

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра  
**ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ**  
**СВІТЛОДІОДНИХ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**  
спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр. ЕП.м-12

Д. М. Панченко

Науковий керівник

д-р фіз.-мат. наук, професор

Л. В. Олександров

Завідувач кафедри

д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми - 2022

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики  
Спеціальність 171 – Електроніка, освітня програма  
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«07» грудня 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Панченко Дмитро Миколайович

1. Тема роботи Фізико-технічні основи функціонування світлодіодних електронних систем

затверджена наказом по університету від «14» листопада 2022 р., №1067-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 20 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета): Світлодіоди – малоінерційні напівпровідникові джерела випромінювання, які працюють при прямій напрузі; застосовують як фотореле, у різноманітних сенсорах, входять до складу оптронів, лазерні діоди. Сучасні світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі від інфрачервоної до близького ультрафіолету, існують методи поширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів. Мета роботи полягає у вивченні питань стосовно фізичних основ роботи та конструктивно-технологічних особливостей світловипромінювальних діодів і електронних систем на їх основі; вимірюванні та моделюванні робочих характеристик світлодіодів різних типоміналів для визначення найбільш ефективних у певному діапазоні спектра.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Фізико-технічні особливості світлодіодів на електронних систем на їх основі.

2. Робочі параметри і характеристики джерел світлового випромінювання.

3. Методи і техніка проведення вимірювань.

4. Моделювання характеристик світлодіодів з використанням програмного симулятора Multisim. Порівняння результатів вимірювання і моделювання.

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

Слайди № 1-5: Мета, задачі; літературний огляд стосовно фізичних принципів роботи, конструкції, сучасних типів світлодіодів та електронних систем на їх основі.

Слайди № 6-8: Методика і техніка вимірювань з використанням лабораторного стенду.

Слайди № 9-11: Результати вимірювань та моделювання.

Слайд № 12: Висновки.

6. Дата видачі завдання 07.12.2022 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних стосовно фізичних принципів роботи, конструкції, сучасних типів світлодіодів та електронних систем на їх основі.	до 10.12.2022 р.	<i>виконано</i>
2.	Методика і техніка вимірювань з використанням лабораторного стенду.	до 14.12.2022 р.	<i>виконано</i>
3.	Моделювання характеристик світлодіодів.	до 17.12.2022 р.	<i>виконано</i>
4.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 20.12.2022 р.	<i>виконано</i>
5.	Попередній захист роботи	21.12.2022 р., 11 <sup>30</sup>	<i>виконано</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	28.12.2022 р., 09 <sup>00</sup>	

Здобувач \_\_\_\_\_ Панченко Д.М.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Однодворець Л.В.

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної магістерської роботи є фізико-технічні основи функціонування світлодіодних електронних систем.

Мета роботи полягала у вивченні питань стосовно фізичних основ роботи та конструктивно-технологічних особливостей світловипромінювальних діодів і електронних систем на їх основі; вимірюванні та моделюванні робочих характеристик світлодіодів різних типономіналів для визначення найбільш ефективних у певному діапазоні спектра.

На основі аналізу літературних даних показано, що колір світлодіода та довжина хвилі випромінювання змінюється залежно від використовуваних матеріалів та зі зростанням прямого струму потік випромінювання та сила світла збільшуються що приводить до збудження ефекту насичення та спаду яскравості випромінювання.

Узагальнення результатів вимірювань вольт-амперних характеристик світловипромінюючих діодів як елементів електронних систем вказує на те, що при зростанні напруги від 2,0 до 3,0 В величина прямого струму експоненціально зростає від 0 до 5,80 – 6,50 мА (СД зеленого, білого, блакитного і синього кольорів світіння) та від 0 до 2,72 мА (СД червоного кольору світіння). З використанням симулятора Multisim 14.2. проведене моделювання схемотехнічних рішень для дослідження вольт-амперних характеристики світлодіодів та визначення залежності яскравості світлодіодів від зовнішньої напруги на р-n-переході.

Робота викладена на 33 сторінках і складається з трьох розділів, містить 16 рисунків та 2 таблиці, список використаних джерел із 20 найменувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИЙ ДІОД, ЕЛЕКТРОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ, СПЕКТР ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЯСКРАВІСТЬ, ШИРИНА ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНА, ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА.

## ЗМІСТ

	С.
<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ І. ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ ТА ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ НА ЇХ ОСНОВІ</b> .....	6
1.1. Принцип дії світлодіодів.....	6
1.1.1. Загальні поняття.....	6
1.1.2. Процес випромінювання світла.....	9
1.2. Типи випромінювання та спектральні характеристики.....	14
1.2.1. Випромінювання за спектром.....	14
1.2.2. Робочі характеристики та структурні особливості.....	17
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ</b> .....	21
2.1. Похідні величини та ВАХ світлодіодів.....	21
2.2. Результати вимірювань ВАХ світлодіодів.....	23
2.3. Функціональне призначення та параметри світлодіодів.....	24
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ</b> .....	26
3.1. Результати вимірювань.....	26
3.2. Моделювання ВАХ та відношення яскравості.....	28
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	31
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	32

## ВСТУП

Покращення робочих характеристик світлодіодів та інших твердотільних джерел освітлення за останні кілька років спричинили суттєвий прогрес в галузі оптоелектроніки та волоконної оптики. Поліпшення вихідних характеристик та операційної ефективності, а також інновації в серійному виробництві призвели до цінової конкуренції, що в поєднанні з тривалим терміном експлуатації та надійністю зробили світлодіодні системи потенційним вибором для наступного покоління освітлювальних систем.

Світло, що випромінює світлодіод (СД), лежить у вузькому діапазоні спектру, тобто світлодіод спочатку випромінює практично монохроматичне світло (якщо мова йде про видимий діапазон), на відміну від лампи, яка випромінює більш широкий спектр, коли певний колір світіння можна отримати лише застосуванням світлофільтра. Спектральний діапазон випромінювання СД найбільшою мірою залежить від типу і хімічного складу напівпровідників та ширини забороненої зони.

Використання світлодіодів, стрічок, матриць та транспарантів на їх основі як сучасних енергоефективних джерел випромінювання дало змогу забезпечити терморегулювання і виробництво ефективних оптичних систем, розробити нові високотехнологічні системи і сформувавши ринок світлодіодного освітлення.

Вирішення проблем освітлення можуть серйозно вплинути на подальший розвитку та практичне використання на споживчих ринках необхідних компонентів щодо розробки нових нетоксичних та стабільних люмінесцентних матеріалів, а також їх застосування у світлодіодних електронних системах. Електричні характеристики використовують для розрахунку вторинного джерела живлення та способу комутації світлодіодних приладів [1-4].

Мета роботи полягала у вивченні питань стосовно фізичних основ роботи та конструктивно-технологічних особливостей світловипромінювальних діодів і електронних систем на їх основі; вимірюванні та моделюванні робочих характеристик світлодіодів різних типоміналів для визначення найбільш ефективних у певному діапазоні спектра.

# РОЗДІЛ 1.

## ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ ТА ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ НА ЇХ ОСНОВІ

### 1.1. Принцип дії світлодіодів

#### 1.1.1. Загальні поняття

Світлодіодом (СД) називається напівпровідниковий діод, призначений для перетворення електричної енергії на енергію некогерентного світлового випромінювання. Коли через діод протікає постійний струм проходить інжекція неосновних носіїв заряду (електронів або дірок) в діодну структуру. На рисунку 1.1 зображено світловипромінювальний діод.

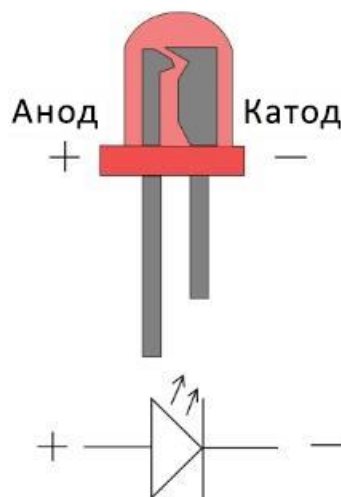


Рисунок 1.1 – Світловипромінювальний діод [1]

Світлодіод працює на основі р-п-переходу, в якому напівпровідники р- і п-типу вступають у контакт і змінюють свою провідність на протилежну. Електрони п-типу містять електрони провідності як носії заряду. Напівпровідник р-типу містить позитивні носії заряду дірки. Анод р-типу - позитивний, а катод п-типу - негативний. Зовнішні поверхні катода й анода мають металеві контактні поверхні, до яких припаяні провідники. Коли до анода прикладається позитивний заряд, а до катода - негативний, в р-п переході між кристалом і катодом проходить струм. Під

час легування (електронного обміну) відбувається обмін електронами в дірково-електронному переході. Якщо до матеріалу n-типу прикладена негативна напруга, то це призводить до прямого зміщення. Під час рекомбінації (обміну) енергія вивільняється у вигляді фотонів.

Підключення до р-n переходу постійної напругу певної величини та полярності, викликає у переході електричний струм у вигляді зустрічного потоку носіїв електричного заряду дірок позитивно заряджених та електронів негативно заряджених. При зустрічі цих потоків у р-n-переході відбувається їхня рекомбінація або злиття. У дірку потрапляє вільний електрон із підвищеною енергією, і вона зникає. На рисунку 1.2 наведено схему р-n переходу СД [2].

