

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

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ТЕХНОЛОГІЇ мікро LED: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ  
РОЗВИТКУ**

спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр.ЕПм-01

А.О.Неледва

Науковий керівник,  
канд. фіз.-мат. наук, доцент

Н.М. Опанасюк

Завідувач кафедри ЕЗПФ  
д-р. фіз.-мат. наук, професор

І.Ю.Проценко

Суми 2022

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ



І.Ю. Проценко

«02» травня 2022 року

## ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Неледві Андрія Олександровича

Тема роботи **Технології мікро LED: сучасний стан та перспективи розвитку**

затверджена наказом по університету від «18» квітня 2022 р., № 0270-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 17 травня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) Сучасна людина не може уявити своє життя без таких засобів відображення візуальної інформації як телевізор, екран ноутбуку чи телефону. А розповсюдження пристроїв та постійна доступність інтернету та новітніх розробок, тільки посилюють розвиток технологій виготовлення різноманітних дисплеїв. Світлодіодний екран - пристрій відображення та передачі візуальної інформації, в якому кожною точкою, пікселем, є один або кілька напівпровідникових світлодіодів. Це невеликі за розміром напівпровідникові прилади, що випромінюють світло при проходженні електричного струму. Найбільш популярними технологіями виготовлення дисплеїв з 2017 року стали дві технології: OLED та QLED.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у вивченні фізичних та конструктивно-технологічних принципів створення таких засобів відображення інформації, огляді існуючих та перспективних напрямків розвитку дисплеїв, порівняння переваг та недоліків LED LCD і QLED, OLED і microLED технологій.

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

1. Принцип роботи і основні поняття LED екранів.

2. Огляд відомих напрямів розвитку дисплеїв.

3. Перспективи розвитку microLED і miniLED.

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

Слайди № 1-3. Актуальність роботи, мета, принцип роботи і основні поняття LED екранів

Слайди № 4-5. Огляд відомих напрямків розвитку дисплеїв

Слайди № 6-7. Перспективи розвитку microLED і miniLED.

Слайди № 8-9. Порівняння переваг та недоліків LED LCD і QLED, OLED і microLED.

Слайд №10. Висновки,

6. Дата видачі завдання 02.05.2022 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 02.05.2022 р.	вик.
2.	Проведення порівняльного аналізу відомих технологій відображення	до 12.05.2022 р.	вик.
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 17.05.2022 р.	вик.
5.	Попередній захист роботи	18.05.2022 р., онлайн	вик.
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	24.05.2022 р., онлайн	вик.

Магістрант



Неледва А.О.

Науковий керівник



Опанасюк Н.М.

## РЕФЕРАТ

Мета роботи – на основі порівняльного аналізу найбільш ефективних конструкцій MicroLED дисплеїв запропонувати засоби підвищення ефективності та покращення характеристик пристроїв.

Об'єкт дослідження – структура та конструкція MicroLED дисплеїв, особливості побудови пікселів, перспективні напрямки розвитку конструкцій MicroLED дисплеїв.

Актуальність теми полягає в тому, що ця технологія відображення впевнено конкурує з будь-якими альтернативами. Отже, в майбутньому її можна буде побачити на різних пристроях, від телевізорів та ноутбуків до смартфонів та планшетних комп'ютерів.

В ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи було розглянуто конструкції і характеристики пристроїв світлодіодної техніки, зокрема на основі неорганічних напівпровідників, а також принцип його роботи..

Метод дослідження – аналітичний з використанням порівняльного аналізу видів, конструкцій та схем побудови пристроїв. Розглянуто найбільш вживані типи MicroLED дисплеїв, фізичні основи їх роботи та особливості конструкції, порівняльні характеристики та параметри, проаналізовані переваги та недоліки. Також наведено шляхи розвитку дисплеїв у наш час та прогнозовані напрямки розвитку майбутньому на основі досвіду відомих компаній.

Робота викладена на 37 сторінках, зокрема містить 13 рисунків, список використаних джерел із 19 найменувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДЖЕРЕЛО ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, МІНІ-СВІТЛОДІОД, МІКРО-СВІТЛОДІОД, СВІТЛОДІОД, СВІТЛОВИЙ ПОТІК, ДИСПЛЕЙ.

## ЗМІСТ

С.

<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1 ПРИНЦИП РОБОТИ І ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ LED ЕКРАНІВ.</b>	<b>7</b>
1.1 Основні поняття та історія розвитку оптоелектроніки.....	7
1.2 Світлодіод та світлодіодні екрани.....	8
<b>РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ВІДОМИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ ДИСПЛЕЇВ.....</b>	<b>14</b>
2.1 Огляд OLED ДИСПЛЕЇВ.....	14
2.2 Досягнення в області дисплеїв на основі квантових точок.....	15
<b>РОЗДІЛ 3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ microLED і miniLED.....</b>	<b>19</b>
3.1 Розробка microLED.....	19
3.2 MiniLED і MicroLED: перспективні технології відображення, наступного покоління.....	21
3.3 Майбутнє 3D-дисплеїв: Micro-LED відіграє ключову роль.....	30
3.4 Аналіз технологій відображення.....	32
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>35</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>36</b>

## ВСТУП

Якщо глянути на історичний розвиток електроніки то насамперед бачимо, що успіхи, досягнуті електронікою, історично значною мірою пов'язані з розвитком обчислювальної техніки. Обидві ці галузі техніки розвивалися у тісному взаємозв'язку.

Перші електронні комп'ютери з'явилися в першій половині 20 століття. На відміну від попередніх, вони могли виконувати задану послідовність операцій за програмою, що була задана раніше, або послідовно розв'язувати задачі різних типів. Перші комп'ютери були здатні зберігати інформацію в спеціальній пам'яті. Розробка новітніх електронних систем та пристроїв на сьогоднішній день є одним із пріоритетних завдань, які вирішує кожна розвинена держава.

Сучасна людина вже не може уявити своє життя без телевізорів та ноутбуків та телефону. А розповсюдження пристроїв та постійна доступність інтернету та технологій, тільки посилює розвиток технологій виготовлення дисплеїв. Одним з головних факторів набуття популярності якісних дисплеїв є розваги кіно, ігри і тд.

Прогрес електроніки сприяв виникненню та розвитку кібернетичної – науки, що займається в машинах і живих організмах питаннями управління та зв'язку. З винаходом ЕОМ з'явилася потреба виведення інформації на екран.

Сьогодні світ неможливо уявити без різних видів дисплеїв, які знаходять застосування в самих різних областях науки і техніки: медицині, автомобільній промисловості, телекомунікації, побутової техніки і т. д, їх виробництво стає більш екологічним та дешевим, з'являються нові галузі в електроніці.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження сучасних тенденцій розвитку обчислювальних приладів в електроніці, а також оволодіння сучасними технологіями, навичками майстерності у галузі майбутньої професії, формування на базі одержаних у навчальному закладі знань професійних умінь та навичок, а також отримання практичних навичок.

## РОЗДІЛ 1

### ПРИНЦИП РОБОТИ І ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ LED ЕКРАНІВ

#### 1.1 Основні поняття та історія розвитку оптоелектроніки

Оптоелектроніка - науково-технічна галузь, пов'язана з вивченням ефектів взаємодії між електромагнітними оптичними хвилями діапазону та електронами твердого тіла і створення оптоелектронних пристроїв, в яких ці ефекти застосовували для генерації, обробки, передачі, зберігання та відображення інформації.

Спершу оптоелектроніка розглядалася лише як область електроніки, до складу якої входили лише світло випромінювачі та фотоприймачі. Але останні досягнення в цій галузі суттєво змінили уявлення та розуміння концепції оптоелектроніки. Є термін, функціональна оптоелектроніка, багатофункціональні оптоелектронні модулі та ін.

Таким чином, в наш час оптоелектроніка стала багатогранним науковим напрямом, сфера дії якого в біології, техніці, медицині важко полічити.

Сучасна оптоелектроніка як науково-технічний напрямок характеризують такі основні ознаки:

1. Фізичною основою оптоелектроніки складають явища, засоби і методи, для яких є принциповим поєднання і безперервність оптичних і електричних процесів.

2. Технічна основа оптоелектроніки визначається: мініатюризацією елементів; інтеграція елементів та функцій; орієнтація на спеціальні надчисті матеріали; використовувати методів групової обробки, такі як епітаксія, дифузія, фотолітографія, нанесення тонких плівок, іонна імплантація тощо.

3. Функціональне призначення оптоелектроніки полягає у вирішенні задач інформатики: формування інформації шляхом перетворення різних зовнішніх впливів у відповідних електричних та оптичних сигналах; передача і перетворення інформації; зберігання інформації, що включає такі процеси як записування, безпосереднє зберігання, стирання, читання, відображення

інформації, яка полягає у перетворенні вихідних сигналів інформації системи до виду, придатної для сприйняття людським оком.

