

ЗАСОБИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРОННІ ДИСПЛЕЇ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ЗАСОБИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРОННІ ДИСПЛЕЇ

Навчальний посібник

За редакцією З. Ю. Готри

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 621.397 (075)

ББК 32.94я73

3-36

Автори:

З. Ю. Готра, В. П. Кожем'яко, З. М. Микитюк,

С. В. Павлов, Г. Д. Дорошенков

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих технічних навчальних закладів.
Лист № 1/11-6779 від 08.05.2014 р.

Рецензенти:

Л. І. Тимченко, доктор технічних наук, професор (ДЕТУТ)

В. С. Осадчук, доктор технічних наук, професор (ВНТУ)

Я. М. Николайчук, доктор технічних наук, професор (ТНЕУ)

3-36 Засоби відображення інформації. Електронні дисплеї : навчальний посібник / [З. Ю. Готра, В. П. Кожем'яко, З. М. Микитюк та ін.] . – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 162 с.

ISBN 978-966-641-590-8

В навчальному посібнику розглянуто сучасні електронні дисплеї, а саме: рідкокристалічні, плазмові, електрофорезні, електрохромні тощо. Наведені їх базові структури, конструкції та основні параметри. Описані фізичні основи їх функціонування. Проведено аналіз та розглянуто схемотехнічні рішення для керування електронними дисплеями та рекомендації по їх застосуванню в сучасній електронній техніці.

Призначений для студентів спеціальності “Лазерна та оптоелектронна техніка”.

УДК 621.397 (075)

ББК 32.94я73

ISBN 978-966-641-590-8

© З. Готра, В. Кожем'яко, З. Микитюк, С. Павлов, Г. Дорошенков, 2014

Зміст

Передмова	4
Скорочення.....	5
Розділ 1 Класифікація та основні параметри електронних дисплеїв.....	7
Розділ 2 Дисплеї на електронно-променевих трубках.....	14
Розділ 3 Інформаційні дисплеї на світло діодах.....	27
Розділ 4 Рідкокристалічні дисплеї.....	42
Розділ 5 Дисплеї на органічних світлодіодах (OLED).....	74
Розділ 6 Плазмові дисплеї.....	97
Розділ 7 Дисплеї на польовій емісії (FED).....	104
Розділ 8 Електрохромні дисплеї.....	118
Розділ 9 Електрофорезні дисплеї.....	127
Розділ 10 Електронний папір.....	134
Розділ 11 Архітектура TFT LCD панелей для моніторів та ноутбуків.....	140
Контрольні запитання	156
Література	160

ПЕРЕДМОВА

Електронні засоби для візуального відтворення інформації, без яких неможливо уявити сучасну електроніку, широко використовуються в різних галузях науки, техніки та в побуті. Найбільш розповсюдженими сьогодні є рідкокристалічні та плазмові дисплеї, а також дисплеї на органічних та неорганічних світлодіодах. Крім того, інтенсивно ведуться роботи над створенням на серійному виробництві електрохромних, електрофорезних дисплеїв та дисплеїв з використанням електронної емісії як плоского аналога електронно-променевих трубок. Неможливо уявити функціонування сучасних аеропортів, вокзалів, стадіонів і рекламних щитів без використання інформаційних табло на основі світловипромінювальних діодів.

В основі функціонування дисплеїв лежать різноманітні фізичні та хімічні явища, зокрема електрооптичні ефекти в рідких кристалах, процеси в газовому розряді, електрохромні та електрофорезні ефекти, явища електролюмінесценції в неорганічних та органічних напівпровідниках.

Під час написання навчального посібника «Електронні дисплеї» необхідно було показати суть вищезгаданих ефектів з метою розуміння принципів роботи сучасних дисплеїв. Глибокий аналіз цих ефектів наведено у низці монографій вітчизняних і зарубіжних авторів, однак він потребує певної підготовки читача в галузі фізики цих явищ. Автори розглядають матеріал у доступному форматі, достатньому для розуміння принципу роботи дисплеїв.

Навчальний посібник складається з одинадцяти розділів. Перший розділ присвячено класифікації сучасних електронних дисплеїв. Розглядаються основні параметри дисплеїв та методи формування зображень у них. У другому розділі описано дисплеї на електронно-променевих трубках. Детально розглянуто фізичні принципи фокусування електронного променя неоднорідним магнітним полем та магніто-відхиляючі системи. У третьому розділі розглядаються інформаційні дисплеї на неорганічних світлодіодах (інформаційні табло), принцип формування зображення на RGB-світлодіодах, технічні характеристики світлодіодних модулів як складової частини інформаційних табло. У четвертому розділі, присвяченому рідкокристалічним дисплеям, описано історію їх створення, а також розглянуто класифікацію, фізичні властивості та електрооптичні ефекти в рідких кристалах. Дисплеї на органічних світлодіодах (OLED), фізичні основи їхньої роботи, параметри та характеристики розглядаються в п'ятому розділі. У

шостому розділі наведено основні параметри та характеристики плазмових дисплеїв, показано їхні переваги і недоліки. Описано принцип роботи плазмових комірок та методи формування зображення в них. У наступних трьох розділах розглядаються дисплеї, що перебувають на стадії розробки і ще не знайшли широкого застосування: дисплеї на польовій емісії, електрохромні та електрофорезні дисплеї. Дисплеї, що використовуються в електронних книгах (електронний папір) описуються в десятому розділі. Останній, одинадцятий розділ присвячено архітектурі дисплеїв.

Навчальний посібник призначений для студентів та аспірантів, які спеціалізуються в галузі електронної техніки, зокрема оптоелектронної.

Скорочення

CR	–	коефіцієнт контрасту (contrast ratio)
C_M	–	нормалізований коефіцієнт контрасту (contrast modulation):
LC	–	рідкий кристал (liquid crystal)
LCD	–	рідкокристалічний дисплей (liquid crystal display)
TFT	–	тонкоплівковий транзистор
PMLCD	–	LCD з пасивною матрицею
AMLCD	–	LCD з активною матрицею
ITO	–	оксид олова та індію (станат окису індію)
BTN LCD	–	бістабільний твіст-нематичний LCD
FLC	–	сегнетоелектричний рідкий кристал (ferroelectric liquid-crystal)
CRT	–	електронно-променева трубка
OLED	–	органічний світлодіод
SMOLED	–	OLED на низькомолекулярних сполуках
POLED	–	OLED на полімерах
HTL	–	дірково-провідний шар
ETL	–	електронно-провідний шар
PSS	–	полістиренсульфонат
CEF	–	фільтр підсилення контрасту
LTPS	–	технологія низькотемпературного полікремнію
PEDOT	–	поліетилендіокситіюфін
EL	–	електролюмінісцентні пристрої

TFEL	–	тонкоплівкові електролюмінісцентні дисплеї
PDP	–	плазмова панель
AC PDP	–	плазмова панель змінного струму
DC PDP	–	плазмова панель постійного струму
DBD	–	діелектричні перегородки (dielectric barrier discharges)
ACM PDP	–	плазмова панель змінного струму матричної структури
ACC PDP	–	плазмова панель змінного струму компланарної структури
ЕПТ	–	електронно-променева трубка
FED	–	дисплей польової емісії (field emission display)
HDTV	–	телебачення високої роздільної здатності
SED	–	дисплей поверхневої емісії (surface conduction electron emitter display)
CNT FED	–	дисплей польової емісії з катодом з вуглецевих нанотрубок (Carbon NanoTube FED)
FPD	–	плоскопанельний дисплей
EC Display	–	електрохромний дисплей (electrochromic)
EPD	–	електрофорезний дисплей (electrophoretic)

Розділ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОННИХ ДИСПЛЕЇВ

Дисплей (від англ. display – показувати) – електронний засіб для відтворення інформації. Дисплеї поділяються на світловипромінювальні та світломодульовальні [1-4]. На рис. 1.1 подано класифікацію сучасних електронних дисплеїв.

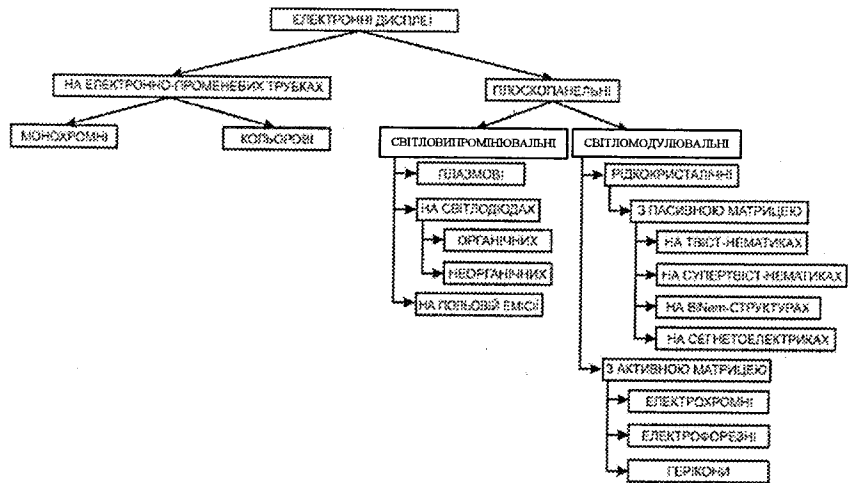


Рисунок 1.1 – Класифікація електронних дисплеїв

Розглянемо основні параметри електронних дисплеїв.

Яскравість. Яскравість дисплея характеризується силою світла, випромінюваного екраном. Вона вимірюється в канделах на квадратний метр ($\text{кд}/\text{м}^2$), або рідше у фут-ламбертах (фут·лб) чи в нітах ($1 \text{ ніт} = 1 \text{ кд}/\text{м}^2$; $1 \text{ фут·лб} = 3,426 \text{ ніт}$). Яскравість в $1 \text{ кд}/\text{м}^2$ відповідає яскравості джерела світла в 1 канделу із поверхні в 1 м^2 по нормалі до неї.

У зображенні розрізняють максимальну, мінімальну та середню яскравість. Максимальна яскравість відповідає найяскравішим деталям зображення. Середня яскравість зображення містить інформацію про середню яскравість відтвореного зображення.

Мінімальна яскравість – це, по суті, яскравість поверхні дисплея, який не світиться. Це залишкова яскравість за рахунок зовнішнього освітлення.

Контраст. Контраст – це властивість межі розділу світло – темрява двох чи більшої кількості частин поля зору, що спостерігаються одночасно.

но. Він є важливою характеристикою електронних дисплеїв. Розрізняють яскравісний, відносний та миттєвий контрасти.

Яскравісний контраст. Яскравісний контраст – це відношення максимальної (L_H) до мінімальної (L_L), яскравості, яку здатен відтворити дисплей. Цю величину також часто називають коефіцієнтом контрасту (CR), але, по суті, це коефіцієнт яскравості. Значення коефіцієнта контрасту використовують для характеристики контрасту пристроїв з електронними дисплеями. Яскравісний контраст (коефіцієнт контрасту) є безрозмірною величиною та часто позначається через відношення значення коефіцієнта контрасту до одиниці (наприклад, $CR = 900:1$).

$$CR = \frac{L_H}{L_L}, 1 \leq CR \leq \infty.$$

Значення коефіцієнта контрасту $CR = 1$ означає відсутність контрасту.

Контраст також можна виразити за допомогою нормалізованого коефіцієнта контрасту (C_M):

$$C_M = \frac{L_H - L_L}{L_H + L_L}, 0 \leq C_M \leq 1.$$

$C_M = 0$ означає відсутність контрасту.

Для електронних дисплеїв також застосовують визначення контрасту як:

$$K = \frac{L_H - L_L}{L_H}, 0 \leq K \leq 1.$$

При $K = 0$ контраст відсутній, максимально можливий контраст $K_{max} = 1$.

Відносний контраст. Контраст, що вимірюється за наявності зовнішнього освітлення, називають відносним контрастом. Відносний контраст, або контрастність, визначається відношенням

$$(B_c - B_m) / (B_c + B_e)$$

де B_c і B_m – відповідно яскравості найсвітлішої та найтемнішої ділянок зображення, B_e – яскравість зовнішнього світла, що падає на екран.

Миттєвий контраст. Коли зображення на екрані швидко змінюється, оптичний стан дисплея може не встигати стабілізуватись, у цьому разі спостерігається помітний миттєвий контраст, менший за статичний.

Шкала сірого. Градації яскравості, або шкала сірого, визначаються як кількість кроків, що змінюють інтенсивність випромінювання в $\sqrt{2}$ раз.

Насиченість і тон кольору. Відтворення кольору, насиченість і тон

кольору – це найважливіші характеристики кольорового зображення. Достовірність відтворення кольору визначається яскравістю та контрастом; чистотою кольору екрана; чистотою кольору та спектральними характеристиками люмінофорів, кольорових фільтрів.

Тон кольору – це ознака кольору, що сприймається суб'єктивно та дає змогу віднести колір за схожістю до того чи іншого спектрального кольору. Чисельно його визначають *домінуючою довжиною хвилі*, тобто довжиною хвилі монохроматичного випромінювання, яке в суміші з білим дає потрібний колір.

Насиченість – це ознака кольору, що виражає ступінь його відмінності від білого кольору тієї самої яскравості. Насиченість кольору залежить від яскравості та контрасту. Збільшення яскравості чи контрасту зменшує насиченість кольорового зображення. Зовнішнє засвічування також знижує її.

Чисельно насиченість визначається *чистотою кольору* p , яка дорівнює відношенню яскравості спектрального кольору L_λ , що входить до суміші, до повної яскравості суміші L :

$$p = \frac{L_\lambda}{L} = \frac{L_\lambda}{L_\lambda + L_6},$$

де L_6 – яскравість білого кольору, що входить до суміші.

Спектральний розподіл випромінюваного світла повинен відповідати спектральній чутливості ока людини. Тривале спостереження деяких кольорів, зокрема червоного, приводить до втоми.

Швидкодія. Швидкість відгуку визначає, для яких застосувань придатний дисплей. Очевидно, що для плоскопанельного телевізійного екрана необхідна швидкість відгуку близько 1 мкс для послідовної адресації кожної комірки. Проте для низки застосувань прийнятна швидкість відгуку 0,1 с, оскільки людське око не може розрізнати зміни швидше, ніж за 0,1 с. Висока швидкодія пов'язана з вищою розсіяною потужністю, а отже, з меншою ефективністю.

Наявність пам'яті – це здатність дисплея зберігати зображення у ввімкненому стані без споживання (або з малим споживанням) енергії. У деяких випадках дисплей не повинен змінювати зображення впродовж тривалого часу, а найчастіше частота проходження зображень не повинна перевищувати величину, що відповідає часу відгуку ока (~0,1 с). Якщо елемент дисплея вмикається за мікросекунду і без подальшого споживання потужності зберігає ввімкнений стан протягом 0,1 с, то його ефективність зростає, очевидно, в 10^5 разів. Крім того, здатність зберігання зображення полегшує доступ схеми керування до інших елементів панелі дисплея без втрати інформації. Ці міркування справедливі для електрохромних, електрофорезних дисплеїв і світлових клапанів.

Роздільна здатність. Під роздільною здатністю можна розуміти ступінь розпізнання окремих деталей відтворюваного на екрані зображення.

Так, наприклад, роздільну здатність дисплея можна оцінювати за можливістю розпізнання двох світлових точок, що містяться на деякій відстані одна від одної (якщо роздільна здатність низька, то спостерігач сприйматиме дві точки за одну, коли їхні центри розташовані порівняно далеко один від одного, а за високої роздільної здатності навіть дві дуже близько розташовані точки сприйматимуться ним як окремі).

Якщо роздільна здатність перевищує деяку межу, то її подальше підвищення вже не сприйматиметься оком.

Методи формування зображення в дисплеях. Використання типових рідкокристалічних дисплеїв сьогодні залежить від елементів зображення, або пікселів, сформованих рідкокристалічними (LC) комірками, які змінюють напрям поляризації світла, що проходить крізь них, відповідно до прикладеної напруги. Внаслідок зміни напрямку поляризації змінюється кількість світла, що може пройти крізь поляризаційний шар на лицевому боці дисплея. Зміною напруги досягається зміна кількості світла.

Існує два методи формування зображення в LCD: сегментний та матричний.

Відповідно до сегментного методу символи формуються за допомогою електродів – сегментів (рис. 1.2, а). Сегментну адресацію використовують у простих цифрових, алфавітно-цифрових, мнемонічних і графічних дисплеях невеликої інформаційної ємності (до кількох десятків елементів зображення). Усі сегменти зображення розташовуються на одній із підкладок дисплея, а інша виконує функцію загального електрода. У цій конфігурації контакти підводять безпосередньо до кожного сегмента та до загального електрода. Завдяки такій конфігурації кожен сегмент адресується незалежно. Сегментна адресація може також використовуватись для створення дисплеїв типу «біжучої стрічки». Однак у разі зростання кількості елементів зображення до сотень і більше технологічна реалізація підведення контактів до кожного елемента зображення значно ускладнюється. Тому для запису інформації на високоінформативні дисплеї використовують методи активної та пасивної матричної адресації, в яких кількість контактів набагато менша за кількість елементів зображення.

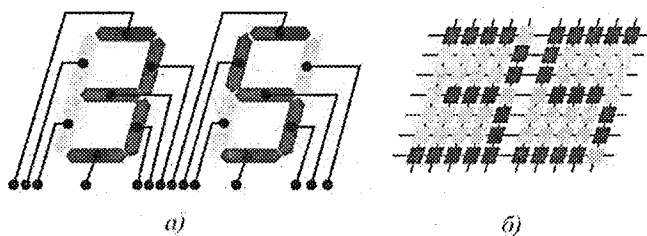


Рисунок 1.2 – Структура сегментного (а) та точково-матричного (б) дисплея

У матричному методі символи та зображення відображаються множиною точок (рис. 1.2, б). Точково-матричний метод керування використовується у дисплеях високої роздільної здатності, зокрема у портативних комп'ютерах та TFT моніторах.

Для матричних дисплеїв використовують два методи керування – статичний та динамічний. У статичному чи безпосередньому методі керування кожний піксель безпосередньо приєднується до драйвера. Такий спосіб керування доволі простий, однак у разі збільшення кількості пікселів його застосування значно ускладнюється. Альтернативою є мультиплексний метод керування, коли пікселі розташовуються та з'єднуються у формі матриці. Для керування пікселем точково-матричного LCD напруга прикладається до перетину відповідного верхнього сигнального та нижнього скануючого електродів. Цей метод дає змогу керувати кількома пікселями одночасно, розділяючи в часі керуючі імпульси. Тому він також називається динамічним методом керування.

Для керування сучасними дисплеями використовуються активний і пасивний методи, в яких використовуються відповідні типи матриць.

У випадку динамічної матричної адресації кількість контактів, за допомогою яких відбувається керування зображенням, значно менша за кількість самих елементів зображення. Якщо кількість рядків становить R , а стовпців – C , то загальна кількість елементів зображення дисплея буде $N=R \times C$. При цьому кількість контактів (m), необхідних для його матричної адресації, становить приблизно

$$m = R + C \approx 2\sqrt{N}.$$

Конфігурація електродів у дисплеї з пасивно-матричною адресацією схематично подана на рис. 1.3.

Електроди на обох підкладках дисплея орієнтовані перпендикулярно один до одного. Кожний елемент зображення дисплея визначається ділянкою перетину електродів стовпців і рядків та може пропускати чи перекривати світловий потік. Пікселі адресуються імпульсами напруги, поданими на відповідні рядок і стовпець дисплея. У дисплеях із пасивною матрицею (рис. 1.3, а) кожен піксель адресується впродовж часу, що перевищує період одного кадру.

Незважаючи на простоту реалізації пасивно-матричної адресації з погляду виготовлення дисплеїв, процес безпосереднього запису інформації пов'язаний із певними складнощами. Керуючі електричні сигнали, подані на рядок та стовпець дисплея для адресації певного пікселя, впливають на інші елементи зображення з відповідних рядка та стовпця, створюючи паразитне підсвічування.

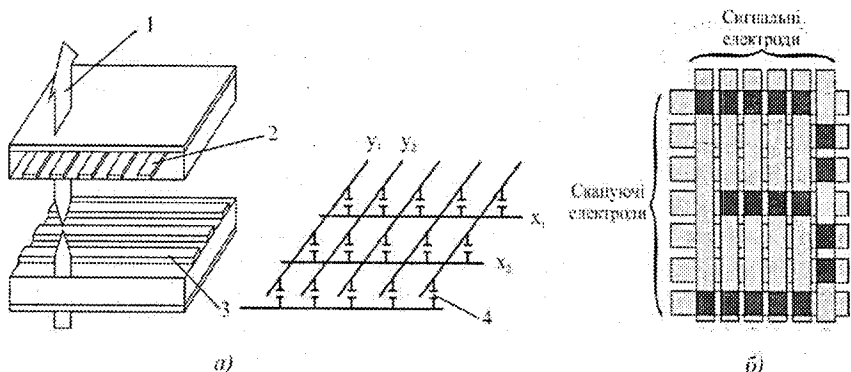


Рисунок 1.3 – Будова пасивної матриці (а) та пасивно-матричне керування (б): 1 – промінь світла; 2 – вертикальні електроди; 3 – горизонтальні електроди; 4 – піксель

Активно-матрична адресація (рис. 1.4) відрізняється від пасивно-матричної насамперед тим, що в кожному елементі зображення присутній свій електронний ключ: нелінійний елемент (діод чи транзистор) із конденсатором. Введений у кожен піксель дисплея електронний ключ унеможливує подання напруги на неадресовані елементи матриці. Типовим ключем для цієї мети є МОН-транзистор із конденсатором.

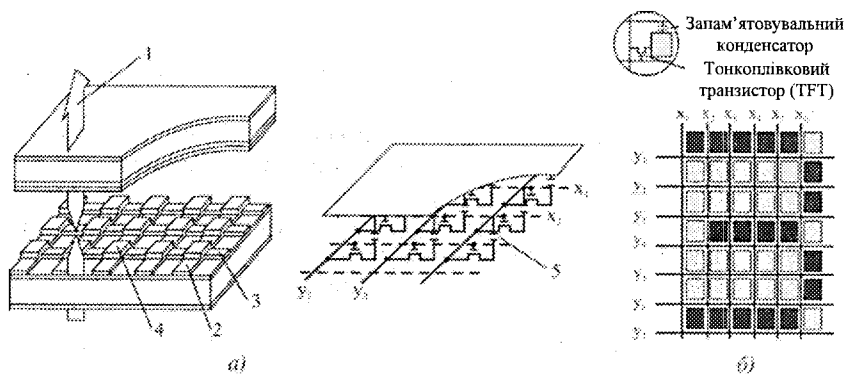


Рисунок 1.4 – Будова активної матриці (а) та активно-матричне керування (б): 1 – промінь світла; 2 – вертикальні електроди; 3 – горизонтальні електроди; 4 – тонкоплівковий транзистор (TFT); 5 – піксель

У цій структурі горизонтальні шини сполучені не з електродами дисплея, а із затворами МОН-транзисторів. Напруга, прикладена до затвора транзистора, керує величиною опору між двома іншими виводами. Один із цих виводів з'єднаний з електродом елемента дисплея, інший – з однією з вертикальних шин. Коли напруга прикладається до певної горизонтальної шини, всі транзистори, сполучені з цією шиною, відкриваються і напруга, прикладена до вертикальних шин, подається на елементи вибраного рядка дисплея. Після вимкнення напруги на затворах транзисторів опір витік – стік стає дуже великим та ізолює елементи дисплея від вертикальних шин. Заряд, накопичений на конденсаторі електронного ключа, зберігається до наступного циклу адресації.

Будова активної матриці зображена на рис. 1.4, а. Сигнальні електроди рядків та стовпців, відповідні шари ізоляторів, формувачі напруги та електроди елементів зображення розташовані на одній підкладці дисплея. На іншій підкладці міститься лише загальний електрод.

ДИСПЛЕЇ НА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ТРУБКАХ

Електронно-променева трубка (ЕПТ) – це найпоширеніший на сьогодні тип дисплеїв [2, 4]. Технологія, використана в цьому типі дисплеїв, була розроблена німецьким ученим Фердинандом Брауном у 1897 році. Промінь відхилявся за допомогою електромагніту в одному напрямку, розгортка другого напрямку здійснювалася за допомогою рухомого дзеркала. У 1906 році співробітники Брауна М. Дікман і Г. Глаге отримали патент на використання трубки Ф. Брауна для передавання зображення, а в 1909 році М. Дікман розробив фототелеграфний пристрій для передавання зображення на основі трубки Брауна.

