

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри загальної фізики

проф. О.В. Лазоренко



Оцінка « добре (80) »

/ Голова ЕК

д.фіз.-мат.н.



С. А. Шевченко

18 грудня 2025 р.

24 грудня 2025 р.

Кулініч Артур Михайлович

**Порівняльний аналіз фізичних характеристик матеріалів для дисплеїв  
смартфонів**

Кваліфікаційна робота на  
здобуття освітнього ступеня  
«Магістр» спеціальність 104 –  
«фізика та астрономія»  
освітньо-професійна програма  
«фізика»



Науковий керівник – канд. фіз.-мат. н.,  
доцент кафедри загальної фізики,  
Савченко О.М.



**Харків 2025**

## **АНОТАЦІЯ**

Дипломна робота присвячена дослідженню фізичних принципів функціонування матеріалів і технологій, що застосовуються у дисплеях сучасних смартфонів, а також їх порівняльному аналізу за ключовими оптичними та енергетичними характеристиками. У роботі проаналізовано розвиток дисплейних систем від рідкокристалічних панелей до самосвітних технологій OLED, LTPO-OLED, MiniLED і MicroLED. Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу фізичних властивостей матеріалів на параметри зображення та енергоефективність екранів. Для досягнення мети використано методи аналітичного огляду джерел, теоретичного моделювання оптичних процесів, а також порівняльний аналіз експериментальних характеристик (яскравість, контрастність, енергоспоживання, довговічність, вартість виробництва). Отримані результати дозволили визначити переваги та недоліки кожної технології та встановити, що найбільш перспективним напрямом розвитку є MicroLED-технологія як поєднання високої світлової ефективності, довговічності та відсутності деградації емітерів. Ключові слова: дисплей, OLED, LCD, LTPO, MiniLED, MicroLED, яскравість, контрастність, енергоспоживання.

## **ABSTRACT**

The thesis investigates the physical principles underlying modern smartphone display materials and technologies, as well as their comparative optical and energy characteristics. The study analyzes the evolution of display systems from liquid-crystal technologies to self-emissive OLED, LTPO-OLED, MiniLED, and MicroLED solutions. The aim of the research is to determine how the physical properties of display materials influence image parameters and energy efficiency. The methodology includes analytical review of scientific literature, theoretical modeling of optical processes, and comparative evaluation of published experimental data (brightness, contrast ratio, power consumption, lifetime, and manufacturing cost). The results identify the strengths and limitations of each technology and show that MicroLED represents the most promising direction due to its high luminous efficiency, long operational lifetime, and superior stability of inorganic emitters. Keywords: display, OLED, LCD, LTPO, MiniLED, MicroLED, brightness, contrast, energy efficiency.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	4
Вступ.....	5
1. Огляд літературних джерел	
1.1 Екрани для смартфонів: від початку застосування до сучасності.....	7
1.2 Фізичні явища та процеси, на яких ґрунтується функціонування дисплеїв.....	11
2. Основна частина. Вплив технологій виготовлення дисплеїв на їх фізичні характеристики	
2.1 Зразки: види, характеристики та основні фізичні властивості екранів.....	15
2.2 Порівняльний аналіз фізичних параметрів дисплеїв різних типів.....	21
2.3 Результати та обговорення.....	27
Висновки.....	33
Список використаних джерел.....	35

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

LCD — Liquid-crystal display (рідкокристалічний дисплей)

TFT-LCD — Thin-Film Transistor Liquid-Crystal Display (активна матриця на тонкоплівкових транзисторах)

OLED — Organic Light-Emitting Diode (органічний світлодіод)

AMOLED — Active-Matrix OLED (OLED-дисплеї з активною матрицею)

HDR — High Dynamic Range (високий динамічний діапазон)

LTPO — Low-Temperature Polycrystalline Oxide (Низькотемпературний полікристалічний оксидний)

LTPS — Low Temperature Polycrystalline Silicon (низькотемпературний полікристалічний кремній)

IGZO — Indium Gallium Zinc Oxide (оксид індію та галію цинку)

MiniLED — міні-світлодіод

MicroLED — мікросвітлодіод

TN — Twisted Nematic (скручений нематик)

IPS — In-Plane Switching (технологія "перемикання в одній площині")

PLS — Plane-to-Line Switching (технологія "перемикання площина-лінія")

PWM — Pulse-Width Modulation (щиротно-імпульсна модуляція)

TADF — Thermally Activated Delayed Fluorescence (термічно активована затримка флуоресценції)

EQE — External Quantum Efficiency (зовнішня квантова ефективність)

## ВСТУП

Екрани смартфонів сьогодні є одним із найважливіших елементів усього пристрою. Вони визначають не лише зручність користувача, а й енергоспоживання, вартість і навіть довговічність смартфона. За три десятиліття розвитку від простих рідкокристалічних панелей до складних гнучких OLED відбувся значний технологічний стрибок.

Сучасні дисплеї базуються на двох принципово різних фізичних підходах — модуляції світла (LCD і MiniLED) та власному випромінюванні (OLED, LTPO-OLED, MicroLED). Рідкокристалічні панелі (LCD) залишаються найдешевшими і найнадійнішими з точки зору довговічності, проте їхні оптичні характеристики обмежені втратами світла на поляризаторах та невисокою контрастністю. MiniLED став еволюційним кроком, який дозволив суттєво підвищити яскравість і частково компенсувати недоліки класичних LCD, але така технологія дає вищу товщину, складність і вартість.

Технологія OLED, що базується на електролюмінесценції органічних матеріалів, забезпечила прорив у якості зображення: ідеальний чорний, надвисоку контрастність і гнучкість конструкції. Водночас її слабкими місцями залишаються деградація органічних емітерів і ризик вигорання зображення. Модифікація LTPO-OLED завдяки застосуванню комбінованого бекплейну з LTPS і IGZO дозволила знизити енергоспоживання та реалізувати змінну частоту оновлення екрана, що стало одним із найуспішніших рішень останніх років.

MicroLED є найперспективнішою технологією серед усіх розглянутих. Вона поєднує найкращі характеристики попередників — самосвітність, рекордну яскравість, довговічність і високу енергоефективність — завдяки використанню неорганічних напівпровідникових мікросвітлодіодів. Основним бар'єром для її широкого впровадження залишається складність

масового виробництва, пов'язана з необхідністю точного розміщення мільйонів мікродіодів.

Ефективність різних технологій можна порівняти за оптичними й енергетичними параметрами отриманих дисплеїв. Сьогодні, коли технології швидко змінюються, а отже змінюються і характеристики дисплеїв – об'єктів дослідження, інформація лавиноподібно зростає. Виникає проблема послідовної систематизації та узагальнення даних, на основі яких можна було б прогнозувати подальші тренди розвитку цієї сфери.

*Задачею дипломної роботи* було порівняти оптичні та енергетичні характеристики дисплеїв, які і були предметом дослідження, проаналізувати зв'язок між ними та технологіями, зробити прогноз руху розвитку технологій смартфонів на сучасному ринку.

Для проведення порівняльного аналізу були опрацьовані дані з відкритих наукових і технічних джерел, що містять характеристики матеріалів, застосовуваних у сучасних дисплейних технологіях.

## 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

### 1.1 Екрани для смартфонів: від початку застосування до сучасності

Перші мобільні телефони мали прості монохромні рідкокристалічні дисплеї (LCD) з сегментною або піксельною матрицями. Ключовою віхою став IBM Simon Personal Communicator (1994) — пристрій, який часто вважають першим смартфоном: поєднував мобільний телефон і PDA-функції та оснащувався монохромним підсвічуваним LCD (160×293) зі стилусним керуванням (див. рис. 1.1). Саме він заклав ідею сенсорного «комунікатора» задовго до ери iPhone/Android.