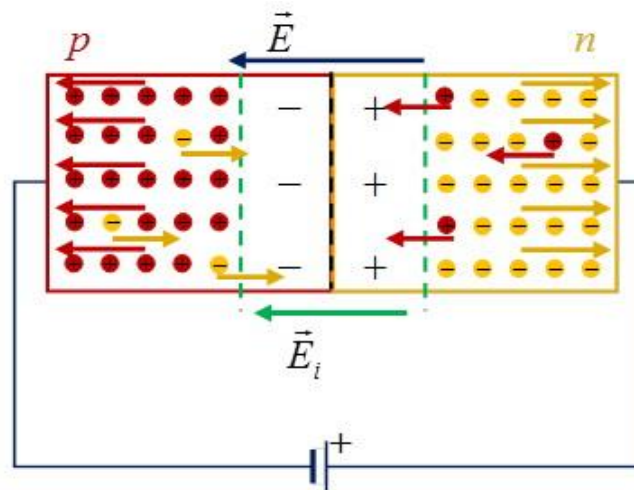


Рисунок 1.2 – Схема р-n переходу світлодіода [3]

Праворуч знаходиться n-напівпровідникова частина кристала, яка заповнена вільними електронами, а ліворуч - р-напівпровідникова частина з позитивними частинками - дірками.

Енергія вивільняється у вигляді світлових квантів. Вони емітуються, тобто випромінюються з торця кристала. Потік квантів потрапляє на рефлектор. Його блискуча поверхня відбиває світло в потрібному напрямку. Особливість конфігурації поверхні полягає в тому, що вона формує бажану діаграму спрямованості світлового потоку. Перехідна напруга живлення подається позитивно на анод діода і негативно на катод.

Світлодіод - це напівпровідникове джерело світла, або діод з р-n-переходом



який випромінює світло під час активації. При подачі відповідної напруги електрони можуть рекомбінувати з електронними дірками всередині пристрою, вивільняючи енергію у вигляді фотонів. Цей ефект називається електролюмінесценцією, а колір світла відповідний енергії фотона визначається енергетичним зазором напівпровідника [4].

Основні параметри світлодіодів: яскравість – відношення сили світла до площини поверхні, що світиться ( $10\text{--}1\,000$  Кд на  $\text{см}^2$ ); постійна пряма напруга ( $2\text{--}3$  В); колір світіння й довжина хвилі, які відповідають максимальному світловому потоку; максимальний постійний прямий струм ( $1\text{--}10$  мА); діапазон температур довкілля, за яких світлодіод може нормально функціонувати ( $-60\text{--}(+70)$  °С); швидкодія ( $10^{-8}$  с).

Світловипромінювальні діоди є основою більш складних електронних систем:

- лінійної світлодіодної шкали – інтегральної мікросхеми із від 5 до 100 світлодіодних структур (сегментів), розміщених послідовно, використовуваної для відображення інформації, що постійно змінюється;

- цифро-літерного світлодіодного індикатора – інтегральної мікросхеми з декількох діодних структур, розміщених так, щоб за відповідної комбінації сегментів одержувалося зображення літери або цифри;

- світлодіодної матриці – електронної системи одержання складних зображень (до її складу входять до  $10^4$  світлодіодів).

Матеріал, який використовують у світлодіодах, в основному являє собою арсенід галію алюмінію (AlGaAs). У вихідному стані атоми цього матеріалу щільно пов'язані один з одним. Без вільних електронів провідність стає неможливою.

Домішки у вигляді додаткових атомів можуть вводити в систему вільні електрони n-тип або витягати деякі з наявних електронів з атомів p-тип, створюючи дірки на атомних орбіталях. В обох випадках збільшується провідність матеріалу. Тому електрони можуть рухатись від анода позитивний заряд до катода негативний заряд під дією електричного струму в матеріалі n-типу і навпаки в матеріалі p-типу. Через властивості напівпровідника струм ніколи не проходить в протилежних

напрямках, що відповідає рівню провідності. Інтенсивність світла, випромінюваного світлодіодом, залежить від енергетичного рівня фотонів, що випромінюються, який, відповідно залежить від енергії, що виділяється електронами, які рухаються між атомними границями напівпровідникового матеріалу [3].

Світло, що випромінюється світлодіодом, перебуває у вузькому діапазоні спектра. Інакше кажучи, кристал спочатку випромінює певний колір, на відміну від лампи, випромінює ширший спектр і де бажаного кольору можна досягти тільки за допомогою зовнішнього світлофільтра. Діапазон випромінювання світлодіоду залежить від хімічного складу використовуваного напівпровідника.

Світлодіоди є дуже чутливими пристроями, і струм, що протікає через світлодіод дуже важливий. Крім того, яскравість світлодіоду залежить від споживаного ним струму. Кожен світлодіод має максимальний прохідний струм, який забезпечує стабільну роботу пристрою [5].

### 1.1.2. Процес випромінювання світла

Відповідно до характеристики p-n-перехід напівпровідника підключений до джерела постійної напруги залежно від полярності. У контактному шарі між матеріалами p- і n-типу починають рухатися вільні електрони з негативним зарядом і дірки з позитивним знаком. Ці частинки рухаються до полюсів і притягуються ними.

У перехідному шарі відбувається рекомбінація зарядів. Електрони переходять зі зони провідності у валентну зону, долаючи рівень Фермі. На рис. 1.3 наведено схематичне зображення процесу випромінювання світла напівпровідником [5]. Таким чином, частина енергії вивільняється під час випромінювання світлових хвиль з різним спектром і яскравістю. Частота і передача кольору хвилі залежать від типу використаного матеріалу, що утворює p-n-перехід.

Корисним компонентом струму, що забезпечує випромінювальну рекомбінацію в p-області, є електронний струм  $I_n$  інжектований емітером.

Ефективність інжекції визначається тим, наскільки струм величина  $I_n$  відрізняється від повного струму  $I$  і характеризується коефіцієнтом  $\gamma$  (2.1):

$$\gamma = \frac{I_n}{I} = \frac{I_n}{(I_n + I_p + I_{рек} + I_{тун} + I_{нов})}, \quad (2.1)$$

де  $I_p$  – дірковий струм, обумовлений інжекцією дірок у n-області;

$I_{рек}$  – струм рекомбінації в області р – n-переходу;

$I_{тун}$  – тунельний струм, обумовлений просочуванням носіїв крізь потенційний бар'єр;

$I_{нов}$  – поверхневий струм витоку по поверхні р – n-переходу.

Інжектвані в р-область електрони рекомбінують в ній поблизу р- n-переходу, одночасно з цим проходить процес рекомбінації, який забезпечує генерацію оптичного випромінювання, існують механізми без випромінювальної рекомбінації, що призводить до втрати властивості випромінювання матеріалу.

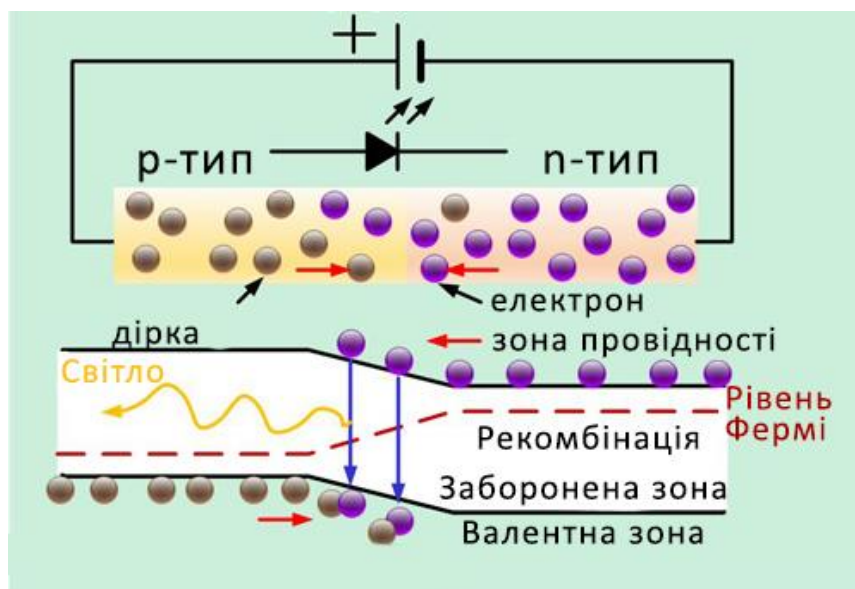


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення процесу випромінювання світла напівпровідником [6]

Ця технічна проблема може бути вирішена кількома способами. Один із них - нашарування р-n-переходів для формування складних гетероструктур. Зі збільшенням напруги напівпровідниковий шар зростає, і світловий потік збільшується, так що більше зарядів досягає зони рекомбінації за одиницю часу. Одночасно відбувається нагрівання струмопровідних елементів. Це важливо для матеріалів і речовин у р-n-переході. Однак більш високі температури можуть пошкодити або знищити їх.

У світлодіодах енергія струму перетворюється безпосередньо на світло без додаткових процесів. У цьому разі тепло, що виділяється струмоведучими елементами невелике, тому втрата корисної потужності незначна. Однак їх можна використовувати тільки в тому разі, якщо сама конструкція захищена, або виконана з термостійких матеріалів. Рекомбінація приводить до нерівномірного світлового потоку. Зазвичай це характеризується параметром квантового виходу, тобто кількістю світлових квантів, що випускаються на одну рекомбіновану пару зарядів. Це явище характеризується двома процесами: всередині самого напівпровідникового переходу та зовні всієї структури світлодіоду [7].

