

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ НА
ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВИХ ОРГАНІЧНИХ СВІТЛОДІОДІВ
(тема)

Виконав:
студентка 2 курсу, групи МНПм-22-1

Позднякова А.О.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні
прилади і пристрої»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Галат А.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

I.М.Бондаренко

« » 2023р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Поздняковій Анні Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та розробка системи штучного освітлення на основі тонкоплівкових органічних світлодіодів

затверджена наказом університету від 27 11 2023 року № 1400Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 02.01. 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

3.1.Випромінювачі для порівняльного дослідження: світлодіодні ДРЛ, ДНаТ, їх електричні та оптичні характеристики

3.2 Спектри фотосинтезу рослин, спектри джерел та необхідні рівні освітленості

3.3 Врахування екологічних, ергономічних та енергозберігаючих аспектів

3.4 Розрахувати параметри тонко плівкового освітлювача для використання у варіанті підсвітлення агрокультур

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1. Огляд типів, конструкцій, складу та характеристик випромінювачів;

4.2. Порівняльний аналіз структур фітоосвітлювачів та вимог до них;

4.3. Вибір програми та розрахунки характеристик освітлювача;

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз завдання на атестаційну роботу	01.12.23	
2.	Аналітичний огляд методів та конструкцій	10.12.23	
3.	Порівняння та вибір типу освітлювача на основі OLED	15.12.23	
4.	Вибір конструкції, компоновки, освітлювача	18.12.23	
5.	Розрахунки характеристик пристрою	25.12.23	
6.	Оформлення пояснювальної записки	30.12.23	
7.	Підготовка презентації	02.01.24	
8.	Подання роботи до захисту	02.01.24	

Дата видачі завдання 01 грудня 2023 року

Студент _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка складається з: 58 с., 30 рис., 6 табл., 31 джерела.

ОСВІТЛЮВАЧ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, НАПІВПРОВІДНИК, СВІТЛОДІОД, ВИПРОМІНЮВАННЯ, СПЕКТР, ЛЮМІНЕСЦЕНТНА ЛАМПА, ХАРАКТЕРИСТИКА.

Об'єкт дослідження – структура джерела випромінювання освітлювача для рослин.

Мета роботи – оптимізація складу та конструкції освітлювача для тепличних та кімнатних рослин виходячи з найбільш ефективної спектральної характеристики.

Метод дослідження – аналітичний метод порівняння спектральних характеристик різних випромінювачів, вибір випромінювачів за основними характеристиками: ефективність, екологічність освітлювачів.

Розглянуто декілька типів випромінювачів, у результаті всебічного аналізу у якості елемента освітлювача був обраний органічний тонкоплівковий світлодіод.

Результати роботи можуть використовуватися для проектування освітлення в теплицях, для вирощування рослин (овочі, фрукти, домашні рослини).

ABSTRACT

Explanatory note consists of: 58 p., 30 Fig., 6 table. 31 sources.

ILLUMINATOR, EFFICIENCY, SEMICONDUCTOR, LED, RADIATION, SPECTRUM, FLUORESCENT LAMP, CHARACTERISTIC.

The object of study is the structure of the radiation source of the illuminator for plants.

The work purpose is optimization of the design of the illuminator for greenhouse and indoor plants on the basis of the most efficient spectral characteristics.

The research method is an analytical method of comparing the spectral characteristics of different emitters, the selection of emitters according to the main characteristics: efficiency, environmental friendliness of illuminators.

Several types of emitters were considered, and as a result of a comprehensive analysis, an organic thin-film LED was chosen as an illuminator element.

The results of the work can be used for designing lighting in greenhouses, for growing plants (vegetables, fruits, house plants)..

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 СУЧАСНІ ШТУЧНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА	9
1.1 Лампи розжарювання	9
1.2 Люмінісцентні лампи	10
1.3 Світлодіоди	13
1.4 Органічні світлодіоди	17
2 ОРГАНІЧНІ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ ДІОДИ	18
2.1 Історія розвитку та принцип роботи OLED	18
2.2 Класифікація OLED	20
2.2.1 Класифікація за світловипромінюючим матеріалом	20
2.2.2 Інші види органічних світлодіодів	21
2.3 Переваги та недоліки OLED	24
3 СПЕКТРИ ФОТОСИНТЕЗУ РОСЛИН ТА ВИПРОМІНЮВАННЯ	33
ДЖЕРЕЛ	
3.1 Спектральна якість світла	33
3.2 Інтенсивність світла	36
3.3 Тривалість світла	38
3.4 Важливість якості випромінювання	39
3.5 OLED для вирощування рослин	39
4 РОЗРАХУНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВІТЛЮВАЧА НА ОСНОВІ	42
ТОНКОПЛІВКОВОГО ОРГАНІЧНОГО СВІТЛОДІОДА	
4.1 Програма розрахунку	42
4.2 Розрахунки параметрів та характеристик приладу	43
4.3 Порівняння результатів з експериментальними літературними даними	52
ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	56
ДОДАТОК А	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- СІЕ – міжнародна комісія з освітлення;
- LCD – рідкокристаличний дисплей;
- OLED – органічний світловипромінюючий діод;
- АФ – апаратна функція;
- ДНаТ – дугова натрієва трубчаста газорозрядна лампа;
- ІЧ – інфрачервоний;
- К – константа;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- ЛР – лампа розжарювання;
- МГЛ – металогалогенна лампа;
- НПІ – напівпровідниковий індикатор;
- НВЧ – надвисока частота;
- О – об'єктив;
- СВД – світловипромінюючий діод;
- Т – температура;
- УФ – ультрафіолет.

ВСТУП

З кожним днем електроніка розвивається і вдосконалюється досить швидкими темпами. На сьогодні є ряд базових напрямків електроніки, які викликають інтерес сучасної науки та техніки. Одним з напрямків є органічна електроніка, в якій виділяються: сонячна енергетика, інтегральна оптика та сенсори.

Невід'ємною частиною органічної електроніки є тонкоплівкові органічні світлодіоди, які зараз мають велику перспективу розвитку. У цій роботі вони будуть розглядатися у якості штучного джерела світла, яке може використовуватися у різних сферах: побутове освітлення, наприклад, панелі стін, стель, елементів одягу; промислове освітлення для вирощування різних рослинних культур; підсвітка рекламних банерів, вивісок вітрин, дорожніх знаків тощо. Однак через велику зануреність у різні сфери життя, задля більш детального розгляду однієї області, органічні світлодіоди будуть досліджуватися у якості штучного джерела світла для вирощування рослин: їх недоліки та переваги, чому саме OLED, та чи є можливим зараз органічним світлодіодам наздогнати або навіть обігнати неорганічні на прикладі їх використання у такому важливому питанні, як вирощування рослинних культур.

Мета роботи – оптимізація складу та конструкції освітлювача для тепличних та кімнатних рослин виходячи з найбільш ефективної спектральної характеристики.

1 СУЧАСНІ ШТУЧНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

Усі джерела світла поділяються на природні та штучні. Природні джерела світла - це природні матеріальні об'єкти та явища, основною чи вторинною властивістю яких є здатність випромінювати видиме світло. На відміну від природних джерел світла, штучні є продуктом виробництва людини. Штучні джерела світла - це технічні пристрої різної конструкції та з різними способами перетворення енергії, основним призначенням яких є отримання світлового випромінювання. У сучасному світі як джерела штучного освітлення зазвичай застосовують лампи розжарювання, газорозрядні, металогалогенові лампи, ексілампі та світлодіоди [1].

1.1 Лампи розжарювання

Розглянемо класичну лампу розжарювання (ЛР) та галогенну. У класичних лампах (рис. 1.1) вольфрамова спіраль у колбі, з якої викачане повітря, підігрівається електричним струмом. У ЛР більша частина електроенергії, що живить нитку розжарення, перетворюється в тепло, тому вони не стільки освітлюють, скільки обігрівають, тому спектр лампи розжарювання реалізується максимумом у інфрачервоній області та спадає зі зменшенням довжини хвилі.



Рисунок 1.1 – Лампа розжарювання [2]

Термін служби також не тішить, бо не перевищує 1000 годин. На зміну простим лампам розжарювання прийшли галогенові лампи (рис.1.2). За принципом роботи вони нічим не відрізняються. Звичайна модель складається з колби великих розмірів, виготовленої з матового або прозорого скла. Вона всередині заповнюється газовою сумішшю. Зазвичай використовується аргон або азот, а іноді їх поєднують[3].

Ця суміш, пропускає електричний струм і нагрівається до 2500°C . Через це елемент через час перегорає і навіть вибухає. Завдяки розжарюванню створюється світіння. Вольфрам, як і будь-який метал білого кольору, при прожарюванні світиться білим. Однак колба має властивість робити світіння більш теплим або холодним.



Рисунок 1.2 – Галогенна лампа розжарювання [4]

Такі лампи все більше використовуються у якості декоративного контрастного освітлення через значення потужності 10...50 Вт. За допомогою відбивача у галогенних лампах $2/3$ тепла відводиться назад, тому об'єкти, які освітлюються, нагріваються менше у порівнянні з класичними лампами розжарювання.

1.2 Люмінесцентні лампи

Люмінесцентна лампа або як її часто називають "енергозберігаюча",

відноситься до більш сучасного типу ламп з нижчим рівнем споживання електроенергії.

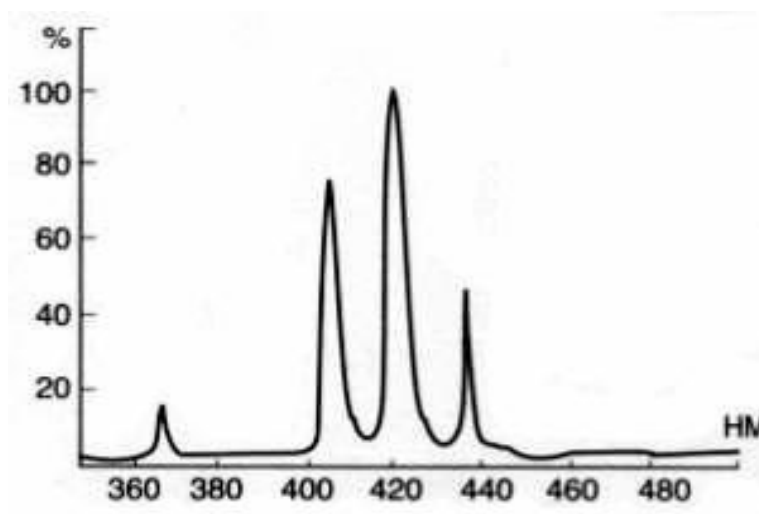


Рисунок 1.3 – Спектральна характеристика галогенної лампи розжарювання [5]

Люмінесцентна лампа - це газорозрядне джерело світла, в якому електричний розряд у парах ртуті створює ультрафіолетове випромінювання, яке перетворюється на видиме світло за допомогою люмінофора. Енергоефективність цих ламп приблизно в 5 разів вище, ніж у ламп розжарювання, але при цьому на 30-40% нижче, ніж у світлодіодних ламп [6].



Рисунок 1.3 – Люмінесцентна лампа [7]

Люмінесцентні лампи характеризуються такими перевагами:

- відносно висока світловіддача (люмінесцентна лампа потужністю 23 Вт дає освітленість як 100 Вт лампа розжарювання);
- тривалий термін служби (2000-20000 год на відміну від 1000 годин ламп розжарювання);
- розсіяне світло;
- різноманітність відтінків світла;
- є лінійним джерелом світла;

До недоліків люмінесцентних джерел світла слід віднести:

- складність схеми включення;
- обмежена поодинокі потужність (до 150 Вт);
- залежність від температури довкілля;
- значне зниження світлового потоку до кінця терміну служби;
- шкідливі для зору пульсації світлового потоку;

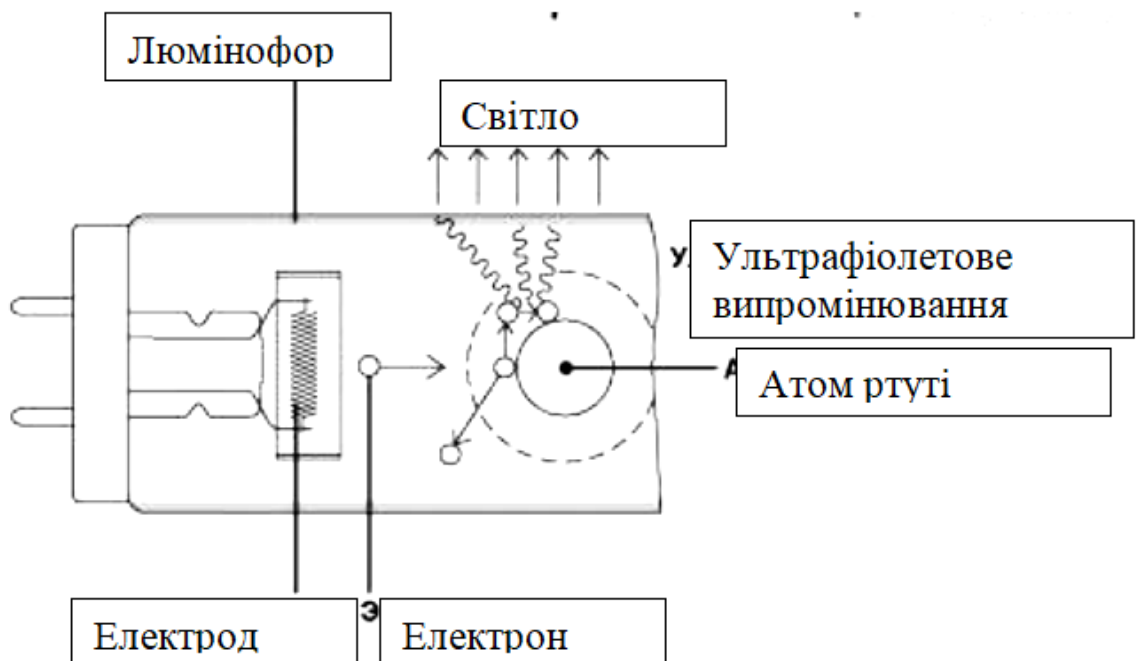


Рисунок 1.4 - Схема роботи люмінесцентної лампи [8]

1.3 Світлодіоди

Світлодіодні лампи на сьогоднішній день можна вважати найбільш високотехнологічним джерелом освітлення. Принцип їх дії: при пропусканні електричного струму через межу напівпровідників створюється світлове випромінювання. Завдяки складу світлодіодів, кольорова температура може змінюватись в широкому діапазоні, як у енергозберігаючих ламп (2700–7700 К). Використання новітніх технологій в області штучного освітлення на основі світлодіодів відкриває широкі можливості для створення ефектних світлових сценаріїв, зонування простору приміщень, розробки спеціальних дизайн-проектів. LED технології розкривають широкі можливості у створенні світлодіодних світильників різних розмірів, форм, конструктивного виконання, характеру світіння, кольорової гами, електричних параметрів. Вибір конкретних LED технологій багато в чому залежить від типу освітлення: функціональне освітлення, локальне підсвічування, декоративне світло. Світлодіодне освітлення підрозділяється на освітлення вуличне та інтер'єрне [9].