Для вирішення цих проблем в оптоелектронних пристроях використовуються як оптичні, так і електричні сигнали. При цьому саме вирішальною є оптичні, і саме це досягає якісно нове відрізняє оптоелектроніку від електроніки.

Суворо здійснити розмежування у всіх без винятку конкретних випадках не завжди вдається, але загалом вищезазначені особливості дозволяють окреслити діапазон тих пристроїв, схема реалізації яких висвітлено у цій корсовій роботі.

Оптоелектроніка синтезує досягнення багатьох галузей науки і техніки, серед яких, насамперед, квантова електроніка, оптика, напівпровідникова техніка, електрооптика, нелінійна оптика, голографія, фотоелектроніка, волоконна оптика та інфрачервона техніка [1].

Новий напрям для модернізації оптоелектроніки дає розвиток наноелектроніки, яка виникла в надрах мікроелектронної техніки при створенні великих інтегральних мікросхем і гетеролазерів, які характеризуються різким зменшенням пасивних і активних областей до нанометрів. Оскільки ця довжина є в порівнянні з розмірами атомів та розмірів хвиль електронів і фотонів, відбувається перехід на нові методи формування діелектричних, напівпровідникових та металевих структур, відійшли від традиційних технологій та пошук нового, інших досконаліх технологічних процесів на атомно-молекулярному рівні.

Серед різноманітності розробок наноелектронних технологій найбільше практичне застосування отримала реалізація наноструктур за допомогою іонних та молекулярних потоків: іонна імплантація та літографія, плазма осадження плівки та травлення, епітаксія молекулярного-провеневого гетероструктур.

Використання іонних процесів при інтеграції наноструктур в функціональні мікро- та оптоелектронні пристроїв відкривають нові перспективи побудови надшвидких нанопроцесорів на основі іонів нанотехнології створення кванторозмірних гетерогенних інформаційних середовищ в наземних та



космічних умовах. Після такої технології на практиці вони можуть здійснити революцію в усіх існуючих методах проектування та виготовлення мікроелектронних та оптоелектронних пристроїв, що забезпечують їх високу надійність, низькі втрати енергії у поєднанні з простотою та низькою вартістю виготовлення [2].

## 1.2 Світлодіод та світлодіодні екрани

Напівпровідникові індикатори є одним з видів світлових індикаторів, під якими усвідомляють прилади, де данні, що призначені для видимого випромінювання, відображається за допомогою сукупності або одного, дискретних елементів. Напівпровідникові індикатори є активними знакодруківних індикаторами, в яких застосовується явище електролюмінесценції. Високі технічні характеристики напівпровідникових індикаторів (НПІ) забезпечили їх успішне втілення в апаратурі як елементи індикації, що застосовують в приладах рухомими об'єктами, управління стаціонарним технологічним устаткуванням та приладами побутового призначення та ін. Є перевага індикаторів напівпровідникової технології, що забезпечують можливість їх конструктивного безшовного з'єднання у виконанні одноманітних модулів. Крім того, модульність індикаторів підтверджується висока ремонтпридатність додатків відображення інформації. Ще не менш важлива перевага НПІ є можливість значно скоротити об'єми схем управління елементами індикації систем за рахунок використання елементної бази і підвищити надійність індикаторних пристроїв і систем, виконаної лише за напівпровідниковою технологією [3].

Світлодіод або світловипромінювальний діод (LED) - напівпровідниковий пристрій з електронно-дірковим переходом, що здійснює оптичне випромінювання при проведенні через нього електричного струму в прямому напрямку. Випромінюване світло знаходиться у видимому діапазоні спектра. Його спектральні характеристики залежать великою мірою від хімічного складу використаних в світлодіоді. Кристал світловипромінювальний діода випромінює

єдиний колір, на відміну від лампи, що випромінює більш широкий спектр і де єдиний колір відсіюється зовнішнім світлофільтром.

У порівнянні з іншими електричними джерелами світла (перетворювачами електроенергії в електромагнітне випромінювання видимого діапазону), світлодіоди мають наступні відмінності: висока механічна міцність, вібростійкість, висока світлова віддача (відсутність нитки розжарювання та інших чутливих складових); кількість циклів включення-виключення не роблять помітного впливу на термін служби світлодіодів, має тривалий термін служби: від 30.000 до 100.000 годин (при тривалій роботі відбувається «отруєння» кристала і поступове падіння яскравості); мала інерційність (включаються відразу на повну яскравість); різний кут випромінювання: від 15 до 180 градусів; низька вартість індикаторних світлодіодів, але відносно висока вартість при використанні в освітленні, яка знизиться при збільшенні виробництва і продажів, нечутливість до низьких і дуже низьких температур (проте, високі температури протипоказані); екологічність (відсутність ртуті, фосфору і ультрафіолетового випромінювання).

Застосування світлодіодів: у промисловому, вуличному, побутовому освітленні як індикаторів (у вигляді одиночних світлодіодів або буквенно-цифрового табло); Так же використовують у великих вуличних екранах які показують звідки на беларусь готувався напад, як джерело світла в ліхтарях і світлофорах. А якості джерел модульованого оптичного випромінювання (передача сигналу по оптоволокну, пульти ДУ); в підсвічуванні РК-екранів (стільникових телефонів, моніторів, телевізорів і т.д.); в світлодіодних дорожніх знаках.

Актуальність дослідження полягає у тому, що нові технології дозволяють з точнішою передачею кольору відображати зображення, та створювати дисплеї з більшим розширенням задля кращої деталізації об'єктів на екрані кінцевих пристроїв. Випромінювання виникає в області р-п-переходу при протіканні по ньому прямого струму в результаті рекомбінації носіїв заряду (електронів і дірок). При цьому вони переходять з більш високого енергетичного рівня на більш низький, а надлишкова енергія виділяється у вигляді випромінювання. Довжина

хвилі  $\lambda$  потоку, що випромінюється визначається різницею енергетичних рівнів  $\Delta E$ , між якими відбувається обмін:

$$\lambda = \hbar c \Delta E, \quad (1.1)$$

де  $\hbar$  – стала Планка,  $c$  – швидкість світла.

Зазвичай  $\Delta E$  практично дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника, на основі якого виготовлений діод. Діапазон довжин хвиль видимого світла становить  $0,45 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,68 \text{ мкм}$ . Для виготовлення LED застосовують НП матеріали з порівняно великою шириною забороненої зони  $E_p > 1,8 \text{ еВ}$ , такі як карбідкремнію, фосфід галію і тверді розчини, що мають в своєму складі галій-миш'як-алюміній або галіймиш'як-фосфор. Колір випромінювання LED можна змінювати в деяких межах шляхом додавання в НП матеріал атомів речовин – активаторів. Наприклад, залежно від концентрації азоту і цинку в фосфіді галію колір світіння може змінитися від зеленого до червоного. Існують світлодіоди з керованим кольором світіння (наприклад типу АЛС331А), що містять в корпусі два світловипромінювальних переходи, один з яких має різко виражений максимум спектральної характеристики в зеленій смузі, інший - в червоній. Колір випромінювання такого LED залежить від співвідношення струмів через переходи. На рисунку 1.1 наведена спрощена структура світлодіода. Світло, що випромінюється напівпровідниковим кристалом, відбивається від рефлектора і проходить через прозорий або напівпрозорий корпус.



Рисунок 1.1 - Структура світлодіода [4]

Коли ми порівнюємо енергозбереження між однорідним розміром світлодіодних чіпів і різними розмірами світлодіодних чіпів, ми повинні враховувати вміст зображення економія енергії залежить від вмісту кольору, а максимальна економія енергії (>20%) досягається при червоному кольорі. Тому, якщо вміст зображення насичений червоним кольором, економія енергії буде більш очевидною.

Світлодіодний екран (LED screen, LED display) - пристрій передачі візуальної інформації та відображення, в якому кожною точкою, пікселем, є один або кілька світлодіодів. Серед великої різноманітності систем відображення інформації з активних світінням (польові, електролюмінесценції, плазмові і т.д. дисплеї), світлодіодні системи відображення стоять окремо. Це пов'язано з тим, що такі системи будуються з окремих світлодіодів, які групуються спочатку в пікселі, а потім в матрицю пікселів. Світлодіодні екрани за принципом побудови діляться на два типи:

Кластерні світлодіодні екрани. У кластерних екранах кожен піксель, що містить від трьох до кількох десятків світлодіодів, об'єднаний в окремий світлоізолюючий корпус, який залитий герметиком. Такий конструктивний елемент називається кластером. Кластери закріплені за допомогою гвинтів на лицьовій поверхні екрану. Від кожного кластера відходить різні проводів, що підключається, за допомогою електричного роз'єму, до відповідної точки плати. Такий спосіб побудови різнокольорових світлодіодних екранів поступово зменшуються, дає місце більш пріоритетному технологічному матричному принципу.