На першому етапі квантовий вихід правильно реалізованого монокристала може досягати значень, близьких ідеальних. Однак для досягнення цього значення потрібні великі струми і потужний тепловідвід.

Коли високоенергетичний електрон падає на низькоенергетичну орбіту в дірці, він повинен якось втратити надлишкову енергію, і в цьому випадку енергія випромінюється у вигляді фотона, основної одиниці світла. Різниця в енергетичних рівнях або висота падіння рівнів або висота падіння, визначатиме енергію фотона, і чим вища енергія цього фотона, тим вища частота світла.

Усередині джерела світла частина світла від другого рівня розсіюється і поглинається елементами конструкції, що знижує загальну ефективність випромінювання. У цьому випадку максимальна квантова ефективність значно нижча. Ефективність червоних світлодіодів становить трохи більше 55 %, а синіх - ще менше, 35 %.

Падіння постійної напруги на р-n-переході, яке спричиняє номінальний струм

світлодіоду, залежить від напруги, прикладеної до світлодіоду, причому анод має більш позитивний потенціал ніж катод, а величина падіння напруги на переході залежить від хімічного складу напівпровідника і довжини хвилі оптичного випромінювання.

Енергія забороненої зони зростає зі зменшенням розмірності. Колір світла, яке випромінюється, безпосередньо пов'язаний з її розміром, більший розмір призводить до більш великих хвиль, нижчі частоти і червоне світло, в той час як менший розмір випромінює коротші довжини і червоне світло.

Зазвичай індикаторний світлодіод виконують в корпусі з епоксидного матеріалу діаметром 5 мм та двома контактами для підключення до ланцюгів електричного струму анодом та катодом. Візуально вони відрізняються довжиною. В загальному випадку конструктивно катод виконується коротшим. На рисунку 1.4 зображена конструкція світлодіоду [8].

Світлодіод складається з таких частин: анод, яким подається позитивна напівхвиля на кристал; катод, яким подається негативна напівхвиля на кристал; рефлектор; кристал напівпровідника; розсіювач.

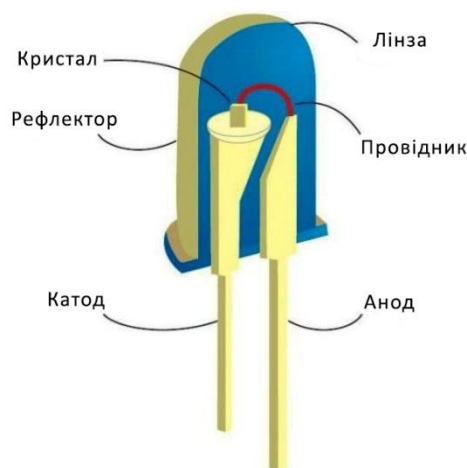


Рисунок 1.4 – Конструкція світлодіоду [8]

Люмінесцентні активні напівпровідникові монокристали мають прямокутну форму. Вони розташовуються біля параболічного відбивача світла з алюмінієвого сплаву, встановленого на підкладці з діелектричними властивостями.

На кінці прозорого пластикового корпусу виготовленого з полімерних матеріалів знаходиться лінза, яка фокусує світловий промінь. Разом з рефлектором вона утворює оптичну систему, яка формує кут нахилу світлового променя.

Така властивість характеризується діаграмою спрямованості променю світлодіодів. Алюмінієві або латунні компоненти іноді розміщуються в нижній частині корпусу в якості тепловідводу для відведення тепла, що генерується джерелом живлення. Цей тип конструкцій зараз широко використовується. На цій основі виготовляються інші напівпровідникові джерела світла з різноманітними конструктивними елементами [9].

Великий ефект підвищення ефективності рекомбінації досягається при побудові емісійного шару, так що електрони і дірки можуть переміщатися безпосередньо з поверхонь електронно-транспортного шару.

На відміну від звичайних сигнальних діодів, які виготовляються для виявлення або випрямлення потужності, і які виготовляються з германієвих або кремнієвих напівпровідникових матеріалів, світлодіоди виготовляються з екзотичних напівпровідникових сполук, таких як арсенід галію (GaAs), фосфід галію (GaP), фосфід арсеніду галію (GaAsP), карбід кремнію (SiC) або нітрид галію-індію (GaInN), які змішуються між собою в різних співвідношеннях, створюючи колір з різною довжиною хвилі.

Особливості світлодіодів необхідно враховувати при його проектуванні, оскільки він є одночасно електронним і оптичним пристроєм. Бажані оптичні властивості, такі як колір, яскравість і ефективність, повинні бути оптимізовані без необґрунтованої електричної або фізичної конструкції [7]. В таблиці 1.1 наведено відповідність кольору до довжини хвилі напруги та матеріалу.

Різні сполуки світлодіодів випромінюють світло в певних областях спектру видимого світла і, отже, створюють різні рівні інтенсивності. Точний вибір використовуваного напівпровідникового матеріалу визначає загальну довжину хвилі випромінювання фотонів світла і колір випромінюваного світла [9].

Таблиця 1.1 – Відповідність кольору до довжини хвилі, напруги та матеріалу

Колір світіння	Довжина хвилі, нм	Напруга, V	Матеріал напівпровідника
Інфрачервоний	> 760	< 1.9	GaAs, AlGaAs
Червоний	610-760	1.63-2.03	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP
Помаранчевий	590-610	2.03-2.10	GaAsP, AlGaInP, GaP
Жовтий	570-590	2.10-2.18	GaAsP, AlGaInP, GaP
Зелений	500-570	1.9-4.0	InGaN / GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP
Синій	450-500	2.48-3.7	ZnSe, InGaN, SiC, Si
Фіолетовий	400-450	2.76-4.0	InGaN
Пурпурний	Декілька видів	2.48-3.7	Подвійні сині/червоні світлодіоди
Ультрафіолетовий	< 400	3.1-4.4	Алмаз (235 нм). Нітрид бору (215 нм). AlN, AlGaN, AlGaInN
Білий	Широкий спектр	3.5	Синій/УФ діод з жовтим люмінофором

## 1.2. Типи випромінювання та спектральні характеристики

### 1.2.1. Випромінювання за спектром

В основі роботи RGB світлодіодів лежить оптичний ефект змішування трьох основних компонентів палітри для створення різних відтінків кольору, три кристали об'єднані в єдину матрицю. За наявності спільного катода або анода можна реалізувати різні модифікації для використання в різних умовах. Цей метод освітлення найчастіше використовують для вивісок, прикрас тощо. Принцип роботи цих світлодіодів такий самий, як і у звичайних світлодіодів. Однак ця

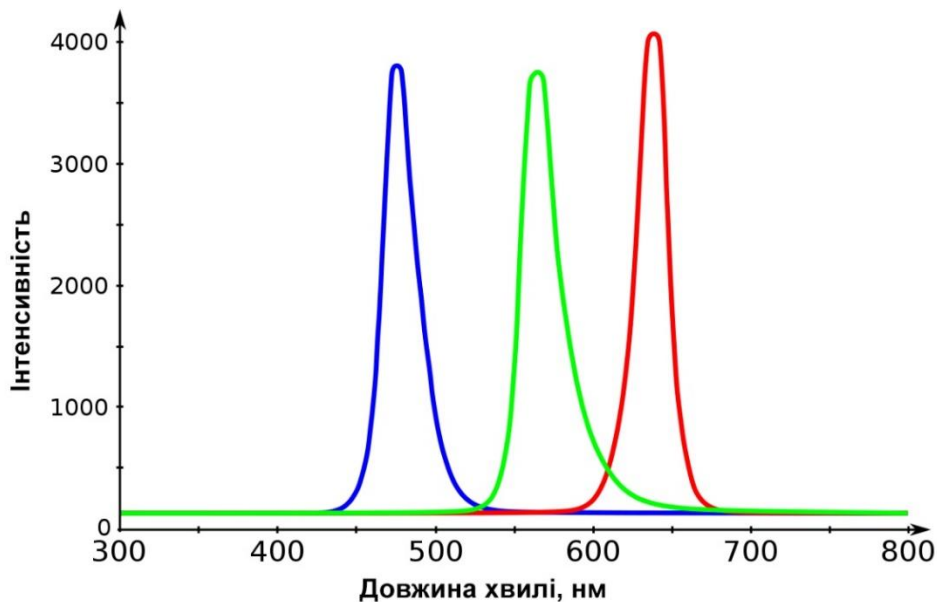


Рисунок 1.5 - Комбіновані спектральні криві СД високої яскравості [9]

конструктивна особливість збільшує кінцеву вартість виробу і ускладнює підключення схеми до електромережі. На рисунку 1.5 зображено комбіновані спектральні криві світлодіодів високої яскравості [8].

Оскільки багатоколірні RGB-світлодіоди вимагають точного балансу яскравості випромінювальних кристалів кожного кольору для досягнення чистого білого кольору, в RGB-діод додається четвертий білий випромінювальний кристал для відтворення білого кольору і збільшення варіативності колірного ефекту. У цьому разі світлодіодами керують сигналом із позитивною полярністю на аноді та імпульсом із негативною полярністю на катоді; третій варіант допускає будь-які варіації перемикування і зазвичай постачається у вигляді SMD-компонента. На наступному рисунку 2.2 показані приблизні криві кожного кольору між напругою і струмом [7].