Рисунок 1.5 – Використання світлодіодів [10]

В даний час світлодіодне освітлення набуло широкого поширення та застосування у всіх цивілізованих країнах світу. Воно є економним, ефективним, досить естетичним, довговічним та комфортним. Сучасні технології світлодіодного освітлення зайняли своє гідне місце на ринку і є одним із важливих та пріоритетних напрямів науково-технічного прогресу. Світлодіодні джерела світла витісняють із ринку традиційні джерела [9].

Сфера використання світлодіодного освітлення набуває все більшого розвитку та поширення через легкість управління параметрами світлодіодів. Світлодіодне освітлення застосовується у різних галузях народного господарства. Світлодіодне освітлення зайняло своє місце у міських квартирах та приватних будинках, на виробничих підприємствах та в офісних приміщеннях, у торгових центрах та офісах, барах та ресторанах, готелях, парках та скверах. Воно знайшло широке застосування у транспортних засобах різних видів та призначення; для рекламних конструкцій; для підсвічування будівель, вулиць, перехресть, площ та автомагістралей, тунелів та мостів; у садово-парковому та ландшафтному освітленні. Наявне застосування світлодіодних ламп для дизайнерського освітлення спеціальних проектів.



Рисунок 1.6 – Різноманітність освітлення світлодіодів [11]

Перевагами світлодіодів у якості штучного освітлення є:

- низьке споживання приладами електричної енергії. Так, результати тестування показують, що при однаковій кількості світла світлодіоди споживають лише 12,5 Вт електроенергії, а лампочки розжарювання 60 Вт;
- досягнення економії електричної енергії. Світлодіодні лампи мають високий коефіцієнт корисної дії – 95%, тобто 95% електричної енергії в лампах LED перетворюється на світлову енергію і лише 0,5% на теплову, у той час як лампи розжарювання мають коефіцієнт корисної дії лише 0,5%;
- рентабельність застосування джерел світла;
- довгий термін служби приладів, який сягає до 50000 годин, а деяких видів – і більше;
- спектр світла, що випромінюється, близький до спектру сонячного світла, що забезпечує комфортне сприйняття;
- малі габарити світлодіодів, що забезпечує компактність світлодіодних приладів;
- висока механічна міцність світлодіодів, що створює надійність у процесі експлуатації приладів;
- здатність приладів працювати у широкому інтервалі температур (від -40° до $+60^{\circ}\text{C}$);
- екологічна безпека для довкілля;
- високий рівень пожежної безпеки;
- стійкість до вібрацій;
- простота конструкції та монтажу приладів;
- відсутність стробоскопічного ефекту, незначне ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, низьке тепловиділення;
- світлодіодне освітлення є комфортним для сприйняття людським оком, відрізняється стабільністю світлового потоку, не створює відблисків, мерехтіння;
- немає необхідності здійснювати технічне обслуговування приладів у процесі їх роботи;

Основний недолік, який приписують світлодіодам – виділення великої кількості тепла від кристала та необхідність відведення цього надлишкового тепла. Цей недолік є розв'язувальною технологічною особливістю, проте потребує уважного ставлення. Потрібно створити компактну форму тепловідведення з ефективною здатністю охолодження, інакше лампа стає занадто великих розмірів. Основне технічне завдання в тому, що потрібно відвести від дуже маленького кристала величезний надлишок теплової енергії, і при цьому вписатися в габарити стандартних ламп із загальноприйнятими цоколями та габаритами. Необхідність відведення тепла безпосередньо збільшує вартість пристрою, потужність, яку можна перетворити на світло. Ця особливість LED впливає на надійність і довговічність систем світлодіодного освітлення. Спеціальні підкладки з пористих структур та застосування спеціальних технологій виробництва дозволяє вирішити більшу частину обмежень у цьому питанні, проте для створення надпотужних джерел світла фахівцям все ще потрібен час.

При недостатньому охолодженні кристала світлодіода підвищується температура напівпровідникового переходу р-п-р, що призводить до зниження яскравості свічення, а при незадовільному тепловідведенні до деградації структури кристала LED джерела світла.

Другий недолік, що найбільш обговорюється фахівцями, навіть не відноситься до технології LED безпосередньо, а знаходиться біля нього – це низька якість електроенергії в мережах. Пульсації, наявні в електромережі, можуть призвести до передчасного виходу лампи з ладу.

Відносна найвища вартість світлодіодних ламп. Цей недолік складно назвати недоліком LED. Це, скоріше, на сьогодні стримуючий фактор, відображення того, що продукт новий, прогресивний, технологічний і дуже перспективний, що вимагає інвестицій у технологію виробництва, освоєння нових галузей науки. Вже зараз порівняльні економічні характеристики говорять про його вигідність у довгостроковій перспективі, не кажучи вже про те, що вартість постійно знижується.

1.4 Органічні світлодіоди

Технологію органічних світловипромінюючих діодів (OLED) було винайдено дослідниками компанії Eastman Kodak у 1987 році. OLED виготовляються з органічних (вуглецевих) напівпровідникових матеріалів, які випромінюють світло під час пропускання через них електричного струму.

Органічні світловипромінюючі діоди є кольоровими джерелами світла, що використовуються в дисплеях смартфонів і екранах телевізорів, а також в панелях для освітлювальних приладів. За останні 25 років дослідження та розробки OLED стали областю, що швидко розширюється в наукових колах і промисловості. OLED пропонують новий ефективний та стійкий метод для технологій освітлення та відображення та знаходяться на підйомі, щоб замінити попередні технології на ринку [12].

2 ОРГАНІЧНІ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ ДІОДИ

2.1 Історія розвитку та принцип роботи OLED

Одним з найперспективніших напрямків інтегральної оптики, а саме джерел світла є органічні світловипромінюючі діоди (OLED) [13]. У напівпровідниках вивільнена енергія рекомбінації перетворюється на тепло. Але змінюючи склад напівпровідникового кристала, можна досягти ефекту, коли "вільним" квантом рекомбінації буде фотон. А фотон, як відомо – квант світла. Таким чином, світіння світлодіода є наслідком рекомбінації зарядів у р-п переході напівпровідника спеціального складу. Очевидно, якщо практично вся енергія рекомбінації переходить у світлову, на теплову нічого не залишається. Цим пояснюється відсутність нагріву працюючого світлодіода.

Типовий OLED складається з шару органічних матеріалів, розташованих між двома електродами, анодом і катодом, всі наносяться на підкладку. Органічні молекули є електропровідними в результаті делокалізації пієвих електронів, викликаних кон'югацією над частиною або всією молекулою. Ці матеріали мають рівні провідності від ізоляторів до провідників, і тому розглядаються органічні напівпровідники. Найвищі заняті та найнижчі незайняті молекулярні орбіталі (HOMO і LUMO) органічних напівпровідників аналогічні смугам валентності та провідності неорганічних напівпровідників. Спочатку найбільш основні полімерні OLED склалися з одного органічного шару. Одним із прикладів було перше випромінювальний пристрій, синтезований Дж. Х. Берроуз та ін., Який включав один шар полі (п-фенілен вінілену). Проте багат шарові OLED можуть бути виготовлені з двома або більше шарами для підвищення ефективності пристрою. Також як провідні властивості, різні матеріали можуть бути вибрані, щоб допомогти введення заряду в електродів, надаючи більш поступовий електронний профіль, або

блокувати заряд від досягнення протилежного електроду і витратити даремно. Багато сучасних OLED-пристроїв включають просту двошарову структуру, що складається з провідного шару та емісійного шару. Більш сучасні розробки в архітектурі OLED покращують квантову ефективність (до 19%) за допомогою градуйованого гетеропереходу. У градуйованій гетеропереході архітектура композиція свердловин та електронно-транспортних матеріалів постійно змінюється в межах емісійного шару з емітером-доповнювачем. Градуйована гетероструктурна архітектура поєднує в собі переваги обох традиційних архітектур, покращуючи інжекцію заряду, одночасно балансує транспортний заряд у межах емісійного регіону[14].

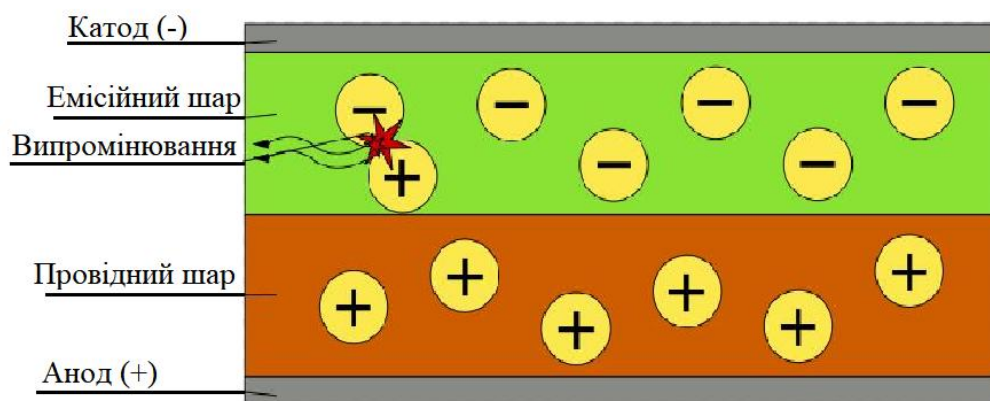


Рисунок 2.1 – Схема двошарового OLED [15]

Під час роботи над напругою OLED подають напругу так, що анод позитивний відносно катода. Аноди вибираються на основі якості їх оптичної прозорості, електропровідності та хімічної стійкості. Потік електронів проходить через пристрій від катода до анода, оскільки електрони вводяться в LUMO органічного шару на катоді і виводяться з HOMO на аноді. Цей останній процес можна також описати як ін'єкцію електронних дірок у HOMO. Електростатичні сили приводять електрони та дірки один до одного, і вони рекомбінують, утворюючи екситон. Це відбувається ближче до емісійного шару, оскільки в органічних напівпровідниках дірки в цілому більш рухливі,

ніж електрони. Розпад цього збудженого стану призводить до розслаблення енергетичних рівнів електрона, що супроводжується випромінюванням, частотою якого є видима область. Частота цього випромінювання залежить від забороненої зони матеріалу, в цьому випадку різниця в енергії між НОМО і LUMO. У напівпровідниках вивільнена енергія рекомбінації перетворюється на тепло. Але змінюючи склад напівпровідникового кристала, можна досягти ефекту, коли "вільним" квантом рекомбінації буде фотон. А фотон, як відомо – квант світла. Таким чином, світіння світлодіода є наслідком рекомбінації зарядів у р-n переході напівпровідника спеціального складу. Очевидно, якщо практично вся енергія рекомбінації переходить у світлову, на теплову нічого не залишається. Цим пояснюється відсутність нагріву працюючого світлодіода [16].

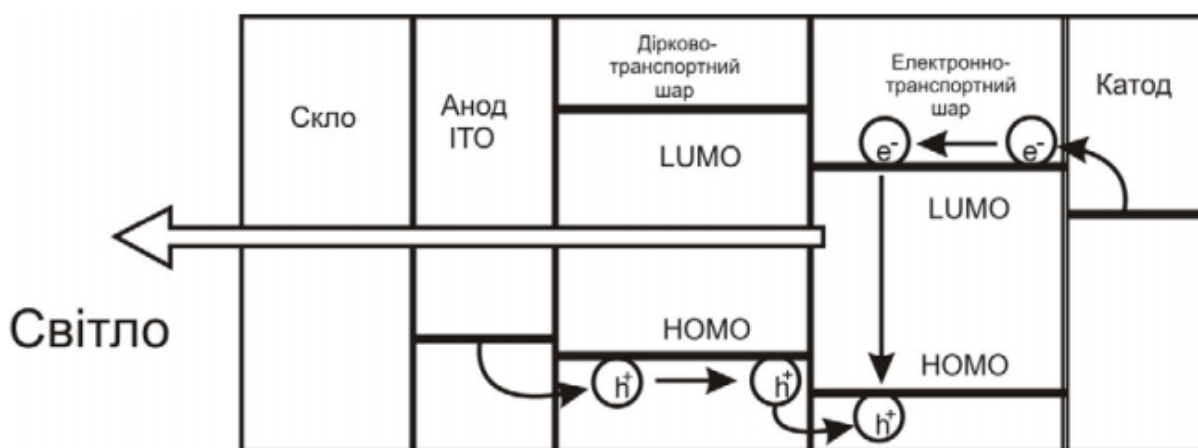


Рисунок 2.2 – Принцип дії органічного світлодіода [16]

2.2 Класифікація OLED

2.2.1 Класифікація за світловипромінюючим матеріалом.

