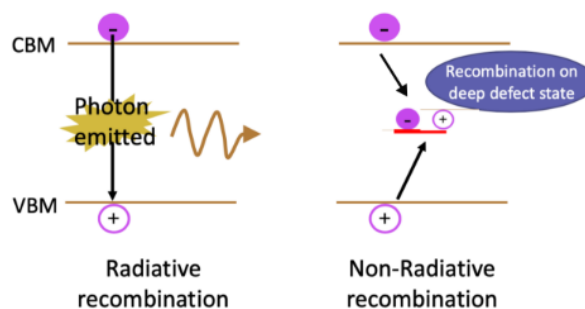


Рис. 1.8. Схематичне зображення випромінювальної рекомбінації та безвипромінювальної рекомбінації Шоклі-Ріда-Хола[10]

Також при достатньо високих концентраціях носіїв з'являється оже-рекомбінація, якій відповідає коефіцієнт ідеальності 1.5 $n_{ideal} \approx 1.5$. Оже-рекомбінація - це невидимувальний процес, в якому беруть участь три носії. Пряма оже-рекомбінація відбувається, коли енергія від рекомбінації електрона і дірки не випромінюється у вигляді фотона, а передається третьому носію (електрону або дірці). В результаті чого або електрон піднімається вище в зону провідності, або дірка виштовхується глибше у валентну зону. Варіанти оже-рекомбінації у комплексі з SRH рекомбінацією наведені на рис.1.9. Оже-рекомбінація є добре відомим ефектом у напівпровідниках з меншою шириною забороненої зони, але ефект оже-рекомбінації сильно зменшується зі збільшенням ширини забороненої зони[11].

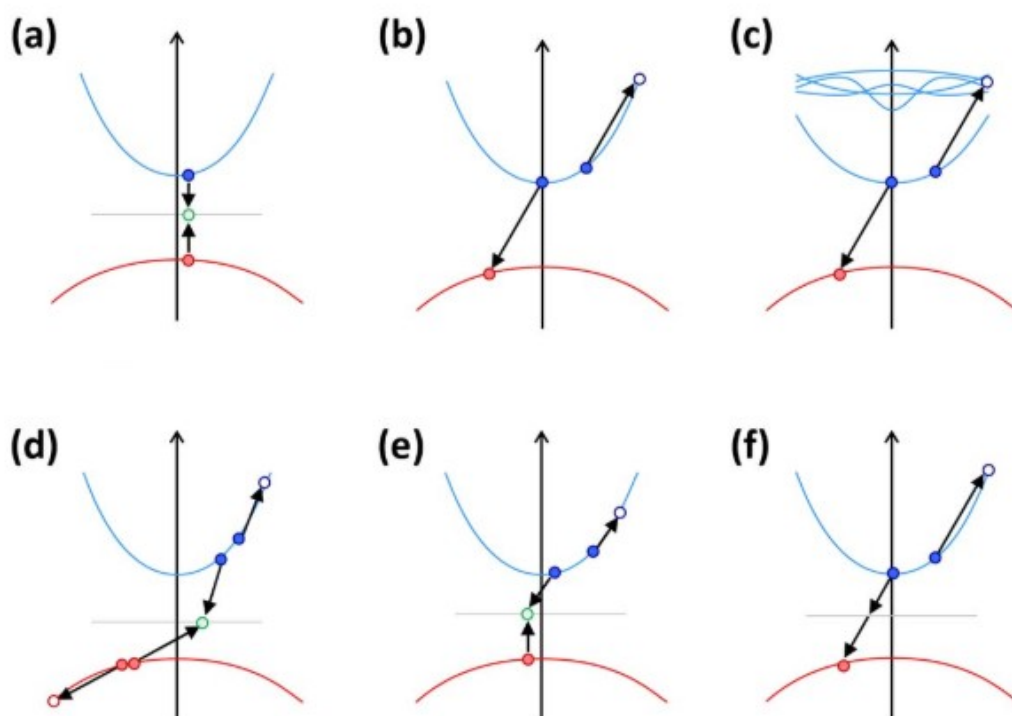


Рис. 1.9. Спрощені діаграми для процесів нерадіаційного розсіяння. (а) SRH-рекомбінація, що складається з двох подій мультифононної рекомбінації. (б) Пряме оже-розсіяння eeh. (с) Оже-розсіяння в InGaN за допомогою сплаву, де флуктуації складу створюють кілька підзон. (d) Два оже-процеси з пастками, де електрон і дірка захоплюються пасткою. (е) Комбінація оже-процесу з пастками і SRH-процесу. (f) Віртуальний оже-процес з пасткою, де дефект діє як віртуальний стан[12].

Окрім рекомбінації SRH через пастки та оже-рекомбінації, одним із чинників безвидимувальної рекомбінації є тунелювання. Тунелювання носіїв зумовлене квантовою природою самих носіїв і хвильових функцій, що їх описують, і його

в принципі неможливо уникнути. Ймовірність тунелювання також залежить від ширини забороненої зони: чим більша ширина забороненої зони, тим довший тунельний шлях через р-п перехід і менша ймовірність тунелювання між зоною провідності і валентною зоною (CB, VB), так званого тунелювання з зони в зону (BTBT).

Однак, тунельний шлях може бути скорочений за наявності структурних дефектів, таких як точкові дефекти або дислокації, що відповідають міжщільним станам (пасткам). Ці пастки поведуться як центри термоіндукованої безвипромінювальної рекомбінації, механізм якої добре описується теорією Шоклі-Ріда-Холла (SRH). Загальний процес, що включає тунелювання, захоплення і рекомбінацію, утворює механізм тунелювання за допомогою пасток (TAT), зображений на рис. 1.10 у простому випадку раптового р-п переходу, і генерує додатковий канал для протікання струму.

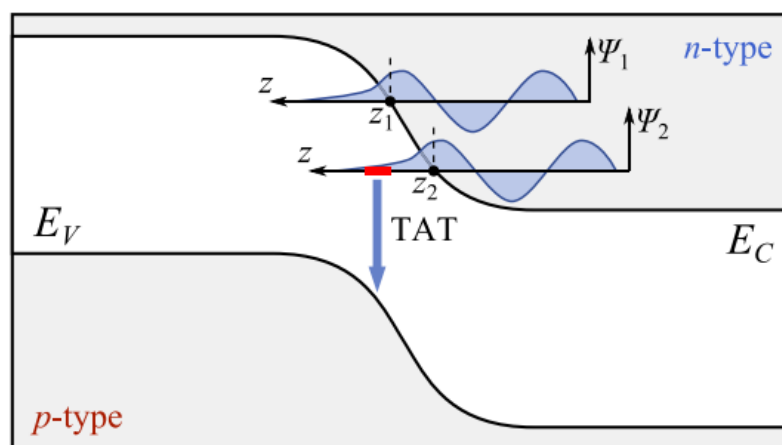


Рис. 1.10. Схематичне зображення TAT на зонній діаграмі прямого зміщеного р-п переходу. Тунелювання не відбувається для електрона, хвильова функція якого Ψ_1 експоненціально зникає в межах бар'єру. При тій самій забороненій зоні перехід між зоною провідності та валентною зоною можливий за наявності дефектних рівнів: хвильова функція Ψ_2 відповідає тунелюванню електрона в бік області р-типу, який перехоплює пастку в зазорі (позначена червоним сегментом).

Потім захоплений електрон і дірка у валентній зоні рекомбінують на місці пастки [13]

Оскільки загальний процес TAT складається з тунелювання, захоплення і рекомбінації, його ймовірність є добутком трьох окремих ймовірностей [13]. В режимі нижче оптичного ввімкнення, внесок TAT у загальний струм є помітним (рис. 1.11).

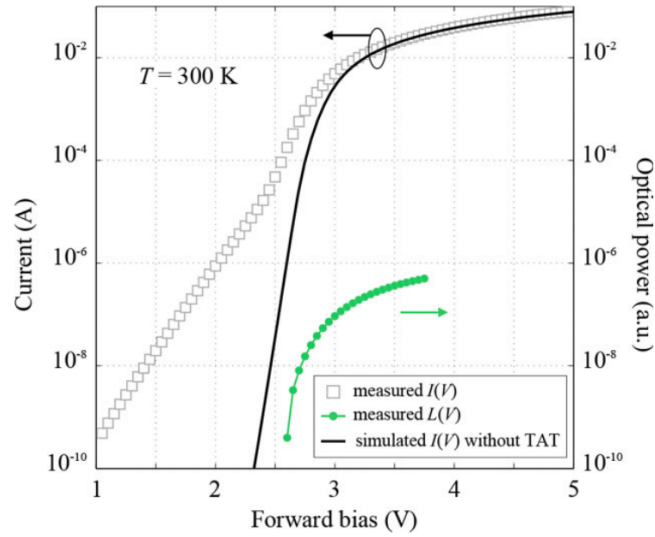


Рис. 1.11. Порівняння вимірних і змодельованих ВАХ тестової структури з однією квантовою ямою (SQW) LED при 300 K. Обчислені результати не включають внесок тунельних механізмів.

Також наведено випромінювану оптичну потужність як функцію прикладеного зсуву [14]

Насправді аналіз експериментальних вольт-амперних характеристик дозволяє не тільки виявити головні компоненти тунельного струму, але й оцінити деякі фізичні параметри пасток, зокрема їхню енергію, густину та переріз[14].

Однією з найпоширеніших ознак тунелювання через пастки є високий коефіцієнт ідеальності ($n_{ideal} > 2$), який демонструють вимірні вольт-амперні характеристики при низькому та середньому прямому зміщенні [15]-[16]. В такому випадку ВАХ буде мати вигляд як на рис. 1.12. При високій концентрації тунельованих носіїв фактор ідеальності може набувати естремально високих значень ($n_i \approx 14$), як видно з рис. 1.13.