З 1902 року роботи з трубкою Брауна проводив Б. Л. Розінг. У 1907 році він подав заявку на винахід «Спосіб електричного передавання зображень на відстані», а в 1911 році на засіданні Російського технічного товариства продемонстрував передавання телевізійних зображень простих геометричних фігур та приймання цих зображень з відтворенням на екрані ЕПТ.

Будова та принцип дії електронно-променевих приладів. *Електронно-променеві прилади* – це прилади, в яких використовуються потоки електронів, сформовані у вигляді променів. Розрізняють одно-, дво- та багатопроменеві прилади. Прилади, балон у яких має форму трубки, називаються *електронно-променевими трубками*.

Для формування та керування електронними потоками в електронно-променевих трубках (ЕПТ) використовуються або тільки електричні поля (ЕПТ з *електростатичним керуванням*), або як електричні, так і магнітні поля (ЕПТ з *магнітним керуванням*).

Основними елементами електронно-променевих трубок є: електронний прожектор 1, відхильна система 2, екран 4 (рис. 2.1). У трубках з магнітним керуванням використовуються також магнітні фокусувальні котушки 5.

Електронний прожектор, який називається також *електронною гарматою*, створює та фокусує електронний пучок (потік) в електронний промінь. Електронний прожектор складається з катода і, як правило, кількох електродів, які формують електронний промінь із заданими енергетичними та геометричними характеристиками. *Відхильна система* сканує (переміщує) промінь, сформований прожектором, за заданим законом у просторі. Відхилення здійснюється за допомогою ортогонально розміщених двох пар магнітних котушок 2. Для магнітного керування використовуються не тільки фокусувальні котушки, але й магнітні відхильні системи. На екрані відбувається перетворення кінетичної енергії електронів на оптичне або електричне зображення. Під час роботи більшості електронно-променевих

трубок електроні променя, сфокусовані та прискорені прожектором, надходять до відхильної системи, де під дією електричного чи магнітного поля відбувається просторове переміщення променя.

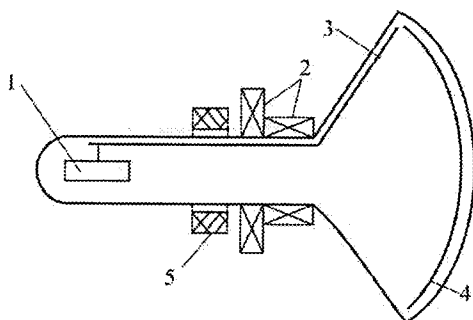


Рисунок 2.1 – Схема електронно-променевої трубки з магнітним фокусуванням

На рис. 2.1 позначено: 1 – електронний прожектор; 2 – відхильна система (магнітні котушки); 3 – провідне покриття; 4 – екран; 5 – фокусувальні котушки.

Після відхильної системи електронний промінь попадає на екран – конструктивний елемент ЕПТ із шаром люмінофора, нанесеного на дно балона трубки. За відсутності відхилення електронний промінь формує в центрі екрана невелику яскраву пляму. Для відведення вторинних електронів, вибитих променем із поверхні екрана, на внутрішню поверхню трубки наноситься провідний шар 3, з'єднаний із прожектором. У трубках із магнітним керуванням для фокусування використовується магнітна фокусувальна котушка.

Електронний прожектор, електростатичні фокусувальні системи. В електронному прожекторі, який складається з катода та, як правило, кількох електродів, відбувається керування як силою струму, так і густиною електронного потоку (фокусування).

Керування густиною (інтенсивністю) електронного потоку уможливає зміну яскравості плями на екрані ЕПТ. Керування густиною струму здійснюється за рахунок зміни характеристик електричного поля переважно в міжелектродних областях. Катод в ЕПТ найчастіше виконується у формі невеликого циліндра 3, всередині якого міститься підігрівач 2 (рис. 2.2). Емітувальною частиною слугує дно циліндра, вкрите оксидним шаром. Катод розміщується всередині другого циліндра з отвором-діафрагмою, який є керувальним електродом (модулятором) 1. Основне призначення модулятора полягає у зміні струму електронного променя 7, його дія нагадує дію керувальної сітки у тріоді. На модулятор подається

невеликий негативний відносно катода потенціал U_m . У просторі між катодом і модулятором формується неоднорідне електричне поле 4, що змінює об'ємний заряд поблизу катода і ту частину його поверхні, біля якої існує поле з додатним градієнтом потенціалу. Залежність між катодним струмом і потенціалом модулятора, що має назву *модуляційної характеристики* $I_K = f(U_m)$, в ЕПТ дещо відрізняється від закону степені три других і описується співвідношенням

$$I_K = b[(U_m - U_{m0})/U_{m0}]^\gamma |U_{m0}|^{3/2}, \quad (2.1)$$

де U_m – напруга модулятора, В;
 U_{m0} – запірна напруга, В;
 I_K – струм катода, мкА;
 $b = 2,3-3,5$, $\gamma = 2,5-3,5$ – коефіцієнти.

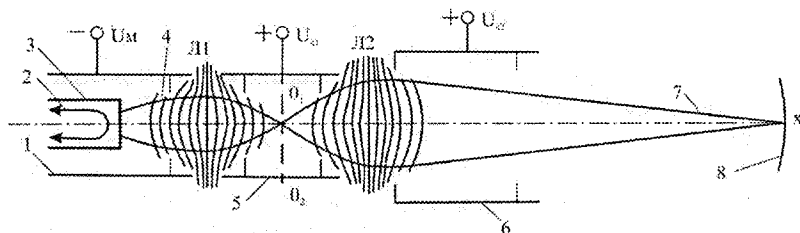


Рисунок 2.2 – Електронний прожектор:

- 1 – керувальний електрод; 2 – підігрівач; 3 – катод;
 4 – неоднорідне електричне поле; 5 – перший анод; 6 – другий анод;
 7 – електронний промінь; 8 – екран

Відмінність виразу (2.1) від закону степені три других зумовлена тим, що струм катода залежить не тільки від потенціалу модулятора, але й від величини поверхні катода, на якій існує додатний градієнт потенціалу. У трубках з магнітним фокусуванням обмежувальні діафрагми відсутні, а струм променя близький до катодного струму.

Принципи роботи електронних прожекторів багато в чому аналогічні принципам дії оптичних фокусувальних систем. Неоднорідні аксіально-симетричні електричні поля, що формуються системами електродів і використовуються для зміни швидкості та напрямку руху електронів, називаються електронними лінзами. Однорідні та неоднорідні магнітні поля можуть також використовуватися як лінзи.

Більшість прожекторів сучасних електронно-променевих приладів ґрунтуються на дволінзовій оптичній схемі. Використання дволінзового прожектора з першою сильною (короткофокусною) лінзою та другою слабкою

(довгофокусною) уможлиблює одержання в площині екрана перерізу електронного променя діаметром $\sim 0,1$ мм, якщо діаметр емітувальної поверхні катода ~ 1 мм. Приблизний вигляд розподілу потенціалів неоднорідних електричних полів (еквіпотенціалів), які утворюють дві лінзи, і траєкторію електронів 7 в електронному прожекторі наведено на рис. 2.2.

Перша лінза Л1 у цьому прожекторі утворена катодом 3, модулятором 1 і першим анодом 5, а друга Л2 формується першим 5 і другим 6 анодами. Отже, перша і друга лінзи прожектора, крім фокусування, забезпечують ще й прискорення електронів. У лінзі Л1 електричне поле з додатним градієнтом досягає поверхні катода і прискорює електрони, емітовані катодом. Перша лінза повинна витягувати електрони з катодної області та прискорювати їх, тому вона може бути лише електростатичною. Друга лінза прожектора може бути як електростатичною, так і магнітною. У розглянутому прикладі кожен лінзу можна подати як сукупність збиральної (двоопуклої) та розсіювальної (двогнутої) елементарних лінз. Збиральна лінза утворюється неоднорідним електричним полем з еквіпотенціальними поверхнями, повернутими опуклістю до катода, а розсіювальна – еквіпотенціальними поверхнями, повернутими в бік екрана. Заломлювальна дія збиральної лінзи більша, ніж у розсіювальної. Крім того, внаслідок більшого потенціалу біля розсіювальної лінзи швидкості руху електронів у її просторі більші, ніж у збиральній, тому фокусувальна (збиральна) дія останньої переважає. Розсіювальна лінза збільшує лише фокусну відстань усієї системи. Фокус Л1 розміщується в площині O_1O_2 .

Змінюючи потенціал першого анода 5, у колі якого проходить менший струм, ніж у колі другого анода 6, можна регулювати фокусну відстань другої лінзи, сумішуючи цим фокус другої лінзи з поверхнею екрана (рис. 2.2).

Основним недоліком розглянутого прожектора є взаємозв'язок між густиною катодного струму, від якого залежить яскравість свічення екрана, та якістю фокусування (діаметром плями на екрані). Зміна потенціалу першого анода для оптимального фокусування електронного потоку приводить до зміни розміру та конфігурації електричного поля біля поверхні катода, а отже, струму променя, тобто яскравості. З іншого боку, під час регулювання яскравості зміною напруги на модуляторі буде порушуватися фокусування. Для усунення цих небажаних явищ в більшості сучасних приймальних трубок використовуються прожектори з нульовим струмом першого анода. У цьому типі прожектора (рис. 2.3) між першим анодом і модулятором розміщено прискорювальний електрод (ПЕ) у вигляді довгого циліндра з діафрагмами для обмеження поперечних розмірів електронного пучка. Перший анод виконано у формі діафрагми з отвором, у 2 – 3 рази більшим від діаметра пучка, внаслідок чого електрони на цей електрод практично не потрапляють. Для такої конструкції A_1 і ПЕ струм у колі першого анода дорівнює нулю, що дає змогу здійснювати живлення електродів прожектора від спільного подільника напруги. Через відсутність

струму в колі першого анода A_1 зміна напруги на ньому під час фокусування не впливає на розподіл струму та напруги на елементах подільника, тобто не відбувається зміни режиму роботи першої лінзи Л1, а отже, зміни яскравості. Аналогічно і регулювання яскравості не порушує фокусування.

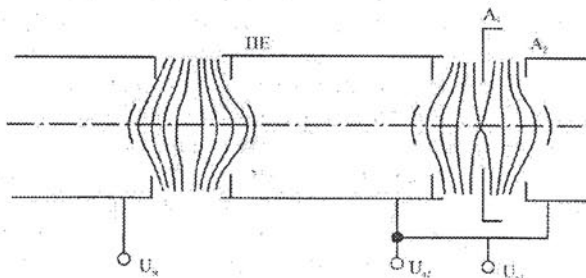


Рисунок 2.3 – Тріодний прожектор з нульовим струмом першого анода: A_1 – перший анод; A_2 – другий анод; ПЕ – прискорювальний електрод

Незалежність діючої напруги в площині модулятора від напруги першого анода зумовлена малою проникністю прискорювального електрода, оскільки прискорювальний електрод з обмежувальними діафрагмами є ефективним електростатичним екраном, що перешкоджає проникненню поля першого анода в прикатодну область.

Електронний прожектор з магнітним фокусуванням. В електронно-променевих трубках з магнітним фокусуванням як друга проекційна лінза використовується неоднорідне магнітне поле (магнітна лінза) короткої котушки, діаметр якої сумірний із її товщиною (довжиною). Котушка у феромагнітному панцирі одягається на горловину трубки.

Неоднорідні магнітні поля, що використовуються в електронно-променевих приладах, створюються котушками, через які протікає струм. Для одержання необхідної форми магнітного поля використовуються полюсні наконечники та магнітні екрани, що виготовляються з матеріалів з великою магнітною проникністю.

У більшості електронно-променевих трубок використовуються аксіально-симетричні магнітні поля, що створюються круговими котушками з феромагнітними оболонками. Принцип фокусування електронного променя неоднорідним магнітним полем короткої котушки ілюструє рис. 2.4.

У загальному випадку вектор швидкості електрона \mathbf{V} направлений під деяким кутом α до осі котушки. Якщо електрон перебуває в точці A , то вектор індукції магнітного поля \mathbf{B} і вектор швидкості \mathbf{V} мають як радіальні B_r і U_r , так і осьові B_A і U_A складові. Відомо, що на електрон, який рухається під довільним кутом до напрямку магнітного поля, діє сила Лоренца $\mathbf{F}_m = -e[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$. Складова сили Лоренца F_{mz} , зумовлена U_A і B_r , скерована з-за площини креслення до читача. Векторний добуток $[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$ – це права

трийка векторів, однак під час визначення напрямку F необхідно враховувати від'ємний знак заряду електрона. Сила F_{mt} викликає обертання електронів навколо осі OC , тобто виникає азимутальна складова швидкості U_r , яка разом з V_A утворює силу F_{mr} , направлену до осі котушки. Описана ситуація зберігається для площини, яка проходить через центральні точки O_1, O_2 котушки перпендикулярно до її осі. Отже, під час руху електрона до цієї площини він рухається по спіралі з усе меншим радіусом, відхиляючись до осі котушки. Після перетину площини O_1O_2 напрямок радіальної складової індукції магнітного поля V_r змінюється на протилежний, отже, сила F'_{mr} буде направлена назустріч силі F_{mr} . Однак після перетину площини O_1O_2 електрони вже відхилились у напрямку до осі, значення V_r зменшилися, тому сила $F'_{\text{mr}} < F_{\text{mr}}$, а поперечна сила F_{mr} , як і раніше скерована в той самий бік. Тангенціальна сила F'_{mr} справа від площини O_1O_2 зменшуватиме частоту обертання електрона, який перетне вісь у деякій точці. Змінюючи індукцію магнітного поля шляхом регулювання струму в котушці, можна досягти перетину траєкторій усіх електронів з віссю трубки у площині екрана (точка C), забезпечуючи цим фокусування електронного потоку.

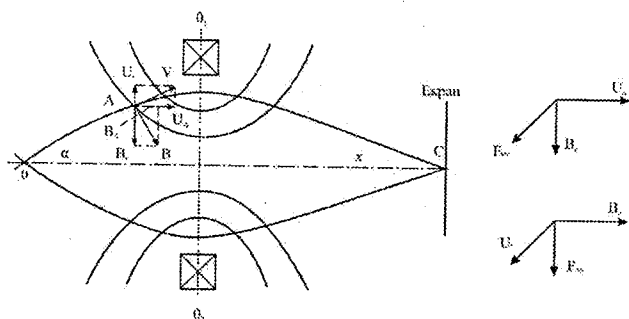


Рисунок 2.4 – Принцип фокусування електронного променя неоднорідним магнітним полем

Магнітне фокусування, як правило, потребує використання магнітних відхильних систем.

Магнітні відхильні системи. Магнітна відхильна система найчастіше складається з двох пар котушок, надягнених на горловину трубки, які створюють магнітні поля у взаємно перпендикулярних напрямках (див. рис. 2.1). Одна пара котушок відхиляє промінь у вертикальній, а друга – в горизонтальній площині. Розглянемо відхилення електрона однорідним магнітним полем (рис. 2.5).

В однорідному магнітному полі ($B = B_y, B_x = B_z = 0$), за повної відсутності електричного поля, рівняння руху електронів у декартовій системі координат мають вигляд

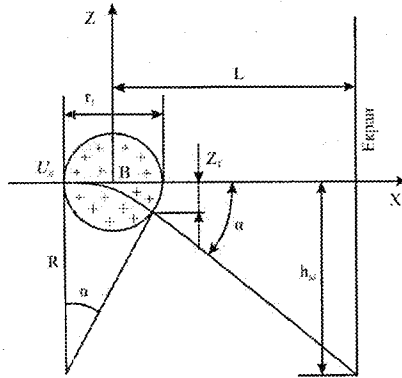
$$md^2x/dt^2 = -e(v_z B_y); \quad md^2y/dt^2 = 0; \quad md^2z/dt^2 = -e(v_x B_y). \quad (2.2)$$

Система рівнянь (2.2) може використовуватися також для обчислення траєкторії електронів у фокусувальних системах. Оскільки сила Лоренца, що діє на електрони, перпендикулярна до повної швидкості V , то повна швидкість електрона залишається незмінною, а напрямок руху (швидкості) електрона змінюється.

Якщо вважати, що $x_0 = 0$, $v_{z0} = 0$, $v_{x0} = v_0$, то розв'язок системи рівнянь (2.2) можна записати у вигляді

$$z - z_0 = [mv_0/(eB)][1 - \cos(\omega_y t)]; \quad x = [mv_0/(eB)][\sin(\omega_y t)], \quad (2.3)$$

де $\omega_y = eB/m$ – електронна циклотронна частота.



Рисуюнок 2.5 – Відхилення електрона однорідним магнітним полем

Рівняння (2.3) описують траєкторію електрона в однорідному магнітному полі – коло з радіусом $R = mv_0/(eB)$. Отже, в однорідному магнітному полі електрон буде обертатися по колу радіусом R з кутовою частотою ω_y . Діаметр l_1 відхильних котушок, як правило, значно менший за R , тому на виході з них електрон відхилиться від осі трубки на деяку величину $z_1 \approx l_1 \text{tg} \alpha$ (рис. 2.5) і рухатиметься далі прямолінійно. Якщо кути малі, $\text{tg} \alpha \approx \alpha \approx z/l_1$ і шлях, пройдений всередині котушок, мало перевищує їхній діаметр, тому

$$\text{tg} \alpha \approx \alpha \approx l_1 / R = eBl_1/(mv_0) = \sqrt{e/(2m)} Bl_1 / \sqrt{U_A}, \quad (2.4)$$

де U_A – потенціал останнього електрода перед відхильною системою, від якого залежить швидкість електрона.

За (2.4) можна визначити кут відхилення α . Як відомо, індукція магнітного поля пропорційна кількості витків тобто $B = k_1 w I$, де k_1 – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструкції котушки; w – кількість витків; I – струм у витках.

Повне зміщення електрона на плоскому екрані електронно-променевої трубки, що перебуває на відстані L від центра відхильних систем (див. рис. 2.5), $h = Ltg\alpha$. Зміщення променя для магнітної системи відхилення можна знайти з виразу:

$$h_M = \sqrt{e/(2m)} L l_1 (k w I) / \sqrt{U_A}. \quad (2.5)$$

Відношення $h_M / I = \varepsilon_M$ (мм/А) називається чутливістю до відхилення для магнітної системи. Зі співвідношення (2.5) можна визначити відхилення променя при зміні струму, що протікає через котушки на 1А:

$$\varepsilon_M = \sqrt{e/(2m)} l_1 L / \sqrt{U_A}.$$

Після відхильної системи електрони потрапляють на екран електронно-променевої трубки. Екран – це тонкий шар люмінофора, нанесеного на внутрішню поверхню торцевої частини балона і здатного інтенсивно світитися під час бомбардування електронами. Іноді зверху на шар люмінофора наносять провідний тонкий шар алюмінію. Властивості екрана визначаються його характеристиками та параметрами. Основними параметрами екрана є світловидатність, яскравість свічення, роздільна здатність, тривалість післясвітіння.

Маски для електронно-променевих трубок. Для того, щоб кожний електронний промінь попадав лише на «свої» точки люмінофора та не підсвічував сусідні, поблизу поверхні екрана всередині ЕПТ міститься маска. Від якості виготовлення маски залежать чіткість зображення та чистота кольорів дисплея. На сьогодні в ЕПТ використовується три типи масок.

Тіньова маска – це тонкий металевий лист (переважно з інвару) з великою кількістю регулярно розміщених отворів, кількість яких дорівнює кількості точок на екрані (рис. 2.6). Інвар (InVar) – магнітний сплав заліза (64%) з нікелем (36%). Після проходження крізь отвори маски промені розходяться, попадаючи кожний на свою точку люмінофора. За відсутності маски кожний промінь, рухаючись по рядках і кадрах, збуджував би, крім своїх, ще й точки двох інших люмінофорів. Маска запобігає попаданню електронних променів на «чужі» люмінофорні точки.

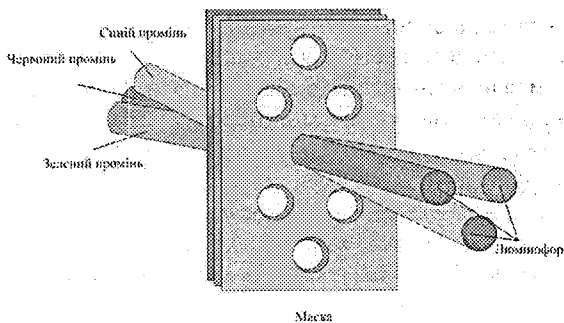


Рисунок 2.6 – Конструкція тіньової маски

Одним зі "слабких" місць моніторів з тіньовою маскою є її термічна деформація (рис. 2.7). Частина променів від електронно-променевої гармати потрапляє на тіньову маску, внаслідок чого відбувається її нагрівання та подальша деформація. Зміщення отворів тіньової маски призводить до виникнення ефекту строкатості екрана (зсуву кольорів RGB).

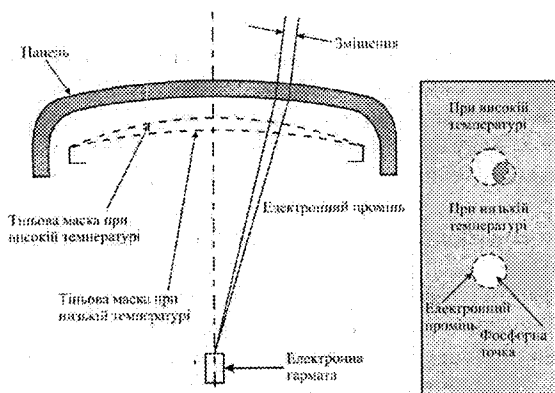


Рисунок 2.7 – Термічна деформація тіньової маски

Недоліки тіньової маски добре відомі. По-перше, це мале співвідношення пропущених і затриманих маскою електронів (лише близько 20 – 30% проходить через маску), яке потребує застосування люмінофорів із великою світловіддачею, що, насамперед, погіршує монохромність світіння, зменшуючи діапазон передавання кольору. По-друге, забезпечити точний збіг трьох променів, що не лежать в одній площині, при відхиленні їх на більші кути доволі складно. Мінімальна відстань між люмінофорними елементами однакового кольору в сусідніх рядках називається кроком точок і є індексом якості зображення (рис. 2.8). Крок точок зазвичай вимі-

рюється в міліметрах (мм). Чим меншим є значення кроку точок, тим вища якість відтвореного на моніторі зображення. Відстань між двома сусідніми точками по горизонталі дорівнює кроку точок, помноженому на 0,866.

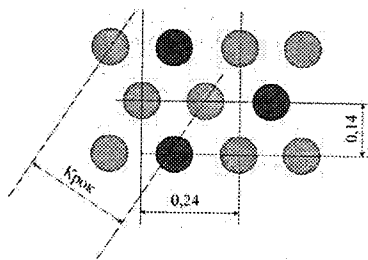


Рисунок 2.8 – Крок точок для люмінофорних елементів

Апертурна решітка – це тип маски, який використовується в електронно-променевих трубках і складається з великої кількості вертикально натягнутих тонких ниток (струн). Замість люмінофорів трьох основних кольорів у формі точок, як у тінювій масці, в апертурних решітках використовуються смужки люмінофорів (рис. 2.9).

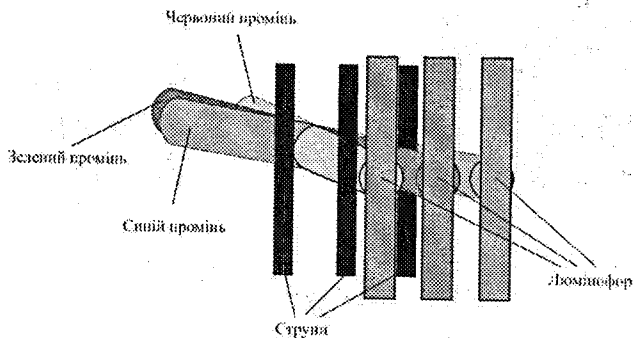


Рисунок 2.9 – Принцип дії апертурної решітки

Мінімальна відстань між смужками люмінофорів одного кольору називається кроком смуг і вимірюється в міліметрах (рис. 2.10). Чим менше значення кроку смуг, тим вищою є якість зображення. В апертурній решітці має значення лише горизонтальний розмір смужки, оскільки вертикальний визначається фокусуванням електронного променя та відхильної системи. В електронно-променевих трубках з апертурною решіткою застосовуються три гармати, три катоди та три модулятори зі спільним фокусуванням електронного променя.