Рисунок 1.1 – *IBM Simon Personal Communicator (1994)*



Рисунок 1.2 – *Прототип прозорого смартфона IBM, продемонстрований на Comdex 1992 поруч з iPhone 5 для порівняння.*

Наприкінці 1990-х TFT-LCD (активна матриця на тонкоплівкових транзисторах) поступово витісняє пасивні матриці в мобільних: зростають контрастність, швидкодія та кольоровість. Уже 1997 року з'являється Siemens S10 (див. рис. 1.3) — перша модель з кольоровим екраном (4 базові кольори:

R, G, B та білий). Це ще не «повний колір», але важливий крок від монохромного до кольору.



Рисунок 1.3 – *Siemens S10*

У 2000–2006 роках ринок масово переходить на повноколірні TFT-LCD, зростають діагоналі й роздільні здатності, з’являються перші сенсорні телефони та комунікатори. Кульмінація — 2007 рік: iPhone (1-го покоління) популяризує емнісну мультитач-сенсорну панель поверх повноколірного LCD і фактично задає новий UX-еталон для екранів смартфонів (цей факт загальновідомий; у технічних ретроспективах фігурує як переломний момент UX-дизайну екранів).

Паралельно в 1980-х формується фізична основа OLED [1], а у 2000-х технологія переходить із лабораторій у споживчу електроніку. У 2008 році Nokia N85 (див. рис. 1.4) стає першим смартфоном із AMOLED-дисплеєм (active-matrix OLED), що стало точкою входу емісійних панелей у мобільний сегмент. Надалі AMOLED стрімко набирає популярності у флагманів.

Компанія Samsung розгортає власну лінійку, і вже 2010 року Galaxy S (див. рис. 1.5) робить Super AMOLED масовим «обличчям» Android-

флагманів: кращий «перцептивний» контраст (чорний = вимкнений піксель), висока яскравість, швидка матриця.



Рисунок 1.4 – *Nokia N85*



Рисунок 1.5 – *Samsung Galaxy S*

У другій половині 2010-х на флагманах поширюються високі частоти оновлення (90–120 Гц) і HDR-піки яскравості. Водночас виробники працюють над енергоспоживанням. Прорив — LTPO-OLED (Low-Temperature Polycrystalline Oxide) як бекплейн-технологія, яка дозволяє динамічно знижувати частоту оновлення (до 1–10 Гц у режимі Always-On) без втрати пікової. Першим масовим споживчим продуктом із LTPO OLED став Apple Watch Series 4 (2018), а згодом технологію масштабовано на смартфони (режими 1–120 Гц).

У 2017 році iPhone X (див. рис. 1.6) знаменує перехід Apple до OLED у смартфонах, а медіа та аналітики фіксують загальногалузевий тренд на повний перехід лінійок на OLED у 2020-х (включно з новими поколіннями iPhone).



Рисунок 1.6 – *iPhone X*

Попри домінацію OLED у флагманах смартфонів, LCD еволюціонує завдяки MiniLED-підсвічуванню з локальним димінгом на тисячі зон: це дає дуже високі HDR-піки та «перцептивний» контраст у планшетах/ноутбуках, хоча в телефонах MiniLED зустрічається значно рідше через товщину стека і довговічність без burn-in, але з надскладним і дорогим мас-трансфером пікселів (поки що бар'єр для широкого мобільного впровадження). Наступний горизонт — MicroLED: неорганічні мікродіоди з потенційно найкращою яскравістю, ефективністю.

Фізика OLED дозволила гнучкі/складні дисплеї: 2018–2019 — хвиля релізів foldable (Royole FlexPai, Samsung Galaxy Fold (див. рис. 1.7), Huawei Mate X тощо). Складані смартфони на гнучких OLED — нинішня передова

ніша мобільних екранів, у якій інтегруються високі яскравості, частоти оновлення та вдосконалене захисне покриття.



Рисунок 1.7 – *Samsung Galaxy Fold*

Еволюція екранів смартфонів пройшла шлях від монохромних LCD (низька роздільність, стилус-керування) до повноколірних TFT-LCD, а далі — до емісійних OLED/AMOLED, що забезпечили ідеальний чорний, великий динамічний діапазон і високі частоти оновлення. LTPO-бекплейн дозволив поєднати високу частоту з енергозбереженням. MiniLED-LCD розширив можливості локального димінгу (переважно в планшетах/ноутбуках), тоді як MicroLED лишається стратегічним горизонтом через виробничі бар'єри. Водночас гнучкі OLED відкрили складані форм-фактори, що у найближчі роки визначатимуть преміальний сегмент.

## **1.2 Фізичні явища та процеси, на яких ґрунтується функціонування дисплеїв**

Функціонування усіх сучасних дисплеїв, незалежно від типу — рідкокристалічні, органічні або неорганічні емітери, ґрунтується на фундаментальних законах оптики та квантової фізики. Їхня робота описується через взаємодію світла з речовиною, процеси пропускання,

відбиття або випромінювання фотонів, а також через енергетичні властивості матеріалів, що використовуються. У цьому розділі розглядаються основні фізичні принципи, які визначають роботу та ефективність екранів смартфонів.

### *Рідкокристалічні дисплеї*

Будова LCD включає декілька послідовних шарів. На задньому плані розташована світлодіодна підсвітка, за якою знаходиться перший поляризатор. Він пропускає лише світло з певною площиною поляризації. Далі йде шар рідких кристалів, здатних змінювати орієнтацію під дією електричного поля. У нормальному стані молекули рідких кристалів розташовані так, що поступово повертають площину поляризації світла приблизно на 90 градусів. Завдяки цьому промінь може пройти крізь другий поляризатор, розташований перпендикулярно до першого, і на екрані формується яскравий піксель. Коли ж на шар кристалів подається напруга, молекули вирівнюються за напрямком поля, і обертання поляризації не відбувається. У такому разі світло блокується другим поляризатором, і піксель здається темним.

Цей процес описується через закон Малюса, відповідно до якого інтенсивність світла після проходження крізь поляризатор визначається як

$$I = I_0 \cos^2(\theta),$$

де  $I_0$  — початкова інтенсивність, а  $\theta$  — кут між напрямком поляризації світла і віссю аналізатора. Рідкі кристали, змінюючи орієнтацію під дією напруги, фактично керують цим кутом, а отже й інтенсивністю світлового потоку. Саме завдяки цьому можливе створення зображення на екрані.

Водночас такий принцип має низку обмежень. По-перше, навіть у «закритому» стані другий поляризатор не блокує світло на сто відсотків, і частина променів проходить крізь нього. Це призводить до того, що чорний колір на LCD ніколи не буває абсолютно чорним, а виглядає радше як темно-сірий. По-друге, вже сам факт наявності двох поляризаторів означає, що

значна частина світла втрачається, що робить LCD менш енергоефективними порівняно з емісійними технологіями. Ще однією проблемою є залежність якості зображення від кута огляду. При відхиленні від нормалі змінюється довжина оптичного шляху та умови проходження поляризованого світла, що викликає зміщення кольорів і зменшення контрасту.

Для зменшення цих недоліків розроблені модифікації LCD. Найпростішим варіантом стали TN-матриці (Twisted Nematic), які забезпечували швидкий відгук, але мали вузькі кути огляду. Подальший розвиток привів до створення IPS (In-Plane Switching), у яких молекули рідких кристалів змінювали положення в площині екрана, що дало значно кращу стабільність кольорів при зміні кута.

Розвиток рідкокристалічних дисплеїв у певний момент досяг межі можливостей традиційного LED-підсвічування.