Матричні світлодіодні екрани. В цій технології кластери і керуюча плата об'єднані в єдине ціле в матрицю, тобто на керуючій платі знаходяться світло діоди і електроніка, які залиті герметиком. Залежно від діагоналі і розширення екрану, кількість LED, пікселів, може коливатися від 3 до кількох десятків. А розподіл кількості світлодіодів за кольорами в пікселі змінюється від типу застосовуваних LED в інтересах дотримання балансу білого. Світлодіодні екрани можуть бути як стаціонарними, так і пересувними (встановленими на мобільній платформі), як

зовнішніми (призначеними для вулиці), так і внутрішніми (призначеними для приміщень). Пікселі об'єднуються в стандартні конструкційні елементи - модулі, які мають у різних виробників різні розміри, наприклад: 130 x 65 мм, 160x160 мм, 256 x 256 мм та ін. Модуль - це спеціальна плата, в яку з лицьового боку вбудовані світлодіоди (цю операцію виконують на заводах спеціальні автомати), а на тильній стороні розміщується електронні елементи. При виборі світлодіодного екрана потрібно вирішити, чи буде світлодіодний екран використовуватися для показу попередньо створених відео, чи буде необхідний для трансляції онлайн. Також варто звернути увагу на плановане застосування екрану (внутрішнє або зовнішнє), на розмір екрану, на розширення екрана, на робочу відстань до екрану, на якість використовуваних LED. Варто також вибрати тип світлодіодів і крок пікселя.

Навколишнє світло частково відбивається на ділянці мікросхеми світлодіодів, але поглинається в області чорної матриці. Отже, коефіцієнт відбиття навколишнього освітлення пропорційний співвідношенню діафрагми світлодіодного дисплея. При заданому співвідношенні діафрагми коефіцієнт відбиття навколишнього освітлення синього та зеленого світлодіодів приблизно в 2,2 рази сильніший, ніж у червоного світлодіода. Для смартфонів із сенсорною панеллю та портативних комп'ютерів покривне скло зазвичай не має антиблікового покриття (AR). Таким чином, ми припускаємо, що їх поверхневе відбиття становить близько 4%. Однак більшість телевізорів використовують пульт дистанційного керування, щоб ми могли наносити AR-покриття для зменшення поверхневого відбиття. Тут ми припускаємо, що їх поверхневе відбиття становить 1,2%. Крім того, освітленість навколишнього світла може сильно відрізнятись залежно від умов освітлення навколишнього середовища, наприклад, прямих сонячних променів, офісного світла та світла вітальні. На сучасному рівні розвитку комунікацій щосекунди передається величезна кількість інформації, з якої відображається на дисплеях кінцевих пристроїв абонентського доступу [4].

## РОЗДІЛ 2

### ОГЛЯД ВІДОМИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ ДІСПЛЕЇВ

#### 2.1 Огляд OLED дисплеїв

Найбільш популярними технологіями виготовлення дисплеїв у 2017 році стали дві технології: OLED та QLED. OLED (Organic Light-Emitting Diode) – це технологія створення дисплеїв, заснована на розміщенні органічної плівки (на вуглецевій основі) між двома провідниками, що пропускають електричний струм, через вплив якого плівка випромінює світло [5].

Існує 2 види OLED: з пасивною матрицею та з активною матрицею. Пасивна матриця є масивом анодів, розміщених рядками, і катодів, розміщених стовпцями. Щоб подати заряд на певний органічний діод, треба вибрати потрібний номер анода і катода, на перетині яких знаходиться потрібний піксель, і подати струм. Використовується в монохромних екранах з діагоналлю 2-3 дюйма (дисплеї мобільних телефонів, розумних годинників, тощо). Активна матриця: для управління кожним пікселем OLED використовуються транзистори, запам'ятовуючі необхідні для підтримки світіння пікселя данні. Керуючий сигнал подається на потрібний транзистор, завдяки чому комірки досить швидко поновлюються. Технологію яку використовують називається TFT. Створюється масив транзисторів у вигляді матриці, який накладається на підкладку прямо під органічний шар дисплея. Шар TFT формується з аморфного або полікристального кремнію. Типова структура OLED представлена на рисунку 2.1.

Отже матриці на основі органічних LED мають кілька переваг, серед яких: відсутність додаткового підсвічування пікселів, великі кути перегляду без погіршення зображення, спрощене виготовлення порівняно з РК, що дозволяє створювати дисплеї з роздільною здатністю до 8K UHD.

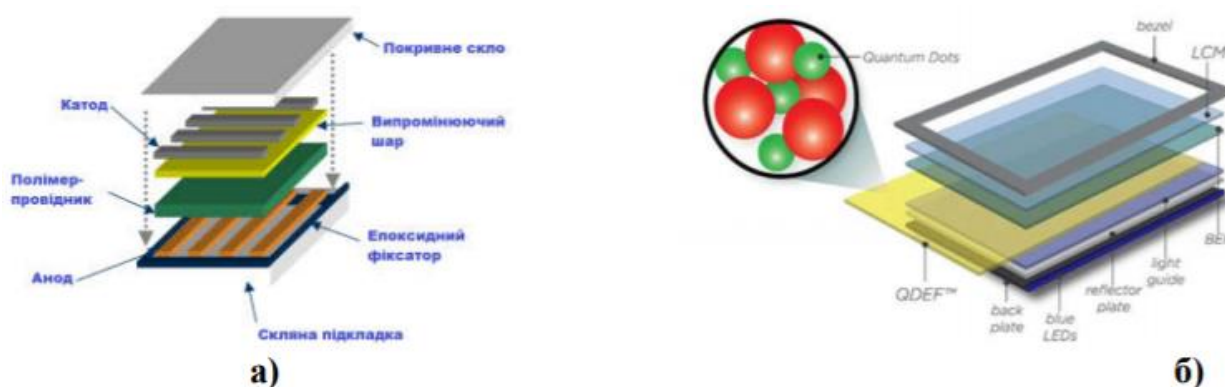


Рисунок 2.1 - Типові структура OLED пристроїв [6]

## 2.2 Досягнення в області дисплеїв на основі квантових точок

Квантові точки (КТ) — це дрібні напівпровідникові частинки, розміри яких становлять кілька нанометрів. Вони демонструють унікальні електронні та оптичні властивості, які відрізняються від властивостей об'ємних напівпровідникових матеріалів. КТ мають дискретні електронні стани, як у природних атомів і їх електронна хвильова функція дещо аналогічна функцією реального атома. Тому їх часто називають штучними атомами [7].

Завдяки своїм відмінним властивостям КТ знайшли застосування в різних сучасних технологіях, включаючи сонячні батареї, фотодетектори, фотодіоди, польові транзистори, біологічні системи та світлодіоди.

КТ використовуються як понижуючий перетворювач кольору для світлодіодів (LED) для створення ефективних джерел освітлення та високоякісних дисплеїв. З світлодіодами використовуються квантові точки як з електричною, так і з оптичною накачкою. Поряд з передачею енергії випромінювання від світлодіодів до КТ, інший механізм включає резонансну передачу енергії Форстера, який відповідає за передачу не випромінюваної енергії від світлодіодів до КТ. Дисплеї на основі електролюмінесценції КТ мають вищі можливості, ніж будь-яка з технологій OLED або рідкокристалічних технологій, щоб забезпечити найкраще рішення з широкою гамою та чистим чорним кольором [8].

Недавні QD-LED-телевізори з лінзами з підсвічуванням країв використали перше рішення для КТ в дисплеях. У ньому використовувалася дисперсія КТ в полімері, вбудованому в скляну трубку, розміщену по краях екрана, над смугою світлодіодів.

Цей метод має багато недоліків, включаючи зниження температури виробництва. Це виявилось складним для ранніх КТ, які страждали від проблем теплової нестабільності; включаючи дуже важку герметичну трубку для забезпечення тривалої надійності роботи. Сучасна технологія вибору для телевізорів QD-LCD - це плівки КТ на дисплеях. По-перше, квантові точки на основі селеніду кадмію або фосфіду індію були накладені на синє світлодіодне підсвічування і включені в прототипні РК-матриці, що забезпечило переваги кольорових характеристик КТ. Завдяки вищій продуктивності, світловій ефективності та широкому діапазону, В останні кілька років зазвичай використовуються квантові точки на основі CdSe. Однак Cd має негативний вплив на навколишнє середовище. Отже, КТ для InP та перовскіту вважаються кандидатами наступного покоління для КТ. Останнім промисловим стандартним рішенням для створення КТ на екранах є плівки без кадмію. Проте все ще існує консенсус, що кольорові фільтри КТ наступного покоління все ще залишаються майбутньою зупинкою на шляху досліджень і розробок КТ.