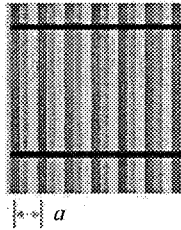
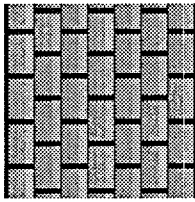


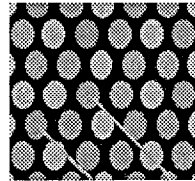
Рисунок 2.10 – Крок смуг в апертурній решітці: a – крок смуг

Апертурна решітка має меншу роздільну здатність та чіткість зображення, порівняно з тінговою маскою. Однак, порівняно з тінговими масками, трубки з апертурною решіткою менше затіняють електронний промінь, мають більшу контрастність та насиченість кольорів. Недоліком апертурних решіток є тонкі, але добре помітні на екрані тіні, утворені двома металевими нитками, які стабілізують апертурну решітку.

Щілинна маска – це комбінація тінгової маски й апертурної решітки. У цьому разі люмінофорні елементи розташовані у вертикальних еліптичних комірках, а маска зроблена з вертикальних ліній (рис. 2.11, *а*).



а)



б)

Рисунок 2.11 – Щілинна маска: *а* – конструкція щілинної маски; *б* – розміщення люмінофорів у щілинній масці

Фактично вертикальні смуги розділені на еліптичні комірки, які утворюють групи з трьох люмінофорних елементів основних кольорів у формі рівностороннього трикутника (рис. 2.11, *б*). Мінімальна відстань між двома комірками називається щілинним кроком. Чим менше його значення, тим вища якість зображення на моніторі.

Конструкція ЕПТ-дисплея. Електронно-променева трубка – це вакуумний прилад, який складається зі скляної трубки, один з кінців якої вузький і довгий (горловина), а інший – широкий і плоский (екран). Зсередини екран зсередини покривається люмінофором (рис. 2.12). Як люмінофори для кольорових ЕПТ використовуються доволі складні речовини на основі рідкоземельних металів – ітрію, ербію тощо. Потік електронів створюється електронним прожектором (гарматою) і, пройшовши через металеву маску,

потрапляє на екран, покритий люмінофором. Потік електронів (промінь) може відхилитися у вертикальній і горизонтальній площинах, що забезпечує його рух по всій поверхні екрана. Для створення зображення на екрані електронний промінь повинен рухатися за певною траєкторією.

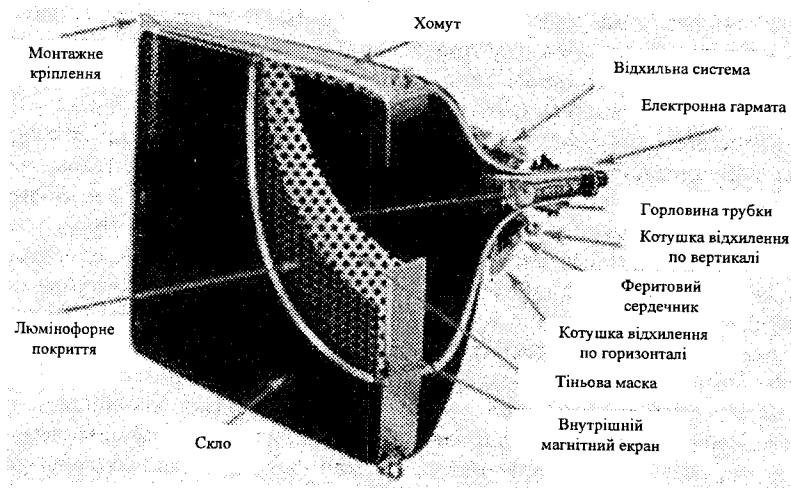


Рисунок 2.12 – Конструкція електронно-променевої трубки

Шлях електронного променя на екрані схематично показано на рис. 2.13.

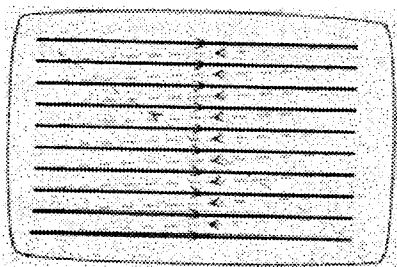


Рисунок 2.13 – Шлях електронного променя на екрані

Електронний промінь починає рух із верхнього лівого кута, рухаючись зліва направо та формуючи в такий спосіб рядок зображення. Після того, як рядок буде сформований, промінь здійснює зворотний хід, швидко переміщаючись вліво до місця початку формування наступного рядка. Отже, на екрані утворюється кадр (растр), який складається з певної кількості

близько розташованих рядків. Після формування останнього рядка промінь повертається з правого нижнього у лівий верхній кут.

Для запобігання мерехтінню зображення формування всіх рядків зображення повинно відбуватися з частотою понад 50 Гц, яка називається кадровою частотою (частотою кадрової розгортки). Для сучасних дисплеїв ця частота перебуває в діапазоні 85 – 100 Гц. Частота переходу на нову лінію називається частотою горизонтальної (або рядкової) розгортки. Частота переходу з нижнього правого кута в лівий верхній називається частотою вертикальної (або кадрової) розгортки.

У дисплеях застосовуються два типи розгортки: рядкова і черезрядкова. Принцип рядкової розгортки полягає в тому, що всі рядки формуються послідовно, один за одним. Після формування кадру промінь переміщується на початок першого рядка і процес повторюється. Черезрядкова розгортка здійснюється так: кадр розбивається на два півкадри, один з яких складається з парних, а другий – з непарних рядків. Спочатку формуються непарні рядки. Після закінчення їх формування промінь переміщується на початок другого рядка і починається формування парних рядків.

У кольорових дисплеях зображення формується з трьох основних кольорів: червоного, зеленого та синього. У кольорових електронно-променевих трубках для відтворення кожного з цих кольорів використовується окрема електронна гармата, а екран покривається люмінофорами трьох кольорів свічення. При цьому електронний потік з кожної гармати попадає лише на люмінофор відповідного кольору. Будь-який колір на екрані дисплея можна отримати комбінацією трьох основних кольорів. Точки трьох основних кольорів розташовані на екрані так близько одна до одної, що людське око сприймає їх як одну. Сукупність усіх трьох кольорів відповідає білому світлу, а їх відсутність – чорному.

Люмінофори трьох складових, що належать до одної точки, можуть бути розміщені або в кутах трикутника (так зване дельтаподібне розміщення, рис. 2.14), або на одній лінії – планарне розміщення (рис. 2.15).

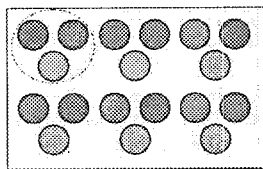


Рисунок 2.14 – Дельтаподібне розміщення люмінофорів

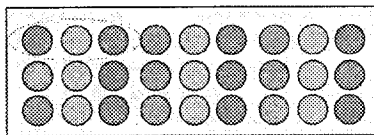


Рисунок 2.15 – Планарне розміщення люмінофорів

Розділ 3

ІНФОРМАЦІЙНІ ДИСПЛЕЇ НА СВІТЛОДІОДАХ

Світловипромінювальний діод – напівпровідникове джерело випромінювання – є основою пікселя світлодіодного екрана [3, 5]. На сьогодні розроблено багато напівпровідникових матеріалів, які можуть випромінювати у видимому діапазоні довжин хвиль, від червоного до синього, і використовуються у світлодіодних екранах. В основі роботи світловипромінювального діода лежить явище люмінесценції. І хоча саме явище було відкрито в 1923 році, практичне застосування люмінесценції стало можливим лише після її відкриття у прямозонних напівпровідниках типу $GaAs$. Після цього було розроблено червоні світлодіоди на основі широкозонних напівпровідників $GaAs_{1-x}P_x$. У 1964 році була отримана ефективна люмінесценція в непрямозонному напівпровіднику GaP . Було створено ефективні світловипромінювальні діоди в жовтій та зеленій областях спектра, а дещо пізніше – сині світлодіоди на основі бар'єрів Шоттки у GaN , ZnS і $ZnSe$.

На початку 80-х років було створено $GaAlAs$ – матеріал, що відкрив нову сторінку у виробництві світлодіодів. Ефективність світлодіодів на $GaAlAs$ вдсятеро вища, що уможливило їх застосування, наприклад, для зчитування штрих-кодів, передавання даних через оптичне волокно, у медичному обладнанні. Недоліками цього матеріалу були малий час життя та робота лише в червоній ділянці спектра. Вирішення цих проблем стало можливим після створення нового люмінесцентного матеріалу $InGaAlP$, який давав змогу плавно настроювати колір за рахунок зміни ширини забороненої зони. До того ж, після появи лазерних діодів стало можливим виготовлення світлодіодів за однією технологією, розробленою для лазерних діодів.

Не всі напівпровідникові матеріали ефективно випромінюють світло в результаті рекомбінації. Гарними випромінювачами є, як правило, прямозонні напівпровідники типу $A^{III}B^V$ (наприклад, $GaAs$ або InP) та $A^{II}B^{VI}$ (наприклад, $ZnSe$ або $CdTe$). Змінюючи склад напівпровідників, можна створити світлодіоди, що випромінюють на різних довжинах хвиль – від ультрафіолету (GaN) до середнього інфрачервоного діапазону (PbS).

Електролюмінесценція у напівпровіднику. Електролюмінесценція у напівпровідниках є результатом випромінювального переходу між енергетичними станами в атомі. Швидкість випромінювальної рекомбінації визначається добутком густини електронів в енергетичних станах з високою енергією, густини незаповнених нижніх енергетичних станів і ймовірності переходу між цими двома наборами станів. Через те, що відстань між сусідніми атомами в напівпровіднику мала ($\sim 5\text{Å}$), відбувається накладання хвильових функцій їхніх зовнішніх орбітальних електронів, що приводить до виникнення зон дозволених станів, а не дискретних енергетичних рівнів (як в ізольованому атомі). Отже, люмінесценція, що супроводжує міжзонні

переходи, не монохроматична, а займає переважно діапазон довжин хвиль завширшки в кількисот ангстрем.

У напівпровіднику люмінесценція відбувається за рахунок рекомбінації електронів чи дірок, генерованих у концентраціях, що перевищують концентрації у стані теплової рівноваги. Процес рекомбінації є важливою характеристикою фізичних та електричних властивостей матеріалу, однак він майже не залежить від конкретного способу, яким здійснюється генерація надлишкових носіїв. Ефективне утворення неосновних носіїв завжди потребує затрат енергії.

Надлишкові носії найчастіше утворюються в результаті прикладення до p - n -переходу прямого зміщення. У цьому разі неосновні носії інжектуються через перехід.

Пряме зміщення p - n -переходу збільшує потенціальну енергію електронів n -області, зменшуючи висоту бар'єра, що перешкоджає їх переходу в область p -типу (рис. 3.1). Аналогічно бар'єр, що блокує потік дірок з області p -типу в n -область, знижується у разі прямого зміщення. Як тільки створюється надлишок електронів і дірок, виникає можливість їхньої рекомбінації.

Пройшовши через перехід, надлишкові носії значно підвищують концентрації неосновних носіїв (p - n -перехід, через який протікає струм густиною 10 А/см^2 , інжектує неосновні носії зі швидкістю майже 10^{24} носіїв ($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) у вузькій області, переважно завширшки $1 - 2 \text{ мкм}$, прилеглий до переходу). Така швидкість генерації, якщо час життя неосновних носіїв становить 10^{-9} с , дає загальну надлишкову концентрацію носіїв $10^{24} \cdot 10^3 = 10^{15}$ носіїв/ см^3 , що набагато перевищує типову рівноважну концентрацію неосновних носіїв при кімнатній температурі (рис. 3.1, б). Надлишкові носії рекомбінують потім із деякими протилежно зарядженими основними носіями, прагнучи повернути концентрації неосновних носіїв до їхніх рівноважних значень. Рекомбінація надлишкових носіїв у межах дифузійної довжини L і є механізмом емісії світла.

Значимо, що хвіст больцманівського розподілу носіїв досягає енергій, більших від висоти бар'єра. Отже, у вузькозонних матеріалах навіть при низьких прямих зміщеннях протікатиме деякий струм. Однак, внаслідок того, що кількість вільних носіїв швидко збільшується до рівня Фермі, струм експоненціально зростатиме із зростанням прикладеної напруги. Величина його описується діодним рівнянням виду

$$I = I_0 [\exp(qV_j / \beta kT) - 1],$$

де V_j – напруга, що виникає в переході. V_j може відрізнитися від прикладеної напруги V_a на омичний спад на внутрішньому опорі R : $V_j = V_a - IR$.

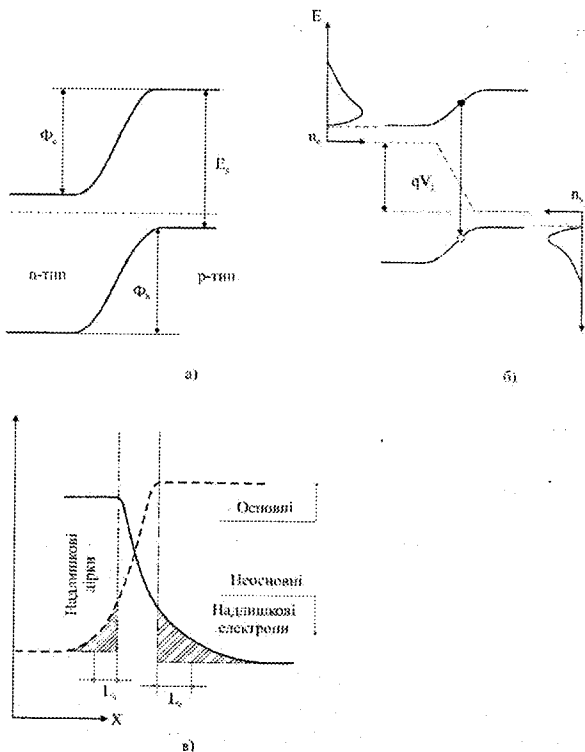


Рисунок 3.1 – Діаграма $p-n$ -переходу:

- а – бар'єри, утворені електронами та дірками у стані рівноваги;
- б – зниження бар'єра під дією прямого зміщення;
- розподіли електронів і дірок позначені як n_e і n_h , відповідно;
- стрілкою показана рекомбінація зона – зона;
- в – просторовий розподіл концентрацій основних і неосновних носіїв на n - і p -боках прямозміщеного $p-n$ -переходу

У світловипромінювальних діодах один бік переходу часто легується сильніше, ніж другий. І дійсно, з сильно легованого боку матеріал часто буває виродженим, тобто рівень Фермі розміщений всередині зони та віддалений від її краю на відстань ξ . Як видно з рис. 3.2, носії у виродженій зоні мають ту перевагу, що для них висота бар'єра зменшена на ξ порівняно зі слабо легованим боком. Ще однією перевагою сильного легування в n^+ -області (рис. 3.2) є те, що це заповнення зони на ξ збільшує поріг енергії поглинання так, що випромінюване світло виводиться з n^+ -області без поглинання. Коли обидва боки леговані до виродження, необхідно розглянути

додаткове явище – відносне зменшення ширини забороненої зони з будь-якого боку переходу за рахунок ефектів взаємного перекриття зон.

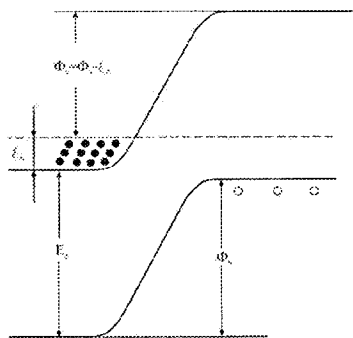


Рисунок 3.2 – Діаграма $p-n$ -переходу між виродженим n -типом і слабо легованим напівпровідником p -типу

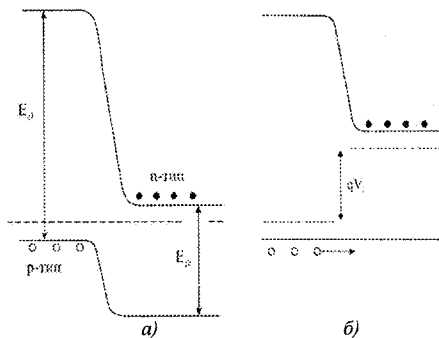


Рисунок 3.3 – Діаграма гетеропереходу: a – в рівноважному стані; b – після прикладення прямого зміщення V_j

Гетероперехід. Для контролю того, який носій інjektується в люмінесцентний матеріал, можна скористатися гетеропереходом (рис. 3.3). Джерелом інjektованих іонів є матеріал, що має ширшу заборонену зону, ніж люмінесцентна область. У цьому разі асиметрія бар'єрів у електронів та дірок забезпечує високу ефективність інjektції з широкозонного до вузькозонного шару. Гетеропереходи можуть створюватися між різними матеріалами, однак найбільш вдалим є прилади, виготовлені на основі матеріалів з однаковою сталою ґратки при робочій температурі – в цьому разі виникнення дислокацій та напружень на межі розділу зводиться до мінімуму. Перспективною гетероперехідною структурою, в якій ефекти, викликані незбігом параметрів ґраток, мінімальні, є структура типу $Al_{1-x}Ga_xAs$ з різними значеннями x з кожного боку переходу.

Бар'єр Шотткі. Бар'єр Шотткі здебільшого існує на поверхні напівпровідника в місці контакту з металом. Такий бар'єр нагадує $p-n$ -перехід: коли поверхневі стани індукують інверсний шар, поверхня набуває типу провідності, протилежного об'ємному, що еквівалентно наявності $p-n$ -переходу безпосередньо під поверхнею. Пряме зміщення прагне вирівняти зони, уможливаючи інjektцію неосновних носіїв в об'єм матеріалу. Потім неосновні носії рекомбінують, емітуючи випромінювання, як це відбувалося б у $p-n$ -переході.

Однією з особливостей прямо зміщеного бар'єра Шотткі є порівнянна легкість, з якою основні носії проходять до металевого електрода, зменшуючи цим ефективність інjektції і, відповідно, ефективність люмінесцен-

ції. Ефективність інжекції залежить від співвідношення кількостей основних носіїв біля поверхні та в об'ємі. Значна інверсія слабо легованого кристала – найсприятливіше поєднання для високої ефективності інжекції. Наприклад, якщо *n*-шар слабо легований, то рівень Фермі віддалений від зони провідності в об'ємі матеріалу далі, ніж від валентної зони біля поверхні. Іншими словами, бар'єр для електронів буде вищим від бар'єра для дірок. Із напівпровідника в метал протікатиме менша кількість електронів, ніж дірок у протилежному напрямі.

Бар'єри Шотткі доволі просто виготовити: точковий контакт або напилений на поверхню шар утворює бар'єр Шотткі. Тонкий металевий шар може бути одночасно провідним і частково прозорим (для плоскої хвилі). Така структура полегшує емісію світла, емітованого близько від поверхні, однак на практиці вона не використовується ні як *p-n*-перехід, ні як гетероперехід через обмежене пропускання світла металевим електродом та низьку ефективність інжекції неосновних носіїв. З іншого боку, її зручно використовувати для дослідження матеріалів, для яких ще не розроблені технології створення гетеропереходів.

У напівпровіднику ефективність перетворення вхідної електричної енергії (для електролюмінесценції та катодолюмінесценції) чи оптичної енергії (для фотолюмінесценції) в необхідну енергію випромінювання залежить від трьох факторів: 1) збудження надлишкових неосновних носіїв; 2) випромінювальної рекомбінації цих носіїв; 3) виведення генерованого випромінювання з кристала. К.к.д. перетворення енергії для цього процесу можна записати, залежно від цих факторів, виразом

$$\eta \equiv \eta_g \eta_{\text{внут}} \eta_x,$$

де η_g – ефективність перетворення потужності для генерації надлишкових неосновних носіїв;

$\eta_{\text{внут}}$ – внутрішній квантовий вихід випромінювальної рекомбінації неосновних носіїв;

η_x – ефективність виведення фотона в зовнішнє середовище.

Добуток членів $\eta_{\text{внут}}$ та η_x називається зовнішнім квантовим виходом

$\eta_{\text{зовн}}$, отже,

$$\eta_{\text{зовн}} \equiv \eta_{\text{внут}} \eta_x$$

$$\eta \equiv \eta_g \eta_{\text{зовн}}.$$

Характерною для світловипромінювальних діодів є інжекційна люмінесценція зі зміщенням *p-n*-переходу, що дорівнює 2 – 3 В.

Напівпровідникові світловипромінювальні діоди широко використовуються в пристроях відображення інформації. Інформаційні світлодіодні дисплеї (світлодіодні екрани, світлодіодні біжучі рядки, спортивні табло, електронні годинники, термометри, розклади руху поїздів, автобусів, літаків, покажчики напрямку руху транспортних засобів на автомобільних дорогах, табло курсу обміну валют тощо) відображають інформацію, необхідну для населення.

Великий вибір кольорів свічення, комбінація потужного випромінювання з будь-якою формою просторового розподілу та можливість отримання будь-якого відтінку в широкому динамічному діапазоні яскравості відкривають великі перспективи використання світловипромінювальних діодів як джерел світла для цих пристроїв.

Формування пікселя повноколірного світлодіодного інформаційного дисплея. Під час розроблення повноколірних світлодіодних екранів важливим завданням є вибір однотипних характеристик світлодіодів для кожного кольору, вхідного відеопотоку та розподіл відеоданих між модулями та світлодіодами. Розглянемо деякі алгоритмічні, схемні та конструктивні рішення, що лежать в основі побудови цих перспективних пристроїв.

Основним елементом світлодіодного екрана є піксель. Піксель складається із субпікселів – світлодіодів основних кольорів (червоного, зеленого і синього) і може мати різні розміри. При цьому, незалежно від того, скільки діодів використовується в пікселі (один або кілька), він несе в собі інформацію про одну точку зображення. Пікселі розміщені у вузлах прямокутної сітки екрана, тому можна говорити про розмір пікселя та про крок пікселів у полі екрана. Звичайними значеннями кроку між пікселями у світлодіодних модулях для зовнішніх дисплеїв є 10 – 15, 20 – 25, 30 – 38 міліметрів (рис. 3.4).

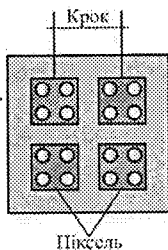


Рисунок 3.4 – Фізичний піксель, наприклад, 1R-2G-1B
(1 червоний – 2 зелених – 1 синій)

Існує два типи світлодіодів, які використовуються для створення інформаційних дисплеїв. Це так звані RGB-світлодіоди, у яких в одному корпусі міститься три світлодіоди (рис. 3.5, а, б) та окремі (дискретні) світлодіоди (рис. 3.5, в).

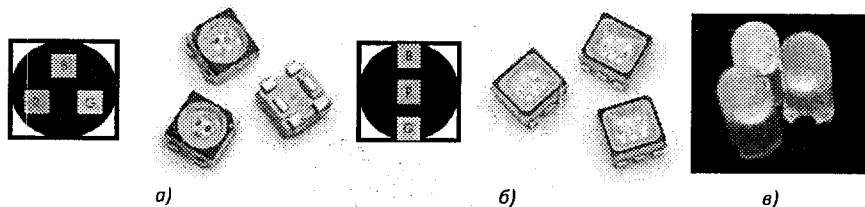


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд світлодіодів "3 в 1":

а – розташування кристалів за схемою "зірка" – світлодіод ASMT-QTBO в корпусі PLCC-4; *б* – лінійне розташування кристалів – світлодіод ASMT-UTBO у корпусі PLCC-6; *в* – дискретних світло діодів

Розташувачи RGB-світлодіоди з однаковим кроком, можна вважати, що кожен такий діод відповідає точці зображення. Цей підхід можна застосувати і для окремих світлодіодів, формуючи з них групи, які розташовуються потім з однаковим кроком (рис. 3.6).

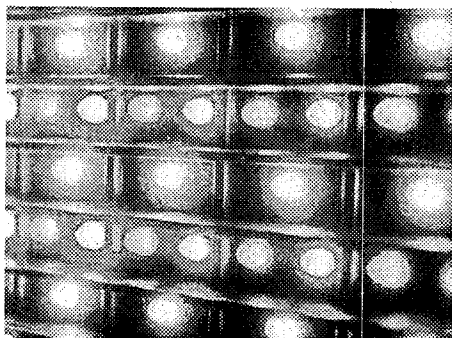


Рисунок 3.6 – Фрагмент повноколірного екрана.
Пікселі складені зі світлодіодів основних кольорів

Однак цей підхід не можна вважати оптимальним. Справа в тому, що, використовуючи особливості зору, можна за рахунок оригінальних алгоритмів керування і застосування так званої технології "віртуального" пікселя знизити собівартість виробу, зменшивши кількість дорогих світлодіодів. У цьому разі кожний світлодіод керується індивідуально і крок розміщення для синіх світлодіодів стає удвічі більшим, ніж крок для червоних і зелених.