Інфрачервоні світлодіоди - це спеціальні світлодіоди, що випромінюють інфрачервоне випромінювання в діапазоні від 700 до 1 мм. Ці світлодіоди можуть випромінювати інфрачервоне випромінювання в різних довжинах хвиль, як і інші світлодіоди, що випромінюють світло різних кольорів і зазвичай виготовляються з



арсеніду галію або арсеніду алюмінію. Зовнішній вигляд інфрачервоного світлодіода схожий на зовнішній вигляд звичайного світлодіода. Людське око не бачить інфрачервоного випромінювання і тому не може визначити, працює світлодіод чи ні [9].

Випромінювання інфрачервоних світлодіодів має модулюватися під час використання в електронних пристроях, щоб уникнути помилкових спрацьовувань. Модуляція робить сигнал від інфрачервоного світлодіода вищим за шум. В інфрачервоних світлодіодах використовують розсіювачі, непрозорі для видимого світла, але прозорі для інфрачервоного світла. Широке використання інфрачервоних світлодіодів у системах дистанційного керування та охоронної сигналізації призвело до різкого зниження ринкової ціни.

Кожен світлодіод перевіряється на робочі характеристики, коли він прикріплений до дроту. Конкретні рівні струму повинні давати конкретну яскравість. Точний колір світла перевіряється для кожної партії пластин, а деякі світлодіоди проходять спеціалізовані перевірки [10].

Ультрафіолетове випромінювання - це невидима електромагнітна хвиля, що займає діапазон довжин хвиль нижче видимого світла, між видимим світлом і рентгенівськими променями. Принцип роботи світлодіодів для такого випромінювання здебільшого такий самий, як і у звичайних світловипромінювальних діодів (вони випромінюють світло під дією постійного струму), але вони відрізняються використанням спеціальних добавок, таких як арсенід галію, алюміній і нітрид індію. Готові світлодіоди мають спектр випромінювання між 100 і 400 нм (так званий квазіультрафіолетовий діапазон), довжина хвилі якого залежить від напівпровідникового матеріалу ультрафіолетове випромінювання названо на честь фіолетового відтінку видимого світла, але більшість ультрафіолетових променів невидимі для людського ока [8].

Спектральні діапазони UVC і UVB в основному використовують для стерилізації та дезінфекції. Світло, що випромінюється на цих довжинах хвиль, шкідливе не тільки для мікроорганізмів, а й для людей та інших живих істот з якими воно вступає в контакт.

Близькі до інфрачервоного спектру випромінювання діоди на основі оброблених розчином напівпровідників, таких як органіка, галогенідні перовськіти та колоїдні квантові точки, стали життєздатною технологічною платформою для біомедичних застосувань, нічного бачення, спостереження та оптичного зв'язку. Відсоток носіїв буде рекомбінують в результаті випромінювального процесу, в якому енергія рекомбінації дірки-електрона енергія рекомбінації дірки-електрона вивільняється у вигляді фотона світла. Кількість світла, що генерується, або вихідна потужність світлодіоду, змінюється майже лінійно з прямим струмом [9].

### 1.2.2. Робочі характеристики та структурні особливості

Параметри СД такі як малі габарити, тривалий термін експлуатації, низьке енергоспоживання, сумісність з інтегрованими мікросхемами і відносно низька вартість роблять їх ефективним джерелом світла в багатьох сферах застосування.

Недивлячись на це, залишаються проблеми в досягненні високого рівня випромінювання, зменшенні спаду ефективності і продовженні терміну експлуатації. На рисунку 1.6 наведені основні характеристики світлодіодів [11].

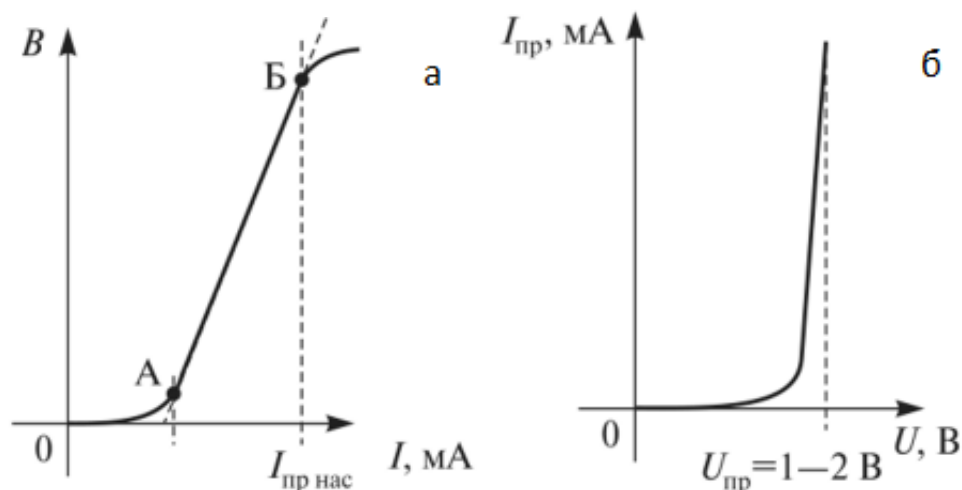


Рисунок 1.6 – Основні характеристики світлодіодів: а – яскравісна; б - вольт-амперна. Із роботи [11]

Вольт-амперна характеристика світлодіоду аналогічна характеристикам звичайного випрямляючого діода при прямому зміщенні. Постійна напруга прямого зміщення світлодіоду становить 1-2В, а максимальний прямий струм - в залежності від типу світлодіодів 10-100 мА. Допустима напруга зворотного зміщення невелика і становить 3-7 В. Слід зазначити, що світлодіоди не розраховані на роботу під напругою зворотного зміщення.

Зі зростанням прямого струму потік випромінювання та сила світла збільшуються, а потім відбувається ефект насичення та спад яскравості випромінювання. Нелінійна початкова ділянка  $OA$  характеризується низькою вихідною яскравістю. Через малу кількість рекомбінованих електронів яскравість незначна, а нелінійність пояснюється нерівністю інжектованих та рекомбінованих електронів.

Така нерівність виникає через те, що частина електронів беруть участь у точковій компенсації нерухомих зарядів потенційного бар'єру, що призводить до руйнування потенційного бар'єру в наслідок чого лінійна ділянка  $AB$  відповідає рівності інжектованих та рекомбінованих зарядів і починається з порогового струму, який у світлодіодах різних типів знаходиться в інтервалі  $01-25$  мА [10].

Розуміння взаємозв'язку між структурою матеріалів і фотофізичними властивостями дозволило розробити ефективні випромінювачі, що призвели до створення пристроїв із зовнішньою квантовою ефективністю, яка перевищує 20%. Завдяки таким властивостям світлодіоди можуть виробляти інфрачервоне світло різної довжини хвилі, так само як різні світлодіоди виробляють світло різних кольорів.

При деякому значенні прямого струму  $I_{пр\ наc}$  спостерігається максимум випромінювання (точка  $B$ ) і при подальшому збільшенні  $I_{пр}$  випромінювання знижується, так як виникає ударна генерація носіїв зарядів і зменшується ширина забороненої зони, що часто призводить до зменшення енергії забороненої зони.

Можливість попадання електронів в зону провідності збільшується, що в свою чергу спричиняє можливість появи світлового ефекту а рекомбінація у валентній зоні зменшується.

Органічні світловипромінюючі діоди або OLED - це монолітні, твердотільні пристрої, які зазвичай складаються з ряду органічних тонких плівок, затиснутих між двома тонкоплівковими провідними електродами. На рисунку 1.7 показано конструкцію OLED [6].

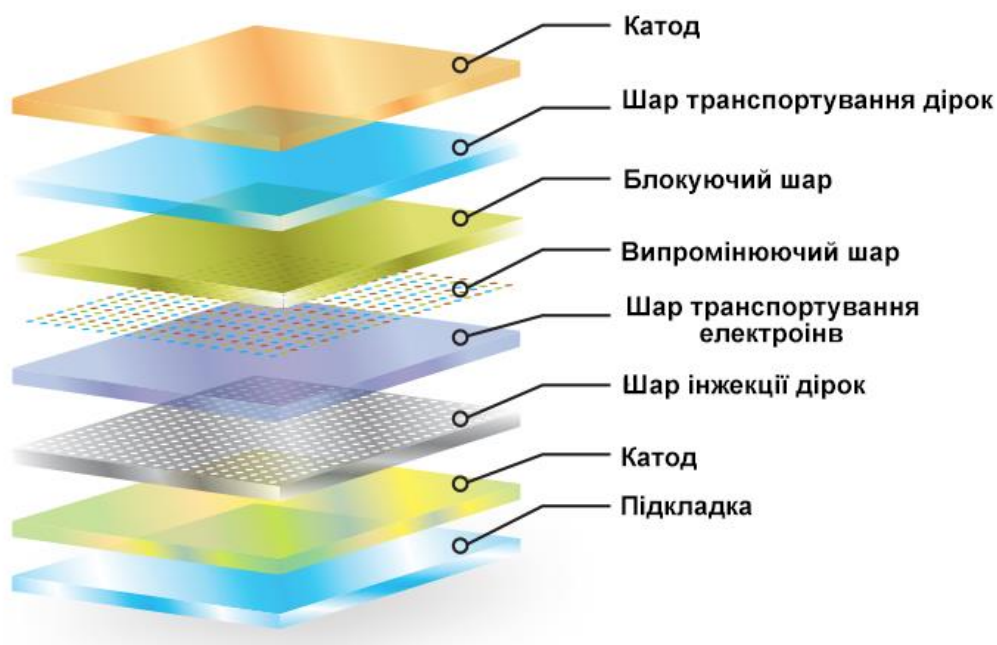


Рисунок 1.7 – Конструкція OLED світлодіодів. Адаптовано із роботи [12]

Такий різновид СД роблять з випромінюючим електролюмінесцентним шаром, виготовленим з органічних сполук. Шар зазвичай виготовляється з полімерів, які випромінюють червоне, зелене або синє світло при подачі напруги. Такі світлодіодні лампи є невидимі для людського ока тому вони завжди мають бути екрановані. Вплив цих хвиль може призвести до раку шкіри і тимчасової або постійної втрати або пошкодження зору.