Нині переважно розвиваються дві технології, які показали найбільшу ефективність. Розрізняються вони використовуваними органічними матеріалами це мікромолекули (sm-OLED) та полімери (PLED), останні поділяються на просто полімери, полімерорганічні сполуки (POLED), та

фосфоресціруючі (PHOLED). Про останні трохи докладніше. PHOLED використовують принцип електрофосфоресценції, щоб перетворити до 100% електричної енергії у світ. Наприклад, традиційні флуоресцентні OLED перетворюють на світло приблизно 25-30 % електричної енергії. Через їх надзвичайно високий рівень ефективності енергії, навіть у порівнянні з іншим OLED, PHOLED вивчаються для потенційного використання у великих дисплеях типу телевізійних моніторів або екранів для потреб освітлення. Цікаво, що технологія OLED здатна значно підвищити якість LCD панелей, оскільки перспективною технологією підсвічування для них є технологія PHOLED (PHosphorescent Organic Light Emitting Diode). За даними компанії Universal Display Corporation, застосування PHOLED діодів збільшує яскравість панелей у чотири рази [17].

2.2.2 Інші види органічних світло діодів.

TOLED – прозорі світловипромінюючі пристрої TOLED (Transparent and Top-emitting OLED) – технологія, що дозволяє створювати прозорі (Transparent) дисплеї, а також досягти більш високого рівня контрастності.

Прозорі TOLED-дисплеї: напрям випромінювання світла може бути тільки вгору, тільки вниз або в обидва напрямки (прозорий). TOLED може суттєво покращити контраст, що покращує читабельність дисплея при яскравому сонячному світлі.

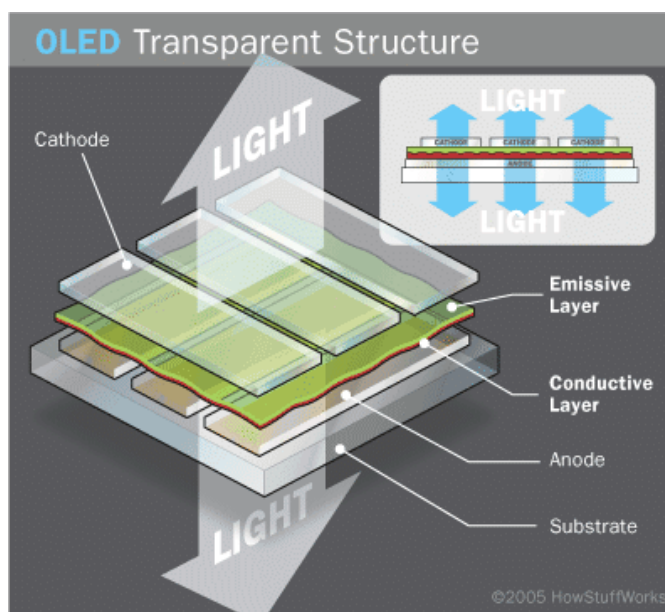


Рисунок 2.6 – Структура прозорого OLED [18]

Так як TOLED на 70% прозорі при вимкненні, їх можна кріпити прямо на лобове скло автомобіля, на вітрини магазинів або для встановлення в шоломі віртуальної реальності... Також прозорість TOLED дозволяє використовувати їх з металом, фольгою, кремнієвим кристалом та іншими непрозорими підкладками для дисплеїв з відображенням вперед (можуть використовуватись у майбутніх динамічних кредитних картках). Прозорість екрану досягається при використанні прозорих органічних елементів та матеріалів для виготовлення електродів.

За рахунок використання поглинача з низьким коефіцієнтом відображення для підкладки TOLED-дисплея контрастне відношення може перевершити РК (мобільні телефони та кабіни військових літаків-винищувачів). За технологією TOLED також можна виготовляти багат шарові пристрої (наприклад SOLED) і гібридні матриці (Двонаправлені TOLED TOLED робить можливим подвоїти область, що відображається, при тому ж розмірі екрана — для пристроїв, у яких бажаний обсяг виведеної інформації ширший, ніж існуючий) [23].

FOLED (Flexible OLED) – головна особливість – гнучкість OLED-дисплея (Демонстрація гнучкого OLED-дисплея від SONY). Використовується пластик або гнучка металева пластина як підкладка з одного боку, і OLED-комірок та герметична тонка захисна плівка — з іншого. Створені на основі дуже тонкої пластикової або металевої фольги, FOLED можуть бути набагато тоншими і легшими, ніж РК-дисплеї з підсвічуванням та інші дисплеї, представлені сьогодні на ринку. Таким чином, стільникові телефони, портативні комп'ютери, настінні телевізори та інші продукти з дисплеями можуть бути легше і менше. Крім того, технологія FOLED може спростити встановлення білих освітлювальних плиток OLED у більшій кількості приміщень та створити нові можливості використання в архітектурі, які неможливі при використанні люмінесцентних ламп і ламп розжарювання [17].



Рисунок 2.6 — Структура FOLED [19]

Більш міцний, безпечний та удароміцний. Руйнування скла є серйозною проблемою для продуктів, що містять дисплеї, та ключовою проблемою безпеки в галузі освітлення. FOLED на пластиковій та металевій основі по суті усувають ці проблеми, створюючи очевидні переваги як у дисплеях, так і у висвітленні.

Гнучкість. Залежно від товщини і внутрішніх властивостей гнучкої підкладки FOLED можуть бути згинаються, адаптуються, згортаються і складні. У міру подальшого розвитку FOLED можна буде регулярно налаштовувати для використання у таких продуктах, концептуалізованих як UCD.

Економічність. Сьогодні у виробництві OLED зазвичай використовуються технології, що базуються на послідовній обробці окремих скляних панелей. Передбачається, що завдяки гнучким підкладкам, які зазвичай виробляються у рулонному форматі (наприклад, рулони паперу), виробництво FOLED може перейти до більш продуктивних процесів з рулону на рулон, які зазвичай використовуються у поліграфічній промисловості. Це може

забезпечити основу для справді недорогого масового виробництва.

2.3 Переваги та недоліки OLED

На відміну від неорганічного світлодіода, який представляє собою точкове джерело світла, органічні світлодіоди - це плоскі панелі, які випромінюють світло рівномірно по всій поверхні. Спектр випромінювання органічних світлодіодів покриває практично всю видиму область спектру, забезпечуючи високий індекс передачі кольору і комфортне психофізичне сприйняття для людського ока. Значними перевагами органічних світлодіодів є можливість отримання світіння будь-якої форми та розміру, використання матеріалів, які не містять екологічно небезпечних складових та низьке енергоспоживання (1-3 В) [20].

Через фундаментальну різницю в тому, як працює технологія OLED, вона пропонує деякі вражаючі та унікальні характеристики порівняно зі стандартними світлодіодними дисплеями, які ми бачили в попередні роки. У цьому розділі ми опишемо деякі сильні та слабкі сторони OLED-дисплеїв як нового, більш передового оновлення старого (хоча все ще високопродуктивного та дуже популярного) світлодіодного стандарту.

Вищий коефіцієнт контрастності. Оскільки OLED-дисплеї випромінюють світло безпосередньо на екран, ця група пікселів може бути повністю відключена при отриманні команди відображати темні області. У цьому стані вони взагалі не випромінюють світло, що призводить до ясного та очевидного сприйняття дуже глибокого, насиченого чорного кольору та тональних відтінків.

Більшість типів РК-дисплеїв, включаючи стандартні світлодіодні панелі, не можуть забезпечити такий вражаючий коефіцієнт контрастності, оскільки їхня версія «чорного» зображення повинна бути досягнута шляхом простого маскування підсвічування світлодіодного дисплея максимально можливою мірою [21].

У таких умовах світлодіодні дисплеї майже завжди мають певний ступінь

витоку підсвічування, внаслідок чого їхній чорний колір стає набагато менш глибоким і чітким.

Більш широкі кути огляду. Знову ж таки, це пов'язано з тим, що OLED розташовані набагато ближче до поверхні та випромінюють світло безпосередньо на екран, без необхідності проходити через шар рідких кристалів, як на стандартних світлодіодних дисплеях.

Шар РК-дисплея викликає певний ступінь заломлення, який може мати дивні наслідки під час перегляду стандартної світлодіодної панелі під гострішими кутами.

Світлодіодні панелі вищої якості, наприклад ті, які використовують технологію площинного перемикавання (IPS), можуть в деякій мірі пом'якшити це явище, але дешевші версії, такі як екрани на основі крученого нематика (TN), все ще поширені і сильно страждають у цій області.

Найшвидший час відповіді. "Час відгуку" дисплея означає час, необхідний даному пікселю для перемикавання між станами увімкнення та вимкнення у відповідь на вхідний сигнал.

Як зазначено вище, сучасні OLED-дисплеї здатні зробити це миттєво і, отже, можуть похвалитися набагато кращим часом відгуку, ніж світлодіодні/РК-панелі - фактично всього 1 мілісекунд.

Це робить OLED явними переможцями, коли справа доходить до відображення зображень у швидкому русі з набагато менш помітними артефактами. Світлодіоди зазнають труднощів у цьому відношенні, частково через те, що кожен окремий діод повинен висвітлювати кілька пікселів за шаром РК-дисплея.

Однак потенційні недоліки OLED-дисплеїв у порівнянні з версіями LED/LCD полягають у наступному:

Найменша тривалість життя. Органічні матеріали, що використовуються в OLED, мають обмежений термін служби, порівняно з РК-дисплеями.

Найменша яскравість. Хоча коефіцієнт контрастності набагато вищий, ніж у типового OLED-дисплея, його загальний рівень яскравості, який зазвичай

вимірюється в «нитях», що приблизно відповідає кількості свічок на квадратний метр, значно нижчий через органічну природу молекул у його ядрі.

У деяких сценаріях це не є величезним недоліком, тим більше, що обидва типи дисплеїв можуть бути досить яскравими для стандартного перегляду в приміщенні, але це потенційна проблема, коли йдеться про порівняльну продуктивність поза приміщенням (що часто потрібно в телефонах та інших портативних пристроях).

В умовах високої експозиції OLED-екрани можуть виглядати розмиті і важкі для читання, або їм може бути важко досягти досить точної і насиченої кольору. Збільшення загальної яскравості екрана для вирішення цих проблем може бути ефективним, але може ще більше скоротити термін служби OLED-дисплеїв.

Високе енергоспоживання. Однією з реальних переваг світлодіодної технології є дуже низьке енергоспоживання, необхідне для забезпечення яскравого та чіткого освітлення протягом тривалого часу.

OLED-дисплей також певною мірою може досягти цього, але при цьому він зазвичай споживає значно більше енергії, ніж еквівалентний РК-дисплей (якщо зображення не є переважно чорним з причин, викладених вище).

Можливість вигорання з часом. Хоча на папері цього має бути важко досягти, враховуючи (досі відносно низьке) енергоспоживання OLED-дисплеїв, деякі перші користувачі цієї технології повідомляють про проблеми з надмірним використанням певних пікселів, що призводять до передчасного вицвітання областей на екрані.

У крайніх випадках це може призвести до того, що «примарне» зображення буде назавжди і незабутньо накладено поверх всього, що намагається відобразити екран, оскільки пікселі в цій області деградують.

OLED-дисплеї швидко зростають у популярності, але їх аналоги у сфері освітлення все ще активно намагаються визначити свої унікальні переваги порівняно зі світлодіодним освітленням. Сьогодні вони відстають за ефективністю. Це пов'язано з тим, що світлодіоди зазвичай забезпечують

світловий потік 90-100 лм/Вт на рівні корпусу (інкапсульований світлодіодний чіп), тоді як модулі OLED, як і раніше, знаходяться в районі 20-50 лм/Вт. Термін служби світлодіодів набагато перевищує термін служби OLED. Дійсно, термін служби світлодіодних ламп зазвичай перевищує 50 000 годин, тому вони спочатку знайшли нішу на ринку для застосування на відкритому повітрі у важкодоступних місцях. Навпаки, OLED-освітлення забезпечує термін служби від 5000 до 15 000 годин навіть у герметизованому стані.

Світлодіодне освітлення також має низьку вартість: ціна становить 5 доларів США за 1 км в упаковці (світильники коштують 20–100 доларів США за 1 км). Порівняйте це з грабіжницькою ціною на OLED сьогодні. Вони коштують 300–500 доларів за кілометр на рівні панелі, не рахуючи витрат на проектування світильників, роздрібну торгівлю, установку та розмір прибутку. Основними факторами витрат є герметизуючий шар (бар'єрний, клейкий та осушуючий) та інтегровані підкладки (прозорий провідний шар, підкладка та вихідний шар).

У поточній конфігурації як бар'єр використовується скло порожнини. Це дорого, тому що (а) потрібна додаткова обробка (піскоструминна обробка) для вирізання порожнини, і (б) великі виробники скла не хочуть виділяти виробничі потужності з огляду на низький попит. Зміна конфігурації системи з, по-перше, порожнини на фриттове скло і, по-друге, з фриттового скла на тонкоплівкову інкапсуляцію, щоб знизити вартість. Сьогодні герметизуючі шари (включаючи вологопоглинач та клей) коштують \$400-\$500/м².

Інтегрована підкладка також є важливим фактором витрат. Інтегрована підкладка включає підкладку (скло), прозорий провідний шар (в основному ІТО), металеві електроди, планаризацію (все з малюнком фотолітографії / травлення) та зовнішню світловивідну плівку. Сьогодні весь стос коштує 800–900 доларів за м², хоча 2023 року він може знизитися до 100–120 доларів за м². Тут відбуваються інновації з появою печатки, сітчастих матеріалів тощо.

Нижче коротко викладено ситуацію з продуктивністю OLED та світлодіодного освітлення на сьогоднішній день. OLED-освітлення пропонує

високий потенціал для випромінювання великої площі, хоча сьогодні виробництво OLED відбувається лише на підкладках Gen-2. Подібним чином OLED-освітлення пропонує хороші форм-фактори, хоча сьогодні більшість OLED-освітлення виготовляється на твердому склі.