З фізичної точки зору принцип MiniLED залишається спорідненим до звичайного LCD: світло від світлодіодів проходить крізь шари розсіювачів, поляризаторів і рідких кристалів, які модулюють його поляризацію. Проте саме зменшення розміру діодів і збільшення їх кількості радикально змінює якість відтворення зображення. Важливим фактором є також складні алгоритми локального затемнення, які у режимі реального часу аналізують картинку і регулюють роботу тисяч зон підсвітки, зменшуючи втрати й покращуючи суб'єктивне сприйняття. Оптичний ефект від використання MiniLED проявляється у значному покращенні контрастності. Хоча повної ізоляції світлових потоків досягти неможливо, і частина світла з яскравої зони все одно розсіюється у сусідні, суб'єктивно чорний колір виглядає значно глибшим, ніж на звичайних LCD. У темних ділянках зображення підсвітка може приглушуватися або вимикатися майже повністю, а на яскравих — працювати на повну потужність. Це дозволяє наблизитися до поведінки OLED, де кожен піксель сам випромінює світло.

### *Органічні та неорганічні світлодіоди*

Фізична основа OLED базується на явищі електролюмінесценції органічних напівпровідників. Коли через шар органічного матеріалу пропускають електричний струм, відбувається інжекція електронів з катода і дірок з анода. У світловипромінювальному шарі ці носії рекомбінують, утворюючи збуджені стани — екситони. Розпад екситонів супроводжується випромінюванням фотонів у видимому діапазоні. Хімічна природа органічних сполук визначає довжину хвилі, а отже колір випромінювання: червоний, зелений чи синій.

Кожен субпіксель OLED складається з багат шарової структури: прозорий анод (часто оксид індію-олова), шар транспортування дірок, світловипромінювальний шар, шар транспортування електронів і катод. Товщина таких шарів вимірюється нанометрами, що робить технологію складною з точки зору виробництва, але надзвичайно гнучкою для інженерних рішень. Завдяки прозорим електродам світло виходить прямо назовні без потреби у зовнішньому джерелі підсвітки.

LTPO-OLED став логічним кроком розвитку емісійних екранів. Він поєднав оптичну досконалість OLED із можливістю адаптивного керування частотою оновлення, що безпосередньо вплинуло на зручність користування смартфонами та їх енергоефективність.

З точки зору оптики MicroLED працюють за принципом електролюмінесценції *неорганічних* напівпровідників. При подачі напруги електрони та дірки рекомбінують у p-n переході, випромінюючи фотони у видимому діапазоні. На відміну від органічних матеріалів OLED, неорганічні діоди набагато стабільніші, мають вищу квантову ефективність і значно більший термін служби.

## **2.Основна частина. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ДИСПЛЕЇВ НА ЇХ ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

### **2.1 Зразки: види, характеристики та основні фізичні властивості екранів**

Зразками (об'єктами дослідження) для аналізу виконаного в даній роботі обрані вже частково згадані рідкокристалічні (LCD), органічні/неорганічні (OLED/AMOLED ) світлодіодні екрани та їх модифікації. У наведеному нижче описі увага акцентується на *перевагах* та *недоліках* фізичних властивостей кожного типу дисплеїв, з чого випливають кроки їх технологічного покращення.

Основні характеристики для порівняльного аналізу наступні:

- коефіцієнт пропускання
- контрастність
- пікова яскравість
- квантова ефективність
- енергоефективність

#### **2.1.1 Рідкокристалічні дисплеї (LCD)**

Рідкокристалічні дисплеї стали першою масовою технологією для мобільних телефонів і надовго закріпилися у виробництві смартфонів. Фізичний принцип роботи LCD базується на явищі поляризації світла. У такому екрані рідкі кристали не є самостійними джерелами випромінювання, а лише модулюють світловий потік від підсвітки. Вони надійні, перевірені часом і зручні у виробництві, але їхні фізичні обмеження, пов'язані з використанням поляризаторів та відсутністю самосвітності, роблять їх менш конкурентоспроможними у сучасному світі смартфонів. Саме тому поступово вони витісняються OLED - дисплеями, де кожен піксель сам випромінює світло та іншими новітніми технологіями, які здатні забезпечити глибший чорний колір, вищу контрастність і кращу енергоефективність.

### 2.1.2. Органічні світлодіоди (OLED та AMOLED)

На відміну від рідкокристалічних панелей, де світло лише модулюється поляризаторами, у OLED кожен піксель є самостійним випромінювачем світла.

Оптичні властивості OLED безпосередньо впливають із фізики процесів. *Переваги* :

- По-перше, кожен піксель можна повністю вимкнути, що робить чорний колір абсолютно глибоким і дає контрастність, яка вимірюється не тисячами до одного, а фактично нескінченністю.
- По-друге, через відсутність поляризаторів і фільтраційних втрат OLED значно яскравіші: сучасні смартфони досягають пікової яскравості понад 1500–2000 кд/м<sup>2</sup> у HDR-режимі.
- По-третє, швидкість відгуку сягає десятих часток мілісекунди, що усуває шлейфи і робить можливим відтворення високих частот оновлення до 120 і навіть 240 Гц.

Разом із тим OLED мають і *недоліки*, зумовлені особливостями органічних матеріалів. Найвідоміший з них — вигорання (burn-in), що виникає через нерівномірну деградацію субпікселів, особливо синіх, які мають коротший термін служби. У результаті на дисплеї з'являються залишкові «тіні» від статичних елементів інтерфейсу. Другою проблемою є використання широтно-імпульсної модуляції (PWM) для регуляції яскравості. При низькій частоті це призводить до мерехтіння, яке помітне оком і може викликати втому чи головний біль у чутливих користувачів.

У смартфонах найбільшого поширення набули AMOLED (Active Matrix OLED). У таких панелях кожен піксель керується окремим транзистором у складі тонкоплівкової активної матриці. Це забезпечує точне регулювання яскравості та швидку реакцію. Завдяки тонкоплівковим транзисторам екрани

AMOLED можна робити гнучкими. Саме тому з'явилися складані смартфони, які неможливо було реалізувати на базі традиційних LCD.

Важливим параметром OLED є *квантова ефективність* — відношення кількості випромінених фотонів до числа інжекттованих носіїв заряду. Вона залежить від внутрішніх процесів у матеріалі, зокрема від співвідношення синглетних і триплетних екситонів. Дослідження в галузі матеріалознавства спрямовані на подовження терміну служби органічних шарів і розробку нових типів емітерів, що мають вищу квантову ефективність.

### 2.1.3. LTPO-OLED

Розвиток технології OLED призвів до появи нового покоління екранів — LTPO-OLED (Low Temperature Polycrystalline Oxide). Ця технологія є поєднанням двох типів тонкоплівкових транзисторів, які використовуються у матрицях активного керування: LTPS (Low Temperature Polycrystalline Silicon) та IGZO (Indium Gallium Zinc Oxide). Кожен із них має власні *переваги та недоліки*:

- LTPS забезпечує високу швидкодію й здатність працювати при великих струмах, що важливо для досягнення високої яскравості. Проте він характеризується значними витратами енергії в режимі очікування.

- IGZO, навпаки, має дуже низькі струми витоку, тобто споживає мінімальну енергію при відображенні статичних зображень, однак поступається LTPS за максимальною швидкістю перемикавання.

Комбінація цих двох підходів у вигляді LTPO дала змогу досягти *оптимального балансу*. Важливим наслідком такої архітектури стало можливе динамічне регулювання частоти оновлення дисплея. Це має величезне значення для мобільних пристроїв, адже дозволяє суттєво економити заряд акумулятора, не погіршуючи візуального сприйняття.

Попри очевидні переваги, LTPO має і свої *труднощі*:

- поєднання двох різних типів транзисторів у матриці ускладнює технологію виробництва, що підвищує вартість панелей.

