

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

ПРИСТРОЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ
НА ОСНОВІ РІДКИХ КРИСТАЛІВ
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи МТЮЛС-21-1
Максим ІЛЬЧЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та
інформаційно- вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія
оптоінформаційних та лазерних систем»
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. каф. ФОЕТ Сергій КУХТІН
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Ільченку Максиму Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Пристрої відображення інформації на основі рідких кристалів

затверджена наказом університету від « 23 » травня 2025 р. № 408 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 23 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

1 Фізичні основи функціонування рідкокристалічних дисплеїв. 2. Конструкція рідкокристалічного дисплея. 3. Формули, що описують керування світлопропусканням і параметри зображення. 4. Експлуатаційні характеристики рідкокристалічних дисплеїв.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Дослідити природу рідких кристалів і їхні анізотропні властивості, що лежать в основі функціонування РК-дисплеїв.

2. Вивчити принципи модуляції світла за допомогою електричного поля та механізми поляризації.

3. Проаналізувати конструктивні особливості та принцип дії різних типів РК-дисплеїв (TN, IPS, VA, TFT).

4. Розглянути особливості підсвічування (CCFL, LED) та їхній вплив на якість зображення й енергоефективність.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 11 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про рідкі кристали та їх характеристики	05.05.25–14.05.25	Виконано
2	Дослідження властивостей рідких кристалів	15.05.25–21.05.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик дисплейних елементів	22.05.25–26.05.25	Виконано
4	Аналіз отриманих даних та характеристик дисплейних структур	27.05.25–29.05.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	30.05.25–08.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	09.06.25–11.06.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	12.06.25–19.06.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.06.25–21.06.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.06.25–24.06.25	Виконано

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ ст. викл. каф. ФОЕТ Сергій КУХТІН
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 57 с., 24 рис.,
18 джерел, 1 додаток.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, КОНСТРУКЦІЯ ДИСПЛЕЯ,
ПІДСВІЧУВАННЯ, ПІКСЕЛЬ, ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА, ПОРІВНЯННЯ З
OLED, ПРИНЦИП РОБОТИ, РІДКІ КРИСТАЛИ, РК-ДИСПЛЕЇ, ФІЗИЧНІ
ОСНОВИ

Об'єкт дослідження – пристрої відображення інформації на основі
рідких кристалів..

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження фізичних принципів,
конструкції, експлуатаційних характеристик, а також сучасних тенденцій
розвитку рідкокристалічних дисплейних технологій

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні
завдання.

1. Дослідити природу рідких кристалів і їхні анізотропні властивості,
що лежать в основі функціонування РК-дисплеїв.
2. Вивчити принципи модуляції світла за допомогою електричного
поля та механізми поляризації.
3. Проаналізувати конструктивні особливості та принцип дії різних
типів РК-дисплеїв (TN, IPS, VA, TFT).
4. Розглянути особливості підсвічування (CCFL, LED) та їхній вплив
на якість зображення й енергоефективність.
5. Оцінити сучасні напрями розвитку РК-дисплеїв та їхнє місце серед
конкуrentних технологій, зокрема OLED.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 57 p., 24 fig. , 18 sources, 1 addition.

COMPARISON WITH OLED, DISPLAY DESIGN, ENERGY EFFICIENCY, ILLUMINATION, LIGHT POLARIZATION, LIQUID CRYSTALS, LCD DISPLAYS, PHYSICAL BASES, PIXEL, PRINCIPLE OF OPERATION,.

The object of research is information display devices based on liquid crystals.

The purpose of the qualification work is to study the physical principles, design, operational characteristics, as well as modern trends in the development of liquid crystal display technologies.

The research method is theoretical.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. To study the nature of liquid crystals and their anisotropic properties that underlie the functioning of LCD displays.
2. To study the principles of light modulation using an electric field and polarization mechanisms.
3. To analyze the design features and operating principle of different types of LCD displays (TN, IPS, VA, TFT).
4. To consider the features of backlighting (CCFL, LED) and their impact on image quality and energy efficiency.
5. To evaluate the current directions of development of LCD displays and their place among competitive technologies, in particular OLED.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Фізичні властивості рідких кристалів	9
1.1 Природа та класифікація рідких кристалів	9
1.2 Основний опис рідкокристалічних матеріалів.....	10
1.3 Рідкокристалічні фази.....	13
1.3.1 Термотропна фаза	14
1.3.2 Нематична фаза	14
1.3.3 Сметичні фази.....	16
1.3.4 Хіральні фази або скручені нематики.....	16
1.3.5 Сині фази	19
1.3.6 Дискотичні фази.....	19
1.3.7 Конічні фази.....	20
1.4 Анізотропія молекул та її роль у властивостях рідких кристалів.....	20
1.4.1 Алгоритм структурного тензора.....	21
1.4.2 Перевірка алгоритму структурного тензора	24
2 Рідкокристалічні кристали в сучасних дисплеях.....	27
2.1 Рідкокристалічні дисплеї та їх особливості	27
2.2 Технології підсвічування РК-дисплеїв	31
2.2.1 Масив білих світлодіодів (WLED-масив).....	31
2.2.2 Люмінесцентна лампа з холодним катодом (CCFL)	32
2.2.3 Бокове підсвічування білими світлодіодами (EL-WLED)	33
2.2.4 RGB-LED масив	34
2.2.5 Монохромні світлодіоди	34
2.2.6 Міні-світлодіод.....	35
2.3 Пасивно-матричні РК-дисплеї	35
2.4 Тонкоплівковий транзисторний рідкокристалічний дисплей	38
2.5 Скручений нематичний дисплей	39
2.6 Сучасні тенденції та інновації у сфері рідкокристалічних дисплеїв	41
2.6.1 Електролюмінесцентні телевізори з квантовими точками (QDEL)..	42

2.6.2 Фосфоресцентні органічні світлодіоди (PHOLED-телевізори).....	43
2.6.3 Дисплеї, надруковані струменевим друком	44
3 Математичне моделювання рідких кристалів за допомогою COMSOL MULTIPHYSICS	49
3.1 Будова РК-дисплею.....	49
3.2 Основні рівняння для моделювання.....	50
3.2.1 Рівняння Еріксена-Леслі.....	50
3.2.2 Рівняння Максвелла	51
3.3 Результати 2D-моделювання COMSOL.....	51
Висновки	56
Перелік джерел посилання	58
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	60

ВСТУП

При щоденному спілкуванні людей з екранами – у телефоні, ноутбучі, годиннику, навіть у мікрохвильовці чи термометрі люди навіть не задумуються, як усе працює. Але за кожним таким «віконцем у світ інформації» стоїть досить цікава і водночас складна технологія. Одна з найпоширеніших серед них – рідкокристалічні дисплеї (РК-дисплеї).

Чому саме вони? Бо вони прості, зручні, тонкі, майже не споживають енергії і можуть працювати роками. І хоча вже існують нові технології, як-от органічний світлодіод (OLED) чи мікро-світлодіод (MicroLED), рідкі кристали досі тримають позиції – особливо в тих пристроях, де важливі надійність, енергоефективність і невисока вартість.

Ця тема цікава тим, що поєднує фізику, електроніку та програмування. Хотілося не просто прочитати, як усе працює, а й спробувати створити щось своє – невеликий пристрій, який виводить інформацію на РК-дисплей, щось на кшталт табло або міні-екрана. Таке, що можна підключити до мікроконтролера й подивитися в дії.

У процесі роботи довелося зануритися в те, як поведуться рідкі кристали під дією електричного струму, які бувають режими роботи дисплеїв, чим відрізняються технології TN, IPS, VA – і як усього цього не боятись, коли в тебе в руках паяльник і плата Arduino.

Загалом, це робота не лише про техніку, а й про цікавість – як із маленького шматочка пластику, трохи електроніки і кількох рядків коду зробити щось, що «говорить» з людиною мовою світла і символів.

1 ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДКИХ КРИСТАЛІВ

1.1 Природа та класифікація рідких кристалів

Рідкі кристали – це справді дивовижні матеріали. Вони поведуться одночасно як рідина і як кристал. З одного боку – молекули в них можуть вільно рухатися, немов у воді. А з іншого – вони все ж зберігають певний порядок: всі «дивляться» в один бік, наче домовились між собою. Така комбінація — рідка гнучкість плюс кристалічна організованість – дає дуже цікаві властивості.

Цікаво, що рідкі кристали надзвичайно чутливі до навколишнього середовища. Трохи змінилася температура, освітлення чи тиск – і молекули вже поведуться по-іншому. Вони можуть почати по-іншому викривляти світло, змінювати його напрямок або навіть перекривати повністю. Це дуже зручно для створення дисплеїв, де кожен піксель керується саме так — подав струм, і картинка на екрані змінилася.

Усі рідкі кристали поділяються на кілька основних типів [1,2]. Вони різняться тим, як саме їхні молекули розміщені всередині – від цього залежить, як швидко і як сильно вони реагують на зміну умов:

Нематичні – це найпростіший і найпоширеніший тип. У них молекули орієнтовані в одному напрямку, але хаотично розміщені, немає чіткого порядку. Вони швидко реагують на електричне поле, тому ідеальні для екранів, де зображення постійно змінюється – наприклад, у телевізорах або смартфонах.

Смектичні – тут молекули не просто орієнтовані – вони ще й упорядковані по шарах, ніби складені в стопку. Це дає більшу стабільність, але реакція на зовнішній вплив відбувається повільніше. Такі кристали використовуються там, де не потрібна швидка зміна зображення, але важлива точність.

Холестеричні рідкі кристали – це такий особливий вид, де молекули закручені, немов у спіральній гвинтовій драбинці. Завдяки цьому вони можуть відбивати світло певного кольору, і роблять це без жодних фарб чи барвників – просто за рахунок своєї структури. Це дуже круто, бо саме такі кристали часто використовують у речах, які реагують на температуру: наприклад, у термонаклейках або декоративних плівках, які змінюють колір залежно від нагрівання.

У кожного типу рідких кристалів свої плюси і мінуси, але найбільше розповсюджені і знайомі нам – це нематичні рідкі кристали. Саме їх застосовують у більшості сучасних дисплеїв, які ми бачимо навколо щодня – від простеньких калькуляторів до великих телевізорів. Вони швидко реагують на зміни, тому дозволяють показувати картинки, відео і текст з високою якістю.

1.2 Основний опис рідкокристалічних матеріалів

Більшість матеріалів, які, як відомо, мають рідкокристалічні фази, є органічними речовинами, два класичних приклади яких показано на рисунку 1.1. Молекули рідких кристалів є анізотропними і можуть мати стрижнеподібну або дископодібну форму. Саме через анізотропну природу молекул у рідких кристалах при описі рідкокристалічних матеріалів необхідно враховувати орієнтаційне впорядкування, а також потік рідини.

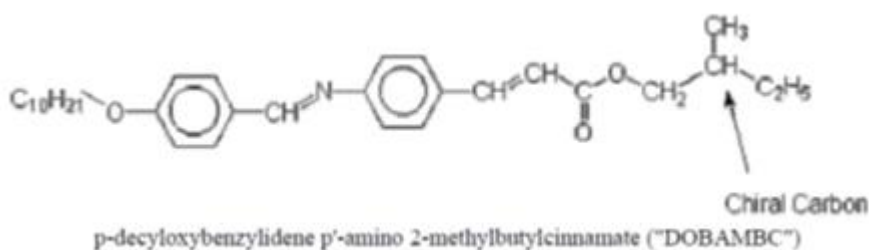


Рисунок 1.1 – Два приклади органічних структур у рідкокристалічних матеріалах

Існує кілька можливих рідкокристалічних фаз, кожна з яких має свої власні структурні характеристики. У найпростішому описі, запропонованому Жоржем Фріделем у 1922 році, схема класифікації, що використовується для рідкокристалічних фаз, складається з трьох категорій: нематична, холестерична та смектична [3]. У нематичній (або ахіральній нематичній) фазі довгі осі складових молекул прагнуть вирівнюватися паралельно кожній вздовж одного переважного напрямку, який називається анізотропною віссю. Холестерична (або хіральна нематична) рідкокристалічна фаза подібна до нематичної фази, за винятком того, що молекулярна орієнтація демонструє переважну спіральну конфігурацію.