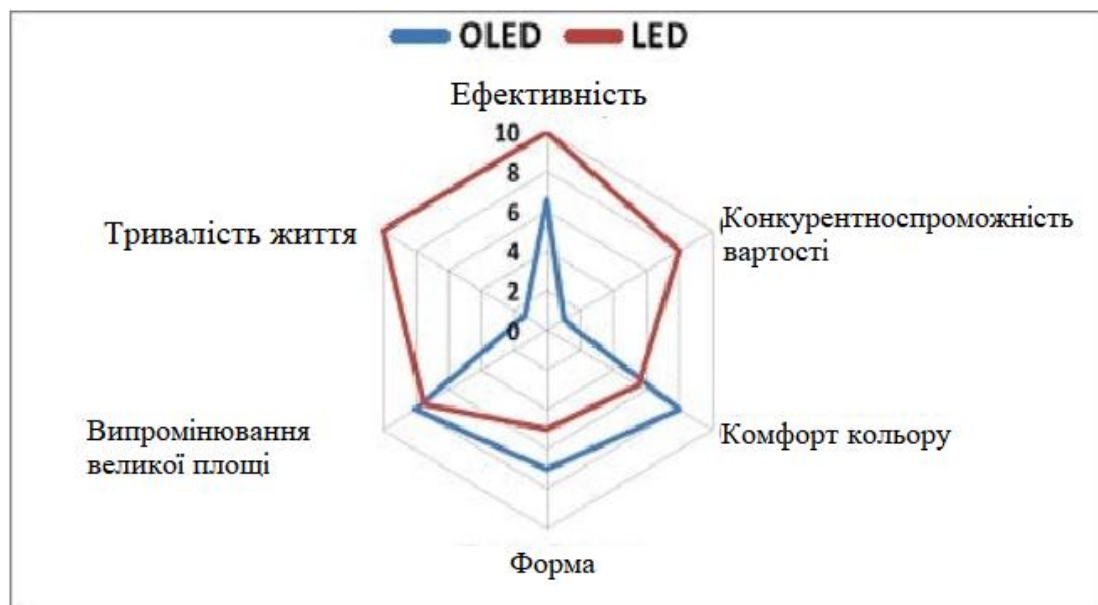


Рисунок 2.7 — Радіолокаційна діаграма, що порівнює атрибути OLED та LED освітлення в сьогоденні [21]

Тим не менш, OLED-освітлення все ще знаходиться в зародковому стані. Звичайно, важливо додати, що розробка світлодіодного освітлення набагато зріліша – і на неї було витрачено більше грошей, ніж на OLED-освітлення. Останнім часом багато компаній почали активно працювати у сфері OLED-освітлення, і інвестиції в них зростають. Наприклад, очікується, що вартість активних матеріалів швидко знижуватиметься. Це відбувається через вплив з боку індустрії OLED-дисплеїв, а також через те, що витрати зростатимуть разом з обсягом. Це відрізняється від двох інших рівнів, оскільки попит здебільшого обумовлений факторами, що знаходяться за межами освітлення OLED. В даний час активні матеріали коштують від 350 до 400 доларів за м², але очікується, що 2023 року ця ціна знизиться до 70-90 доларів за м².

Зростання індустрії OLED-дисплеїв з часом допоможе сектору OLED-

освітлення пропонувати більш дешеві та більш продуктивні пристрої – з деяким перекриттям у ланцюжках поставок. Проблеми, з якими стикаються виробники OLED-освітлення, не будуть вирішені лише виробниками панелей.

Світлодіодне освітлення за своєю суттю є точковим джерелом світла, тоді як OLED-освітлення являє собою пристрій поверхневого випромінювання. Хоча OLED-освітлення, ймовірно, матиме тут конкурентну перевагу, його перевага не така очевидна, як здається на перший погляд. Це з тим, що кілька світлодіодів разом із хвилеводами дозволяє ефективно реалізувати поверхневе випромінювання. У той же час більшість виробництва OLED сьогодні здійснюється на підкладках Gen-2.

Форм-фактор (механічна гнучкість) також часто вважається основною перевагою. Сьогодні технологія OLED зазнає невдачі через те, що шари інкапсуляції засновані на склі, але прогрес у створенні гнучких бар'єрів для OLED-дисплеїв, ймовірно, допоможе цьому у майбутньому. OLED також мають перевагу в теплоті кольору, малій вазі та тонкощі.

Тому найближчими роками відповідальність, швидше за все, ляже на дизайнерів світильників, які розробляють і продають нішеві продукти, одержуючи вигоду з покращених параметрів конструкції, доступних завдяки OLED.

Звіт IDTechEx OLED [21] проти світлодіодного освітлення пропонує широкий, але докладний огляд як світлодіодного, так і OLED-освітлення з описом виробничих процесів, складів матеріалів, технологічних планів та ключових гравців. Також критично оцінюються характеристики пристроїв кожної технології, досліджуються такі параметри, як теплота кольору та керованість, гнучкість, ефективність, поверхневе випромінювання, термін служби, розмір пластини та конструкція світильника.

Цей звіт також пропонує грубу оцінку ринку. Розроблено докладні плани прогнозування витрат з урахуванням передбачуваної зміни вартості інтегрованих підкладок, герметизуючих шарів та матеріалів. Викладено зміни у конфігурації системи та складі матеріалів, необхідних реалізації планів витрат.

Ми також враховуємо виробничі витрати, включаючи капітал та робочу силу. Нижче подано зведену інформацію про відносний внесок кожного сегменту ринку освітлення в загальний ринок OLED у період з 2013 по 2023 рік.

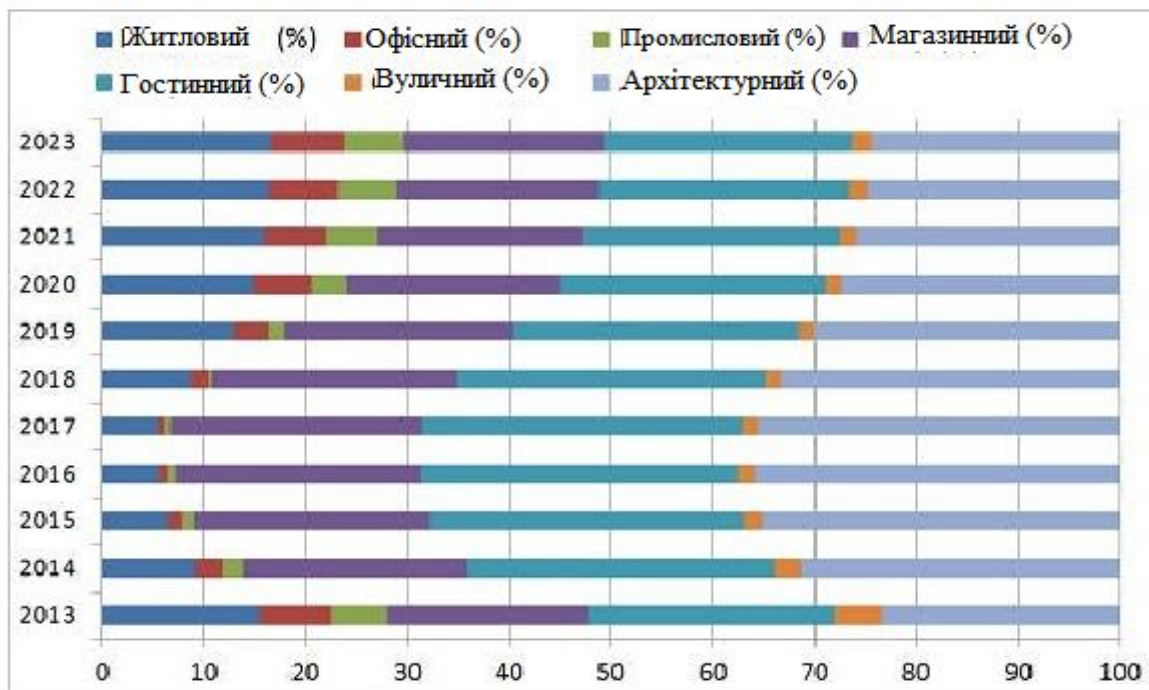


Рисунок 2.8 — Відносний грошовий внесок кожного сегмента ринку освітлення у спільний ринок OLED у 2013–2023 роках [21]

Перерахуємо переваги світлодіодних світильників. Світлодіоди дуже ефективні та споживають на 80% менше енергії, ніж традиційні лампи. Світлодіоди можуть працювати до 50 000 годин, що робить їх економічно ефективними через їх довговічність. Світлодіоди дуже універсальні. Світлодіодні ліхтарі є гнучкими і можуть використовуватися для багатьох речей, таких як освітлення, автомобільні ліхтарі та знаки. Їх міцність і здатність витримувати екстремальні температури ще більше сприяють їх універсальному застосуванню.

Перерахуємо недоліки світлодіодних світильників. Незважаючи на велику кількість переваг, світлодіоди мають недоліки. Моделі преміум-класу з розширеними функціями, як-от можливість зміни кольору, можуть мати високу початкову вартість. Користувачі вважають, що світлодіоди повинні мати більш

яскраві кольори, включаючи червоний і жовтий. Світлодіоди можуть мерехтяти або мати нерівномірну яскравість. Це може статися через погані драйвери або несумісні системи затемнення.

Перерахуємо переваги OLED-світильників. Технологія OLED блищить, коли йдеться про відтворення кольорів і контрастність. Він може відображати справжні чорні відтінки, оскільки кожен піксель окремо підсвічується, і його можна вмикати чи вимикати. Цей атрибут також дозволяє отримати екстремальні кути огляду без втрати точності кольору. OLED-дисплеї виготовлені з легкого пластику, що робить їх гнучкими та менш імовірними для зламів. OLED мають особливі функції. Вони використовуються в телефонах, що згинаються, і телевізорах, що згортаються.

Перерахуємо недоліки OLED-світильників. OLED не позбавлені підводних каменів. Виробництво КЛЛ коштує дорожче, ніж світлодіоди, тому звичайні люди не можуть собі їх дозволити. OLED з органічними матеріалами руйнуються швидше, особливо сині кольори. Це означає, що їх, можливо, доведеться частіше калібрувати або замінювати. Це з часом впливає на їх економічну ефективність. Дисплеї OLED можуть залишати зображення або «вигоряти», оскільки кожен піксель випромінює світло.

Розглянемо енергоефективність світлодіодів. Що стосується енергоефективності, світлодіоди є беззаперечними чемпіонами. Світлодіодні лампи дуже ефективні, перетворюючи понад 50% електричної енергії на світло. Вони також мінімізують марнотратне розсіювання тепла, на відміну від будь-яких інших світильників. Це робить їх екологічно чистим вибором, зменшуючи викиди вуглецю та рахунки за електроенергію. Ефективне перетворення має вирішальне значення для сонячного освітлення, оскільки кожен ват має значення. Світлодіоди, як правило, кращі, ніж OLED, щодо довгострокової стійкості та експлуатаційних витрат.

Розглянемо енергетичний профіль OLED. Хоча OLED не такі енергоефективні, як світлодіоди, вони мають ряд переваг. Одним із значних переваг є їх здатність економити енергію під час відображення темніших

зображень. OLED-пікселі можуть вимикатися самі по собі, підсвічування не потрібне, як на екранах зі світлодіодним підсвічуванням. Ви можете економити енергію, керуючи світлом під час перегляду фільмів або використовуючи «темний режим».

Порівняємо якість зображення на світлодіодах і OLED. OLED часто вітають за їхню надзвичайну якість зображення. Кожен піксель випромінює власне світло, що забезпечує глибші чорні кольори та яскравіші й точніші кольори. Це особливо корисно для таких речей, як професійні фотомонітори та телевізори високого класу. Точність кольору дуже важлива в таких випадках. Світлодіоди використовують механізм, званий РК-затвором із підсвічуванням, для створення кольорів. Тепер світлодіоди мають кращу точність кольору, але вони не мають яскравих кольорів або справжнього чорного, як OLED.

Врахуємо термін служби та довговічність. Світлодіоди є марафонцями в категорії терміну служби, часто тривають до 50 000 годин. Ці потужні світильники довговічні, оскільки виготовлені з неорганічних матеріалів. Вони ідеально підходять для вуличних ліхтарів і промислових установок. OLED є передовими, але їхній термін служби коротший через органічні компоненти. Статичні зображення можуть назавжди знебарвити пікселі, що називається «вигоранням», зменшуючи термін їх служби. OLED можуть виглядати краще, але світлодіоди служать довше.

3 СПЕКТРИ ФОТОСИНТЕЗУ РОСЛИН ТА ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ

3.1 Спектральна якість світла

Правильне освітлення відіграє велику роль у житті рослин. Рослини використовують світлову енергію для фотосинтезу, процесу, в результаті якого вони перетворюють вуглекислий газ і воду на глюкозу і кисень. Висвітлення надає рослинам необхідний спектр світлових хвиль, який використовують для виконання цього процесу.

Рослини потребують різних довжин хвиль світла для ефективного фотосинтезу. Спектр освітлення повинен містити як видиме світло (червоне, оранжеве, жовте, зелене, синє, блакитне і фіолетове), так і невидимі ультрафіолетові (УФ) та інфрачервоні (ІЧ) промені. Кожна довжина хвилі грає свою роль різних фізіологічних процесах рослин [22].



Рисунок 3.1 - Штучне освітлення для рослин [23]

Фотосинтез активно відбувається при поглинанні світла певних довжин хвиль, таких як червона та синя. Червоне світло стимулює зростання та розширення клітин, а також цвітіння рослин. Синє світло сприяє

фотоморфогенезу, контролює напрямок росту та регулює вироблення хлорофілу.

Однак важливо пам'ятати, що не всі світлові джерела забезпечують необхідний спектр освітлення для здорового росту рослин. Особливу увагу слід приділяти ФАР або фотосинтетично активному випромінюванню, яке є ключовим аспектом при виборі світлового джерела для рослин. Для здорового росту та розвитку рослин необхідно забезпечити їм правильний спектр освітлення.