- процеси деградації в LTPS і IGZO мають різну природу, тому потрібні складні алгоритми керування, які компенсують зміни параметрів із часом. Усе це робить LTPO дорожчим варіантом порівняно з класичним OLED.

Прикладом першого масового впровадження LTPO стала Apple Watch Series 4 (2018 рік), де така технологія дала змогу реалізувати завжди активний екран без значної шкоди для автономності. У подальшому LTPO були перенесені у смартфони — спочатку у флагманські моделі Samsung і Apple, а згодом і у пристрої інших брендів.

#### **2. 1.4. MiniLED-LCD**

Класичні LCD завжди страждали на відносно низьку контрастність, адже вся площа екрана рівномірно освітлювалася підсвіткою, і чорний колір ніколи не був по-справжньому чорним. Для покращення цього параметра почали впроваджувати технології локального затемнення (local dimming), коли підсвітка поділялася на окремі зони, які можна було вмикати й вимикати незалежно. Проте кількість таких зон у звичайних LED-дисплеях залишалася обмеженою, і ефект був далеким від ідеалу.

Рішенням цієї проблеми стала поява технології MiniLED, яка є еволюційним розвитком LCD. Її принцип базується на використанні великої кількості надзвичайно малих світлодіодів, розміри яких у десятки разів менші за традиційні LED для підсвітки. Якщо в класичному смартфонному LCD підсвітку забезпечували сотні діодів, то в MiniLED їхня кількість сягає десятків тисяч. Кожна група світлодіодів формує локальну зону підсвітки, завдяки чому дисплей отримує змогу регулювати яскравість з високою просторовою точністю.

MiniLED-панелі стали проміжним етапом між класичними LCD та OLED. Вони дозволили зберегти *переваги* LCD, такі як відсутність вигорання

та відносно тривалий термін служби, але водночас наблизили контрастність і динамічний діапазон до OLED.

Попри це, MiniLED має *недоліки*, які залишаються:

- конструкція є товстішою, ніж у OLED, і менш придатною для створення гнучких екранів. Тому ця технологія активно використовується у великих дисплеях — планшетах, ноутбуках і телевизорах;
- halo-ефект. Він виникає тоді, коли на темному фоні з'являється яскравий об'єкт (наприклад, білий текст на чорному тлі). Через те, що підсвітка керується зонами, а не окремими пікселями, навколо світлого елемента утворюється «ореол» із залишкового світіння. Збільшення кількості зон MiniLED значно зменшує цей ефект, але повністю усунути його неможливо через фізичне розсіювання світла.

MiniLED можна розглядати як місток між традиційними рідкокристалічними дисплеями та майбутніми самосвітними технологіями, такими як MicroLED.

### **2.1.5. MicroLED**

Технологія MicroLED вважається наступним етапом розвитку дисплеїв після OLED і MiniLED. Її суть полягає в тому, що кожен піксель складається з окремого неорганічного мікросвітлодіода (на основі GaN чи інших напівпровідникових матеріалів), який сам випромінює світло. Це дозволяє отримати всі переваги OLED —

Таким чином, MicroLED поєднує *найкращі риси* OLED і LCD:

- високу якість зображення, яскравість і довговічність;
- ідеальний чорний та нескінченний контраст, адже піксель можна повністю вимкнути.

- Основною *проблемою* технології поки що є складність виробництва. Щоб створити дисплей смартфона з мільйонами пікселів, необхідно з високою точністю розмістити таку ж кількість мікродіодів. Цей процес, відомий як мас-трансфер, технологічно складний і дорогий, що значно підвищує собівартість.

Тому, через виробничі обмеження, ця технологія поки що залишається у фазі прототипів і використовується лише у великих дисплеях преміум-класу. Для смартфонів вона розглядається як перспективне, але ще недосяжне рішення найближчого майбутнього .

Підсумовуючи, наводимо таблицю 2.1, в якій інформація цього розділу подана більш компактно і зручно для порівняння.

Таблиця 2.1. Порівняння основних оптичних і енергетичних характеристик дисплейних технологій

Параметр / Технологія	LCD	OLED	LTPO-OLED	MiniLED	MicroLED
Принцип дії	Модуляція поляризації	Електролюмінесценція органічних шарів	Електролюмінесценція з адаптивною частотою	Локальне LED-підсвічування	Електролюмінесценція неорганічних діодів
Коефіцієнт пропускання (T)	0.08–0.12	–	–	0.10–0.15	–
Квантова ефективність (EQE)	–	25–60%	30–70%	–	70–90%
Пікова яскравість, кд/м <sup>2</sup>	400–800	1000–2000	1500–2000	2000–2500	4000–5000
Енергоспоживання, Вт/дм <sup>2</sup>	2.5–3.0	1.5–2.5	1.2–2.0	2.0–3.0	1.0–1.5
Контрастність	~1000:1	∞:1	∞:1	2000+:1	∞:1
Довговічність, годин	>30 000	10 000–20 000	15 000–25 000	>50 000	>100 000

Ця таблиця демонструє, як фізичні параметри (ефективність, пропускання, енергоспоживання, ін.) змінюються від LCD до MicroLED.

Помітно, що перехід до самосвітних технологій (OLED і MicroLED) значно підвищує енергоефективність і контрастність, але знижує довговічність у випадку органічних матеріалів.

## **2.2 Порівняльний аналіз фізичних параметрів дисплеїв різних типів**

### **2.2.1. Світловіддача, коефіцієнт відбиття та коефіцієнт пропускання**

Світловіддача дисплея визначає, яку частку електричної енергії він перетворює у видиме світло. Для рідкокристалічних екранів (LCD) це переважно процес модуляції світлового потоку, який проходить крізь шар поляризаторів і рідких кристалів. Світло у таких дисплеях не генерується, а лише частково пропускається або поглинається. Тому ефективність LCD залежить від коефіцієнта пропускання  $T$  та відбиття  $R$ , які підкоряються рівнянню енергетичного балансу:

$$T+R+A=1,$$

де  $A$  — частка поглинутої енергії.

Для якісного зображення необхідно, щоб коефіцієнт пропускання був максимальним, а коефіцієнт відбиття — мінімальним. Проте на практиці, через втрати на поляризаторах і фільтрах, LCD-дисплеї пропускають лише 5–10% початкового світлового потоку підсвітки. Решта поглинається або розсіюється. Це обумовлює значні енергетичні витрати: щоб досягти яскравості у 500–600 кд/м<sup>2</sup>, підсвітка має випромінювати у кілька разів більше.

В OLED і MicroLED ситуація принципово інша. Тут світло випромінюється безпосередньо в кожному пікселі, тому коефіцієнт пропускання як такий не застосовується. Для цих технологій головним є параметр світлової віддачі (luminous efficiency), який описує кількість світла, що утворюється на одиницю спожитої електроенергії:

$$\eta_L = \frac{\Phi_v}{P}$$

де  $\Phi_v$  — світловий потік, а  $P$  — споживана потужність. Для OLED типове значення  $\eta_L$  становить 40–60 лм/Вт, тоді як для MicroLED прогнозовано можливі значення понад 100 лм/Вт, що свідчить про їхню вищу енергоефективність.

На рисунку 2.1 показано порівняння яскравості та контрастності між основними технологіями дисплеїв. Зазначимо, що для OLED і MicroLED контрастність умовно позначена як  $10^6$ – $10^7 : 1$ , що відповідає практично безмежному співвідношенню ( $\infty : 1$ ). Як видно з графіка, перехід від LCD до OLED і далі до MicroLED супроводжується різким зростанням контрастності та пікової яскравості. Ця тенденція підтверджує, що розвиток дисплейних технологій відбувається у напрямку підвищення світлової ефективності та розширення динамічного діапазону.