Ця спіральна структура виникає через хіральні властивості складових молекул. Смектичні рідкі кристали є шаруватими структурами і, отже, більш впорядковані, ніж нематична фаза, і зазвичай виникають при нижчих температурах, ніж у нематичних. Молекулярне розташування в кожній з цих трьох рідкокристалічних фаз показано на рисунку 1.2. Нематична фаза найчастіше використовується при розробці рідкокристалічних дисплеїв і буде фазою, на якій ми зосередимося в цій публікації блогу.

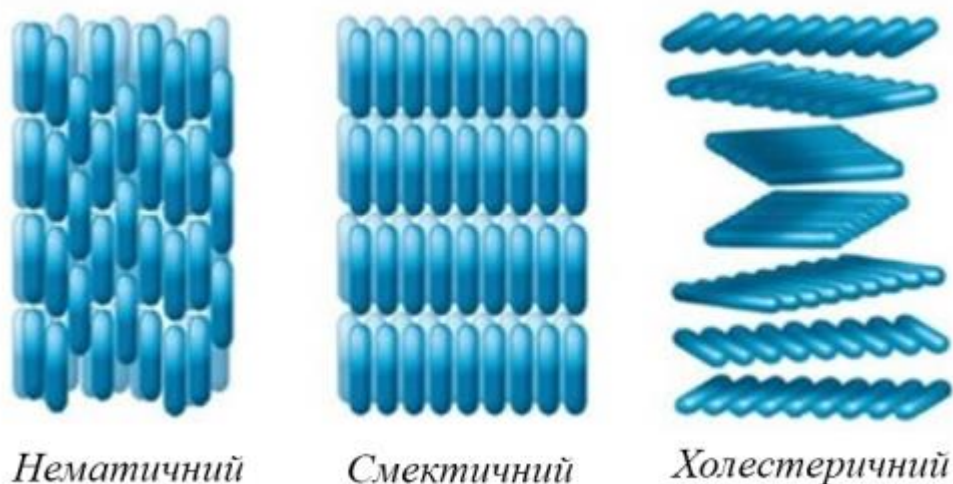


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення розташування молекул у нематичній, смектичній та холестеричній фазах

Як згадувалося раніше, рідкі кристали використовуються в розробці багатьох дисплеїв – від мобільних телефонів, комп'ютерів і телевізорів до дисплеїв приладових панелей автомобілів. Здатність рідких кристалів взаємодіяти зі світлом і прикладеними електричними полями означає, що вони можуть перемикатися між оптично різними станами – і тому можуть бути використані для побудови дисплея. Стандартні нематичні рідкокристалічні дисплеї складаються з двовимірного масиву пікселів, кожен з яких можна перемикати окремо, утворюючи таким чином двовимірне пікселізоване зображення.

Однією з галузей, яка стикається зі значними труднощами у використанні стандартних нематичних дисплеїв, є автомобільна промисловість, де безпека є основним рушійним фактором розробки нових технологій, які дозволяють водіям транспортних засобів, таких як автомобілі, не збиватися з дороги під час читання дисплея. Як результат, автомобільна промисловість, серед інших, почала розробляти проекційні дисплеї (HUD).

Загалом, HUD – це прозорий дисплей, який відображає інформацію, не потребуючи від глядачів зміни поля зору. Стандартні підходи використовують зображення, що проектується на лобове скло, створюючи 2D-зображення. Однак, за допомогою динамічних голографічних методів, нематичні рідкокристалічні шари можуть бути використані для створення HUD доповненої реальності.

На відміну від стандартних рідкокристалічних дисплеїв, голографічні пристрої потребують набагато щільнішого масиву пікселів, що вимагає менших піксельних елементів. Це зменшення розмірів пікселів призводить до швидкої зміни молекулярної орієнтації рідкого кристала на надзвичайно малих масштабах довжини, створюючи області з високим спотворенням поблизу країв пікселів, які називаються полями облямівок.

Ці області можуть погіршувати оптичні характеристики рідкокристалічного дисплея через локалізоване плавлення в дисплеї. Як результат, існує значний інтерес, як у промисловості, так і в академічних

колах, до адаптації форми пікселів для мінімізації небажаних ефектів полів облямівок у HUD. Враховуючи, що в рідкокристалічному пристрої є численні матеріальні та геометричні параметри, повна оптимізація цих матеріалів є складною, трудомісткою та дорогою. Розробка математичних моделей цих матеріалів має вирішальне значення для покращення нашого розуміння та майбутнього розвитку HUD та голографічних технологій.

Окрім підвищення безпеки на дорогах, майбутні застосування голографічних технологій включають:

а) телекомунікації (наприклад, для реконфігурованих оптичних з'єднань, таких як селективні перемикачі довжин хвиль для високошвидкісного Інтернету);

б) медицина (наприклад, відновлення зору за допомогою генної терапії та 3D-проекційних окулярів);

в) зберігання даних та інформації у 3D;

г) захист від шахрайства з ідентифікацією. Елементарні хвилі несуть інформацію про два важливі параметри, що характеризують саме середовище.

1.3 Рідкокристалічні фази

Різні рідкокристалічні фази можна характеризувати типом упорядкування. Можна розрізнити позиційний порядок та орієнтаційний порядок. Рідкі кристали характеризуються орієнтаційним порядком, але лише частковим або повністю відсутнім позиційним порядком [4, 5]. На противагу цьому, матеріали з позиційним порядком, але без орієнтаційного порядку, відомі як пластичні кристали

Впорядкування рідких кристалів поширюється на весь розмір домену, який може бути порядку мікрометрів, але зазвичай не до макроскопічного масштабу, як це часто відбувається в класичних кристалічних твердих тілах. Однак деякі методи, такі як використання меж або прикладеного

електричного поля , можуть бути використані для забезпечення єдиного впорядкованого домену в макроскопічному зразку рідкого кристала. Орієнтаційне впорядкування в рідкому кристалі може поширюватися лише вздовж одного виміру , при цьому матеріал по суті неупорядкований у двох інших напрямках.

1.3.1 Термотропна фаза

Термотропні фази – це ті, що виникають у певному діапазоні температур. Якщо підвищення температури занадто велике, тепловий рух зруйнує тонке кооперативне впорядкування рідкофазної фази, перетворюючи матеріал у звичайну ізотропну рідку фазу. За занадто низької температури більшість рідкофазних матеріалів утворюватимуть звичайний кристал. Багато термотропних рідкофазних матеріалів демонструють різноманітні фази зі зміною температури [6]. Наприклад, певний тип молекули рідкофазного матеріалу (так званий мезоген) може демонструвати різні смектичні фази, за якими слідує нематична фаза і, нарешті, ізотропна фаза зі збільшенням температури. Прикладом сполуки, що демонструє термотропну поведінку рідкофазного матеріалу, є пара-азоксианізол .

1.3.2 Нематична фаза

Найпростішою рідкокристалічною фазою є нематична. У нематичній фазі каламітові (стрижнеподібні) органічні молекули не мають кристалічного позиційного порядку, але самовирівнюються з приблизно паралельними довгими осями. Молекули вільно рухаються, а положення їхніх центрів мас розподілені хаотично, як у рідині, але їхня орієнтація обмежена для формування далекосяжного спрямованого порядку.

Нематики також демонструють так звані топологічні дефекти типу «їжак». У двох вимірах існують топологічні дефекти з топологічними

зарядами $+1/2i$, $-1/2$. Через гідродинаміку $+1/2$ дефект рухається значно швидше, ніж $-1/2$ дефект. Коли дефекти розташовані близько один до одного, вони притягуються; при зіткненні вони анігілюють.

Більшість нематичних фаз є одноосьовими: вони мають одну вісь (так звану директрису), яка є довшою та переважнішою, а дві інші є еквівалентними (їх можна апроксимувати як циліндри або стрижні). Однак деякі рідкі кристали є двоосьовими нематичними , що означає, що крім орієнтації своєї довгої осі, вони також орієнтовані вздовж вторинної осі.

Фазовий перехід між нематичною та смектичною фазами було показано на рисунку 1.3.

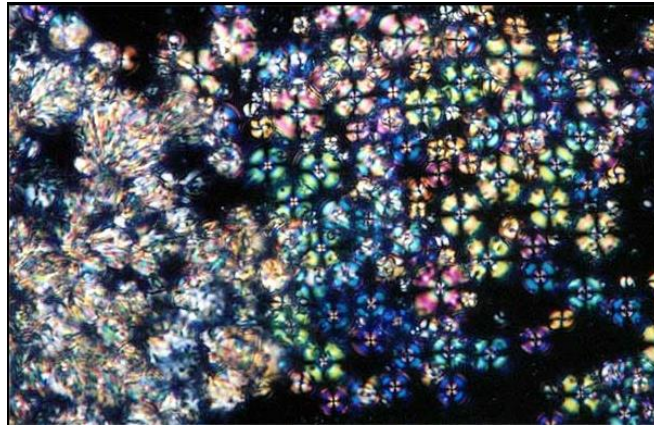


Рисунок 1.3 – Фазовий перехід між нематичною (ліворуч) та смектичною А (праворуч) фазами, що спостерігається між схрещеними поляризаторами

Нематичні кристали мають плинність, подібну до плинності звичайних (ізотропних) рідин, але їх можна легко вирівняти зовнішнім магнітним або електричним полем. Вирівняні нематичні кристали мають оптичні властивості одноосьових кристалів, і це робить їх надзвичайно корисними в рідкокристалічних дисплеях (РКД).

Нематичні фази також відомі в немолекулярних системах: у сильних магнітних полях електрони рухаються пучками або смугами, створюючи «електронну нематичну» форму матерії.

1.3.3 Сmekтичні фази

Сmekтичні фази, які знаходяться за нижчих температур, ніж нематичні, утворюють чітко визначені шари, які можуть ковзати один по одному подібно до мила. Таким чином, смектики позиційно впорядковані вздовж одного напрямку. У смектичній фазі А молекули орієнтовані вздовж нормалі шару, тоді як у смектичній фазі С вони нахилені від неї. Ці фази є рідиноподібними всередині шарів. Існує багато різних смектичних фаз, всі з яких характеризуються різними типами та ступенями позиційного та орієнтаційного порядку. Схема вирівнювання в смектичних фазах зображена на рисунку 1.4.

Окрім органічних молекул, також повідомлялося про смектичне впорядкування в колоїдних суспензіях двовимірних матеріалів або нанолістів. Одним із прикладів смектичних рідкокристалічних рідин (РК) є р,р'- динонілазобензол.

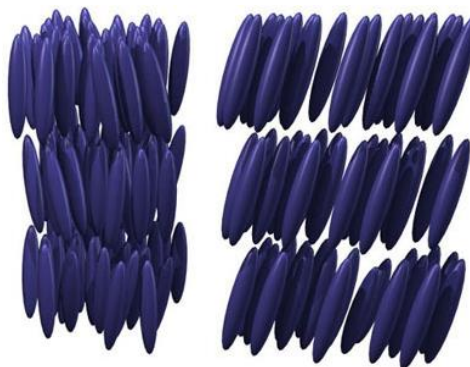


Рисунок 1.4 – Схема вирівнювання в смектичних фазах

1.3.4 Хіральні фази або скручені нематики

Хіральна нематична фаза демонструє хіральність (орієнтацію на руку). Цю фазу часто називають холестеричною фазою, оскільки вона вперше спостерігалася для похідних холестерину. Тільки хіральні молекули можуть

утворювати таку фазу. Ця фаза демонструє скручування молекул перпендикулярно до директора, причому молекулярна вісь паралельна директору.

Кінцевий кут скручування між сусідніми молекулами зумовлений їх асиметричним упакуванням, що призводить до хірального порядку на більшій відстані. У смектичній фазі C^* (зірочка позначає хіральну фазу) молекули мають позиційне впорядкування в шаруватій структурі (як і в інших смектичних фазах), причому молекули нахилені на кінцевий кут відносно нормалі шару. На рисунку 1.5 було зображено хіральну нематичну фазу.

Хіральність індукує кінцеве азимутальний скручування від одного шару до наступного, створюючи спіральне скручування молекулярної осі вздовж нормалі шару, тому їх також називають скрученими нематиками .

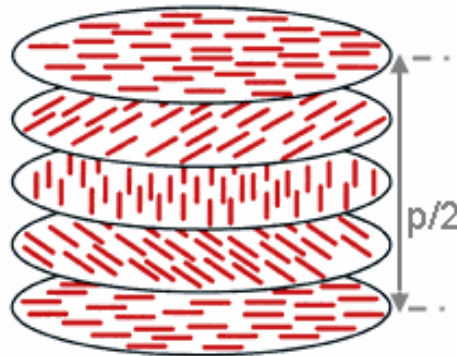


Рисунок 1.5 – Хіральна нематична фаза

Хіральний крок, p , відноситься до відстані, на якій молекули рідкокристалічного рідкого кристала зазнають повного повороту на 360° (але зауважте, що структура хіральної нематичної фази повторюється через кожену половину кроку, оскільки в цій фазі директори при 0° та $\pm 180^\circ$ еквівалентні).

