

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
 Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 176 Мікро та наносистемна техніка
 (код і повна назва)
 Тип програми освітньо-професійна
 Освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Присянику Микиті Сергійовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи **ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ** затверджена наказом по університету від 06.12.2024 р. № 1284 Ст ____
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _07_ _01_____ 2025р.
- Вихідні дані до роботи:
 Робочі параметри системи освітлення:
Напруга 220 В (5 В з використанням адаптера), потужність 1...10 Вт, ККД вище 50%,.
Розміри робочої ділянки 0,1...2 м².
Матеріал світлодіодної структури: органічні напівпровідникові матеріали з високою ефективністю та досить дешевою технологією, товщина не більше 0,1 мм.
Оптичні параметри: світловий потік 1000 лм, рівномірний розподіл по куту випромінювання.
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____
 - Огляд та аналіз сучасних світлодіодних пристроїв, які використовуються у системах освітлення, порівняльний аналіз, вибір оптимальних рішень.
 - Розгляд теоретичних питань, що стосуються параметрів та характеристик освітлювачів з точки зору зручності та безпечності їх використання людиною.
 - Розгляд сучасних тонкоплівкових систем, відповідних елементів, що необхідні для поліпшення параметрів таких систем, вибір найбільш ефективних матеріалів та структур.
 - Розрахунок системи світлодіодного освітлення на основі тонкоплівкових органічних шарів, вибір оптимальної послідовності шарів, їх розмірів.


5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри): слайд-презентація (не менше 15 слайдів).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	12.12.2024	
2	Аналітичний огляд джерел	15.12.2024	
3	Систематизація джерел, обробка та постановка завдання для розрахунку	18.12.2024	
4	Вибір математичної моделі для досліджуваної структури	18.12.2024	
5	Розрахунок досліджуваної системи	26.12.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки	03.01.2025	
7	Підготовка презентації	04.01.2025	
8	Рецензування, нормоконтроль, антиплагіат	04.01.2025	

Дата видачі завдання 09 12 2024р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____  _____ доцент каф. МЕЕПІ О. Б. Галат
(підпис) (посада, ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 72 сторінки,
41 рисунок.

НАНОСТРУКТУРА, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ОРГАНІЧНИЙ
НАПІВПРОВІДНИК, ОСВІТЛЕННЯ, СВІТЛОДІОД, МОДЕЛЮВАННЯ,
ХАРАКТЕРИСТИКА, ВИПРОМІНЮВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ

Об'єкт дослідження – тонкоплівкова освітлювальна система.

Мета роботи – отримання оптимальної структури тонкоплівкового випромінюючого елемента системи освітлення з високою рівномірністю розподілу світлового потоку, на основі моделювання та розрахунку його характеристик.

Метод – аналітичний з використанням спеціалізованого програмного забезпечення *grvdm*.

Актуальність роботи пов'язана з необхідністю підвищення ефективності та поліпшення рівномірності розподілу світлового потоку по поверхні плоского випромінювача у системах освітлення.

У роботі зроблено огляд світлодіодних систем випромінювання, вказані напрямки вдосконалення напівпровідникових освітлювачів. Наведено використання субхвильових елементів для поліпшення коефіцієнту виводу випромінювання зі структури назовні. Проведено розрахунки параметрів тонкоплівкового випромінювального елемента освітлювальної системи. Встановлено характер залежності оптичних характеристик випромінювального елемента від геометричних розмірів шарів.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 72 pages, 41 figures

NANOSTRUCTURE, EFFICIENCY, ORGANIC SEMICONDUCTOR,
LIGHTING, LED, MODELING, CHARACTERISTICS, EMITTING CAPACITY

The object of research is a thin-film panel lighting system.

The purpose of the work is to obtain the optimal structure of the thin-film emitting element of the lighting system with high uniformity of light flux distribution, based on modeling and calculation of its characteristics.

The method is analytical using specialized software gpvdm.

The relevance of the work is related to the need to increase the efficiency and improve the uniformity of the light flux distribution over the surface of a flat emitter in lighting systems.

The paper provides an overview of LED radiation systems, indicates the directions of improvement of semiconductor illuminators, in particular, to increase the radiation output coefficient from the emitter structure. The use of subwavelength elements to improve the coefficient of output of radiation from the structure to the outside is shown.. The parameters of the thin-film radiating element of the lighting system are calculated. The nature of the dependence of the optical characteristics of the radiating element on the geometric dimensions of the layers is established.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	10
1 СУЧАСНІ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....	12
1.1 Перспективи світлодіодних систем освітлення	12
1.2 Як побудована світлодіодна лампа.....	15
1.3 Схемотехніка світлодіодних ламп.....	18
1.4 Впровадження LED технологій на транспорті.....	21
1.5 Побутові світлодіодні модулі.....	27
1.6 Варіанти комерційних світлодіодів та їх параметри	30
1.7 Плaskі електролюмінесцентні освітлювальні системи	37
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....	38
2.1 Світло та його особливості щодо розповсюдження та сприйняття.....	38
2.2 Фотометричні характеристики світла	39
2.3 Нормативні параметри освітлювальних систем	44
2.4 Візуальна чутливість різних джерел випромінювання	48
3 НАНОЕЛЕМЕНТИ У СИСТЕМАХ ОСВІТЛЕННЯ	51
3.1 Нанорозмірна сітка для підвищення випромінювальної здатності	51
3.2 Наноструктури GaN на графеновій плівці.....	54
4 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНІЧНОГО ВИПРОМІНЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА.....	58
4.1 Вибір послідовності шарів випромінювача.....	58
4.2 Результати моделювання тонкоплівкового OLED.....	59
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	70
ДОДАТОК А.....	73

ДОДАТОК Б 74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Be – енергетична яскравість, Вт/м²;

Bv – видима (візуальна) яскравість, кд/м²;

Bv(100Вт) – видима (візуальна) яскравість лампи розжарювання 100Вт;

COB – chip on board (кристал на платі) ;

CRI – color rendering index;

dip – dual in-line package (назва корпусу мікросхеми);

HOMO – highest occupied molecular orbital;

H – світлова віддача джерела світла;

L – яскравість;

Kv – коефіцієнт відносного спектрального розподілу щільності енергетичної яскравості

LED – light-emitting diode (світловипромінюючий діод);

LUMO – lowest unoccupied molecular orbital;

M – показник дискомфорту;

OLED –organic light-emitting diode;

PlacSH – плазмонічна порожнина з субхвильовими дірковими ґратами

smd – surface mounted device (технологія монтажу на поверхню)

ГРЛ –газорозрядна лампа;

«господарський» матеріал – матеріал основи (host material), що складає більшу частину твердого розчину;

«гостьовий» матеріал – матеріал домішки (guest material) , що складає меншу частину твердого розчину;

ДВ – джерело випромінювання;

ЕЛ – електролюмінесценція;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

Кп – коефіцієнт пульсації освітленості;

НЗМО – найвища зайнята молекулярна орбіталь;

ННМО – найнижча незайнята молекулярна орбіталь;

Ф – світловий потік, лм.

ВСТУП

Більшість інформації із навколишнього світу людина отримує за допомоги свого зору. Тому можна зауважити щодо величезного значення вказаного органу людини. Треба розуміти, що діапазон сприйняття видимої інформації вельми обмежений, оскільки займає близько 0,4 мкм діапазону оптичного спектра (фактично від 0,38 мкм до 0,71 мкм стосовно довжини хвилі). Очевидно, що інформація, яка надходить таким шляхом, повинна бути у більшості адаптована до людських потреб, зокрема мати необхідний спектральний склад, питому потужність, просторову спрямованість тощо.

Призначення видимої інформації полягає у тому, що без неї людина неспроможна реалізувати свою здатність виконувати відповідні предметні дії. Інформація, отримана через органи зору, дає можливість вірно оцінювати місцезнаходження, геометричні розміри і кольорові характеристики речей.

Велика кількість предметів, живих істот можуть випромінювати або відбивати світло, та легко сприймаються органами зору людини. На жаль більшість об'єктів, якими ми користуємось, взаємодіємо, оптично неактивні, тобто не випромінюють та недостатньо відбивають світло у вищезгаданому діапазоні. Зважаючи на це ми мусимо використовувати штучне освітлення.

За минулі багато років людство використовувало різноманітні джерела світла, починаючи з відкритого вогню, найпростіших електричних ламп розжарювання, та закінчуючи сучасними люмінесцентними та світлодіодними приладами. На протязі останніх декількох років світлодіоди впевнено впроваджуються на ринку систем освітлення, опановуючи сучасні технологічні рішення, враховуючи мікро- та наночарові структури, молекулярні матеріали та квантово-розмірні елементи тощо. Всі ці напрацювання дають змогу забезпечувати оптичну ефективність приладів, підвищувати рівень екологічності та безпечності їх використання.

Враховуючи вищевказане, робота спрямована на дослідження системи штучного освітлення, зокрема випромінюючого елемента на основі тонкоплівкової структури, що складається з мікро- та нанорозмірних шарів. Також розглянута можливість використання дифракційних мікро- та нанорешіток для перетворення світлового потоку. Як активне середовище вибрано сучасні молекулярні та напівпровідникові електрооптичні матеріали.

Мета роботи – отримання оптимальної структури тонкоплівкового випромінюючого елемента системи освітлення з високою рівномірністю розподілу світлового потоку, на основі моделювання та розрахунку його характеристик.

1 СУЧАСНІ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

1.1 Перспективи світлодіодних систем освітлення

Світлодіоди досить довгий час не застосовувалися для освітлення. Причиною було те, що конструкція світлодіодної лампи досить складна та вартість порівняно велика. До того ж була проблема з функціонуванням білих світлодіодів, оскільки вони включали випромінювальний елемент синього кольору. Сині світлодіоди достатньо довго не забезпечували необхідний термін експлуатації, мали недосконалу структуру. Але з часом ця проблема була вирішена.

Все змінилося з появою ефективних надяскравих елементів, які підходили до створення освітлювальних приладів. З того часу світлотехніка на основі LED стала входити в наше життя і витіснити не тільки лампочки розжарювання, а й так звані енергозберігаючі лампи.

Сьогодні світлодіодне освітлення займає лідируючі позиції на світлотехнічному ринку, адже це світлове рішення є максимально екологічним з точки зору того, що воно допомагає зберегти безцінні ресурси нашої планети. В умовах загального скорочення видатків, розробки нових стандартів, зелених ініціатив та прийняття законодавчих актів, спрямованих на захист довкілля, створюються великі можливості для використання світлодіодного освітлення як на національному, так і на міжнародному рівні [1].

Враховуючи стрімке зниження ціни світлодіодних ламп, збільшення різноманіття у виробництві таких приладів, слід чекати впровадження світлодіодного освітлення у всі сфери, де необхідно штучне освітлення. Але все ж таки потрібно враховувати необхідність утилізації відпрацьованих приладів, що може з часом суттєво збільшити вартість експлуатації систем світлодіодного освітлення.

Розглянемо критерії, за яких вибирають саме світлодіодні системи.

Візьмемо виробничу сферу використання.

Робота на складі або промисловому об'єкті з високими вимогами може бути небезпечною, якщо у вас немає достатнього та надійного освітлення для забезпечення безпеки при швидкому переміщенні з однієї зони до іншої. Оскільки дуже важливо, щоб кожна ділянка була освітлена якісно та повністю, все більше власників будівель переходять на світлодіодні лампи та LED-світильники замість традиційних типів джерел [1]. Якщо брати взагалі, існує три основні причини, через які власники комерційної нерухомості розглядають можливість використання світлодіодів як основне джерело освітлення для своєї будівлі:

- такі світильники допомагають суттєво економити фінанси у довгостроковій перспективі завдяки своєму низькому енергоспоживанню та тривалому терміну експлуатації;

- світлодіоди вкрай безпечні у використанні, оскільки вони не виділяють тепла, як це роблять лампи розжарювання, а тому не провокують ні ризиків виробничих травм, ні псування майна від термічного впливу (що часто важливо на складах, де має чітко підтримуватися певний температурний режим);

- перехід на світлодіодне освітлення позитивно позначається вплив на навколишнє середовище, що одна із чинників хорошої репутації будь-якого сучасного бренда.

Як і прогнозувалося на основі численних тематичних досліджень і статистики щодо використання світлодіодних джерел світла, тенденції однозначно говорять про рух масового споживача у бік світлодіодного освітлення та уникнення ламп розжарювання та інших типів. У 2024 році світлодіодні світильники продовжують залишатися в тренді ще й завдяки тому, що дизайнери шукають способи включити в проекти нових ремонтів більше елементів керування освітленням, яскравістю, відтінками, а також хочуть достовірно оцінювати довговічність та енергозберігаючу ефективність

світлоприладів, які пропонують виробники. У міру заміни неефективних ламп напівпровідниками багато відомих концепцій і стилів освітлення істотно змінюватимуться або зовсім йдуть у минуле.

Інтерес масового споживача до світлодіодних світильників ґрунтується ще й на тому, що вони випускаються в різних стилях і підходять для будь-якого приміщення в комерційних будинках. Наприклад, можна купити світлодіодні лампи, які спеціально розроблені для зовнішнього охоронного освітлення. Світлодіодні світильники також можна використовувати як освітлення у специфічних умовах та закладах – аж до лікарень, складів та пожежонебезпечних приміщень.

Залежно від типу галузі, для якої пропонується рішення, можна знайти прилади для небезпечних зон та спеціальні вибухозахищені світильники, які забезпечують безпеку роботи персоналу. Їхні міцні каркаси захищені від таких небезпечних елементів як іскри або газу, які можуть спричинити пожежу. Окремо можна виділити моделі для низьких і високих прольотів: вони мають схожі переваги, оскільки виробляють промені освітлення, які з легкістю покривають або зовсім невеликі, або, навпаки, великі площі. Найчастіше це підвісні світильники з відповідними габаритами та рівнем яскравості.

Розглядаючи сьогоденну статистику використання світлодіодного освітлення і роблячи прогнози на частину десятиліття, можна сказати, що подібні світлові рішення продовжуватимуть встановлювати стандарти доти, доки ми не розробимо нові технології, які дозволять ще більше оптимізувати штучне освітлення при мінімізації споживання енергії. На щастя, поточна статистика цієї галузі показує, що ми знаходимося у чудовій стартовій позиції для модернізації житлових, промислових, комерційних, розважальних, медичних, освітніх, інфраструктурних та інших об'єктів за допомогою напівпровідникових джерел світла з метою досягнення довгострокової ефективності та продуктивності.

Ось лише деякі з основних статистичних даних, пов'язаних зі світлодіодними лампами, на даний момент:

- очікується, що до 2030 року світлодіоди становитимуть 87% джерел освітлення;
- понад 50% комерційних будівель використовують просунуті системи керування освітленням (не просто вимикачі, але також різні таймери, датчики та реле);
- у 2015 році у комерційному секторі світлодіодними були близько 13% освітлювальних установок, сьогодні – понад 65%;
- до 91% всієї енергії, що споживається для освітлення приміщень у комерційному та промисловому секторах, припадає на лінійні, низько- та високоярусні світильники;
- на люмінесцентні світильники сьогодні припадає менше ніж 25% всього споживання енергії на освітлення;
- у 2020 році на частку світлодіодного освітлення у світі припадало близько 51 мільярдів доларів США;
- статистика розвитку світлодіодної галузі каже, що до 2030 року слід очікувати збільшення енергоефективності напівпровідників не менше ніж у два рази;
- світлодіоди служать мінімум у 25 разів довше ламп розжарювання та в 8-10 разів довше за всі види люмінесцентних (традиційних лінійних, КЛЛ та ін.).

1.2 Як побудована світлодіодна лампа

Джерелом світла світлодіодної лампи є LED-діоди. Вони являють собою багатошаровий напівпровідниковий кристал, що перетворює електрику на світло.

На сьогодні можна виділити чотири типи діодів [1]:

- «dip» – це діод із двома напівпровідниками, зверху яких розташовується збільшувач. За допомогою таких ІВ (джерело світла) працюють гірлянди, підсвічуються вуличні вивіски;

– «smd» – цей тип діодів має зменшений розмір та покращений тепловідведення;

– «піранья» – тип аналог діодів «dip», але має вже чотири виводи, що застосовуються для фар автомобілів та інших потужних ІВ, відрізняються надійністю та довговічністю;

– «COB» – варіант, де кристали розташовані на платі, вони впаяні послідовно один за одним. Цей тип більш захищений від перегріву, має яскраве свічення, але при виході з ладу одного діода потрібно замінювати всю плату цілком.

Приклад системи штучного освітлення у мініатюрі – так звана LED лампа (рис. 1.1). Основними елементами є система світлодіодів та драйвер. Важливим елементом є радіатор, особливо для потужних систем.

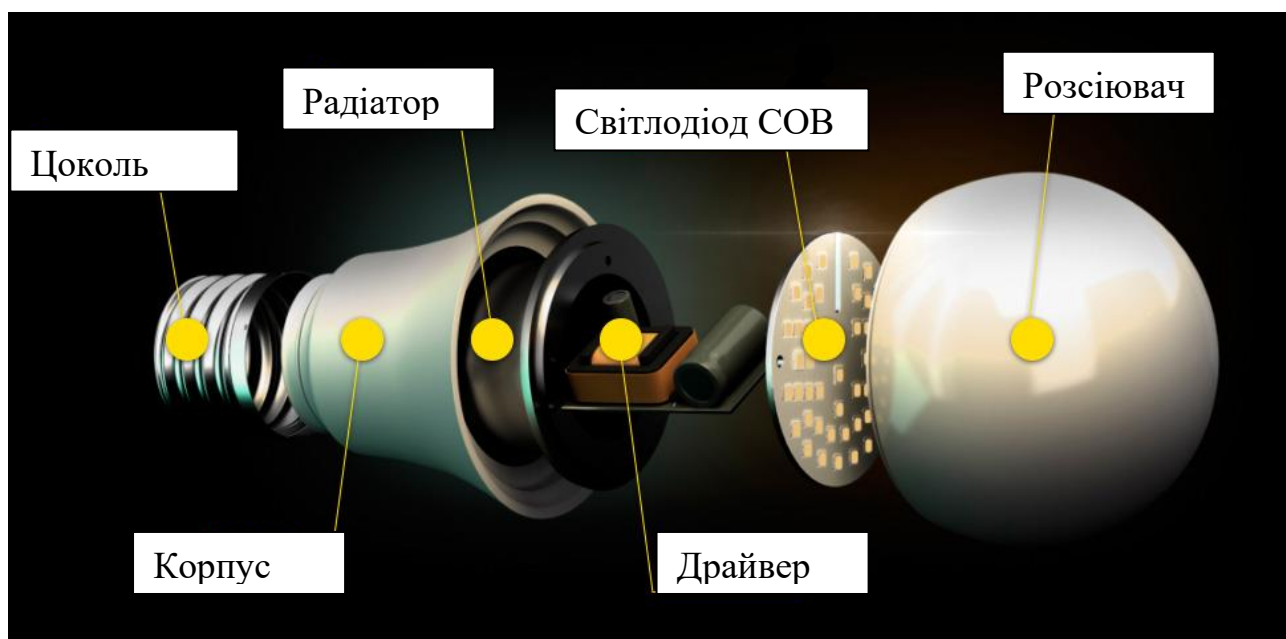


Рисунок 1.1 – Як побудована LED – лампа

Корпус LED -світильників сьогодні виготовляють найчастіше з пластмаси, в якій роблять спеціальні отвори для відведення тепла від кристалів, що нагріваються. Верхня частина корпусу буває з матовим чи прозорим

розсіювачем. Усередині пристрою розташовані світлодіоди, які послідовно з'єднані, кожен з них працює від постійного струму. Усередині пристрій має спеціальний перетворювач струму, який отримує змінний струм від побутової мережі, а видає на діоди вже постійний струм потрібної напруги.