При подачі струму на OLED під дією електричного поля носії заряду (дірки і електрони) мігрують з електродів в органічні тонкі плівки до тих пір, поки вони не рекомбінують в емісійній зоні, утворюючи екситони. Після утворення ці екситони, або збуджені стани, релаксуються до більш низького енергетичного рівня, випромінюючи світло (електролюмінесценція) та виділяють небажане тепло. До

сих пір такі OLED-дисплеї використовували переважно як монохромні дисплеї. Недоліком цих кольорових OLED є те, що час роботи залежить від типу кольорової плівки. Вона становить щонайменше 12-15 тисяч годин [14].

Як елемент нових оптоелектронних і фотонних приладів OLED збираються, як правило, між трьома і більше органічними молекулами матеріалів, де така конфігурація складається з шару інжекції електронів і випромінюючого шару. У зв'язку з цим, відносно слабкий характер сил відіграє роль у системі зв'язку органічних приладів, в яких виготовляються низькомолекулярні OLED, осаджені у вакуумі на підкладки з плівки.

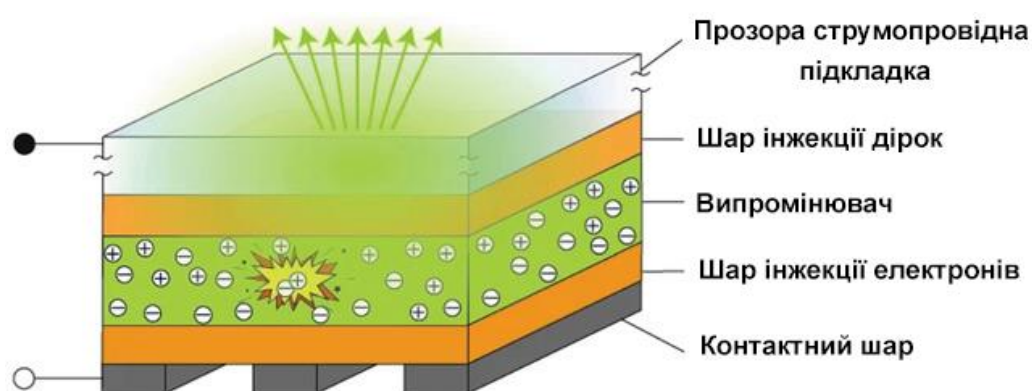


Рисунок 1.8 – Схематична структура світлодіодів з перовськіту [13]

На заміну світлодіодів зі звичними напівпровідниками вже приходять органічні світлодіоди та світлодіоди з перовськіту. На рисунку 1.8 наведено схематичну структуру світлодіодів з перовськіту. Їх малі габарити, тривалий термін експлуатації, низьке енергоспоживання, сумісність з твердотільними накопичувачами схемотехнікою і відносно низька вартість роблять світлодіоди кращим джерелом світла джерелом світла в багатьох сферах застосування.

Інженери дослідницького центру Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) досягли ефективності 29,8% у тандемного сонячного елемента з основою з кристалічного кремнію та шаром з перовськіту (галогеніду металу) [13].

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 2.1. Вольт-амперні характеристики світлодіодів

Вольт-амперна характеристика світлодіода показує взаємозв'язок між прикладеною напругою та струмом світлодіода. На рисунку 2.1 наведено пряму вольт – амперну характеристику.

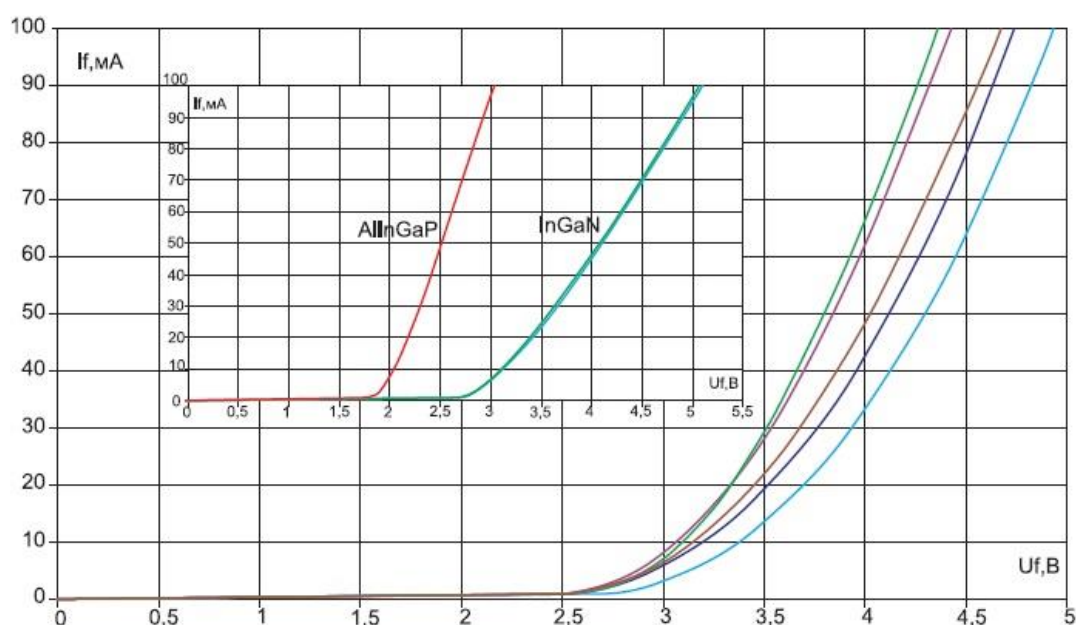


Рисунок 2.1 - Пряма вольт-амперна характеристика  $I_f/(U_f)$ . Адаптовано із [16]

Пряма вольт-амперна характеристика показує динаміку прямого струму зі зміною напруги при прямій поляризації світлодіода. Її використовують для розрахунку динамічних характеристик пристроїв керування та живлення світлодіодів і, разом із  $P(T_a)$  або  $P(I_f)$ , для розрахунку характеристик освітлення під час зміни заданих електричних характеристик.

Світлодіоди як поверхневі випромінювачі мають корпус з пластиковими куполами. Конструктивно вони виконуються методом плоского поверхневого монтажу, основні галузі застосування: волоконно-оптичні лінії зв'язку надвипромінюючі або суперлюмінесцентні пристрої.

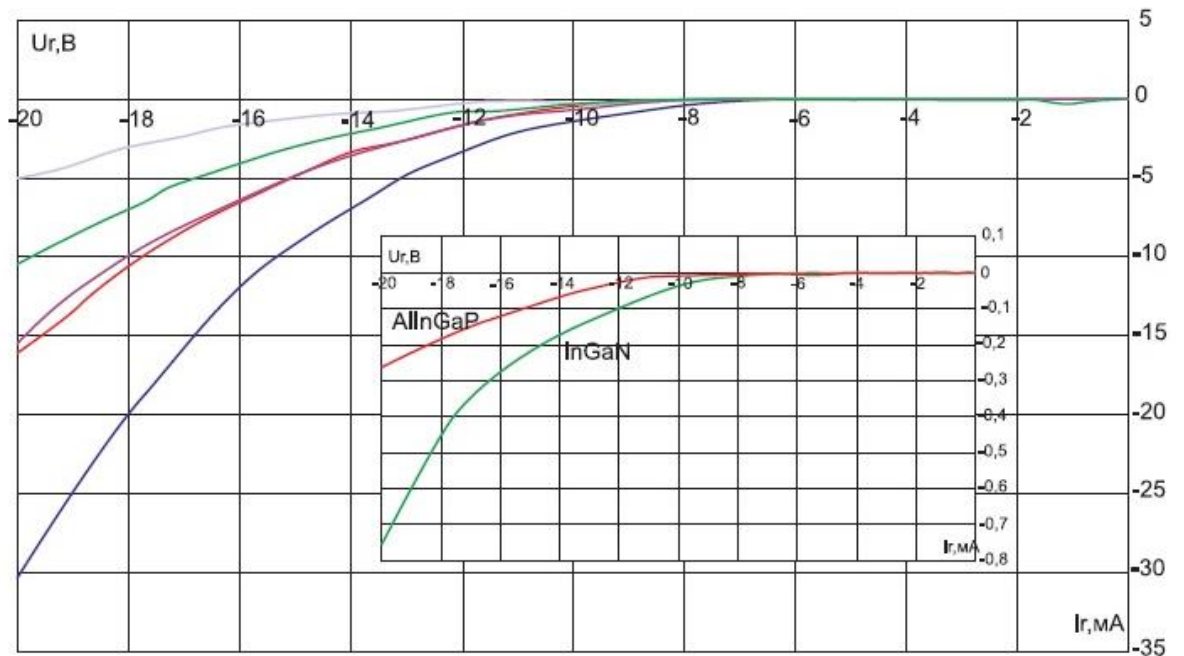


Рисунок 2.2 - Обернена вольт-амперна характеристика  $I_r/(U_r)$ . Адаптовано із роботи [16]

Крутизна ВАХ характеризує динамічні характеристики світлодіода. На рис.2.2 наведено обернену вольт – амперну характеристику [14]. Обернена вольт-амперна характеристика показує зміну зворотного струму залежно від прикладеної зворотної напруги. Як і параметр  $I_r$  (зворотний струм), він може апроксимувати якісні характеристики конструкції та світлодіода. Вони також вказують на прямо пропорційну залежність між прямим струмом і прямою напругою. Це використовується для розрахунку навантажувальних характеристик буферних каскадів, ключові елементи яких керують світлодіодом.