Крок, p , зазвичай змінюється при зміні температури або коли до основного матеріалу рідкокристалічного рідкого кристала додаються інші молекули (ахіральний матеріал основного матеріалу рідкокристалічного

рідкого кристала утворюватиме хіральної фазу, якщо його легувати хіральним матеріалом), що дозволяє відповідно налаштувати крок даного матеріалу. У деяких рідкокристалічних системах крок має той самий порядок, що й довжина хвилі видимого світла. Це призводить до того, що ці системи демонструють унікальні оптичні властивості, такі як брегівське відбиття та низькопорогове лазерне випромінювання, і ці властивості використовуються в ряді оптичних застосувань.

У випадку брегівського відбиття дозволено лише відбиття найнижчого порядку, якщо світло падає вздовж спіральної осі, тоді як при косому падінні дозволені відбиття вищого порядку. Холестеричні рідкі кристали також демонструють унікальну властивість, що вони відбивають циркулярно поляризоване світло, коли воно падає вздовж спіральної осі, та еліптично поляризоване, якщо воно падає похило.

Планарна комірка, заповнена ахіральним рідкокристалічним матеріалом, легованим оптично активним аналогом бази Трегера, розміщена між парою паралельних (А) та схрещених (В) лінійних поляризаторів. Ця легована мезогенна фаза утворює самоорганізовані спіральні надструктури, які дозволяють певним довжинам хвиль світла проходити через схрещені поляризатори та вибірково відбивають певну довжину хвилі світла.

1.3.5 Сині фази

Блакитні фази – це рідкокристалічні фази, що з'являються в діапазоні температур між хіральною нематичною фазою та ізотропною рідкою фазою. Блакитні фази мають регулярну тривимірну кубічну структуру дефектів з періодами решітки в кілька сотень нанометрів, і таким чином вони демонструють селективні брегівські відбиття в діапазоні довжин хвиль видимого світла, що відповідає кубічній решітці. Теоретично в 1981 р. було передбачено, що ці фази можуть мати ікосаедричну симетрію, подібну до квазікристалів.

Хоча сині фази становлять інтерес для швидких модуляторів світла або настроюваних фотонних кристалів, вони існують у дуже вузькому температурному діапазоні, зазвичай менше кількох кельвінів. Нещодавно було продемонстровано стабілізацію синіх фаз у діапазоні температур понад 60 К, включаючи кімнатну температуру (від 260 К до 326 К). Сині фази, стабілізовані при кімнатній температурі, дозволяють електрооптичне перемикання з часом відгуку порядку 10^{-4} с. У травні 2008 року була розроблена перша РК-панель із синім фазовим режимом.

Кристали блакитної фази, будучи періодичною кубічною структурою із забороненою зоною у видимому діапазоні довжин хвиль, можна розглядати як 3D фотонні кристали. Отримання ідеальних кристалів блакитної фази у великих обсягах все ще є проблематичним, оскільки отримані кристали зазвичай є полікристалічними (пластинчаста структура) або розмір монокристалів обмежений (у мікрометровому діапазоні). Нещодавно блакитні фази, отримані як ідеальні 3D фотонні кристали у великих обсягах, були стабілізовані та отримані з різними контрольованими орієнтаціями кристалічної решітки.

1.3.6 Дискотичні фази

Дископодібні молекули рідкокристалічного оксиду (РК) можуть орієнтуватися шаруватою формою, відомою як дискотична нематична фаза. Якщо диски упаковуються в стопки, фаза називається дискотичною стовпчастою. Самі стовпці можуть бути організовані в прямокутні або гексагональні масиви. Також відомі хіральної дискотичні фази, подібні до хіральної нематичної фази.

1.3.7 Конічні фази

Конічні молекули рідкокристалічного оксиду (РК), як і в дискотичних молекулах, можуть утворювати стовпчасті фази. Було передбачено існування інших фаз, таких як неполярна нематична, полярна нематична, фази типу «стрункова квасоля», «пончик» та «цибуля». Конічні фази, за винятком неполярної нематичної, є полярними фазами.

1.4 Анізотропія молекул та її роль у властивостях рідких кристалів

Анізотропія – це властивість речовини мати різні характеристики залежно від напрямку, в якому на неї впливають. У випадку рідких кристалів анізотропія пов'язана з формою та розташуванням їхніх молекул.

Молекули рідких кристалів часто мають видовжену форму – схожі на маленькі палички, циліндри або навіть вигнуті палички. Вони не кулясті і не однакові в усіх напрямках, тому мають орієнтацію – тобто «дивляться» певним боком [7]. Це означає, що рідкий кристал по суті складається з молекул, які мають певний порядок у просторі, але при цьому вони можуть рухатися, як у рідині.

Саме ця особливість – анізотропія – дає можливість рідким кристалам проявляти унікальні оптичні властивості. Світло, що проходить через матеріал, взаємодіє з молекулами по-різному в залежності від їх орієнтації. Наприклад, у рідких кристалах відбувається явище подвійного променезаломлення, коли світловий промінь розділяється на два, що рухаються з різною швидкістю і в різних напрямках. Це дозволяє керувати поляризацією світла, змінювати його інтенсивність і колір.

Крім оптики, анізотропія відіграє ключову роль і в електричних властивостях. Коли на рідкий кристал подається електричне поле, молекули починають повертатися, змінюючи свою орієнтацію.

Окрім цього, анізотропія впливає і на механічні властивості – рідкі кристали можуть бути текучими, але в той же час вони зберігають напрямленість і певну жорсткість у напрямку молекул. Це робить їх дуже гнучкими і дозволяє використовувати в різних технологіях, де потрібне поєднання рідкої рухливості і кристалічного порядку.

1.4.1 Алгоритм структурного тензора

Намагаючись оцінити ступінь вирівнювання шару рідкокристалічного кристалу (РК) за зображеннями, отриманими, наприклад, за допомогою поляризаційного мікроскопа, ми намагаємося оцінити напрямок, вздовж якого переміщення (або зсув) зображення призводить до «найменшої» зміни певним кількісно вимірюваним способом. Для цього можна використовувати ряд методів обробки зображень, більшість з яких спираються на певну форму градієнтного аналізу [8].

Дійсно, якщо позначити через $f(x; y)$ інтенсивність зображення в місці розташування $(x; y)$, градієнт дорінює:

$$\nabla f(x; y) = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \equiv [\partial_x f, \partial_y f]^T \quad (1.1)$$

та представляє швидкість зміни інтенсивності вздовж стандартних базисних осей.

Як швидко змінюється інтенсивність вздовж певного напрямку – представленого тут довільним одиничним вектором $\bar{v} = [v_x v_y]^T$ – зазвичай називається спрямованою похідною вздовж \bar{v} і обчислюється шляхом проектування градієнта вздовж \bar{v} використовуючи скалярний добуток:

$$\nabla f(x; y) \times \bar{v} = \partial_x f v_x + \partial_y f v_y = |\nabla f(x; y)| |\bar{v}| \cos(\theta), \quad (1.2)$$

де θ – кут між градієнтом та \bar{v} .

З того часу \bar{v} вважається одиничним вектором, маємо $|\bar{v}| = 1$, а проєкція максимальна, коли $\cos(\theta) = 1$, тобто коли напрямок паралельний градієнту. Таким чином, можна зробити висновок, що градієнт відображає напрямок найбільшої зміни, у нашому випадку інтенсивності. Аналогічно, це означає, що напрямок найменшої зміни знаходиться під прямим кутом до градієнта, для якого $\cos(\theta) = 0$. Ми називаємо це орієнтацією LC.

Підхід полягає у визначенні напрямку зміщення, який визначається одиничним вектором \bar{v} – призводить до найменшої зміни зображення в середньому. Це можна реалізувати, обчисливши середній градієнт $\langle \nabla f \rangle$ по всьому зображенню, а потім намагаючись мінімізувати $|\langle \nabla f \rangle \times v|^2$ з урахуванням обмеження $|\bar{v}|^2 = 1$. Цей тип обмеженої оптимізації можна вирішити, використовуючи підхід множників Лагранжа, сформувавши лагранжіан виду:

$$L(v_x, v_y, \lambda) = |\langle \nabla f \rangle \times v|^2 + \lambda(1 - |\bar{v}|^2), \quad (1.3)$$

де λ – відомий як множник Лагранжа,

лагранжіан L повинен відповідати умовам:

$$\frac{\partial L}{\partial v_x} = \frac{\partial L}{\partial v_y} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad (1.4)$$

Підставляючи $\langle \nabla f \rangle$ у лагранжіані та застосовуючи перші дві умови похідних, отримуємо два рівняння, які найкраще записати в матричній формі як:

$$\begin{bmatrix} \langle (\partial_x f)^2 \rangle & \langle \partial_x f \partial_y f \rangle \\ \langle \partial_x f \partial_y f \rangle & \langle (\partial_y f)^2 \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

Це являє собою задачу на власні значення вигляду $T\bar{v} = \lambda\bar{v}$, де T , зазвичай, називають (усередненим) тензором структури зображення. Цей тензор є усередненим значенням того самого (локального) тензора, обчисленого в кожній точці (на практиці пікселі) зображення. Варто зазначити, що для будь-якого заданого пікселя, тобто за відсутності усереднення, визначник T дорівнює нулю, і, таким чином, два рівняння є лінійно залежними, що дає власні значення:

$$\lambda_{min} = 0; \lambda_{max} = |\nabla f|^2, \quad (1.6)$$

що відповідають відповідно власним векторам:

$$\bar{v}_{min} = [\partial_y f, -\partial_x f]^T; \bar{v}_{max} = [\partial_x f, \partial_y f]^T. \quad (1.7)$$

Легко показати шляхом підстановки, що \bar{v}_{min} відповідає $\nabla f \times \bar{v}_{min} = 0$, і таким чином у напрямку найменших змін, поки \bar{v}_{max} – напрямок градієнта, а отже, і найбільшої зміни. Через процес усереднення ці співвідношення лише приблизно виконуються для тензора структури зображення в цілому, але тим не менш є показовими. Напрямок найменшої зміни пов'язаний з найменшим власним значенням (що відповідає $\lambda_{min} = 0$ вище) та обернено для напрямку найбільшої зміни. Отже, можна визначити орієнтацію (напрямок найменшої зміни), спочатку обчисливши тензор структури зображення, а потім його власні значення та власні вектори за допомогою \bar{v}_{min} забезпечуючи орієнтацію. Дійсно, якщо ми позначимо $\bar{v}_{min} = [a, b]^T$, у нас є орієнтація $\theta = \arctan(a/b)$ (у радіанах). Крім того, ми можемо визначити показник якості s (для оцінки):

$$s = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{\lambda_{max} + \lambda_{min}}, \quad (1.8)$$

який коливається від 0 до 1 залежно від загального ступеня вирівнювання LC на зображенні – вище значення свідчить про більш рівномірне вирівнювання по всьому зображенню. Ми реалізували цей метод за допомогою бібліотеки обробки зображень OpenCV, доступної як для Python, так і для C++.

1.4.2 Перевірка алгоритму структурного тензора

Для перевірки нашого підходу було проведено експеримент з використанням змодельованих зображень, згенерованих за допомогою OpenCV. Усі зображення склалися з темних ліній на світлому фоні, як показано на рисунку 1.6. Кожне зображення містило 200 ліній однакової довжини, випадково розподілених по зображеннях. Усі лінії були в середньому орієнтовані під кутом 45° , але зі зростаючим кутовим розкидом (тобто стандартним відхиленням) навколо цієї середньої орієнтації. Якщо позначити середню орієнтацію як θ та розкид на σ , розподіл ймовірностей, що використовується для генерації зображень, задається як:

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\theta-\bar{\theta})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1.9)$$

Для кожного значення кутового розкиду σ ми згенерували 50 випадкових зображень та обчислили середній бал вирівнювання \bar{s} , як обговорювалося в попередньому розділі.