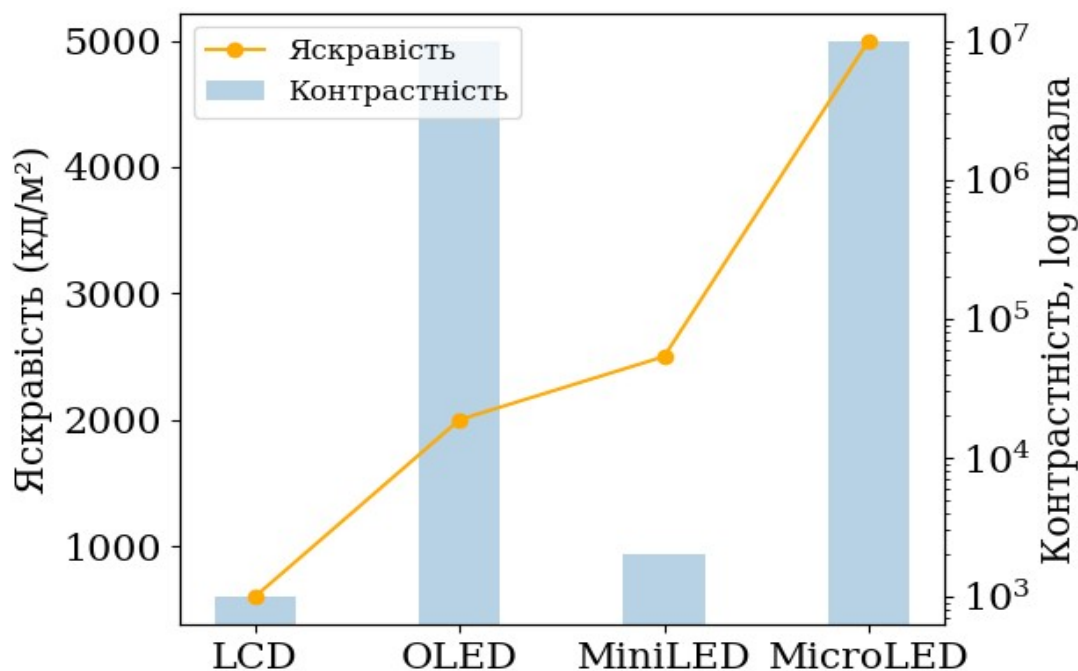


Рисунок 2.1 – Яскравість та контрастність різних технологій дисплеїв

Із точки зору яскравості MiniLED демонструють виняткові показники. Сучасні панелі для смартфонів здатні досягати пікових значень понад 1500–2000 кд/м<sup>2</sup>, що дозволяє впевнено використовувати їх на яскравому сонячному світлі та відтворювати HDR-контент високої якості. При цьому енергоспоживання MiniLED є вищим, ніж у OLED при відтворенні темних сцен, оскільки підсвітка навіть у вимкнених зонах не є повністю ідеальною. Однак у білих і яскравих сценах MiniLED можуть виявитися енергоефективнішими, оскільки OLED у такому випадку витрачає багато енергії на роботу великої кількості субпікселів.

Отримані результати свідчать, що різні типи екранів мають суттєво відмінні оптичні властивості. Оптично LTPO-OLED мають усі переваги класичних OLED — ідеальний чорний, практично нескінченну контрастність та яскравість понад 1000–2000 кд/м<sup>2</sup>. Але додатково вони значно ефективніші при відображенні статичних зображень, наприклад у режимі Always-On Display, коли на екрані показуються лише годинник чи повідомлення. У такому випадку частота може падати до 1 Гц, і споживання енергії зменшується у кілька разів.

### 2.2.2. Квантова ефективність матеріалів

Яскравість і енергетична ефективність екранів, заснованих на випромінюванні світла (OLED, MicroLED), визначаються квантовими процесами. Ключовим параметром є зовнішня квантова ефективність (External Quantum Efficiency, EQE), яка показує, скільки фотонів випромінюється назовні відносно кількості інжекттованих електронів:

$$EQE = \eta_{inj} \cdot \eta_{rad} \cdot \eta_{out},$$

де:

- $\eta_{inj}$  — ефективність інжекції носіїв заряду,

- $\eta_{\text{rad}}$ — ймовірність радіаційної рекомбінації,
- $\eta_{\text{out}}$ — частка світла, що виходить назовні, не втрачаючись у структурі.

В OLED кожен з цих факторів має обмеження. Лише частина екситонів, що виникають під час рекомбінації, перебуває у синглетному стані, який випромінює фотони. Тому ефективність звичайних флуоресцентних OLED обмежена близько 25%. Використання фосфоресцентних або TADF-матеріалів підвищує  $\eta_{\text{rad}}$  майже до 100%.

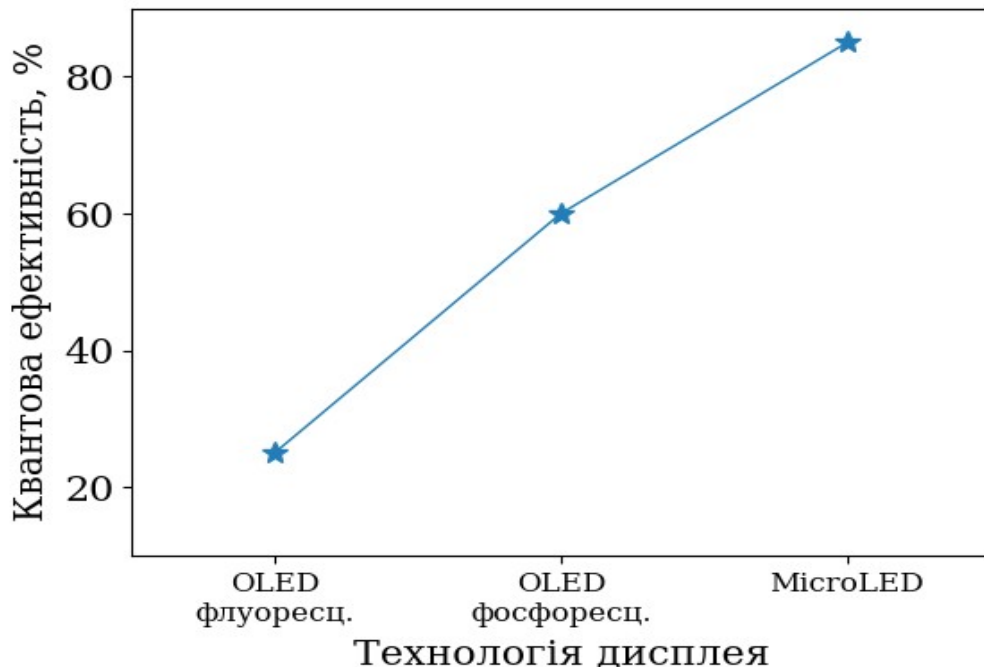


Рисунок 2.2. - Квантова ефективність різних типів екранів

У MicroLED, побудованих на неорганічних матеріалах (найчастіше GaN), радіаційна рекомбінація майже повна, тобто  $\eta_{\text{rad}} \approx 1$ , а ефективність обмежується переважно оптичними втратами ( $\eta_{\text{out}}$ ), пов'язаними з відбиттям і внутрішнім повним відбиванням. Використання мікролінз або наноструктурних покриттів дозволяє підвищити  $\eta_{\text{out}}$  до 80–90%.

Таким чином, квантова ефективність є ключовим критерієм, який визначає потенційну яскравість і енергоспоживання дисплеїв. Саме через

вищу квантову ефективність MicroLED мають значну перевагу над OLED у перспективі масового виробництва.