Треба зазначити, що світлодіодні лампи не одразу отримали визнання, як вигідний побутовий освітлювач. Довгий час у цій галузі домінували лампи розжарювання, які і сьогодні досить широко використовують у особливих умовах експлуатації. Ці лампи досить дешеві, прості за конструкцією та мають близький до природного спектр випромінювання. Остання властивість і на сьогодні неперевершена. Але за ефективністю вони дуже сильно відстають від інших, більш довершених приладів. Тому поступово, починаючи з промислових систем освітлення, лампи розжарювання почали замінюватись так званими енергозберігаючими лампами. Зазвичай, починались вони з газорозрядних ламп на парах ртуті, що було дуже небезпечно у разі потрапляння в навколишнє середовище. Але екологія була принесена в жертву матеріальній вигоді ці лампи споживали у 4..5 разів менше енергії.

З появою світлодіодних ламп з'явилася нагода відмовитись від шкідливих газорозрядних освітлювачів. Деякий час використання світлодіодних пристроїв стримувалось досить значною ціною – у 2..3 рази вищою, ніж газорозрядних пристроїв. З часом, зокрема за останні 10 років, переваги LED пристроїв здолали упередженість користувачів, а їх недоліки поступово зменшувались.

На сьогодні можна виділити такі основні та незаперечні плюси LED - кристалів у порівнянні з іншими джерелами випромінювання (ДВ):

а) перша перевага світлодіодів – висока світлова віддача. У таких ІС однорідне світіння, вони мають спрямований світловий потік, мінімальні втрати світла від світильника до об'єкта, що освітлюється. Завдяки використанню світлодіодів, ви отримуєте в 8 разів більшу освітленість приміщення, ніж при використанні інших джерел світла;

б) економія на витратах на електроенергію - це найважливіший плюс, який помітили всі користувачі таких світильників. ККД світлодіодів 60%, вони споживають значно менше електрики в порівнянні з аналогами, видаючи високий світловий потік;

в) довговічність світлодіодних світильників до 100 000 годин (у середньому 40-60 тис. годин – це 10-15 років при 10-годинному щоденному циклі роботи) це дозволяє суттєво економити на обслуговуванні, а також на заміні ламп у таких місцях як міські парки, мости, шосе, де сьогодні лід технології використовують повсюдно;

г) безпека та надійність. Напруга світлодіодної лампи низька, тому вона безпечна у використанні. А завдяки тому, що кристали витримують великі перепади температур (при належному охолодженні), працюють у складних умовах (запиленість, вібрація, підвищена вологість) вони можуть прослужити довгі роки навіть у дуже складних умовах. Безперечним плюсом є їхня міцність, розбити мініатюрний діод досить складно, він не має крихкого скляного корпусу, не вимагає герметичного газового середовища для роботи кристалів;

д) висока якість світла, що випромінюється - кольоропередача діодів Ra більше 80 одиниць;

е) миттєве включення без ефекту мерехтіння та без часу на розігрів;

ж) світлодіоди не містять та не виділяють шкідливі речовини, тому повністю безпечні для навколишнього середовища та тварин.

1.3 Схемотехніка світлодіодних ламп

Нижче розглянемо будову та варіанти компоновки світлодіодної лампи на прикладах кількох невеликих схем [1...3]. Спаяти такий пристрій самостійно не складе труднощів (схема надана нижче).

Щоб пристрій працював, потрібно вирішити три питання:

– отримання змінного струму мережі на пристрій;

- перетворення змінного струму мережі на постійний;
- трансформування його до 12V.

Схема складання лампи, що працює від 220 В, може бути заснована на двох змінних - це діодний міст або резистор.

Схема з використанням діодного мосту досить примітивна, її зможе зібрати навіть електронник-початківець з мінімальними знаннями (рис. 1.2).

За основу візьміть плату від старого світильника. А світлодіоди з'єднайте послідовно в кілька кіл по 10 штук, після яких з'єднайте паралельно. Недоліком розглянутої схеми є використання трансформатора, що призводить до великих габаритів та ваги.

Інша схема використовує діодний міст та конденсатор (рис. 1.3)

Подача напруги на лід-кристали забезпечуються через міст, він має баласт ємності (конденсатор С1), що обмежує вихідний струм. Зібрана за цією схемою лампочка служитиме вам довго, адже вона не боїться КЗ мережі.

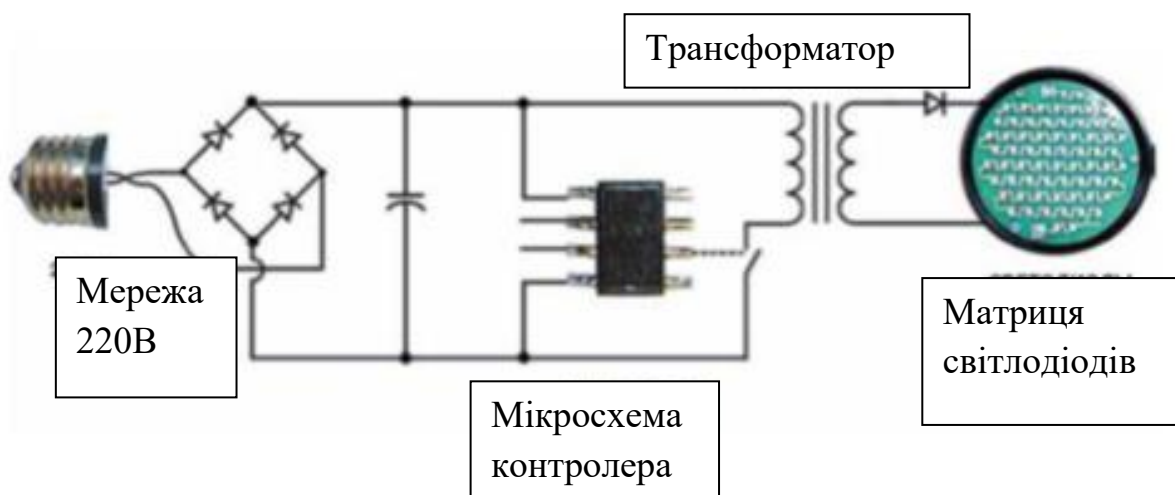


Рисунок 1.2 – Електрична схема найпростішого драйвера LED

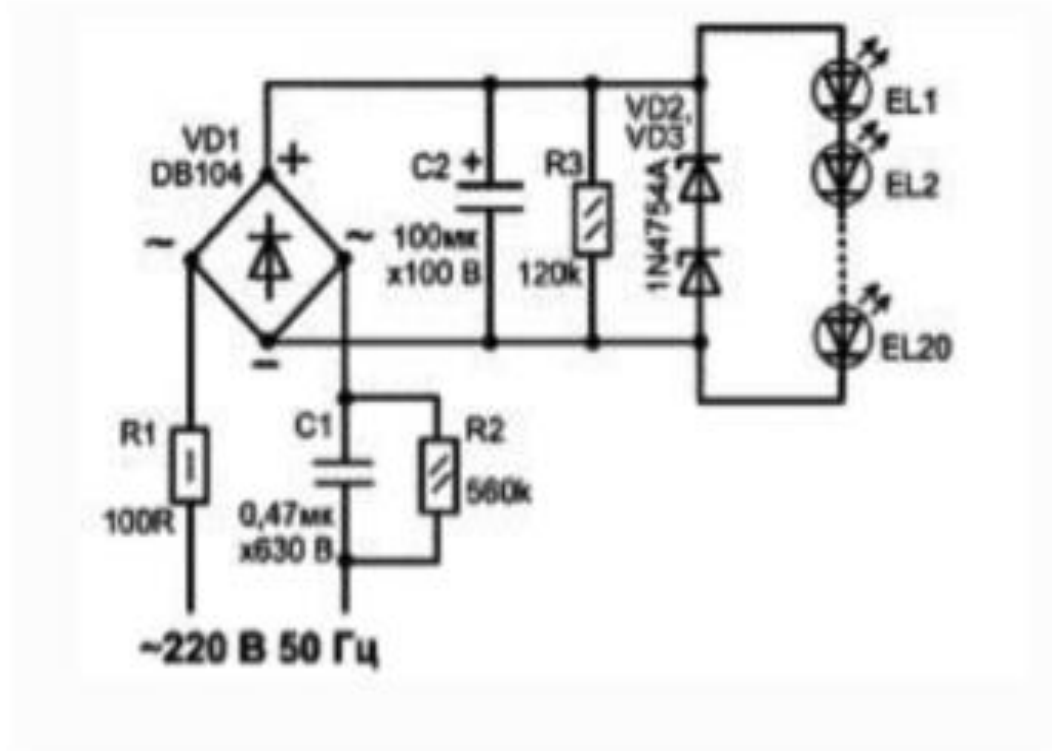


Рисунок 1.3 – Схема світлодіодного світильника з мостом-випрямлячем

Конденсатор C2 встановлений для зменшення пульсацій моста. Резистор R1 служить обмеження подачі зарядного струму під час запуску схеми, який тут використовується як запобіжник. Для розрядки конденсаторів C1 та C2 використовуються у схемі резистори R1, R2. За основу при складанні лампи краще взяти корпус і цоколь від старої LED -лампи, що не працює, яка вже має спеціальні отвори для відведення тепла від діодів.

У результаті ви отримуєте недорогий, економний і довговічний пристрій, який в рази кращий і безпечніший, ніж лампи розжарювання або люмінесцентне освітлення.

Слід зазначити, що якість функціонування розглянутої лампи суттєво залежить від якості складових компонент. Якщо ви отримуєте дешеву лампу, зазвичай вона розрахована на мінімальний термін (3..6 місяців). Більш якісні (1...2 роки експлуатації) дорожчі у 1,5 – 2 рази.

1.4 Впровадження LED технологій на транспорті

Технологічний прорив не залишився поза увагою автовиробників. Потужні та при цьому мініатюрні світлодіоди дозволили розробити інноваційні автомобільні фари. Спочатку їх почали використовувати для габаритних вогнів, стоп-сигналів, поворотів, потім ближнього світла. Нещодавно з'явилися і світлодіодні фари далекого світла.

Якщо спочатку LED фари встановлювалися виключно на дорогих моделях, то останнім часом, у міру здешевлення технологій, вони з'являтимуться і на машинах середнього класу. У бюджетних моделях застосування світлодіодів поки що обмежується допоміжними джерелами світла – наприклад, габаритні чи ходові вогні.

Зате у любителів тюнінгу тепер є нова можливість виділити свій автомобіль на тлі решти ефектного світлодіодного підсвічування днища, логотипу та номерів. Колір можна підібрати на власний смак. За допомогою світлодіодних стрічок зручно підсвітити багажник або повністю замінити освітлення у салоні.

Побудова LED фар. Головне завдання розробників автомобільних фар – забезпечити максимальну дальність освітлення, виключивши при цьому сліпучий ефект для водіїв зустрічного транспорту. Важливими є також надійність, міцність і довговічність. LED технології значно розширюють можливості проектувальників фар.

Хоча один окремо взятий світлодіод менш яскравий, ніж галогенова лампа і тим більше ксенон, але, завдяки малим розмірам, у головну фару можна помістити кілька десятків таких світлодіодів. Разом вони забезпечать достатнє висвітлення дорожнього полотна. При цьому несправність одного-двох елементів не призведе до повного виходу фари з ладу і критично не позначиться на рівні освітленості.

LED елемент хорошої якості здатний опрацювати 50 тисяч годин. Це понад п'ять років безперервної роботи. Імовірність виходу з експлуатації двох або більше елементів в одній фарі вкрай мала. Насправді це означає, що змінювати таку фару швидше за все взагалі ніколи не знадобиться.

Електроживлення на LED фару подається не безпосередньо від бортової мережі, а через стабілізатор. У найпростішому випадку можна використовувати випрямний діод плюс резистор, який обмежує струм, що протікає через світлодіод. Але автовиробники зазвичай встановлюють складніші перетворювачі, які дозволяють максимально продовжити термін служби світлодіодних елементів.

Ще недавно світлодіодні фари головного світла вважалися чимось, що набуде реального поширення лише у віддаленому майбутньому. Ксенонове та галогенне світло задовольняли практично всім вимогам автолюбителів. Однак зараз світлодіодні фари входять до комплектації безлічі автомобілів преміум-сегменту і навіть поступово переходять у середній сегмент. Імовірно, вже за 10 років такі фари стануть основними. Втім, встановити світлодіодне світло можна практично на будь-який автомобіль – питання лише в ціні та в тому, чию оптику купувати.

Як кольорові, так і білі світлодіоди [2...4] можуть похвалитися високою світловою віддачею – у цьому вони можуть зрівнятися, а іноді й перевершують металогалогенні та натрієві газорозрядні лампи (Табл.1.1). На відміну від цих ламп, світлодіоди мають високу механічну міцність. За рахунок відсутності нитки розжарювання джерело світла може витримувати як удари, так і сильні вібрації. Основа світлодіода – кристал – має великий експлуатаційний ресурс. Середній термін служби становить 30 тисяч годин, але потенційно він може сягати навіть 100 і більше тисяч годин. Втім, кристал «деградує», внаслідок чого яскравість свічення падає, а сам світлодіод через тривалий час виходить з ладу.

Таблиця 1.1 – Порівняння найбільш поширених автомобільних ламп

	Галоген	Бі-Ксенон	LED
Потужність, Вт	55/60	35	20/40
Світловий потік, лм,	1200/1500	3000	2000/4000
Ефективність, лм/Вт	30	85	100
Кольорова температура, К	2800	4300-5000	5000-6000
Ресурс, год	500	3000	30000
Середня вартість, \$	15-20	40-50	50-70

Одними з найважливіших особливостей світлодіодів, які і визначили їхній успіх в автомобільній галузі, є: відсутність інертності (включення на максимальну яскравість), різні кути випромінювання, низька вартість (поки що це відносно), висока безпека. Хоча за окремими показниками світлодіоди можуть поступатися звичнішим освітлювальним приладом, вони мають цілий набір переваг.

Довгий час вважалося, що світлодіоди не можуть бути використані у головному світлі автомобіля. Справа в тому, що окремі світлодіоди недостатньо яскраво світять. Сучасні LED-лампи мають цілі блоки (модулі), в яких знаходиться безліч світлодіодів – це чимось нагадує стільники, заповнені випромінювачами світла. Такі блоки (модулі) можуть у ролі самодостатніх джерел світла. У середньому, одна світлодіодна фара включає 2-3 десятки окремих діодів, поділених на 2-3 блоки (залежить від моделі). Як було зазначено, діоди випромінюють світло у досить вузькому діапазоні. Цим можна скористатися. Ось як у яких режимах працює LED-фара на Audi A7:

– денний ходовий вогонь. У роботу входить 18 білих діодів, причому вони світять не на повну яскравість. Яскравість регулюється зміною шпаруватості ШІМ-модульованого сигналу;

– ближнє світло. У роботу включається 3 модулі світла: пара внутрішніх та один зовнішній. Число світлодіодів у внутрішньому модулі відмінно від числа в зовнішньому і, до того ж, яскравість свічення може бути відрегульована;

- далеке світло. Включається 3 модулі + ще один додатковий. Також відкривається рефлектор;
- покажчик повороту. Реалізується включенням у роботу 11 світлодіодів жовтого світла в нижній частині фари;
- статичне адаптивне освітлення, яке називається бічним світлом. Працює таке освітлення так само, як і ближнє світло, з тією різницею, що в роботу включається ще один модуль світлодіодів на внутрішній стороні фари. У цьому режимі фара висвітлює як дорогу перед автомобілем у невеликому конусі;
- освітлення для автомагістралі. Режим схожий на далеке світло, але з тією різницею, що внутрішні модулі трохи піднімаються електродвигуном коректора;
- всепогодне освітлення. Режим схожий на статичне адаптивне освітлення, але з тією різницею, що частина яскравості свічення частини світлодіодів знижується до 50% від максимальної;
- туристичний режим. У роботу включається пара внутрішніх модулів світлодіодів;
- гнучкий режим coming home/leaving home. Цей режим допомагає водієві – освітлює салон автомобіля у момент виходу назовні або, навпаки, за відмикання центрального замку з метою потрапити до салону. Вимагає отримання сигналів від датчиків освітлення та дощу.

Світлодіодні фари [2] складаються з наступних елементів: блоки діодів (ближнього, далекого світла) (рис. 1.4), набір діодів поворотників та ходових вогнів, вентилятори та канали охолодження, електронний блок керування.

Важливим для адекватного сприйняття водієм дорожніх умов є спектр випромінювання освітлювача (рис. 1.4). На жаль більшість світлодіодів, що використовуються у лампах, мають традиційний спектр з двома максимумами (рис. 1.4в). Таке джерело хоча і випромінює біле світло, але воно суттєво відрізняється від сонячного. Предмети, освітлені таким джерелом вночі, дещо відрізняються по кольору від освітлених природними джерелами вдень. Це може

призвести до погіршення сприйняття навколишнього середовища, та навіть втрати орієнтації.

З метою поліпшення якості автомобільних освітлювачів були розроблені вдосконалені випромінювачі з оптимізованим спектром випромінювання, наближеним до денного світла (рис. 1.4 г).

Окремо варто розібрати блок керування світлодіодами. Справа в тому, що освітлювальний пристрій живиться не безпосередньо від АКБ, а через т. зв. струмообмежувач, що є основою блоку керування.

Він включає резистори і діоди – вони обмежують струм до певного значення. До речі, режим роботи схеми струмообмежувача і визначатиме те, з якою яскравістю світлитимуть LED-фари.