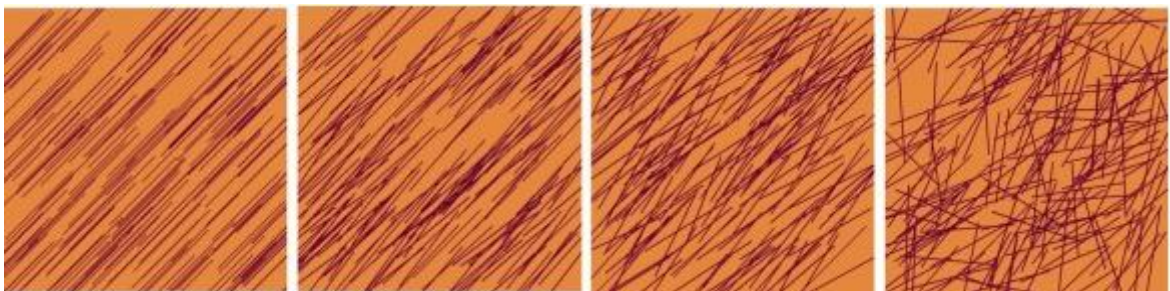


Рисунок 1.6 – Комп'ютерно згенеровані зображення зростаючого безладу

Кожне зображення містить 200 ліній однакової довжини, випадково розподілених по зображенню. Для кожного зображення всі лінії в середньому вирівняні по $\bar{\theta} = 45^\circ$ але зі збільшенням кутового розкиду σ (стандартного відхилення) навколо цього середнього значення. Зліва направо: $\sigma = 0,0^\circ$; $5,0^\circ$; $10,0^\circ$; $30,0^\circ$ (рис. 1.7).

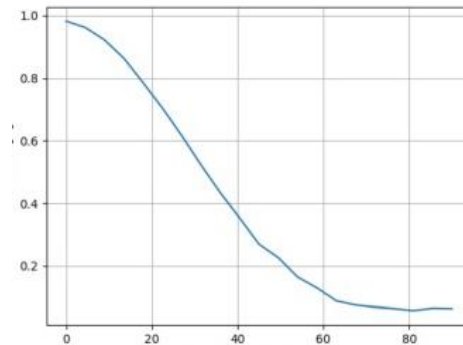


Рисунок 1.7 – Середній бал \bar{s} функції кутового розкиду σ

Ця універсальна крива не залежить від середньої орієнтації $\bar{\theta}$ і було розраховано з використанням середнього значення 50 зображень для кожного значення кутового розкиду.

Висновки до розділу 1. У цьому розділі ознайомилися з основами рідкокристалічних матеріалів – їх унікальною здатністю поєднувати рідкоподібну текучість з впорядкуванням молекул, характерним для кристалів. Розглянули основні типи рідкокристалічних фаз – нематичну, смектичну та холестеричну – і зрозуміли, як їх структура впливає на оптичні і фізичні властивості.

Особливо важливою є анізотропія рідких кристалів – властивість, яка означає, що їх поведінка залежить від напрямку. Саме завдяки анізотропії молекули реагують на прикладені електричні поля, змінюючи свою орієнтацію, а разом із нею і оптичні властивості матеріалу.

Це дає змогу створювати рідкокристалічні дисплеї, які управляються електричним сигналом, швидко змінюють колір або прозорість, що лежить в

основі сучасних екранів телефонів, телевізорів і приладових панелей автомобілів. Розуміння цих фізичних основ і механізмів взаємодії з електричними полями – фундамент для розробки нових рідкокристалічних технологій, покращення якості дисплеїв та створення інших оптичних приладів.

2 РІДКОКРИСТАЛІЧНІ КРИСТАЛИ В СУЧАСНИХ ДИСПЛЕЯХ

2.1 Рідкокристалічні дисплеї та їх особливості

Рідкокристалічний дисплей (LCD) – це сучасна технологія, яка використовується в екранах практично скрізь – від мобільних телефонів до телевізорів і приладових панелей у літаках [9,10]. Сам по собі рідкий кристал світла не випромінює, але вміє дуже цікаво з ним працювати: змінює напрям поляризації світла під дією електричного поля. Щоб картинка стала видимою, потрібне зовнішнє підсвічування або дзеркало – світло проходить крізь дисплей, а молекули рідких кристалів «вирішують», пропустити його чи ні.

LCD-дисплеї можуть показувати як складні зображення (як-от фотографії на екрані комп'ютера чи смартфона), так і прості символи – наприклад, цифри на електронному годиннику. І все це – завдяки одній і тій же базовій технології. У складніших екранах інформація відображається через керування мільйонами маленьких пікселів, а в простіших – через більші сегменти.

Зараз LCD можна знайти всюди: в моніторах, телевізорах, камерах, калькуляторах, годинниках, мобільних телефонах, DVD-програвачах, ігрових приставках та навіть вуличних табло. Вони майже повністю витіснили старі, масивні й енергозатратні електронно-променеві трубки (CRT).

Кожен піксель РК, як правило, складається з шару молекул, вирівняних між двома прозорими електродами, і двома поляризаційними фільтрами (паралельними та перпендикулярними), осі передачі яких (у більшості випадків) перпендикулярно один одному. Без рідкого кристала між поляризаційними фільтрами світло, що проходить через перший фільтр, буде заблоковано другим (схрещеним) поляризатором.

Перед застосуванням електричного поля орієнтація молекул рідкого кристала визначається вирівнюванням на поверхні електродів. У перекрученому нематичному пристрої (TN) напрямки вирівнювання поверхні

на двох електродів перпендикулярні один одному, і тому молекули влаштовуються в спіральній структурі або скручуються.

Якщо прикладна напруга досить велика, молекули рідкого кристала в центрі шару майже повністю розкручені, а поляризація падаючого світла не обертається, оскільки вона проходить через рідкокристалічний шар.

Приклад такого РК-дисплею, що використовується як панель сповіщень зображено на рисунку 2.1.

Контролюючи напругу, що подається через рідкокристалічний шар в кожному пікселі, світло може пропускатись у різних кількостях, що становить різні рівні сірого кольору. Системи кольорових РК-систем використовують таку ж техніку, з кольоровими фільтрами, які використовуються для створення червоних, зелених та синіх пікселів.



Рисунок 2.1 – РК-дисплей, що використовується як панель сповіщень для подорожуючих

Оптичний ефект пристрою TN у стані напруги набагато менший залежить від варіацій у товщині пристрою, ніж у стані напруги. Через це TN відображає низький інформаційний вміст і зазвичай не працює підсвітка між перекресленими поляризаторами, такими, що вони виглядають яскраво, без напруги (око набагато чутливі до варіацій темного стану, ніж яскраве стан).

Оскільки більшість РК-моніторів 2010 року використовуються у телевизорах, моніторах та смартфонах, у них є матриці високої роздільної

здатності масивів пікселів для показу довільних зображень із використанням підсвічування з темним фоном.

Коли зображення не відображається, використовуються різні способи. З цією метою РК-дисплеї TN працюють між паралельними поляризаторами, тоді як на телевизорах IPS є перехрещені поляризатори.

У багатьох додатках рідкокристалічні дисплеї IPS замінили РК-дисплеї TN, зокрема на смартфонах, таких як iPhone .

Якщо електричне поле однієї конкретної полярності застосовується протягом тривалого періоду часу, цей іонний матеріал притягується до поверхонь і погіршується продуктивність пристрою.

Цього можна уникати, застосовуючи змінний струм або змінюючи полярність електричного поля, коли пристрій вирішено, бо реакція рідкокристалічного шару однакова незалежно від полярності застосовуваного поля (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – РК-дисплей зі знятим та повернутим верхнім поляризатором

Уявімо собі простий цифровий годинник або калькулятор. Там на екрані видно лише кілька цифр або символів – нічого складного. Щоб це

працювало, за кожну частинку цифри (той самий знайомий «сегмент») відповідає окремий електрод.

Тобто, якщо потрібно показати цифру «2», певні частинки підсвічуються, інші – ні. Це як мозаїка, де кожен камінчик вмикається окремо, залежно від того, що хочемо побачити.

А от коли ми говоримо про сучасні екрани – смартфони, телевізори, ноутбуки – тут усе набагато цікавіше. Уявіть собі мільйони дрібних світлових «віконць» – пікселів – які можуть вмикатися й вимикатися, змінюючи яскравість і колір.

Вони всі зібрані в акуратну сітку, як у шаховій дошці: зверху проходять рядки, а збоку – стовпчики. І от у кожному перехресті цього «екранного плетива» – піксель, маленький, майже непомітний.

Щоб цей піксель ожив, система швидко активує потрібний рядок і одночасно подає сигнал на відповідні стовпчики – так світло проходить тільки через вибрані клітинки.

Це відбувається так швидко, що ми навіть не встигаємо помітити процес – бачимо вже готову картинку: фотографію, відео або текст (рис. 2.3).

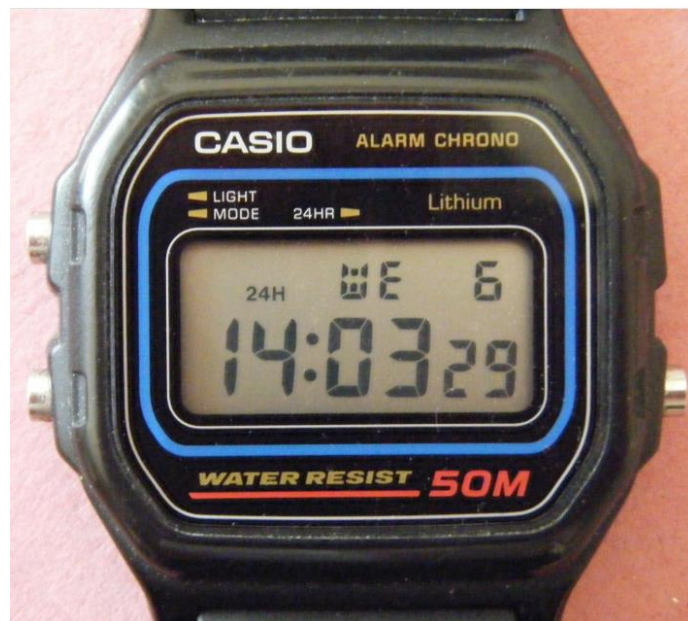


Рисунок 2.3–Цифровий годинник з РК-дисплеєм

2.2 Технології підсвічування РК-дисплеїв

РК-дисплеї самостійно не виробляють світло, тому для створення видимого зображення їм потрібне зовнішнє світло [11]. У пропускаючому типі РК-дисплеїв джерело світла розташоване на задній стороні скляного пакету і називається підсвічуванням .

РК-дисплеї з активною матрицею майже завжди мають підсвічування. Пасивні РК-дисплеї можуть мати підсвічування, але багато з них є відбивними, оскільки вони використовують відбивну поверхню або плівку на задній стороні скляного пакету для використання навколишнього світла.

Трансфлексивні РК-дисплеї поєднують у собі характеристики пропускаючого дисплея з підсвічуванням та відбивного дисплея (рис. 2.4).

Поширені варіанти реалізації технології підсвічування РК-дисплеїв.

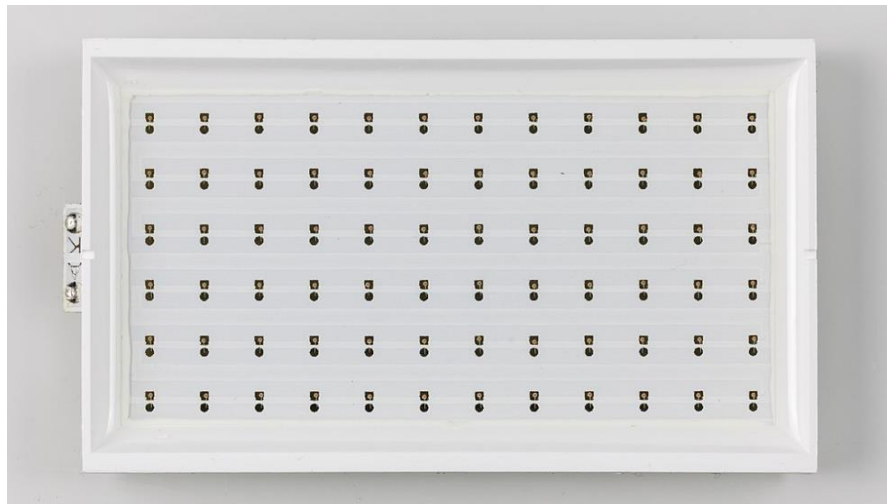


Рисунок 2.4- Світлодіодне підсвічування для портативного РК-пристрою

2.2.1 Масив білих світлодіодів (WLED-масив)

РК-панель підсвічується повним масивом білих світлодіодів, розміщених за дифузором позаду панелі. РК-дисплеї, що використовують цю реалізацію, зазвичай мають можливість затемнювати або повністю вимикати

світлодіоди в темних областях зображення, що відображаються, що ефективно збільшує коефіцієнт контрастності дисплея. Точність, з якою це можна зробити, залежить від кількості зон затемнення дисплея. Чим більше зон затемнення, тим точніше затемнення, з менш помітними артефактами затемнення, які видно як темно-сірі плями, оточені неосвітленими областями РК-дисплея. Станом на 2012 рік ця конструкція найчастіше використовується у висококласних РК-телевізорах з великим екраном.