Фотосинтетичний активна радіація (ФАР) є основним фактором фотосинтезу у рослин. Однак не всі довжини хвиль світла однаково ефективні для стимулювання фотосинтезу. У 1970-х роках два вчених-біолога на ім'я доктор МакКрі і доктор Инада провели кілька досліджень, щоб визначити вплив світлових спектрів на фотосинтез. Це дослідження привело до створення кривої фотосинтетичного відгуку, яка тепер відповідно відома як крива МакКрі. Якщо ви посилаєтеся на криву МакКрі (рис. 3.2), ви помітите, що червоне світло (600-700 нм) майже в два рази ефективніше синього світла (400-500 нм) при проведенні фотосинтезу, з зеленим (500-600 нм) світлом між ними. До цього дослідження було поширеною помилкою, що, оскільки хлорофіл поглинає світло в основному в червоною і синьою частинах спектра видимого світла (що призводить до зеленого кольору листя рослин), зелений світло не використовувався рослинами для фотосинтезу [24].

Проте, точні і незалежні вимірювання фотосинтетичної активності при різних довжинах хвиль МакКрі і Инада продемонстрували, що світло в зеленому спектрі (500-600 нм) майже так само ефективний, як синє світло для значного числа видів рослин. Короткий пояснення цього експериментального факту полягає в тому, що у вищих рослин з'явилися як біохімічні, так і біофізичні розчини (наприклад, допоміжні пігменти) використовувати зелене світло. Ці допоміжні пігменти (в основному, каротиноїди) можна розглядати як молекули-сховища для фотонів, які безпосередньо не поглинаються хлорофілом.

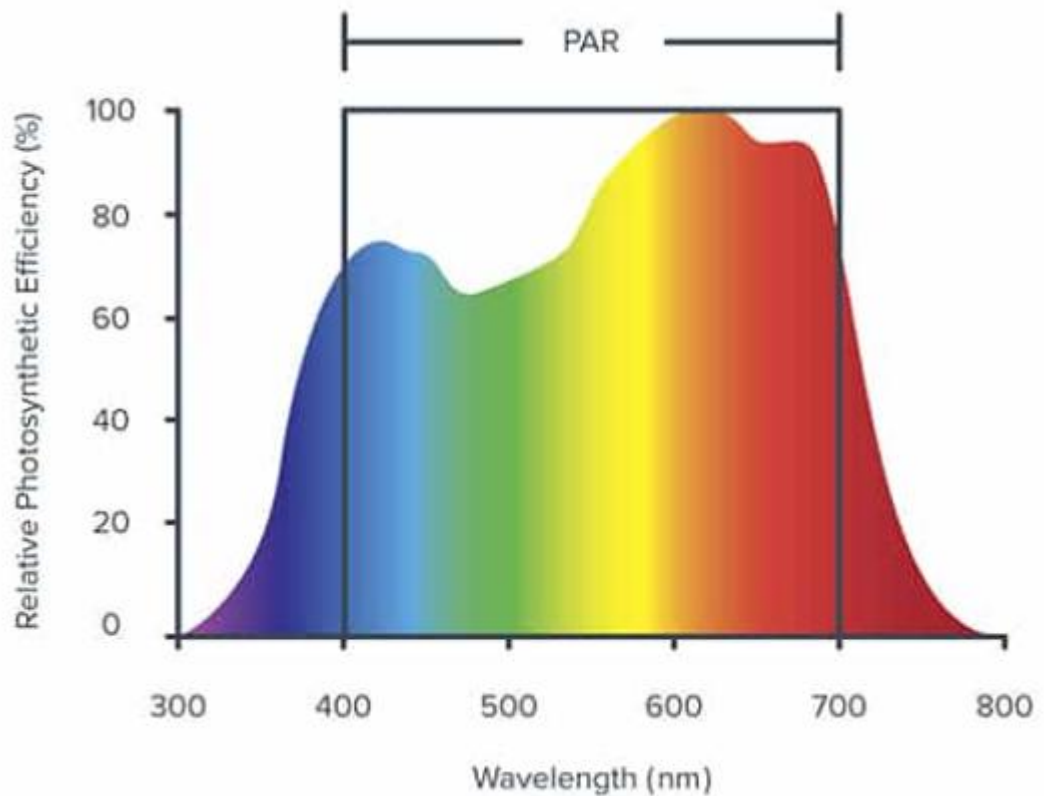


Рисунок 3.2 - Середня реакція рослини на фотосинтетичний активну радіацію (PAR) [24]

Якість спектрального світла є ключовим компонентом, який входить в розробку систем освітлення для садівництва, особливо в системах з єдиним джерелом освітлення (повна відсутність сонячного світла).

Традиційні системи освітлення з інтенсивним розрядом (HID) (натрієві і метал-галогенні лампи високого тиску) завжди мали обмеження, коли мова йшла про зміну спектральної якості світла. Використання світлодіодів в системах освітлення для рослинництва дозволяє виробникам створювати власні спектральні характеристики освітлення поряд з багатьма іншими перевагами в порівнянні з традиційними системами освітлення, включаючи: високу ефективність фотоелектричного перетворення, низьку теплову потужність і регульовані інтенсивності світла. Якість світла не тільки впливає на

фотосинтез, але також впливає на морфологію рослин, яка відома як фотоморфогенез.

3.2 Інтенсивність світла

Кількість фотонів, які поглинаються спеціалізованими фоторецепторами, відомими як хлоропласти, безпосередньо впливає на швидкість фотосинтезу. У міру збільшення інтенсивності світла (PPFD) збільшується швидкість фотосинтезу, поки не буде досягнута точка насичення. У кожного виду рослин є своя точка насичення світлом, на якій плато фотосинтетических рівнів засноване на освітленості, в якій вони розвивалися. Насичення світла відбувається при набагато меншій інтенсивності у рослин, які розвивалися в умовах тіні, ніж ті, які розвивалися в умовах повного сонця. Однак насичення світлом зазвичай відбувається (особливо у сонячних рослин), коли який-небудь інший фактор (зазвичай CO₂) обмежений.

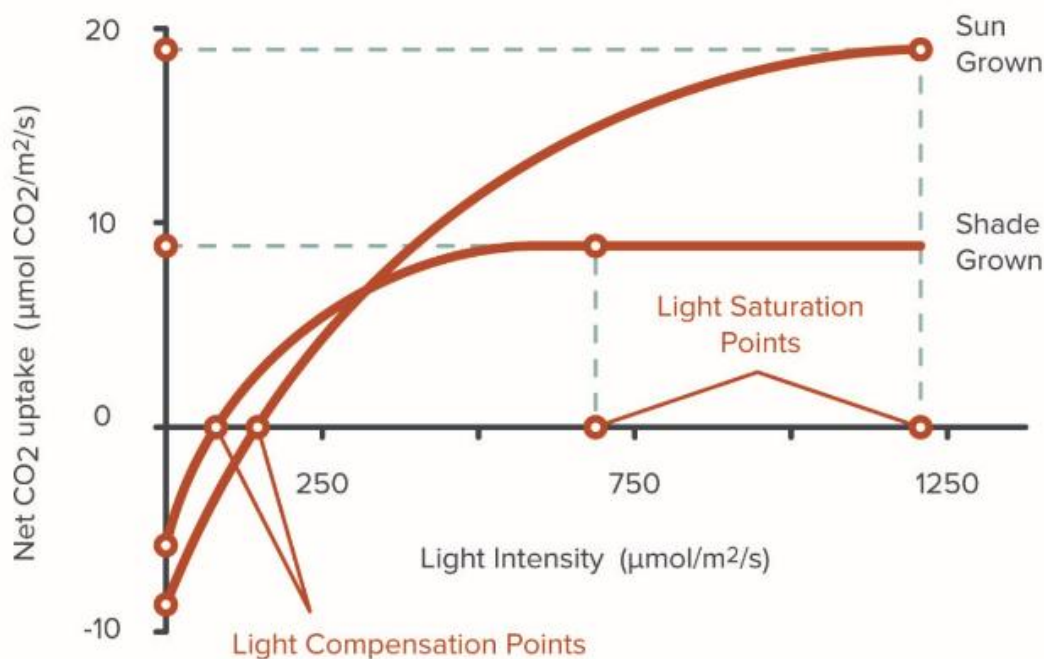


Рисунок 3.3 - Криві фотосинтетичного світлового відгуку [24]

Інший важливий міркування щодо інтенсивності світла відомо, як точка компенсації світла. Рослини мають мінімальну інтенсивність світла, необхідну для стимулювання зростання і підтримки життя. Як і слід було очікувати, точка компенсації світла виникає при більш високій інтенсивності світла для сонячних рослин, ніж для тіньових рослин. Забезпечення адекватної інтенсивності світла при правильному спектральному якості світла має вирішальне значення для стимулювання зростання нових рослин.

Системи освітлення для садівництва можна використовувати двома способами:

- для збільшення інтенсивності світла;
- для стимулювання фотосинтезу.

Додаткове світло може забезпечуватися системами освітлення в тепличних умовах. Як правило, в умовах обмеженого освітлення (наприклад, зимові місяці в північних широтах, хмарні умови або їх поєднання) або в якості єдиного джерела фотосинтетичного світла в контрольованих приміщеннях, наприклад, камера для вирощування, склад, намет для вирощування і т. Д., де сонячне світло не використовується в якості джерела для фотосинтезу.

Одним з ключових переваг використання світлодіодів для будь-якого застосування є низька теплова потужність на поверхні діода. Досягнення дуже високого PPFD за допомогою HID-ламп завжди обмежувалося відстанню, на якому лампи повинні знаходитися від навісу, оскільки ці лампи випромінюють великий відсоток енергії у вигляді інфрачервоного (ИК) світла. Інфрачервоний світло не фотосинтетичний активний і значно підвищує температуру рослин, тому одним із способів пом'якшення цього відгуку є збільшення відстані між світлом і пологом врожаю (що призводить до зниження інтенсивності світла і обмежує середу, в якій вони можуть використовуватися, для приміщень з високими стелями).

При правильному управлінні температурою світлодіоди відводять більшу частину свого тепла з заднього боку діода, тому освітлювальні прилади можна розміщувати на набагато більш близьких відстанях від навісу, що забезпечує

дуже високі рівні PPFD (≥ 1000 мкмоль / м² / s) для рослин. Одним із способів пом'якшення цього відгуку є збільшення відстані між освітлювальним приладом і пологом врожаю (що призводить до зменшення інтенсивності світла і обмежує середу, в якій вони можуть використовуватися, для приміщень з високими стелями).

3.3 Тривалість світла

Тривалість світла (фотоперіод) - це період часу, протягом якого рослина піддається впливу світла протягом 24 годин. Тривалість фотоперіоду може впливати на загальну інтенсивність світла, що отримується рослиною за 24 години, що, в свою чергу, впливає на загальне зростання. Це описується як денний світловий інтеграл (DLI), який визначається як сукупний PPFD, отриманий протягом 24 годин, і виражається в моль / м² / сут.

Фотоперіод також впливає на перехід від вегетативного до репродуктивного розвитку у кількох видів рослин. Однак насправді саме темний період (скотоперіод), а не фотоперіод, визначає, коли певні види перейдуть в репродуктивну стадію зростання. Фоторецептора фітохром в основному відповідає за сигнал про перехід до репродуктивного розвитку і росту у фотоперіодичних культур.

Короткі дні (довгі ночі) рослини цвітуть, коли фітохром сприймає безперервну довгу ніч (зазвичай ≥ 12 годин). Довгі дні (короткі ночі) рослини цвітуть короткими ночами (зазвичай ≤ 12 годин). В якості альтернативи, деякі види рослин є нейтральними в денний час, де фотоперіод не впливає на цвітіння.

В якості альтернативи, деякі види рослин є нейтральними в денний час, де фотоперіод не впливає на цвітіння. Системи освітлення для садівництва можуть використовуватися для забезпечення фотоперіодичну освітлення для збільшення тривалості світлового дня, або щоб сприяти цвітінню рослин з довгим днем, або пригнічувати цвітіння рослин з коротким днем незалежно від

пори року і клімату.

3.4 Важливість якості випромінювання

Синє світло чинить характерний вплив на цвітіння та зростання рослин. Воно підвищує загальну якість рослин у декоративних та листових зелених культурах у більш високих співвідношеннях. Для підтримки нормального розвитку рослин потрібна мінімальна кількість синього світла. У поєднанні з червоним світлом воно сприяє виробленню вторинних метаболітів, розвитку коренів, кращому живленню та компактності рослин. Його використання знижує потребу у хімічних регуляторах росту рослин (PGR). Крім того, воно посилює відкриття стоматитів та накопичення хлорофілу, що сприяє покращенню здоров'я рослин. Він також сприяє утворенню вторинних метаболічних сполук, пов'язаних із покращенням аромату та смаку.

Довжина хвилі червоного світла також формує досить ефективний діапазон хвиль для стимулювання зростання біомаси рослин та фотосинтезу. При освітленні тільки червоним світлом рослини виростають високими та витягнутими, з тонким листям. Це погана модель зростання. При додаванні до синього світла у правильній кількості світло стає збалансованим, створюючи компактність рослин. Воно застосовується здебільшого для витягування рослин, коли необхідно збільшити відстань між рослинами, та збільшення об'єму рослин на ранніх стадіях розвитку.

3.5 OLED для вирощування рослин

Сільське господарство в закритих приміщеннях зазнало серйозної еволюції з використанням технології твердотілого освітлення (SSL). Перше покоління SSL, світлодіодних світильників для вирощування рослин, забезпечило численні переваги для садівництва, включаючи підвищення ефективності та прибутковості. Наступне покоління SSL, технологія органічних

світлодіодів (OLED), потенційно може здійснити революцію у майбутньому сільського господарства у закритих приміщеннях.

Будучи поверхневими випромінювачами на скляних листах, освітлювальні панелі OLED за своєю природою тонкі (товщиною менше 1 мм) і холодні на дотик. Низьке тепловиділення та економія місця за рахунок найтоншого OLED-освітлення дозволяють фермам у закритих приміщеннях знизити витрати на кондиціювання повітря, збільшити вертикальну щільність та максимізувати врожайність, створюючи безпрецедентну ефективність та прибутковість.