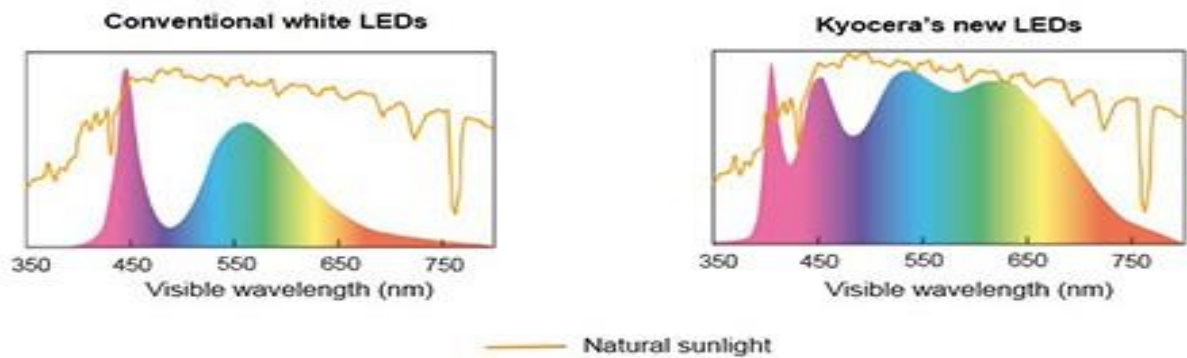
Попри поширену думку, будь-які світлодіоди гріються по ходу роботи. Наприклад, всі LED-лампи обладнані радіатором. Причина проста: незважаючи на високий коефіцієнт перетворення електричної енергії на світлову, частина енергії все одно перетворюється на тепло. Сучасні світлодіодні лампи мають ККД від 30% до 40%. Тобто більшість енергії діодів однаково витрачається виробництво теплової енергії. У разі світлодіодних ламп надлишки тепла примусово відводяться вентилятором та через спеціальні канали охолодження.



a)



б)



в)

г)

(а, б) –варіанти LED - ламп, спектри випромінювання звичайних (в) та вдосконалених (г) LED – ламп

Рисунок 1.4 – Автомобільні світлодіодні лампи

1.5 Побутові світлодіодні модулі

Найбільше різноманіття типів, конструкцій та модифікацій освітлювальних приладів (рис. 1.5, 1.6, 1.7) ми спостережуємо у побутовій сфері. Адже саме тут реалізуються усі переваги цих приладів.



Рисунок 1.5 – Світлодіодна лампа з драйвером

При оптимальній схемотехніці джерел живлення, застосуванні якісних компонентів і збереженні прийнятних для загального освітлення показників термін експлуатації може досягти 36-72 тисячі годин [5], що в середньому в 50 разів більше у порівнянні з номінальним терміном служби ламп розжарювання загального призначення [6] та в 4-16 разів більше, ніж у більшості люмінесцентних ламп.

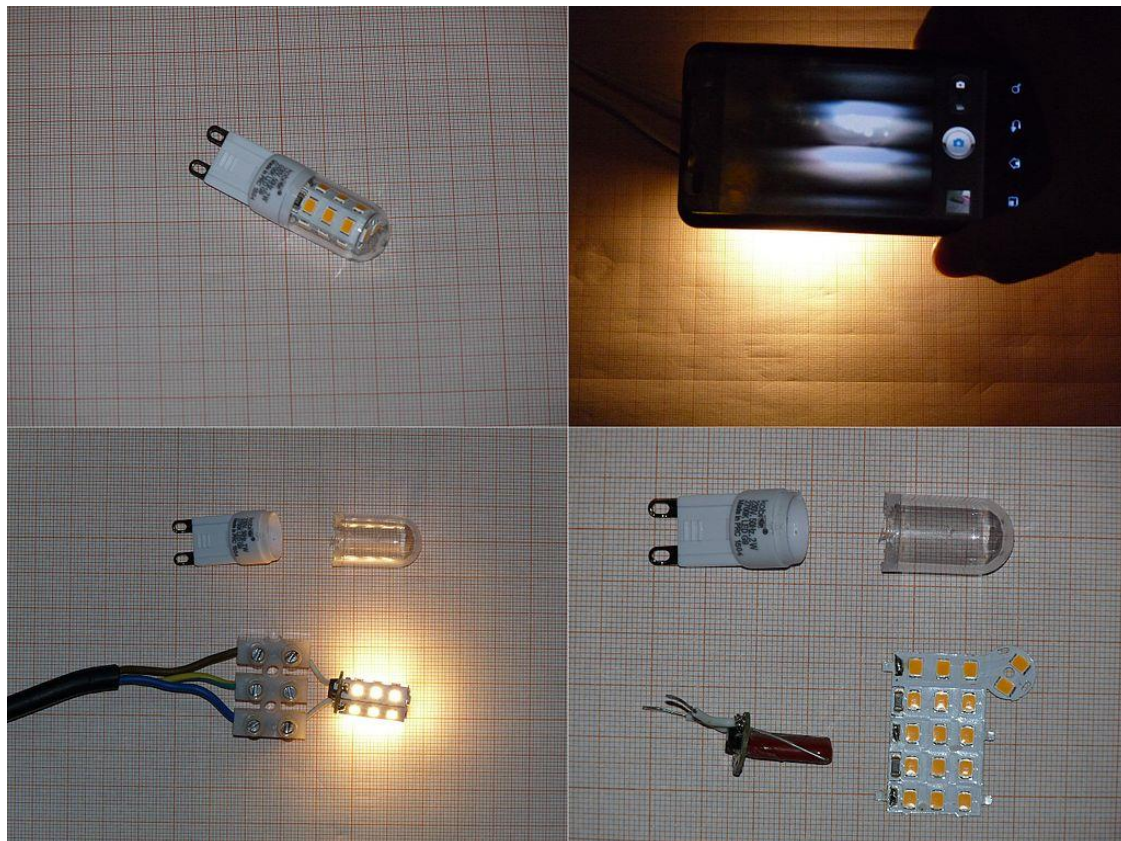


Рисунок 1.6 – Сучасні світлодіодні лампи та модулі



Рисунок 1.7 – Світлодіодний прожектор та вуличний світильник

Виробники світлодіодів через постійне оновлення та вдосконалення продукції не мають можливості проводити тестування в реальному часі та вказують прогнозований термін служби, використовуючи спеціальні методики, такі як TM-21 та IESNA LM-80 [7]. Великий термін служби у деяких застосуваннях грає вирішальну роль. Так, економія на обслуговуванні та заміні ламп у вуличних світильниках найчастіше перевищує економію на електроенергії.

З іншого боку потрібно враховувати недоліки цих приладів, відповідно ретельно підбирати саме такі компоненти, що не створять шкоду для людини та навколишнього середовища:

- світлодіодне освітлення через значну відмінність свого спектра від спектра природного освітлення негативно впливає на здоров'я [6], викликаючи різні порушення здоров'я. Синє випромінювання світлодіодів може впливати на зір і викликати втоми очей та ушкодження сітківки [7];

- високі вимоги до якості тепловідведення, оскільки температура має вирішальний вплив на надійність [8]. Потужні освітлювальні світлодіоди вимагають наявності зовнішнього радіатора для охолодження, тому що мають несприятливе співвідношення своїх розмірів до теплової потужності, що виділяється, і не можуть без спеціального тепловідведення розсіяти стільки тепла, скільки виділяють. Так, для розсіювання 5 Вт теплової потужності, що виділяється напівпровідниковим приладом з можливістю роботи при температурі навколишнього середовища до $+40^{\circ}\text{C}$, потрібно радіатор площею 100 cm^2 [9]. Необхідність використання радіатора веде до подорожчання готового виробу і ускладнює конструювання світлодіодних ламп понад 15 Вт, сумісних із типорозміром цоколя та габаритами ламп розжарювання загального призначення. Особливо проблеми з тепловідведенням відчутні на прикладі світлодіодних лампочок, що спонукає користувачів мережі складати їх рейтинги [10];

– дешеві масові світлодіоди мають світлову віддачу від 80 лм/Вт до 110 лм/Вт, що у економічності нижче сучасних натрієвих ламп [11], у зв'язку з ніж, попри активне впровадження світлодіодних бюджетних світильників у різні виробничі і комунальні сфери побутового обслуговування, нині для освітлення вулиць та дворових територій одними з найбільш енергоефективних та надійних джерел світла є світильники типу ДНаТ (світловіддача натрієвих ламп високого тиску досягає 150 лм/Вт, низького тиску – до 200 лм/Вт);

– синя компонента спектру, що застосовується в світлодіодному освітленні, негативно позначається на функціонуванні харчових ланцюгів фауни і приваблює безхребетних із сільської місцевості в міста [11] .

1.6 Варіанти комерційних світлодіодів та їх параметри

Розглянемо варіант світлодіодного елемента PM2E3LXESD, представлений на ринку освітлювальних пристроїв (рис. 1.8). Наведений світлодіод [13] виробляється у декількох варіантах, 6 кольорових та 1 білий. В позначенні світлодіода в залежності від кольору X = W (білий), R (червоний), A (помаранчовий), G (зелений), C (синезелений), B (синій), D (фіолетовий).



Рисунок 1.8 – Потужний світлодіод для промислових освітлювачів

Конструкція та геометричні розміри вищезгаданого світлодіода наведені на рис. 1.9. Конструкція має 2 виводи (анод помічено), корпус пластиковий герметичний з металевим низом для розсіювання тепла.

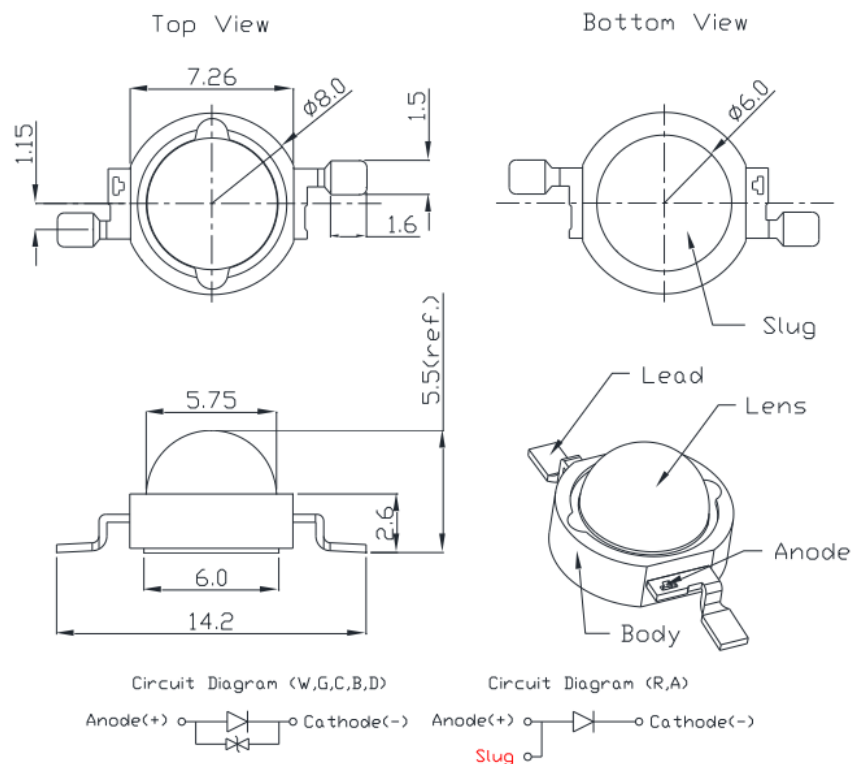


Рисунок 1.9 – Конструкція світлодіода PM2E3LGESD-1

Оптичні властивості (світловий потік або потужність для фіолетового варіанта) модифікацій світлодіода за температури 25°C наведено на рис. 1.10 для двох значень прямого струму (350 мА та 700 мА). Враховуючи досить високу потужність для вказаних розмірів, світлодіод потребує відповідного радіатора для охолодження, підключати його без охолодження можливо лише на 1 с для перевірки.

Електричні властивості (пряма напруга та тепловий опір) модифікацій світлодіода за температури 25°C наведено на рис. 1.11 для прямого струму а 700 мА.

Radiation Pattern	Color	Part Number Emitter	Luminous Flux or Power		
			@700mA		Refer @350mA
			Minimum	Typical	Typical
Lambertian	White	PM2E-3LWE-SD	218.9 lm	274 lm	154 lm
	Red	PM2E-3LRE-SD	87.4 lm	126 lm	67 lm
	Amber	PM2E-3LAE-SD	113.6 lm	137 lm	73 lm
	Green	PM2E-3LGE-SD	147.7 lm	197 lm	128 lm
	Cyan	PM2E-3LCE-SD	113.6 lm	148 lm	89 lm
	Blue	PM2E-3LBE-SD	39.8 lm	55 lm	31 lm
	Royal Blue	PM2E-3LDE-SD	875 mW	1170 mW	660 mW

Рисунок 1.10 – Оптичні властивості модифікацій світлодіода

Color	Forward Voltage V_F (V)				Thermal Resistance Junction to Slug ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
	Min.	@700mA		Refer @350mA	
		Typ.	Max.	Typ.	
White	3.10	3.50	4.10	3.10	8
Red	2.00	2.50	3.25	2.20	8
Amber	2.00	2.50	3.25	2.20	8
Green	3.10	3.80	4.35	3.30	8
Cyan	3.10	3.80	4.35	3.30	8
Blue	3.10	3.50	4.10	3.10	8
Royal Blue	3.10	3.60	4.10	3.20	8

- ProLight maintains a tolerance of $\pm 0.1\text{V}$ for Voltage measurements.

Рисунок 1.11 – Електричні властивості модифікацій світлодіода

На рис 1.12 наведені параметри спектра випромінювання та кут розходження світла для наявних модифікацій світлодіода. Граничні та максимально допустимі параметри світлодіода представлено на рис. 1.13. Фотометричні параметри для наявних кольорових варіантів модифікацій приладу наведені на рис. 1.14. На рис. 1.15 представлені колориметричні параметри модифікацій білого світлодіода згідно кольорового графіка МКО.

Color	Dominant Wavelength λ_D , or Color Temperature CCT			Total included Angle (degrees) $\theta_{0.90V}$	Viewing Angle (degrees) $2 \theta_{1/2}$
	Min.	Typ.	Max.		
White	4100 K	5500 K	10000 K	180	130
Red	613.5 nm	623 nm	631 nm	180	130
Amber	587 nm	592 nm	597 nm	180	130
Green	515 nm	525 nm	535 nm	180	130
Cyan	495 nm	505 nm	515 nm	180	130
Blue	455 nm	465 nm	475 nm	180	130
Royal Blue	450 nm	455 nm	460 nm	180	130

Рисунок 1.12 – Спектральні властивості та кут розходження світла для модифікацій світлодіода

DC Forward Current (mA)	700
Peak Pulsed Forward Current (mA)	1000 (less than 1/10 duty cycle@1KHz)
ESD Sensitivity (HBM per MIL-STD-883E Method 3015.7)	$\pm 4000V$ (Class III)
LED Junction Temperature	120°C
Operating Board Temperature at Maximum DC Forward Current	-40°C - 90°C
Storage Temperature	-40°C - 120°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3
Reverse Voltage	Not designed to be driven in reverse bias

Рисунок 1.13 – Граничні та максимально допустимі параметри світлодіода

Color	Bin Code	Minimum Photometric Flux (lm)	Maximum Photometric Flux (lm)	Available Color Bins
White	X2	218.9	249.6	All
	Y1	249.6	284.5	All
	Y2	284.5	324.5	[1]
Red	U1	87.4	99.6	[1]
	U2	99.6	113.6	All
	V1	113.6	129.5	All
	V2	129.5	147.7	[1]
Amber	V1	113.6	129.5	All
	V2	129.5	147.7	All
	W1	147.7	168.4	[1]
Green	W1	147.7	168.4	[1]
	W2	168.4	192	All
	X1	192	218.9	All
	X2	218.9	249.6	[1]
Cyan	V1	113.6	129.5	All
	V2	129.5	147.7	All
	W1	147.7	168.4	[1]
Blue	R	39.8	51.7	A, 1 [1]
	S1	51.7	58.9	A, 1 [1]
	S2	58.9	67.2	[1]

Рисунок 1.14 – Фотометричні параметри варіантів світлодіода

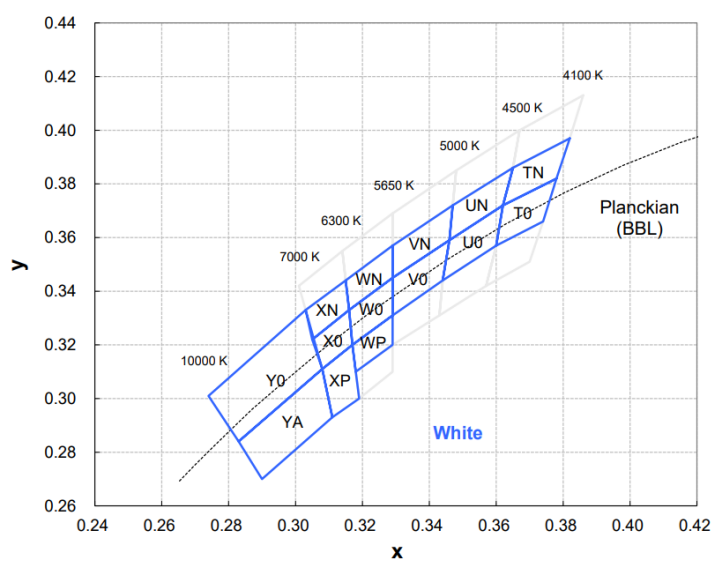
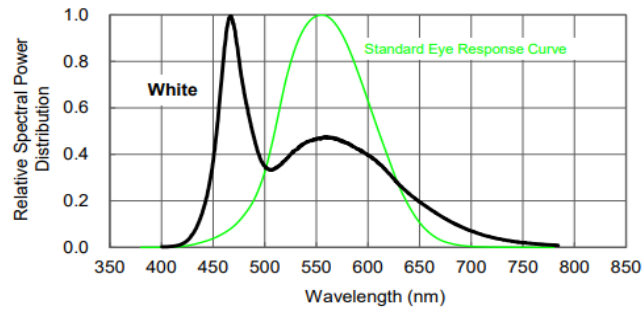


Рисунок 1.15 – Колориметричні параметри модифікацій білого світлодіода

1. White



2. Royal Blue · Blue · Cyan · Green · Amber · Red

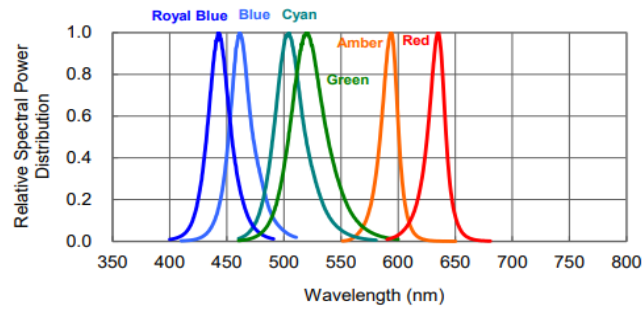


Рисунок 1.16 – Спектральні характеристики білого (зверху) та кольорових модифікацій світлодіода