Це викликано тим, що роздільна здатність людського ока за яскравістю вища, ніж за кольором, тобто, якщо дивитися на дві точки (червону і зелену), то людина спочатку бачить що їх дві, а тільки потім – що вони різного

кольору, тому існують конструкції світлодіодних екранів, де використовується розташування діодів, показане на рис. 3.7.

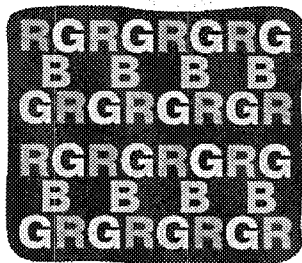


Рисунок 3.7 – Розташування діодів у світлодіодному екрані

У цьому разі сприйнятий крок дорівнює R–G, а не R–R, який вдвічі більший. Крім того, відомо, що око гірше розрізняє синій колір, тому сині діоди розташовуються з більшим кроком.

Для створення дисплеїв великого розміру окремі світлодіоди об'єднуються в світлодіодні модулі – закінчені конструктивні елементи, з яких збирається поверхня світлодіодного дисплея. Такий модуль – це матриця, складена зі світлодіодних пікселів. Кількість пікселів по горизонталі і вертикалі (тобто, роздільна здатність модуля) у світлодіодних модулях переважно однакова і дорівнює степені числа 2. Найчастіше для зовнішніх дисплеїв використовуються світлодіодні модулі розміром 8×8, 16×16, 32×32 і 64×64 пікселів.

На рис. 3.8 подано світлодіодний модуль з 2R1G1B і роздільною здатністю 8×8 пікселів.

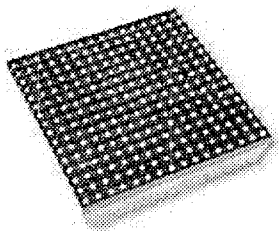


Рисунок 3.8 – Світлодіодний модуль з пікселем 2R1G1B і роздільністю 8×8 пікселів

Чим менший крок між пікселями світлодіодного модуля, тим вища роздільна здатність дисплея, побудованого з цих модулів при однакових лінійних розмірах екрана.

Основні характеристики світлодіодних модулів:

- крок – відстань між пікселями;
- яскравість світлодіодного модуля (кандела/кв. м або ніт);
- кути огляду по горизонталі та вертикалі;
- кількість світлодіодів червоного, зеленого і синього кольорів, що утворюють піксель;
- роздільна здатність – кількість пікселів по горизонталі і вертикалі;
- лінійні розміри – ширина та висота;
- конструкція – для зовнішнього чи внутрішнього застосування;
- потужність споживання.

Технічні характеристики світлодіодних модулів подано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики світлодіодних модулів

Характеристики модуля	Тип модуля				
	LM15-16×16 RGB	LM19-16×16 RGB	LM22-16×16 RGB	LM30-8×8 RGB	LM38-8×8 RGB
Тип модуля	Для зовнішніх і внутрішніх відеоекранів				
Склад пікселя	1R1G1B	1R1G1B	1R1G1B	1R1G1B	1R1G1B
Кількість пікселів	16×16	16×16	16×16	8×8	8×8
Крок пікселів, мм	15	19	22	30	38
Розміри, мм	240×240	304×304	352×352	240×240	304×304
Яскравість, кд/м ²	8000±10%	7000±10%	5000±10%	5000±10%	5000±10%
Кути огляду в градусах					
– по горизонталі	120	120	120	60	60
– по вертикалі	60	60	60	45	45
Вага модуля, кг	2,0	2,2	2,0	1,5	1,7
Потужність споживання	80	80	80	20	20

Примітка. У таблиці прийнято загальноприйняті позначення моделей світлодіодних модулів: LMXX-YY×YY, де LM – світлодіодний модуль, XX – крок між пікселями в мм, YY×YY – кількість пікселів у модулі по горизонталі та вертикалі – роздільна здатність модуля.

Одним із варіантів побудови пікселя є так званий віртуальний піксель, який формується програмно-апаратним способом з набору світлодіодів, що належать сусіднім "фізичним" пікселям (рис. 3.9). Використання "віртуального" пікселя дає змогу збільшити роздільну здатність екрана в динамічному режимі (під час демонстрації рухомих об'єктів) і, як правило, поліпшити якість зображення.

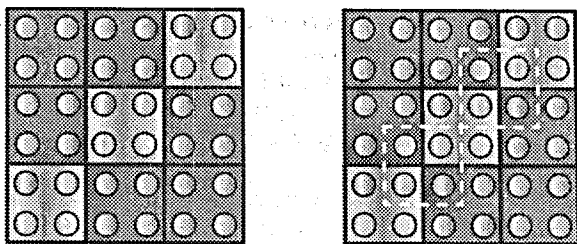


Рисунок 3.9 – Фізичний піксель 1R-2G-1B і віртуальний піксель (позначений білою пунктирною лінією) 1 червоний-2 зелених-1 синій

"Віртуальний" і "фізичний" пікселі демонструються в різних кадрах – за рахунок інерційності зорової системи людини виникає відчуття подвоєння роздільної здатності екрана.

Зазначимо, що технологія "віртуального" пікселя в класичному вигляді застосовна лише в матричних світлодіодних екранах з пікселями, складеними з 4 світлодіодів, розташованих на однакових відстанях один від одного, і не може використовуватись в екранах, які мають структуру пікселя з 3 світлодіодів або з SMD-світлодіода "3-в-1".

Незважаючи на деякі переваги, технологія "віртуального" пікселя дає змогу поліпшити якість виведеної на екран інформації лише в деяких випадках (сюжетні картинки з плавними переходами яскравості чи відеоінформація). У більшості випадків, особливо це стосується зображень з різкими кольорними переходами, на екрані можуть виникати кольорні артефакти, а частина інформації може взагалі втрачатися.

Формування зображення для кожного кольору проводиться за допомогою так званих схем скейлування (з англ. *scaling* – шкалування, масштабування). У світлодіодному екрані реалізована технологія адаптивного скейлування. На відміну від існуючих екранів, де світловипромінювальні елементи червоного, зеленого та синього кольорів, що утворюють білий колір, розташовані з однаковим кроком, у цьому екрані світловипромінювальні елементи кожного кольору розташовані з різним кроком. Крок світловипромінювальних елементів вибрано з урахуванням особливостей кольорного зору людини. Це дає змогу збільшити крок зелених і синіх світлодіодів без погіршення видимої роздільної здатності.

Важливим під час проектування екранів є врахування психофізіологічних особливостей зору людини. Так, наприклад, якщо на освітлену поверхню з яскравістю I падає додаткове освітлення dI , то, згідно з відомим законом Вебера, людина помітить різницю в освітленості, тільки якщо $dI/I = K$, де K – константа, що дорівнює 0,01 – 0,015. Величину dI/I називають диференціальним порогом світлової чутливості. Відношення dI/I при різному освітленні постійне і означає, що для сприйняття різниці в освітленості двох поверхонь одна з них повинна бути яскравіша за іншу на

1–1,5%. Стосовно екрана це означає, що схема керування для забезпечення високих характеристик сприйняття зображення повинна "відпрацьовувати" середній рівень яскравості та коригувати сигнали керування світлодіодами.

Індивідуальне керування яскравістю кожного світлодіода дало змогу забезпечити й інші переваги запропонованого табло. Якщо для проєкційних систем нерівномірність яскравості виражається, переважно, в зменшенні яскравості на краях системи, то для світлодіодних екранів на перше місце виходить нерівномірність яскравості пікселів. Це пов'язано з тим, що інформаційне поле екрана складається з окремих світлодіодів, які завжди мають технологічний розкид у силі випромінюваного світла. Виробники світлодіодів поділяють їх на ранги, в межах кожного з яких випромінювана сила світла відрізняється не більше, ніж на 15 – 30%.

Зір людини більш чутливий до детальних відхилень яскравості, ніж до загальних. Так, наприклад, якщо для нормального зору зменшення яскравості на краях екрана на 30% майже непомітне, то розкид яскравості двох сусідніх ділянок зображення навіть на 5% фіксується відразу. Така детальна нерівномірність яскравості проявляється в так званій грануляції зображення, а для більших нерівномірних ділянок – у плямистості зображення. Сьогодні за допомогою схемотехнічних методів можна вирівнювати яскравість окремих світлодіодів з точністю до 2 – 5%.

Іншим джерелом нерівномірності яскравості може стати неоднакова орієнтація світлодіодів у полі екрана, що призводить до зміщення індикатрисипроменювання. Для усунення цього дефекту застосовується спеціальне конструктивне рішення: жорстка фіксація світлодіодів, яка забезпечує постійність випромінювання в заданому напрямку.

Вплив індикатрисипроменювання на якість відображення інформації. Незважаючи на велику кількість модифікацій конструкцій випромінювальних кристалів, не можна однозначно віддати перевагу будь-якій одній. Якщо не брати до уваги якість самого виробництва кристалів та дотримання технологічних процесів під час їх виробництва, то вибір визначається, як правило, на підставі конструкції оптичної системи світлодіода, в якій працює випромінювальний кристал і завдання, яке згодом повинен вирішувати цей світлодіод.

У пристроях відображення інформації світлодіоди зібрані в групи (кластери) та не працюють поодиноці. Найважливішою умовою вибору світлодіодів є ідентичність великої кількості характеристик приладів усіх використовуваних кольорів одночасно (якщо мова йде про повноколірні системи). Інакше будуть порушені умови правильного передавання кольору та лінійності яскравості пристрою залежно від кута огляду.

Зараз у конструкціях світловипромінювальних діодів найчастіше застосовуються овальні лінзи, які дають змогу формувати просторовий розподіл з істотною різницею кутів випромінювання в горизонтальній і вертикальній площинах.

Іноді для досягнення такого ефекту та забезпечення максимальної рівномірності діаграми в матеріал лінзи локально чи по всьому об'єму вводиться диспергатор. У результаті виходить доволі раціональна конструкція: з одного боку, широкий (як правило, 110 градусів на рівні 0,5) кут розсіювання в горизонтальній площині дає можливість побудувати екран, зображення на якому можна спостерігати без спотворень під великими кутами в цій площині, з іншого боку, невеликий вертикальний кут розсіювання (30 – 50 градусів на рівні 0,5) обмежує поширення світлового потоку в простір, де немає спостерігачів. Отже, весь світловий потік від кристала рівномірно направляється до спостерігача. Складність полягає в тому, що розподіл світлового потоку всередині діаграми випромінювання світлодіодів різного кольору світіння рідко буває однаковим, хоча кутові характеристики на рівні 0,5, вказані в специфікаціях, збігаються. Це пов'язано з особливістю конструкцій кристалів, їхніми геометричними розмірами, правильно підбраною оптикою, процентним вмістом диспергатора в матеріалі лінзи тощо. Невиконання цієї умови призводить до появи описаних спотворень зображення, сформованого кластером з таких світлодіодів (рис. 3.10). Тому важливо зрозуміти, що побудова якісного пристрою відтворення повноколірного зображення, де відбувається змішування кольорів і формування відтінків, неможлива без урахування характеристик розподілу світлового потоку всередині діаграми просторового розподілу випромінювання. Ця умова стосується також умови мінімального розкиду інтенсивностей випромінювання всіх світлодіодів одного кольору, невиконання якої проявляється у вигляді нерівномірного засвічування поля екрана.

На рис. 3.10 чорним кольором показано діаграму в режимі балансу білого, близького до джерела D65, іншими кольорами – діаграми відповідних кольорів світлодіодів. Показано розходження в направленості випромінювання кожного світлодіода відносно оптичної осі кластера

Наступним кроком у розробленні конструкцій світлодіодів для систем відображення інформації високої якості стали багатокристалні світлодіоди з різним кольором випромінювання та повноколірний (RGB, Full Color) прилад, що містить три кристали в одному корпусі (див. рис. 3.5, а, б), який уможливує формування будь-якого відтінку світіння (зокрема білого) як результат матрицювання трьох кольорів.

Кристали розташовані на одній спільній підкладці і перебувають один від одного на відстані, не більшій 1 – 3 їхніх лінійних розмірів. Саме з використанням таких приладів стала можливою відмова від кластерів під час виготовлення повноколірних екранів з високою роздільною здатністю. Розмір пікселя при цьому дорівнює розміру одного світлодіода, а змішування кольорів взагалі відбувається в точці розміром приблизно $0,8 \times 0,3$ мм. До того ж, через розташування на одній підкладці, всі три кристали мають однакову температуру в будь-який момент часу, тому всі теплові залежності їхніх параметрів мають однаковий характер, незалежно від великої різниці прямих струмів, і не впливають на результуючий колір та інтенсивність,

сформовані в цей момент системою керування (на відміну від кластерів на дискретних світлодіодах, де немає єдиної термостабілізації). Максимальний ефект цієї властивості проявляється під час формування та відтворення білого кольору з великою частотою зміни полів.

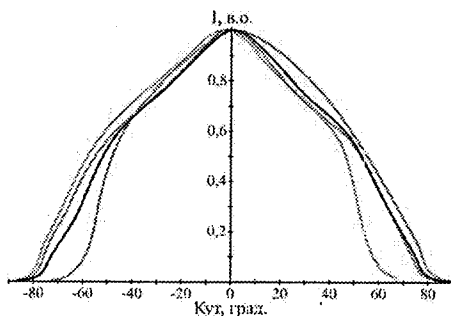


Рисунок 3.10 – Відносна діаграма просторового розподілу сили світла кластера з трьох світлодіодів R, G, B з овальною оптикою та лінійним розташуванням світлодіодів у горизонтальній площині

Як правило, такі світлодіоди виконуються у вигляді безвивідних елементів для SMD-монтажу і практично не мають оптичної системи, яка формує специфічну діаграму направленості, тому вона наближається за формою до $\cos \theta$. Однак взаємне геометричне розташування кристалів все-таки вносить спотворення в рівномірність змішування світлових потоків, що призводить до "замальовування" екрана при зміні кута спостереження (рис. 3.11).

Але, порівняно зі світлодіодами з овальною оптикою, якість рівномірності розподілу набагато вища на віддалених від оптичної осі кутах, відповідно, більший і кут спостереження без спотворень. Проте у таких світлодіодів існує проблема з упорядкуванням ідентичності параметрів кристалів, про яку говорилося вище – адже необхідно, щоб усі три кристали були за параметрами дуже близькі до відповідних у інших світлодіодах. Домогтися такого поєднання необхідно вже на етапі монтажу кристалів у корпус, інакше вихід приладів з близькими параметрами буде невисокий у всій партії. Це доволі складно з технологічної точки зору і призводить до подорожчання продукту. Як правило, за основу вибирається параметр, який можна скорегувати вже у складі світлодіода, – сила світла. Колірні характеристики кристалів тестуються і розділяються ще до монтажу. Згодом інтенсивність світіння кожного кристала кожного світлодіода у складі табло, наприклад, доводиться до однакового значення програмними засобами чи корекцією живлення. У такий спосіб реалізовується ідентичність характеристик у трикристалних світлодіодах, використовуваних групами.

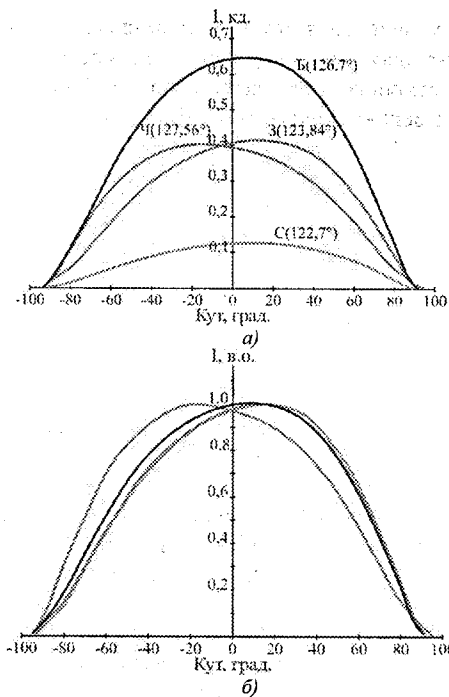


Рисунок 3.11 – Абсолютна (а) та відносна (б) діаграми просторового розподілу сили світла трикристального RGB-SMD-світлодіода LM1-TPP1-01 TQ фірми COTCO з дельтоподібним розташуванням кристалів усередині корпусу. Показано розходження в направленості випромінювання відносно оптичної осі

Дослідження індикатрис випромінювання дискретних світлодіодів і світлодіодів конструкції "3 в 1" показало, що доцільно створити такий оптичний елемент, де формування кольору відбувалося б в одній і тій самій площині, тобто просторовий розподіл інтенсивності для кожного базового кольору залишався однаковим.

Принцип роботи світлодіодних екранів. Розглянемо докладніше принцип роботи світлодіодного екрана (рис. 3.12). Світлодіодний екран складається з:

- набору світлодіодних модулів, що утворюють поле світлодіодного екрана;
- системи керування світлодіодним екраном – комп'ютер, відеопроцесор та контролери;
- системи електроживлення модулів і контролерів.

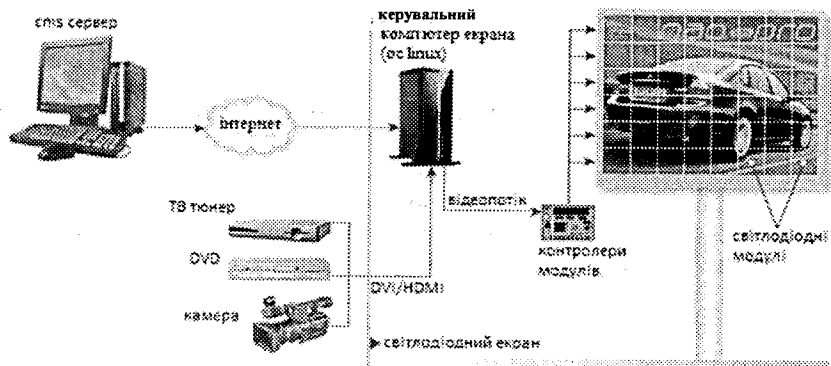


Рисунок 3.12 – Блок-схема світлодіодного екрана і системи керування

Система керування світлодіодним екраном ніби "розбиває" все зображення на окремі "шматочки", кількість яких дорівнює кількості світлодіодних модулів відеоекрана, і передає через контролери кожен "шматочок" відповідному світлодіодному модулю для відображення. У такий спосіб на світлодіодному екрані формується ціле зображення.

Система керування світлодіодним екраном забезпечує як показ заздалегідь підготовлених рекламних відеороликів за заданим розкладом, так і можливість роботи від зовнішніх джерел відеосигналу, включаючи роботу в режимі прямої відеотрансляції від телевізійних камер. Роботу світлодіодного екрана від зовнішніх джерел забезпечує відеопроцесор.

Ще одну важливу функцію виконує система керування світлодіодним екраном. Вона має програмний модуль "віртуального пікселя", що забезпечує покращення якості зображення на світлодіодному екрані.

Керувальний комп'ютер світлодіодного екрана, який не тільки керує екраном, але і є сервером контенту (реklamних роликів), має можливість віддаленого керування через ВОЛЗ або Інтернет, що дає змогу змінювати розклад показу на світлодіодному екрані необхідних матеріалів та оновлювати вміст контенту.

Завдяки можливості віддаленого керування через Інтернет декілька окремих, віддалених один від одного світлодіодних екранів можуть бути об'єднані в мережу світлодіодних екранів з керуванням з єдиного центру.

Розділ 4 РІДКОКРИСТАЛЧНІ ДИСПЛЕЇ

Серед світломодулювальних дисплеїв найбільш поширені рідкокристалічні (LCD) дисплеї [6 - 11]. У 1967 році Ричард Вільямс отримав патент на електрооптичний елемент із використанням рідкокристалічної речовини. На рис. 4.1 показано конструкцію типового LCD дисплея з матричною адресацією. У своєму патенті Вільямс розглянув дисплей, який працює як на пропускання, так і на відбивання світла.

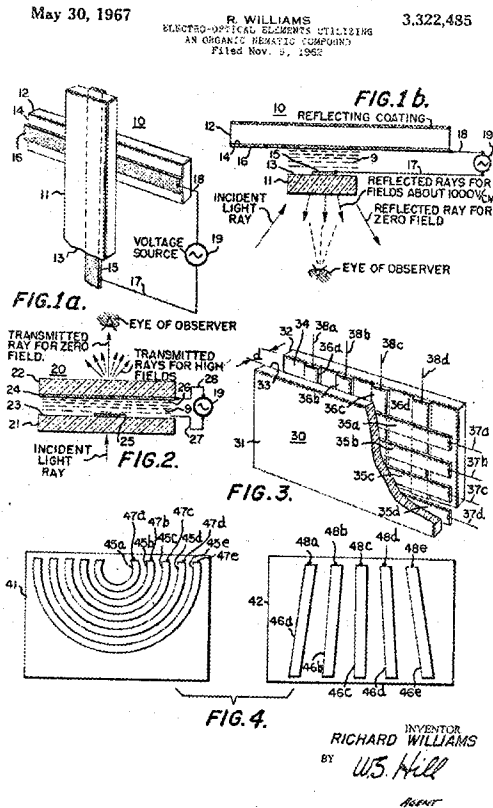


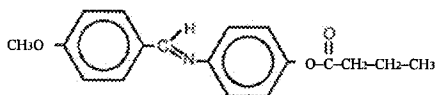
Рисунок 4.1 – Сторінка з оригіналу патенту США №3322485, отриманого Ричардом Вільямсом

Основний недолік розглянутого дисплея – висока робоча температура рідкокристалічної речовини. Тому необхідним елементом у ньому була на-

грівна пластина. Пізніше було розпочато дослідну програму із синтезу нових матеріалів, які працювали б у широкому діапазоні температур, близьких до кімнатних.

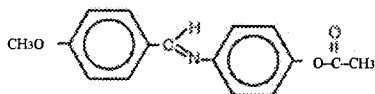
На початку 1965 році Джордж Хейлмейер розпочав проект зі створення плоского дисплея з використанням рідкокристалічних речовин, мезоморфна фаза яких існує при кімнатній температурі. Джордж Хейлмейер продовжив досліджувати електрооптичні властивості різних рідкокристалічних матеріалів та конфігурації LC комірок. Розпочалося створення різноманітних дисплеїв, переважно на основі семисегментних індикаторів, щоб продемонструвати потенціал LCD для використання в наручних годинниках та електронних затворах.

У 1966 році синтезовано рідкокристалічні матеріали, які мали широкий температурний інтервал існування мезофаз, включаючи кімнатну температуру. До складу такої нематичної рідкокристалічної суміші входили матеріали, які при кімнатній температурі не мали рідкокристалічної фази (рис. 4.2).



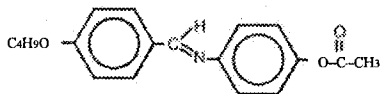
Діапазон: 50 – 113 °C

a)



Діапазон: 81 – 110 °C

b)



Діапазон: 82 – 113 °C

c)

Рисунок 4.2 – Структура першої нематичної рідкокристалічної суміші, мезофаза якої існує при кімнатній температурі

У 1966 році розпочалась робота зі створення LCD дисплеїв з матричною адресацією. Такий дисплей складався з окремих рідкокристалічних комірок. Керування оптичними властивостями LC комірок здійснювалося двома діодами з конденсатором. Схема матричної адресації (рис. 4.3)

отримала назву D^2C , а її варіанти використовувались у LCD виробництві у 90-х роках.

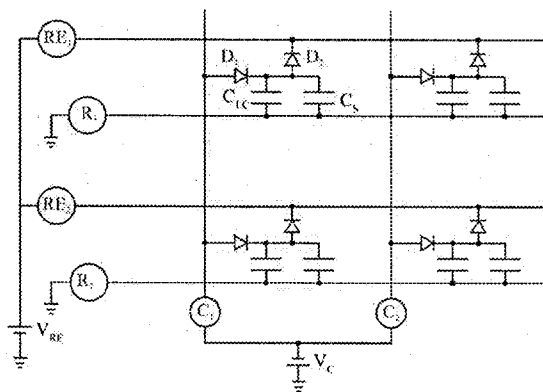


Рисунок 4.3 – Схема адресації D^2C

У подальших розробках діоди були замінені на польові транзистори (рис. 4.4). Водночас велась робота над створенням тонкоплівкових польових транзисторів, а також розроблялась технологія інтегральних схем на монолітному кремнії та технологія кремнії на сапфірі. Рідкокристалічний матеріал, що використовувався в дисплеї, мав час ввімкнення 3 – 4 мкс та вимкнення 50 мкс при кімнатній температурі.