### 2.2.3. Порівняння енергоспоживання та довговічності

Енергоспоживання дисплеїв залежить від фізичного механізму утворення зображення. Для LCD воно майже постійне, адже підсвітка працює з незмінною потужністю незалежно від того, яка картинка відображається. Натомість для OLED і MicroLED споживання енергії змінюється динамічно: чим більше світлих ділянок зображення, тим більше пікселів активні. Це створює характерний феномен — на чорному фоні OLED економить енергію, а на білому споживає її більше, ніж LCD (див. Рис. 2.3). Як видно з графіка, LCD зберігає постійний рівень споживання енергії незалежно від зображення. OLED і MicroLED демонструють динамічну поведінку: темні сцени вимагають менше енергії, тоді як яскраві — значно більше. Це пояснюється природою самосвітних пікселів, для яких яскравість прямо визначається силою струму через випромінювальний елемент.

Щодо довговічності, органічні матеріали OLED поступово деградують під дією високих струмів і температури. Найшвидше старіють сині емітери, що зумовлює поступову зміну кольорів і появу ефекту вигорання. Для MicroLED, навпаки, деградація практично відсутня: неорганічні матеріали GaN і AlGaInP стабільні та витримують десятки тисяч годин роботи без втрати яскравості.

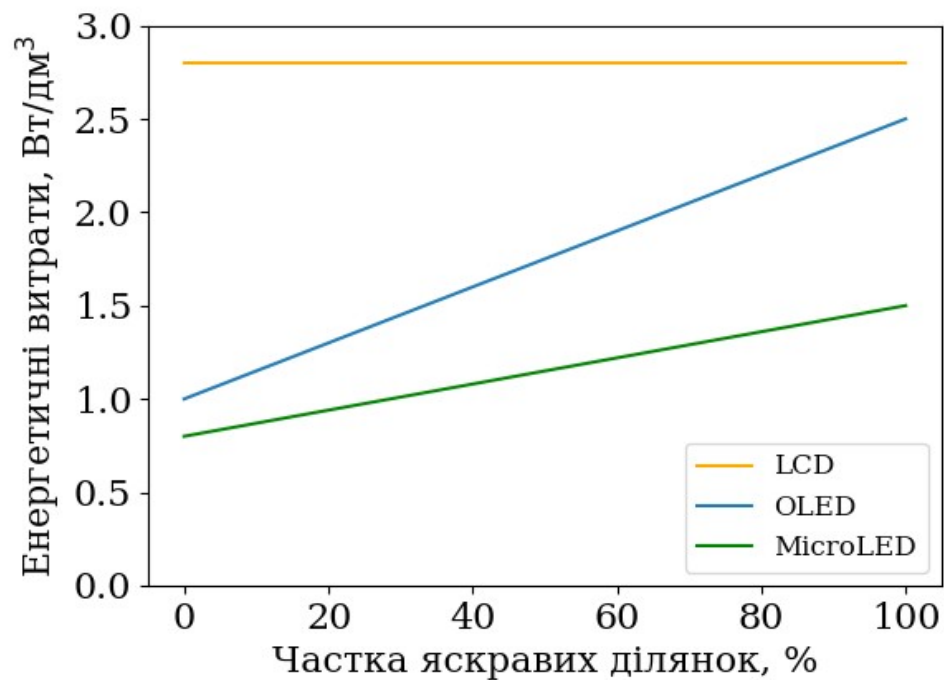


Рисунок 2.3 - Залежність енергоспоживання від типу зображення

Якщо порівнювати питомі енергетичні втрати, OLED мають ефективність близько 40–60 лм/Вт, LCD — 10–15 лм/Вт, тоді як MicroLED у перспективі можуть перевищити 100 лм/Вт. Це означає, що при однаковій яскравості MicroLED споживатимуть у 2–3 рази менше енергії, ніж OLED, і в 6–8 разів менше, ніж LCD.

#### 2.2.4. Вплив щільності пікселів (ppi) на якість зображення

Одним із ключових параметрів, що визначають сприйняття зображення, є щільність пікселів (pixels per inch, ppi). Вона описує кількість пікселів, розташованих уздовж діагоналі в одному дюймі. Висока щільність пікселів забезпечує плавність ліній, чіткість тексту й деталізацію.

З точки зору оптики, роздільна здатність, яку може сприйняти людське око, обмежена кутовою роздільною здатністю — приблизно 1 кутовою мінutoю (1/60 градуса). При типовій відстані перегляду 25–30 см це відповідає приблизно 300–350 ppi. Тобто все, що перевищує цю межу,

людське око сприймає як «суцільне» зображення без видимих пікселів (див. Табл. 3.2). Саме тому Apple свого часу ввела термін «Retina-дисплей» для екранів із щільністю понад 320 ppi.

Збільшення ppi вимагає зменшення розмірів субпікселів, що накладає технологічні обмеження. У LCD це призводить до зниження коефіцієнта пропускання (менші отвори для світла) та потребує потужнішої підсвітки. В OLED надмірна мініатюризація може знизити ефективність емітера, оскільки менший піксель швидше деградує. У MicroLED, де кожен субпіксель — це окремий діод, зменшення розміру ускладнює процес масового розміщення, що нині є головним викликом цієї технології.

Отже, оптимальна щільність пікселів для смартфонів знаходиться в межах 350–500 ppi. Подальше збільшення, хоч і підвищує технічну якість, майже не впливає на візуальне сприйняття, але ускладнює виробництво й знижує енергоефективність.

Таблиця 2.2 – Вплив щільності пікселів на якість зображення

Щільність, ppi	Середня відстань перегляду, см	Гострота зору, кутова хвилина	Видимість пікселів	Тип дисплея
250	30	>1,5'	Пікселі помітні	бюджетні LCD
350	30	≈1,0'	Межа «Retina»	середній рівень
450	25	<1,0'	Пікселі непомітні	флагманські OLED
600	20	<0,8'	Надлишкова деталізація	експериментальні MicroLED

### 2.3. Результати та обговорення

В цьому розділі проведений аналітичний огляд сучасних матеріалів і технологій, що використовуються у дисплеях смартфонів. Зібрані дані охоплюють такі параметри: пікова яскравість, контрастність, питоме енергоспоживання, ресурс роботи до втрати 50% яскравості (L50), приведено

також орієнтовну вартість виробництва 1 см<sup>2</sup> дисплейної площі. Усі показники зведені до усереднених значень.

Дані систематизовано для п'яти основних технологій, які найчастіше застосовуються у смартфонах: LCD (IPS/PLS), OLED, LTPO-OLED, MiniLED та MicroLED.

На основі зібраних і систематизованих даних встановлено ключові закономірності розвитку дисплейної індустрії, а також визначено найбільш перспективні напрямки подальших досліджень і вдосконалення матеріалів.

Отримані значення узагальнено в таблиці 2.3, що дозволяє безпосередньо порівняти оптичні й енергетичні властивості кожної технології.