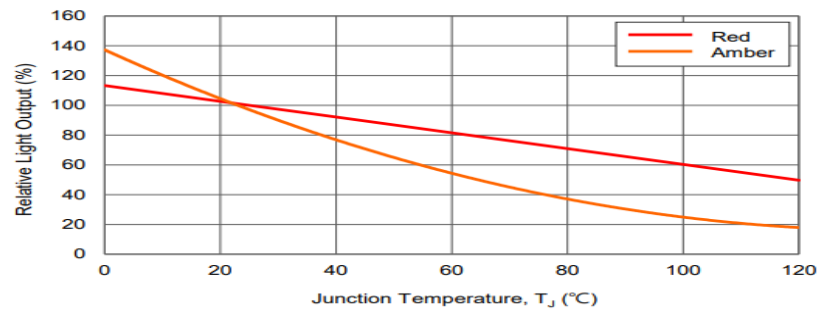
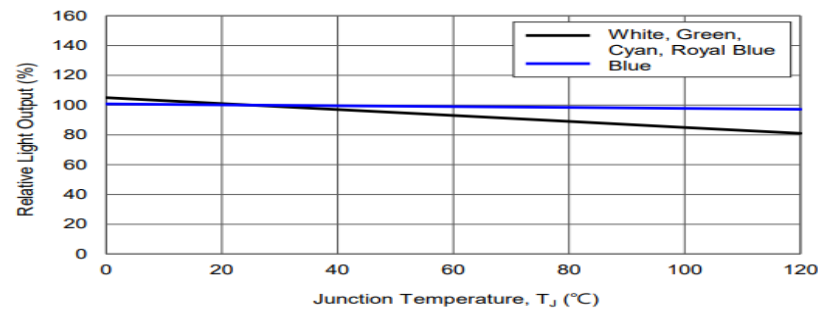
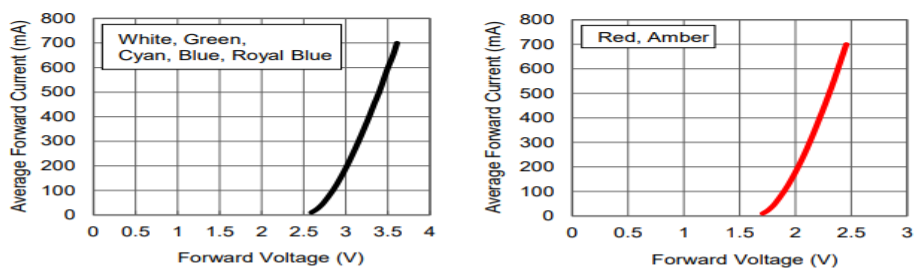


Рисунок 1.17 – Вихідні характеристики кольорових світлодіодів

1. Forward Voltage vs. Forward Current



2. Forward Current vs. Normalized Relative Luminous Flux

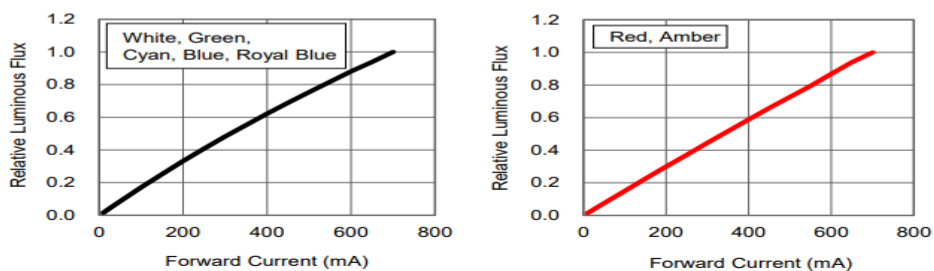


Рисунок 1.18 – Вольтамперні (верх) та яскравісні (низ) характеристики розглянутого світлодіода

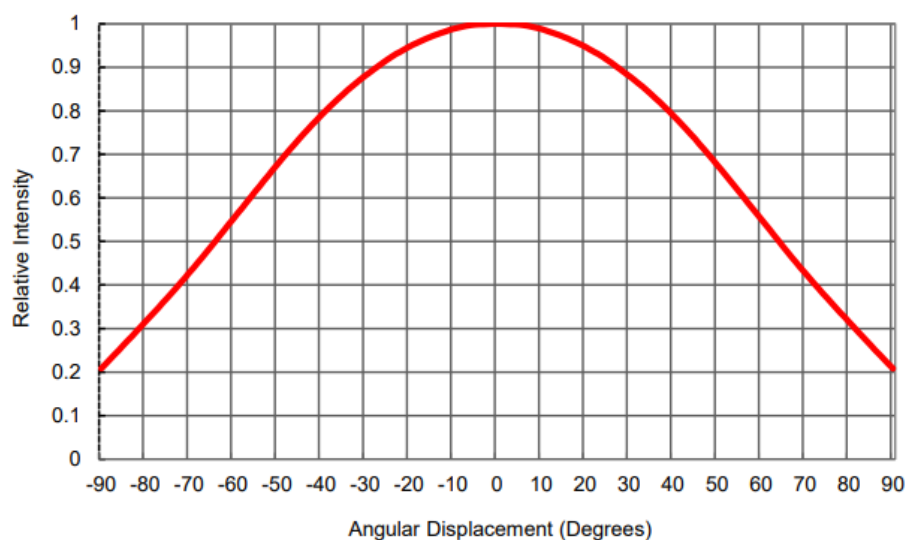


Рисунок 1.19 – Діаграма спрямованості випромінювання досліджуваного світлодіода

1.7 Плaskі електролюмінесцентні освітлювальні системи

Значно вигідніше використовувати для освітлення не точкові а розподілені випромінюючі пристрої – світлодіодні панелі. Вони мають велику площу, таким чином їх значно легше охолоджувати. Використовуючи різний розподіл випромінюючих ділянок по площині панелі ми можемо змінювати розподіл просторової щільності світлового потоку без кошовної оптики. Окрім того пласкі панелі можна виготовляти досить тонкими. За відповідних умов та матеріалу можливо зробити ці панелі гнучкими. У такому разі змінюючи геометрію панелі можна перерозподіляти світловий потік, формуючи відповідну просторову щільність світлового потоку.

LG Chem офіційно підтвердила запуск своєї нової гнучкої OLED-панелі розміром 406x50 мм [6...9], яка була вперше представлена на семінарі OLED та прес-конференцією LpS 2015 вперше для європейської громадськості.

Новий гнучкий OLED приблизно вдвічі перевищує розмір попередньої світлодіодної OLED панелі 200x50 мм. LG Chem раніше представила пластикову гнучку панель 200x50 мм, а в січні 2015 року – оголошення про цінову пропозицію зразка.

Нові 406мм x 50 мм гнучкі OLED панелі (моделі P6SD) мають товщину 0,41 мм, а термін служби – 20000 годин. Крім того, нові гнучкі панелі мають ефективність 50lm/W із CRI 85. Панелі показують однорідність світла 70% і більше по всій панелі.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

2.1 Світло та його особливості щодо розповсюдження та сприйняття

Так от, світло - це електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль від 380 до 760 мільярдних частин метра або нанометрів (скорочено нм).

Випромінювання з різною довжиною хвилі сприймаються оком по-різному: від 380 до 450 нм - як фіолетовий колір; від 450 до 480 - як синій; від 480 до 510 - як голубий; від 510 до 550 - як зелений; від 550 до 575 - як жовто-зелений; від 575 до 590 - як жовтий; від 590 до 610 - як помаранчевий; більше 610 нм - як червоний колір. Межі кольорів приблизні і у різних людей можуть дещо розрізнятися.

Білий колір - це сукупність усіх або декількох кольорів, узятих в певній пропорції. Якщо промінь білого світла пропустити через скляну призму, то він розкладеться на кольорові складові. Сукупність кольорових складових складного випромінювання називається спектром випромінювання.

Чутливість ока до випромінювання різних кольорів неодинакова - якщо на око потрапляє кольорове світло з однаковою потужністю електромагнітного випромінювання, то жовті і зелені кольори будуть здаватися набагато більше світлими, чим сині і червоні. Міжнародний комітет мір і вагів в 1933 році прийняв єдину стандартну чутливість ока до випромінювання різних кольорів для денного зору. На рис. 2.1 показана стандартизована крива спектральної чутливості ока, що називається у світлотехнічній літературі також «кривою відносної спектральної світлової ефективності».

На основі кривої спектральної чутливості ока для денного зору побудована уся система світлових величин і одиниць. Максимум кривої спектральної чутливості ока лежить в жовто-зеленій області спектру і доводиться на довжину хвилі 555 нм.

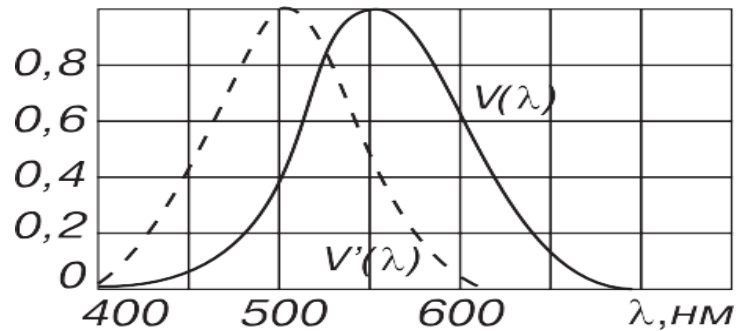


Рисунок 2.1 – Крива спектральної чутливості ока (– вдень, - - вночі)

Фізіологами і оптиками давно встановлений факт виборчої чутливості людського зору до хвиль різної довжини. У спрощеному викладі, без залучення графіків чутливості паличок і колб, це означає, що в звичайних обставинах людина добре сприймає зелений колір, дещо гірше - червоний і найгірше - синій колір.

Це фундаментальне положення фізіології зору людини, з якої виходить ряд важливих практичних наслідків. По-перше, складові кольорового зображення вносять різний вклад у відчуття яскравості. По-друге, максимальна чутливість зору людини лежить в жовто-зеленій області спектру.

2.2 Фотометричні характеристики світла

Світловий потік (Φ). Світловий потік характеризує потужність видимого випромінювання по дії на людський зір. Вимірюється в люменах (лм). Величина не залежить від напрямку. Світловий потік - це найважливіша характеристика джерел світла (рис. 2.2).

Наприклад, лампа розжарювання E27 75 Вт має світловий потік 935 лм, галогенна G9 на 75 Вт - 1100 лм, люмінесцентна T5 на 35 Вт - 3300 лм, металлогалогенная G12 на 70 Вт (тепла) - 5300 лм, світлодіодна E27 9,5 Вт (тепла) - 800 лм.

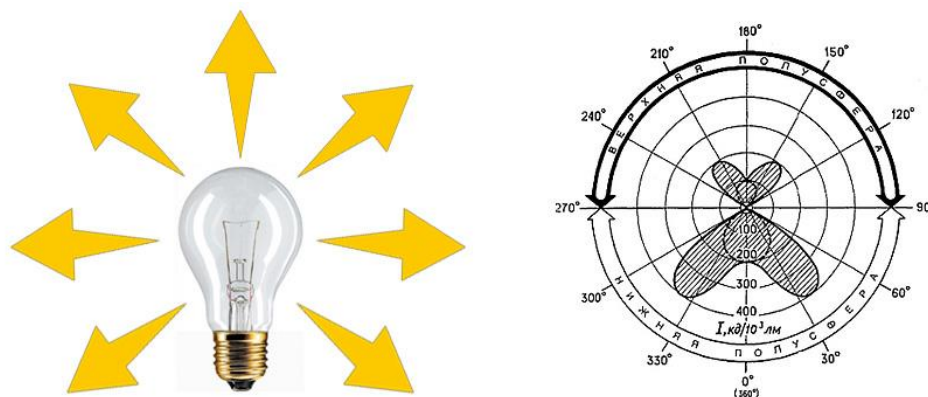
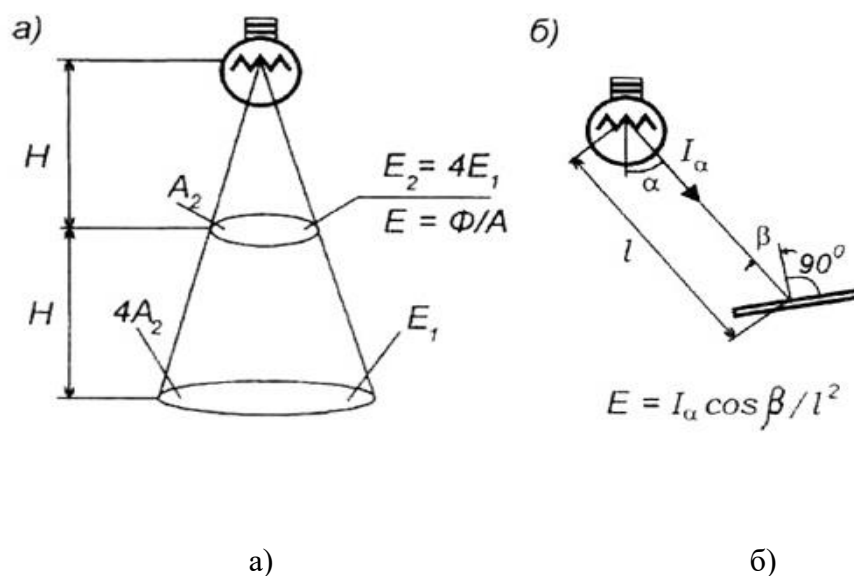


Рисунок 2.2 – Розповсюдження світла від лампи та діаграма світлової спрямованості

Люмен (лм) - це світловий потік від джерела світла (лампи) при навколишній температурі 25° , виміряною за еталонних умов.

Освітленість (E) - це відношення світлового потоку, що подає на елемент поверхні, до площі цього елемента (рис.2.3).



а) - середня освітленість на площі А, б) - загальна формула для розрахунку освітленості

Рисунок 2.3 – Пояснення до поняття освітленості

$E = \Phi / A$, де, A - площа. Одиниця освітленості - люкс (лк).

Найчастіше нормується горизонтальна освітленість (на горизонтальній площині).

Середні діапазони освітленості : на вулиці при штучному освітленні від 0 до 20 лк, в приміщенні від 20 до 5000 лк, 0,2 лк в повний місяць в природних умовах, 5000 -10000 лк вдень при хмарності і до 100 000 лк в ясний день.

Сила світла - це просторова щільність світлового потоку, обмеженого тілесним кутом. Тобто відношення світлового потоку, що витікає від джерела світла і поширюється усередині малого тілесного кута, що містить даний напрям.

$I = \Phi / \omega$ Одиниця виміру сили світла - кандела (кд).

Середня сила світла лампи розжарювання в 100 Вт складає близько 100 кд.

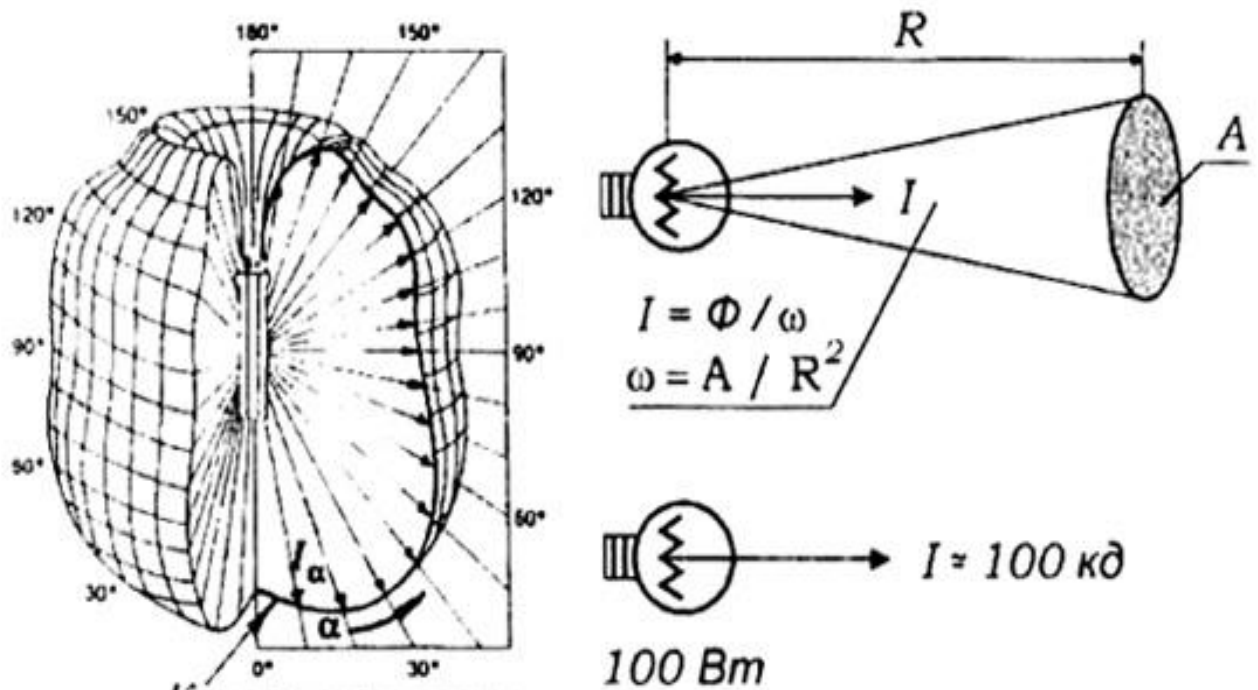


Рисунок 2.4 – Крива сили світла (просторовий розподіл сили світла) та розрахунок сили світла джерела

Крива сили світла (КСС) - розподіл сили світла в просторі, одна з найважливіших характеристик світлотехнічних приладів, необхідна для розрахунку освітлення.

Яскравість L (щільність світла) - це відношення світлового потоку, переносимого в елементарному пучку променів і що поширюється в тілесному вугіллі, до площі перерізу цього пучка.

$L=I/A$ ($L=I/\cos\alpha$) Одиниця виміру яскравості - кд/м².

Яскравість пов'язана з рівнем зорового відчуття; поширення яскравості в полі зору (у приміщенні/інтер'єрі) характеризує якість (зоровий комфорт) освітлення.

У повній темряві людина реагує на яскравість в одну мільйонну частку кд/м².

Стеля, що повністю світиться, яскравістю більш 500 кд/м² викликає у людини дискомфорт.

Яскравість сонця приблизно мільярд кд/м², а люмінесцентної лампи 5000-11000 кд/м².

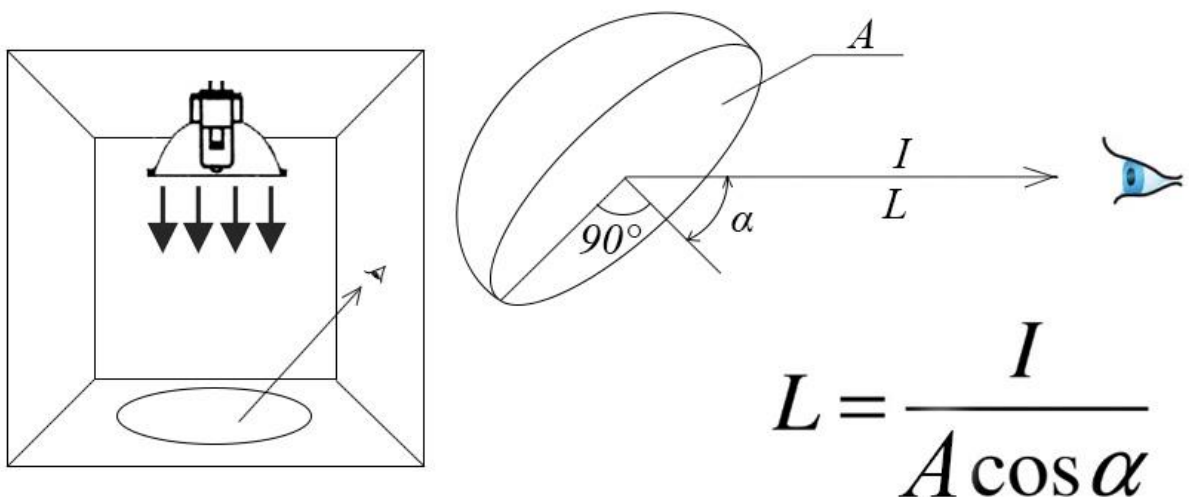


Рисунок 2.5 – Яскравість поверхні та її розрахунок

Світлова віддача джерела світла – це відношення світлового потоку лампи до її потужності.