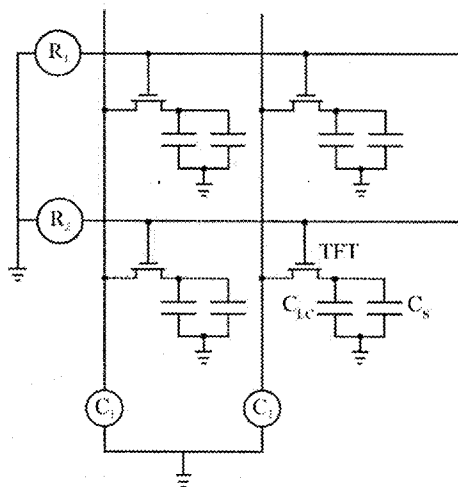


Рисунок 4.4 – Схема адресації з польовим транзистором

У 1968 році був створений матричний дисплей, який складався з 2×18 пікселів з інтеграцією схеми керування в кожен елемент матриці (піксель) дисплея та порядковою схемою адресації. Першим важливим комерційним застосуванням матричних LCD стали портативні комп'ютери (ноутбуки).

Назва «рідкокристалічний дисплей» говорить про те, що робочою речовиною в таких дисплеях є рідкі кристали. Розглянемо рідкокристалічний стан речовини.

Рідкокристалічний стан речовини. Рідкокристалічний стан – це проміжний стан (*мезофаза*) між ізотропною рідиною та кристалічним твердим тілом. Рідкими кристалами називають речовини з упорядкованими в певний спосіб молекулами, в яких існує анізотропія механічних, електричних, магнітних та оптичних властивостей. У рідких кристалах поєднуються властивості рідин і твердих тіл. Речовини, які можуть утворювати рідкокристалічні фази (*мезофази*), називають *мезогенними* або *мезогенами*. Рідкокристалічні фази утворюються речовинами, які мають *анізотричні* молекули (тобто такі, в яких істотною є різниця між довжиною та шириною). Рідкокристалічний стан речовини існує в певному температурному інтервалі, який може змінюватись у широких межах, включаючи кімнатні температури. Цей температурний інтервал називається *температурним інтервалом існування мезофази*. Якщо рідкі кристали утворюються внаслідок нагрівання твердої речовини, то це термотропні РК.

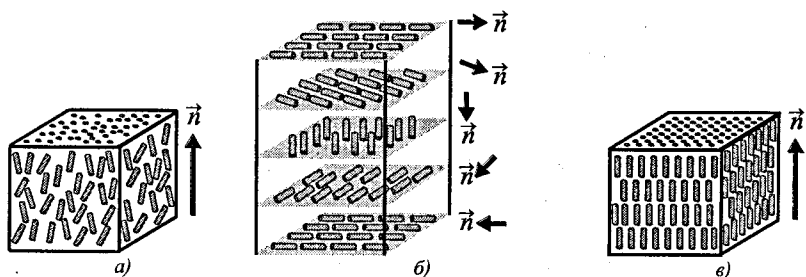


Рисунок 4.5 – Схематичне розташування молекул і напрямку орієнтації директора \vec{n} у термотропних рідких кристалах:
 а – нематичний; б – холестеричний; в – смектичний

Термотропні РК характеризуються температурою плавлення $T_{пл}$ та температурою просвітлення $T_{пр}$ або температурою переходу в ізотропну рідину $T_{із}$, отже, інтервал існування мезофази перебуває в діапазоні від $T_{пл}$ до $T_{пр}$.

Існують три типи термотропних рідких кристалів: нематичні, холестеричні та смектичні. Для характеристики розташування молекул у мезофазах вводять одиничний вектор \vec{n} , який вказує напрямок переважної орієнтації довгих осей молекул, – *директор*. Типове схематичне зображення ро-

зташування молекул і напрямку орієнтації директора \vec{n} у шарі для трьох типів термотропних рідких кристалів показано на рис. 4.5.

Типова структура молекули рідкого кристала на основі бензольних кілець показана на рис. 4.6.

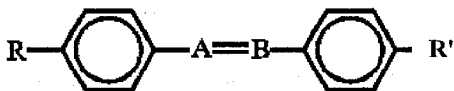


Рисунок 4.6 – Типова структура молекули РК на основі бензольних кілець

Нематичні рідкі кристали (НРК) отримали свою назву від грецького слова “ημεα”, що означає нитка. Особливістю нематичного рідкого кристала є довільне розташування молекул, яке, однак, має загальну тенденцію встановлюватись паралельно до директора \vec{n} (рис. 4.5, а). Прикладом нематичних рідких кристалів є *n*-азоксанизол (ПAA) і *N*-(*n*-метоксибензиліден)-*n*-бутиланілін (МББА), структурні формули молекул яких наведено на рис. 4.7 і 4.8.

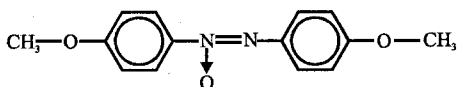


Рисунок 4.7 – Структура молекули ПAA

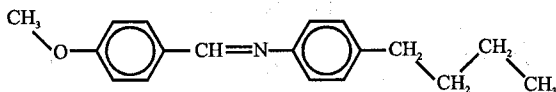


Рисунок 4.8 – Структура молекули МББА

Основною ознакою нематичних рідких кристалів є наявність орієнтаційного впорядкування. Ступінь орієнтаційного порядку в розташуванні молекул описується параметром порядку *S*. Він залежить від температури – з підвищенням температури значення параметра порядку зменшується, що пояснюється відхиленням орієнтації молекул від заданої початкової.

Відхилення директора \vec{n} від рівноважного положення називається деформацією, а сили пружності, які протидіють цій деформації – напруженням. Якщо деформації незначні, виконується закон Гука, згідно з яким напруження пропорційне деформації. У рідких кристалах існують три види деформації (рис. 4.9): поперечний згин, кручення та поздовжній згин. Вони описуються трьома константами – K_{11} , K_{22} і K_{33} . Ці константи визначають поведінку рідкокристалічних речовин в електричних і магнітних полях.

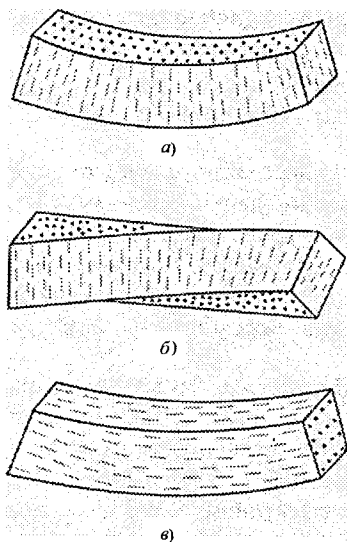


Рисунок 4.9 – Види деформації в рідких кристалах: а) поперечний згин “splay”; б) кручення, “torsion”; в) поздовжній згин “bend”

Анізотропія властивостей нематичних рідких кристалів. Нагадаємо, що рідкокристалічний стан виникає за певних умов в органічних речовинах з анізотричними молекулами, тобто молекулами, що мають явно виражену протяжність в одному з напрямів. Фізичні властивості такої молекули будуть анізотропними – неоднаковими вздовж довгої осі молекули та перпендикулярно до неї. Анізотропні властивості молекули визначають анізотропні властивості НРК.

Так, анізотропія показника заломлення (Δn) дорівнює $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$, анізотропія діелектричної проникності – $\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, анізотропія електропровідності – $\Delta \sigma = \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}$. Значення анізотропії можуть бути як додатними, так і від’ємними. Тут індекси “ \parallel ” і “ \perp ” відповідають значенням відповідних величин вздовж та поперек довгої осі молекули рідкого кристала. При цьому значення цих величин прямують до 0, тобто в ізотропній рідині, внаслідок усереднення за всіма напрямками, анізотропія властивостей відсутня, незважаючи на анізотропність молекул.

Особливостями оптичних властивостей нематичних рідких кристалів є двозаломлення та оптична активність. У НРК оптична анізотропія може бути одновісною та двовісною. Особливістю оптичних властивостей одновісного рідкого кристала є наявність у нього двох основних показників заломлення. Один з них (n_o) характеризує поширення звичайної світлової хвилі, електричний вектор якої перпендикулярний до оптичної осі, другий

(n_e) – поширення незвичайної лінійно поляризованої світлової хвилі, електричний вектор якої паралельний оптичній осі. Величина двозаломлення характеризується різницею:

$$\Delta n = n_e - n_o = n_{\parallel} - n_{\perp}.$$

Оскільки на практиці переважно $n_{\parallel} > n_{\perp}$, то нематичний рідкий кристал характеризується додатним двозаломленням ($\Delta n \geq 0$). Найхарактерніші значення показників заломлення для нематиків у видимій області спектра перебувають у межах від 1,4 до 1,9. Показник двозаломлення Δn , залежно від типу матеріалу може змінюватися в широких межах – від 0,02 до 0,5. Значення Δn визначає можливості практичного застосування НРК в дисплеях.

Холестеричні рідкі кристали (ХРК). Молекули холестеричних рідких кристалів не мають центра симетрії. Таку молекулу не можна сумістити саму з собою простим накладанням, так само, як праву і ліву руки, тому вони називаються хіральними (від грецького слова $\chi\epsilon\iota\rho$ – рука). Холестерична структура на молекулярному рівні дуже нагадує нематичну, однак до неї входить, наприклад, один або декілька асиметрично розташованих атомів вуглецю. Така конфігурація призводить до деякого відхилення напрямку довгої осі молекули в кожному наступному шарі, порівняно з попереднім, яке накопичується із проходженням шарів так, що відхилення осей молекул утворює загалом спіраль. Якщо рухатись вздовж осі, перпендикулярної до площини шарів, то через певну їх кількість орієнтація молекул стає такою самою, як і в першому шарі. Отже, молекула обертається навколо осі на 360° . Віддаль між двома найближчими шарами, у яких молекули спрямовані в одному напрямку, називається кроком спіралі та позначається P_0 . Рідкокристалічні сполуки утворюють просторову спіраль, тобто структуру, що характеризується гвинтовою віссю симетрії, розташованою нормально до переважаючого напрямку орієнтації молекул (рис. 4.5, б). Класичним прикладом молекули холестеричного рідкого кристала є молекули ефірів холестерину, загальна формула яких зображена на рис. 4.10.

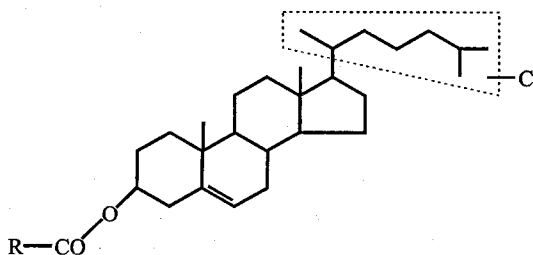


Рисунок 4.10 – Загальна формула молекули ефірів холестерину

Прикладом речовини, що утворює холестеричний стан, є холестерилбензоат (рис. 4.11).

Холестеричні рідкі кристали мають великий, порівняно з розміром молекул, крок спіралі P_0 , який залежить від природи молекул і зовнішнього впливу (рис. 4.12).

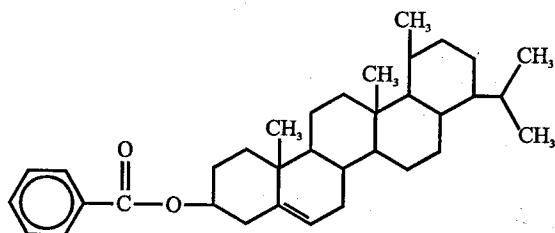


Рисунок 4.11 – Структура молекули холестерилбензоату

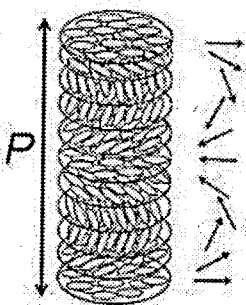


Рисунок 4.12 – Крок спіралі холестеричного рідкого кристала

Отже, компоненти директора можна записати у вигляді:

$$n_x = \cos\varphi, n_y = \sin\varphi, n_z = 0,$$

де n_x , n_y і n_z – напрям директора,

φ – кут закручування, який можна виразити через величину хвильового вектора q_0 спіралі, причому вісь спіралі напрямлена вздовж осі z :

$$\varphi = q_0 z + \text{const},$$

де $q_0 = 2\pi/\lambda$.

Періодична спіральна структура ХРК визначає їхню унікальну властивість, а саме, селективне відбивання світла, тобто відбивання світла певних довжин хвиль. Спектральна характеристика світла, відбитого від періодич-

ної спіральної структури ХРК, має максимум (λ_0) та півширину ($\Delta\lambda_0$), які при нормальному падінні світла описуються формулами:

$$\lambda_0 = \bar{n} \times P_0, \quad \Delta\lambda = \Delta n \times P_0,$$

де $\bar{n} = \sqrt{(2 \times n_{\perp}^2 + n_{\parallel}^2)}/3$ – середнє значення показника заломлення.

Смектичні рідкі кристали (СРК). Таку назву смектичні рідкі кристали отримали від грецького слова (σμηγμα – мило). Прикладом молекули смектичного рідкого кристала може бути молекула терофтал-біс-(*n*-бутиланіліну) ТББА (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Структура молекули терофтал-біс-(*n*-бутиланілін) ТББА

Розрізняють три основні типи смектичних рідких кристалів, які позначаються буквами А, В і С.

Смектики А. Розташування молекул у смектику А показано на рис. 4.14. До першої підгрупи належать смектики, в яких довгі осі молекул перпендикулярні до смектичних шарів. Ці рідкі кристали називають смектиками А та позначають S_A . Всередині шару молекули можуть переміщуватись у двох напрямках і обертатися навколо довгої осі.

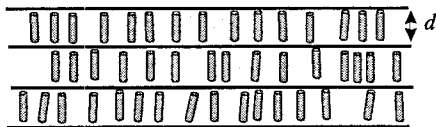


Рисунок 4.14 – Розташування молекул у смектику А (d – товщина шару смектичного рідкого кристала)

Основними характеристиками смектика А є:

- шарувата структура, причому товщина шарів d близька до довжини молекул;
- всередині кожного шару центри маси не мають дальнього порядку; кожний шар є двовимірною рідиною;
- оптично одновісна система з оптичною віссю, перпендикулярною до площини шарів.

У більшості смектиків А товщина шарів дорівнює довжині молекули РК і становить 20 – 30 Å.

Смектики В. У смектику В шари характеризуються періодичністю та жорсткістю двовимірного твердого тіла. Смектичні В фази є найбільш

впорядкованими з трьох типів смектичних РК. У смектиках В центри мас молекул у шарах розміщені у вузлах гексагональної гранецентрованої ґратки, а директор скерований перпендикулярно до шарів.

Смектики С. У смектику С довгі осі молекул нахилені під кутом θ відносно нормалі до шарів (рис. 4.15).

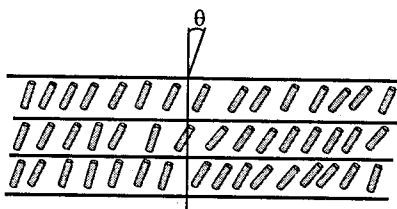


Рисунок 4.15 – Похиле розташування молекул у смектику С (θ – кут нахилу молекул до площини смектичного шару)

Якщо до смектика С додати холестеричний рідкий кристал, то в ньому виникає спіральна структура, яка характеризується певною величиною кроку (рис. 4.16). Якщо молекули мають дипольний момент, то такі структури мають сегнетоелектричні властивості та позначаються як S^* .

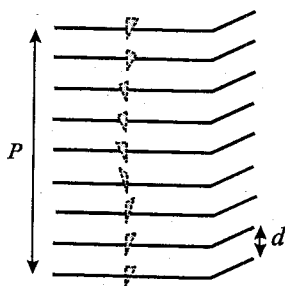


Рисунок 4.16 – Закручування, викликане в смектику S^* наявністю хіральної домішки (d – товщина шару смектичного рідкого кристала)

У рідкокристалічному сегнетоелектрику дипольні моменти молекул перпендикулярні до довгої осі. Якщо хіральні молекули мають дипольний момент, направлений перпендикулярно до довгих осей молекул, спостерігається спонтанна поляризація. Сегнетоелектричні властивості смектика S^* пов'язані зі спонтанною впорядкованістю постійних дипольних моментів молекул у смектичних шарах. Термодинамічно рівноважна конфігурація довгих осей молекул (директора) смектика S^* зображена на рис. 4.17, а.

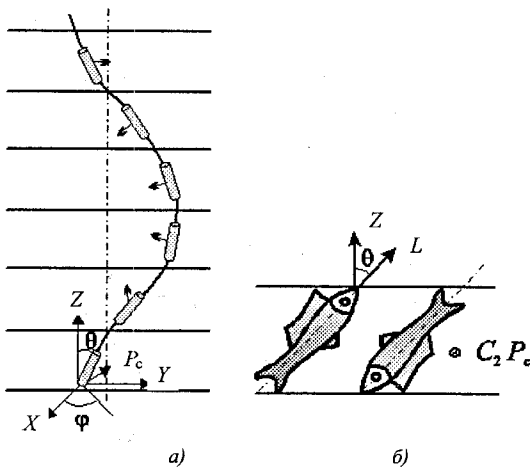


Рисунок 4.17 – Розташування молекул та дипольних моментів у смектичних шарах:

- a* – закручування директора L у смектику C^* навколо гелікоїдальної осі Z , перпендикулярної до смектичних шарів;
- б* – мікроскопічна модель пакування хіральных молекул у шарі смектика C^* – сегнетоелектричні “риби” де Жена

На рис. 4.17 позначено: спонтанна поляризація P_c смектика C^* перпендикулярна до директора L і нормалі до шарів Z . Кут θ характеризує нахил директора в шарі, ϕ – гелікоїдальне закручування, P_0 – рівноважний крок гелікоїда.

Хіральні молекули у смектичному шарі смектика C^* щільно упаковані, як показано на рис. 4.17, б, де вони зображені у вигляді “риб”. Найщільнішому пакуванню відповідає таке розміщення “риб”, коли їхній великий “плавник” торкається межі смектичного шару. Поляризацію P одного смектичного шару можна обчислити за формулою:

$$P = P_c \cdot [LZ].$$

Класичним прикладом смектика C^* є *n*-децилоксибензиліден-*n*-аміно-2-метилбутилциннамат (ДОБАМБЦ).

Перспективним є створення смектика C^* із широким температурним інтервалом, малою в'язкістю та великою спонтанною поляризацією. Найперспективнішим у цьому разі є не синтез окремих смектиків C^* речовин із заданою формулою молекули, а створення багатокомпонентних C^* сумішей, у яких смектична C матриця характеризується малою в'язкістю, хімічно-, фото- та термостабільністю, добре орієнтується та існує в широко-

му температурному інтервалі, а мезогенна (або немезогенна) закручувальна домішка забезпечує утворення сегнетоелектричного гелікоїда та більшу величину спонтанної поляризації.

Основними фізичними параметрами, які характеризують електрооптичні властивості смектиків C^* , є:

- кут нахилу директора в шарі;
- величина кроку;
- діелектрична анізотропія;
- оптична анізотропія;
- модулі пружності;
- енергія зчеплення з підкладкою.

На основі смектиків C^* створено пристрої з поверхневою стабілізацією сегнетоелектричного РК.

LCD дисплеї – це матриця РК комірок типу сандвіч (sandwich). Конструкція такої комірки подана на рис. 4.18. Вона складається з двох скляних пластин, на внутрішні поверхні яких нанесено прозорі електропровідні плівки на основі оксиду індію In_2O_3 чи оксиду олова SnO_2 або їхньої суміші ІТО (Indium tin oxide). Електропровідний шар має бути хімічно нейтральним до рідкого кристала та мати мінімальний коефіцієнт відбиття, а його питомий поверхневий опір повинен міститися в діапазоні $100 - 500 \text{ Ом/см}^2$. Відстань між скляними пластинами (тобто товщина шару рідкого кристала) задається за допомогою діелектричних прокладок (spacers), таких як слюда, тефлон, поліетилен, керамічні кульки тощо.

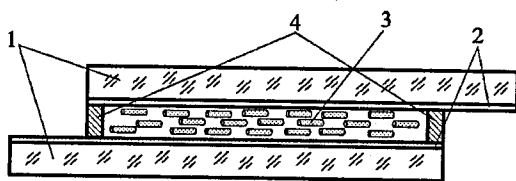


Рисунок 4.18 – Типова рідкокристалічна комірка:

- 1 – скляні пластини; 2 – прозорі електроди; 3 – молекули рідкого кристала;
4 – діелектричні прокладки

Орієнтація шару РК створюється декількома способами: механічною обробкою поверхні підкладки; нанесенням орієнтувальних покриттів (з можливою подальшою механічною обробкою); введенням у РК орієнтувальних домішок; внесенням у шар РК мономерів з подальшою полімеризацією. Коли переважаюча орієнтація довгих осей молекул, яка задається директором \vec{n} рідкого кристала, скерована паралельно скляним підкладкам, ми отримуємо *планарну* орієнтацію (рис. 4.19, а), коли вона перпендикулярна до підкладок, маємо *гомеотропну* орієнтацію (рис. 4.19, б), можлива також *похила* орієнтація або орієнтація *під кутом* θ (рис. 4.19, в).

Для конкретного зразка рідкого кристала положення директора визначається граничними умовами, а також зовнішніми полями, використовуючи які можна отримати однорідну в усьому кристалі орієнтацію директора.

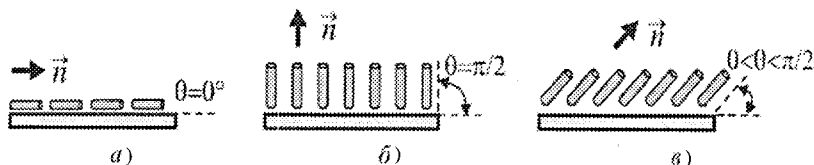


Рисунок 4.19 – Схематичне зображення орієнтації рідкокристалічних молекул і напрямку директора:

a – планарна орієнтація; *b* – гомеотропна орієнтація; *c* – похила орієнтація

Електрооптичні ефекти, що використовуються в дисплеях. Першим електрооптичним ефектом, який почали застосовувати в пристроях відображення інформації, став *ефект динамічного розсіювання світла* (ДРС). Він спостерігається в шарі нематичного рідкого кристала з від'ємною анізотропією діелектричної проникності та питомим опором, меншим ніж 10^{10} Ом·см. Після прикладання до електродів комірки напруги поверхня початково прозорого нематичного шару РК стає матовою внаслідок переорієнтації молекул. Це відбувається в результаті розсіювання світла під великим кутом через двозаломлювальне середовище мікронних розмірів. Схематично перебіг цього явища зображено на рис. 4.20. Як видно, у початковому стані (рис. 4.20, *a*) шар РК гомеотропно впорядкований (хоча це й не обов'язково для виникнення ефекту).

Прикладання та поступове збільшення прикладеної напруги спочатку не викликає жодних видимих змін. Тільки після досягнення певного порогового значення ($U = U_{пор}$) нематичний РК стає непрозорим. Порогова напруга, при якій з'являються домени, описується формулою:

$$U_{пор} = 2\pi \sqrt{\frac{K_{33}\pi}{\left(\frac{K_1\varepsilon_{\parallel}}{\eta_1}\right)\left(\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} - \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel}}\right) + (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp})\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel}}}},$$

де K_{33} – константа поздовжнього згину;

K_1 – коефіцієнт моменту зрізу;

η_1 – коефіцієнт в'язкості;

ε_{\parallel} , ε_{\perp} – діелектричні проникності;

σ_{\parallel} , σ_{\perp} – провідності.

Після перевищення порогової напруги починається рух молекул РК. Рідина стає щораз більше неупорядкованою аж до моменту, коли напруга дійде до значення $\sim 2U_{пор}$. Це і є, власне, область інтенсивного розсіювання, яка називається динамічним розсіюванням. Вона може спостерігатися тільки:

- нижче деякої граничної частоти;
- вище порогової напруги;
- у матеріалах із порівняно малим питомим опором ($< 1-2 \cdot 10^{10}$ Ом·см).