Серед різних типів КТ, таких як CdSe та InP, перовскітні квантові точки демонструють декілька чудових оптичних характеристик, включаючи високий квантовий вихід фотолюмінесценції, регульовану довжину хвилі випромінювання, високу чистоту кольору, що робить їх можливим кандидатом для використання наступного покоління в технології відображення [9].

Отже, перовскітові квантові точки були затребувані в області досліджень протягом останніх кількох десятиліть завдяки їх ефекту квантового утримання та стійкості до різних дефектів. Декількома синтетичними шляхами були спробовані знайти метод, який може надійно виготовляти стабільні та стійкі до дефектів перовскітові квантові точки. Зараз розроблено два основних шляхи синтезу:



синтез при кімнатній температурі та синтез гарячим інжекцією. Перший включає змішування галогеніду цезію ( $\text{CsX}$ ) і галогеніду свинцю ( $\text{CsX}_2$ ) розчиннику, такому як диметилсульфоксид (ДМСО) або N,N-диметилформамід (ДМФА), з подальшим додаванням лігандів, що укупорюють, таких як олеїнова кислота та олеїламін, при інтенсивному перемішуванні. Потім суміш додають у колбу для інтенсивного перемішування, що містить більш слабкий розчинник, такий як толуол, так що квантові точки перовскіту починають випадати в осад і їх можна далі розділити центрифугуванням. Другим методом є так званий метод «гарячої ін'єкції», що включає одержання олеату цезію в 1-октадецені (ОДЕ) під аргоном при  $150\text{ }^\circ\text{C}$  шляхом перемішування карбонату цезію та олеїнової кислоти. Галогенід свинцю окремо сушать в ОДЕ шляхом вакуумного нагрівання, а ліганди для укупорки, включаючи олеїнову кислоту та олеїламін, додають під аргоном для його повного розчинення. Потім розчин олеату цезію перемішують протягом 5–10 с при  $150^\circ\text{C}$  до випадання осаду, який далі відокремлюють центрифугуванням. У порівнянні з CdSe та InP-залежними КТ, перовскітові квантові точки мають ряд переваг, таких як можливість налаштування довжини хвилі випромінювання від синього до червоного, вузька повна ширина на половині максимуму, легке виготовлення тощо. Однак деякі проблеми перешкоджають виконанню перовскітові квантові точки з точки зору представлення їх у вигляді перетворювача кольору для програм відображення, і деякі проблеми розглядаються в цьому огляді. Оптичні властивості перовскітові квантові точки можуть бути легко порушені різними впливами навколишнього середовища, такими як тепло, волога, високоенергетичне випромінювання тощо, що може змінити їх властивості поверхні та стабільність у довгостроковій перспективі. Крім того, конфігурація КТ важлива для оцінки їх стабільності, оскільки склад КТ і взаємодія між атомами є визначальними факторами для оптичних властивостей і стабільності КТ. Хоча перовскітові квантові точки мають чудові оптичні властивості, їх застосування для відображення обмежено перовскітові квантові точки із зеленим випромінюванням  $\text{CsPbBr}_3$ . Більше того, вони не підходять для застосування на дисплеях, оскільки страждають від

високого термічного гасіння при більш високих температурах, що призводить до проблем зі стабільністю [8].

Причинами цієї проблеми є поверхневі та об'ємні дефекти, які можуть викликати поверхневі пастки та міграцію іонів відповідно. Отже, ці проблеми необхідно подолати, щоб можна було успішно запровадити для програм відображення без проблем зі стабільністю. Запропоновано кілька способів підвищення стабільності, наприклад, інженерія композиції, інженерія поверхні, інкапсуляція матриці та інкапсуляція пристроїв. Вирішуючи це питання, було досягнуто шляхом заміни олеїламіну на цетилтриметиламоній бромід, який не може бути протонований, тим самим пригнічуючи передачу протонів між лігандами та покращуючи стабільність у перовскітових квантових точок. Крім того, для покращення вологостійкості та термічної стабільності, можна додатково компонувати з карбоксил-функціоналізованим полістиролом. Завдяки своїм чудовим характеристикам КТ відносно придатні для багатьох застосувань технологій відображення, таких як білі світлодіоди, гнучкі системи, що містять датчики, виконавчі механізми тощо. Тим часом, перовскітні КТ вважаються передовим матеріалом завдяки їх високій ефективності та чистоті кольору [9].

## РОЗДІЛ 3

### ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ microLED і miniLED

#### 3.1 Розробка microLED

Сьогодні microLED визнаються в якості кінцевої технології відображення і є одним з найбільш швидко зростаючих у світі технологій, як технології гіганти використовують його на широкий спектр продуктів, від великих плоскопанельних дисплеїв і телевізорів, носяться дисплеїв і віртуальних дисплеїв реальності у світ джерела для нейронного інтерфейсу та оптогенетики. Очікується, що колективні зусилля з досліджень та розробок у всьому світі виведуть продукти microLED не тільки на масові споживчі електронні ринки, але й будуть служити суспільству в найширшому масштабі, охоплюючи сектори в галузі медицини, охорони здоров'я, енергетики, транспорту, зв'язку та розваг.

Майже всі відомі технологічні компанії, яких ми можемо уявити в технічній галузі, розглядають Micro LED як наступну велику справу. Samsung випустила масивний модульний дисплей, тоді як Apple придбала розробника Micro LED LuxVue і навіть подала патент на складний iPhone із екраном Micro LED. Люди почали очікувати від Apple Watch та або iPhone, які оснащені технологією Micro LED.

Мікросвітлодіодний (мікро-світлодіодний) дисплей складається з масиву світлодіодів, які мають довжину менше 50 мкм. Він має величезні переваги у яскравості, роздільній здатності, контрастності, енергоспоживанні, тривалості життя, швидкості відгуку та надійності порівняно з рідкокристалічним дисплеєм (РК) та органічним світлодіодним (OLED) дисплеєм. Отже, мікро-світлодіодний дисплей розглядається як технологія відображення наступного покоління з великими потенційними додатками, такими як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), мобільні телефони, планшетні комп'ютери, телевізори високої чіткості та носні пристрої. В даний час поєднання комерційних технологій зв'язку 5G з дисплеєм VR та AR, відеотехнологіями ультра високої

чіткості ще більше сприятиме розвитку індустрії мікро-світлодіодних дисплеїв. Однак деякі основні науково-технічні проблеми мікро-світлодіодного дисплея ще залишаються вирішеними. Оскільки розмір мікросхеми зменшується до рівня менше 50 мкм, для мікро-світлодіодів з'являються деякі проблеми, які не є серйозними для великих світлодіодів. Ці проблеми включають дефекти кристалів, однорідність довжини хвилі, повнокольорову емісію, масове перенесення та тестування тощо. Протягом останніх двох десятиліть було запропоновано різні рішення цих проблем, які значно сприяли прогресу мікро-світлодіодного дисплея. У цій роботі спочатку дається огляд мікро-світлодіодного дисплея з 2000 року, який включає основні результати досліджень та досягнення в застосуванні. По-друге, обговорюються питання, пов'язані з епітаксією пластин та процесом мікросхеми мікросвітлодіодів, а також можливі шляхи їх вирішення, детально виходячи із застосування дисплея. Поверхневий стан, викликаний звисаючими зв'язками та пошкодженнями від сухого травлення, стосується нерадіаційної рекомбінації при низькому рівні ін'єкції. Засоби пропонуються для таких поверхневих станів, таких як осадження атомного шару та травлення нейтральним пучком. Деякі методи зменшення дислокації різьби та придушення поляризаційного поля узагальнені для мікроелектричного росту епітаксії. Більше того, світлодіоди на основі GaN на підкладці Si (100) також вводяться для майбутньої інтеграції мікро-світлодіодів в інтегральні схеми на основі Si. Що стосується однорідності довжини хвилі, обговорюється обладнання MOCVD та технологія росту, включаючи лазерну обробку. У частині обробки мікросхем обговорюються повнокольоровий дисплей, масообмін та ефективна технологія контролю. Складання окремих світлодіодів RGB, квантово-фосфорного матеріалу та світлодіодів з наноколоумом - різні шляхи для повнокольорового відображення. Надано їх тенденції у майбутньому. Вибір і місце, технології лазерного зняття, посилюються завдяки масовій передачі мікро-світлодіодів. У технологіях масового та швидкого обстеження обговорюються фотолюмінесценція в поєднанні з комбінаційним розсіюванням, електролюмінесценція в поєднанні з цифровою камерою [9].