$H = \Phi/P$. Одиниця виміру світловидатності – лм/Вт.

Це характеристика енергоекономічності джерела світла. Лампи з високою світловою віддачею забезпечують економію електроенергії. Замінюючи лампу розжарювання зі світло віддачею 7-22 лм/Вт на люмінесцентні (50-90 лм/Вт), ми зменшуємо витрати електроенергії в 5-6 разів, а рівень освітленості залишиться той же.

Колірна температура визначає колірність джерел світла і колірну тональність освітлюваного простору. Колірна температура дорівнює температурі нагрітого тіла (випромінювач Планка, чорне тіло), однакового за кольором із заданим джерелом світла.

Одиниця виміру Кельвін (К) за шкалою Кельвіна : Т - (градуси Цельсія 273) К.

Полум'я свічки – 1900 К.

Лампа розжарювання – 2500-3000 К.

Люмінесцентні лампи – 2700 - 6500 К.

Сонце – 5000-6000 К.

Хмарне небо – 6000-7000 К.

Ясний день – 10 000 - 20 000 К.

Індекс кольоровідтворення Ra характеризує міру відтворення кольорів різних матеріалів при їх освітленні джерелом світла (лампюю) при порівнянні з еталонним джерелом.

Максимальне значення індексу кольоровідтворення Ra =100.

Показник кольоровідтворення :

- Ra = 90 і більше - дуже хороша (міра кольоровідтворення 1А);
- Ra = 80-89 - дуже хороша (міра кольоровідтворення 1В);
- Ra = 70-79 - хороша (міра кольоровідтворення 2А);
- Ra = 60-69 - задовільна (міра кольоровідтворення 2В);

- Ra = 40-59 - достатня (міра кольоровідтворення 3);
- Ra = менше 39 - низька (міра кольоровідтворення 3).

Ra він же CRI - color rendering index був розроблений для порівняння джерел світла безперервного спектру, індекс перенесення кольорів яких був вищий 90, оскільки нижче 90 можна мати два джерела світла з однаковим індексом перенесення кольорів, але з передачею кольору, що сильно розрізняється.

Комфортне для ока людини значення CRI = 80-100 Ra

2.3 Нормативні параметри освітлювальних систем

Показники засліпленої і дискомфорту. Ці показники характеризують пряму сліпучу дію джерел світла (світильників). За показником засліпленої можна судити про міру погіршення видимості при роботі блескких джерел. Наприклад, при значенні показника = 100, видимість знижується на 10% , для точних виробничих робіт значення показника засліпленої має бути ≤ 20 . Показник дискомфорту (M) характеризує міру незручності або напруженості за наявності у полі зору джерел підвищеної яскравості.

Межі комфорт-дискомфорт присвоєно значення $M = 25$.

Коефіцієнт пульсації освітленості (Кп). Характеризує відносну глибину пульсації освітленості у відсотках в заданій точці приміщення при живленні ламп від мережі змінного струму (рис. 2.6). Неконтрольована пульсація освітленості призводить до підвищення небезпеки травматизму пі роботі з об'єктами, що рухаються і обертаються, а також зоровому стомленню.

У нормативах для більшості зорових робіт встановлено значення $Кп \leq 20$.

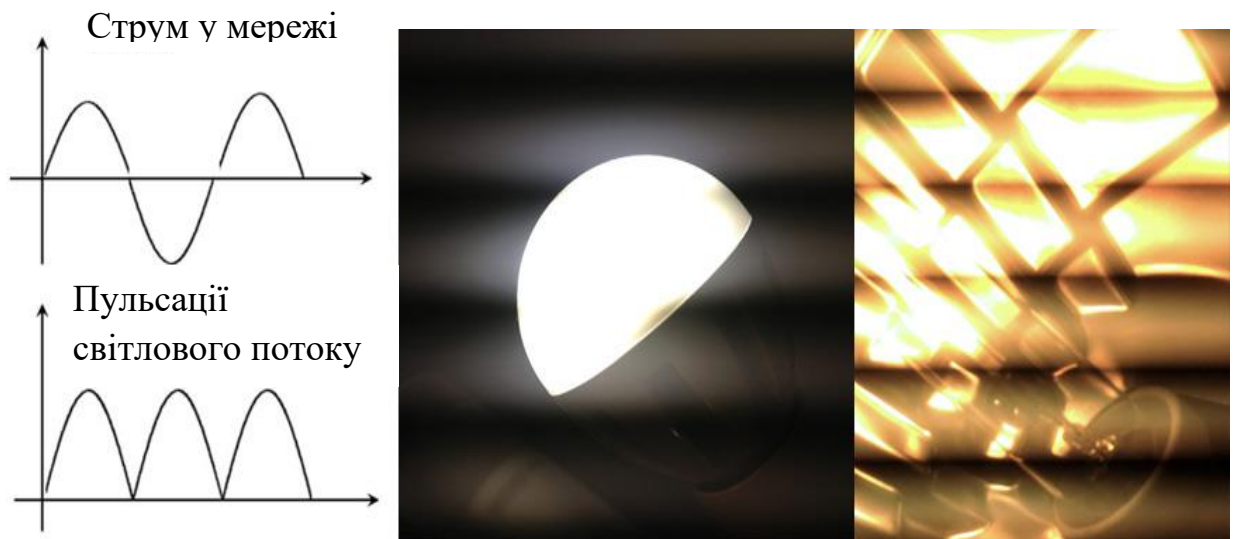


Рисунок 2.6 – Пульсації світлового потоку

Контрастність освітлення. Характеризує тіньотворюючі та моделюючі властивості освітлення (правильну передачу розмірів і форми предметів). Залежить від відношення освітленостей на різноорієнтованих площинах. Наприклад, усередині рівнояскравої сфери, усі площини якої освітлені однаковою, створюється безтіньове освітлення. Використовується декілька показників контрастності освітлення, наприклад, відношення освітленостей в горизонтальній і вертикальній площинах E_g/E_v .



Рисунок 2.7 – Пояснення поняття контрастності

Блискість - умова бачення, при якому з'являється дискомфорт або зменшення здатності бачити деталі, об'єкти або і те і інше, внаслідок несприятливого розподілу яскравості, або діапазону яскравості, або екстремальних контрастів в просторі.

Блискість ділять зазвичай на пряму і відбиту:

– пряма блискість виходить безпосередньо від джерела світла (неприкрита лампа), непряма - спостерігається на освітлюваних поверхнях. Явище осліплення супроводжується роздратуванням і різью в очах, головними болями. Гігієнічно допустима яскравість поверхонь, що відбивають світло, - до 0 75 сб / стильб. При цьому створюються об'єктивні умови для травматизму.

– відбита блискість - характеристика відображення світлового потоку від робочої поверхні у напрямі очей працюючого, определяющая зниження видимості внаслідок надмірного збільшення яскравості робочої поверхні і вуалювальної дії, що знижує контраст між об'єктом і фоном.

Блискість ділять на сліпучу і дискомфортну:

– сліпуча – порушує видимість об'єктів, але не викликає дискомфорт;
 – дискомфортна – викликає неприємні відчуття, але не погіршує видимість.

Створюється на робочому місці при відображенні світла яскравих джерел блискучими поверхнями (екран комп'ютера, глясовий папір, картини і т. п.). Характеризується значенням максимально допустимої яскравості.

Наприклад, поверхні, які можуть бути видні при відображенні від екрану комп'ютера, не повинні мати яскравості вище 200 кд/м².

Рівномірність (освітленості / яскравості). Коефіцієнт співвідношення мінімальної величини освітленості (яскравості) до середньої величини освітленості (яскравості) на цій поверхні $E_{\min}/E_{\text{середн}}$ ($L_{\min}/L_{\text{середн}}$).

Захисний кут (для джерел світла світильника). Кут між горизонтом і положенням ока, при якому стає видно джерело світла (рис. 2.8).

Захисний кут обчислюють за формулою:

$$\alpha_z = (180/\pi)\text{arctg}(h/d),$$

де h - відстань від поверхні джерела, що світиться, світла до площини, що проходить через вихідний отвір освітлювального приладу;

d - відстань по горизонталі від основи висоти h до краю вихідного отвору освітлювального приладу.

Очевидно, що чим більше захисний кут, тим ближче потрібно буде підійти до світильника, щоб побачити джерело світла, що безпосередньо світиться.

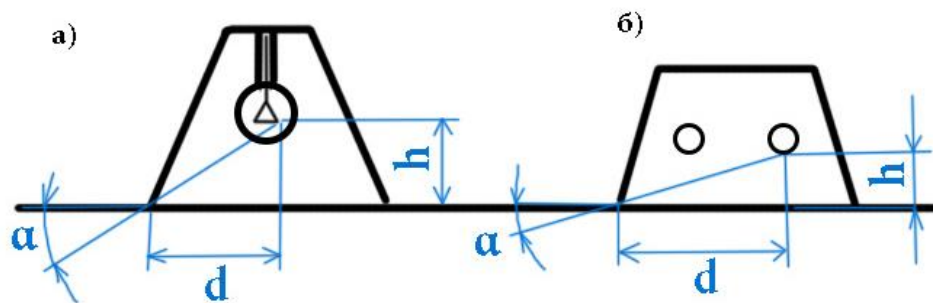


Рисунок 2.8 – До розрахунку захисного кута

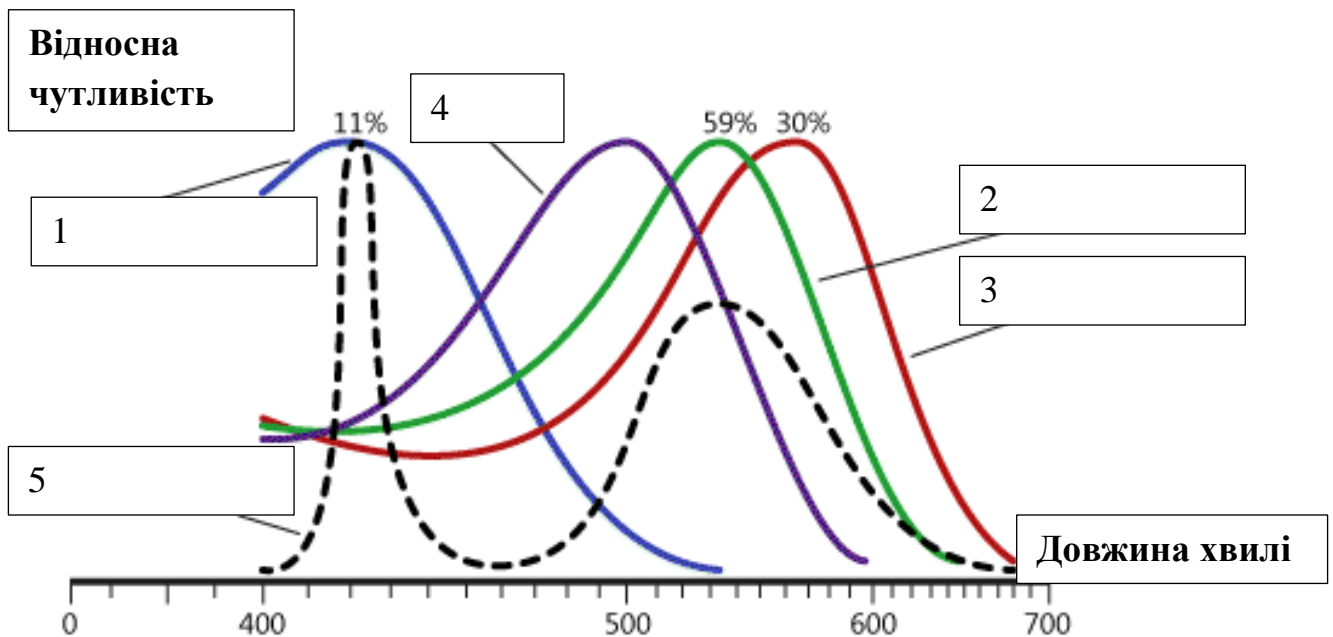
Кут прямого виходу (для світильників). Кут між вертикальною віссю світильника і точкою, в якій стає не видно джерело світла і робочі поверхні світильника з високою яскравістю.

Термін служби. Час горіння лампи до виходу її з ладу або до того, як вона вважається такою, що не відповідає нормам, встановленим технічними правилами (годин).

Робочий ККД світильника. Відношення загального світлового потоку світильника, виміряного в певних практичних умовах з його власними лампами і компонентами, і сум світлових потоків кожної з тих же ламп, коли вони працюють поза світильником з тими ж компонентами за певних умов.

2.4 Візуальна чутливість різних джерел випромінювання

Спектр випромінювання джерел, які входять у систему освітлення, повинен, за можливості, бути пристосований до сприйняття людським оком (рис. 2.9). З графіків видно, що спектр випромінювання білого світлодіоду суттєво не співпадає з графіками чутливості рецепторів людини



1 – спектр чутливості синьої колбочки, 2 – спектр чутливості зеленої колбочки, 3 – спектр чутливості червоної колбочки, 4 – спектр чутливості сірої колбочки, 5 – спектр випромінювання білого світлодіода

Рисунок 2.9 – Спектри чутливості чотирьох видів рецепторів людського ока та спектр випромінювання білого світлодіода

Для адекватного оцінювання джерел світла використовують різні параметри. Найбільш важливі технічні параметри для деяких вживаних джерел наведені у таблиці 2.1. Параметри візуальної яскравості та пов'язані з нею наведені у таблиці 2.2. У таблиці використовуються наступні позначення:

– E_e – енергетична яскравість, Вт/м²;

- B_v – видима (візуальна) яскравість, кд/м²;
- $B_v(100\text{Вт})$ – видима (візуальна) яскравість лампи розжарювання 100Вт;
- K_v – коефіцієнт відносного спектрального розподілу щільності енергетичної яскравості;
- Φ – світловий потік, лм.

Таблиця 2.1 – Порівняння різних джерел світла

Параметри	ЛОН	MR	ЛБ	ЛДЦ	ДРЛ	КГ	ДНАТ	LED
Ефективність, лм/Вт	8...13	16...22	60...100	50...70	45...60	60...100	90...130	50...120
Ресурс, тис. годин	1	2	6...15	8	15	6...10	15	50...100
Індекс кольоровідтворення	100	100	50...90	80...85	40...55	65...90	19...21	75...100
Кольорова температура, К	2500... 2900	2700... 4000	2700... 6500	2700... 6500	4000... 4500	3000... 6000	~2000	2600... 10000
Екологічність	+	+	- Ртуть	- Ртуть	- Ртуть	-	-	+
Пульсації	нет	нет	55..60%	65..75%	65..75%	до 100%	80% и более	ні
Робота при температурі менше 0	так	так	ні	ні	так	так	так	так
Час включення	менше 1 с	менше 1 с	до 10 хв.	до 10 хв.	до 10 хв.	до 10 хв.	5...7 хв.	менше 1 с

Низька чутливість зору в синьому діапазоні видимого спектру добре пояснює те, що синє забарвлення фону у більшості випадків вдало поєднується з кольоровими діапозитивами різного змісту і колірної гамми. Ідеальні умови для сприйняття документу дає друк чорного шрифту на білому фоні. Якщо шрифт білого кольору нанести на синій фон, то в силу відміченої обставини фонова частина зображення частково загубиться. В результаті домінуватиме шрифт або інші фрагменти зображення з іншим забарвленням.

Виборча чутливість зору є експериментально підтвердженим фактом. Більше того, дослідники в області психології зорового сприйняття провели численні тести для отримання кількісних оцінок вкладів окремих кольорних

складових. Встановлено, що для більшості людей долі колірних координат розподіляються таким чином: 59% зелений, 30% червоний і 11% синій колір. Іншими словами, якщо відомі яскравості зеленій, червоній і синій складових, то сумарну яскравість не можна отримати простим підсумовуванням.

Її слід обчислювати за формулою:

$$\text{Візуальна яскравість} = 0,59 * \text{Зелений} + 0,3 * \text{Червоний} + 0,11 * \text{Синій}$$

Таблиця 2.2 – Візуальна яскравість різних джерел світла [3]

Тип	Вс x Кв	Vv/ Vv(100Вт)	Vv, кд/м ²	Ф, лм
Лампа розжарювання 40 Вт	400 x 0,2855	0,27	114,2	400
Лампа розжарювання 60 Вт	780 x 0,2855	0,52	222,69	780
Лампа розжарювання 100 Вт	1500 x 0,2855	1	428,25	1500
Люмінесцентна лампа 40 Вт	3350 x 0,0664	0,52	222,44	786
Білий світлодіод 15 Вт	705 x 0,4468	0,74	315	1103
Світлодіод SA-TIGER-1240U 8Вт	1240 x 0,7931	2,29	983,44	3435
Білі світлодіоди світильника 60 Вт	2820 x 0,4468	2,94	1259,98	4410

3 НАНОЕЛЕМЕНТИ У СИСТЕМАХ ОСВІТЛЕННЯ

3.1 Нанорозмірна сітка для підвищення випромінювальної здатності

Світлодіоди і раніше, і тепер набувають широкого використання у різноманітній побутовій електроніці. Справжня революція має місце у системах освітлення, побутових, промислових та вуличних. Вчені з університету Принстону запропонували вельми ефективний метод, що забезпечує суттєве підвищення вихідних характеристик світлодіоду: яскравості, енергоефективності та просторового розподілу світла [12]. Сітка, яка формується на поверхні кристалу (рис. 3.1), має нанорозмірну структуру.