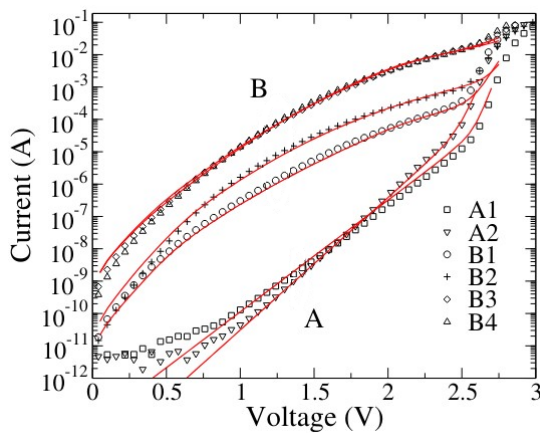


Рис. 1.12. Вимірні (символи) та змодельовані (лінії) ВАХ різних світлодіодних структур з однією квантовою ямою [17]

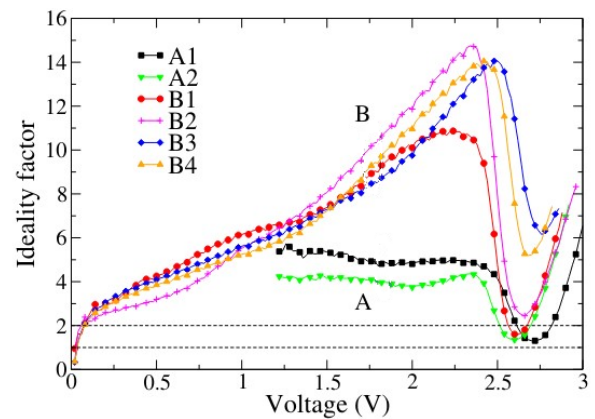


Рис. 1.13. Вимірні фактори ідеальності в SQW InGaN/GaN світлодіодах[17].

Окрім розглянутих прикладів, значення фактора ідеальності може змінюватися через велике різноманіття процесів. В нітридних структурах з множинними квантовими ямами (MQW) високі значення фактора ідеальності можуть бути спричинені такими явищами, як, наприклад, п'єзоелектрична поляризація або струми витоку (carrier leakage) [18]. Також для подібних структур можлива кореляція між фактором ідеальності і кількістю квантових ям в активній області[19].

Крім того, високе значення фактору ідеальності може бути пов'язане з ефектом концентрування струму. Цей ефект виникає внаслідок локалізації ліній протікання струму в деяких областях світлодіодної структури. В структурах з латеральною інжекцією ефект концентрування призводить до формування високої густини струму поблизу контактів, що викликає зменшення ефективно випромінюючої площі та локальний розігрів [20]-[21]. Значна неоднорідність протікання струму може призводити до збільшення “видимого” фактору ідеальності. В такому випадку фактор ідеальності не визначається лише механізмами рекомбінації та транспорту носіїв заряду як це передбачається класичною теорією р-п переходу. Аномалії фактору ідеальності під дією ефекту концентрування струму трапляються, переважно, в проміжному інтервалі струмів, де область об'ємного заряду визначає ефективність роботи світлодіодів і може бути помилково трактована, як така, що виникає в результаті зміни механізмів транспорту і рекомбінації носіїв заряду.

1.2. Оптичні властивості

1.2.1. Ефективність

Активна область ідеального світлодіода випромінює один фотон на кожен інжектований електрон. Таким чином, ідеальна активна область світлодіода має квантову ефективність, що дорівнює одиниці.

Внутрішня квантова ефективність визначається як:

$$\eta_{IQE} = \frac{N_{ph}, \text{ що випромінюються з активної області/с}}{N_e, \text{ що інжектуються в світлодіод/с}} = \frac{P_{int}/(hv)}{I/q} \quad (1.7)$$

де P_{int} - оптична потужність, випромінювана активною областю, а I - струм інжекції.

В ідеальному світлодіоді всі фотони, випромінювані активною областю, також випромінюються у вільний простір. Такий світлодіод має одиничну ефективність випромінювання. Однак у реальному світлодіоді не вся потужність, випромінювана активною областю, випромінюється у вільний простір. Деякі фотони можуть ніколи не покинути чіп. Це пов'язано з кількома можливими механізмами втрат. Наприклад, світло, випромінюване активною областю, може знову поглинатися підкладкою світлодіода, якщо припустити, що підкладка поглинає на довжині хвилі випромінювання (самопоглинання). Світло може падати на металеву контактну поверхню і поглинатися металом. Крім того, явище повного внутрішнього відбиття, яке також називають явищем захопленого світла, зменшує здатність світла виходити з напівпровідника.

Ефективність виведення світла визначається як:

$$\eta_{extraction} = \frac{N_{ph}, \text{ що випромінюються у вільний простір/с}}{N_{ph}, \text{ що випромінюються з активної області/с}} = \frac{P/(hv)}{P_{int}/(hv)} \quad (1.8)$$

де P - оптична потужність, що випромінюється у вільний простір.

Ефективність виведення може бути серйозним обмеженням для високопродуктивних світлодіодів. Досить складно підвищити ефективність випромінювання понад 50%, не вдаючись до високоефективних технологій.

Зовнішня квантова ефективність визначається як:

$$\eta_{EQE} = \frac{N_{ph}, \text{ що випромінюються у вільний простір/с}}{N_e, \text{ що інжектуються в світлодіод/с}} = \eta_{IQE}\eta_{extraction} \quad (1.9)$$

Зовнішня квантова ефективність дає відношення кількості фотонів частинок до кількості інжектованих носіїв заряду.

Енергетична ефективність (ККД) визначається як:

$$\eta_{power} = \frac{P}{IV} \quad (1.10)$$

де IV - електрична потужність, що подається на світлодіод [22].

1.2.2. ABC - модель

Електронно-діркову рекомбінацію в світлодіодах часто моделюють за допомогою моделі *ABC*. Ця модель припускає рівну інжекцію носіїв в активну область ($J_n = J_p$). Швидкість рекомбінації для цього випадку можна записати як:

$$R = An + Bn^2 + Cn^3 \quad (1.11)$$

де n - концентрація носіїв, а A , B і C - коефіцієнти Шоклі-Ріда-Холла, випромінювальний та Оже відповідно.

Як видно з наведеного вище рівняння, рекомбінація SRH представлена коефіцієнтом A і має лінійну залежність від n . Модель ABC правильно прогнозує область низьких струмів на кривій залежності світлової потужності (Light output power - LOP) від струму, де LOP зростає лінійно зі збільшенням струму. Лінійна залежність SRH рекомбінації (n) і квадратична залежність випромінювальної рекомбінації (n^2) призводять до того, що випромінювальна рекомбінація стає домінуючим механізмом рекомбінації при високих рівнях струму. На дуже високих рівнях струму ця модель передбачає, що оже-процес буде домінувати над рекомбінацією [11].

Використовуючи ABC-модель, можемо записати ще одне визначення для IQE[23]:

$$\eta_{IQE} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{nonrad}} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3} \quad (1.12)$$

Ця модель часто дає хороші якісні вказівки щодо відносного впливу каналів рекомбінації на IQE.

1.2.3. Спектр випромінювання

Спектр випромінюваного світла зазвичай визначається шириною забороненої зони світлодіода. Зміщення спектру випромінювання світлодіода в короткохвильову (синю) або довгохвильову (червону) область може бути викликано різними факторами: зміною температури, прикладеної напруги, або через деградацію самого світлодіода.

Шари квантових ям у світлодіодах на основі GaInN/GaN мають високе внутрішнє електричне поле, зумовлене їх кристалічною структурою[24], яке просторово розділяє хвильові функції електронів і дірок, тим самим перешкоджаючи ефективній випромінювальній рекомбінації і одночасно зміщуючи спектр випромінювання в довгохвильову зону. Таке явище називається квантово-розмірним ефектом Штарка. Однак подібне велике електричне поле може бути екрановане високим струмом інжекції, що призводить до зсуву спектру випромінювання у короткохвильову область. Якщо внутрішнє електричне поле відсутнє, то зсув у синю область випромінювання не спостерігається або є мінімальним[25].

Світлодіоди на основі AlGaInP є дуже чутливими до зміни робочої температури. Висока робоча температура може призвести до значного витоку носіїв, що в свою чергу призведе до очевидного теплового падіння ефективності[26], а також до зменшення ширини забороненої зони світлодіода, що спричинить зміщення спектру випромінювання у довгохвильову область.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Вимірювання електричних характеристик

Експериментальна робота проводилась в лабораторії Chemnitz University of Technology, Німеччина. Методика експерименту полягає у вимірюванні вольт-амперної характеристики з використанням Keysight B2901A[27] (рис. 2.1), який виконує функцію джерела струму і мультиметра, дозволяючи швидко і з високою точністю вимірювати ВАХ світлодіодів. Для роботи з Keysight B2901A використовувалася програма Keysight B2900 Quick IV Measure Software, яка дозволяла керувати та вимірювати параметри пристрою.

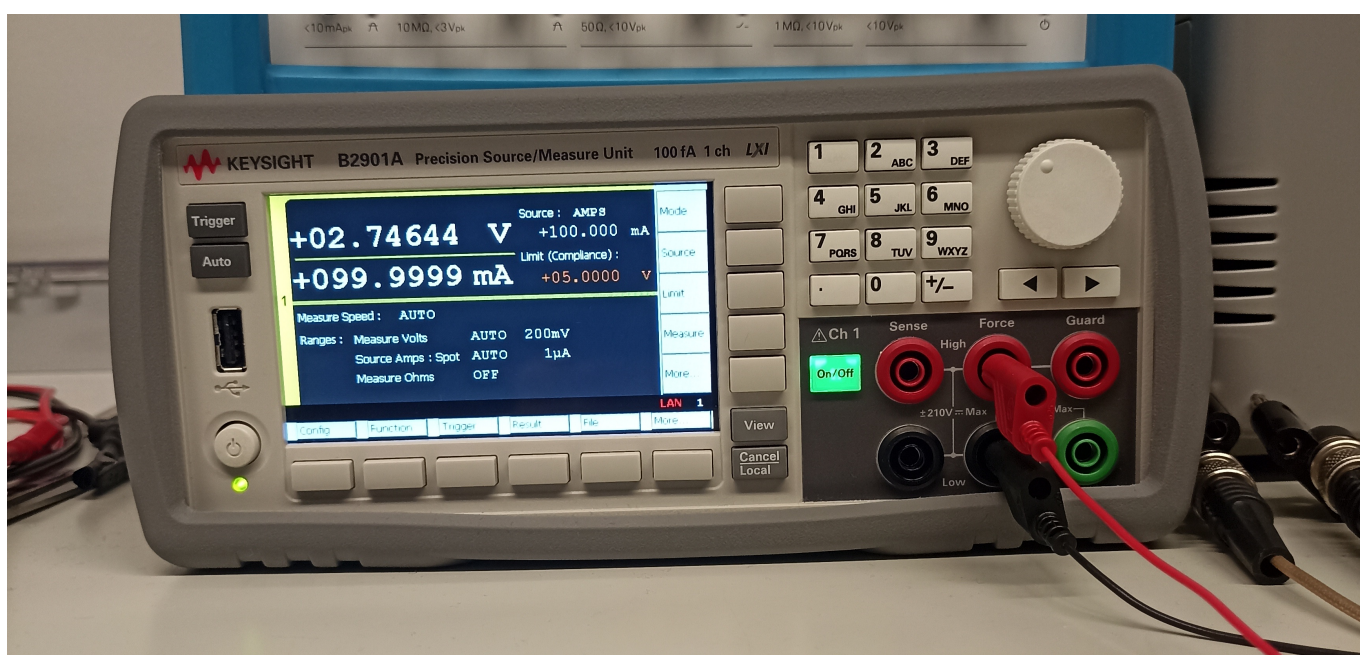


Рис. 2.1. Keysight B2901A Precision Source/Measure Unit

У якості зразків всього було використано 9 комерційних RGB світлодіодів: 2 червоних[28], 4 зелених[29] та 3 синіх[30] з піковими довжинами хвиль 620 нм, 525 нм і 455 нм відповідно, та 27 ІЧ світлодіодів.