2.2.2 Люмінесцентна лампа з холодним катодом (CCFL)

РК-панель освітлюється або двома люмінесцентними лампами з холодним катодом, розміщеними на протилежних краях дисплея, або масивом паралельних CCFL за більшими дисплеями.

Розсіювач (виготовлений з акрилового пластику PMMA, також відомий як хвилевод або світловод/направляюча пластина) потім рівномірно розподіляє світло по всьому дисплею. Протягом багатьох років ця технологія використовувалася майже виключно. На відміну від білих світлодіодів, більшість CCFL мають рівномірний білий спектральний вихід, що призводить до кращої колірної гами дисплея. На рисунку 2.5 зображено CCFL – лампи для підсвічування.



Рисунок 2.5 – 18 паралельних CCFL-ламп для підсвічування РК-телевізора

2.2.3 Бокове підсвічування білими світлодіодами (EL-WLED)

РК-панель підсвічується рядом білих світлодіодів, розміщених на одному або кількох краях екрана.

Розсіювач виготовлений або з пластику РММА, або зі спеціального скла. РММА використовується в більшості випадків через його міцність, тоді як спеціальне скло використовується, коли товщина РК-дисплея має першочергове значення, оскільки воно не так сильно розширюється при нагріванні або впливі вологи, що дозволяє використовувати РК-дисплеї товщиною всього 5 мм.

Квантові точки можуть бути розміщені поверх розсіювача як плівка для покращення квантових точок (QDEF, і в цьому випадку їм потрібен шар для захисту від тепла та вологи) або на кольоровому фільтрі РК-дисплея, замінюючи резисти, які зазвичай використовуються.

Станом на 2012 рік ця конструкція є найпопулярнішою в моніторах настільних комп'ютерів [12]. Вона дозволяє створювати найтонші дисплеї. Деякі РК-монітори, що використовують цю технологію, мають функцію під назвою динамічна контрастність, винайдену дослідниками Philips Дугласом Стентоном, Мартінусом Стромером та Адріанусом де Вааном.

За допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) – технології, де інтенсивність світлодіодів підтримується постійною, але регулювання яскравості досягається шляхом зміни часового інтервалу миготіння цих джерел світла з постійною інтенсивністю світла), підсвічування зменшується до найяскравішого кольору, який відображається на екрані, одночасно підвищуючи контрастність РК-дисплея до максимально досяжного рівня, що дозволяє масштабувати коефіцієнт контрастності 1000:1 РК-панелі до різної інтенсивності світла, що призводить до коефіцієнтів контрастності «30000:1», які можна побачити в рекламі на деяких із цих моніторів.

Оскільки зображення на екранах комп'ютерів зазвичай мають повністю білий колір десь у зображенні, підсвічування зазвичай буде на повній

інтенсивності, що робить цю «функцію» здебільшого маркетинговим трюком для комп'ютерних моніторів, проте для телевізійних екранів вона різко збільшує сприйнятий коефіцієнт контрастності та динамічний діапазон, покращує залежність кута огляду та різко зменшує споживання енергії звичайними РК-телевізорами.

2.2.4 RGB-LED масив

RGB-LED масив – це скупчення (масив) світлодіодів, кожен з яких може випромінювати червоне (Red), зелене (Green) та синє (Blue) світло.

Подібний до WLED масиву, за винятком того, що панель підсвічується масивом RGB-світлодіодів. Хоча дисплеї, освітлені білими світлодіодами, зазвичай мають гіршу колірну гаму, ніж дисплеї з підсвічуванням CCFL, панелі, освітлені RGB-світлодіодами, мають дуже широку колірну гаму.

Ця реалізація є найпопулярнішою на професійних РК-дисплеях для редагування графіки. Станом на 2012 рік РК-дисплеї цієї категорії зазвичай коштують понад 1000 доларів. Станом на 2016 рік вартість цієї категорії різко знизилася, і такі РК-телевізори досягли того ж рівня цін, що й попередні категорії на основі 28-дюймових (71 см) електронно-променевих трубок (ЕПТ).

2.2.5 Монохромні світлодіоди

Такі як червоні, зелені, жовті або сині світлодіоди, використовуються в невеликих пасивних монохромних РК-дисплеях, які зазвичай використовуються в годинниках, наручних годинниках та невеликій побутовій техніці.

Сині світлодіоди можна використовувати в РК-дисплеях з квантово-крапковою плівкою або кольоровими фільтрами квантових точок.

2.2.6 Міні-світлодіод

Підсвічування за допомогою міні-світлодіодів може підтримувати понад тисячу зон повномасштабного локального затемнення (FLAD) (рис. 2.6) .

Це забезпечує глибші чорні кольори та вищий коефіцієнт контрастності.

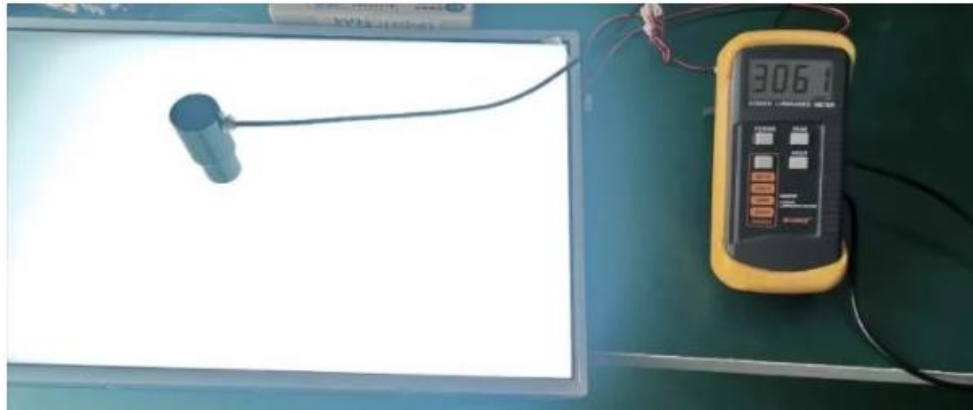


Рисунок 2.6 – РК-дисплей з міні-світлодіодом

Сьогодні більшість РК-екранів розробляються зі світлодіодним підсвічуванням замість традиційного CCFL-підсвічування, при цьому це підсвічування динамічно керується відеоінформацією (динамічне керування підсвічуванням).

Поєднання з динамічним керуванням підсвічуванням, винайденим дослідниками Philips Дугласом Стентоном, Мартінусом Строммером та Адріанусом де Вааном, одночасно збільшує динамічний діапазон системи відображення (також відомої як HDR, телебачення з високим динамічним діапазоном або FLAD , повномасштабне локальне затемнення).

2.3 Пасивно-матричні РК-дисплеї

Монохромні, а пізніше й кольорові пасивно-матричні РК-дисплеї були стандартними в більшості ранніх ноутбуків (хоча деякі використовували

плазмові дисплеї) та оригінальному Nintendo Game Boy до середини 1990-х років, коли кольорова активна матриця стала стандартом для всіх ноутбуків.

Комерційно невдалий Macintosh Portable (випущений у 1989 році) був одним з перших, який використовував активну матрицю (хоча все ще монохромний) .

Пасивно-матричні РК-дисплеї досі використовуються для застосувань, менш вимогливих, ніж ноутбуки та телевізори, таких як недорогі калькулятори (рис. 2.7). Зокрема, вони використовуються на портативних пристроях, де потрібно відобразити менше інформаційного контенту, найнижче енергоспоживання (без підсвічування) та низька вартість, або потрібна читабельність під прямими сонячними променями.

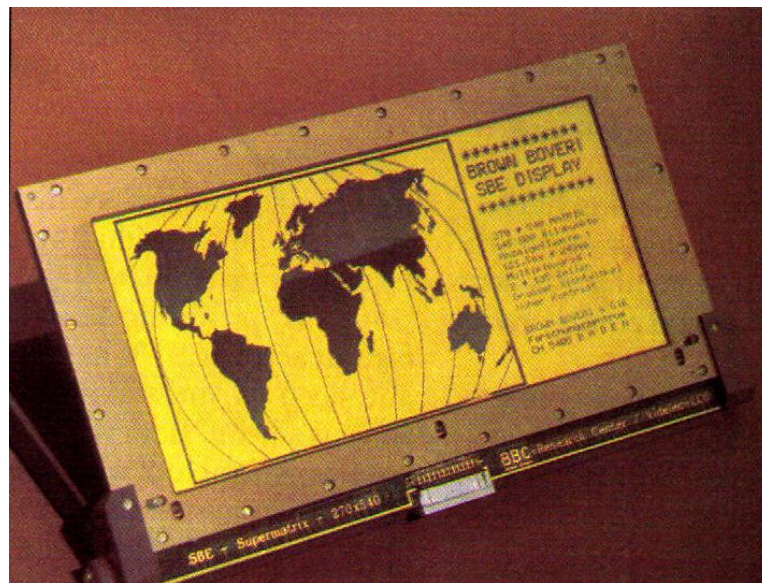


Рисунок 2.7 – Прототип пасивно-матричного STN-РК-дисплея

Дисплеї з пасивно-матричною структурою використовують технологію суперскрученої нематичної STN або двошарової STN (DSTN) (остання з яких вирішує проблему зміни кольору, характерну для першої), а також кольорову STN (CSTN), в якій колір додається за допомогою внутрішнього кольорового фільтра.

РК-дисплеї STN були оптимізовані для пасивно-матричної адресації. Вони демонструють чіткіший поріг характеристики контрастності проти напруги, ніж оригінальні TN-РК-дисплеї. Це важливо, оскільки пікселі піддаються впливу часткових напруг, навіть коли вони не вибрані. Перехресні перешкоди між активованими та неактивованими пікселями необхідно належним чином обробляти, підтримуючи середньоквадратичну напругу неактивованих пікселів нижче порогової напруги, як виявив Пітер Дж. Вайлд у 1972 році, тоді як активовані пікселі піддаються впливу напруги вище порогової.

Для керування такими STN-дисплеями відповідно до схеми керування Альтом і Плешко потрібні дуже високі напруги адресації лінії. Вельцен і де Ваан винайшли альтернативну схему керування (схему керування, що не є схемою керування «Альтом і Плешко»), яка вимагає набагато нижчих напруг, завдяки чому STN-дисплей можна було б керувати за допомогою низьковольтних CMOS-технологій. На рисунку 2.8 зображення дисплея з пасивною матрицею (зверху) та дисплея з активною матрицею(знизу).

Біло-сині РК-дисплеї є STN і можуть використовувати синій поляризатор, або двопронезаломлення, що надає їм їхнього характерного вигляду.



Рисунок 2.8 – Порівняння порожнього дисплея з пасивною матрицею (зверху) та порожнього дисплея з активною матрицею (знизу)

Дисплей з пасивною матрицею можна розпізнати, коли порожній фон має більш сірий вигляд, ніж чіткіший дисплей з активною матрицею, по всіх краях екрана з'являється туман, а зображення на екрані здається тьмяним.

2.4 Тонкоплівковий транзисторний рідкокристалічний дисплей

Тонкоплівковий транзисторний рідкокристалічний дисплей (TFT LCD) – це технологія, яка лежить в основі більшості сучасних екранів у наших телевизорах, смартфонах, ноутбуках і планшетах [13, 14]. Головна ідея тут у тому, що кожен піксель на екрані керується окремим крихітним транзистором – маленьким електронним перемикачем, що дозволяє дуже точно і швидко регулювати яскравість і колір світла.

Саме завдяки цим транзисторам картинка виходить чіткою, з плавними переходами і без розмиття, навіть коли ми дивимось швидкі сцени у відео або граємо в ігри. В основі роботи дисплея лежать рідкі кристали – речовина, яка поєднує властивості рідин і кристалів. У звичайному стані молекули рідких кристалів впорядковані, але під впливом електричного поля вони змінюють своє положення, змінюючи, як світло проходить через них.