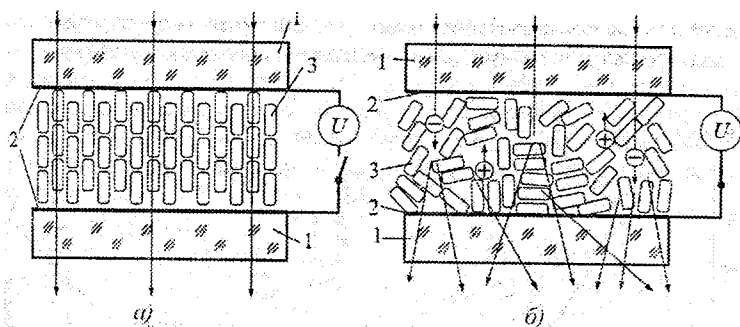


Рисунок 4.20 – Ефект динамічного розсіювання світла:

a – РК комірка в початковому стані;

б – після прикладення поля: 1 – скляна підкладка; 2 – електрод;
3 – молекули рідкого кристала

Динамічне розсіювання виникає як при живленні комірки постійною напругою, так і при живленні змінною напругою з частотою, нижчою від граничної. Однак живлення постійним струмом на практиці не застосовується внаслідок виникнення електрохімічних процесів, які скорочують термін роботи комірки (у граничних випадках навіть до декількох годин).

З погляду практичного використання, основними недоліками ефекту динамічного розсіювання є:

- порівняно висока робоча напруга, що сягає навіть 10 – 40 В, і значний струм;
- обмеження частоти керувальної напруги до значення граничної частоти (найчастіше $f < 1$ кГц);
- значне зростання потужності, необхідної для роботи за низьких температур;
- порівняно низька контрастність.

У сучасних дисплеях найчастіше використовують *twist- та super-twist-ефекти*. Розглянемо планарну орієнтацію молекул в РК комірниці, якщо молекули орієнтовані в напрямку осі у перпендикулярно одна до одної на протилежних поверхнях РК комірки, а речовина має додатну діелектричну

анізотропію. Тоді при накладанні електричного поля вздовж осі z (рис. 4.21) виникає орієнтаційний ефект, який називається твіст-ефектом.

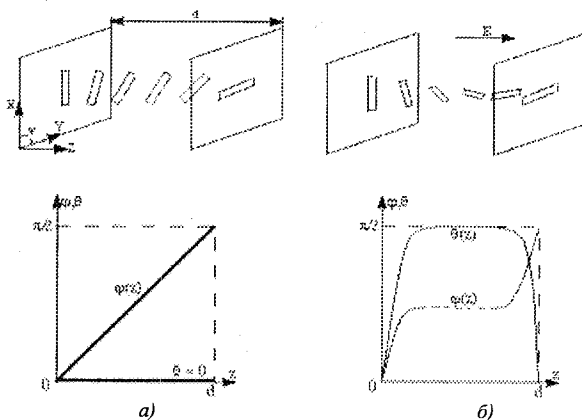


Рисунок 4.21 – Орієнтація молекул у твіст-комірці та залежності кутів θ і φ від координати за відсутності поля (а) і в зовнішньому полі, яке значно перевищує порогове (б)

При граничних умовах, які відповідають рис. 4.21, ($\varphi = 0$ при $z = 0$ і $\varphi = \pi/2$ при $z = d$), розподіл директора по товщині шару за відсутності поля однорідний і може бути поданий у вигляді чверті витка спіралі. Така закручена структура повертає площину поляризації лінійно поляризованого променя, який падає на неї вздовж осі z , на кут $\pi/2$. Це виконується для довжин хвиль, які задовольняють умову Могена:

$$\lambda \ll (n_e - n_o)P_0,$$

де P_0 – крок спіралі,

n_e, n_o – показники заломлення для звичайного та незвичайного променя, відповідно.

Якщо товщина РК комірки значна ($d \geq 10$ мкм), то для всіх довжин хвиль видимого діапазону твіст-комірка закручує на $\pi/2$ поляризацію монохроматичного світла.

За відсутності поля твіст-структура в паралельних поляроїдах непрозора, якщо світло поширюється вздовж нормалі до обмежувальних поверхонь. Якщо прикласти поле, вище від критичного, закручена структура руйнується, тому площина поляризації світла, яке поширюється вздовж осі z , не повертається на кут $\pi/2$, а залишається незмінною, внаслідок чого вся система є прозорою. Вираз для критичного поля має вигляд:

$$E_0 = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{4\pi}{\Delta\epsilon} \left[K_{11} + \frac{1}{4}(K_{33} - 2K_{22}) \right]}.$$

На рис. 4.22 зображено принцип дії твіст-комірки. Типовий перетворювач цього типу складається з двох скляних пластинок, на які з одного боку приклеюють поляризатор або аналізатор, а на інший бік наносять електроди та орієнтувальні шари. Ці шари орієнтують молекули РК планарно, але так, що біля електродів ці напрямки взаємно перпендикулярні. Структура має двозаломлювальні властивості та повертає площину поляризації світла на кут, який дорівнює куту її закручення (в нашому прикладі 90°).

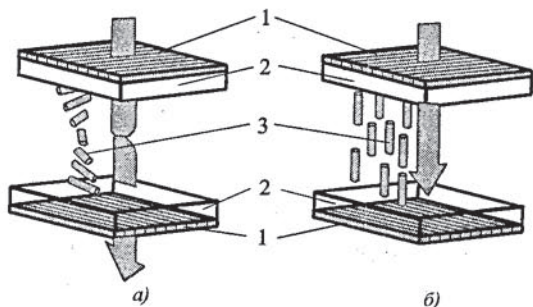


Рисунок 4.22 – Принцип дії твіст-комірки
(поляризатор та аналізатор схрещені):

1 – поляризатор; 2 – скляна пластинка; 3 – молекули рідкого кристала;
а – за відсутності поля; б – за наявності поля

Біле світло, яке падає на комірку, пройшовши через поляризатор, скло, електроди та орієнтувальний шар, потрапляє на шар рідкого кристала. У вимкненому стані (без поля) він скручений, і площина поляризації світла також обертається на кут 90° . Це світло, потрапляючи на аналізатор (з віссю, поверненою на кут 90° відносно поляризатора), проходить далі без перешкод. Після прикладання електричного поля до шару молекули РК з $\Delta\epsilon > 0$ орієнтуються відповідно до силових ліній поля (тоді отримуємо шар з гомеотропною орієнтацією). Така структура РК не повертає площини поляризації, через що світло потрапляє на аналізатор без змін. Площина його поляризації перпендикулярна до осі аналізатора, який не пропускає світла. Через це стандартна картинка, отримана за допомогою твіст-ефекту, має вигляд чорного зображення на світлому фоні. Можна також розміщувати поляризатор і аналізатор паралельно, в цьому разі картинка буде негативом попередньої, тобто білі (прозорі) символи на чорному фоні.

Крім твіст-ефекту в нематичних рідких кристалах використовується і супертвіст-ефект. У комірках на супертвіст-ефекті кут закручування молекул φ дорівнює або π , або $3/2\pi$. Цей ефект характеризується крутішою залежністю оптичного пропускання від прикладеної напруги.

Типові залежності оптичного пропускання від прикладеної до РК комірки напруги для твіст- та супертвіст-ефекту показано на рис. 4.23.

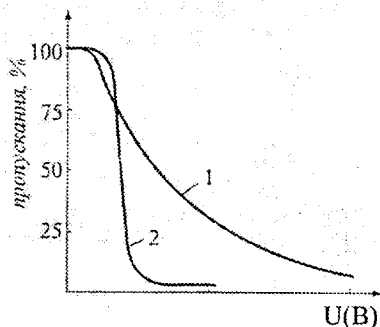


Рисунок 4.23 – Типова залежність оптичного пропускання від прикладеної до РК комірки напруги для твіст- ефекту (1) та супертвіст-ефекту (2)

Методи формування зображення в LCD. Для керування сучасними LCD дисплеями застосовують активний і пасивний методи, в яких використовуються відповідні типи матриць.

У разі пасивно-матричної адресації кожний елемент зображення дисплея визначається ділянкою перетину електродів стовпців і рядків та може пропускати чи перекривати світловий потік. Пікселі адресуються імпульсами напруги, поданими на відповідні рядок і стовпець дисплея. В дисплеях із пасивною матрицею кожний піксель адресується впродовж часу, що перевищує період одного кадру.

Незважаючи на простоту реалізації пасивно-матричної адресації з погляду виготовлення дисплеїв, процес безкосереднього запису інформації пов'язаний із певними складнощами. Керувальні електричні сигнали, подані на рядок та стовпець дисплея для адресації певного пікселя, впливають на інші елементи зображення з відповідних рядка та стовпця, створюючи паразитне підсвічування пікселів LCD.

Активно-матрична адресація LCD відрізняється від пасивно-матричної насамперед тим, що в кожному елементі зображення присутній свій електронний ключ: нелінійний елемент (діод чи транзистор) із конденсатором. Введений у кожен піксель дисплея електронний ключ унеможливує подання напруги на неадресовані елементи матриці.

LCD з активною матрицею (AMLCD) не мають обмежень щодо кілько-

сті ліній сканування та паразитного підсвічування між пікселями. Внаслідок цього розмір дисплея обмежений лише можливістю створення активних матриць відповідних розмірів. Крім того, накопичення електричного заряду на конденсаторі дисплея під час циклу відображення зменшує величину напруги керування та економить енергію джерела живлення. Активно-матрична адресація певною мірою еквівалентна сегментній, оскільки пікселі адресуються практично незалежно один від одного.

Структура кольорових TFT-LCD. Розглянемо структуру кольорових TFT-LCD. TFT-LCD складається з TFT панелі, керувальної електроніки та системи підсвічення, розміщених в одному корпусі (рис. 4.24).

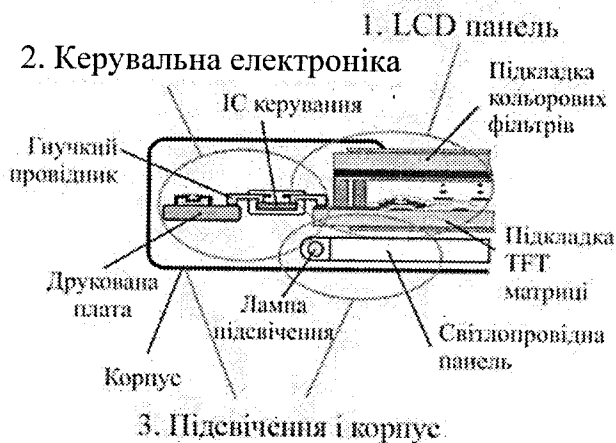


Рисунок 4.24 – Структура кольорового TFT-LCD

Структура TFT-LCD панелі наведена на рис. 4.25. До складу панелі входять: матриця тонкоплівкових транзисторів і запам'ятовувальних конденсаторів, електроди пікселів та з'єднувальних провідників. Кольоровий фільтр складається з чорної матриці та плівки трьох основних кольорів – червоного, зеленого та синього.

Проміжок між скляними підкладками заповнюється рідким кристалом. Для забезпечення рівномірності цього проміжку в нього вводять наповнювач у вигляді кульок із діелектричного матеріалу. Після цього проводять операцію герметизації. На обидві зовнішні поверхні сандвіча, утвореного скляними підкладками, накладають поляризаційну плівку. Для приєднання керувальної електроніки LCD на кінцях ліній рядків і стовпців дисплея розміщують контактні пластинки.

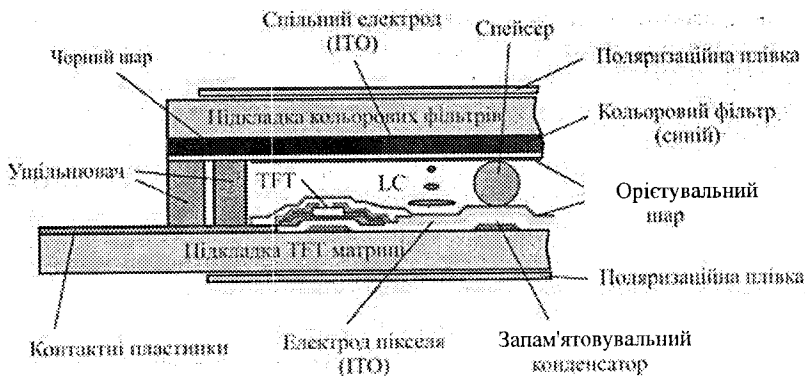


Рисунок 4.25 – Вертикальна структура кольорового TFT дисплея

Для керування TFT-LCD використовують систему, що складається з кількох друкованих плат та інтегральних мікросхем на них. Схема керування LCD панелі показана на рис. 4.26.

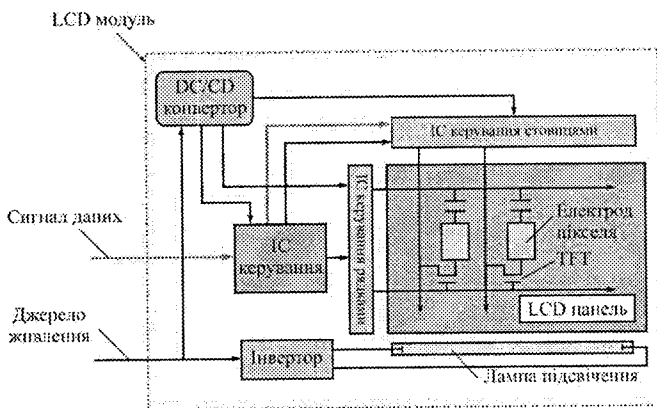


Рисунок 4.26 – Схема керування LCD панелі

Розглянемо структуру та принцип роботи кольорового TFT дисплея. Він складається з певної кількості елементарних пікселів – субпікселів. Кожний такий елементарний піксель містить TFT, електрод пікселя з ІТО та запам'ятовувальний конденсатор (C_s). Кожний субпіксель приєднується до однієї з ліній затвора та однієї з ліній даних у матриці формату $3m \times n$ (рис. 4.27).

Оскільки всі пікселі включені в матрицю, то кожен з них адресується безпосередньо від контактних пластинок на кінцях рядків та стовпців.

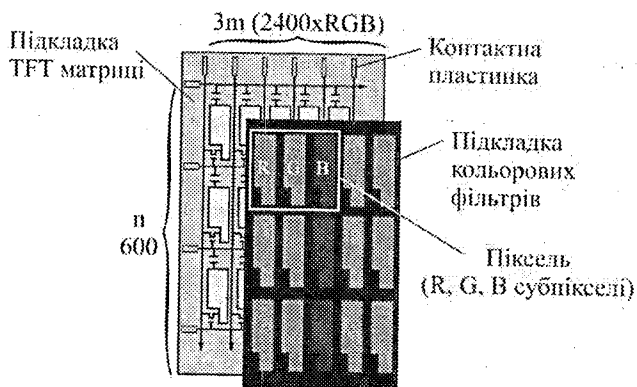


Рисунок 4.27 – Структура кольорової TFT панелі

У субпікселі TFT-LCD рідкокристалічний шар на ITO електродах пікселя утворює конденсатор зі спільним електродом на підкладці кольорового фільтра (рис. 4.28). Запам'ятовувальний конденсатор (C_S) та LC конденсатор (C_{LC}) приєднані як навантаження на TFT.

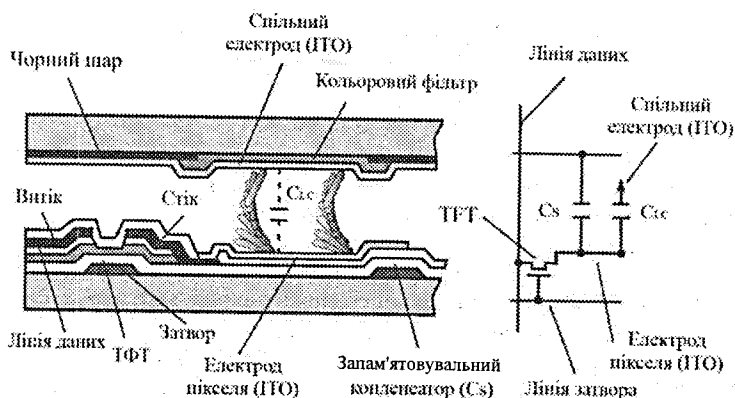


Рисунок 4.28 – Структура пікселя та його еквівалентна електрична схема

Після подачі імпульсу позитивної напруги амплітудою приблизно 20 В на електрод затвора TFT вмикається. Конденсатори C_S та C_{LC} заряджаються, а напруга на електроді зрівнюється з напругою сигналу (+8 В), поданою на лінію даних. Напруга на електроді пікселя змінюється на ΔV , що спричинено паразитною ємністю між електродами затвора та стоку після вимкнення напруги на затворі. Після зміни напруги цей заряджений стан можна підтримувати, поки напруга на затворі прямує до -5 В, а TFT вимикається.

Головна функція конденсатора C_S – підтримувати напругу на електроді пікселя до надходження наступного імпульсу сигналу.

Рідкокристалічна речовина керується змінним струмом, що дає змогу уникнути погіршення зображення внаслідок впливу постійного струму. Це зазвичай втілюється за допомогою методу реверсного керування кадрами, коли прикладена до пікселя напруга змінюється з кожним кадром. Якщо напруга на C_{LC} змінюватиметься між кадрами неоднаково, то результатом буде 30 Гц мерехтіння (один період кадру переважно дорівнює $1/60$ с). Доступні також інші методи керування, що усувають цю проблему (рис. 4.29).

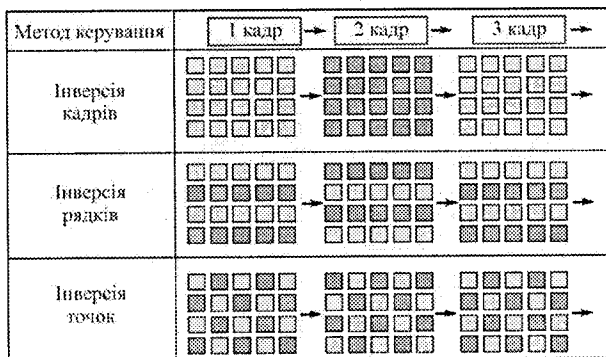


Рисунок 4.29 – Інверсні методи керування

У панелі з активною матрицею електроди затвора та стоку виконуються на спільній основі, але кожний елементарний піксель адресується безпосередньо вибором певних рядків і стовпців (рис. 4.30).

Послідовно скануючи лінії затвора та прикладаючи напругу сигналу до всіх ліній стоку в певній послідовності, можна адресувати всі пікселі. Отже, адресація AMLCD виконується лінія за лінією.

Оптична пропускна здатність рідкокристалічної речовини у TN-режимі змінюється неперервно, як функція прикладеної напруги (рис. 4.31).

TFT-LCD містить кольорові фільтри трьох первинних кольорів – червоного (R), зеленого (G) та синього (B), розташовані на підкладці кольорових фільтрів (рис. 4.32). Ці елементарні кольорові фільтри суміщаються з субпікселями на підкладці TFT матриці. Кожний піксель у кольоровому LCD складається з трьох RGB субпікселів. Через те, що розміри субпікселів надто малі, щоб їх можна було розрізнити окремо, RGB елементи для людського ока здаються сумішшю трьох основних кольорів, і людина бачить один інтегральний колір. У такий спосіб з певними обмеженнями із суміші трьох основних кольорів можна отримати будь-який колір.

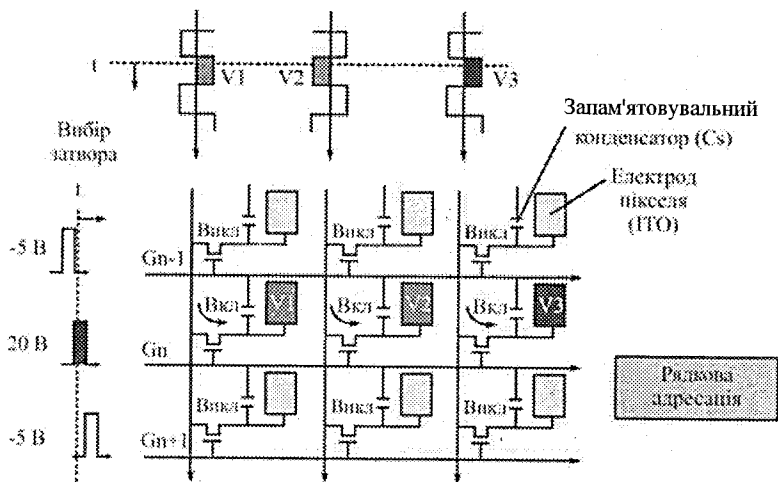


Рисунок 4.30 – Активна адресація матриці розміром 3×3

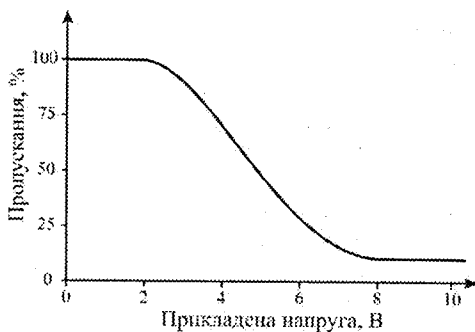


Рисунок 4.31 – Пропускна здатність LC у TN-режимі

Бістабільні нематичні дисплеї (BiNem). Нематичні BiNem дисплеї – це останнє покоління LCD дисплеїв, у яких відтворюване зображення підтримується без споживання енергії. Ці дисплеї мають прекрасний контраст та хороший кут огляду.

Бістабільні дисплеї мають два (або більше) стійких стани та власну пам'ять. Вони споживають енергію лише під час оновлення зображення. Для деяких застосувань, як, наприклад, електронні книги, збережена в такий спосіб енергія може збільшити тривалість роботи в десятки разів.

Кілька видів бістабільних дисплеїв, зокрема бістабільний твіст-нематичний (BTN) та бістабільний холестеричний LCD, відрізняються вла-

ствостями рідкокристалічних матеріалів, що використовуються для створення активного середовища, і використовують орієнтувальні шари з великою енергією зчеплення.

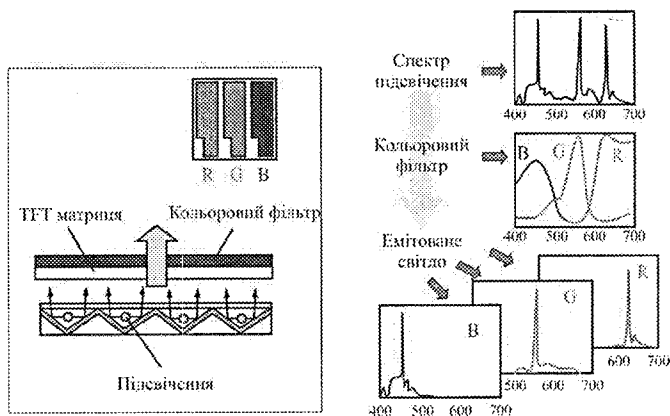


Рисунок 4.32 – Утворення кольорів в LCD

Структура BiNem дисплеїв. BiNem дисплеї мають просту структуру, подібну до твіст-нематичних (TN) чи супертвіст-нематичних (STN) LCD. Вони являють собою заповнені нематичною рідкокристалічною сумішшю комірки. Головною відмінністю тут є менша товщина комірки (1,5 – 2 мкм). Необхідність отримання комірок малої товщини та дотримання точності товщини комірки по всьому екрану є характерною рисою бістабільних дисплеїв. Мала товщина комірки необхідна, щоб реалізувати певні фізичні властивості РК матеріалу. Чим менший зазор, тим більшим стає крок спіралі РК молекул, а товщина комірки стає сумірною з кроком спіралі РК молекул. За цих умов поведінка молекул нематичного РК матеріалу дещо відрізняється від поведінки молекул у стандартній твіст-нематичній комірці завтовшки 20 – 25 мкм.

Крім того, в бістабільних дисплеях використовується орієнтувальний шар і рідкокристалічна суміш з особливими властивостями зчеплення з орієнтувальним шаром. До комірки приєднуються два поляризатори: верхній прозорий та нижній відбивальний. У BiNem дисплеях існують дві стабільні структури молекул у стандартній відбивальній конфігурації: темна та біла.

Орієнтувальні шари призначені для створення різних умов зчеплення молекул РК-матеріалу з верхньою та нижньою підкладками. Одним із способів орієнтації є створення мікрорельєфу, утвореного канавками з різною щільністю чи глибиною. Мікрорельєф може формуватись селективним травленням матеріалу, орієнтувального покриття або просто створюватись

механічним способом – натиранням поверхні спеціальними мікрощітками. Площини граничних шарів РК структур утворюють малий кут з поверхнею підкладки, і молекули розміщуються в канавках шару орієнтуювального покриття. На одному кінці структури молекули РК сильніше зчеплені з підкладкою, ніж на другому внаслідок застосування різних орієнтуювальних шарів з неоднаковою енергією зчеплення. Один шар (з більшою енергією зчеплення) забезпечує планарну орієнтацію молекул, а другий – похилу орієнтацію. Орієнтація канавок і, відповідно, молекул РК на обох підкладках ортогональна.