Для під'єднання RGB зразків до приладу були використані два BNC кабелі. Кожен кабель з однієї сторони був підключений до Keysight за допомогою перехі-

дника з двома банановидними виходами (+ і -), а з іншої сторони - припаяний до двох контактів, за допомогою яких подавалася напруга на контакти власне світлодіодів при з'єднанні. Таким чином до світлодіода було під'єднано всього 4 кабелі, що дозволило зменшити падіння напруги на шляху від джерела до світлодіода для отримання максимально достовірних результатів вимірів.

Для зручного проведення експерименту була зроблена конструкція для фіксації зразка і точного підключення контактів установки до контактів світлодіода. В початковому варіанті використовувалася установка, наведена на рис. 2.2, але через складність точного попадання контактів установки на контакти зразка було вирішено замінити її на конструкцію, наведену на рис. 2.3. У вдосконаленому варіанті є можливість проконтролювати, чи всі контакти установки точно потрапляють на відповідні контакти зразка, що мінімізує можливість некоректної подачі напруги на світлодіод.

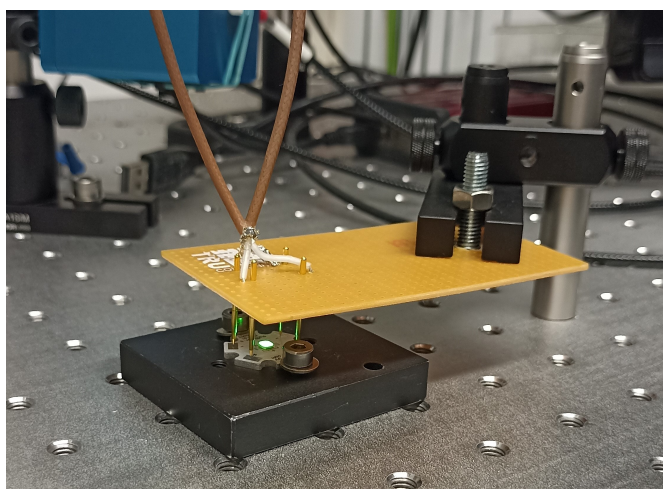


Рис. 2.2. Початковий варіант кріплення

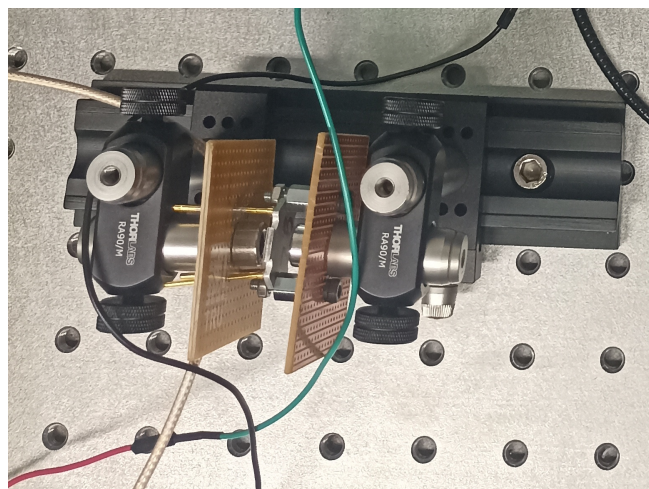


Рис. 2.3. Удосконалений варіант кріплення

Для під'єднання ж ІЧ зразків, в яких тільки 2 контакти використовувалися звичайні кабелі з банановидними виходами з крокодильчиками на кінцях. Так як у інфрачервоних зразків було всього 2 контакти і використати схему з 4-контактним підключенням було неможливо, для мінімізації падіння напруги було використано максимально короткі кабелі, які дозволяла установка.

Під час здійснення вимірювання на джерелі була задана гранична напруга в 5 В. Вимірювання проводилися в діапазоні струму від 0,6 мкА до 100 мА. Діапазон

був поділений на 6 інтервалів від 0,6 мкА до 60 мкА, від 50 мкА до 500 мкА і т. д. Кожен інтервал містить 100 точок і вимірювався по 50 разів. Всі дані після вимірювання зберігались у вигляді таблиці у відповідний файл в форматі Excel.

2.2. Вимірювання оптичних характеристик

Для вимірювання ватт-амперної характеристики та спектру випромінювання світлодіодів була зібрана установка, яка складається з джерела Keysight, про яке говорилось вище, сфери Ульбрихта, фотодіода Thorlabs S140C[31], оптоволокна BIFBORO-1000-2 та спектрометра Ocean Optics Flame-T-VIS-NIR-ES[32]. Нижче наведено схему установки (рис. 2.4) та її реальне фото (рис. 2.5).

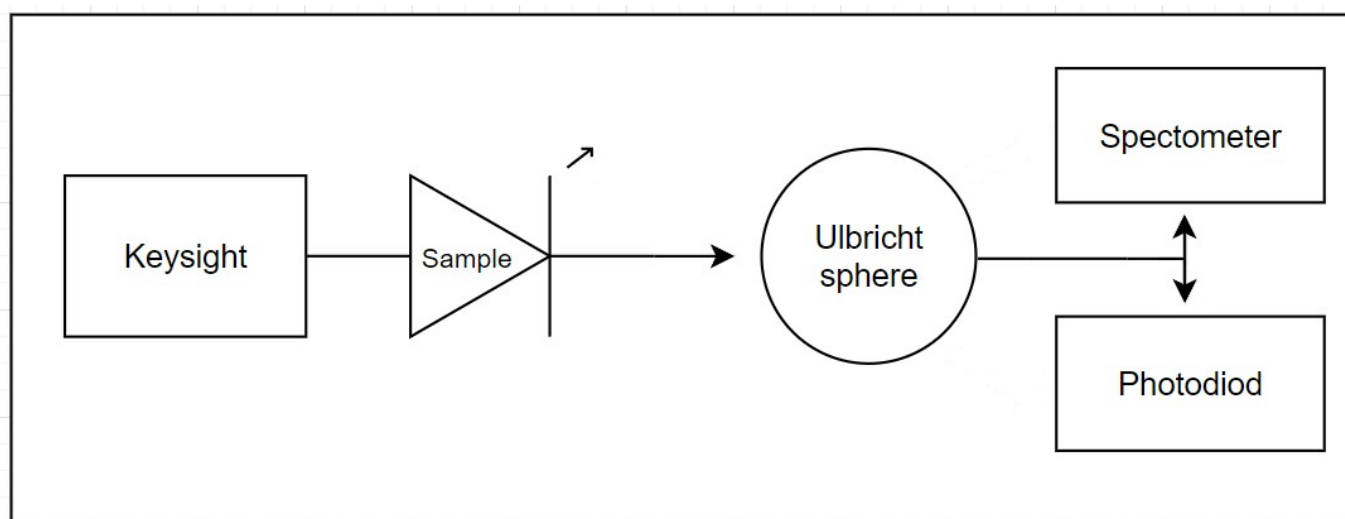


Рис. 2.4. Схема експериментальної установки

Keysight використовується як джерело живлення, а також для заміру ВАХ підключеного зразка, сам зразок резинками прикріплюється до інтегруючої сфери, щоб весь потік світла був напрямлений всередину. Далі вже розсіяне світло з інтегруючої сфери по одному оптоволокну потрапляє в фотодіод, і по другому - в спектрометр.

Keysight, фотодіод і спектрометр мають відповідні програми для роботи з приладом, і для того, щоб зробити вимір на всіх трьох приладах для однієї точки, необхідно переключатися між 3 програмами, що вручну робити було б занадто