Таблиця 2.3 – Порівняльні параметри матеріалів для дисплеїв смартфонів

Технологія	Яскравість (кд/м <sup>2</sup> )	Контрастність	Енергоспоживання (Вт/дм <sup>2</sup> )	Час життя L50 (год)	Орієнтовна вартість (USD/см <sup>2</sup> )
<b>LCD (IPS/PLS)</b>	400–800	~1000:1	2.5–3.0	>30 000	~0.8
<b>OLED (AMOLED)</b>	1000–2000	∞:1	1.5–2.5	15 000– 20 000	~2.0
<b>LTPO-OLED</b>	1000–2000	∞:1	1.2–2.0	18 000– 25 000	~2.5
<b>MiniLED-LCD</b>	1500–2500	2000:1	2.0–3.0	~50 000	~1.8
<b>MicroLED</b>	4000–5000	∞:1	1.0–1.5	>100 000	>3.0

Аналіз даних у таблиці показує, що яскравість зростає майже в геометричній прогресії від класичних LCD до MicroLED. Якщо LCD забезпечують 400–800 кд/м<sup>2</sup>, то OLED і LTPO-OLED перевищують 1000 кд/м<sup>2</sup>, MiniLED виходить на рівень 2000–2500 кд/м<sup>2</sup>, а MicroLED досягає рекордних значень 5000 кд/м<sup>2</sup>. Така тенденція обумовлена

переходом від пасивних до активних джерел світла та вдосконаленням квантової ефективності матеріалів.

Контрастність завдяки повному вимиканню пікселів демонструє ще більш різкі відмінності. Для LCD вона обмежена 1000:1, у MiniLED досягає 2000:1, тоді як OLED і MicroLED мають практично нескінченний ресурс.

Що стосується енергоспоживання, OLED і LTPO-OLED є найефективнішими при відображенні змішаних або темних сцен, оскільки споживання енергії прямо залежить від кількості активних пікселів. LTPO-бекплейн забезпечує додаткову економію завдяки зниженню частоти оновлення до 1 Гц у статичних режимах. MicroLED теоретично може стати найекономнішим варіантом — через високу ефективність перетворення електричної енергії у світло, але поки ця технологія залишається лабораторною через надзвичайну складність масового виробництва.

Порівняння за довговічністю демонструє перевагу неорганічних матеріалів: LCD і MiniLED мають ресурс 30–50 тисяч годин, MicroLED — понад 100 тисяч. Для OLED-екранів цей показник удвічі менший через деградацію органічних шарів, зокрема синіх субпікселів.

Вартість виробництва залишається ключовим чинником стримування нових технологій. Якщо виробництво LCD найдешевше ( $\sim 0.8$  USD/cm<sup>2</sup>), то OLED утричі дорожче, а MicroLED — удвічі дорожче за OLED через складність процесу мас-трансферу мікродіодів. Для візуалізації взаємозв'язків між параметрами побудовано декілька графічних залежностей (див.рис. 2.4 та рис. 2.5)

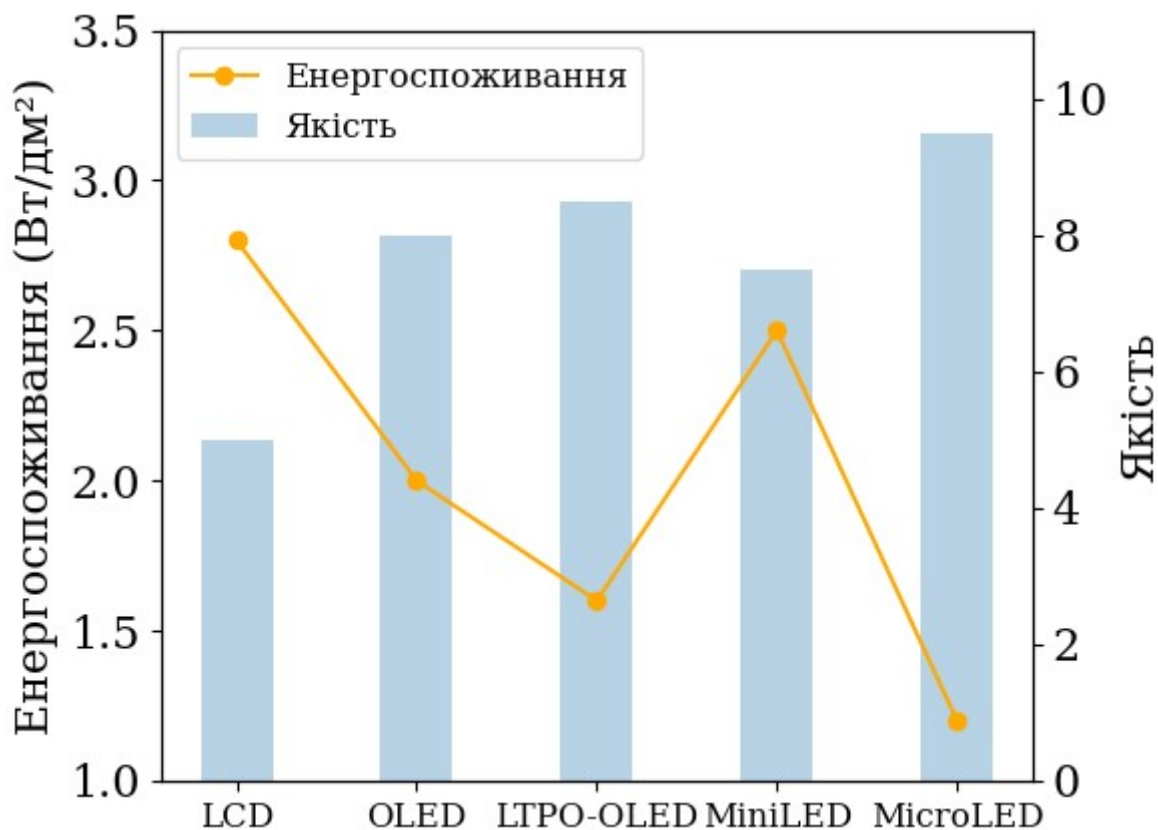


Рисунок 2.4 – Залежність “Якість зображення vs Енергоспоживання”

Цей графік демонструє співвідношення між суб’єктивною якістю зображення (комплексним показником, що включає яскравість, контрастність і кольорове охоплення) та питомим енергоспоживанням.

Крива LCD розташовується у нижній частині графіка — низька якість при високих витратах енергії. OLED і LTPO-OLED формують більш оптимальну лінію балансу, тоді як MicroLED відображає найкраще співвідношення: високу якість при мінімальному споживанні.