### **3.2 MiniLED і MicroLED: перспективні технології відображення, наступного покоління**

Традиційна технологія відображення оснащена електронно-променевою трубкою (ЕЛТ), заснованою на принципі керованого електронно-променевим збудженням флуоресцентного екрану [10]. Структура ЕЛТ - це, в основному, вакуумна трубка з однією або кількома вбудованими електронними гарматами, які виробляють електрони, що підлягають прискоренню та керуванню. Керований електронний промінь збуджує один або кілька пікселів на екрані, призначених для випромінювання основних кольорів червоного, зеленого та синього (RGB). За допомогою відповідного сканування на піксельованому екрані з фосфором створюється зображення. З часу винаходу першого кольорового ЕЛТ-телевізора (телевізора) у 1950 році, ЕЛТ-телевізор протягом багатьох десятиліть домінував на ринку дисплеїв завдяки своїм видатним характеристикам, таким як відмінна візуальна глибина різкості та висока швидкість відгуку.

Це домінування ЕЛТ-дисплеїв зберігалось на надзвичайно довгий час до 2000 року, коли було продемонстровано дві нові технології відображення - рідкокристалічний дисплей (РК) та плазмовий дисплей. Через портативність та характеристики енергоефективності вони дуже популярні серед споживачів. Пізніше, завдяки постійному вдосконаленню зменшення вартості та покращення продуктивності РК-технології, плазмовий дисплей незабаром після цього став неконкурентоспроможним.[9,10] Однак, оскільки РК-дисплеї мають основні недоліки, такі як повільний час відгуку, низька ефективність перетворення та низька насиченість кольорів, технологія неодноразово критикувалась споживачами. Отже, виробники РК-дисплеїв вжили заходів для вдосконалення РК-дисплеїв, таких як заміна звичайних рідкокристалічних матеріалів матеріалами з високою реакцією, використовуючи відносно більші модулі ефективності перетворення підсвічування та використовуючи флуоресцентні матеріали з високою насиченістю кольорів. Як результат, деякі високоефективні РК-дисплеї мають надзвичайно короткий час відгуку і, отже,

використовуються в декількох пристроях віртуальної реальності (VR) [11, 12]. За останні роки нові технології відображення стали більш зрілими, такі як органічний світлодіодний дисплей (OLED) та світлодіодний дисплей. Технологія OLED-дисплея була розроблена в 1990-х роках. У порівнянні з РК-дисплеями, OLED-дисплеї мають переваги, серед яких - самосвітні, широкий кут огляду, висока контрастність, економія енергії, швидка реакція тощо. Однак через обмеження в галузі матеріалознавства та можливостей масового виробництва OLED не так широко використовуються на ринку побутової електроніки, як РК-дисплеї. Дисплеї на основі світлодіодних пікселів в основному застосовуються до великих зовнішніх екранів з перевагами енергозбереження, високої насиченості кольорів та високої яскравості. Якщо світлодіоди використовуються як пікселі дисплея, розмір світлодіодів потрібно буде зменшити відповідно до бажаної роздільної здатності. Оскільки все більша кількість виробників розглядає світлодіодний дисплей як технологію відображення наступного покоління, початок появи міні-світлодіодів та мікро-світлодіодів. Порівняння між miniLED та microLED показано в таблиці 3.1. Розмір міні-світлодіодів становить приблизно 100~200 мкм, що знаходиться між розмірами звичайних світлодіодів (> 200 мкм) та мікро-світлодіодів (<100 мкм).

За даними дослідницької та ринкової організації, що займається дослідженням ринку, прогнозується, що світовий ринок мікро-світлодіодних дисплеїв зросте з 0,6 млрд. Дол. США у 2019 р. До 20,5 млрд. Дол. США в 2025 р. Із річним рівнем зростання близько 80% [13].

Основною причиною спалаху ринку є різке зростання попиту на більш яскраві та енергоефективні панелі дисплея, необхідні для стрімких пристроїв, таких як розумні годинники, телевізори, ноутбуки, доповнена реальність AR та VR. За оптимістичною оцінкою Йоле, ринок мікро-світлодіодних дисплеїв досягне 330 мільйонів одиниць до 2025 року (рис. 3.1) [14].

Таблиця 3.1 - Порівняння між міні-світлодіодом та мікро-світлодіодом [13]

	Міні-світлодіод	Мікро-світлодіод
<b>Розмір (мкм)</b>	100~200	< 100
<b>Призначення</b>	Підсвічування для РК-дисплея	Самовипромінюючий дисплей
<b>Особливості</b>	Високий динамічний діапазон, енергозбереження, тонкий	Висока контрастність, висока ефективність, висока роздільна здатність, великий час відгуку
<b>Врожайність</b>	> 80%	Важко оцінити
<b>Застосування</b>	РК-підсвічування - від маленької до великої РК-панелі	Мікропроекційний дисплей, дисплей від малого до великого розміру

Хоча перспективи ринку в даний час є надзвичайно оптимістичними, мікро-світлодіодні дисплеї все ще стикаються з технологічними проблемами, особливо в тих випадках, коли деякі ключові технології та технологічне обладнання ще не розроблені в достатній мірі. Тому відносно зрілий міні-світлодіод, як очікується, буде першим комерціалізованим різновидом, тоді як технологія мікро-світлодіодного дисплея все ще перебуває у стадії зародження [14].

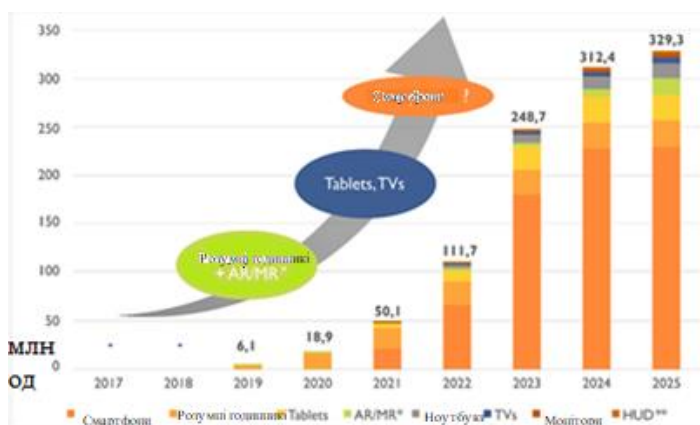


Рисунок 3.1 - Прогноз розвитку мікро-світлодіодних дисплеїв. Адаптовано із роботи [14]

MiniLED високий динамічний діапазон (HDR) - одна з важливих характеристик дисплеїв наступного покоління. Для досягнення HDR із

коефіцієнтом контрастності (CR), що перевищує 100000:1, одночасно потрібні висока пікова яскравість та чудовий темний стан системи відображення. Хоча найкращою вимогою до HDR є затемнення на рівні пікселів, що описується як технологія мікро-світлодіодів, все ще існують деякі технологічні вузькі місця, які ускладнюють мікро-світлодіоди для швидкої комерціалізації. Тому компромісним способом реалізації багатозонного локального затемнення для РК є міні-світлодіодне підсвічування з прямим освітленням. Технологія Mini-LED має набагато менший розмір світлодіода, а це означає, що вона може розділити більше блоків затемнення в світлодіодному підсвічуванні певного розміру. Нещодавно виробники світлодіодів звернулися до досліджень та розробки міні-світлодіодів. Більшість існуючих процесів та обладнання для звичайних світлодіодів можна постійно використовувати для виготовлення міні-світлодіодів.

Моделювання системи та оцінку продуктивності РК-дисплеїв з міні-світлодіодним підсвічуванням. Спочатку для моделювання встановлюється модель РК-системи з прямого освітленого міні-світлодіодного підсвічування (рис. 3.2). Блок підсвічування складається з міні-світлодіодного масиву квадратної форми. Пластина дифузора використовується для розширення як просторового, так і кутового розподілу, а рідкокристалічна панель (РК) застосовується для управління вихідним світлом. Параметри моделі, такі як  $r$ ,  $s$ ,  $H_1$  і  $H_2$ , базуються на конфігурації пристрою.

Далі перевірена модель використовується для з'ясування зв'язку між структурою пристрою та кінцевою продуктивністю дисплея HDR, особливо ефектом гало (рисунок 3.3). Кінцева продуктивність HDR відображаються зображень обчислюється шляхом незалежного регулювання двох ключових параметрів структури пристрою, номера локальної зони затемнення та коефіцієнта контрастності РК-дисплея. Згідно з результатами моделювання, кількість зон затемнення в основному впливає на область гало, тоді як коефіцієнт контрастності РКД впливає на локальне спотворення зображення, а більше локальних зон затемнення та вищий коефіцієнт контрастності LC можуть зменшити ефект гало та покращити ефективність дисплея.