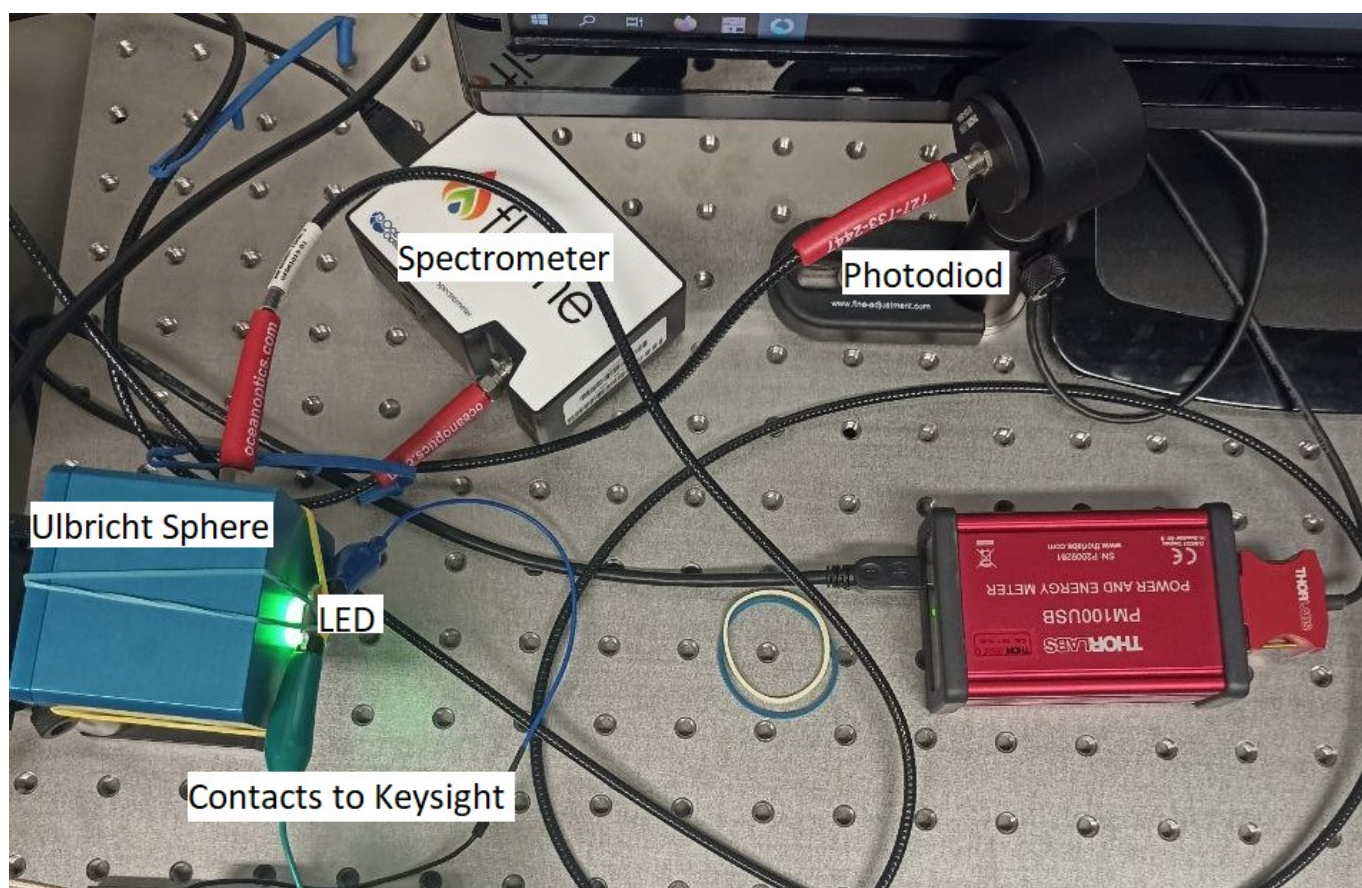


Рис. 2.5. Фото експериментальної установки

часозатратно. Тому було написано макрос, який за допомогою маніпуляцію мишою і клавіатурою буде робити вимір кожної точки. Для різних світлодіодів кількість виміряних точок відрізняється, починаючи з 150 мА і закінчуючи границею чутливості фотодіода і спектрометра.

Макрос працював у циклі: встановлення протікаючого через світлодіод струму → вимір струму і напруги на світлодіоді → переключення на програму для фотодіода і вимір значення потужності → переключення на програму для спектру і збереження графіку спектру. Значення струму, напруги і потужності додаються в таблицю і зберігаються у файл у форматі excel по завершенню виміру всіх точок. Файли зі спектрами зберігаються в окрему папку по завершенню виміру кожної точки. Відповідний код макросу наведений в додатку А.

2.3. Методика обробки експериментальних даних

Обробка експериментальних даних проводилася за допомогою Matlab. Спочатку виміряні дані імпортуються в середовище Matlab, де розбиваються на окремі масиви, що відповідають кожній із виміряних величин. Після всі повтори вимірювань усереднюються для більшої точності отриманих результатів. Після чого можна будувати графіки ВАХ, залежності LOP від струму та спектри випромінювання.

Для отримання формули для фактору ідеальності спочатку пропотенціюємо рівняння 1.5 :

$$\frac{I}{I_s} = \exp \frac{qV}{n_i kT} - 1 \longrightarrow \ln I - \ln I_s = \frac{qV}{n_i kT} \quad (2.1)$$

Далі виразимо V та продиференціюємо отриманий вираз по I :

$$V = \frac{n_i kT}{q} (\ln I - \ln I_s) \longrightarrow \frac{dV}{dI} = \frac{n_i kT}{q} \cdot \frac{d(\ln I)}{dI} \quad (2.2)$$

Домножимо рівняння на $\frac{dI}{d \ln I}$ і виразимо фактор ідеальності:

$$\frac{dV}{dI} \frac{dI}{d \ln I} = \frac{n_i kT}{q} \longrightarrow \frac{dV}{d \ln I} = \frac{n_i kT}{q} \longrightarrow n_i = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln I} \quad (2.3)$$

Таким чином, коефіцієнт ідеальності буде прямо пропорційний похідній напруги за логарифмом струму.

Далі знаходимо похідну $dU/d \ln(I)$. Так як в нашому випадку функція задана таблично, для знаходження похідної використали метод двосторонніх різниць:

$$f'_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (2.4)$$

Після чого для обрахунку фактора ідеальності користуємося формулою 2.3 і будуємо відповідні графіки.

Результати вимірювань та їх аналіз представлені в наступному розділі.

РОЗДІЛ 3.

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

3.1. Загальні особливості RGB світлодіодів

Отримані графіки вольт-амперних характеристик, залежності коефіцієнта ідеальності від струму, залежності вихідної світлової потужності від струму, а також спектри випромінюваного світла наведені нижче. Всі графіки побудовані в напівлогарифмічному масштабі. На графіках також можна побачити деякі флуктуації значення обрахованого коефіцієнта ідеальності, так як було прийнято рішення не проводити апроксимацію даних, оскільки ці флуктуації не впливають на аналіз отриманих результатів.

Спочатку було розглянуто поведінку RGB світлодіодів для всіх 3 кольорів. На рисунку 3.1 наведено ВАХ і залежність фактора ідеальності від струму для світлодіодів різних кольорів. З аналізу видно, що вольт-амперна характеристика в напівлогарифмічному масштабі має лінійний характер, що вказує на експоненційний ріст, фактор ідеальності при цьому знаходиться в інтервалі від 1 до 2.

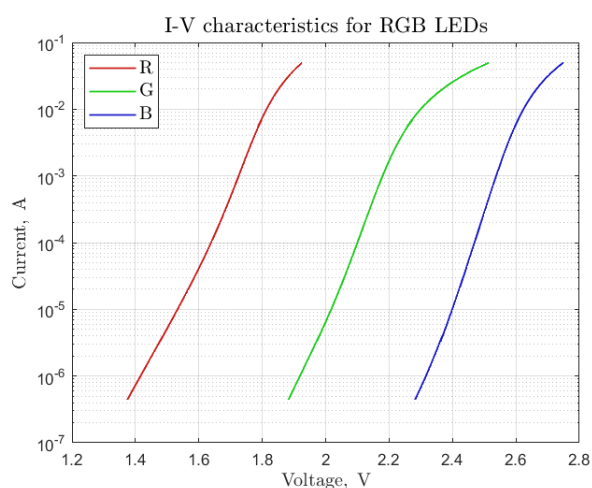


Рис. 3.1. ВАХ для RGB світлодіодів різних кольорів

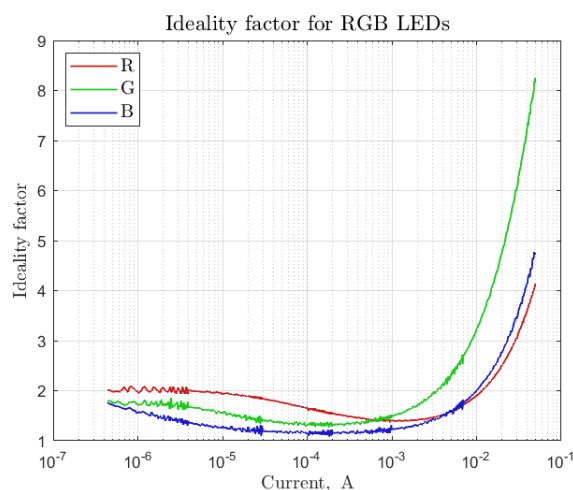


Рис. 3.2. Залежність коефіцієнта ідеальності від струму для RGB світлодіодів різних кольорів

Далі на великих струмах збільшення напруги призводить до уповільнення зростання струму, що означає різке зростання фактора ідеальності, тобто починає діяти послідовний опір на великих струмах. Звертаємо увагу, що порогова напруга є різною в залежності від кольору. Пояснюється це тим, що і порогова напруга і довжина хвилі випромінювання залежать від ширини забороненої зони, а отже від матеріалу, з якого виготовлено світлодіод.

З рис. 3.2 можемо помітити, що фактор ідеальності досить сильно відрізняється в залежності від кольору зразка. Бачимо, що синій світлодіод має найменший коефіцієнт ідеальності, натомість найбільшого значення набуває червоний.

Можемо зробити висновок, що для синіх і зелених світлодіодів, які мають близькі характеристики активної області, в інтервалі, коли $n_i \approx 1$ домінує випромінювальна рекомбінація. В той час як для червоного світлодіода, активна область якого має іншу гетероструктуру, фактор ідеальності значно відрізняється.

Далі наведено графіки ВАХ і залежності фактору ідеальності для різних зразків одного кольору. Зроблено це для оцінки того, наскільки n_i буде відрізнятися в межах однієї партії. Також додано графіки LOP зразків та спектри їх випромінювання для більш детального аналізу.

3.1.1. Сині світлодіоди

На рис. 3.3-3.6 наведено графіки електричних та оптичних характеристик синіх світлодіодів. З графіка ВАХ та LOP можемо зробити висновок, що в рамках партії ці зразки не мають значної різниці в оптичних та електричних характеристиках.

Фактор ідеальності не має значних відхилень від очікуваного діапазону від 1 до 2, що свідчить про те, що ніяких особливо помітних паразитних процесів в світлодіоді не відбувається. На низьких струмах поблизу точки світіння більш домінуючою є SRH рекомбінація, яку зі збільшенням струму заміщає випроміню-

новальна рекомбінація і фактор ідеальності наближається до 1. Його подальше збільшення цілком обумовлене впливом послідовного опору.