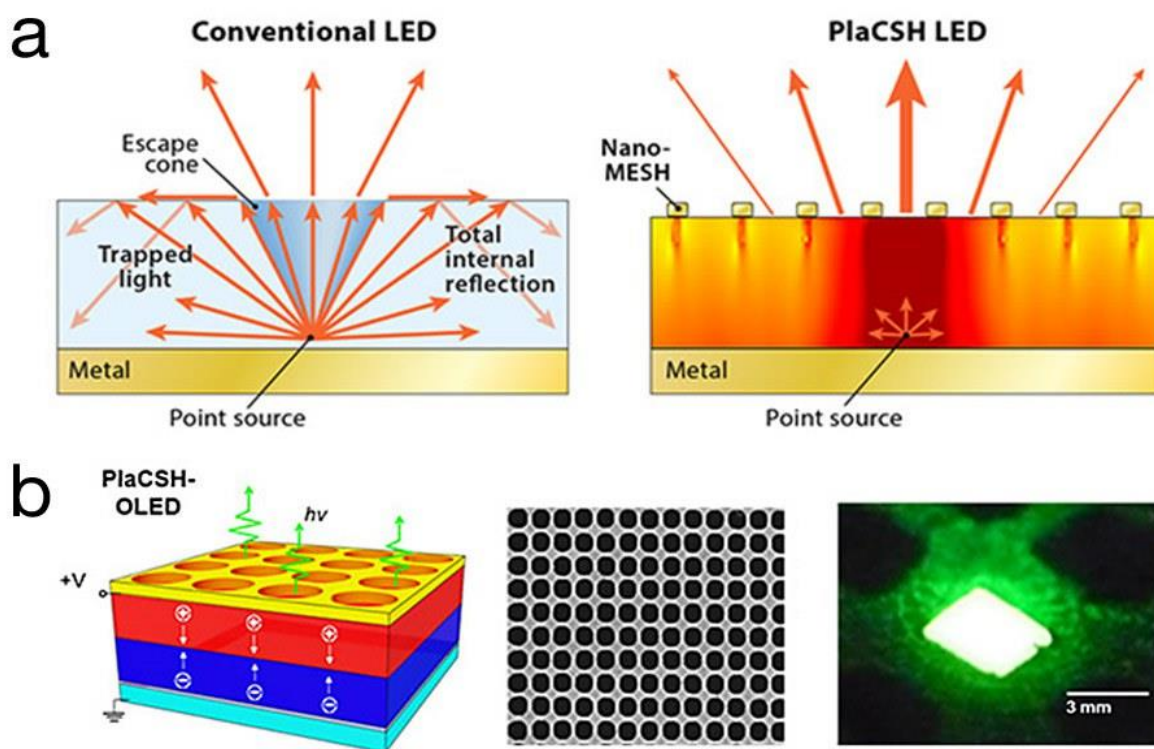


Рисунок 3.1 – Звичайний світлодіод та елемент з наносіткою PlaCSH LED

Завдяки дуже малим розмірам отворів цієї структури та відповідно до фізичних законів змінюється співвідношення коефіцієнтів заломлення середовищ, світло отримує можливість виходити з кристалу для більшого діапазону кутів падіння. Цей ефект значно (більше ніж 50 відсотків) збільшив силу світла та ефективність органічних світлодіодів (зокрема сформованих на гнучких підкладках на основі вуглецю). Також є інформація від вчених, що цей метод зможе працювати і у звичайних світлодіодах, вироблених з неорганічних матеріалів, зокрема на основі гетероструктур InGaN/GaN, що дуже широко використовуються сьогодні у світлодіодних стрічках..

Кристал звичайного світлодіода не може випустити значну частину випромінювання, особливо у разі планарної конструкції. Запропонована конструкція, яку назвали «плазмонічна порожнина із субхвильовими дірковими ґратами (PlaCSH)», відкриває можливість для виходу випромінювання назовні навіть за умови закритичного кута падіння променя на поверхню розділу.

Система PlaCSH побудована таким чином, що на поверхні шару світловипромінюючого матеріалу, який зазвичай має товщину десь 100 нм, методами мікролітографії наносять тонку металеву плівку товщиною 15 нанометрів. Саме ця плівка, що має розмір отворів завбільшки 200 нанометрів та товщину металевих стінок близько 20 нанометрів, є основною функціональною частиною. Картина працюючого експериментального світлодіода наведена поряд праворуч, що демонструє відмінні випромінювальні властивості.

Поставивши своєю метою підвищення випромінювальних властивостей LED-структури, американські вчені ґрунтовно підійшли до вирішення досить складної проблеми. Але, як відомо з фундаментальних закономірностей електроніки, поверхневі ефекти дозволяють змінювати внутрішні властивості речовини, зокрема електрофізичні (ширину забороненої зони, діелектричну проникність тощо) та оптичні (коефіцієнт заломлення). Періодичні структури (так звані надрешітки), розташовані у тонкому шарі, також мають властивість змінювати вказані вище параметри напівпровідникових матеріалів.

У даному випадку проблема стосувалась саме планарних тонкоплівкових конструкцій, призначених для використання на полімерних підкладках, у тому числі прозорих та гнучких.

Якщо повернутись у недалеке минуле, то перші випромінюючі діоди мали дуже низький ККД, не більше 1 відсотки. Додатково до цього, вони мали вкрай малий коефіцієнт виводу випромінювання назовні – не вище 4 відсотків.

Враховуючи на те, що світло, що генерується світлодіодом, залишається всередині, поглинається та перетворюється на тепло, ефективність перших світлодіодів не досягала навіть показників лампи розжарювання. До того ж нагрів світлодіоду завдяки внутрішньому поглинанню пришвидшував деградацію активної області випромінювача на суттєво зменшував час його експлуатації.

На шляху підвищення ефективності випромінювальних структур велика кількість експериментів була виконана з формою кристалу, але обробка складної багатосарової структури механічним шляхом, або навіть з використанням методів мікролітографії, значно підвищила вартість отриманих структур.

Наступним кроком уперед була знайдена з часом лінзоподібна форма пластикового корпусу, який формувався навколо звичайного плаского випромінюючого елемента. Такий корпус виконував подвійну функцію – захищав напівпровідник від впливу зовнішнього середовища та створював фокусуючу систему, що формувала невеликий кут розсіювання світла та підвищувала вихід світла назовні до декількох десятків відсотків.

Ще один крок – маленький плаский кристал припаювався у фокусі алюмінійового дзеркала, яке формувалось для відводу залишкового тепла і, одночасно, для додаткового фокусування світла з кристалу.

Наведені рішення на сьогодні реалізовані у більшості світлодіодів, що виготовляються для широкого використання.

Що ж стосується випромінюючих елементів світлодіодних екранів, то тут складнощів було ще більше. До вже згаданих проблем додалися нові: низька

контрастність зображення за рахунок проникнення світла у сусідні комірки, відбиття зовнішнього світла шарами випромінювальної структури тощо.

Представлене американськими вченими рішення, безпосередньо пов'язане з нанотехнологіями, позначене як PlaCSH (плазмонічна порожнина із субхвильовими дірковими ґратами). Результати досліджень сформованої конструкції дають можливість сказати, що винахід збільшив ефективність виведення випромінювання вище 60%, що значно краще показників комерційних світлодіодів відповідних категорій. Додатково вище наведена структура дозволила збільшити контраст (порівняна яскравість в умовах зовнішнього освітлення) більше ніж у 5 разів.

Разом з іншими перевагами нові світлодіодні структури значно зменшили тепловиділення, що призвело до збільшення у декілька разів терміну використання.

В цілому технологія виготовлення PlaCSH структури досить проста та має низьку вартість.

3.2 Наноструктури GaN на графеновій плівці

Унікальні можливості продемонструвала підкладка з наноструктурного матеріалу – графену. Вона дозволяє нарощувати на поверхні тонкі нанорозмірні випромінюючі плівки GaN. Такі структури можуть витримати багаторазові згини без пошкодження плівки та її функціональних властивостей.

Для переносних мобільних телефонів, годинників, інформаційних дисплеїв дуже важливим є матеріал саме з такими властивостями. На його основі за використанням сучасних технологічних процесів будуть виготовлені гнучкі кольорові екрани з пікселями розміром у декілька мікрометрів. Такі структури забезпечать можливість перейти на наступний рівень роздільної здатності, яскравості та контрастності.

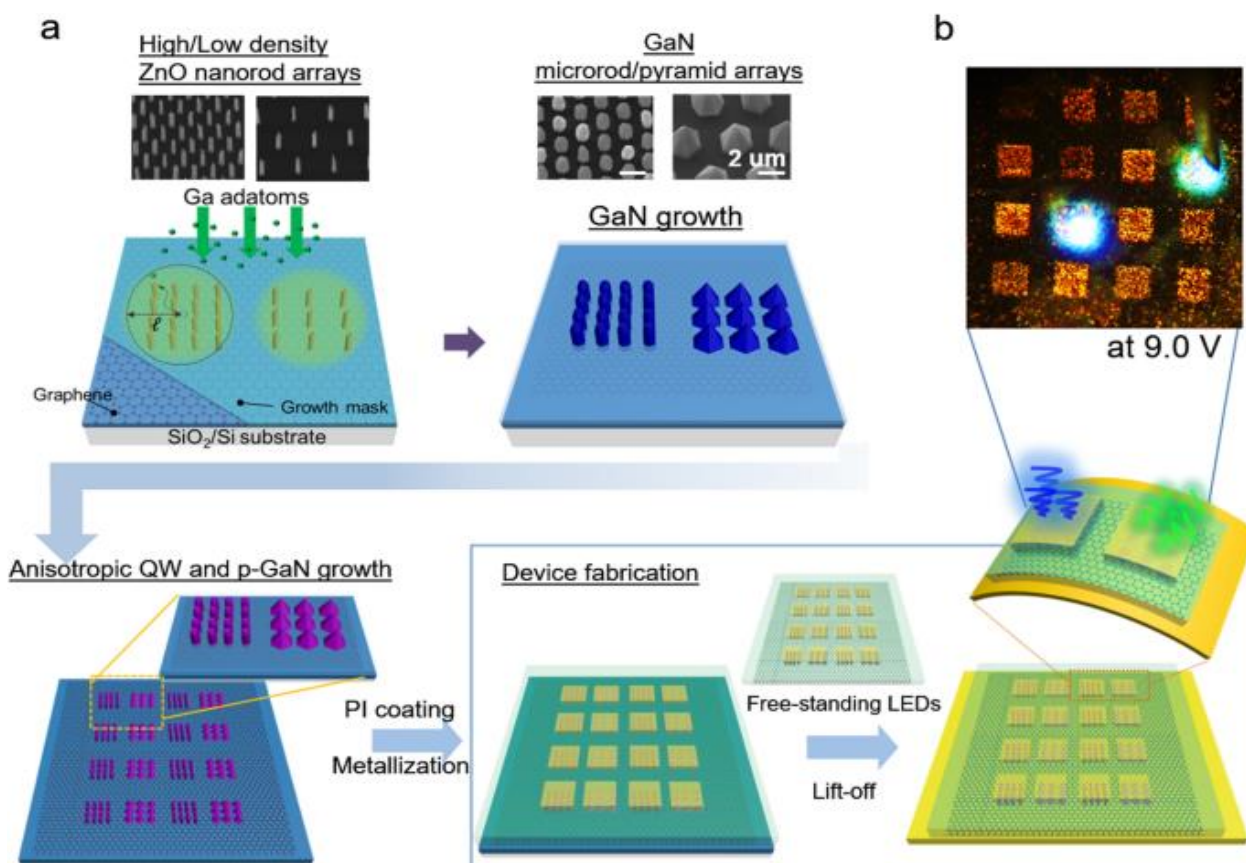
Двовимірні структури світловипромінюючих діодів (LED) на гнучкій підкладці, інтегровані з шарами струморозподільчих мереж були розроблені та виконані на основі технологічного процесу з керованим вирощуванням на графеновій плівці окремих мікроелементів GaN. Використовувалась технологія хімічного осадження з парової фази (CVD) [13, 14]. У якості літографічного шаблону для вирощування наноструктур GaN попередньо формували наноструктурні шаблони з ZnO, що регулювали топологію випромінюючих мікроелементів. Отримані зразки, етапи технологічного процесу вирощування двох типів структур (мікрострижні та мікропіраміди) різних геометричних розмірів на підкладках з графену докладно представлені на рис. 3.2, 3.3, 3.4.

Проведений процес оптимізації заданих попередньо технологічних параметрів формування дозволив одночасно вирощувати різні геометричні структури з матеріалу GaN.

Далі йшло формування одночасно трьох варіантів квантових ям задля забезпечення випромінюючих елементів відповідних кольорів. При цьому використовувалась досить розповсюджена оптоелектронна структура InGaN/GaN відповідного типу легування, що наносилась пошарово. Таким чином була виготовлена монолітна матриця світлодіодів трьох кольорів у одному технологічному циклі.

Наступним технологічним етапом було створення шарів та p-GaN та металізація на основі мідної фольги на полімерній плівці.

Подальші експерименти з отриманою тонкоплівковою структурою, спрямовані на дослідження механічної міцності, продемонстрували високу стійкість до зовнішніх навантажень. При цьому навіть після багаторазового вигинання екран продемонстрував високу та стабільну випромінювальну здатність до електролюмінесценції без втрати потужності.



а - схематична ілюстрація формування шаблону наноструктур ZnO, монологітного інтегрованого зростання масивів мікрострижнів та мікропірамід GaN на графеновій плівці CVD та виготовлення гнучких світлодіодів (LED), б - фотографія випромінювання світла від вбудованих мікро-світлодіодів при доданій напрузі 9,0 В

Рисунок 3.2 – Гнучкі структури світлодіодів різних кольорів на основі наноструктурних елементів GaN

Тонкий шар металу Cu при цьому наносився для створення електричних контактів гнучких стрічок світлодіодів.

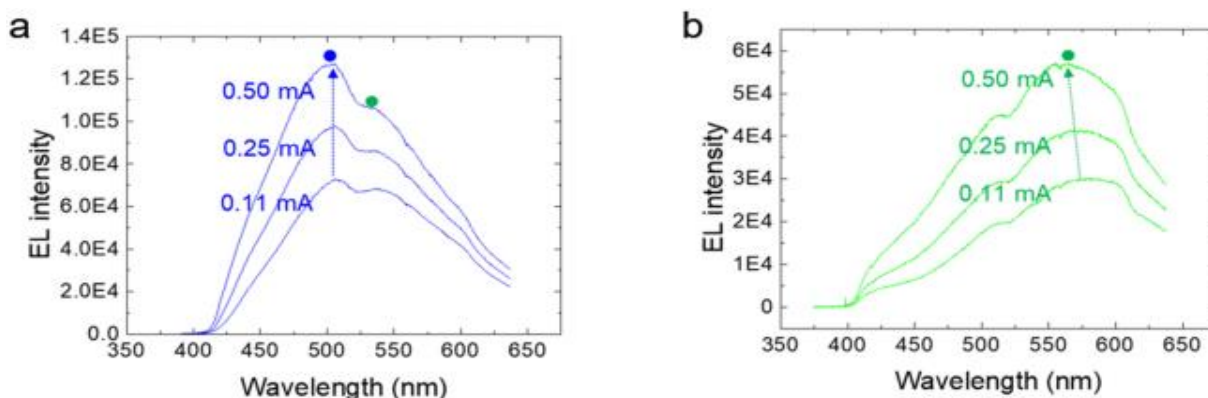


Рисунок 3.3 – Розподіли залежності спектральної сили світла від довжини хвилі випромінювання світлодіодів на основі мікрострижнів (а) та мікропірамід (б)

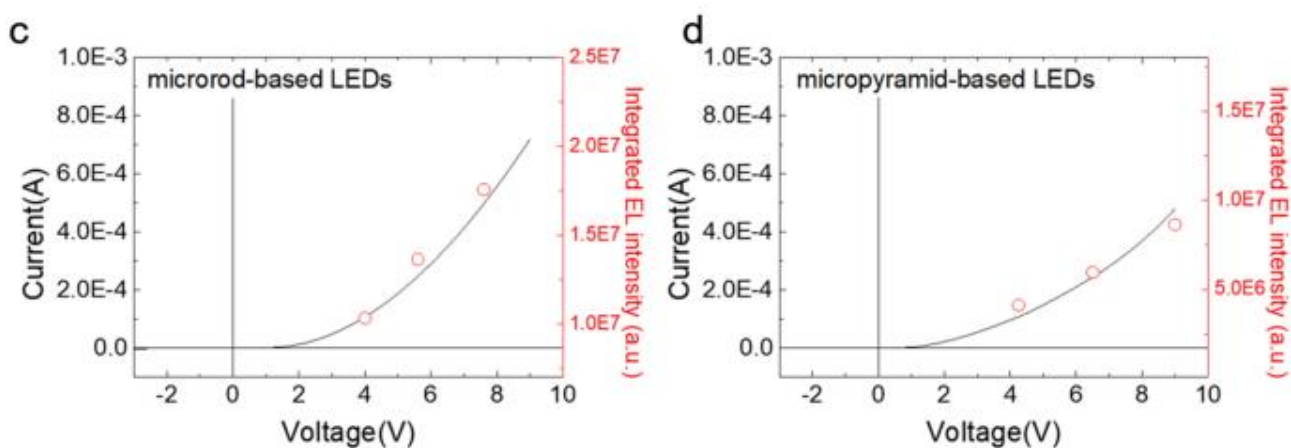


Рисунок 3.4 – Вольтамперні характеристики світлодіодів на базі мікрострижнів (с) та мікропірамід (д)

Експерименти з монолітними плівками сформованих матриць багатокольорових мікроскопічних світлодіодів на графенових підкладках підтвердили високу механічну міцність, експлуатаційну довговічність та стабільну випромінювальну здатність.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНІЧНОГО ВИПРОМІНЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА

4.1 Вибір послідовності шарів випромінювача

У відповідності з завданням потрібно виконати розрахунки тонкоплівкового світлодіодного пристрою з наступними характеристиками: ККД вище 50%, товщина не більше 0,1 мм, напруга живлення 220В, 50Гц, світловий потік 1000 лм, площа 0,5 кв. м. Також потрібно дослідити вплив розміру окремих шарів структури на випромінювальні характеристики пристрою.

Для розрахунку було вибрано структуру ITO/NPD/Alq3/TPBi/Bphen/LiF/Al (рис. 4.1) на основі базового активного шару Alq3 [15...18].

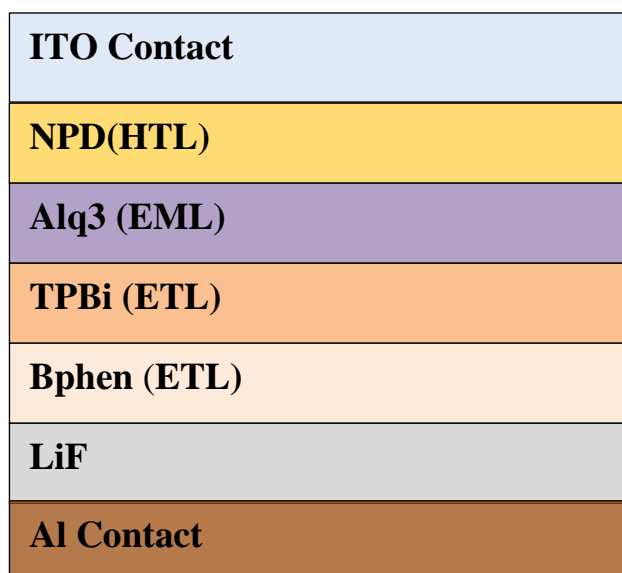


Рисунок 4.1 – Структура багатошарового органічного світлодіоду, що моделюється

Анод виготовлено з провідного антивідбивного шару ITO на скляній підкладці.