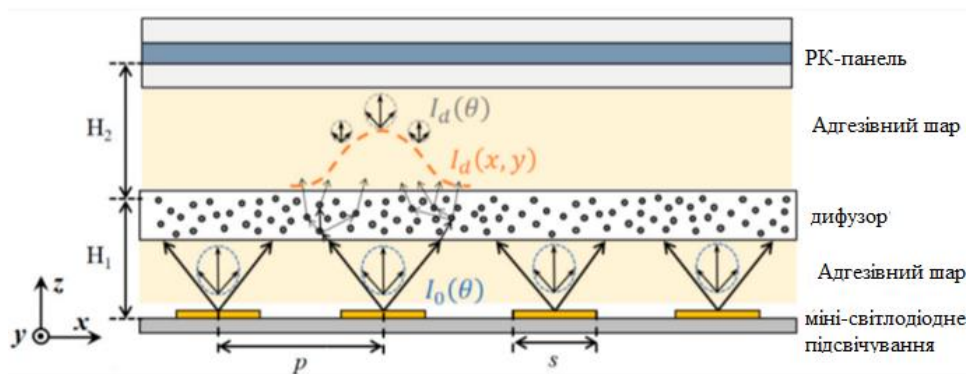


Рисунок 3.2 - Принципова схема моделі для РК-дисплея з міні-світлодіодним підсвічуванням. Адаптовано із роботи [15]

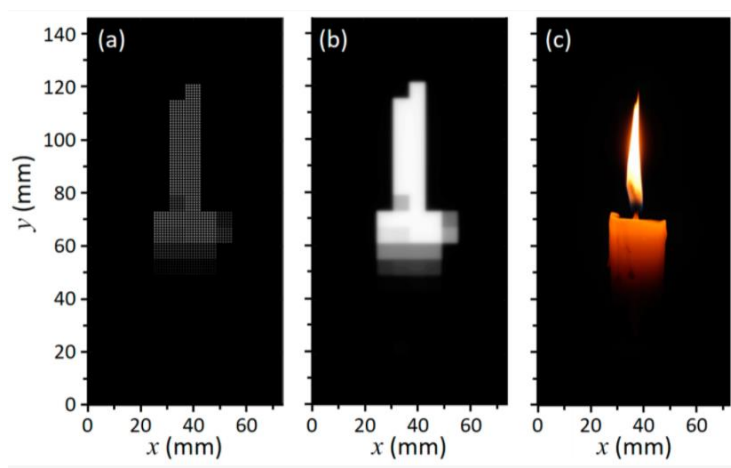


Рисунок 3.3 - Моделювання відображеного зображення: ( а ) модуляція міні-світлодіодного підсвічування; ( б ) розподіл яскравості світла, що падає на LC-шар; та ( с ) відображене зображення після модуляції РК-дисплеєм [15]

Розробляється та проводиться суб'єктивний експеримент для визначення межі людського зорового сприйняття ефекту гало. LabPSNR, це показник оцінки використовується для кількісного визначення різниці між відображуваним зображенням і цільовим зображенням, повинен бути більше, ніж 47,4 дБ. Виходячи з цього обмеження, можна запропонувати вимогу щодо кількості локальних зон затемнення: понад 200 зон локального затемнення для РК-панелей із високим CR  $\approx 5000:1$  та більше 3000 зон затемнення для РК-дисплеїв CR  $\approx 2000:1$ . Зображено на рисунку рисунку 3.4.

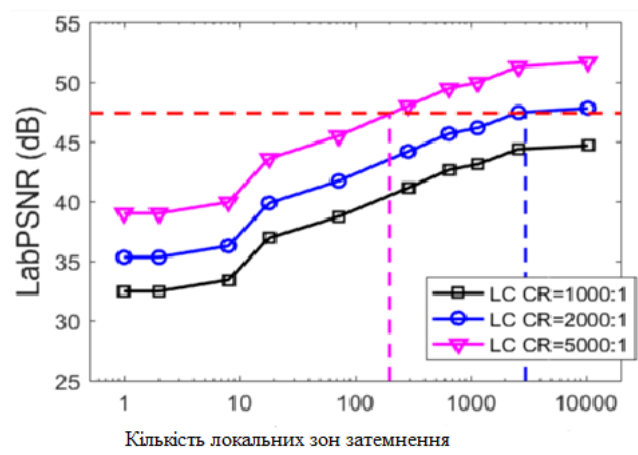


Рисунок 3.4 - Імітація LabPSNR для різних систем відображення HDR з різними номерами локальних зон затемнення та коефіцієнтами контрастності LC. Адаптовано із роботи [15]

Незважаючи на те, що всі вищезазначені моделювання та експерименти базуються на малогабаритних дисплеях смартфонів з відстанню огляду 25 см, аналіз та висновок також можуть бути застосовані до пристроїв відображення з різними розмірами та роздільною здатністю шляхом перетворення результатів із просторової області в кутову область (рис. 3.5). Щоб продемонструвати порівнянню продуктивність HDR з OLED, і ефективність HDR не вдалося досягти за допомогою звичайного сегментованого світлодіодного підсвічування. Імітаційна модель може надати корисні рекомендації щодо теоретичної оптимізації міні-світлодіодних РК-дисплеїв із підсвічуванням для досягнення чудового HDR-дисплея.

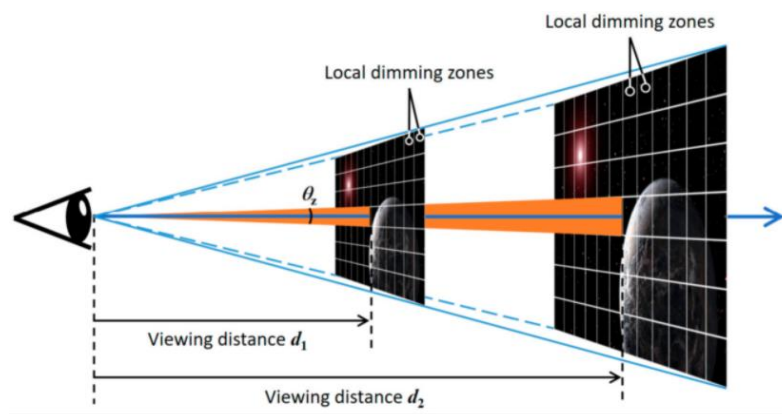


Рисунок 3.5 - Концептуальна схема масштабування розміру дисплея на основі однакового кутового розміру [16]



Рисунок 3.6 - 27-дюймовий ігровий монітор та 2-дюймовий VR-дисплей AUO [16]

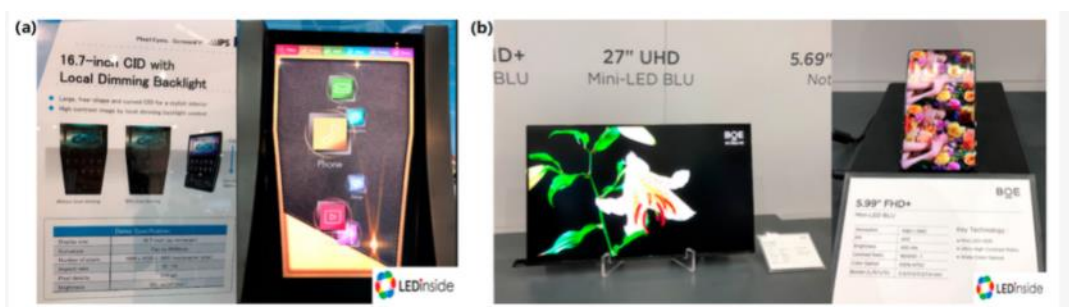


Рисунок 3.7 - 16,7-дюймовий вигнутий автомобільний дисплей з прямим підсвічуванням JDI (a) та ультра-високий контраст UHD-дисплей BOE (b) [16]

AU Optronics Corporation (AUO) продемонструвала кілька високоякісних міні-світлодіодних РК-дисплеїв із підсвічуванням, включаючи 27-дюймовий ігровий монітор 4K 144 Гц та 2-дюймовий LTPS VR-дисплей 1000 PPI (рис. 3.6). Ігровий монітор використовував міні-світлодіодне підсвічування прямого типу, щоб забезпечити точне локальне затемнення з надвисокою яскравістю, створюючи для клієнта більш реалістичне візуальне задоволення. Однак вартість міні-світлодіодів все ще в кілька разів перевищує традиційні технології підсвічування в даний час. Для головного VR-дисплея AUO показує 2-дюймову панель, оснащену схемою драйвера з активною матрицею (AM), яка може забезпечити 1024 локальні зони затемнення для отримання яскравих зображень [18].