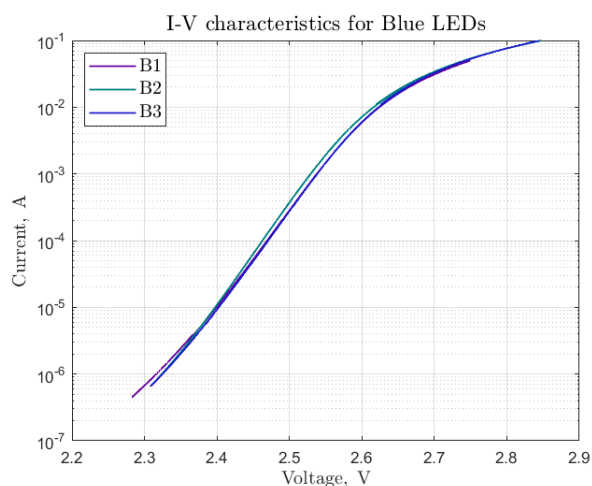


Рис. 3.3. ВАХ для синіх світлодіодів

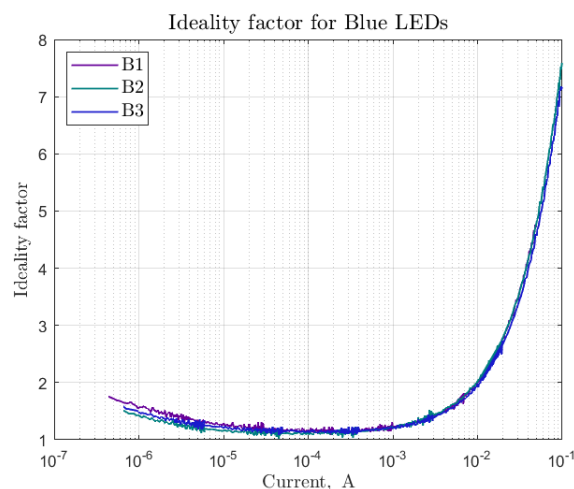


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнта ідеальності від струму для синіх світлодіодів

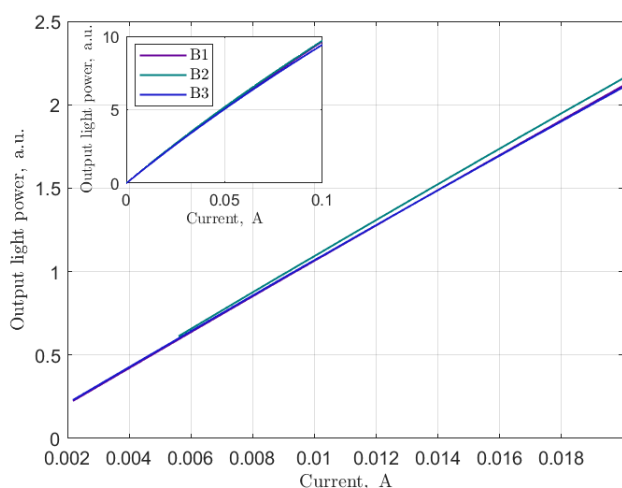


Рис. 3.5. LOP для різних синіх світлодіодів

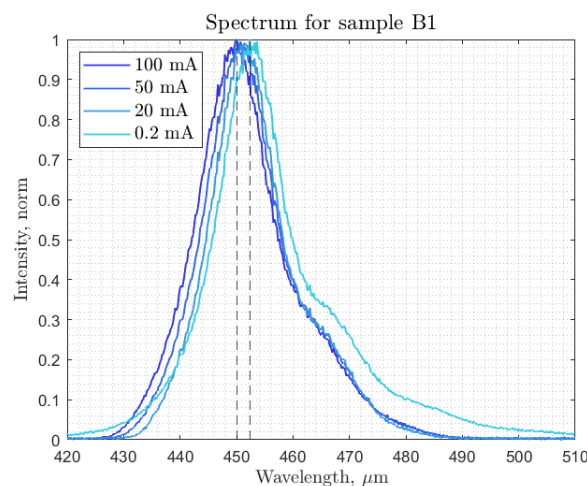


Рис. 3.6. Спектр випромінювання одного з синіх світлодіодів

Так як спектри випромінювання для всіх зразків в межах однієї партії є майже ідентичними, наводитимемо тільки по одному графіку. З рис. 3.6 видно, що зі збільшенням струму максимум спектру зміщується в короткохвильову область з 452 нм до 450 нм. У документації до світлодіодів цієї партії вказана довжина хвилі випромінювання в 455 нм на 150 мА. Враховуючи зміну спектру з 0.2 мА до 100 мА можемо зробити припущення що на 150 мА довжина хвилі не буде відповідати

заявленій у документації. Зміни характеристик спектру можуть бути пов'язані з часом експлуатації самого світлодіода і з деградацією його характеристик.

Загалом можна зробити висновок, що досліджені зразки мало відрізняються один від одного, не мають значних відхилень в характеристиках і є якісними.

3.1.2. Зелені світлодіоди

На рис. 3.7-3.10 наведено графіки електричних та оптичних характеристик зелених світлодіодів. В той час як ВАХ для всіх виміряних зразків є майже ідентичними, один зі зразків значно відрізняється по своїм оптичним характеристикам, хоч всі зразки мають однакові спектральні характеристики.

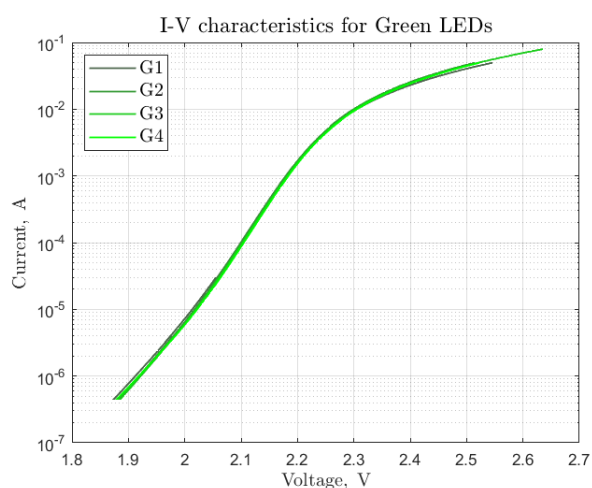


Рис. 3.7. ВАХ для зелених світлодіодів

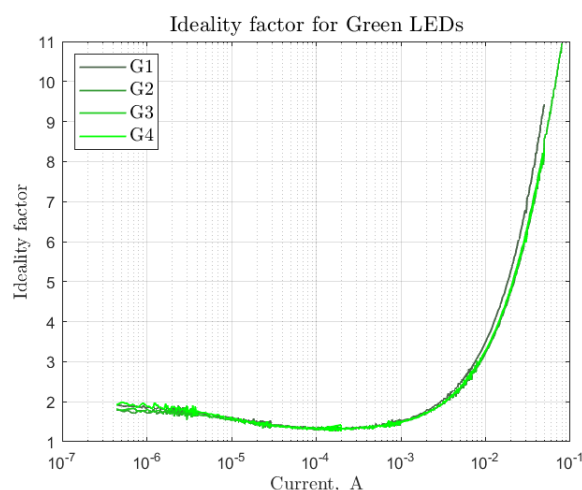


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнта ідеальності від струму для зелених світлодіодів

Фактор ідеальності, як і у випадку синіх зразків, знаходиться в діапазоні від 1 до 2 і не виявляє ніяких аномальних значень до початку зростання впливу послідовного опору, який стає помітним на дещо менших струмах ніж в випадку синіх світлодіодів. На низьких струмах поблизу точки світіння більш домінуючою є SRH рекомбінація, яку зі збільшенням струму заміщає випромінювальна рекомбінація і фактор ідеальності наближається до 1, хоч і не настільки близько, як у випадку синіх зразків.

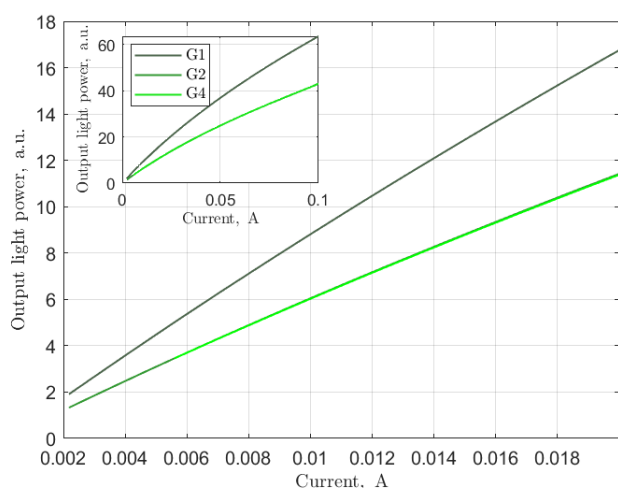


Рис. 3.9. LOP для різних зелених світлодіодів

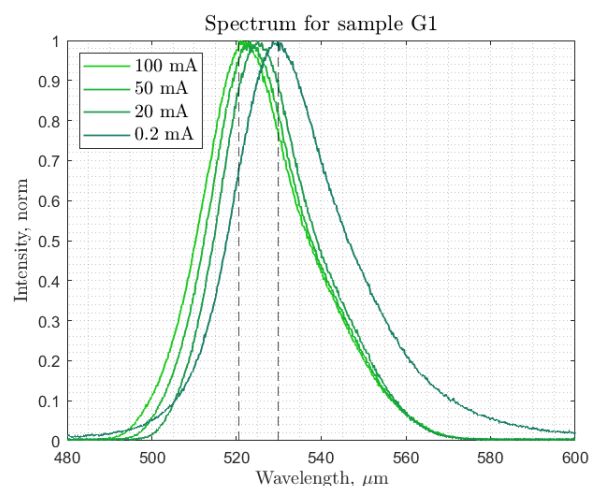


Рис. 3.10. Спектр випромінювання одного з зелених світлодіодів

З графіку 3.10 видно, що зі збільшенням струму максимум спектру зміщується в короткохвильову область з 530 нм до 520 нм. Видно що у випадку зелених СД зсув спектру є більш яскраво вираженим. В документації до світлодіодів цього зразка вказана довжина хвилі випромінювання в 525 нм на 150 мА. Враховуючи зміну спектру з 0.2 мА до 100 мА можемо зробити припущення, що на 150 мА довжина хвилі не буде відповідати заявленій у документації, як і у випадку синіх зразків.

3.1.3. Червоні світлодіоди

На рис. 3.11-3.14 наведено графіки електричних та оптичних характеристик червоних світлодіодів. З графіка ВАХ можемо зробити висновок, що в рамках партії ці зразки дещо відрізняються. На жаль, їх оптичні характеристики порівняти не вийде, так як на момент їх вимірів був доступним тільки один зразок.

Фактор ідеальності знаходиться в діапазоні від 1 до 2 і не виявляє аномально високих значень до початку збільшення впливу послідовного опору. На низьких струмах поблизу точки світіння, як і у випадку синіх і зелених СД, $n_i \approx 2$, що вказує на домінування SRH рекомбінації. Зі збільшенням струму фактор ідеальності хоч і

зменшується, однак так і не наближається до 1, залишаючись більше 1.5, що може вказувати на невідомі додаткові процеси в активній області.