Рідкі кристали самі не світяться, тому знизу екран має підсвітку, зазвичай світлодіодну, а зверху й знизу встановлені поляризатори – спеціальні фільтри, які допомагають контролювати напрямок світла, що проходить крізь кристали.

Кожен піксель складається з трьох субпікселів — червоного, зеленого і синього, і кожен з них має свій транзистор і конденсатор, що дозволяє зберігати заряд і підтримувати потрібний колір між оновленнями. На рисунку 2.9 зображено тонкоплівковий транзисторний рідкокристалічний дисплей.

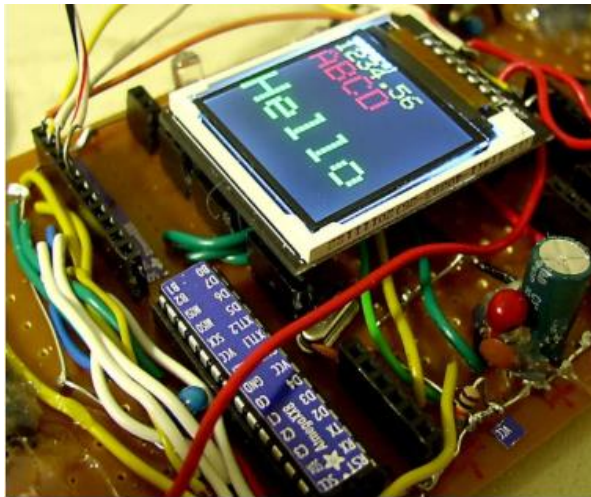


Рисунок 2.9 – TFT LCD дисплей

Такий принцип називають активною матрицею, на відміну від старіших пасивних матриць, де керували цілими рядами або стовпцями, що обмежувало якість і швидкість. Завдяки цій системі ми отримуємо насичені кольори, високу роздільну здатність і мінімальне мерехтіння.

2.5 Скручений нематичний дисплей

Скручений нематичний дисплей (TN-дисплеї) є однією з найстаріших і часто найдешевших технологій рідкокристалічних дисплеїв. TN-дисплеї мають швидкий час відгуку пікселів і менше розмивання, ніж інші типи РК-дисплеїв, такі як IPS-дисплеї, але страждають від поганої передачі кольорів і обмежених кутів огляду, особливо у вертикальному напрямку. При перегляді під кутом, не перпендикулярним до дисплея, кольори зміщуються, іноді аж до повної інвертації.

Сучасні високоякісні споживчі продукти розроблені методи подолання недоліків технології, таких як технології RTC (компенсація часу відгуку/перевантаження). Сучасні TN-дисплеї можуть виглядати значно краще, ніж старіші TN-дисплеї, що випускалися десятиліттями раніше, але загалом TN

має гірші кути огляду та погану передачу кольорів порівняно з іншими технологіями, такими як IPS.

Більшість TN-панелей можуть відображати кольори, використовуючи лише шість бітів на канал RGB, або 18 біт загалом, і не здатні відобразити 16,7 млн кольорів (24-бітний справжній колір), доступні при використанні 24-бітного кольору. Натомість ці панелі відображають інтерпольований 24-бітний колір за допомогою методу дизерингу, який поєднує сусідні пікселі для імітації бажаного відтінку.

Вони також можуть використовувати форму часового дизерингу, яка називається керування частотою кадрів (FRC), яка циклічно перемикається між різними відтінками з кожним новим кадром для імітації проміжного відтінку. Такі 18-бітні панелі з дизерингом іноді рекламуються як такі, що мають «16,2 млн кольорів».

Ці методи імітації кольору помітні для багатьох людей і дуже дратують деяких. FRC, як правило, найбільш помітний у темніших тонах, тоді як дизеринг, здається, робить окремі пікселі РК-дисплея видимими. Загалом, відтворення кольорів та лінійність на TN-панелях погані. TN-дисплей під мікроскопом зображено на рисунку 2.10.

Недоліки в кольоровій гамі дисплея (часто званій відсотком від кольорової гами NTSC 1953) також зумовлені технологією підсвічування. Для старіших дисплеїв зазвичай колірна гама NTSC коливається від 10% до 26%, тоді як інші типи дисплеїв, що використовують складніші формули люмінофорів CCFL або LED, або RGB LED підсвічування, можуть перевищувати 100% колірної гами NTSC, і цю різницю легко помітити людському оку.

Коефіцієнт пропускання пікселя РК-панелі зазвичай не змінюється лінійно з прикладеною напругою, а стандарт sRGB для комп'ютерних моніторів вимагає певної нелінійної залежності кількості випромінюваного світла як функції значення RGB.

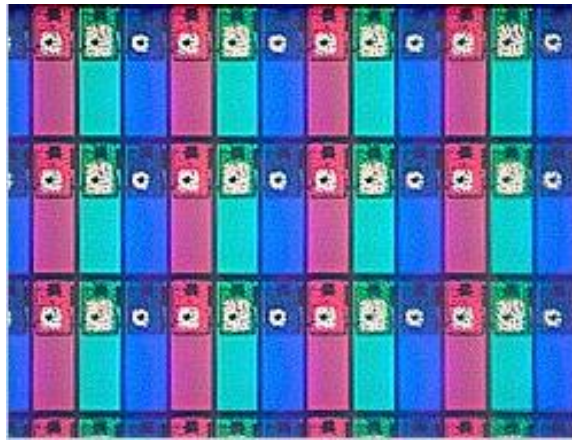


Рисунок 2.10 – TN-дисплей під мікроскопом

2.6 Сучасні тенденції та інновації у сфері рідкокристалічних дисплеїв

Якщо у вас вдома є телевізор, ноутбук чи навіть електронна книжка – швидше за все, ви щодня дивитесь на рідкокристалічний дисплей (LCD). Ця технологія з нами вже давно [15]. Вона надійна, перевірена й доволі доступна – саме тому вона «прижилася» в усьому: від кухонних термометрів до ігрових моніторів.

Але це не означає, що LCD уже все показала, на що здатна.

Сучасний світ технологій – це як нескінченний марафон інновацій. І хоч OLED чи MicroLED зараз на слуху, LCD теж не пасе задніх, а тихо й наполегливо оновлюється, набуває нових форм і можливостей. Приклад сучасного OLED-дисплея було розглянуто на рис. 2.11.

Нові типи LCD – наприклад, з Advanced IPS або PLS-матрицями – мають широкі кути огляду, глибокі кольори, високу контрастність і дуже приємне зображення навіть у сонячну погоду. Особливо це важливо для геймерів, дизайнерів або просто тих, хто любить подивитися фільм із чіткою картинкою.



Рисунок 2.11 – Сучасний OLED-дисплей

Підсвітка – це серце LCD. Якщо раніше дисплеї підсвічувались звичайними лампами (CCFL), то тепер у гру вступають Mini-LED – тисячі крихітних діодів, які точно й рівномірно освітлюють екран. Це означає більше контрасту, глибший чорний і економнішу витрату енергії [10].

А ще – квантові точки (Quantum Dots). Це такі мініатюрні "розумники", які світяться потрібним кольором, коли на них потрапляє світло. Завдяки ним кольори на екрані стають соковитими, живими, справжніми. Згадайте нові телевізори Samsung з QLED – це якраз приклад LCD з квантовими точками.

2.6.1 Електролюмінесцентні телевізори з квантовими точками (QDEL)

Останнім часом все частіше можна почути про нову багатообіцяючу технологію – QDEL, або як її ще називають Nano-LED чи QD-EL. Виробники телевізорів активно досліджують її потенціал і вже готують ґрунт для масового запуску у найближчі роки.

Уявіть собі екран, який світиться без жодного підсвічування. Саме так працюють NanoLED-дисплеї. На відміну від знайомих нам телевізорів з квантовими точками (QLED), де світло створює окрема підсвітка, тут усе по-

іншому: кожна квантова точка світиться сама, коли до неї подають електричний струм.

Ще зарано говорити, чи зможуть ці телевізори стати одними з найкращих одразу, особливо враховуючи те, що це схоже на початок кінця для QD-OLED-телевізорів .

Але ця технологія може потрапити до наших вітальних кімнат швидше, ніж ви можете собі уявити [16]. Нещодавня стаття Business Korea стверджує, що Samsung розробляє цю технологію та прагне випередити TCL. Їхні джерела також припускають, що «китайські фірми наразі випереджають LG Display», хоча це залишається незрозумілим.

Samsung вкладає багато коштів у дослідження та розробки в цей проєкт. За даними Business Korea, компанія залучає три різні сектори, зокрема Visual Display (VD) від Samsung Electornics, Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT) та Samsung Display. Незважаючи на наявну робочу силу, нібито до цього ще «кілька років», і, схоже, TCL не надто відстає.

Таким чином, важко сказати, коли споживачі насправді зможуть очікувати її у своїх вітальнях. На момент написання статті існувало лише три фізичні версії цієї технології, перша з яких була реалізована Sharp за допомогою NanoSys, компанії, яка не лише розробила технологію, але й ввела номенклатуру NanoLED.

2.6.2 Фосфоресцентні органічні світлодіоди (PHOLED-телевізори)

Наразі є тенденція появи телевізорів з NanoLED-дисплеями, але не варто забувати й про іншу багатообіцяючу технологію – PHOLED, а точніше – Blue PHOLED. Про цю технологію говорять з 2005 року, хоча перші реальні приклади з'явилися тільки останні пару років.

Сині PHOLED-дисплеї звучать досить складно, і в них справді є хімія й тонкощі передачі кольору, але спробуємо пояснити простіше – порівнявши їх

із добре знайомими OLED-телевізорами. У OLED є три субпікселі: червоний, зелений і синій (RGB). А LG, наприклад, додає ще й білий, щоб зробити зображення яскравішим — це їхня фішка з панелями WOLED.

Різниця між OLED і PHOLED полягає в тому, що PHOLED використовують фосфоресцентні сині субпікселі, а в багатьох OLED – вони флуоресцентні. Наприклад, у моделях Samsung S95D або LG C4. І тут криється цікава річ: синій колір – найменш енергоефективний. Він дає більше тепла і може спричинити вигорання екрана з часом.

Фосфоресцентні сині субпікселі мають у рази вищу ефективність – приблизно на 25 % кращу, ніж флуоресцентні. Тож, якщо Blue PHOLED нарешті вийдуть з лабораторій і доберуться до масового ринку, це може стати справжнім проривом. На жаль, поки що ця тема трохи відійшла на задній план – на користь NanoLED.

Проте, Компанія Universal Display Corporation (UDC), яка активно розвиває цю технологію, раніше обіцяла запуск уже в 2024 році. За останніми новинами, реальні шанси побачити Blue PHOLED з'являться не раніше 2026 р., а офіційна презентація може відбутися в другій половині 2025.

Звісно, навіть якщо все вдасться – не факт, що ця технологія одразу стане популярною. Потрібен час, аби її почали масово впроваджувати. І навіть тоді все залежатиме від вартості виробництва і від того, чи побачить пересічний глядач реальну різницю в якості зображення або енергоефективності. Але якщо все складеться – майбутнє екранів може стати ще яскравішим.

2.6.3 Дисплеї, надруковані струменевим друком

У США бренд TCL не надто асоціюється з OLED-телевізорами. Насправді, багато хто знає його більше як виробника доступних телевізорів, і це не дивно – тут компанія робить ставку насамперед на Mini-LED.

Нещодавно TCL навіть почала просувати їх як QD-Mini-LED, намагаючись таким чином приєднатися до OLED-сегменту ринку.

А от в Китаї та інших країнах Азії TCL веде зовсім іншу гру: там вона вже має кілька моделей OLED, які виробляє підрозділ CSOT. І найцікавіше – вони експериментують зі струменевим друком, щоб створювати OLED-дисплеї. На рисунку 2.12 зображено дисплей, надрукований за допомогою струменевого друку.

Такі телевізори отримали назву IJP OLED (Ink Jet Printed OLED), і, за попередніми планами, вони мали з'явитися на ринку у 2024–2025 роках.

Хоча поки точних дат запуску немає, деякі прототипи вже показували. Більшість із них – це великі 8К-дисплеї, і компанія, здається, справді серйозно налаштована. TCL починала з невеликих мобільних екранів ще у 2016 році, а вже до 2020-го змогла перейти до більших телевізійних панелей.