На рис. 4.33 показана порівняльна оцінка структур, виготовлених за TN-технологією та за технологією BiNem.

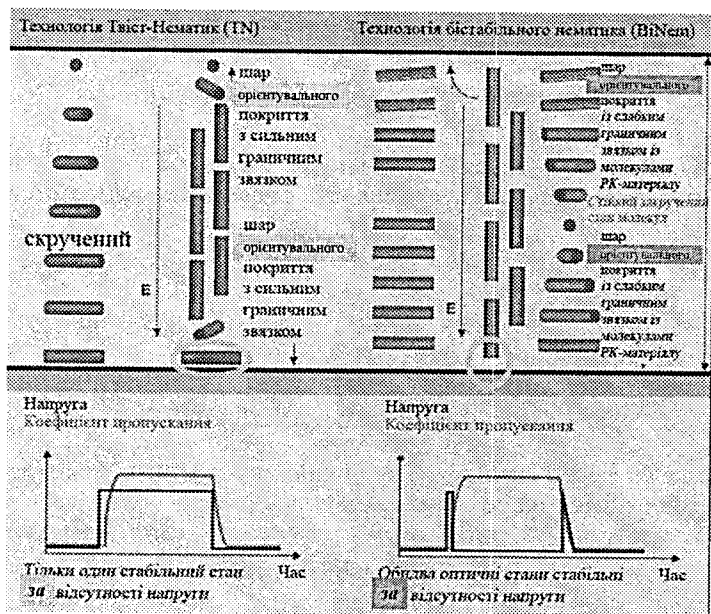


Рисунок 4.33 – Порівняння структури TN та BiNem дисплеїв

Принцип дії. У BiNem дисплеях існують стабільні квазіпланарні рідкокристалічні структури двох станів: з нульовим кутом закручування (U-стан) та наполовину (180°) закручена структура (T-стан). У відбивальній конфігурації (рис. 4.34, 4.35) U-стан забарвлений у чорний колір, а T-стан – у білий. T-стан індукує поворот площини поляризації світла на кілька градусів, а U-стан виконує функцію півхвильової пластинки.

Бістабільні структури BiNem дисплея реалізуються для однакових властивостей поверхні обох структур. Властивості поверхні відіграють

критичну роль у перемиканні між двома станами під дією поля. Проте на перемикання між двома станами впливають також об'ємні властивості рідкокристалічного матеріалу (константи пружності та в'язкості).

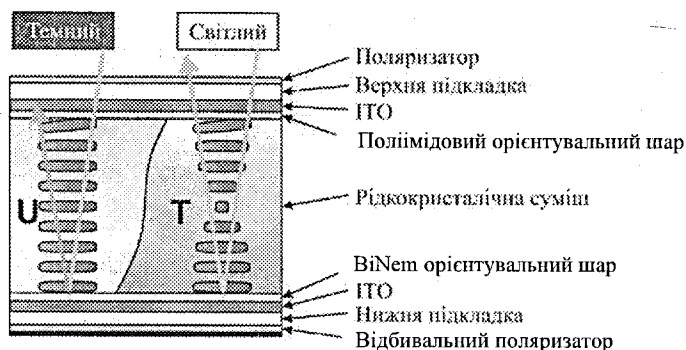


Рисунок 4.34 – Структура ВіНем комірки відбивальної конфігурації: за відсутності електричного поля існують 2 стани U (темний) та T (світлий)

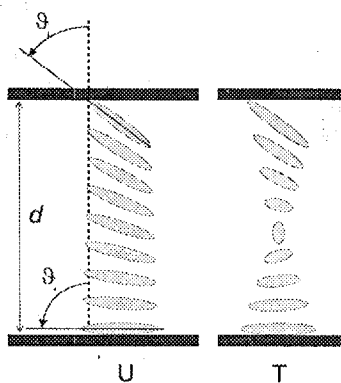


Рисунок 4.35 – Орієнтація РК молекул для U і T стабільних станів: d – товщина РК комірки; ϑ_1 – кут попереднього нахилу РК молекул

Перемикання між двома станами отримують, руйнуючи зчеплення молекул рідкого кристала з ВіНем орієнтувальним шаром. Якщо керувальна напруга пікселя є двокроковим імпульсом, то індукується темний U-стан. Якщо керувальна напруга пікселя є одним імпульсом, комірка швидко релаксує до світлої T-структури, якій передують короткі зігнуті стани. Механізм вибору структури залежить від величини керувальної напруги. Механізм вмикання показано на рис. 4.36.

Під дією електричного поля РК структура руйнується, орієнтуючись вздовж поля (гомеотропний стан), і вироджується в диполь. Проміжний гомеотропний стан досягається після подачі електричного імпульсу з амплітудою, вищою за деяку порогову напругу. Після зняття поля молекули під дією внутрішніх сил знову намагаються повернутися до стану спіральної структури. Відмінність у величині сил зчеплення для верхньої і нижньої підкладки дає можливість реалізувати ефект бістабільності. Кінці спіральних структур, утворених РК молекулами, орієнтуються на обох підкладках відповідно до напрямків орієнтувальних поверхонь. При цьому РК структура буде закручена на 90° (Т-стан) та зберігатиме свої властивості. В перехідному процесі молекули РК, які лежать на орієнтувальному шарі з меншою енергією зчеплення, займають інше стійке положення, що відповідає відсутності закручування – (U-стан). Отже, після зняття поля система може зайняти два стійких стани з різними оптичними властивостями.

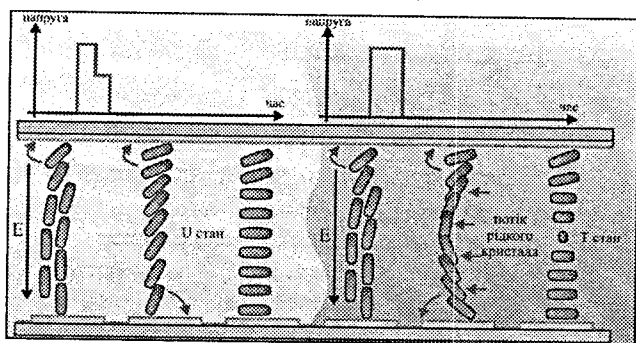


Рисунок 4.36 – Перемикання між структурами в BiNem дисплеї.

Зліва – невеликий чи помірний спад напруги перемикає піксель у стан U-структури. Справа – великий та швидкий спад напруги перемикає піксель у стан білої T-структури

Відтворене на такому дисплеї зображення може залишатися стабільним за відсутності електричного поля протягом кількох місяців. Контраст у BiNem-технології практично не залежить від кількості рядків і помітно кращий, ніж у будь-якого з TN-дисплеїв. У схрещених поляризаторах стану U відповідає білий колір, а стану T – чорний колір.

Сегнетоелектричні рідкокристалічні дисплеї (FLCD). Сегнетоелектрики – тверді діелектрики, що мають у певному інтервалі температур спонтанний дипольний момент, який можна переорієнтувати за допомогою електричного поля. Температурний діапазон, у якому сегнетоелектрик має спонтанний дипольний момент, називається полярною областю. Кристалічна модифікація, в якій сегнетоелектрик спонтанно поляризований, називається полярною фазою. Кристалічна модифікація, в якій спонтанний мо-

мент відсутній, називається неполярною фазою: Температура, при якій відбувається перехід між полярною та неполярною фазами, називається температурою Кюрі.

Антисегнетоелектрики – речовини, в яких полярна фаза виникає лише тоді, коли прикладене до них електричне поле перевищує певне значення. Температура переходу речовини до сегнетоелектричного стану називається температурою Нееля. Фізична природа антисегнетоелектричного ефекту схожа на фізичну природу сегнетоелектричного, за винятком того, що в антисегнетоелектриках існують дві поляризовані підґратки, дипольні моменти яких направлені у різні боки. Як наслідок, у малих полях речовина за своїми поляризаційними властивостями схожа на звичайний діелектрик. Проте сильні електричні поля можуть переполяризувати підґратку, орієнтовану проти поля, тож обидві підґратки стають поляризованими однаково, а речовина набуває властивостей сегнетоелектрика.

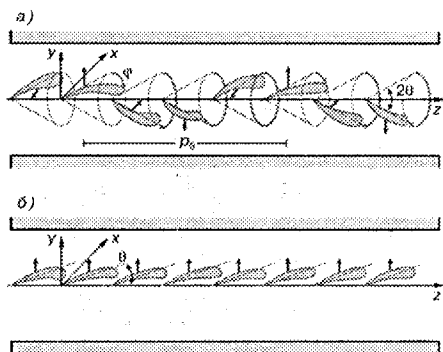


Рисунок 4.37 – Розташування молекул та їхніх дипольних моментів у смектичній С-фазі:

- а) зразок за відсутності впливу зовнішніх чинників;
- б) однорідна орієнтація директора та дипольних моментів молекул у зовнішньому електричному полі

На рис. 4.37 смектичні шари паралельні площині xy . В середині шарів молекули повернуті на кут θ відносно нормалі до смектичного шару; φ – азимутальний кут у площині xy ; p_0 – крок спіральної структури.

Спонтанна поляризація в рідких кристалах проявляється в разі виникнення кута нахилу молекул θ відносно нормалі до смектичних шарів та зміни симетрії системи, тобто при фазовому переході між смектичною А-фазою та смектичною С-фазою.

Цікавою особливістю дипольного впорядкування смектичної С-фазы є неоднорідність спонтанної поляризації в об'ємі. Дипольний момент кож-

ного смектичного шару повернутий на певний кут відносно сусідніх шарів, внаслідок чого виникає макроскопічна спіральна просторова модуляція поляризації з певним кроком спіралі, що залежить від температури. Отже, середня в об'ємі поляризація зразка дорівнює нулю, а С-мезофаза сегнетоелектрична лише умовно. Важливо, що в електричному полі спіральну структуру можна розкрутити, і залежність поляризації рідкого кристала від електричного поля набуває типового для звичайних сегнетоелектриків вигляду (рис. 4.37).

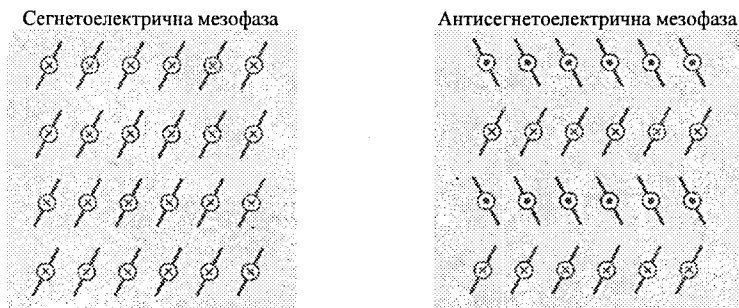


Рисунок 4.38 – Порівняння структур однорідної сегнетоелектричної та антисегнетоелектричної мезофаз

Антисегнетоелектричні рідкі кристали було відкрито порівняно недавно (в 1989 р.). Цей тип рідких кристалів характерний тим, що молекули в його сусідніх шарах нахилені в протилежних напрямках. Спонтанна поляризація таких шарів є антипаралельною (рис. 4.38). Такий антисегнетоелектричний стан за допомогою зовнішнього електричного поля можна перевести в сегнетоелектричний.

Сегнетоелектричні рідкі кристали мають великі перспективи використання. Керувати властивостями хіральних смектичних мезофаз можна за допомогою зовнішнього електричного поля. Перемикання спонтанної поляризації приводить до повороту оптичної осі рідкого кристала. На рис. 4.39 показано температурну залежність спонтанної поляризації кута нахилу молекул у смектичних шарах та кроку спіралі.

Сегнетоелектричні рідкокристалічні дисплеї з пасивною матрицею.

FLCD з пасивною матрицею вважались найкращими кандидатами на створення великоформатних дисплеїв, однак цього так і не сталося через відсутність адекватних способів утворення відтінків сірого.

Властивість хіральних рідкокристалічних молекул формувати похилі смектичні фази, наприклад, смектичну С-фазу, виявлено ще в середині 1970-х років.

Несиметричність шарів похилої смектичної С-фази та хіральних моле-

кул приводить до формування стабільного електричного диполя. В такому матеріалі молекули повертаються від шару до шару, формуючи спіраль і компенсуючи в такий спосіб утворений у матеріалі дипольний момент. Проте, якщо смектичну спіраль "обмежити" за рахунок значного потоншення FLC шару, то макроскопічний сегнетоелектричний диполь буде існувати і в цьому стані проявлятимуться деякі цікаві бістабільні властивості.

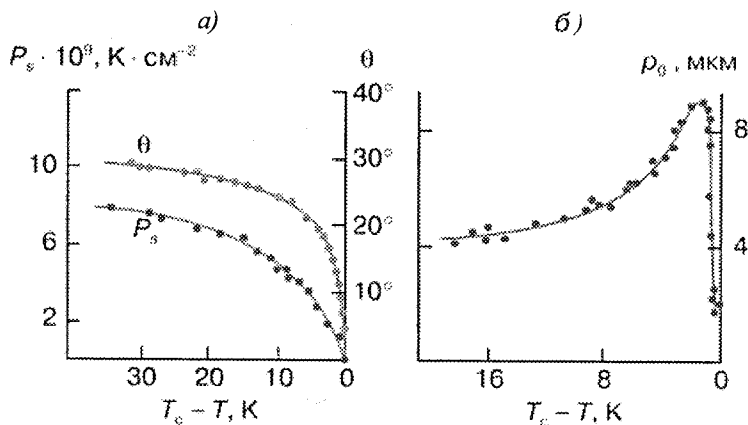


Рисунок 4.39 – Температурна залежність спонтанної поляризації P_s , кута нахилу θ (а) та кроку спіралі p_0 (б) біля А – С фазового переходу для рідкокристалічної речовини DOBAMBC

Як показано на рис. 4.40, молекули нахилені під кутом θ до площини шарів і можуть обертатись навколо конуса. Стабільними є стани на протилежних боках конуса в горизонтальній площині. Орієнтації сегнетоелектричних диполів у цих двох стабільних станах позначено P1 та P2.

Аналогічно іншим LCD FLC дисплеї модулюють інтенсивність поляризованого світла, що проходить крізь них. Основний принцип дії полягає у використанні класичної півхвильової пластинки, оптичну вісь якої можна переорієнтувати в електричному полі. Світло, проходячи крізь вхідний поляризатор, поляризується паралельно чи перпендикулярно до оптичної осі та потрапляє в FLCD (рис. 4.41). Світло не змінює поляризації, проходячи в FLCD, і не проходить крізь аналізатор на виході, ортогональний до вхідного.

Подання імпульсу певної полярності змінює орієнтацію LC молекули так, що її оптична вісь утворює кут 45° із вхідним поляризованим світлом. Пропускання світла описується виразом для поляризованого світла, яке проходить крізь півхвильову пластинку. Імпульс протилежної полярності

перемикає FLCD у попередній стан.

Очевидною перевагою цього ефекту є існування двох стабільних станів із різними оптичними властивостями, які можуть співіснувати за відсутності електричного поля. Така бістабільність дає змогу записувати інформацію на сегнетоелектричному дисплеї та вільно керувати нею без споживання додаткової енергії. Ця властивість важлива для дисплеїв з пасивною матрицею, де використовується порядковий запис інформації. У таких дисплеях немає необхідності оновлювати рядки, в яких інформація не змінюється.

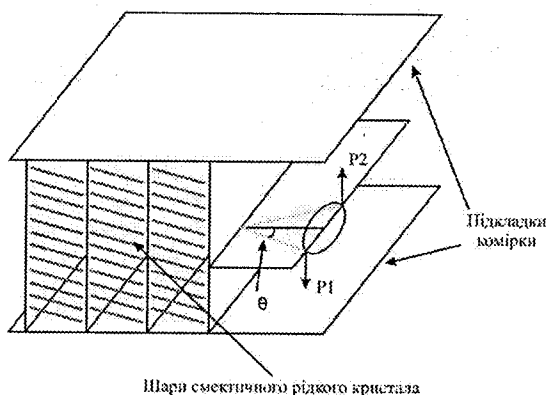


Рисунок 4.40 – Конструкція модулятора світла з використанням сегнетоелектричного рідкого кристала (FLCD модулює інтенсивність поляризованого світла, виконуючи роль класичної півхвильової пластинки, оптичну вісь якої можна переорієнтувати електричним полем):

P_1 , P_2 – вектори спонтанної поляризації; θ – кут нахилу молекул у шарі нематичного рідкого кристала

Проте доводиться йти на компроміс під час відображення рухомих зображень, оскільки в цьому разі для уникнення артефактів руху потрібно оновлювати рядки з частотою приблизно 25 – 60 Гц. Вибирати доводиться між кількістю рядків, які можуть бути записані, та швидкістю оновлення. Втім, кількість рядків, які можна записати за певний проміжок часу, обмежується швидкістю перемикавання.

Швидкість перемикавання – найважливіша перевага сегнетоелектричних дисплеїв, яка може становити десятки мікросекунд при кімнатній температурі. Час перемикавання дуже чутливий до прикладеного електричного поля і є мінімальним при використанні напруг понад 30 В.

Проте бістабільність є й недоліком таких дисплеїв, оскільки вона ускладнює відображення сірих тонів – проміжних між білим і чорним ста-

ном. Традиційний метод отримання відтінків сірого використовує субпікселі або кілька субкадрів для затемнення чорного та білого станів у просторі чи часі, щоб отримати усереднений у часі або просторі відтінок сірого.

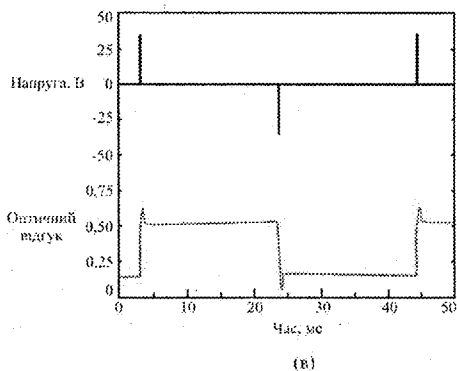
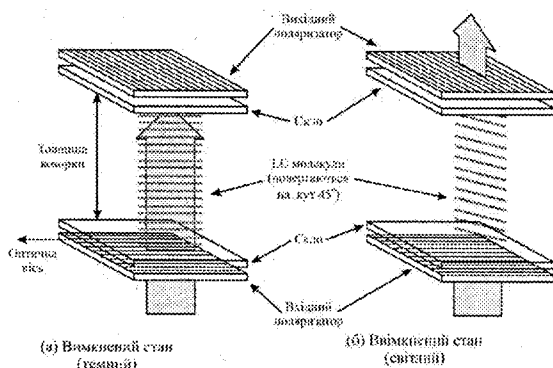


Рисунок 4.41 – Принцип роботи FLC: (а) світлий пропускний стан та (б) темний непропускний стан.

Оптичний відгук на імпульси змінної поляризації (в) чітко відображає бістабільність FLC

Антисегнетоелектричні дисплеї. Антисегнетоелектричні рідкокристалічні (AFLC) дисплеї та матеріали дуже схожі на звичайні сегнетоелектричні матеріали та пристрої за такими ознаками, як швидкість, широкий кут огляду та наявність гістерезису, пов'язаного з тристабільним перемиканням. Для мультиплексного керування в таких дисплеях не потрібна активна матриця. На відміну від звичайних FLC, AFLC пристрої не цілком бістабільні, тому вони можуть відтворювати аналогову шкалу сірого у разі керування змінним струмом (рис. 4.42).

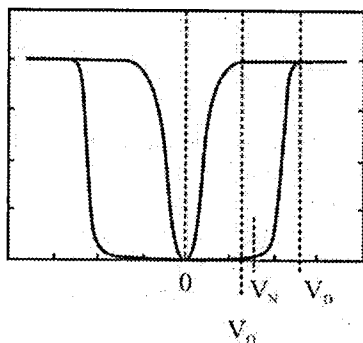


Рисунок 4.42 – Принцип модуляції світла антисегнетоелектричним рідким кристалом

В типових електрооптичних характеристиках AFLCD шкала сірого вибирається в діапазоні напруг $V_N - V_D$, де V_0 – підтримувальна напруга, що задає вибраний рівень сірого.

Перспективним є використання AFLC дисплеїв з активною матрицею. Очевидно, що FLC дисплеї можна використовувати в пристроях із кремнієвою підкладкою, в яких можна досягти високої роздільної здатності, швидкості перемикавання та отримати широку шкалу сірого.

Розділ 5

ДИСПЛЕЇ НА ОРГАНІЧНИХ СВІТЛОДІОДАХ (OLED)

Перспективним напрямком серед випромінювальних є дисплеї на органічних світлодіодах [3, 12 – 18]. Перші спроби створення дисплеїв на органічних світлодіодах (OLED) розпочались у середині 1960-х років дослідженнями інжекції заряду та люмінесценції з окремих кристалів низькомолекулярних сполук, зокрема антрацену. Ці перші OLED мали доволі хорошу квантову ефективність, але високі робочі напруги і, як наслідок, низьку енергетичну ефективність.

Низька ефективність перших пристроїв зумовлювалась трьома основними факторами:

- існувала розбіжність між рухливістю електронів та дірок, часто на кілька порядків, внаслідок чого електронно-діркова рекомбінація відбувалась поблизу одного з електродів, де безвипромінювальні рекомбінації екситонів більш імовірні;

- дефекти матеріалів, з яких формувались плівки, потребували використання товстіших плівок, що призводило до підвищення робочої напруги;

- у перших пристроях існувала невідповідність енергетичних рівнів між органічним матеріалом та електродами, що підвищувало інжекційні бар'єри на електричних контактах пристрою та робочу напругу.

Значний прорив в OLED технології за всіма трьома пунктами, що призвів до початку створення кольорових OLED дисплеїв, відбувся в 1987 році. Саме в цьому році було створено двошарову структуру з низькомолекулярних сполук, у якій один шар призначений для інжекції та перенесення лише дірок, а інший – електронів. У цій структурі на основі низькомолекулярних сполук була досягнута яскравість 100 кд/м^2 при робочій напрузі 5 В та коефіцієнті корисної дії 0,6.

Така структура дала змогу ефективно переносити електрони та дірки в пристрої, навіть якщо кожен з використаних матеріалів переносив один тип носіїв заряду значно краще, ніж інший. Двошарова структура також сприяла ефективному утворенню екситонів, що зменшило послаблення яскравості електродами та дало більше світла при нижчих струмах інжекції. Шари для перенесення дірок та електронів створювались із тонких аморфних або полікристалічних плівок, які дали можливість значно зменшити робочі напруги дисплеїв.

Для виготовлення катода було вибрано метал з малою роботою виходу, що значно зменшило інжекційний бар'єр для електронів, інжектованих в органічний матеріал, та надалі знизило робочу напругу.

Ці дослідження дали поштовх для створення нових матеріалів і структур для OLED на основі низькомолекулярних сполук. У 1989 році в лабораторії Кембриджського університету було встановлено, що ненасичені напівпровідникові сполуки також можна використовувати як активні шари

OLED, що ще більше розширило світові дослідження нових класів матеріалів та структур для OLED.

Органічні напівпровідники. Напівпровідникові властивості органічних матеріалів визначаються особливостями їхньої молекулярної структури. Органічні сполуки, що мають напівпровідникові властивості, характеризуються наявністю спряжених π -електронних зв'язків. В органічній молекулі кожний атом вуглецю має три sp^2 гібридизовані орбіталі, одна з яких зв'язана з молекулою водню, а дві інші утворюють σ -зв'язки з сусідніми атомами вуглецю. У результаті бокового перекриття σ -орбіталей атома вуглецю утворюються дві інші молекулярні орбіталі – π і π^* орбіталі (рис. 5.1, а). Електрони, що рухаються по них, називаються π -електронами та повністю делокалізовані в об'ємі органічної молекули, тобто рухливі вздовж спряженої системи атомів вуглецю (рис. 5.1, б).