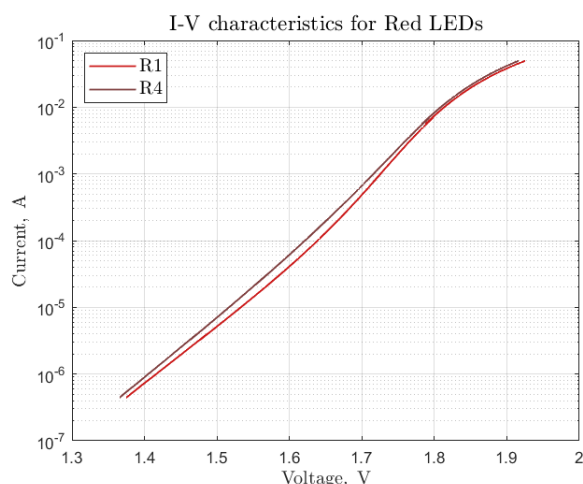


Рис. 3.11. ВАХ для червоних світлодіодів

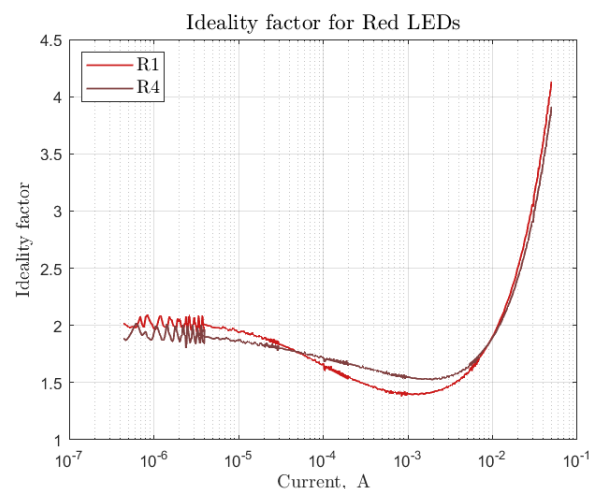


Рис. 3.12. Залежність коефіцієнта ідеальності від струму для червоних світлодіодів

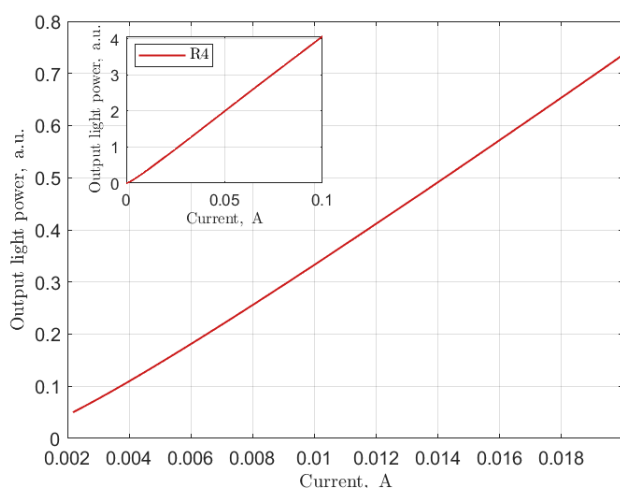


Рис. 3.13. LOP для червоного світлодіода

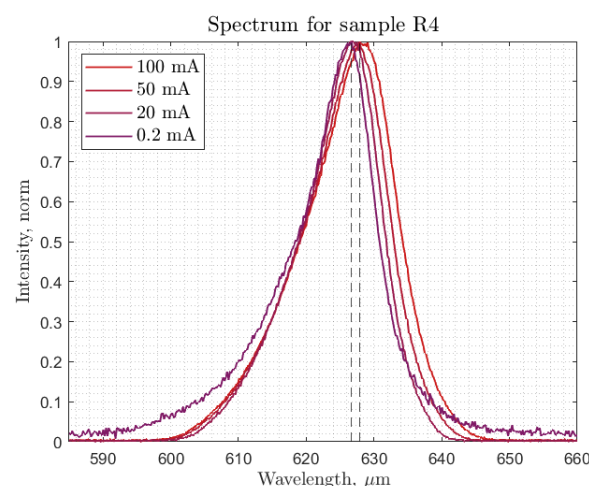


Рис. 3.14. Спектр випромінювання червоного світлодіода

З графіку 3.14 видно, що, на відміну від синіх і зелених світлодіодів, спектр червоного зразка при збільшенні струму має зсув у довгохвильову область з 627 до 628 нм. Причина в тому, що на відміну від синіх чи зелених світлодіодів які виготовляються на основі нітридів, червоні світлодіоди які, як правило, виготовляються на основі AlGaInP, мають принципово іншу структуру, і є дуже температурно залежними. В документації до світлодіодів цього кольору вказана довжина хвилі 620 нм. Зі збільшенням протікаючого струму зсув спектру буде і далі відбуватись в

сторону довгих хвиль, що означає що на заявлених 150 мА отримана максимальна довжина хвилі випромінювання буде також відрізнятися від очікуваної.

3.2. Інфра-червоні світлодіоди

Далі розглянемо графіки електричних і оптичних характеристик інфра-червоних світлодіодів (рис. 3.15-3.19). Під час експерименту було виміряно ВАХ всього для 27 зразків з 7 різних партій. Однак, цікавими для аналізу є тільки одна партія з виміряних. Всі інші партії мають схожі характеристики, тому не будуть наведені для аналізу.

В партії зразків, яку ми будемо розглядати було виявлено 2 зразки, які по своїм вольт-амперним характеристикам значно відрізняються від інших виміряних світлодіодів. На рис. 3.15 наведено 4 зразки, 2 з них мають типовий вигляд ВАХ, і 2 значно відрізняються. Подібне викривлення ВАХ може бути викликано паразитним паралельним опором. На великих струмах як і у випадку нормальних зразків починає переважати послідовний опір і ВАХ загинається вниз.

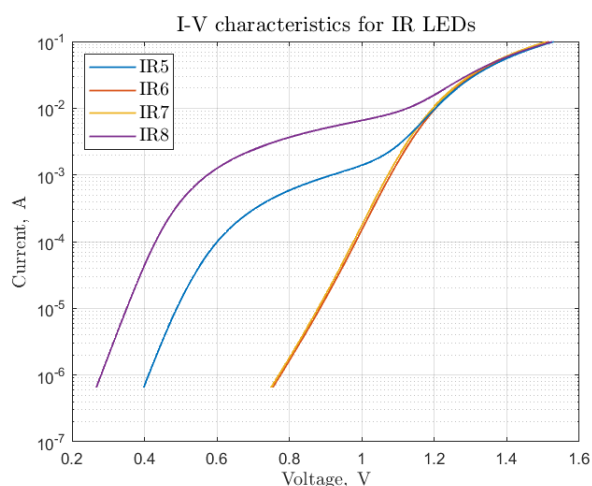


Рис. 3.15. ВАХ для інфра-червоних світлодіодів

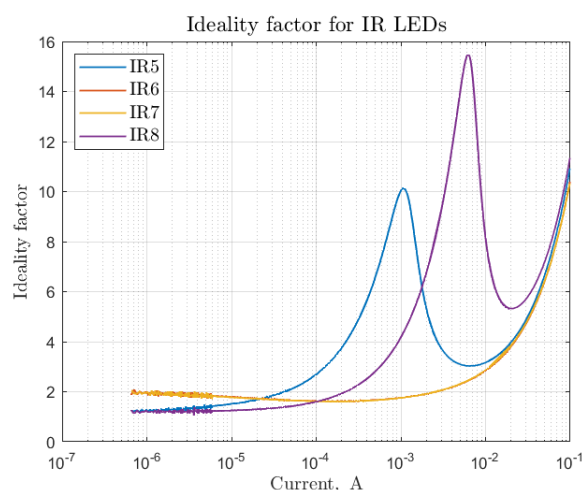


Рис. 3.16. Залежність фактора ідеальності від струму для інфра-червоних світлодіодів

Для наглядності було побудовано графіки ВАХ для відповідних 4 зразків для нижнього діапазону струмів у звичайному масштабі (рис. 3.17). З рисунку видно

що 2 дефектних зразки мають прямі області характеристик, які в загальному випадку повинні мати виключно експоненційний характер.

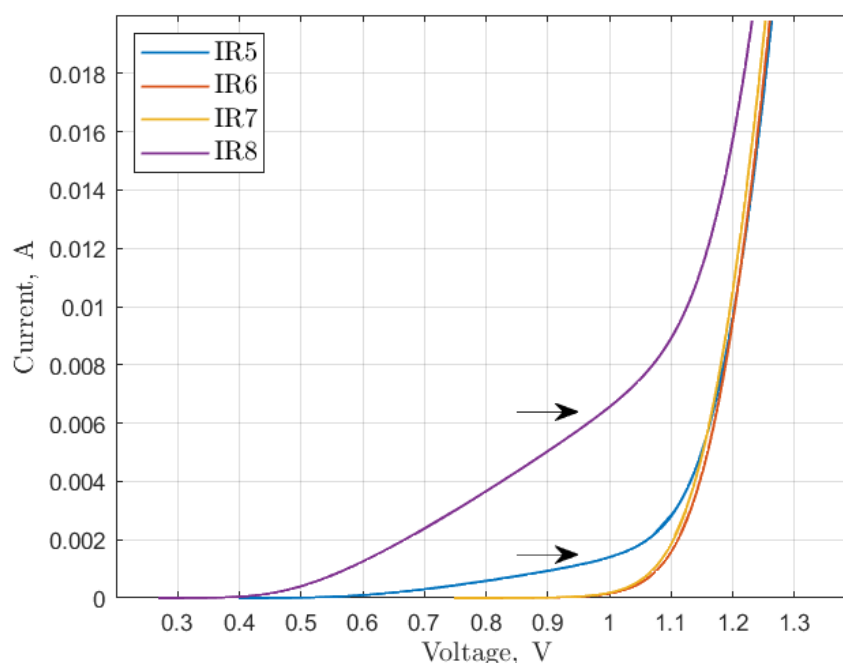


Рис. 3.17. ВАХ в звичайному масштабі. Стрілками показано прямі області ВАХ, на яких діє паралельний опір

Проаналізувавши графік залежності LOP від струму (рис. 3.18), бачимо, що всі зразки мають різні оптичні характеристики. Так як LOP вимірялося з початку зафіксованого світіння зразків, можна зробити висновок, що зразок IR8, який має найбільше відхилення в електричних характеристиках, починає світитися пізніше, ніж інші і має найменше значення вихідної світлової потужності.