Температурна залежність прямої напруги  $U_f(T_a)$  і ВАХ світлодіодів обумовлена тим, що під час роботи виділяється велика кількість тепла, перевищення якого може призвести до зниження інтенсивності світла і згодом до повного руйнування СД. Деякі надяскраві кристали здатні нагріватися до  $150\text{ }^\circ\text{C}$  [10].

Максимальна робоча температура визначає температурні межі, в яких джерело працює оптимально. Допустимі значення температури вказані в

загальному технічному паспорті.

При підвищенні температури зменшується як яскравість (сила світла), так і падіння напруги на світлодіоді. Залежність яскравості від температури практично лінійна, у робочому діапазоні температур вона може змінюватися у 2-3 рази [17].

## 2.2. Результати вимірювань ВАХ світлодіодів

Для побудови вольт-амперних характеристик (ВАХ) світлодіодів різного кольору світіння як елементів електронних систем візуалізації інформації проведені вимірювання напруги при зміні прямого струму від 0 до 4 мА на лабораторному стенді, цей стенд є власністю кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики, зовнішній вигляд і принципова схема якого наведені на рисунку 2.3 і 2.4. До схеми стенду входять: світлодіоди різних типів; вузол комутації (виконаний на перемикачах SA1 та SA2); вимірювальні прилади (мультиметри типу DT-830A); змінний резистор типу ППБ-1А з опором 2,2кОм; імпульсне джерело живлення на базі Push-down генератора з напругою до 10 В.



Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд лабораторного стенду [19]



Проведемо вимірювання напруги при зміні прямого струму для кожного із світло діодів. До лабораторного стенду підключаємо два мультиметри: один для регулювання величини струму, другий – для показника значень напруги. Перемикаємо світлодіоди з одного на другий здійснюється за допомогою вузла комутації. Принципова електрична схема лабораторного схема показана на рис.2.4.

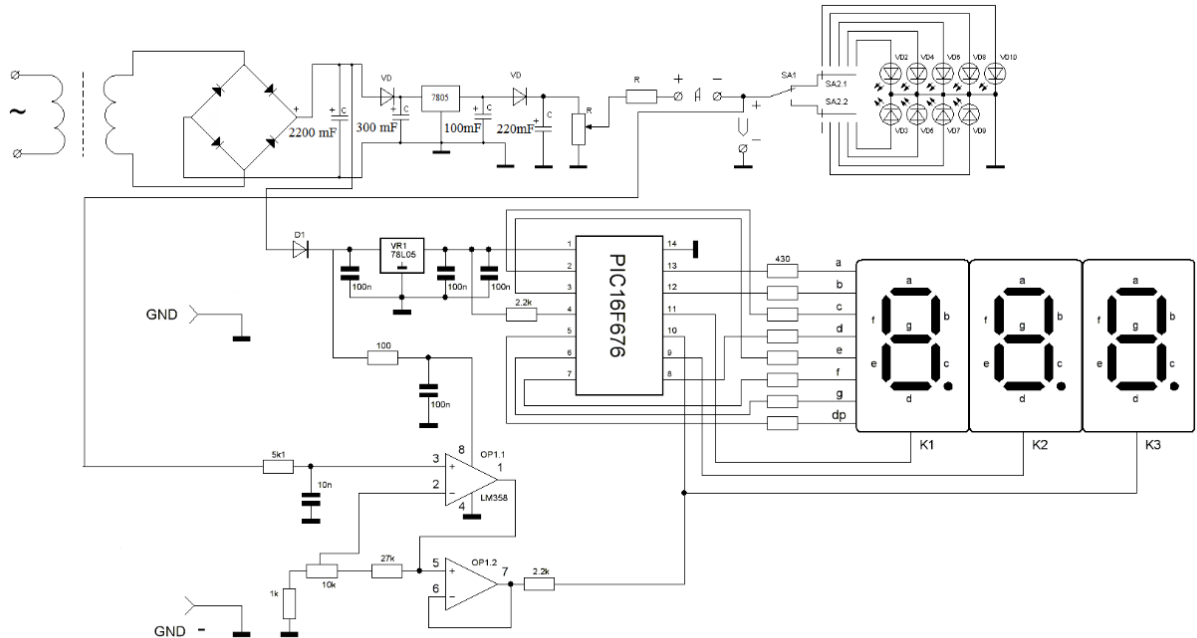


Рисунок 2.4 - Принципова схема лабораторного стенду [19]

До основних характеристик світлодіодів відносять наступні:

- яркісна – залежність яскравості від величини прямого струму, тобто  $R = f(I_{пр.})$ ;
- світлова – залежність величини світлового потоку або освітленості від величини прямого струму  $\Phi(E) = f(I_{пр.})$ ;
- спектральна – залежність довжини хвилі випромінювання від величини прямого струму  $\Phi(E) = f(I_{пр.})$ ;
- вольт-амперна характеристика – залежність прямої напруги від величини прямого струму  $U = f(I_{пр.})$ .

Сучасні світлодіоди можуть випромінювати світло в діапазоні довжин хвиль від інфрачервоного до ближнього ультрафіолету. У той час як лампи розжарювання випромінюють широкий спектр світла рівномірно в усіх

напрямах, звичайні світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі в певному напрямку. Лазерні діоди, як і світловипромінювальні діоди, являють собою лазери, активним середовищем яких є електронно-дірковий газ, а робочою областю - напівпровідниковий р-п-перехід [18].

### 2.3. Функціональне призначення та параметри світлодіодів

При проведенні експерименту використовувалися наступні типи світлодіодів: АЛ102В, АЛ307ЕИ, АЛ307КМ, КЛД901, АЛ307Б. Відповідні характеристики світлодіодів наведені нижче.

Світлодіод АЛ102В має наступні характеристики: колір світіння – зелений, сила світла - 200  $I_v$ , мккд, прямий струм ( $I_{пр}$ ) - 20 мА, пряма напруга ( $U_{пр}$ ) - 2,8 В, довжина хвилі ( $\lambda$ ) - 530 нм, максимальна температура - 70 °С.

Світлодіод АЛ307ЕИ має наступні характеристики: колір світіння – білий, сила світла - 2000  $I_v$ , мккд, прямий струм ( $I_{пр}$ ) - 20 мА, пряма напруга ( $U_{пр}$ ) - 2 В, довжина хвилі ( $\lambda$ ) - 655 нм, максимальна температура - 70 °С.

Світлодіод АЛ307КМ має наступні характеристики: колір світіння – блакитний, сила світла - 2000  $I_v$ , мккд, прямий струм ( $I_{пр}$ ) - 10 мА, пряма напруга ( $U_{пр}$ ) - 2 В, довжина хвилі ( $\lambda$ ) - 655 нм, максимальна температура - 70 °С.

Світлодіод КЛД901 має наступні характеристики: колір світіння – синій, сила світла - 150  $I_v$ , мккд, прямий струм ( $I_{пр}$ ) - 3 мА, пряма напруга ( $U_{пр}$ ) - 12 В, довжина хвилі ( $\lambda$ ) - 466 нм, максимальна температура - 70 °С.

Світлодіод АЛ307Б має наступні характеристики: колір світіння – червоний, сила світла - 900  $I_v$ , мккд, прямий струм ( $I_{пр}$ ) - 2 мА, пряма напруга ( $U_{пр}$ ) - 10 В, довжина хвилі ( $\lambda$ ) - 665 нм, максимальна температура - 70 °С [17].

Характеристики відповідають видимій частині спектру та залежать від матеріалу та властивостей напівпровідника, багатошарового або багатокомпонентного функціонального матеріалу СД, які оскільки вони дуже ефективні з точки зору випромінювання світла [19].

## РОЗДІЛ 3.

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ

## 3.1. Результати вимірювань

Результати вимірювання вольт-амперних характеристик світлодіодів різних типів за конструкцією і кольором світіння наведені у таблиці 3.1. На основі отриманих даних побудовані вольт-амперні характеристики [20].