Японський виробник JDI продемонстрував автомобільну центральну панель управління, засновану на 16,7-дюймовому вигнутому екрані з прямо-вниз міні-світлодіодним підсвічуванням на виставці SID Display 2018, як показано на рисунку 3.7 а. Контраст і колір екрана можуть бути представлені ідеально навіть у складних ситуаціях через локальне затемнення з 104 зонами затемнення на екрану. Крім того, BOE також продемонстрував 5,9-дюймову панель мобільного телефону, що була товщиною лише 1,4 мм, як показано на рисунку 3.7 б

Оскільки група HX Jiang з Техаського університету техніки повідомила про перше виготовлення мікросвітлодіодного чіпа діаметром 12 мкм у 2000 році, мікро-світлодіод став актуальною темою незабаром після створення.

MicroLED область застосування світлодіодів змінюється залежно від розміру мікросхеми. Зважаючи на різницю в розмірах, традиційний світлодіодний чіп в основному використовується в загальному освітленні та модулі підсвічування дисплея. Міні-світлодіод застосовується для додатків з підсвічуванням, таких як HDR та гнучкі дисплеї, тоді як мікро-світлодіод підходить для таких додатків, як носяться годинники, мобільні телефони, автомобільні головні дисплеї, AR, VR, мікропроектори та телевізори високого класу ( 3.8 ). Крім того, мікро-світлодіод може поєднуватися з гнучкою основою для реалізації таких гнучких характеристик, як OLED. Отже, мікро-світлодіодні дисплеї можуть відповідати сучасним OLED-дисплеям або перевершувати їхні сучасні OLED-дисплеї завдяки своїй високій контрастності, низькому енергоспоживанню, високій яскравості та особливо тривалому терміну служби [16].

	Автоматичне відображення	Телевізор	Цифровий дисплей
Застосування			
Розмір панелі (дюйми)	6 ~ 12	32 ~ 100	150 ~ 220
PPI	150 ~ 250	40 ~ 80	20 ~ 30
Об'єм стружки (М)	4.1	24.9	24.9
Розмір стружки (мкм)	50 ~ 100	50 ~ 80	80 ~ 100
	AR	Дивітьсяся	Мобільний
Застосування			
Розмір панелі (дюйми)	0,5 ~ 1	1 ~ 1,5	4 ~ 6
PPI	450 ~ 2000	200 ~ 300	300 ~ 800
Об'єм стружки (М)	49,8	0,4	6.2
Розмір стружки (мкм)	1 ~ 5	10 ~ 30	30 ~ 50

Рисунок 3.8 - Вимоги до міні-світлодіодів та мікро-світлодіодів у типових додатках [17]

Компанія	Принцип	Опис
Електростатичний масив LuxVue		Передаючі головки розділені діелектричним шаром, утворюючи пару кремнієвих електродів, які мають позитивний та негативний заряд, відповідно, перед тим, як взяти цільовий світлодіод.
Магнітний масив ITPI		Мікро-світлодіоди адсорбуються і розміщуються під дією електромагнітної сили, що генерується котушкою.
Еластомерний штамп X-Celeprint		Процесам збору та передачі сприяють сили Ван дер Ваальса між в'язкопружним штампом еластомеру та твердими мікро-світлодіодами.
Рулет на тарілці KIMM		Технологія перенесення на основі рулону для перенесення наномасштабних об'єктів з донорського субстрату на цільовий субстрат з високою врожайністю та продуктивністю.

Рисунок 3.9 - Масово селективні методи передачі друку [17]

В даний час технологія мікро-світлодіодного дисплея все ще стикається з деякими проблемами, такими як виготовлення мікросвітлодіодних мікросхем для масового виробництва та повнокольоровий метод для дисплейних програм. За

умови стрімкого розвитку деяких підходів до трансферного друку, узагальнених на рисунку 3.9 [17], очікується, що перша проблема буде ефективно вирішена.

### 3.3 Майбутнє 3D-дисплеїв: Micro-LED відіграє ключову роль

Micro-LED – це нова технологія, яка потенційно стимулює реалізацію 3D-дисплеїв. Micro-LED забезпечує розмір пікселя до кількох мікрон, що еквівалентно десяткам тисяч пікселів на дюйм. Micro-LED задовольняє вимогам надвисокої роздільної здатності, і він здатний значно запровадити розвиток технології. По-друге, Micro-LED забезпечує час відгуку в наносекундах, так що його можна використовувати як мультиплексний дисплей. По-третє, Micro-LED пропонує частково когерентне джерело світла через його малу площу яскравості, і він здатний замінити лазер як точкове джерело світла, щоб зменшити ефект спекл для електронного голографічного дисплея. З іншого боку, розглядаючи Micro-LED як функцію підсвічування, конфігурація на рисунку 3.12 ілюструє, як промені поширюються через кожен піксель і сходяться до зони перегляду; ось приклад для дисплея з чотирма переглядами, а крок ліній трохи більше, ніж у пікселів. Таким чином, чим вужча світлова смуга, тим менше виникає перехресних перешкод. Користуючись перевагами малого розміру Micro-LED, перехресні перешкоди можна ефективно зменшити.

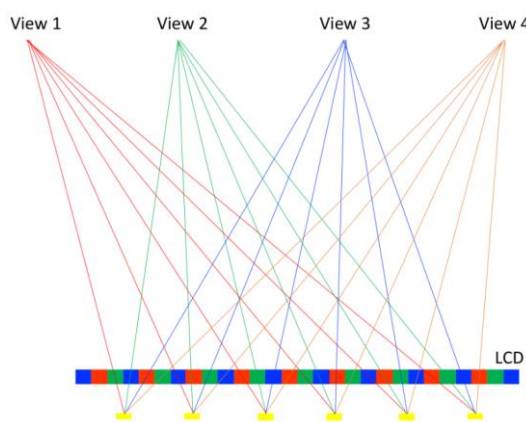


Рисунок 3.12 - Мікро-світлодіоди утворюють одновимірний масив світлової смуги з добре спроектованим кроком, таким чином, що часткові пікселі проектується на відповідні види [19]

Цей метод світлових смуг можна узагальнити на мультиплексний дисплей із кількома наборами масивів світлових смуг. На рисунок 3.13 представлено чотири набори світлових смуг, які циклічно вмикаються і вимикаються в порядку жовтого, фіолетового, сірого та чорного. Кожен набір світлових смуг проектує чверть пікселів на одне око, а чотири набори світлових смуг дозволяють сприймати всі пікселі одним оком. Таким чином, він досягає повної роздільної здатності з мультиплексним увімкненням і вимиканням освітлення. Для прикладу з чотирма видами вмикають та вимикають освітлення 240 Гц. Завдяки швидкій реакції Micro-LED легко вмикати та вимикати високочастотне освітлення. Увімкнення різних наборів світлових смуг спрямовує колімовану підсвітку в різні напрямки, а зображення з повною роздільною здатністю доставляються в різних напрямках.

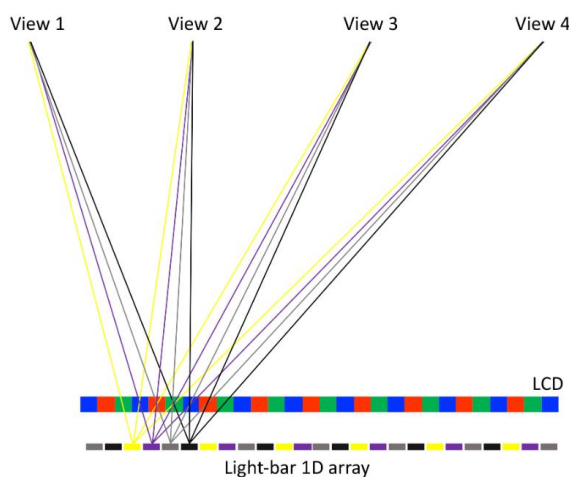


Рисунок 3.13 - Представлення кількох наборів масивів світлових смуг (згрупованих за кольорами) [19]

Послідовне вмикання та вимкнення кожного набору світлових смуг дозволяє сприймати кожен піксель у кожному перегляді. Це метод мультиплексування часу для досягнення повної роздільної здатності. Тут наносяться лише промені, що випромінюються з одного набору світлових смуг, і кожен вид отримує чотири пікселі, а не один піксель, щоб продемонструвати, що сприймається зображення з повною роздільною здатністю. Крім того, Micro-LED можна перенести на прозору скляну підкладку, і він стає прозорим дисплеєм, який володіє плаваючим 3D-



ефектом. Крім того, Micro-LED має набагато вищу яскравість, до десятків тисяч нїт, нїж LCD, OLED, тому його можна використовувати на відкритому повітрі при високому освітленні [20].