На графіку 3.17 на області струмів вище початку світіння, можемо помітити, що якщо ВАХ IR5 вже вирівнялась і має такий самий вигляд, як і для нормальних зразків, то на ВАХ IR8 все ще впливає складова паралельного опору, і потужність, яка б мала витрачатися на випромінювальну рекомбінацію, витрачається на сторонній паразитний процес.

Звернувши увагу на піки фактору ідеальності, а також на вигляд ВАХ, можемо зробити висновок, що мають місце обхідні процеси, природу яких на даному етапі дослідження ми не можемо встановити. Однак можемо припустити як тунелювання через пастки в активній області, як у випадку [17], так і поверхневі стани.

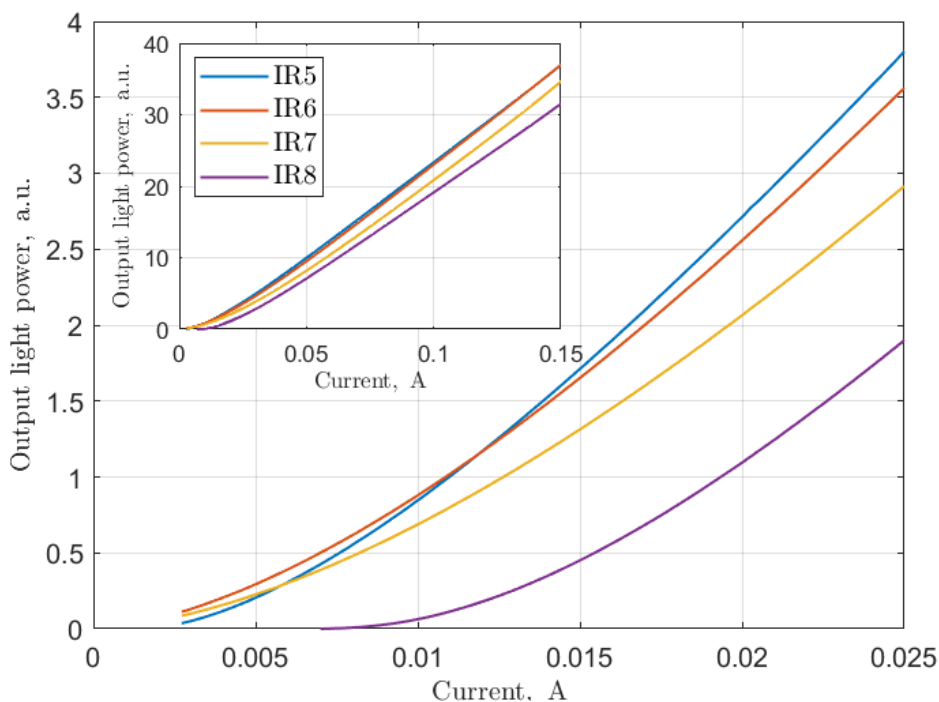


Рис. 3.18. LOP для інфра-червоних світлодіодів

Подібні паразитні процеси впливають не тільки на електричні і оптичні характеристики зразків, а ще й можуть здійснювати вплив на шумові характеристики світлодіодів[33].

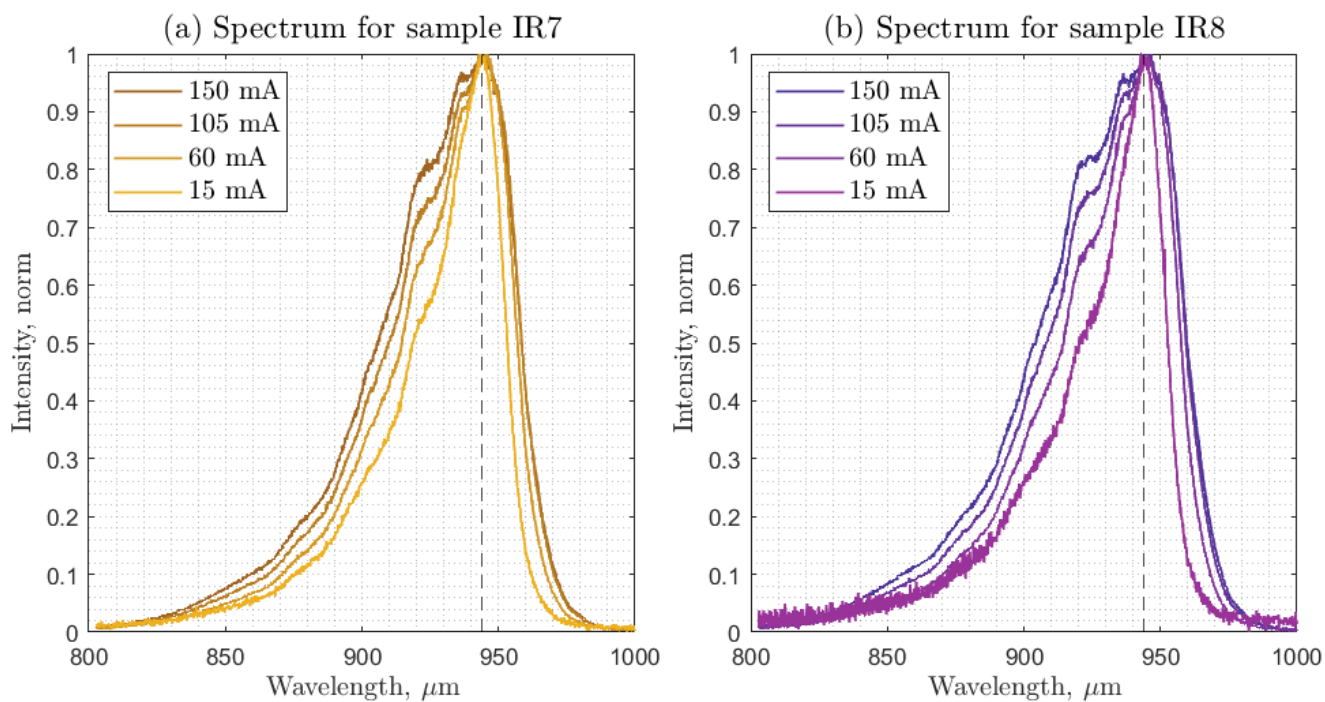


Рис. 3.19. Спектри випромінювання інфра-червоних світлодіодів для дефектного IR8 та нормального IR7 зразків

Далі наводимо графіки спектрів випромінювання (рис. 3.19) для типового (IR7) та дефектного (IR8) зразків для їх порівняння. Принципової різниці між спектральними характеристиками цих двох зразків виявлено не було, тому можна зробити висновок, що виявлені аномалії не впливають на спектральні характеристики розглянутих зразків. Спектри інфра-червоних зразків якісно відрізняються від спектрів RGB світлодіодів, так як не мають зсувів максимуму випромінювання ні в короткохвильовий, ні в довгохвильовий діапазон. Натомість зі збільшенням струму отриманий спектральний діапазон розширюється і другий пік випромінювання, який знаходиться зліва від головного, підіймається вище. Така тенденція зберігається як для дефектних, так і для нормальних зразків.

Таким чином, хоч електричні характеристики для проаналізованої партії інфра-червоних зразків і відрізняються, однак на високих струмах ця різниця зникає і вже мало впливає на оптичні характеристики, а на спектральні не впливає взагалі.

РОЗДІЛ 4.

ВИСНОВКИ

Було проведено експериментальне дослідження електричних та оптичних характеристик світлодіодів, в рамках якого було виміряно вольт-амперну характеристику, світлову потужність випромінювання, спектр, обраховано фактор ідеальності та побудовано залежності відповідних величин від струму.

Після аналізу отриманих результатів підтверджено коректність сучасних теоретичних моделей опису електричних та оптичних характеристик для досліджуваних RGB світлодіодів. Показано, що їхні ВАХ та LOP мають типовий вигляд і мало відрізняються в рамках партії. Для синіх і зелених СД має місце зсув спектру у короткохвильову область, який цілком пояснюється зменшенням впливу квантово-розмірного ефекту Штарка по причині екранування п'єзоелектричного поля, при чому для зелених СД цей зсув є більш вираженим. В той час як для червоних СД має місце зсув спектру у довгохвильову область, який пояснюється температурною залежністю.

Серед однієї з партій досліджених інфра-червоних зразків було виявлено світлодіоди з аномальними вольт-амперними характеристиками та піками фактора ідеальності, які викликають затримку включення відповідних зразків та впливають на їх потужність випромінювання. Струм витоку через паралельні низькоімпедансні канали в обхід активної області в цих зразках домінує при низьких напругах зсуву в підпороговій області. У згаданих світлодіодах ці канали відкриваються при напругах, значно нижчих, ніж у правильно працюючих зразках, що дає додатковий вигин ВАХ і відповідний пік фактора ідеальності.

При порівнянні спектральних характеристик типових інфрачервоних світлодіодів з аномальними було встановлено, що виявлені струми витоку не впливають на спектр випромінювання зразків. Сам спектр розширюється при збільшенні струму, що пояснюється виникненням хвостів щільності станів носіїв заряду.

Розроблена методика може використовуватись для швидкого і простого попереднього аналізу ключових характеристик світлодіодів з метою пошуку дефектів структури чи збірки СД.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ke L., Fengling L., Chaofeng X. The Optical Characteristics and Measurement, Model and Solution of LED // Green Communications and Networks / за ред. Y. Yang, M. Ma. — Springer Netherlands, 2012. — С. 883—890.
2. Пихтин А. Н. Светодиоды // Оптическая и квантовая электроника / за ред. А. Н. Пихтин. — Высшая школа, 2001. — С. 410.
3. Marktech Optoelectronics. MT51020-IR Data Sheet. — 2017. — <https://specs.marktechopto.com/pdf/products/datasheet/MT51020-IR.PDF>.
4. CREE. Cree XP-G3 Royal Blue 450nm синій. — <https://forled.com.ua/cree-xp-g3-siniy-ua>.
5. Schubert E. F. LED basics: Electrical properties // Light-Emitting Diodes. — Cambridge University Press, 2006. — С. 59—85.
6. Schwarz U., Ivanova V. LEDs Efficiency, Part I. — 11.2023.
7. Min P. Y.-S. Electronic Materials: Semiconductor Physics and Devices. — <http://contents.kocw.or.kr/KOCW/document/2014/konkuk/minyosep2/14.pdf>.
8. Sah C.-t., Noyce R. N., Shockley W. Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics // Proceedings of the IRE. — 1957. — Т. 45, № 9. — С. 1228—1243.
9. Hedzir A., Hasbullah N. A review of high ideality factor in gallium nitride-based light-emitting diode // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. — 2021. — Бєр. — Т. 24. — С. 83—89.
10. Gupta S. Theoretical characterization of point defects in semiconductors : from photovoltaics to quantum engineering applications : Theses : 2023GRALY030 / Gupta Sameer. — Université Grenoble Alpes [2020-....], 03.2023.