Рисунок 2.12 – Дисплей, надрукований за допомогою струменевого друку

Станом на зараз, згідно з інформацією від FlatpanelsHD, завод TCL T8 у Гуанчжоу здатний випускати 55", 65" та 75" OLED-дисплеї саме за допомогою цього нового методу струменевого друку. Ідея полягає в тому, що цей процес має бути дешевшим і ефективнішим, ніж традиційне осадження. Щоправда, на практиці зниження вартості поки що не сталося так швидко, як компанія очікувала.

І хоча про ці IJP OLED-телевізори ще зарано говорити як про щось масове, їхні потенційні характеристики вражають. TCL обіцяє до 2000 ніт пікової яскравості і охоплення до 90 % колірному простору Rec.2020. Для порівняння, LG G4, який у 2023 році отримав від критиків майже ідеальні оцінки, показав близько 72,9 % Rec.2020 і досяг 1476 ніт яскравості на 10 % екрана. Тобто, на горизонті – справжній прорив.

Проте, швидше за все, в США (і в інших країнах) ці телевізори з'являться ще не скоро. Навіть якщо компанія вирішить їх випустити – ціна на такий телевізор, скоріше за все, буде просто космічною. Поки що IJP OLED-дисплеї TCL реально використовуються лише у вузьких нішах, наприклад, у медичних моніторах, де бюджети на подібні речі зовсім інші.

Втім, чесно кажучи, шанс побачити ці технології у вільному продажу найближчим часом – майже нульовий. Проблема тут не тільки в тому, що на масове виробництво таких новинок потрібно час – усе впирається в величезні витрати, які супроводжують їхню розробку. Досить згадати, скільки років намагаються вивести на ринок сині PHOLED-дисплеї – і поки що без особливих результатів.

Колись здавалося, що телевізори MicroLED стануть наступним великим кроком уперед, справжньою революцією після OLED. Але, як бачимо, цього не сталося. Навіть попри гучний реліз гігантського 136-дюймового MicroLED від Hisense, провідні гравці – Samsung і LG – ще у 2024 році заявили про перегляд своїх стратегій щодо MicroLED. Це досить тривожний сигнал для шанувальників цієї технології.

Якщо поглянути на всі згадані інновації, то найбільше надії викликають QDEL або NanoLED-дисплеї. Сині PHOLED усе ще залишаються радше фантазією, ніж реальністю, а IJP OLED, схоже, орієнтовані або на 8K-дисплеї, або на спеціалізоване застосування в медичній сфері – переважно в Азії.

Тому, якщо вже говорити про майбутнє, саме NanoLED виглядають найближчими до реального втілення. У них є чимало переваг: потенційно

нижча вартість, вища енергоефективність, а також можливість позбутися підсвічування, що дає чудову якість зображення.

Та поки що залишається тільки чекати й спостерігати, яка з цих технологій першою "постукає у двері" наших віталень. І хоча терміни можуть затягнутись, очевидно одне — телевізори майбутнього будуть не тільки розумнішими, а й значно кращими за все, що ми мали раніше.

Висновки до 2 розділу. У другому розділі було розглянуто рідкокристалічні дисплеї – ті самі, що нас оточують буквально всюди: у смартфонах, ноутбуках, телевізорах.

Рідкокристалічні матеріали самі по собі – справжнє диво природи. Вони об'єднують властивості рідин і твердих тіл, утворюючи унікальний стан речовини. Саме ця подвійність дала змогу створити дисплеї, які дуже точно керують світлом. Уявіть собі – ніби художник пензлем, ці матеріали під дією електричного поля змінюють напрямок і поляризацію світла, створюючи зображення, які ми бачимо на екрані.

Було розглянуто простіші дисплеї – пасивно-матричні, і про більш складні TFT-моделі, що використовуються в сучасних пристроях. Саме розвиток тонкоплівкових транзисторів зробив можливим появу екранів із високою роздільною здатністю, швидкою реакцією та зручними кутами огляду. Завдяки цьому наша взаємодія з технікою стала приємнішою, а зображення – чіткішим і живішим.

Сьогоднішні тенденції розвитку РК-дисплеїв надихають. Вчені й інженери не зупиняються – вони постійно шукають нові матеріали, вдосконалюють структури пікселів, оптимізують підсвітку. Мета – ще краща яскравість, ще глибший чорний, ширша палітра кольорів (наприклад, за стандартом Rec.2020) і зображення, комфортне для очей.

Це не лише приклад прикладної науки. Це ще й фундаментальні дослідження: як поведуться анізотропні матеріали в електричних полях, як змінюються фази рідкокристалічних сполук, як знизити енергоспоживання без втрати якості. Це справжня наука в дії.

Якщо подивитись на все це з простої, людської точки зору – це справді захопливо. Те, що ще не так давно існувало лише у вигляді складних експериментів у лабораторіях або здавалося фантастикою, сьогодні – звична частина нашого життя. РК-дисплеї всюди поруч із нами: вдома, в школі, на роботі, у транспорті, навіть у лікарні. Вони стали невидимими помічниками, які щодня допомагають нам читати новини, працювати, вчитися, спілкуватися з рідними чи просто дивитися улюблений фільм.

І навіть зараз, коли на ринку з'являються нові рішення – скажімо, OLED — це не означає, що рідкокристалічні дисплеї втрачають актуальність. Вони продовжують розвиватися, адаптуватися, змінюватися – і все ще мають чим здивувати. Вони продовжують змінюватися, вдосконалюватися і відкривати перед нами нові можливості.

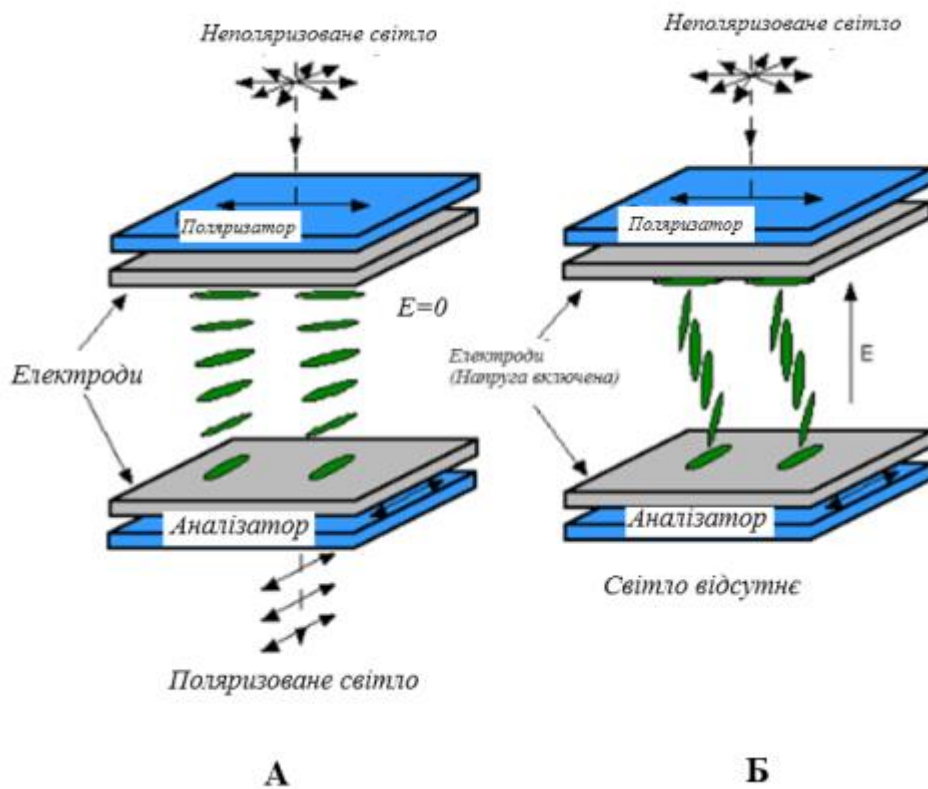
Бо наука – це не щось далеке чи складне. Це те, що вже тут, поруч із нами. Те, що працює для нас щодня і допомагає будувати світ, у якому хочеться жити.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІДКИХ КРИСТАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ COMSOL MULTIPHYSICS

3.1 Будова РК-дисплею

Типовий РК-дисплей складається з наступних компонентів:

- а) дві підкладки зверху та знизу пристрою, які зазвичай виготовлені зі скла або пластику;
- б) електроди, що наносяться на поверхню підкладки;
- в) шар рідкого кристала посередині двох електродів;
- г) поляризаційні фільтри, що дозволяють контролювати вхід та вихід світла (рис. 3.1).



- а) електричне поле вимкнено; б) електричне поле ввімкнено.

Рисунок 3.1 – Схематичне зображення роботи простого рідкокристалічного дисплея

РК-дисплей проєктує зображення від джерела світла, яке проходить через поляризатор і нижню підкладку, в шар рідких кристалів. Поляризатор обмежує кількість світла, що проходить, до однієї площини, що призводить до плоскої поляризації світла.

Молекули рідких кристалів вирівнюються вздовж поверхні підкладок шляхом фізичного тертя, де тертя в різних напрямках може призвести до різної орієнтації в комірці рідких кристалів. До зразка рідких кристалів прикладається достатньо висока напруга, щоб змінити орієнтацію молекул і дозволити світлу досягти верхньої підкладки.

Перед другим поляризаторним фільтром встановлюється кольоровий фільтр для створення кольорів і зображень, які видно на РК-дисплеї. Ці зображення складаються з масиву пікселів, де кожен окремий піксель можна дуже швидко вмикати або вимикати, створюючи рухоме кольорове зображення.

3.2 Основні рівняння для моделювання

3.2.1 Рівняння Еріксена-Леслі

Теорія Еріксена-Леслі для нестисливого (тобто з постійною густиною рідини) нематичного рідкокристалічного матеріалу в ізотермічному випадку складається із законів збереження з механіки континууму маси, кутового моменту та лінійного моменту, з рівняннями для розв'язання щодо орієнтації директора, швидкості рідини та тиску.

Основні закони:

Закон збереження маси:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2.1)$$

Збереження моменту імпульсу:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \omega_F}{\partial (\partial_i \theta_\alpha)} \right) - \frac{\partial \omega_F}{\partial \theta_\alpha} - \frac{\partial D}{\partial \theta_\alpha} = 0 \quad (\alpha = 1, 2). \quad (2.2)$$

3.2.2 Рівняння Максвелла

Для моделювання ефектів, спричинених електричним полем у нематиках, рівняння Еріксена-Леслі пов'язані з рівняннями Максвелла. За відсутності будь-яких вільних зарядів, що є поширеним припущенням моделювання, рівняння для електричного поля мають вигляд:

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0, \quad e_i \epsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j} = 0. \quad (2.3)$$

3.3 Результати 2D-моделювання COMSOL

Числові розв'язки рівнянь Еріксена-Леслі для орієнтації директора, швидкості рідини та тиску, а також рівнянь Максвелла для електричного поля для 2D-моделі нематичного рідкого кристала, затиснутого між двома підкладками, з залежним від часу сигналом напруги (рис. 3.2), що подається на верхній електрод, показано в наступних дослідженнях для різного часу [17].

На рисунках (3.3–3.5) (графік А) зображена зміна кута директора вздовж шару рідкого кристала, коли сигнал напруги прикладається до верхнього електрода.

На рисунках (3.3–3.5) (графік Б) зображена зміна величини швидкості рідини через шар рідких кристалів, коли сигнал напруги, як показано на Анімації 1, прикладається до верхнього електрода.

На рисунках (3.3–3.5) (графік В) зображена зміна електричного потенціалу на шарах рідкого кристала та полімерного ізоляційного матеріалу і під час подачі сигналу напруги на верхній електрод.

На рисунку 3.3 зображено початковий стан графіків при часі $T = 0,01$, їх стартова точка від якої вони потім почнуть змінюватися.