Нарешті, Micro-LED має швидкий час відгуку аж до наносекунд, він особливо підходить для мультиплексних 3D-дисплеїв. Прискорюючи частоту кадрів до 960 Гц і за допомогою бар'єру сканування з такою ж швидкістю або дефлектора, які створюють шістнадцятикратне багаторазове перегляд без втрати роздільної здатності. Крім того, Micro-LED є більш енергозберігаючим, тому він подовжує час роботи акумулятора для мобільних пристроїв, таких як смартфони та планшети [19].

### **3.4 Аналіз існуючих технологій відображення**

Технологія відображення LED LCD.

LCD - це РК панель, яка використовується для керування проходження світлових потоків. LED - світлодіод, вид оптичного випромінювання. LED-підсвітка використовується в більшій кількості пристроїв з екранами РК. Завдяки LED-технології телевізор 50 дюймів має товщину не більше трьох сантиметрів. Яскраві світлодіоди зменшують профіль корпусу. Переваги та недоліки відображені в таблиці 3.2.

Технологія відображення QLED.

QLED - квантовий світлодіод. У цій технології за основу взято традиційний LED-екран, але світлодіоди виконані на основі квантових точок. В рідкокристалічному екрані доданий металевий нанофільтр. Це додає яскравість і насиченість кольору, дозволяє виправити недоліки, властиві колишній матриці. Переваги та недоліки відображені в таблиці 3.2.



Таблиця 3.2 - Порівняння переваг та недоліків LED LCD і QLED

<b>LED LCD</b>	
переваги	недоліки
відмінна передача кольору; жива картинка, чисте зображення; хороший кут огляду.	Через великий розмір світлодіодів світловий потік не може ідеально концентруватися в межах одного пікселя. Світло просто розсіюється в структурі рідких кристалів, впливаючи на чіткість картинки.
<b>QLED</b>	
переваги	недоліки
енергоефективні; економічні; тонкі; пропонують якісне кінематографічне зображення.	квантовим точкам все одно доводиться покладатися на підсвічування, на відміну від OLED-моделей.

### Технологія відображення OLED

OLED - органічний світлодіод. Ця технологія кардинально відрізняється від попередньої. Наприклад телевізор 40 дюймів, що зовсім не має підсвічування. Замість цього мільйони органічних діодів розміром з піксель самостійно регулюють випромінювання і затемнення в будь-яких межах екрану. Максимально реалістично передаються тони і відтінки. Переваги та недоліки відображені в таблиці 3.3.

### Технологія відображення microLED

microLED реалізована на неорганічних світлодіодах, які можуть самостійно випромінювати світло, що дозволяє отримати ідеальний чорний колір, відмінну кольорову гамму, широкий кут огляду, тонкий корпус та зниження собівартості, до складу компонентів не входять шкідливі для здоров'я людини та

навколишнього середовища сполуки. Переваги та недоліки відображені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Порівняння переваг та недоліків OLED і microLED

<b>OLED-технологія</b>	
переваги	недоліки
високий рівень контрастності; глибокий чорний колір; широкий ракурс без дефектів передачі кольору.	Через органічні пікселі здатні зношуватися з часом. Це впливає на якість зображення. Чим довше експлуатація, тим гірше стає картинка.
<b>microLED</b>	
переваги	недоліки
низьке енергоспоживання високий рівень коефіцієнта корисної дії стійкість до вигорання великий ресурс роботи	microLED дисплеї все ще стикаються з технологічними проблемами, особливо в тих випадках, коли деякі ключові технології та технологічне обладнання ще не розроблені в достатній мірі.

За технічними характеристиками OLED-телевізори мають значні переваги перед LED і QLED-моніторами. Причому, у квантових значно вище ціна. Але органічні світлодіоди зношуються, що потребує зміни техніки через кілька років.

Очікується, що колективні зусилля з досліджень та розробок у всьому світі виведуть продукти microLED не тільки на масові споживчі електронні ринки, але й будуть служити суспільству в найширшому масштабі, охоплюючи сектори в галузі медицини, охорони здоров'я, енергетики, транспорту, зв'язку та розваг.

Зроблено висновок, що технологія microLED зберігає в собі всі переваги технологій наведених в таблицях 3.2 і 3.3 та позбувається більшої частини недоліків органічних світлодіодів. Мікро-світлодіодний дисплей розглядається як технологія відображення.

## ВИСНОВКИ

1. Показано, що LED технологія – це технологія, яка дозволяє отримати світлове випромінювання в точці контакту катоду та напівпровідника, що з'єднаний із анодом при пропусканні через нього електричного струму.

2. До переваг LED-технологій можна віднести: низьке енергоспоживання та високий рівень коефіцієнта корисної дії; до складу компонентів не входять шкідливі для здоров'я людини та навколишнього середовища сполуки; великий ресурс роботи.

3. Встановлено, що технологія microLED реалізована на неорганічних світлодіодах, які можуть самостійно випромінювати світло, що дозволяє отримати ідеальний чорний колір, відмінну кольорову гамму, широкий кут огляду та низьке енергоспоживання, стійкість до вигорання, тонкий корпус та зниження собівартості.

4. Проаналізовано, що технологія microLED зберігає в собі всі переваги OLED-технології та позбувається більшої частини недоліків органічних світлодіодів. Крім того маленькі microLED-панелі можна об'єднувати у великі екрани. Така модульність дозволяє користувачам підбирати розмір екрана виходячи із вимог користувача та створювати екрани довільної форми.

5. З'ясовано, що проблеми із виготовлення microLED-панелей полягають у тому, що збільшення кількості світлодіодів можна досягти за рахунок зменшення їх розмірів, що призводить до зменшення інтенсивності світла. У зв'язку з цим треба або підвищувати робочу потужність, що призведе до збільшення енергоспоживання та нагріву елементів, або збільшити коефіцієнт корисної дії. Також необхідно зменшити саму мікросхему, щоб зменшити крок між пікселями. Однак, на сьогоднішній день дані проблеми вже практично вирішені виробниками.

6. Проаналізовано, що найбільш популярними технологіями виготовлення дисплеїв є дві технології: OLED та QLED, але технологія microLED є пріоритетною до розвитку найближчий час.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Готра З. Ю., Кожем'яко В. П., Микитюк З. М. та ін. Засоби відображення інформації. Електронні дисплеї. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 162 с.
2. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання. - Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 436 с.
3. Миколаєць Д.А. Пристрої відображення та реєстрації інформації. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 387 с.
4. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. – Львів: Новий світ, 2003. – 128 с.
5. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.
6. Павлов С.М. Основи мікроелектроніки. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 224 с.
7. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2007. – 428 с.
8. Robert L., Varbin A.S.P. Cathode-ray tube displays. In Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 1999. – 222 p.
9. Weber L.F., History of the plasma display panel. Plasma Sci, 2006. - 278 p.
10. Chang N., Choi I., Shim H. DLS: Dynamic backlight luminance scaling of liquid crystal display. Very Large Scale Integr. (VLSI) Sys, 2004. - 846 p.
11. Peng F.L., Chen H.W., Gou F.W., Lee Y.H.; Wand M., Li M.C., Lee S.L., Wu S.T. Analytical equation for the motion picture response time of display devices. J. Appl. Phys, 2017, - 121 p.
12. online: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4535720/micro-led-market-by-application-display#pos-0>[Електронний ресурс], - Ринок microLED , з прогнозом до 2025 року. (дата звернення 18.02.2022)
13. [http://www.yole.fr/MicroLEDDisplays\\_Market.aspx#.W11AV\\_knaEs](http://www.yole.fr/MicroLEDDisplays_Market.aspx#.W11AV_knaEs) [Електронний ресурс], - Ринок MicroLED, LCD та OLED. (дата звернення 15.01.2022)

14. Tan G.J., Huang Y.G., Li M.C., Lee S.L., Wu S.T. High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight. *Opt. Express*, 2018. –16584 p.
15. Zhang K., Peng D., Lau K.M., Liu Z. Fully-integrated active matrix programmable UV and blue micro-LED display system-on-panel (SoP). *J. Soc. Inf. Display*, 2017. –248 p.
16. Liu Z., Wang K., Luo X., Liu S. Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo ray-tracing. *Opt. Express*, 2010. – 9412 p.
17. Oh J.T., Lee S.Y., Moon Y.T., Moon J.H.; Park S.; Hong K.Y., Song K.Y., Oh C., Shim J.I., Jeong H.H., Light output performance of red AlGaInP-based light emitting diodes with different chip geometries and structures. *Opt. Express*, 2018. – 11200 p.
18. Gu X., Qiu T., Zhang W., Chu P.K. Light-emitting diodes enhanced by localized surface plasmon resonance. *Nanoscale Res. Lett*, 2011. – 199 p.
19. Gou F., Hsiang E.L., Tan G., Lan Y.F., Tsai C.Y., Wu S.T. Tripling the optical efficiency of color-converted micro-LED displays with funnel-tube array. *Crystals*, - 2019.- 9.- 39 p