Крім кращого використання простору та зниження тепловиділення, технологія освітлення OLED має істотну перевагу щодо якості світла. Панелі OLED зі спектральним діапазоном приблизно від 420 нм до 800 нм випромінюють світло у повному спектрі PAR (фотосинтетично активного випромінювання), який дуже схожий на природне денне світло. Дослідження показали, що біле світло повного спектру, що містить довжини хвиль зеленого кольору, стимулює фотосинтез більше, ніж біле світло, що містить тільки червоний та синій кольори.

Виробники, які вирощують у приміщенні, продовжують досліджувати інноваційні технології освітлення, які можуть підвищити ефективність та покращити зростання рослин. Однією з таких технологій, що знаходяться на стадії розробки, є прозорі освітлювальні панелі OLED. Прозорі OLED-екрани дозволять виробникам використовувати природне та «безкоштовне» сонячне світло, коли це можливо, але при необхідності нададуть можливість штучного освітлення. У теплиці прозорі світлодіоди можуть забезпечити додаткове освітлення в період вегетації, коли добове освітлення занадто коротке або недостатнє для оптимального росту рослин.

Освітлювальні панелі OLED пропонують безліч переваг у порівнянні з традиційними та світлодіодними світильниками для садівництва. OLED-освітлення забезпечує найменшу тепловіддачу та найвищу якість світла повного спектру з найтоншим профілем. Завдяки цим функціям OLED-

освітлення здатне змінити можливості індустрії закритого сільського господарства [25].

4 РОЗРАХУНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВІТЛЮВАЧА НА ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВОГО ОРГАНІЧНОГО СВІТЛОДІОДА

4.1 Програма розрахунку

Для розрахунку характеристик та параметрів запропонованого освітлювача використовуємо програмне забезпечення grvdm (General purpose Photovoltaic Device Model) [26-28]., яке наявне у вільному доступі (рис.4.1).

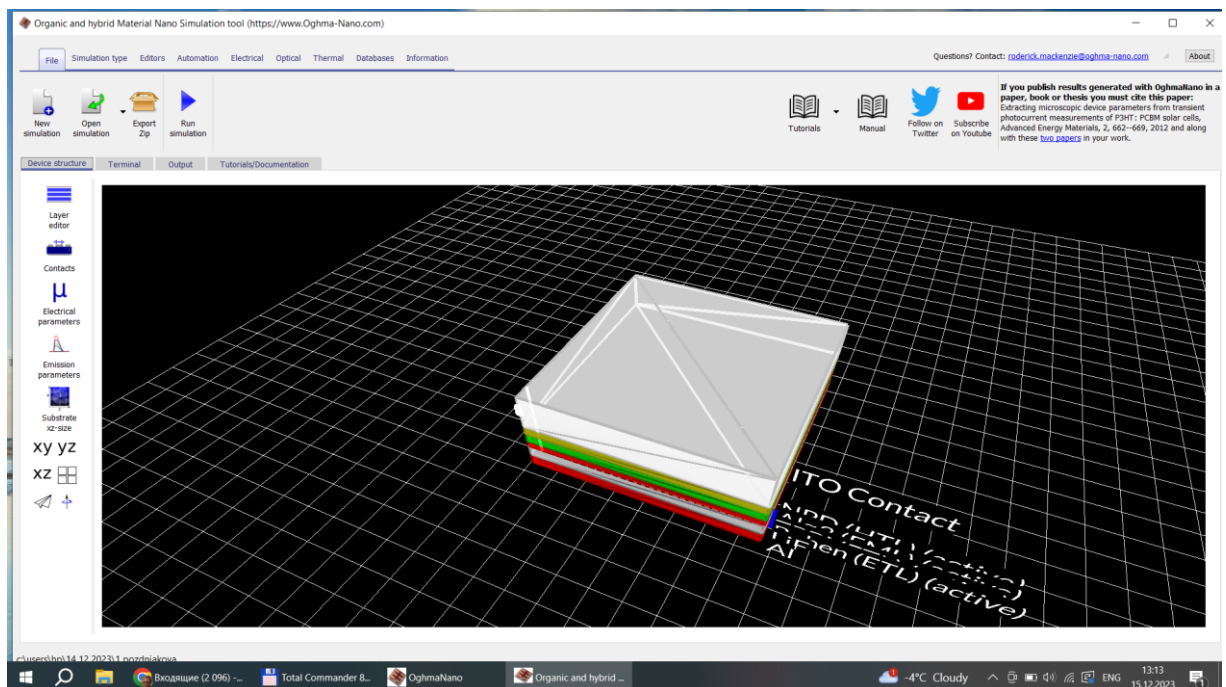


Рисунок 4.1 — Інтерфейс програми

Програма моделювання оптоелектронних приладів grvdm призначена для моделювання низки оптоелектронних пристроїв, зокрема:

- органічних сонячних елементів, з урахуванням дрейфового та дифузійного механізмів переносу;
- перовскітних сонячних елементів, з урахуванням мобільних іонів;

- органічних світлодіодів (OLED), включаючи модель трасировки промінів;
- органічних датчиків;
- оптичних фільтрів та відбиваючих покриттів;
- тонкоплівкових приладів з урахуванням механізмів поверхневої рекомбінації та ін.

Використовувана модель імітує стаціонарні та перехідні процеси у пристроях, будує вольт-амперні характеристики в умовах освітлення та у темряві.

Оптична складова моделі урахує поглинання та відбиття у глибині та на границях середовищ.

В середовищі програми `gprdm` потрібно побудувати структуру (послідовність шарів) запропонованого світловипромінюючого елемента з обґрунтуванням розмірів та типу матеріалу, що використовується.

Для коректного моделювання потрібно знати закономірності узгодження шарів структури світловипромінюючого елемента щодо послідовності матеріалів та розмірів.

Програма дає можливість виконати розрахунки електричних характеристик приладу (вольтамперна характеристика), урахувати вплив дефектів структури, отримати динамічні характеристики з часовими діаграмами, виконати моделювання контактів тощо.

4.2 Розрахунки параметрів та характеристик приладу

Для розрахунку ми вибрали наступну структуру (рис. 4.2)

Layer editor (<https://www.Oghma-Nano.com>)

Layer name	Thicknes	Optical material	Layer type	Solve optical problem	Solve thermal problem	ID
ITO Contact	1.50e-07 m	oxides/ITO/ito	other	Yes - n/k	Yes	f97c83b7ae76ea50
NPD (HTL)	4.00e-08 m	small_molecules/NPD	active layer	Yes - n/k	Yes	3ceaf809017fc808
Alq3 (EML)	4.00e-08 m	small_molecules/Alq3	active layer	Yes - n/k	Yes	82a50948b082fd18
TPBi (ETL)	3.00e-08 m	small_molecules/TPBi	active layer	Yes - n/k	Yes	id115e8a2053d221b7
Bphen (ETL)	5.00e-10 m	small_molecules/Bphen	active layer	Yes - n/k	Yes	351740275a452129
LiF	5.00e-08 m	metal/Al/std	other	Yes - n/k	Yes	38d98f3781165e0d
Al	5.00e-08 m	metal/Al/std	other	Yes - n/k	Yes	ba1bbf1a3966c12a

Рисунок 4.2 — Структура світловипромінюючого елементу

У якості шару транспортування дірок взяли N,N'-bis(1-нафтил)-1,1'-бифеніл-4,4'-діамін (NPD), як шар транспортування дірок (HTL) [29]. Цей матеріал досліджується, виробляється та використовується у якості важливого компоненту OLED фірмою Ossila. Ринкова ціна 1г (чистота не менше 99,5%) – £180.

N,N'-Ді(1-нафтил)-N,N'-дифеніл-(1,1'-бифеніл)-4,4'-діамін, також відомий як NPВ або NPD, інтенсивно використовується в органічних світлодіодах та інших пристроях. Органічні електронні пристрої, такі як полімерні фотогальваніки (OPV) і первоскітні сонячні елементи використовуються за їх видатну здатність перенесення дірок.

NPВ вважається одним із найкращих матеріалів серед конкурентів і став найпоширенішим матеріалом для OLED. Це пов'язано з підвищенням температури до 95 °C, що покращує морфологію пристрою та сприяє довговічності пристрою.

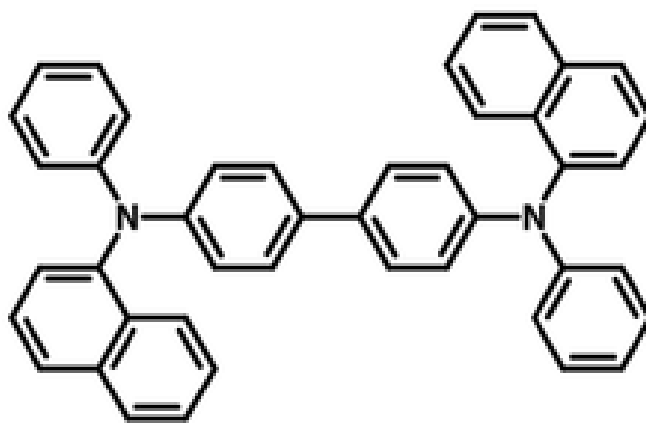


Рисунок 4.3 — Хімічна структура N,N'-Di(1-нафтил)-N,N'-дифеніл-(1,1'-біфеніл)-4,4'-діаміну (NPB);

Хімічна формула $C_{44}H_{32}N_2$, молекулярна маса 588.74 г/моль, електрохімічні параметри HOMO = 5.5 eV, LUMO = 2.4 eV, максимум поглинання λ_{max} 339 нм, максимум флуоресценції – λ_{em} 450 нм

Трис(8-гідроксихінолінато)алюміній (скорочено Alq3) є координаційним комплексом алюмінію(III) та аніону 8-гідроксихіноліну (8-HQ). Атоми азоту та кисню 8-HQ скоординовані з атомом алюмінію так, що комплекс приймає октаедричну конфігурацію (рис. 4.4).

Одночасно цей матеріал є основним випромінюючим шаром обраної структури.

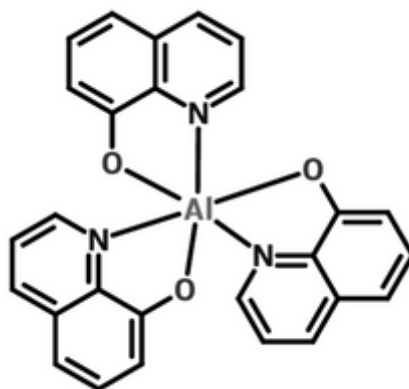


Рисунок 4.4 — Структура Alq3

Alq3 як матеріал шару, що транспортує електрони та випромінює, був першим ефективним OLED з низькою молекулярною вагою, про який повідомив Тан у 1987 році [30]. Відтоді металохінолати стали центром досліджень нових електролюмінесцентних матеріалів, причому Alq3 є найбільш вивченим.

Загальна інформація наведена в табл. 4.1:

Таблиця 4.1 – Загальна інформація по Alq3

Повне ім'я	Tris(8-hydroxyquinoline)aluminum
Синоніми	<ul style="list-style-type: none"> • Alq₃ • 8-гідроксихінолін алюмінієва сіль • 8-гідроксихінолінат алюмінію • Оксинат алюмінію • Трис(8-гідроксихінолінато)алюміній
CAS-номер	2085-33-8
Молекулярна формула	C ₂₇ H ₁₈ AlN ₃ O ₃
Молекулярна вага	459.43 г/моль
Поглинання	λ_{\max} 259 нм (у THF)
Випромінювання	λ_{\max} 512 нм (у THF)
НОМО / LUMO	НОМО 5.62 eV LUMO 2.85 eV
Класифікація	Металоорганічний, шар транспортування електронів (ETL), шар інжекції електронів (EIL), шар випромінювання OLED (ELM)
Чистота	>99% (сублімований)
Температура плавлення	415.4 °C
Зовнішній вигляд	Жовто-зеленуватий порошок

У якості електронного транспортного шару вибрано TPBi 2,2',2''-(1,3,5-Benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole). TPBi, будучи дефіцитним матеріалом, зазвичай використовується як матеріал транспортного шару електронів в оптоелектронних пристроях. Маючи низький рівень енергії LUMO (2,7 eV), TPBi також використовується як основний матеріал як для флуоресцентних, так і для фосфоресцентних світловипромінюючих систем. У деяких випадках TPBi використовується для заміни CBP (HBL)/Alq3 (ETL), щоб спростити структуру пристрою для його відмінного транспортування електронів, а також його здатності блокувати дірки з дуже глибоким рівнем енергії HOMO (HOMO = 6,2/6,7 eV). Також повідомлялося, що TPBi можна використовувати як матеріал шару інжекції електронів між Alq3 (ETL) і Cs2O3/Al (електрод). Було припущено, що тонкий шар TPBi на межі розділу Alq3/Cs2O3 сприяє інжекції електронів, а також бере участь у блокуванні дірок і утриманні екситонів [31].

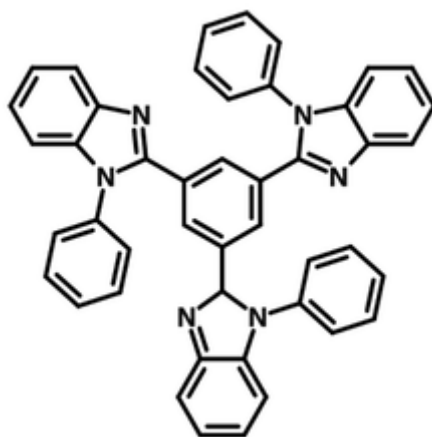


Рисунок 4.5 — Структура TPBi

Загальна інформація наведена у табл. 4.2

Таблиця 4.2 – Загальна інформація по TPVi

CAS-номер	192198-85-9
Хімічна формула	$C_{45}H_{30}N_6$
Молекулярна вага	654.76 г/моль
Поглинання	λ_{max} 305 нм (у THF)
Випромінювання	λ_{em} 370 нм (у THF)
НОМО/LUMO	НОМО 6.2/6.7 eV, LUMO 2.7 eV [1, 2]
Синоніми	2,2',2''-(1,3,5-Бензинетриіл)-трис(1-феніл-1-Н-бензімідазол)
Класифікація	Похідні бензімідазолу, матеріали електронного транспортного шару (ETL), матеріали електронного інжекційного шару (EIL), матеріали шару, що блокує дірки (HBL), флуоресцентні та фосфоресцентні основні матеріали

У якості електронного транспортного шару та блокування дірок використовуємо Bphen (ETL) та робимо розрахунки:

Результати розрахунків наведено на рисунках 4.6 – 4.13.