На нього нанесено шар транспортування дірок (HTL) який складається з NPD (N,N'-Di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine $C_{44}H_{32}N_2$).

Для нього вибрано матеріал Alq3 (Тріс-(8-гідроксихінолін)алюміній [18].

Далі маємо шар транспортування електронів (ETL), для якого використано матеріал TPBi (2,2',2''-(1,3,5-Benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole).

Далі нанесено додатковий шар транспортування дірок (HTL) який складається з Vphen (Bathophenanthroline)

Наступним є погоджуючий провідний шар шар LiF

Катод виготовлений з алюмінію Al.

Вказана послідовність шарів забезпечує добрі умови транспортування та рекомбінації носіїв заряду у структурі [19...24] .

4.2 Результати моделювання тонкоплівкового OLED

Виконуємо моделювання випромінюючого елемента пристрою на базі органічного світловипромінюючого діоду з 4 активними шарами.

Для моделювання застосовано програму gprdm (рис. 4.2).

Послідовність шарів структури ITO/NPD/Alq3/TPBi/Vphen/LiF/Al на скляній підкладці:

- ITO Contact , 100 нм ;
- NPD (HTL), 20...120 нм (базова товщина 40 нм);
- Alq3 (EML), 20...160 нм (базова товщина 40 нм);
- TPBi, 40 нм;
- Vphen, 0,5 нм;
- LiF, 50 нм;
- металевий шар Al, 50 нм.

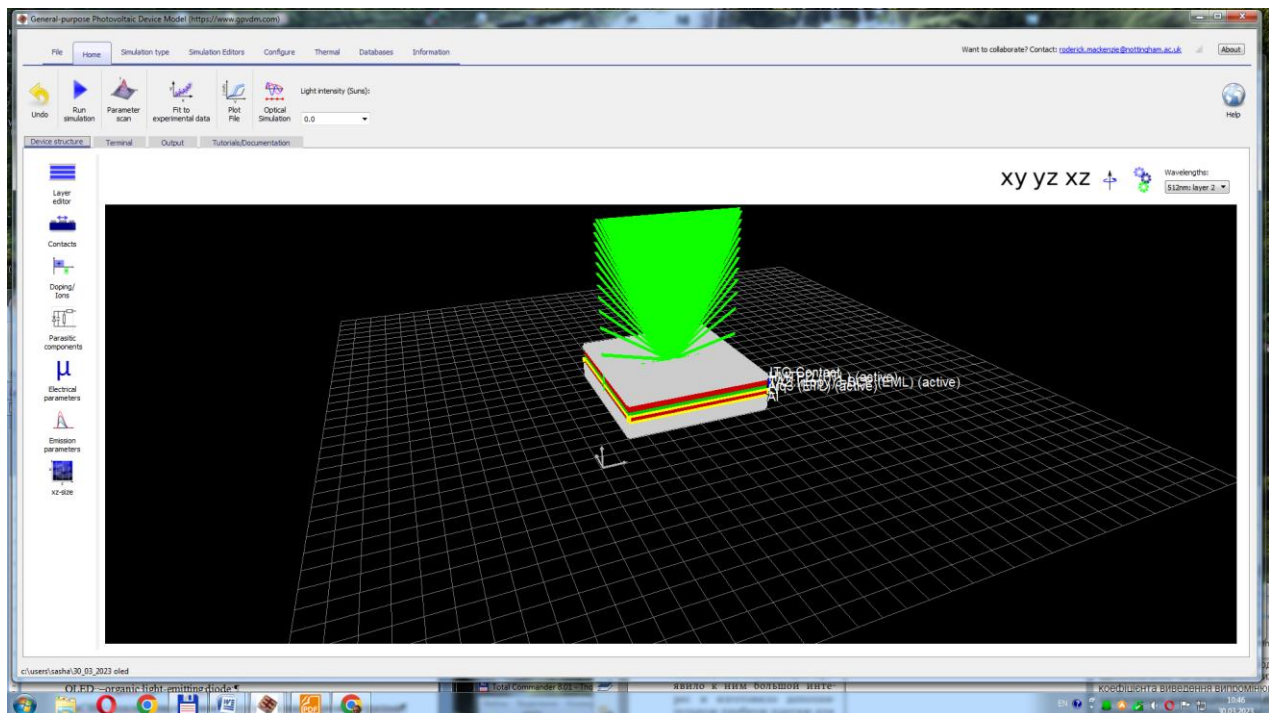


Рисунок 4.2 – Вікно програми gprdm

Структура моделі, що розраховується, наведена на рисунку 4.3.

Напруга, що прикладена до світлодіода, змінювалась у діапазоні 0...5 В.

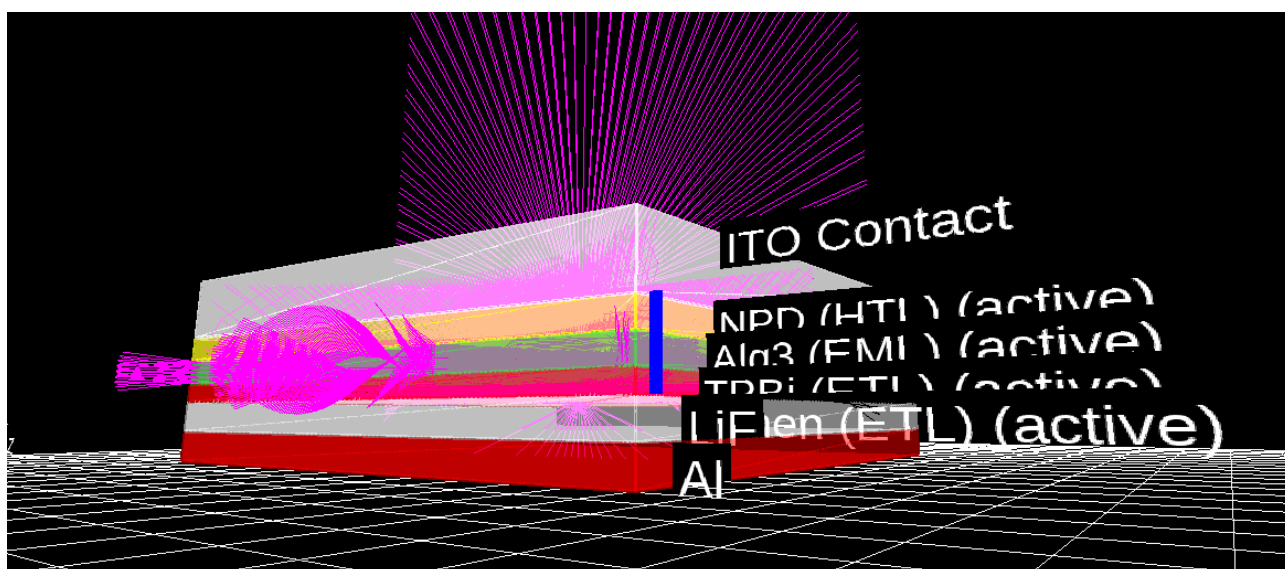


Рисунок 4.3- Вигляд послідовності шарів активної частини випромінювача

Для розрахунку вибраної структури потрібно задати електричні параметри кожного шару. Наведемо необхідні параметри для першого активного шару NPD:

- Electron mobility $\mu_e = 1 \cdot 10^{-05} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$;
- Hole mobility $\mu_p = 1 \cdot 10^{-05} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$;
- Effective density of free electron states (300K): $5 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$;
- Effective density of free hole states (300K): $5 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$;
- Recombination rate constant $n_{\text{free}} \text{ to } p_{\text{free}} = 0$;
- X_i , 2.6 eV ;
- E_g , 3.3 eV;
- $\epsilon = 3.0$.

У результаті виконаного моделювання отримані електричні та оптичні характеристики зазначеного фотоперетворювача.

На рис. 4.4 наведено оптичну емісійну характеристику (спектр випромінювання) базової структури. На рис 4.5 представлено розподіл спектральних складових по напрямкам випромінювання ($0 \dots 180^\circ$)

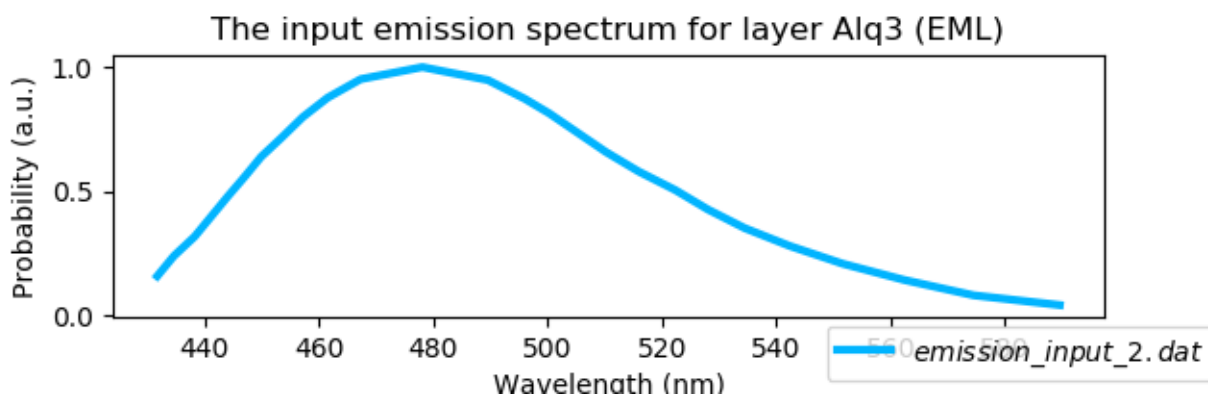


Рисунок 4.4 – Спектр випромінювання запропонованої структури

Зміна товщини активних шарів NPD (HTL) 20...120 нм (базова товщина 40 нм) та Alq3 (EML) 20...160 нм (базова товщина 40 нм) не призвела до суттєвої зміни спектру випромінювання та розподілу спектральних складових по

напрямам випромінювання, тому немає сенсу наводити результати цих розрахунків для інших варіантів.

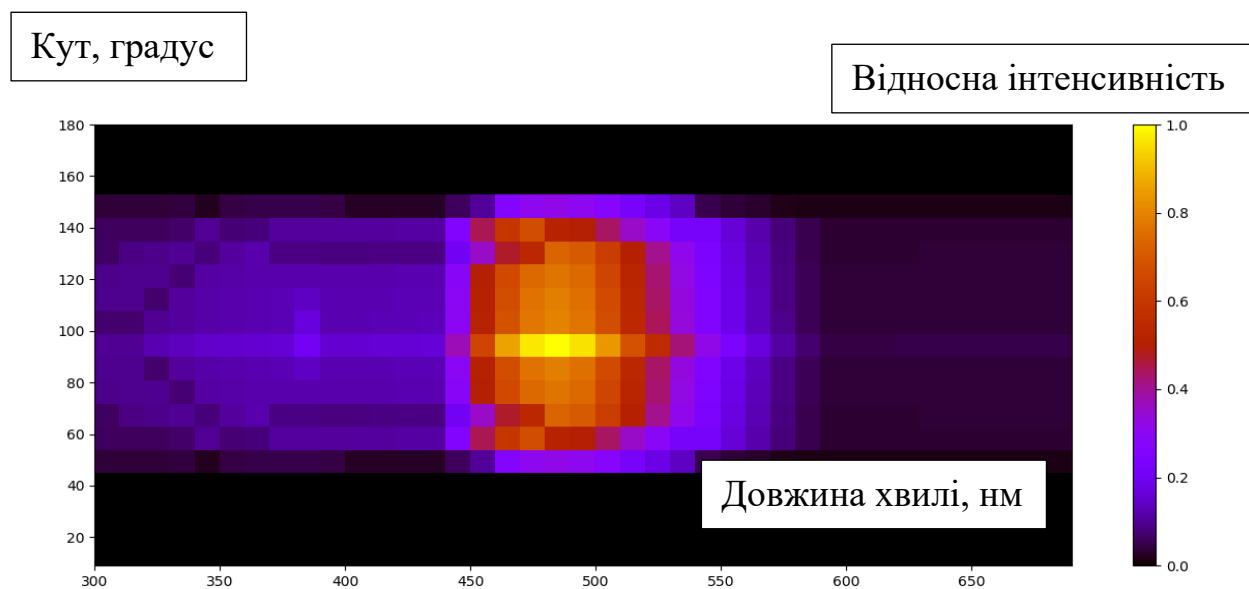


Рисунок 4.5 – Розподіл спектральних складових по напрямкам випромінювання

Як показало моделювання, від залежності ймовірності випромінювання від довжини хвилі λ з цього шару суттєво залежить від значень d_{Alq3} (товщини випромінюючого шару Alq3), розрахунки виконувались для величин 20...160 нм. Також від цієї залежності суттєво змінюється зі зміною d_{NPD} (товщини діркового транспортного шару NPD), розрахунки виконувались у діапазоні значень d_{NPD} у межах 20...120 нм.

Графіки залежності ймовірності випромінювання P_e світлодіодної структури від довжини хвилі для різних d_{Alq3} представлені на рис.4.6.

Графіки залежності кутового розподілу інтенсивності випромінювання для різних d_{Alq3} наведені на рис. 4.7.

Графіки залежності ймовірності випромінювання P_e світлодіодної структури від довжини хвилі для різних d_{NPD} представлені на рис.4.8.

Графіки залежності кутового розподілу інтенсивності випромінювання для різних d_{NPD} наведені на рис. 4.9.

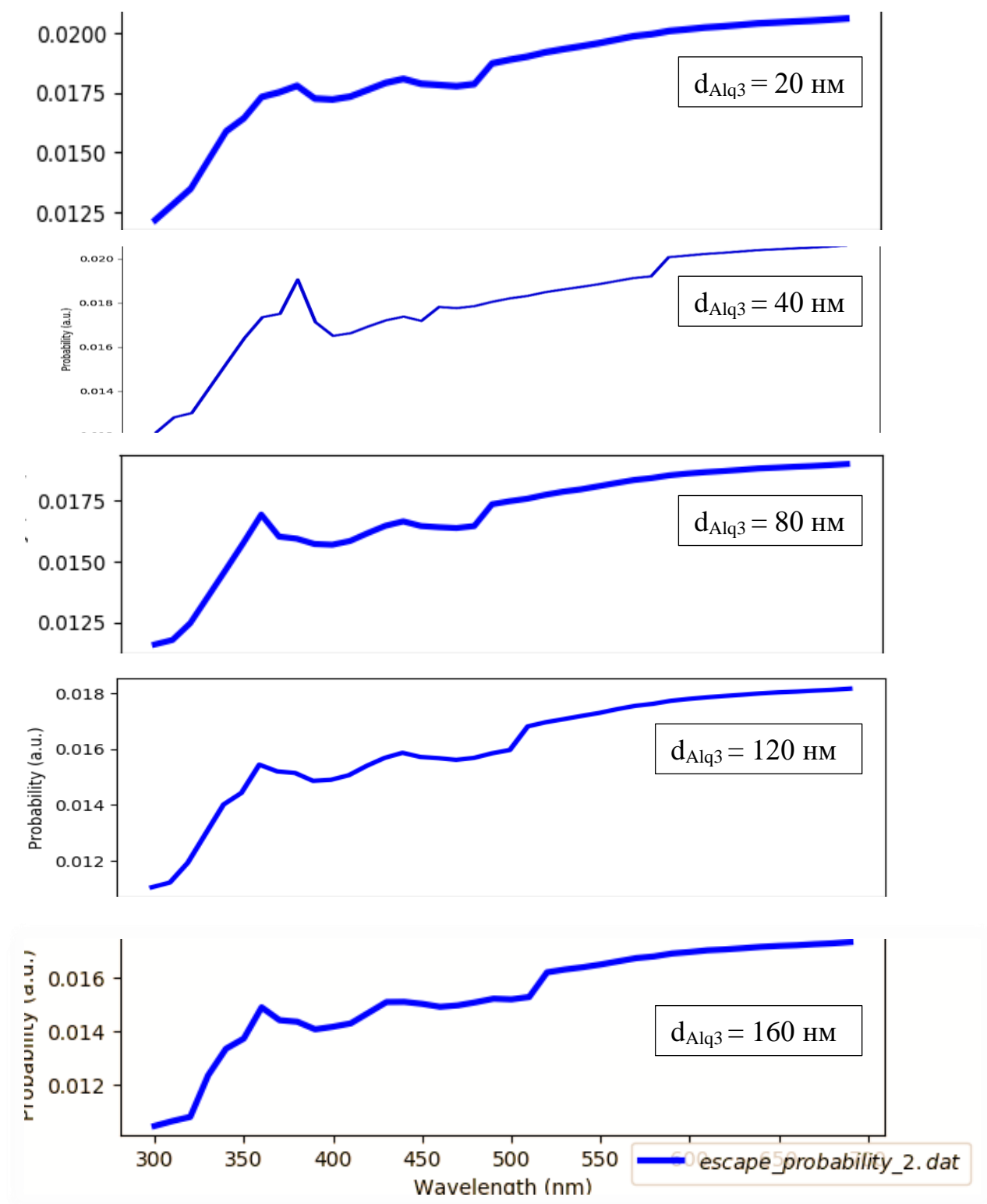


Рисунок 4.6 – Графіки залежності ймовірності випромінювання світлодіодної структури від довжини хвилі для різних значень товщини випромінюючого шару