Таблиця - 3.1 Результати експериментальних вимірювань та розрахунок параметрів світлодіодів

$U$ , В	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
АЛ102В – зелений						
$I_{np}$ , мА	0,01	0,54	1,40	1,86	2,45	5,78
$P$ , мВт	0,025	1,40	3,78	5,21	7,11	17,30
АЛ307ЕИ – білий						
$I_{np}$ , мА	0,02	1,23	1,57	2,00	4,24	6,18
$P$ , мВт	0,05	3,20	4,24	5,60	12,30	18,54
АЛ307КМ – блакитній						
$I_{np}$ , мА	0,20	2,00	2,64	3,48	5,40	6,50
$P$ , мВт	0,50	5,20	7,13	9,74	15,67	19,50
КЛД901 – синій						
$I_{np}$ , мА	1,00	1,80	2,52	4,23	6,00	-
$P$ , мВт	2,50	4,68	6,80	11,84	17,40	-
АЛ307Б – червоний						
$I_{np}$ , мА	0,20	0,50	1,00	1,45	2,12	2,72
$P$ , мВт	0,50	1,30	2,70	4,06	6,38	8,16

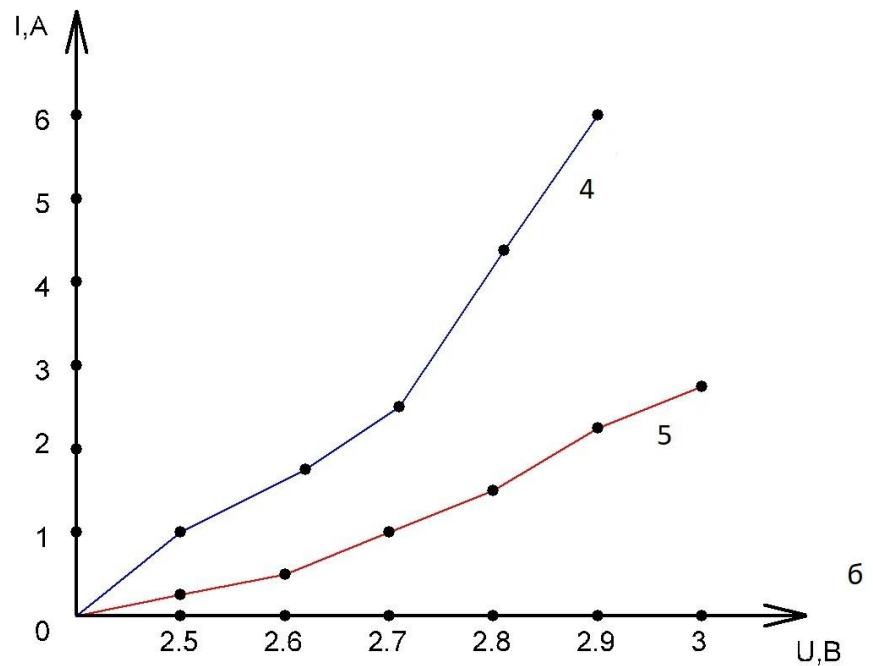
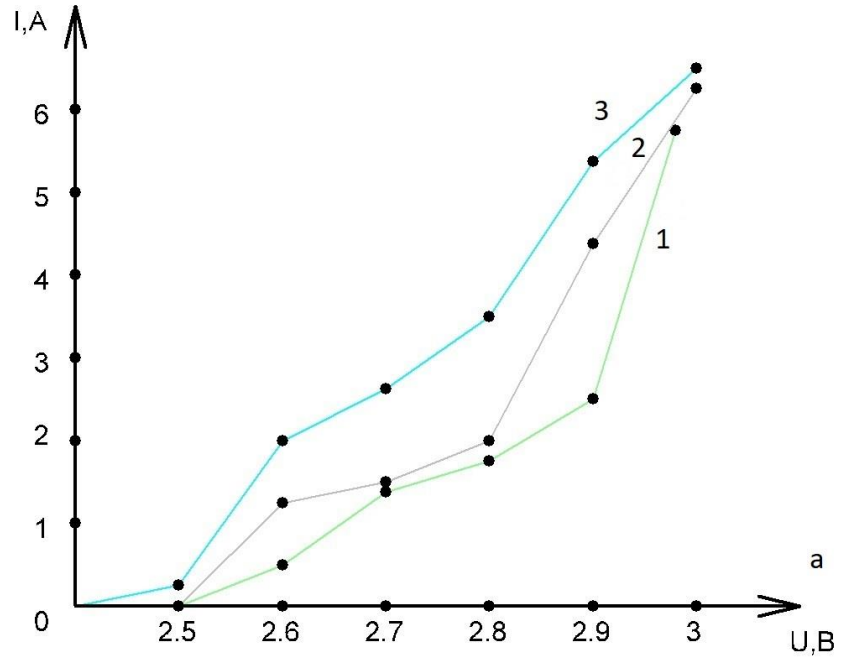


Рисунок 3.1 - Прямі гілки вольт-амперних характеристик світлодіодів. Позиція а: 1 – АЛ102В (зелений колір світіння); 2 – АЛ307ЕИ (білий колір світіння); 3 – АЛ307КМ (блакитний колір світіння). Позиція б: 4 – КЛД901 (синій колір світіння); 5 – АЛ307Б (червоний колір світіння)

Підкреслимо, що регулювання напруги світлодіодів може бути можливим є зацикленним процесом, однак незначне підвищення температури призводить до зсуву кривої характеристики вліво, як це видно з рис. 3.1 що, з часом призводить до зміщення прямого струму СД. Час за який прямий струм СД збільшується призводить до підвищення температури і, як наслідок призводить- до зсуву струму, тобто позитивного зворотного зв'язку. Цей процес продовжується до тих пір, поки пристрій не вийде з ладу.

Таким чином, отримано, що при зростанні величини електричного струму, опір світлодіода значно знижується (залежність має експоненціальний характер), а потужність зростає (лінійна залежність); світлодіоди є малопотужними індикаторними приладами ( $P \leq 0,01$  Вт); світлодіоди мають силу світла у межах від 0,5 до 50 мКд при прямому струмі до 20 мА та значенні напруги до 3 В.

Результати вимірювання ВАХ світловипромінюючих діодів говорить про її нелінійний характер в діапазоні прямого струму. Діод починає проводити струм починаючи з деякого порогового значення напруги, яке дозволяє досить точно визначити матеріал напівпровідника [20].

### **3.2. Моделювання ВАХ та відношення яскравості**

Метою даного моделювання було дослідження вольт-амперних характеристики PN-переходу світлодіоду в прямому та зворотному напрямках за допомогою симулятора Multisim 14.2.

Використовуючи табличні значення отримані під час лабораторного експерименту збільшується шанс отримання характеристик ближчих до реальних, використання блоку живлення для регулювання яскравості світлодіодів світлодіоду або використання змінного резистора, який і використовувався в моделюванні забезпечують досить високу вихідну напруги, а також протікання однакового струму через всі компоненти схеми, які з'єднані паралельно. На рисунку 3.2, наведено схемне рішення з використання змінного резистора для регулювання подачі напруги до світлодіоду і зміни його яскравості відповідно.

Напруга і струм різних світлодіодів будуть відрізнятися, тому для безпосереднього порівняння світлодіодів використовується середнє значення. Світлодіоди широко варіюються за своїм потенціалом яскравості, яскравість змінюється при зміні напруги відповідно до результату моделювань світлодіоду його яскравість максимальна 3.6V помірне зниження напруги зменшує яскравість [17].

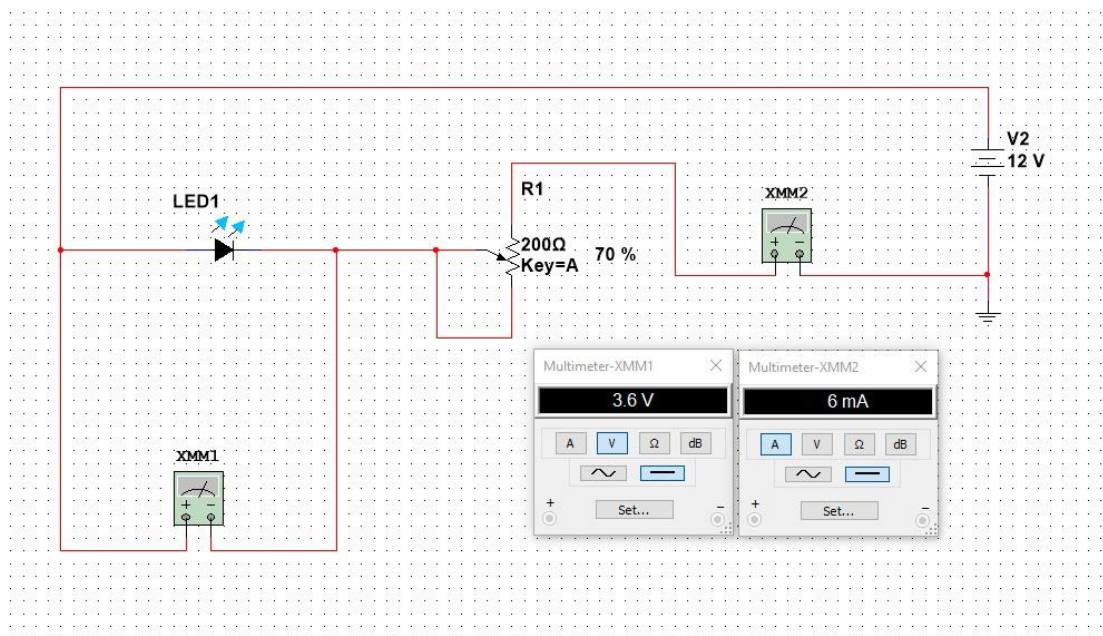


Рисунок 3.2 – Схема для вимірювання залежності яскравості світлодіодів від зовнішньої напруги на р-n-переході

Суттєвий вплив на характеристики СД має матеріал виготовлення, таким чином покращені вольт амперні характеристики та вища вихідна потужність були отримані в InGaN/GaN MQW світлодіоді, що має поверхневий шар з модульованим легуванням Si- і поступово зменшується швидкість росту між високолегованим шаром GaN з високим вмістом Si-легування шаром GaN та InGaN/GaN MQW.