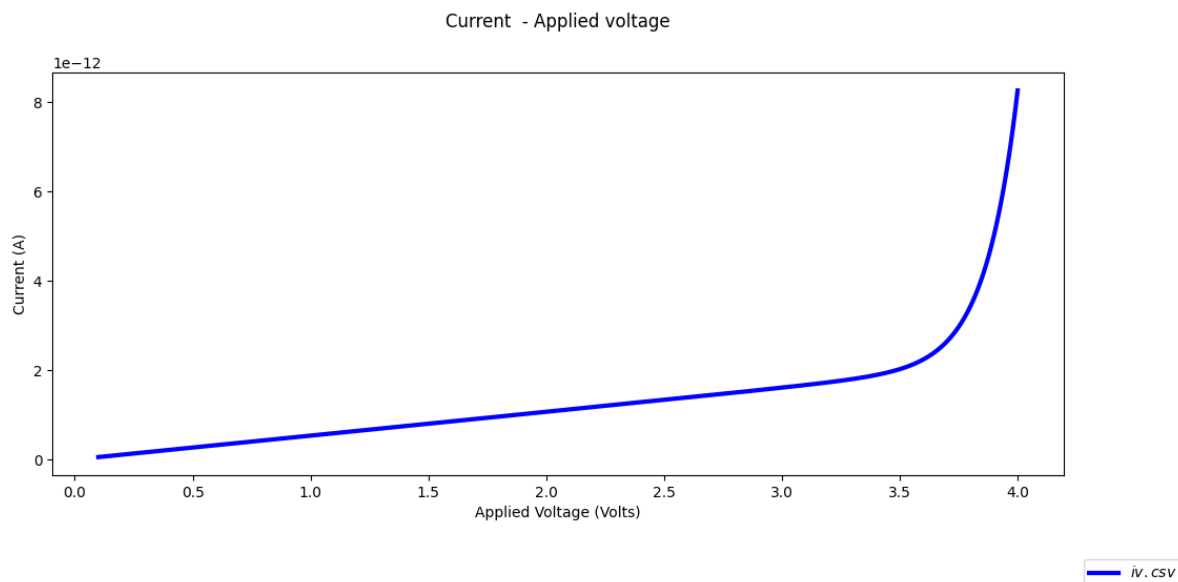


Рисунок 4.6 — Вольт-амперна характеристика обраної структури

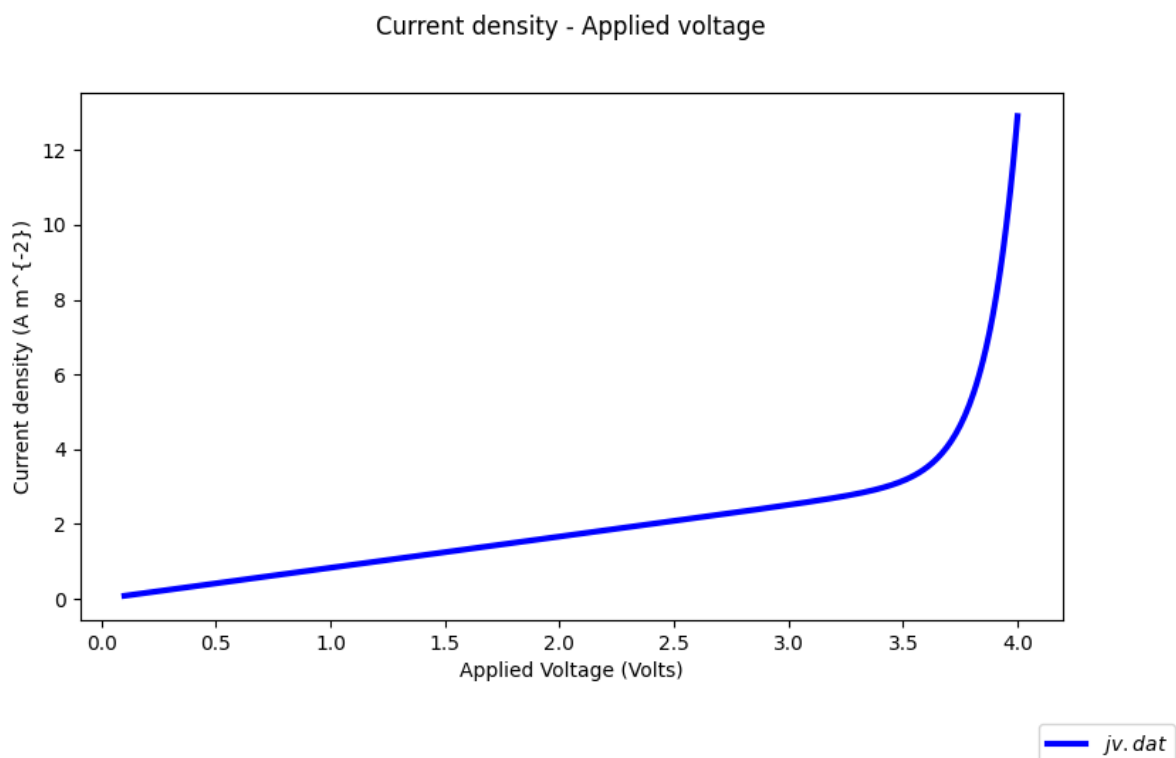


Рисунок 4.7 — Залежність щільності струму від напруги

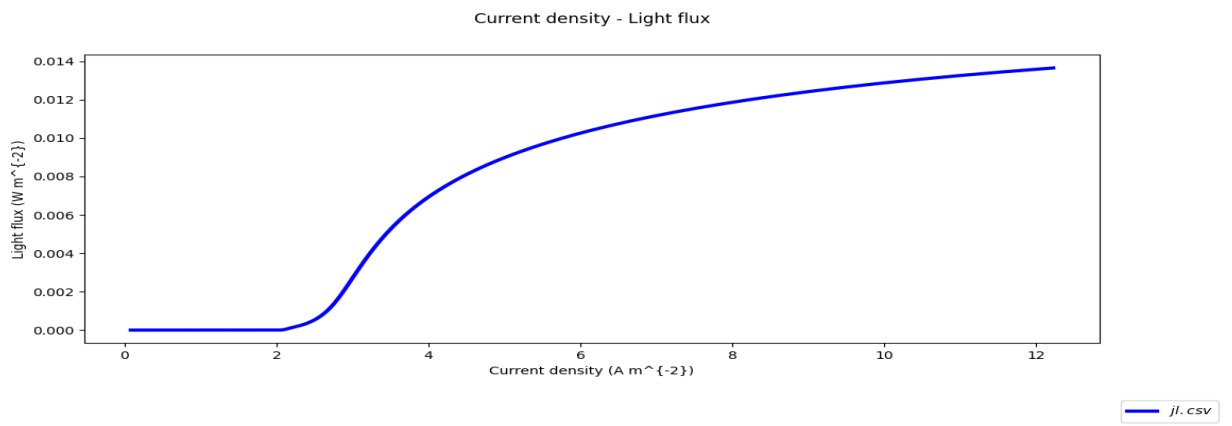


Рисунок 4.8 – Люксамперна характеристика пристрою

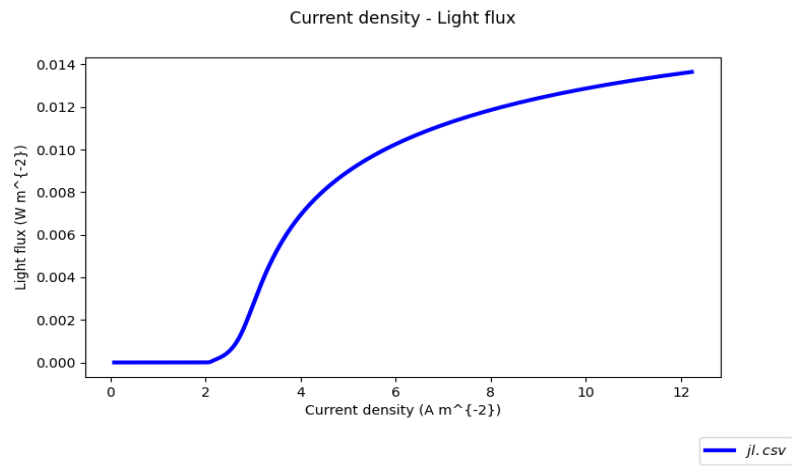


Рисунок 4.9 – Залежність просторової щільності потужності від щільності струму

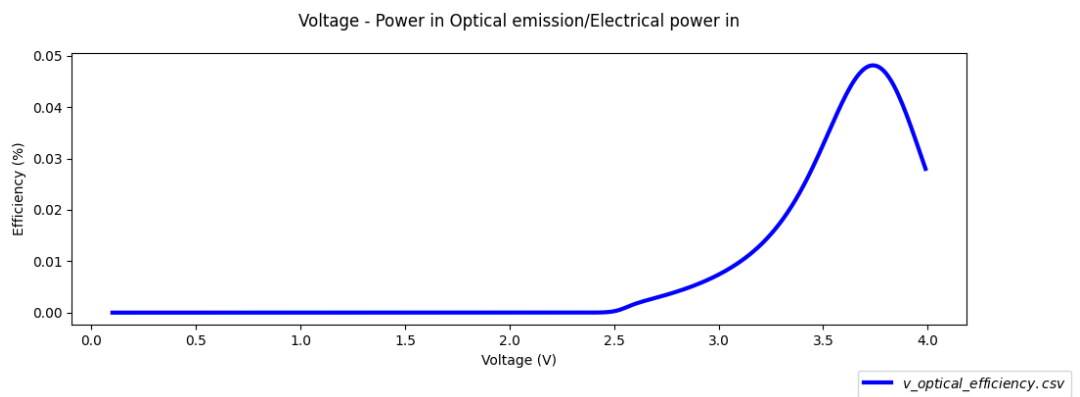


Рисунок 4.10 – Залежність оптичної ефективності від напруги

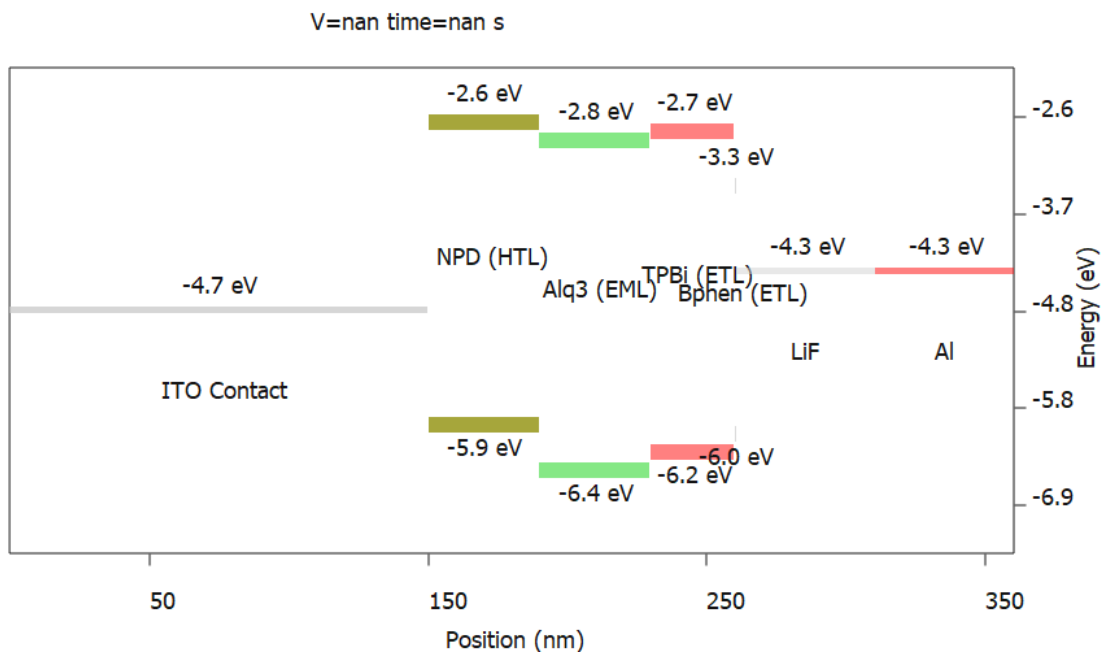


Рисунок 4.11 — Зонна діаграма досліджуваної структури

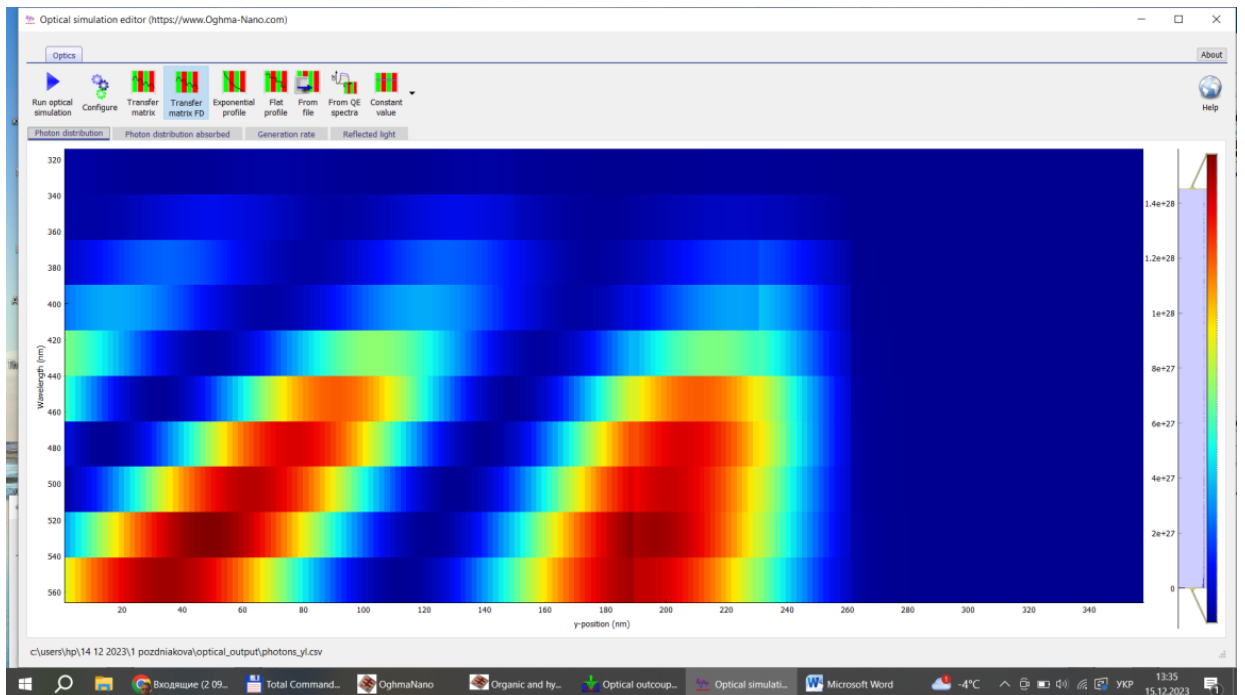


Рисунок 4.12 — Розподіл інтенсивності випромінювання по розрізу структури

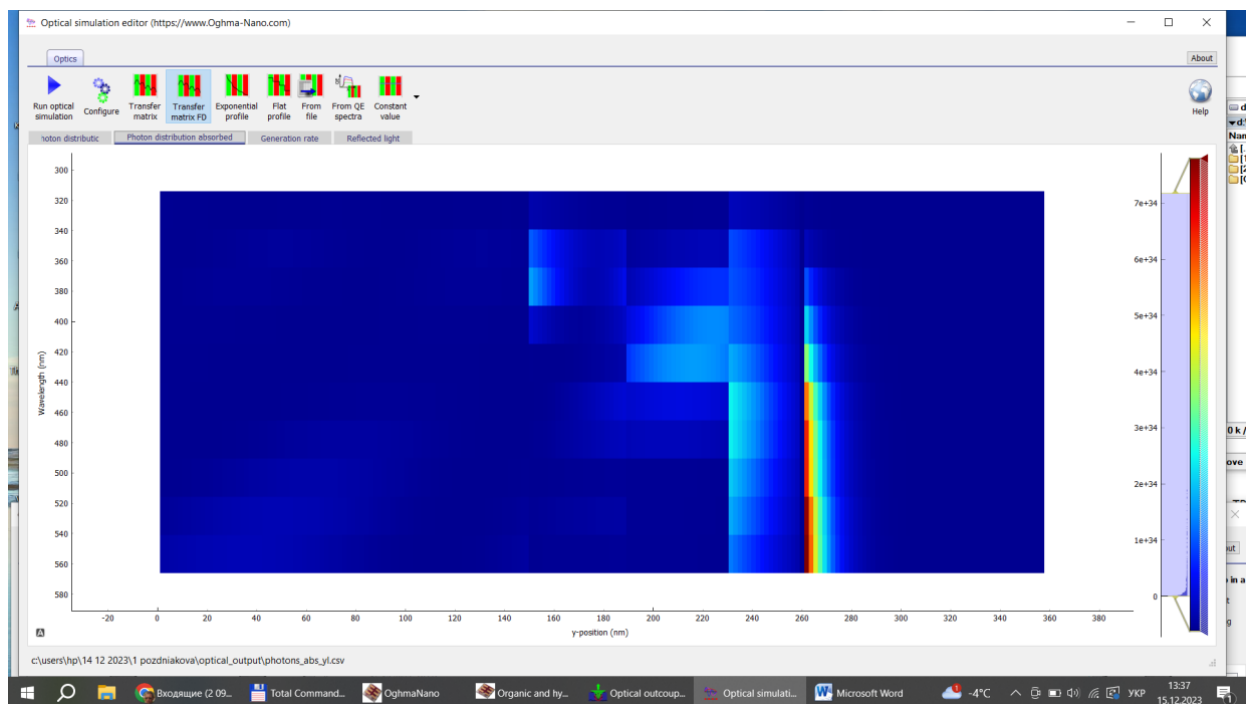


Рисунок 4.13 — Розподіл поглинання по розрізу структури

4.3 Порівняння результатів з експериментальними літературними даними

Важливим етапом досліджень є порівняння результатів розрахунків з даними експериментальних випробувань. З літературних джерел відомі досліджені зразки з матеріалами, аналогічними тим, що використовувались у розрахунках. Найбільш близькою є структура, представлена у табл. 4.3. Досліджуваний у роботі [31] прилад використовує такі шари:

- ITO у якості прозорого контакту;
- NPВ (30 nm);
- NPВ: DCJTВ: C545T* (10 nm);
- NPВ (4 nm);
- DNA (8 nm);
- (BCP) (9 nm);
- Alq₃ (30 nm);
- LiF (1 nm);
- Al (100 nm) .

Більшість з цих шарів було використано у комп'ютерній моделі освітлювача.

Для порівняння надаємо параметри ще декількох експериментальних зразків, результати дослідження яких представлені в роботі [32] (табл..

Таблиця 4.3 – Структура та параметри експериментального зразка 1 [31]

Структура пристрою	ITO/NPB (30 nm)/NPB: DCJTB : C545T * (10 nm)/NPB (4 nm)/DNA (8 nm)/(BCP) (9 nm)/ Alq₃ (30 nm)/LiF (1 nm)/Al (100 nm) [2]
Колір	Білий
Макс. яскравість	13,600 cd/m ²
Макс. Ефективність по струму	12.3 кд/А
Макс. енергоефективність	4.4 lm W ⁻¹

Таблиця 4.4 – Структура та параметри експериментального зразка 2 [31]

Структура пристрою	ITO/ 2-TNATA :33% WO ₃ (100 nm)/NPB (10 nm)/ Alq₃ (30 nm)/ Bphen (20 nm)/BPhen: 2% Cs (10 nm)/Al (150 nm) [5]
Колір	Green
Operating Voltage for 100 cd/m ²	3.1 V
Ефективність по струму для 20 mA/cm ²	4.4 cd/A
Енергоефективність для 20 mA/cm ²	3.3 lm W ⁻¹

Таблиця 4.5 – Структура та параметри експериментального зразка 3 [31]

Структура пристрою	ITO/ 2-TNATA (60 nm)/NPB (15 nm)/TAT* (30 nm)/ Alq₃ (30 nm)/LiF (1 nm)/Al (200 nm) [6]
Колір	Deep Blue

EQE при 10 mA/cm ²	7.18
Ефективність по струму для 10 mA/cm ²	3.64 cd/A
енергоефективність при 10 mA/cm ²	1.87 lm W ⁻¹

Таблиця 4.6 – Структура та параметри експериментального зразка 4 [31]

Структура пристрою	ITO/[F4-TCNQ(x nm)/m-MTDATA(y nm)] _n /NPB/ Alq₃ / Bphen /Cs ₂ CO ₃ /Al [7]
Колір	Green
Макс. яскравість	23,500 cd/m ²
Макс. Ефективність по струму	7.0 cd/A
Макс. енергоефективність	4.46 lm W ⁻¹

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі були розглянуті основні типи, конструкції, характеристики сучасних штучних джерел випромінення, що використовуються для освітлення задля вирощування різних рослин: як побутових, так і промислових та зосереджено увагу на тонкоплівкових органічних світлодіодах.

Були детально розглянуті світлодіодні випромінювачі, а саме OLED, їх спектральні характеристики, актуальність, інтенсивність, конструкції.

Був проведений аналіз щодо вимог до освітлення рослин, виходячи з максимальної ефективності засвоєння потужності випромінювання для фотосинтезу та розглянений необхідний спектр випромінювання.

Було проведено порівняння ефективності традиційних освітлювачів для рослин, таких як LED, з органічними світлодіодами та розроблені рекомендації щодо їх використання.

Виконані розрахунки характеристик та параметрів комп'ютерної моделі багатошарової структури тонко плівкового освітлювача на основі органічних матеріалів.

Представлено порівняння результатів розрахунку та наявних у літературі експериментальних зразків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Галат О. Б. Оптоелектроніка. Навчальний посібник / О. Б. Галат, Ю.О. Гордієнко, Н. Г. Старжинський. – Харків: Компанія Сміт, 2008. – 182 с.