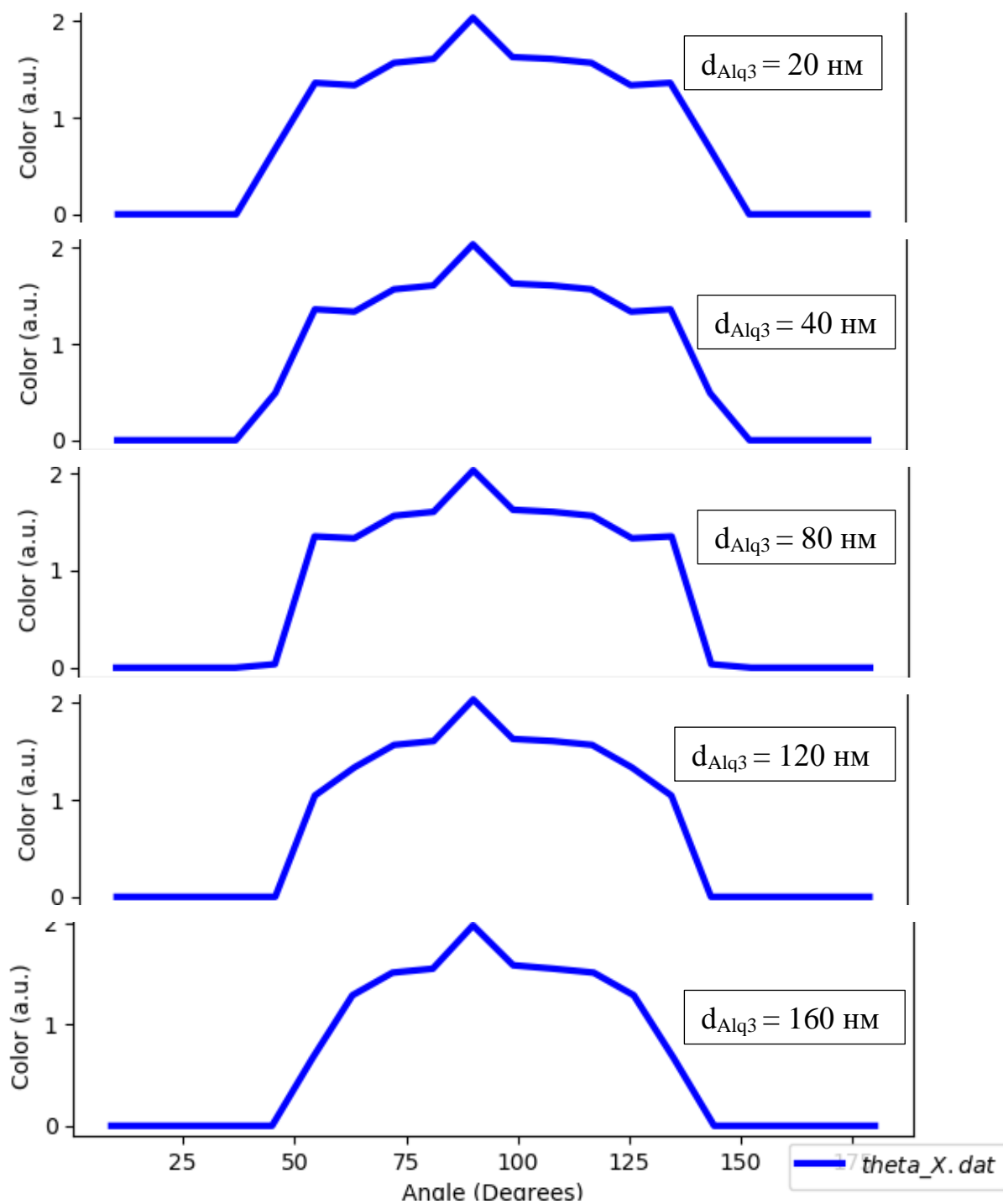


Рисунок 4.7 – Кутовий розподіл інтенсивності випромінювання за різних значень товщини випромінюючого шару

Аналізуючи результати моделювання можна відмітити, що зі збільшенням d_{Alq3} спостерігається наступне:

– перший пік випромінювальної здатності зміщується від 370 нм до 350 нм одночасно по амплітуді змінюючись від 0,018, досягаючи максимуму 0,02 та знижуючись до 0,015;

– також за зміни d_{Alq_3} спостерігається зміщення спектрального мінімуму 400 нм ($d_{Alq_3} = 20$ нм) поступово до 450 нм ($d_{Alq_3} = 40$ нм), 480 нм ($d_{Alq_3} = 80$ нм), 500 нм ($d_{Alq_3} = 120$ нм), 510 нм ($d_{Alq_3} = 160$ нм);

– за зміни d_{Alq_3} спостерігається зменшення кутової напівширини діаграми спрямованості з 90° ($-45^\circ \dots +45^\circ$) до 70° ($-35^\circ \dots +35^\circ$). Крім того на діаграмі зменшуються та зникають бокові максимуми з одночасним зростанням амплітуди середньої частини. При цьому центральний максимум зберігається.

Розраховані також варіанти з товщиною d_{NPD} транспортного шару NPD (HTL) 20 нм, 40 нм, 60 нм, 80 нм, 100 нм, 120 нм. При цьому $d_{Alq_3} = 40$ нм.

Результати розрахунків оптичних характеристик розглянутої світлодіодної структури з варіантами товщини d_{NPD} транспортного шару NPD (HTL) 20 нм, 40 нм, 60 нм, 80 нм, 100 нм та 120 нм свідчать про наступне:

– перший пік випромінювальної здатності 370 нм від 0.019 зменшується та зникає, несуттєво зменшується пік 350 нм одночасно по амплітуді змінюючись від 0,018, досягаючи максимуму 0,02 та знижуючись до 0,015;

– також за зміни d_{NPD} спостерігається зміщення спектрального мінімуму 470 нм ($d_{NPD} = 20$ нм) поступово до 450 нм ($d_{NPD} = 40$ нм) далі щезає;

– за зміни d_{NPD} спостерігається зміщення стрибка характеристики 600 нм ($d_{NPD} = 40$ нм) поступово до 540 нм ($d_{NPD} = 60$ нм), 500 нм ($d_{NPD} = 80$ нм), 470 нм ($d_{NPD} = 100$ нм), 460 нм ($d_{NPD} = 120$ нм);

– за зміни d_{NPD} спостерігається зменшення кутової напівширини діаграми спрямованості з 100° ($-50^\circ \dots +50^\circ$) до 80° ($-40^\circ \dots +40^\circ$). Крім того на діаграмі зменшуються та зникають бокові максимуми з одночасним зростанням амплітуди середньої частини. Центральний максимум зберігається. Загалом зміни менш виражені у порівнянні з залежністю від d_{Alq_3} .

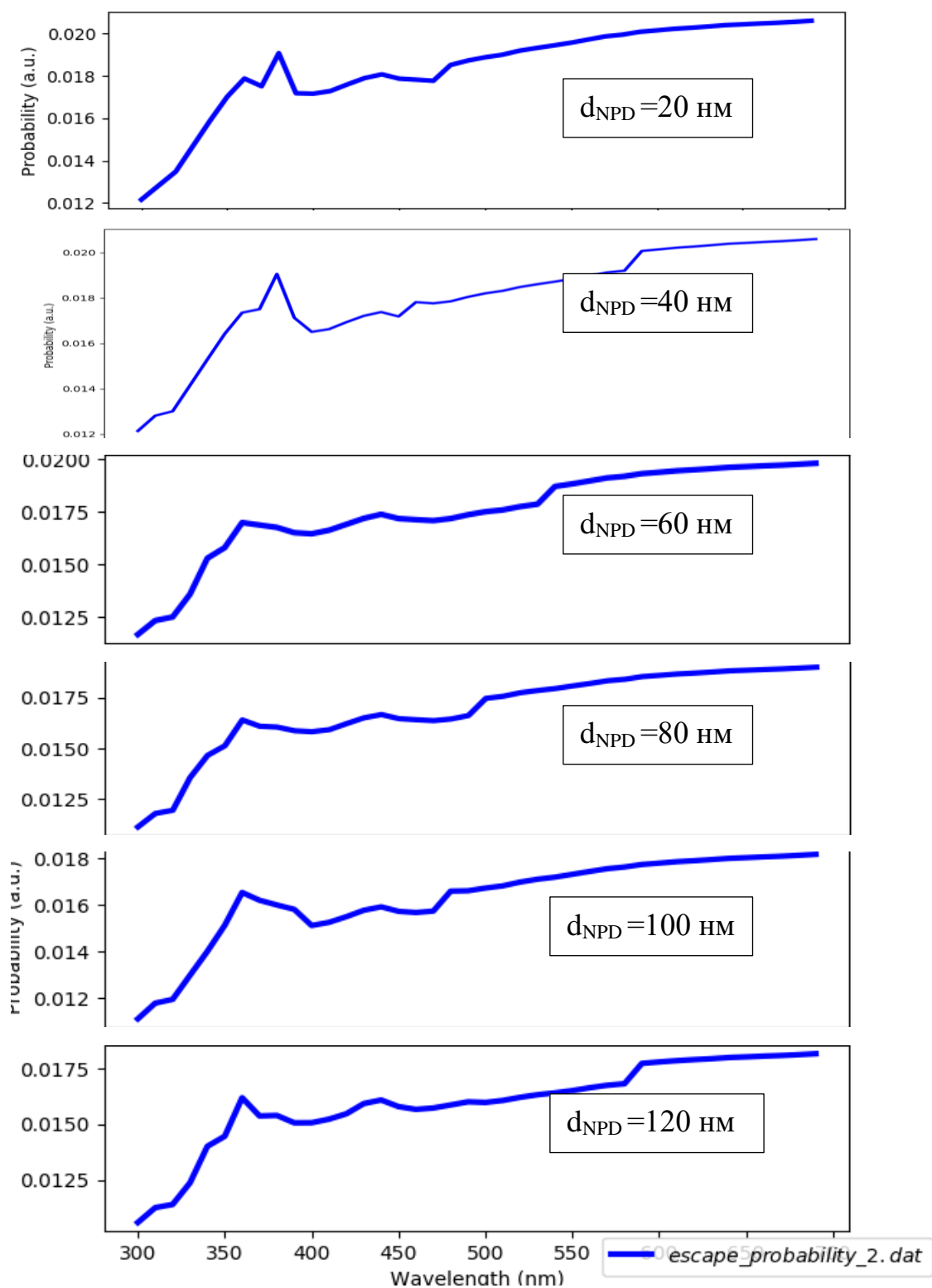


Рисунок 4.8 – Графіки залежності ймовірності випромінювання Ре світлодіодної структури від довжини хвилі для різних d_{NPD}

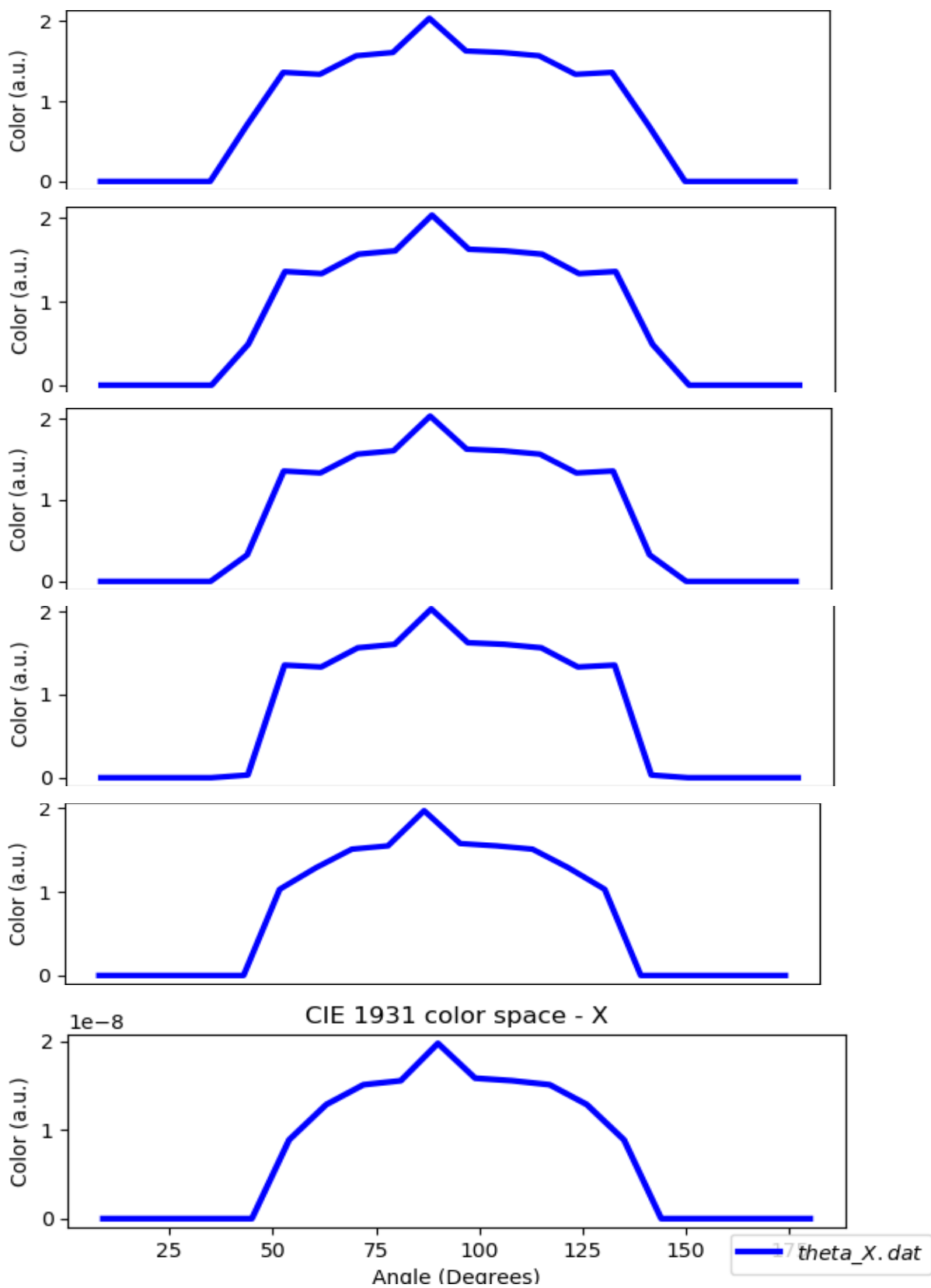


Рисунок 4.9 – Графіки залежності кутового розподілу інтенсивності випромінювання для різних d_{NPD}

Також були виконані розрахунки оптичних характеристик світлодіодної структури з різною товщиною транспортного шару TPVi (ETL) (10 нм, 20 нм, 30 нм, 40 нм, 50 нм, 60 нм). Цей шар відповідає за транспорт електронів до відповідного електроду. Динаміка отриманих характеристик досить близька до розглянутих вище, зокрема у разі зміни товщини діркового транспортного шару. Це свідчить про аналогічні тенденції у зміні оптичних характеристик.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи були розглянуті тенденції світлодіодних освітлювальних систем, основні принципи їх побудови. Наведено галузі використання, зокрема у автомобілях, переваги та недоліки світлодіодних освітлювачів.

Ретельно досліджені параметри побутових світлодіодних ламп, зокрема фотометричні та спектральні.

З'ясовано шляхи розвитку сучасних плоских освітлювальних систем з використанням тонкоплівкових органічних випромінюючих елементів. Наведені можливі напрямки подальшого розвитку таких випромінювачів, зокрема використання сучасних наноматеріалів та субхвильових елементів.

Докладно розглянуті характеристики та параметри освітлювальних систем, що безпосередньо впливають на здоров'я людини та якість сприйняття навколишнього середовища. Виділені найбільш суттєві складові такого впливу.

Виконано моделювання структури активної частини 4-х шарового тонкоплівкового органічного випромінювача. Запропоновано структуру та матеріали активних шарів.

Досліджено та проаналізовано вплив зміни розміру всіх активних шарів випромінювача на основні оптичні характеристики пристрою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Тенденції LED - освітлення: <https://5watt.ua/blog/stati/tendencii> (дата звернення: 22.10.2024).
2. Автолампи світлодіодні URL: https://drossel.ua/content/129425-rvolt-svetodiodnaya-_led_-lampra-rvolt-rc03-h7 (дата звернення: 27.11.2024).
3. Каталог URL: <http://www.aksprom.biz/Catalog/KortemGorelteh/32955> (дата звернення: 03.12.2024).
4. Як вибрати світлодіодні лампи головного світла URL: <https://avto.pro/seller/novosti-avto-pro/> (дата звернення: 24.10.2024).
5. Готра З. та ін. Енергоефективні світлодіодні освітлювальні системи, НАН України, Ін-т фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова, Нац. ун-т "Львів. політехніка", НАМН України, Ін-т медицини праці. - Київ : Авіцена, 2016.
6. Литвиненко А., Черкашина О., Світлові прилади : навч. посіб. [для студентів техн. ВНЗ], Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 235 с.
7. Парфенюк А. Матеріали для світлотехніки й оптоелектроніки та методи дослідження їх властивостей. Чернів. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. - Чернівці : Рута, 2016. – 364 с.
8. LG Chem выпускает гибкую OLED панель 406x50 мм. URL: https://led-displays.ru/story_101.html (дата звернення: 25.03.2023).
9. Морозов А., Клименко В., Корбут В., Ієвлев М., Бутко В., Енергозберігаючі системи світлодіодного освітлення // Математичні машини і системи. 2017, №4. С. 3 – 29.
10. Сахно Т., Кожушко Г., Шпак С., Мартиросова В. Напрямки вдосконалення стандартів на світлодіодну техніку та освітлення її використанням // Комунальне господарство. 2020. т.1, №154. С. 57 – 66.

11. Шпак С., Кислиця С., Єрмілова Н., Кожушко Г. Дослідження кутової рівномірності колориметричних параметрів світлодіодних ламп і світильників // Український метрологічний журнал, 2020, №2, С. 56 – 63.
12. Nanotechnology May Lead to Better, Cheaper LEDs //URL: <https://www.led-professional.com/technology/light-generation/nanotechnology-may-lead-to-better-cheaper-leds> (дата звернення: 27.11.2024).
13. Lee, K., Yoo, D., Oh, H. *et al.* Flexible and monolithically integrated multicolor light emitting diodes using morphology-controlled GaN microstructures grown on graphene films. // *Sci Rep* , 2020. **10**, 19677.
14. Роджерс, Дж. А., Сомя, Т. и Хуанг, Ю. Материалы и механика для растягиваемой электроники // *Наука*, 2010, **327** (5973), С. 1603.
15. Shizuo TOKITO and Isao TANAKA Phosphorescent Organic Light-emitting Devices: Triplet Energy Management // *Electrochemistry*, 2008, 76, No. 1, p.24–31.
16. Gunjan Sharma, Ritu, A. M. Quraishi et al Structure optimization and investigation of electrical and optical characteristics of Alq3/TAZ:Ir(ppy)3-BSP/HMTPD OLED // *Optical and Quantum Electronics*, 2022. 54. p. 284
17. Галат А.Б. Расчет поглотательной способности солнечных фотопреобразователей // 9-я Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники». Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНУРЭ, 2017. С.103 – 106.
18. Галат О. Б., Романенко О. О. Дослідження світлодіодної системи освітлення // IV International Scientific and Practical Conference “PRIORITY DIRECTIONS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT” KYIV 20-22 December 2020. pp. 347–349.
19. Thin-Film Light Management System for Intelligent Large-Area LED Luminaires by the Centre Suisse d’Electronique et de Microtechnique SA . URL:<https://www.led-professional.com/resources-1/articles/> (дата звернення: 31.03.2023)
20. Analytical description of mixed ohmic and space-charge-limited conduction in single-carrier devices // *Journal of Applied Physics*, 2020. 128, 165701.

21. Modeling nongeminate recombination in P3HT: PCBM solar cells // The Journal of Physical Chemistry 2011, C, 115, P. 9806 – 9813.
22. Extracting microscopic device parameters from transient photocurrent measurements of P3HT: PCBM solar cells //Advanced Energy Materials, 2012, 2, P. 662 – 669.
23. Просяник М. С. Тонкоплівковий світлодіодний випромінюючий елемент на основі органічних сполук // XXVII Міжнародний молодіжний форум «Радіoeлектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 1. Харків: ХНУРЕ, 2023. С.43 – 44.
24. Просяник М. С. Дослідження системи світлодіодного освітлення // Sectoral research XXI: characteristics and features: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the IX International Scientific and Theoretical Conference, December 20, 2024. Chicago, USA: International Center of Scientific Research. – PP. 100 – 103.