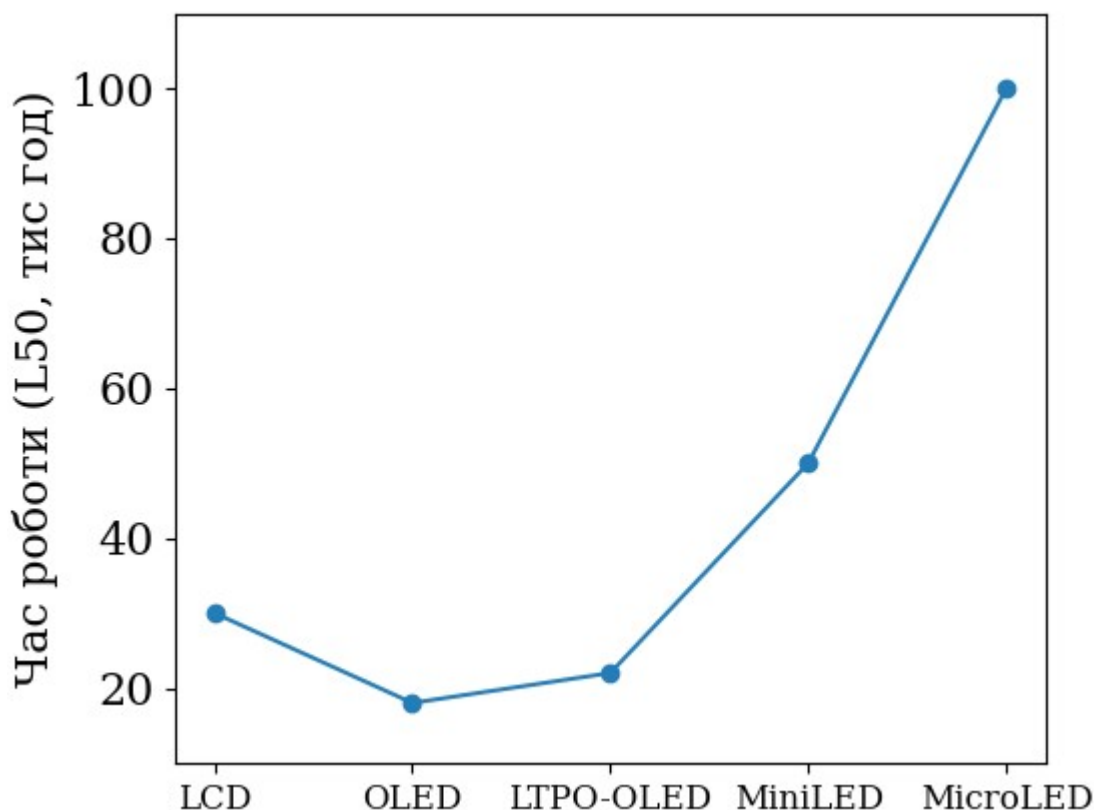


Рисунок 2.5 – Залежність “Довговічність vs Тип матеріалу”

На цьому графіку порівнюються терміни служби дисплеїв різних типів. По осі X — тип технології, по осі Y — кількість годин роботи до зниження яскравості на 50%. Отримані дані показують, що органічні матеріали (OLED, LTPO-OLED) мають нижчу стабільність, тоді як неорганічні рішення (MiniLED, MicroLED) забезпечують триваліший життєвий цикл. Це пов’язано з відсутністю деградації емітерів і стабільністю неорганічних напівпровідників

Порівняльний аналіз показав, що подальший розвиток дисплейних технологій відбувається у напрямку підвищення квантової ефективності, зниження енергоспоживання та збільшення довговічності. Водночас спостерігається тенденція до відмови від проміжних рішень на користь самосвітних матеріалів. Очікується, що у найближчі роки OLED продовжить домінувати у флагманських моделях смартфонів, тоді як MicroLED поступово

переходить із лабораторного етапу до комерційного виробництва, формуючи основу для нового покоління дисплеїв.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити такий підсумок:

1. Найперспективнішими матеріалами для майбутніх смартфонних дисплеїв є неорганічні напівпровідники (GaN, AlGaInP), що використовуються в MicroLED-технології.
2. OLED і LTPO-OLED залишаються найбільш збалансованими рішеннями за критерієм “якість – енергоспоживання – гнучкість конструкції” .
3. MiniLED — ефективний проміжний етап модернізації LCD, який має високу яскравість і стабільність, але поступається OLED за контрастністю.
4. Основними напрямками розвитку є підвищення стабільності емітерів, зменшення витрат на виробництво та пошук нових матеріалів з високою фотонною ефективністю.

Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують, що перехід від органічних до неорганічних випромінювальних структур є закономірним етапом еволюції дисплейних технологій, який визначить подальший розвиток індустрії смартфонів у найближчі десятиліття.

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексне дослідження еволюції, фізичних принципів та сучасних тенденцій розвитку матеріалів для дисплеїв смартфонів.

1. Встановлено, що ключовими етапами розвитку стали: перехід у OLED, а також створення технологій LTPO і MiniLED, які поєднали високу частоту оновлення з енергоефективністю.
2. Аналіз показав, що підвищення ефективності екранів пов'язане зі зменшенням оптичних втрат і переходом від пасивних до активних джерел світла. LCD залишаються найдешевшими та стабільними, але обмеженими у контрастності; OLED і LTPO-OLED забезпечують високу якість і динамічну економію енергії; MiniLED підвищує яскравість і контраст, а MicroLED має найкращі потенційні характеристики — високу світловіддачу, довговічність і відсутність вигорання.
3. Оптична ефективність безпосередньо залежить від фізичних властивостей матеріалів: органічні речовини обмежені стабільністю, тоді як неорганічні мають вищу квантову ефективність і стійкість до деградації.
4. Енергоспоживання найменше в екранів LTPO-OLED і MicroLED завдяки поєднанню самосвітності та адаптивного керування частотою оновлення.
5. Довговічність і стабільність зображення суттєво зростають при використанні неорганічних матеріалів (MiniLED, MicroLED).
6. Розвиток дисплейних технологій прямо залежить від досягнень у матеріалознавстві, нанофотоніці та енергозберігаючих структурах, що визначає міждисциплінарний характер подальших досліджень у цій

сфері. MicroLED можна вважати найперспективнішою технологією майбутнього, проте її широке впровадження потребує здешевлення процесів мас-трансферу мікродіодів і підвищення точності їх розміщення.

7. Виконана робота має не лише теоретичне, а й практичне значення — вона дозволяє зрозуміти взаємозв'язок між фізичними принципами роботи екранів і їхньою споживчою ефективністю, а також вказує на перспективні напрями розвитку індустрії дисплеїв у найближчі десятиліття.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Tang C. W., Van Slyke S. A. *Organic electroluminescent diodes*. // *Applied Physics Letters*. – 1987. – Vol. 51(12). – P. 913–915.
2. Lin C. W., Chen H., et al. *Mini-LED and Micro-LED displays: technologies, materials, and future prospects*. // *Journal of the Society for Information Display*. – 2020. – Vol. 28(6). – P. 481–501.
3. Forrest S. R. *The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic*. // *Nature*. – 2004. – Vol. 428. – P. 911–918.
4. Lee J.-H., Chen H.-Y., Lee J.-Y. *Recent progress in OLED materials and devices*. // *Advanced Materials*. – 2018. – Vol. 30(14). – 1705581.
5. Chen Y., Han J., et al. *MiniLED backlight technology for LCD displays*. // *Displays*. – 2021. – Vol. 70. – P. 102071.
6. Wu T.-L., Wu C.-C. *MicroLED display technology and applications*. // *Micromachines*. – 2020. – Vol. 11(10). – P. 906–921.
7. Kwon H., Kim J., et al. *Development of LTPO thin-film transistors for OLED backplanes*. // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2019. – Vol. 66(11). – P. 4873–4879.
8. DisplayMate Technologies. *Display Technology Shoot-Out: OLED vs LCD*. – 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.displaymate.com>
9. Samsung Display. *White Paper: LTPO OLED Technology Overview*. – Seoul: Samsung Display Corp., 2022. – 15 p.
10. LG Display. *OLED Technology and Applications*. – LG Display Technical Report. – Seoul, 2021. – 22 p.
11. Apple Inc. *Environmental Progress Report 2023*. – Cupertino: Apple, 2023. – 38 p.

12. Sid Display Week Proceedings. *Advances in OLED and MicroLED Displays*. – Society for Information Display, 2023.
13. Li Y., et al. *A review of MicroLED technologies and challenges*. // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2022. – Vol. 58(4). – 2100208.
14. ScienceDirect Database. *Display materials and optical performance reports*. – Elsevier, 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com>
15. IEEE Xplore Digital Library. *Selected articles on display materials and efficiency*. – 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org>
16. Banerjee A. *Optical principles of liquid crystal displays*. – CRC Press, 2017. – 354 p.
17. Hecht E. *Optics (5th Edition)*. – Addison-Wesley, 2017. – 720 p.
18. Tsutsui T., Saito S. *Organic light-emitting diodes: theoretical basis and device physics*. – Springer, 2019. – 412 p.
19. Wei H., et al. *Energy consumption and lifetime improvement in OLED displays*. // *Displays*. – 2020. – Vol. 63. – P. 101928.
20. Zissis G., et al. *Efficiency of modern solid-state lighting devices*. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2021. – Vol. 54(10). – 103001.