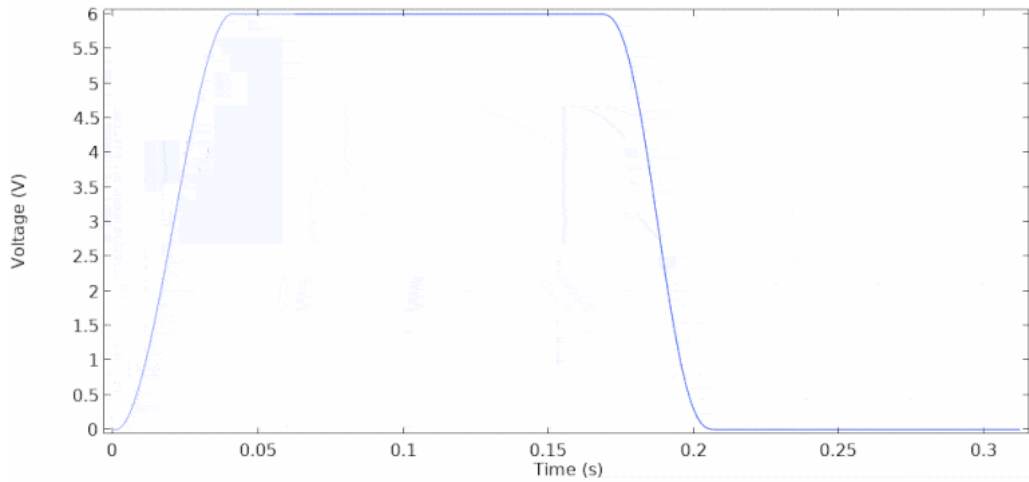


Рисунок 3.2 – Залежний від часу сигнал напруги, що подається на верхній електрод рідкокристалічного пристрою

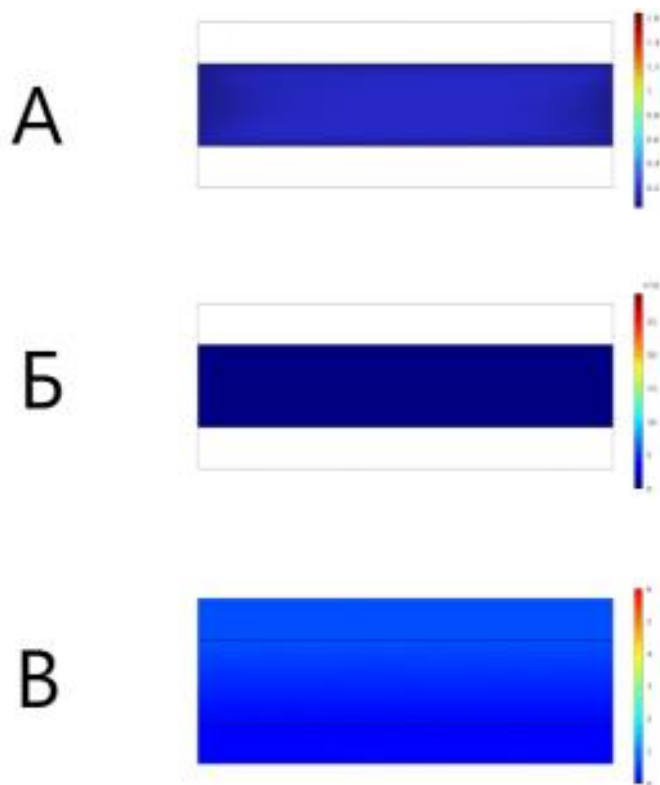


Рисунок 3.3 – Результат роботи програми при $T = 0,01$ с

На момент часу $T = 0,06$ с після подачі напруги (рис. 3.4):

а) молекули рідкого кристала вже почали переорієнтовуватися у напрямку поля (графік А);

б) швидкість руху рідини ще майже не змінилася (графік Б), бо потрібен час для розвитку потоку;

в) електричне поле вже сформоване і діє через увесь шар (графік В).

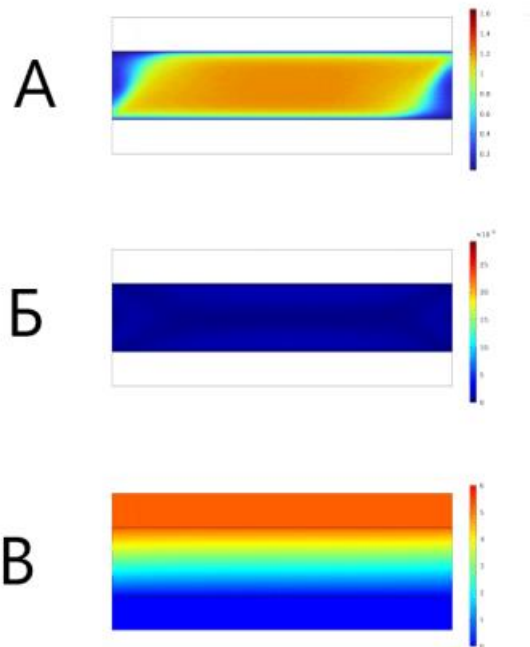


Рисунок 3.4 – Результат роботи програми при $T=0,06$ с

На момент часу $T = 0,1$ с після подачі напруги (рис. 3.5) :

а) молекули рідкого кристала значно переорієнтувалися у напрямку дії електричного поля (графік А). Це видно зі зміни кута директора в центральній частині шару, де спостерігається максимальне відхилення молекул. Система вже активно реагує на електричне поле, і структура рідкого кристала наближається до нового рівноважного стану;

б) швидкість руху рідини зросла, але ще не досягла повного розвитку потоку (графік Б). В центрі шару починають формуватися помітні швидкості, однак вони ще не максимальні. Це типовий проміжний етап розвитку електрогідродинамічного потоку;

в) електричне поле залишається стабільним і повністю охоплює увесь шар рідкого кристала та ізоляційний матеріал (графік В). Потенціал вже встановився, підтримуючи орієнтацію молекул і ініціюючи течію рідини.

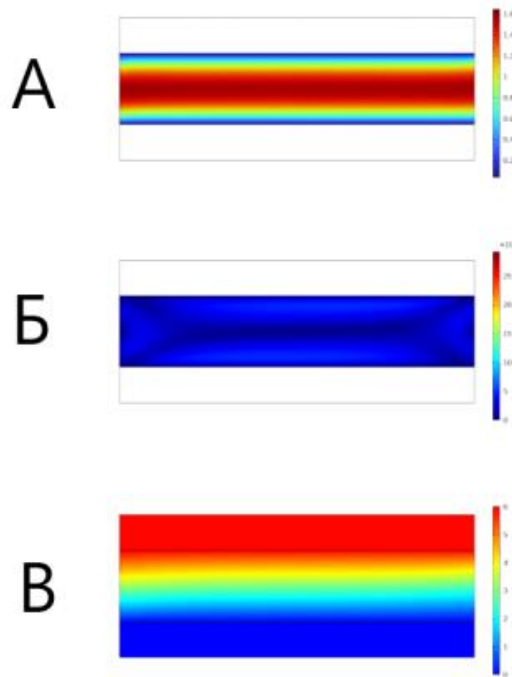


Рисунок 3.5 – Результати роботи програми при $T=0,1$ с

Висновки до 3 розділу. У цьому розділі було проведено математичне моделювання поведінки нематичних рідких кристалів під дією електричного поля з використанням програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. На основі рівнянь Еріксена-Леслі та рівнянь Максвелла змодельовано динаміку орієнтації молекул, розвиток течії рідкого кристала та розподіл електричного потенціалу у двовимірній постановці задачі.

Отримані результати свідчать, що при подачі напруги на верхній електрод відбувається поступове переорієнтування молекул рідкого кристала у напрямку електричного поля, що є ключовим механізмом роботи РК-дисплеїв. Електричне поле швидко охоплює весь шар рідкого кристала, викликаючи зміну орієнтації директора, яка, у свою чергу, впливає на

оптичні властивості пікселя дисплея. Розвиток швидкості рідини має затримку у часі, що пов'язано з інерційністю системи і в'язкісними ефектами.

Модель наочно демонструє послідовність процесів, що відбуваються в рідкокристалічному шарі при зміні електричної напруги, і може бути використана для оптимізації структури дисплеїв та підвищення їх енергоефективності та швидкодії.

ВИСНОВКИ

У процесі написання кваліфікаційної роботи було здійснено комплексне дослідження рідкокристалічних пристроїв відображення інформації, що сьогодні є невід'ємною частиною нашого повсякденного життя. Опрацьовано значну кількість наукових і технічних джерел, що дало змогу не лише систематизувати наявні знання з теми, а й сформувати цілісне уявлення про фізичні процеси, які лежать в основі роботи РК-дисплеїв, їх конструкцію, експлуатаційні характеристики та напрями подальшого розвитку.

Основна мета дослідження – проаналізувати принципи функціонування та конструктивні особливості рідкокристалічних пристроїв відображення інформації – була досягнута. У ході роботи були розв'язані такі ключові завдання:

Розглянуто природу рідких кристалів – матеріалів із унікальними властивостями, які поєднують характеристики рідин і твердих тіл.

Вивчено анізотропні властивості молекул рідких кристалів, їх реакцію на електричне поле та роль у модуляції світлового потоку.

Досліджено принципи поляризації світла, що лежать в основі роботи РК-дисплеїв.

Проаналізовано конструкції різних типів РК-дисплеїв – від простих пасивно-матричних до сучасних тонкоплівкових транзисторних (TFT) дисплеїв.

Вивчено методи підсвічування (CCFL, LED, Edge-Lit, Full Array) та їхній вплив на енергоспоживання, яскравість і якість зображення.

Також було розглянуто свіжі тренди. Інженери не сидять склавши руки: експериментують із новими фазами, зокрема Blue Phase LC, піднімають контрастність, розганяють частоту оновлення, щоб рухи на екрані виглядали ще плавніше, і вдосконалюють кут огляду завдяки IPS, MVA, PLS. Усе це

робиться з однією метою – щоб картинка була максимально живою, а батарея трималась довше завдяки «розумному» підсвічуванню.

Також чесно порівняли РК-панелі з OLED. Так, OLED дає «бездонний» чорний, але саме РК-дисплеї залишаються чемпіонами доступності й витривалості, особливо коли потрібна висока яскравість або екран працює по багато годин щодня.

Усе це можливе не без командної гри фізиків, електроніків, хіміків і матеріалознавців. Їхні міждисциплінарні відкриття тримають РК-технології у постійному русі вперед.

Сьогодні РК-дисплеї – це серце більшості телевізорів, ноутбуків, смартфонів, приладів у лікарнях і навіть панелей у салоні літака.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Труш В.І., Зубрицький А.І. Фізика рідких кристалів: навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ, 2018. 196 с.
2. Патlachук О.В. Оптика рідких кристалів і пристрої на їх основі. Львів: Видавництво ЛНУ ім. Івана Франка, 2020. 176 с
3. Кухтін С.М. Оптоелектроніка. Частина 2: ХНУРЕ, 2016 – 292 с.
4. Liquid crystal URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal (дата звернення 10.05.2025).
5. Козуб, В.В. Оптика рідких кристалів. Харків: Видавництво ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2017. 210 с.
6. Палій, Ю.М. Рідкі кристали та їх використання: навчальний посібник. Івано-Франківськ: ПНУ ім. В. Стефаніка, 2018. 132 с.
7. Kuhtin S.M., Hnatenko O.S. Fibre-Optic Temperature Sensor Using Bragg Structure. Sumy State University, 2023 URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/93376>(дата звернення 17.05.2025)
8. Electrically-driven modulation of flow patterns in liquid crystal microfluidics URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-53436-y>(дата звернення 17.05.2025)
9. Беляєв А.І. Рідкокристалічні дисплеї: принципи дії та застосування. Київ: Наукова думка, 2019. 248 с.
10. Liquid-crystal display URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid-crystal_display (дата звернення 12.05.2025).
11. Lueder E. Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects. Wiley, 2010. 456 с.
12. Blue Phase Liquid Crystals for Display Applications // Journal of the Society for Information Display. 2020. Vol. 28. No 3. P. 167–175
13. Yang D.-K., Wu S.-T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. 2nd ed. Wiley, 2014. 416 с.

14. TFT LCD URL: https://en.wikipedia.org/wiki/TFT_LCD (дата звернення 10.05.2025).
15. Козак С.О., Драчук С.О. Рідкокристалічні екрани у техніці: сучасний стан та перспективи розвитку // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка. 2021. № 86. С. 43–52.
16. These 3 TV technologies are vying to replace OLEDs in the next decade. URL: <https://www.tomsguide.com/tvs/these-3-tv-technologies-are-vying-to-replace-oleds-in-the-next-decade> (дата звернення 12.05.2025).
17. Mathematical Modelling of Liquid Crystals Using COMSOL Multiphysics URL: <https://xiengineering.com/mathematical-modelling-of-liquid-crystals-using-comsol-multiphysics/> (дата звернення 02.06.2025).