11. Efficiency droop in gallium indium nitride (GaInN)/gallium nitride (GaN) LEDs / D. Meyaard [та ін.] // Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs) / за ред. J. Huang, H.-C. Kuo, S.-C. Shen. — Woodhead Publishing, 2014. — С. 279—300.
12. Review—The Physics of Recombinations in III-Nitride Emitters / A. David [та ін.] // ECS Journal of Solid State Science and Technology. — 2019. — Груд. — Т. 9, № 1. — С. 016021.
13. Semiclassical simulation of trap-assisted tunneling in GaN-based light-emitting diodes / M. Mandurrino [та ін.]. — 2015. — Черв.
14. Physics-based modeling and experimental implications of trap-assisted tunneling in InGaN/GaN light-emitting diodes / M. Mandurrino [та ін.] // physica status solidi (a). — 2015. — Т. 212, № 5. — С. 947—953.
15. Dominance of tunneling current and band filling in InGaN/AlGaN double heterostructure blue light-emitting diodes / J. Casey H. C. [та ін.] // Applied Physics Letters. — 1996. — Трав. — Т. 68, № 20. — С. 2867—2869.
16. Effect of deep-level states on current–voltage characteristics and electroluminescence of blue and UV light-emitting diodes / R. Nana [та ін.] // physica status solidi (a). — 2010. — Т. 207, № 6. — С. 1489—1496.
17. Trap-assisted tunneling in InGaN/GaN single-quantum-well light-emitting diodes / M. Auf der Maur [та ін.] // Applied Physics Letters. — 2014. — Бер. — Т. 105, № 13. — С. 133504.
18. High-power 280 nm AlGaN light-emitting diodes based on an asymmetric single-quantum well / K. Mayes [та ін.] // Applied Physics Letters. — 2004. — Лют. — Т. 84, № 7. — С. 1046—1048.
19. The origin of the high diode-ideality factors in GaInN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes / D. Zhu [та ін.] // Applied Physics Letters. — 2009. — Лют. — Т. 94, № 8. — С. 081113.

20. Malyutenko V., Bolgov S., Podoltsev A. Current crowding effect on the ideality factor and efficiency droop in blue lateral InGaN/GaN light emitting diodes // Applied Physics Letters. — 2010. — Груд. — Т. 97.
21. Зіновчук А., Степанчиков Д., Васильєва Р. Фактор ідеальності в світлодіодах на основі InGaN/GaN квантових ям з неоднорідним розтіканням струму // Фізика та освітні технології. — 2023. — Січ. — № 2. — С. 16—22.
22. Schubert E. F. LED basics: Optical properties // Light-Emitting Diodes. — Cambridge University Press, 2006. — С. 86—100.
23. Internal quantum efficiency of high-brightness AlGaInP light-emitting devices / P. Altieri [та ін.] // Journal of Applied Physics. — 2005. — Жовт. — Т. 98, № 8. — С. 086101.
24. kuşdemir E. Investigation of periodic Mg doping in (0001) (Ga,In)N/GaN superlattices grown on by plasma-assisted molecular beam epitaxy (PAMBE) for hole injection in light emitting diodes : дис. ... док. / kuşdemir Erdi. — 02.2022.
25. Partial Polarization Matching in GaInN-Based Multiple Quantum Well Blue LEDs Using Ternary GaInN Barriers for a Reduced Efficiency Droop / M.-H. Kim [та ін.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. — 2009. — Т. 15, № 4. — С. 1122—1127.
26. Zhuang Z., Iida D., Ohkawa K. InGaN-based red light-emitting diodes: from traditional to micro-LEDs // Japanese Journal of Applied Physics. — 2021. — Груд. — Т. 61, SA. — SA0809.
27. Technologies K. B2900A Series Precision Source/Measure Unit Data Sheet. — <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-02794/data-sheets/5990-7009.pdf>.
28. USA INC ams-OSRAM. GR JTLPS1.23-G7H4-45-1-150-R33. — <https://www.digikey.de/de/products/detail/osram-opto-ams-osram/GR-JTLPS1-23-G7H4-45-1-150-R33/16820467>.

29. USA INC ams-OSRAM. GT JTLPS1.13-KKLN-25-1-150-R33. — <https://www.digikey.de/de/products/detail/osram-opto-ams-osram/GT-JTLPS1-13-KKLN-25-1-150-R33/16820475>.
30. USA INC ams-OSRAM. DG JTLPS1.14-MFN8-25-1-150-R33. — <https://www.digikey.de/de/products/detail/osram-opto-ams-osram/GD-JTLPS1-14-MFN8-25-1-150-R33/16820722>.
31. Thorlabs. Integrating Sphere Power Sensor Head with Silicon Detector S140C. — <https://www.thorlabs.com/drawings/715b5dd3ecda3fdd-ECE7DBEA-FF82-68DC-B0725900A0A22E0F/S140C-SpecSheet.pdf>.
32. Optics O. Flame Miniature Spectrometer. — <https://www.egr.msu.edu/psp/sites/default/files/content/Flame-Manual.pdf>.
33. Abnormal Ideality Factor and LED Noise Correlation / V. Ivanova [та ін.] // IEEE 42nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO). — 2024.

ДОДАТКИ

Додаток А. Код файлу програми macros.py

Лістинг 1: Код файлу програми macros.py

```

1  import pyautogui
2  import numpy as np
3  import keyboard
4  import pyperclip
5  import pyvisa
6  import time
7  import pandas as pd
8
9  # Functions
10 def stop_loop():
11     global running
12     running = False
13
14
15 def coeff(s):
16     c = s[-2]
17     n = float(s[:-2])
18     if c == "p":
19         n = round(n * 10 ** -12, 18)
20     elif c == "n":
21         n = round(n * 10 ** -9, 15)
22     elif c == "u":
23         n = round(n * 10 ** -6, 12)
24     elif c == "m":
25         n = round(n * 10 ** -3, 9)
26     else:
27         n = round(n, 6)
28     return (n)
29
30
31 keyboard.add_hotkey('esc', stop_loop)
32 running = True
33
34 # Meaning of current
35 array4 = np.arange(4e-4, 4e-5, -(4e-4-4e-5)/100)
36 array5 = np.arange(3e-3, 3e-4, -(3e-3-3e-4)/100)
37 array6 = np.arange(2e-2, 2e-3, -(2e-2-2e-3)/100)
38 array7 = np.arange(1e-1, 1e-2, -(1e-1-1e-2)/100)
39 array = np.concatenate((array7, array6, array5, array4))
40 array = [round(x, 13) for x in array]
41 array = [str(x) for x in array]
42 add = ":sour:curr"
43 current = [add + "_" + i for i in array]
44 print(array)
45 print(len(array))
46
47 # Connect to the instrument
48 rm = pyvisa.ResourceManager()
49 adress = 'name::resource'
50 inst = rm.open_resource(adress)
51 inst.write("*RST")
52 inst.write(":sour:func:mode_curr")
53 inst.write(":sens:volt:prot_5")
54 inst.write(":sens:rem_on")
55
56 cur = np.empty((0, 0))
57 crrnt = np.empty((0, 0))

```

```

58 vlt = np.empty((0, 0))
59 volt = np.empty((0, 0))
60 a = np.empty((0, 0))
61 intense = np.empty((0, 0))
62 count = 0
63
64 #pyautogui.click(350, 1075) # laptop
65 pyautogui.click(280, 1075) # computer
66 time.sleep(0.5)
67 #pyautogui.click(400, 1075) # laptop
68 pyautogui.click(330, 1075) #computer
69 time.sleep(0.5)
70 pyautogui.hotkey('alt', 'tab')
71 while running:
72     if count >= 1:
73         break
74     for i in current:
75         for j in range(20):
76             inst.write(i)
77             I = inst.query(":meas:curr?")
78             I = float(I[:-1])
79             U = inst.query(":meas:volt?")
80             U = float(U[:-2])
81             crrnt = np.append(crrnt, I)
82             vlt = np.append(vlt, U)
83             pyautogui.doubleClick(320, 140) # computer
84             #pyautogui.doubleClick(340, 180) #laptop
85             pyautogui.hotkey('ctrl', 'c')
86             time.sleep(0.001)
87             s = pyperclip.paste()
88             n = coeff(s)
89             a = np.append(a, n)
90             time.sleep(0.001)
91         cur = np.append(cur, np.mean(crrnt))
92         volt = np.append(volt, np.mean(vlt))
93         intense = np.append(intense, np.mean(a))
94         crrnt = np.delete(crrnt, np.s_[:])
95         vlt = np.delete(vlt, np.s_[:])
96         a = np.delete(a, np.s_[:])
97         time.sleep(0.01)
98         pyautogui.hotkey('alt', 'tab')
99         pyautogui.moveTo(220, 395, 0.5) # computer
100        #pyautogui.moveTo(220, 370, 0.5) # laptop
101        pyautogui.click()
102        pyautogui.moveTo(930, 150, 2) # computer
103        #pyautogui.moveTo(900, 150, 0.5) # laptop
104        pyautogui.click()
105        time.sleep(0.01)
106        pyautogui.hotkey('alt', 'tab')
107        time.sleep(0.01)
108        count = count + 1
109    with pyautogui.hold('alt'):
110        pyautogui.press(['tab', 'tab'])
111    Intensity = [round(x, 10) for x in intense]
112    Current = [round(x, 7) for x in cur]
113    Voltage = [round(x, 7) for x in volt]
114
115    tbl = {'Current': Current, 'Voltage': Voltage, 'Intensity': Intensity}
116    table = pd.DataFrame(tbl)
117    print(table)
118    table.to_csv("Filename", sep = ",", encoding = "utf-8", header = True)

```