2. Лампа розжарювання. Режим доступу: <https://budpolimer.com/ru/catalog/deadly-domu-dlya-pobutu/elektrovari/lampochki/8775/>
3. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Галат О.Б., Карнаушенко В.П. Твердотільна електроніка: навч. посібник для студентів ЗВО./ Харків: ХНУРЕ, 2020. – 236с.
4. Галогенна лампа розжарювання. Режим доступу: <https://220v.guru/elementy-elektriki/lampy/preimuschestva-i-nedostatki-galogennyh-lamp-nakalivaniya-220-v.html>
5. Спектральна характеристика галогенної лампи розжарювання. Режим доступу: <http://www.upg.com.ua/ru/news/?cid=47&nid=146>
6. Пейсахсон, И. В., Оптика спектральних приладів /И. И. Пейсахзон. – Л.: 1970. – 230 с.
7. Люмінісцентна лампа. Режим доступу: <http://indeolight.com/obekty-osveshheniya/vnutrennee/teplitsa/lyuminescentnye-lampy-dlya-rastenij.html>
8. Схема роботи люмінісцентної лампи. Режим доступу: https://electric-220.ru/news/princip_raboty_lyuminescentnoj_lampy/2018-12-24-1622
9. Мосс, Т. Напівпровідникова оптоелектроніка /Т. Мосс. – М.: Мир, 1976. – 365 с
10. Використання світлодіодів. Режим доступу: <https://milight.com.ua/ru/kak-ispolzovat-svetodiodnye-lenty-idei/>
11. Різноманітність освітлення світлодіодів. Режим доступу: <http://e-katalog.kr.ua/catalog/svetodiody-vyvodnye/>
12. Notra Z., Stakhira P., Cherpak V. et all. Characteristics of organic light emitting diodes with Copper iodide as injection layer // Thin Solid Films. –

2010. – 518. – P.7016-7018.
13. Готра З.Ю., Стахіра П.Й., Черпак В.В. та ін. Технологічні особливості формування фоточутливих органічних гетеропереходів методом вакуумного напилення // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2007. – 28(3,4). – С.25-28.
 14. S. Lee, H. Kim, and Y. Kim, “Progress in organic semiconducting materials with high thermal stability for organic light- emitting devices,” *InfoMat* 2, 12123 (2020).
 15. Схема двошарового OLED. Режим доступу: <https://ledjournal.info/byt/oled.html>
 16. Пашенко О.Г., Галат О. Б., Бабиченко О.Ю. Напівпровідникові квантові генератори з наноструктурами. Навч. посібник / Харків: ХНУРЕ, 2019. – 236с.
 17. Режим доступу: <https://www.elprocus.com/oled-display-technology-architecture-applications/>
 18. Структура прозорого OLED. Режим доступу: <https://www.uniaux.com/blog/hard-oled-soft-oled-and-original-which-is-the-best>
 19. Структура FOLED. Режим доступу: <https://oled.com/oleds/flexible-oleds-foleds/>
 20. Ma, R.; Levermore, P.A.; Pang, H.; Mandlik, P.; Rajan, K.; Silvernail, J.; Hack, M.; Brown, J.J. Challenges and Opportunities in Scaling Up OLED Lighting Devices. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2012, 42, 983–986.
 21. Режим доступу: <https://www.idtechex.com/de/research-article/oled-vs-led-lighting-is-there-room-for-oled-lighting/5477>.
 22. Режим доступу: <https://svet-fito.com.ua/novyna2/>
 23. Штучне освітлення для рослин. Режим доступу: <https://ledstorm.ua/stati/osveschenie-dlja-rastenij-ponimanie-spektra-i-far-dlja-ushpeshnogo-rosta-i-razvitija/>
 24. Режим доступу: <https://greenfuture.com.ua/ua/publikacii/2018/005-sistemi->

25. Режим доступу: <https://www.oledworks.com/integrated-solutions/grow-lights/#:~:text=OLED%20lighting%20panels%20offer%20many,with%20the%20thinnest%20profile%20available>.
26. 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.
27. Михайлов К., Галат А. Дослідження характеристик дисплея на основі органічних сполук // Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2019). Тези доповідей на IV Всеукраїнській науково-практичній конференції: 27-29 листопада 2019 р., м. Дніпро /. – Дніпро, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Кременчук: 2019. – с. 271
28. Highly Efficient and Stable Red Organic Light-Emitting Devices Using 9,10-Di(2-naphthyl)anthracene as the Host Material, H. Tang et al., Jpn. J. Appl. Phys. 46 1722 (2007)
29. Режим доступу: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0823/0287/files/NPB-NMR.png>
30. 1. Organic electroluminescent devices with improved stability, S. A. Van Slyke et al., Appl. Phys. Lett. 69, 2160 (1996); <http://dx.doi.org/10.1063/1.117151>.
31. Manipulating Charges and Excitons within a Single-Host System to Accomplish Efficiency/CRI/Color-Stability Trade-off for High-Performance OWLEDs, Q. Wang et al., Adv. Mater., 21, 2397–2401 (2009)