Таке явище пояснюється покращенням інжекції струму і розповсюдження зарядів в активну область, а також зниженням концентрації носіїв заряду в результаті модульованого легування Si-градієнтного шару.

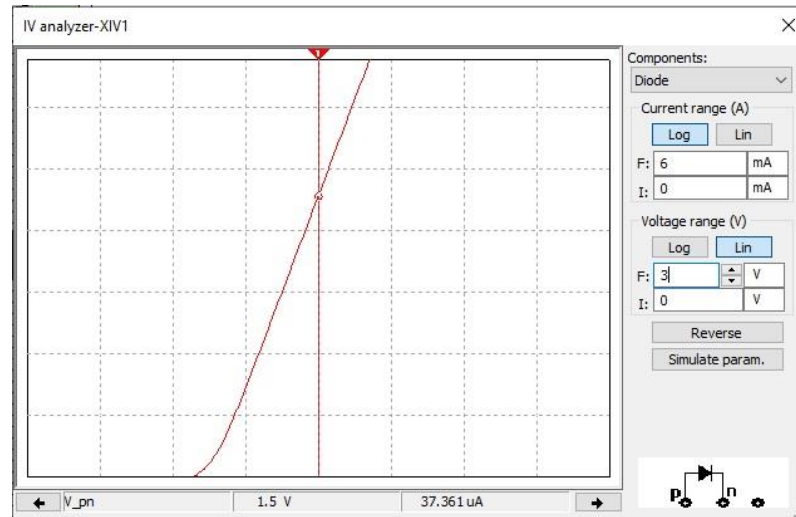


Рисунок 3.3 – ВАХ світлодіода червоного кольору світіння

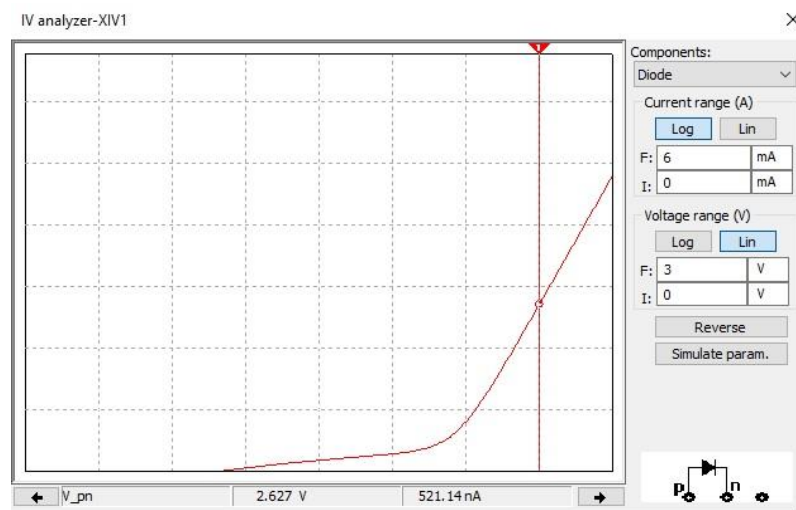


Рисунок 3.4 – ВАХ світлодіода синього кольору світіння

Світлодіоди все ще перетворюють енергію в тепло, це спричиняє до зменшенні ефективності. На рис. 3.3 та 3.4 наведено ВАХ світлодіодів червоного та синього кольорів світіння [18]. Червоний світлодіод має ВАХ лінійного характеру, тоді як синій світлодіод - більшу крутизну ВАХ при збільшенні напруги. За результатами тестів можна зробити висновок, що діоди поведуть себе однаково, тоді як синій світлодіод демонструє різні властивості за напругою. З використанням програмного симулятора Multisim та лабораторного обладнання можна проводити аналіз характеристик СД різних типоміналів [20].

## ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи магістра розглянуті фізичні принципи роботи та технічні характеристики світловипромінювальних діодів та електронних систем на їх основі.

2. Показано, що світловипромінювальний діод – це напівпровідниковий прилад, призначений для генерації світлового випромінювання при пропусканні крізь його перехід струму. По мірі зростання щільності струму через р-п-перехід більше число електронів і дірок інжектується в заборонену зону, виникають вторинні ефекти, збільшуючи число дірок і електронів, які можуть випромінювально рекомбінувати.

3. На основі проведених вимірювань вольт-амперних характеристик світлодіодів різних типів за конструкцією і кольором світіння встановлено, що регулювання напруги світлодіодів є зацикленим процесом, однак незначне підвищення температури призводить до зсуву кривої характеристики вліво, а з часом такий процес призводить до зміщення прямого струму світлодіода. Визначено, що при зростанні величини електричного струму, опір світлодіода значно знижується, а потужність зростає;

4. Узагальнення результатів вимірювань вольт-амперних характеристик світловипромінюючих діодів як елементів електронних систем вказує на те, що при зростанні напруги від 2,0 до 3,0 В величина прямого струму експоненціально зростає від 0 до 5,80 – 6,50 мА (СД зеленого, білого, блакитного і синього кольорів світіння) та від 0 до 2,72 мА (СД червоного кольору світіння).

5. З використанням симулятора Multisim 14.2. проведене моделювання схемотехічних рішень для дослідження вольт-амперних характеристик світлодіодів та визначення залежності яскравості світлодіодів від зовнішньої напруги на р-п-переході.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Подолян А.О., Коротченков О.О. Фізика низькорозмірних напівпровідників. Генерація та рекомбінація нерівноважних носіїв заряду. Фотоелектричний ефект. – Київ, 2018. – 63 с.
2. Jinmin Li., G. Q. Zhang. Light-Emitting Diodes Materials, Processes, Devices and Applications Springer. - Cham, 2019. – 600 p.
3. Gilbert H. Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications. - by Auerbach Publications, 2019. - 192 p.
4. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. – 189 с.
5. Qing Wan., Wenxin Dai., Yili Xie., Qinqin Ke., Chunhui Zhao., Bing Zhang., Zebing Zeng., Zhiming Wang., Ben Zhong Tang. AIE-active deep red/near-infrared electroluminescent emitters with fine regulation of excited state // Chemical Engineering Journal. – V.45(3). - 2016. – P. 4-9.
6. Засоби відображення інформації. Електронні дисплеї: навчальний посібник / З. Ю. Готра, В. П. Кожем'яко, З. М. Микитюк. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 162 с.
7. Shen, H., Gao, Q., Zhang, Y. et al. Visible quantum dot light-emitting diodes with simultaneous high brightness and efficiency // Nature Photon. – V.78(4). – 2019. - P.192–197.
8. Khan M., Shah S. Data and information visualization methods and interactive mechanisms: a survey // Inter. J. Comp. Appl. – V.34(1). – 2011. – P. 1–14.
9. Liu, G., Li, Z., Hu, X. et al. Efficient and stable one-micrometre-thick organic light-emitting diodes // Nat. Photon. – V.11(7). - 2022, - P. 80-110.
10. Матеріали і компоненти функціональної електроніки : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
11. Tooley M. Electronic Circuits: Fundamentals and Applications. – Elsevier: Taylor and Francis, 2013. – 320 p.
12. Xie, C., Zhao, X., Ong, E.W.Y. et al. Transparent near-infrared perovskite light-

emitting diodes// Nat Commun. – V.6(5). – 2020. – P. 112-119.

13. Li, F., Gillett, A.J., Gu, Q. et al. Singlet and triplet to doublet energy transfer: improving organic light-emitting diodes with radicals // Nature Commun. – V.78(2). – 2022. – P. 221- 231.

14. Wang, M., Lin, J., Hsiao, YC. et al. Investigating underlying mechanism in spectral narrowing phenomenon induced by microcavity in organic light emitting diodes // Nature Commun. – V.21(1). – 2019. – P. 223-231.

15. Твердотільна електроніка: підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко.– Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.

16. Zhang, H., Su, Q. & Chen, S. Quantum-dot and organic hybrid tandem light-emitting diodes with multi-functionality of full-color-tunability and white-light-emission // Nature Commun. – V.4(3). – 2020. – P. 84-98.

17. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.

18. Yang X., Zhang X., Deng J., Chu Z., Jiang Q., Meng J., Wang P., Zhang L., Yin Z and You J Efficient green light-emitting diodes based on quasi-two-dimensional composition and phase engineered perovskite with surface passivation // Nature Commun. – V.34(1). – 2018. - P. 45-78.

19. Проценко І. Ю. Технологія одержання та фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми) / І.Ю. Проценко, Л.В.Одноріць. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 231с.

20. Salehi Amin Fu., Xiangyu Shin., Dong-Hun, and So Franky. Recent Advances in OLED Optical Design. - Germany, 2019. – 97 p.