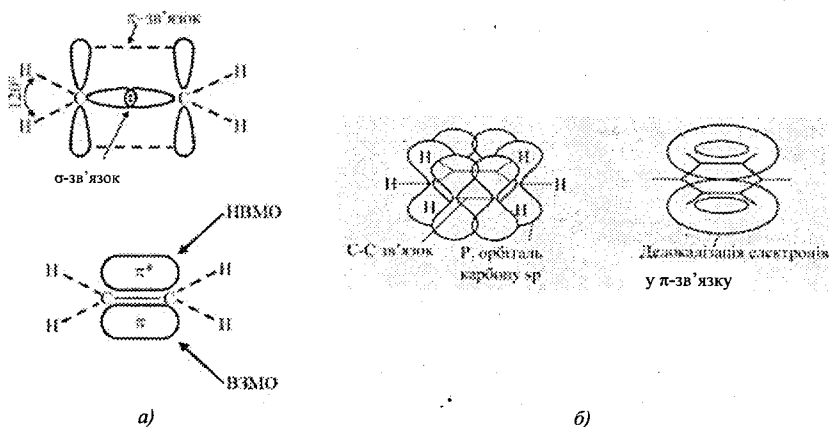


Рисунок 5.1 – Схематичне зображення утворення π -електронних зв'язків в органічній молекулі (а); делокалізація π -електронів усередині органічної молекули (б)

Рухливість π -електронів визначає важливі фізичні та хімічні властивості органічних сполук. Саме завдяки π -зв'язку органічні матеріали мають напівпровідникові властивості. Іншою важливою властивістю π -електронів є те, що здійснювати електронні переходи їм значно легше, ніж σ -електронам.

Найвища π^* -зв'язана орбіталь, заповнена електронами, називається верхньою заповненою молекулярною орбіталою (ВЗМО). Найнижча вакантна π -незв'язана орбіталь називається нижньою вакантною молекулярною орбіталою (НВМО).

Різниця між енергіями ВЗМО та НВМО є енергією π - π^* переходу, яку можна асоціювати з шириною забороненої зони E_g , а ВЗМО та НВМО є

аналогами валентної зони та зони провідності в неорганічних напівпровідниках. Поглинання, яке спостерігається в органічному напівпровіднику у видимій області спектра, є результатом електронного π - π^* переходу. Для більшості органічних напівпровідників значення E_g перебуває в межах 1,5 – 3,5 еВ. Органічні матеріали характеризуються низькою рухливістю носіїв заряду при кімнатній температурі, яка значно нижча, ніж у неорганічних матеріалах і становить $10^{-7} \sim 10^{-3}$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ для дірок і $10^{-8} \sim 10^{-4}$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ для електронів. Така низька рухливість носіїв органічних напівпровідникових матеріалів є результатом розупорядкованості аморфних і полікристалічних матеріалів, які використовуються в OLED. Порівняльні значення рухливості носіїв деяких органічних і неорганічних напівпровідників наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняльна характеристика деяких параметрів органічних і неорганічних напівпровідників

	Матеріал	Ширина забороненої зони (еВ)	Рухливість ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	
			дірки	електрони
Неорганічні напівпровідники	Si	1,11	500	1900
	GaAs	1,35	400	8800
	GaP	2,24	150	300
	Ge	0,67	1820	3800
Органічні напівпровідники	TPD	3,2	10^{-3}	10^{-7}
	α -NPB	3,0	10^{-4}	10^{-4}
	m-MTDATA	3,2	10^{-5}	–
	Alq ₃	2,7	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	10^{-6}

Водночас органічні напівпровідники мають низку переваг перед неорганічними для застосування в дисплеях, найважливішими з яких є:

- величезна різноманітність органічних сполук із напівпровідниковими властивостями, які використовуються у пристроях відображення інформації;

- можливість формування тонких, гнучких і прозорих аморфних плівок;

- простота синтезу сполук і легкість очищення вихідних матеріалів;

- висока стабільність деяких органічних напівпровідників;

- низька вартість органічних матеріалів.

Контакт метал/органічний напівпровідник, органічний напівпровідник/органічний напівпровідник. Розглянемо процеси, які відбуваються на межі поділу метал – органічний напівпровідник та органічний напівпровідник – органічний напівпровідник (рис. 5.2). Контакт метал – органічний матеріал формується в OLED-структурі після нанесення органічного матеріалу на поверхню металу. На контакті метал/органічний матеріал, потенціальний бар'єр для дірок ϕ_h та електронів ϕ_e залежить насамперед від положення ВЗМО та ВНМО рівнів органічної плівки відносно

рівня Фермі металу. Якщо припустити, що рівень вакууму вирівнюється, потенціальний бар'єр для дірок φ_h буде різницею між потенціалом іонізації I_p органічної плівки та роботою виходу металу φ_m , а потенціальний бар'єр для електронів φ_e – відповідно різницею між роботою виходу металу φ_m та значенням спорідненості до електрона A_e органічного матеріалу (рис. 5.2, а):

$$\varphi_h = I_p - \varphi_m, \quad \varphi_e = \varphi_m - A_e,$$

де φ_m – робота виходу металу,

I_p – потенціал іонізації,

A_e – спорідненість з електроном.

У результаті перенесення заряду через межу розділу утворюється заряджений шар Δ на межі розділу метал – органічний напівпровідник (рис. 5.2, б). Формування таких шарів призводить до зсуву рівня вакууму Δ . Тоді, з урахуванням цього шару, величина бар'єрів буде становити:

$$\varphi_h = I_p - \varphi_m, \quad \varphi_e = \varphi_m - A_e.$$

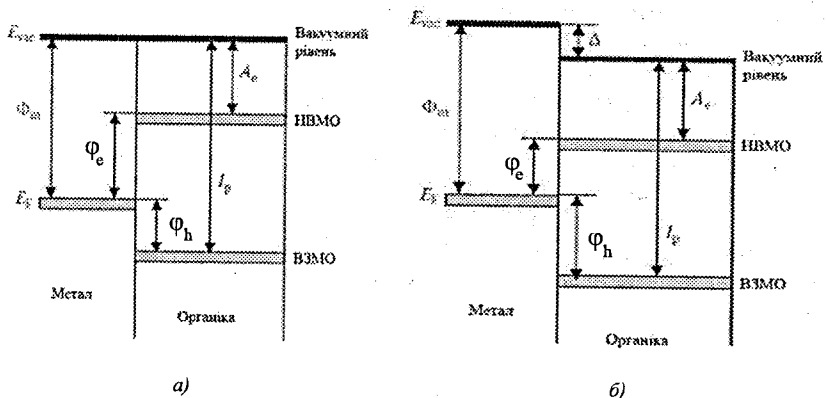


Рисунок 5.2 – Контакт метал – органічний напівпровідник без урахування наявності диполів (а) та з урахуванням дипольних ефектів (б)

На рис. 5.2 позначено: ВЗМО – найвища зайнята молекулярна орбіталь, НВМО – найнижча незайнята молекулярна орбіталь, φ_h – потенціальний бар'єр для дірок, φ_e – потенціальний бар'єр для електронів, φ_m – робота виходу металу, I_p – потенціал іонізації, A_e – спорідненість з електроном.

У разі контакту органічний напівпровідник – органічний напівпровідник потенціальні бар'єри φ_h та φ_e оцінюються, як правило, за різницею I_p і A_e відповідно двох органічних матеріалів.

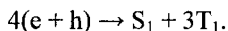
Відповідно до енергетичної діаграми першим, найпростішим, але важливим критерієм відбору матеріалів для створення OLED-структури є відповідність значень робіт виходу матеріалів електродів положенням ВЗМО та НВМО органічного матеріалу. Положення цих рівнів прийнято показувати на енергетичній схемі OLED. Функціональні матеріали потрібно підбирати так, щоб енергетичний бар'єр між відповідними матеріалами був мінімальним.

Природа електролюмінесценції в органічних матеріалах. Електролюмінесценція – це явище свічення середовища, що виникає під час пропускання через нього електричного струму. Вона є прямим перетворенням електричної енергії в світлово.

Внаслідок слабкої делокалізації електронів органічні напівпровідники мають чітко визначені спінові стани – синглетний і триплетний (рис. 5.3). Основним станом органічної молекули є синглетний (S_0) стан. Поглинання приводить до першого збудженого синглетного стану S_1 . Час життя стану S_1 становить 1–10 нс, що зумовлює швидкий перехід молекули в основний стан через випромінювальний або безвипромінювальний переходи. Люмінесценція органічних молекул, як правило, спричинена випромінювальними переходами $S_1 \rightarrow S_0$ (флюоресценція) та $T_1 \rightarrow S_0$ (фосфоресценція). Ці переходи відбуваються з різними ймовірностями, що проявляється у величинах інтенсивності люмінесценції та часі її затухання τ (флюоресценція: $\tau < 10^{-6}$ с, фосфоресценція: $\tau > 10^{-6}$ с).

Синглетні та триплетні екситони формуються у співвідношенні 1:3. Як показано на рис. 5.3, квантова ефективність випромінювання світла, що відбувається зі збудженого стану S_1 в основний S_0 (флюоресценція), становить 25%, а зі стану T_1 в S_0 (фосфоресценція) – 75%.

Отже, випромінювання відбувається внаслідок рекомбінації позитивно та негативно заряджених носіїв. Рекомбінація носіїв здійснюється екситами, що перебувають у синглетному та триплетному станах, у співвідношенні 1:3:



Це співвідношення описує рекомбінаційний процес. Ще одна важлива відмінність полягає в тому, що оптичні збудження (екситони) переважно локалізовані на одній молекулі, а тому мають значну енергію зв'язку.

Поряд з основними процесами розпаду синглетних екситонів відбуваються також процеси гасіння люмінесценції синглетних екситонів, що впливають на ефективність, а саме:

- гасіння синглетних екситонів зовнішніми (домішки, зокрема атоми кисню та галогену) та внутрішніми (дефекти ланцюга полімеру) дефектами;

- гасіння люмінесценції на електродах через диполь-дипольне передавання енергії. Рекомбінаційна зона повинна перебувати на відстані ~50 нм

від електродів. Аналогічне передавання енергії відбувається біля ІТО електрода, проте через його нижчу провідність цей процес значно слабший;
 – гасіння люмінесценції зарядженими дефектами та поляронами.

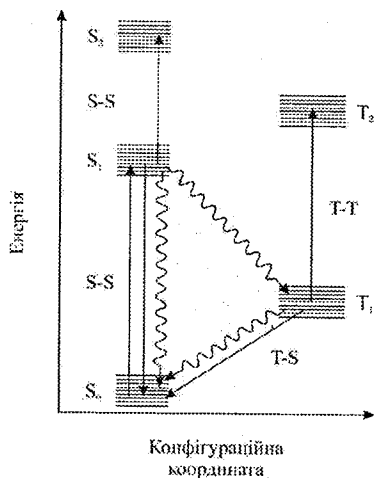


Рисунок 5.3 – Енергетична діаграма утворення синглетних і триплетних переходів: перехід $S_1 \rightarrow S_0$ відповідає процесу флюоресценції, а перехід $T_1 \rightarrow S_0$ – процесу фосфоресценції

Органічні світловипромінювальні діоди (OLED). На сьогодні відомі одношарові та багатошарові органічні світлодіодні структури (OLED). Типова класична структура OLED – це переважно структура типу “сандвіч”, яка складається з кількох шарів, завтовшки ~ 100 нм. На скляній підкладці міститься прозорий провідний електрод із суміші оксидів індію та олова (ІТО). На нього нанесено шар органічної речовини для перенесення дірок, потім ідуть випромінювальний шар, шар для перенесення електронів і, насамкінець, металевий електрод. Органічні сполуки підбирають відповідно до схеми енергетичних рівнів, показаної на рис. 5.4. Різниця енергії між рівнем вакууму та рівнями ВЗМО та НВМО дорівнює різниці між газозфазними потенціалом іонізації (ІР) та спорідненістю з електроном (ЕА). Через поляризованість оточення у твердотільному органічному матеріалі ІР нижчий, а ЕА вища, ніж у газовій фазі. Енергетичний бар’єр між відповідними рівнями електродів та органічних матеріалів повинен бути мінімальним. Випромінювальний шар може виконувати роль шару для перенесення дірок або електронів. Можливість поєднання в одній органічній сполуці люмінесцентних та транспортних властивостей уможливило створення одношарових електролюмінесцентних пристроїв. Використання таких сполук або їхніх сумішей між двома чи кількома електродами, розміщеними на

плоскій діелектричній підкладці, дає змогу одержувати планарні електролюмінесцентні пристрої. Одна з основних вимог – висока однорідність органічних плівок.

Одношарова структура OLED. Одношарова структура OLED складається зі скляної підкладки з нанесеним на неї прозорим електродом, органічного світловипромінювального шару та напиленого зверху металевго катода.

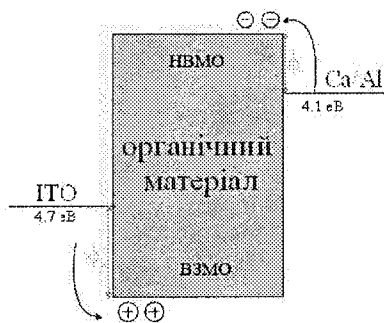


Рисунок 5.4 – Енергетична діаграма одношарової структури OLED

Відповідно до принципу роботи OLED, для хорошої інжекції енергетичний бар'єр між електродами та органічним шаром повинен бути мінімальним, що створює додаткові вимоги до вибору матеріалів для одношарової структури. На енергетичній діаграмі одношарової структури типу ITO/Alq₃/Ca/Al (рис. 5.4) видно, що високий потенціальний бар'єр для дірок (~1 eV) знижує ймовірність інжекції носіїв заряду. В цьому разі енергетичний бар'єр можна подолати, прикладаючи високу напругу. До того ж, в Alq₃ через електронний тип його провідності складно досягти балансу носіїв заряду в одношаровій структурі. Необхідно також взяти до уваги, що рухливості електронів і дірок у більшості електролюмінесцентних матеріалів дуже різні, що призводить до дисбалансу електронного та діркового струмів, внаслідок чого квантова ефективність OLED виявляється низькою.

Значним недоліком одношарової структури є проникнення в органічний шар атомів індію з боку анода та атомів металу з боку катода, які утворюють центри гасіння люмінесценції.

Багатошарова структура OLED. Для усунення недоліків одношарових структур, покращення характеристик та уповільнення процесів деградації використовують багатошарову структуру (рис. 5.5). Ключовим фактором багатошарової структури є використання допоміжних інжекційних і транспортних шарів. Призначення цих додаткових шарів – розділення функцій інжекції, перенесення носіїв та рекомбінації.

Загалом, допоміжні шари поділяються на:

- емісійні (EML);
- дірково-інжекційні (HIL);
- дірково-транспортні (HTL);
- електронно-інжекційні (EIL);
- електронно-транспортні (ETL).

На рис. 5.5 показана енергетична діаграма багатошарової структури OLED. Під час роботи OLED іони індію з ITO анода та іони металів з катода (Al, Mg:Ag, LiF/Al тощо) дифундують у шар світловипромінювального матеріалу, формуючи центри гасіння люмінесценції.

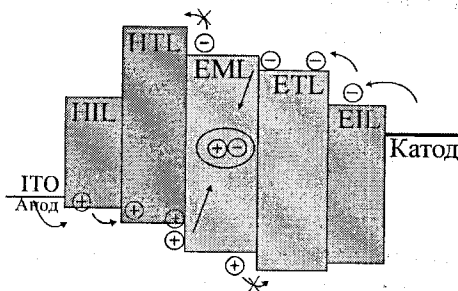


Рисунок 5.5 – Енергетична діаграма багатошарової структури OLED

Кількість органічних шарів у багатошаровій структурі може коливатися від двох до десяти. Розглянемо призначення окремих шарів. Дірково-інжекційний шар розташовують вище анода. Основне призначення HIL шару – зниження бар'єра для покращення інжекції дірок з анода. Він також відіграє роль бар'єра для проникнення в активну область структури сторонніх домішок, що дифундують з ITO в органічний шар.

Емісійна (рекомбінаційна) область багатошарової OLED структури – це вузька, завтовшки менше 10 нм, область поблизу межі розділу двох органічних шарів (HTL/ETL). Ще однією значною перевагою багатошарових структур є збереження енергії молекулярних екситонів від розсіювання в металевих електродах. Відомо, що коли збуджена молекула перебуває на відстані, меншій ніж 20 нм, від металевого електрода, тоді переважає безвипромінювальна рекомбінація. Отже, шари HTL та ETL завтовшки 50 – 70 нм, захищають молекулярні екситони від розсіювання. Транспортні шари також запобігають гасінню люмінесценції на електродах.

Параметри, які характеризують роботу OLED. Для оцінювання ефективності роботи OLED пристрою використовують такі параметри, як зовнішня квантова, енергетична та струмова ефективності. Основною характеристикою, що відображає ефективність процесу перетворення електричної енергії у світлове випромінювання, є зовнішня квантова ефективність

η_{ext} – відношення кількості фотонів η_p до кількості інжектованих електронів η_e :

$$\eta_{ext} = \frac{\eta_p}{\eta_e} \cdot 100\%.$$

Найчастіше значення зовнішньої квантової ефективності для органічних світловипромінювальних структур міститься в діапазоні 1 – 10%. На основі фізичних процесів, що відбуваються в OLED, можна зробити висновок, що зовнішня квантова ефективність залежить не тільки від внутрішніх властивостей випромінювального шару, але й від електричних та оптичних властивостей структури:

$$\eta_{ext} = \eta_{out} \cdot (\eta_{CB} \cdot \eta_r \cdot \eta_{int}),$$

де η_{out} – ефективність виходу світла, що залежить від оптичних властивостей структури;

η_{CB} – баланс носіїв заряду (електрон-дірка) всередині випромінювального шару, що визначається електричними властивостями пристрою;

η_r – ефективність формування екситонів;

η_{int} – внутрішній квантовий вихід електролюмінісцентного матеріалу.

Енергетична ефективність η_p (лм/Вт) визначається як відношення загального світлового потоку L_p в люменах до вхідної електричної потужності:

$$\eta_p = \frac{L_p}{I \cdot U}.$$

Струмова ефективність η_c (кд/А) визначається як відношення сили світла, в напрямку, перпендикулярному до підкладки, до величини струму, що протікає через пристрій.

$$\eta_c = \frac{I_c}{I},$$

де I_c – сила світла;

I – струм, що протікає через пристрій.

Деякі параметри багатошарових органічних структур наведено в табл. 5.2.

OLED на низькомолекулярних сполуках. Сучасний OLED на низькомолекулярних сполуках – це багатошарова структура, що складається з органічного дірково-інжектуючого шару, дірково-провідного шару, емісійного шару, електронно-провідного шару та електронно-інжектуючого шару.

шару, а також неорганічного катода та анода; все це розміщується на прозорій підкладці, наприклад, склі (рис. 5.6, а). Перевагою багатошарової структури є те, що функції інжекції, перенесення електронів і дірок, а також емісії можна розділити в різні шари приладу, а властивості цих шарів оптимізувати окремо. Така гнучкість значно розширила класи органічних матеріалів, придатних для використання в OLED (рис. 5.6, б – 5.6, з).

Таблиця 5.2 – Деякі параметри багатошарових органічних структур

Структура	Яскравість, кл/м ²	Вхідна напруга, В	Струмова ефективність, кл/А	Квантова ефективність
ITO/Alq ₃ /Al	1000	10		
ITO/TPD/Alq ₃ /Al	250	12	1,4	0,34
ITO/CuPc/Alq ₃ /LiF/Al	1150	9	4,51	1,1
ITO/PEDOT/TPD/Alq ₃ /LiF/Al	1760	3	8,2	2
ITO/Alq ₃ /PEGDE/Al	1900	8.4	2.1	
ITO/CuI/Alq ₃ /PEGDE/Al	3500	5.6	2.7	
ITO/NPB/Alq ₃ /LiF/Al	25000	2.3	4.0	1.3

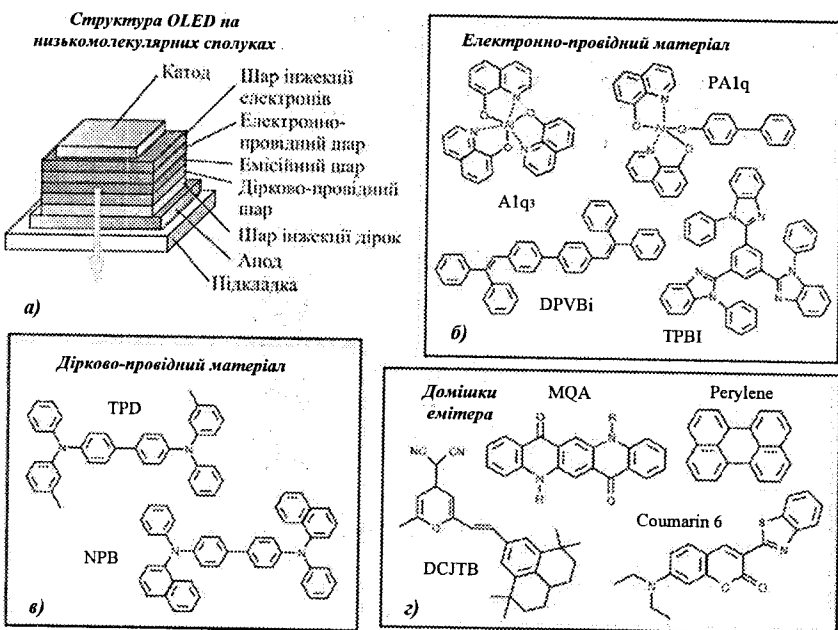


Рисунок 5.6 – (а) Сучасні OLED на низькомолекулярних сполуках складаються з п'яти окремих органічних шарів, розміщених між металевим катодом та прозорим анодом, (б) – (з) хімічна структура провідних матеріалів органічних шарів

Дірково-провідні матеріали виготовляють здебільшого на основі бензидинів та тріариламінів. Хелати металів, ненасичені полімери, оксадіазоли та імідазоли використовуються переважно для емісійного та електронно-провідного шару.

Шари у пристроях на основі низькомолекулярних сполук мають товщину приблизно 5 – 100 нм. Для прозорого анода найчастіше використовують ITO, а метали з малою роботою виходу, як, наприклад, сплав магнію та срібла або ж тонкий шар солі фториду літію з алюмінієвою основою – для катода.

OLED на полімерах. Сучасні полімерні OLED – це зазвичай двошарова органічна структура, один шар якої використовується для інжекції та перенесення дірок, а інший – для інжекції та перенесення електронів (рис. 5.7). Товщина органічних шарів становить 5 – 200 нм.

Найчастіше для діркового шару в полімерних OLED, використовується диспергований у воді поліетилен діоксифіофін та полістирен сульфонат (PEDOT:PSS). Другим шаром пристрою є емісійний полімер, переважно на основі поліфлюоренів або поліфенілвініленів, у підбраному співвідношенні для оптимізації інжекції та перенесення заряду, а також ефективності свічення. Субпікселі кольорових полімерних OLED дисплеїв наносять на попередньо сформовану поверхню підкладки методом струминного друку. ITO використовується як прозорий анод, а такі метали, як барій, кальцій/алюміній або тонкий шар солі фториду літію на кальцієвій/алюмінієвій основі – для непрозорого катода.

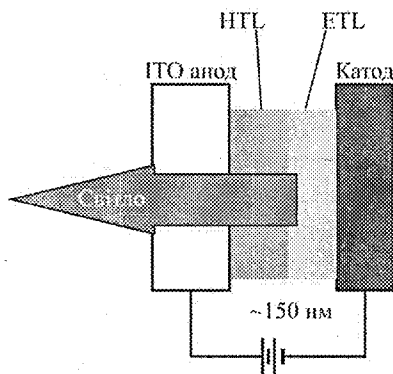


Рисунок 5.7 – Структура OLED

Найактивніші дослідження для OLED на основі полімерів ведуться над покращенням чистоти кольору, ефективності та стабільності свічення. В більшості OLED емісія ґрунтується на флюоресценції органічних молекул, спеціально підібраних для високої ефективності свічення, вузького спектра

емісії та достатньої чистоти кольорів.

Типові ефективність та координати кольору для RGB OLED емітерів, придатних для використання в пристроях із кольоровим дисплеєм, наведено в табл. 5.3.

Одним з обмежень для традиційних флуоресцентних OLED на основі низькомолекулярних сполук і полімерів є те, що лише синглетні стани екситонів забезпечують перехід між основною речовиною та домішкою і відповідно випромінювальну електронно-діркову рекомбінацію, залишаючи розпадатись без випромінювання триплети екситонів, частка яких в утворених електронно-діркових парах може сягати 75%. Цього обмеження можна уникнути, використовуючи відповідну фосфоресцентну домішку в поєднанні з вибраною в певний спосіб основною флуоресцентною органічною речовиною. Так можна потенційно зібрати на домішці та долучити до участі в люмінесценції як подвійні синглети екситонів, так і триплети екситонів, утворені в основній речовині, що значно підвищить ефективність пристрою.

Великих успіхів у покращенні стабільності свічення OLED досягнуто впродовж останнього десятиріччя. Причини послаблення яскравості свічення OLED можна поділити на дві групи: старіння та експлуатаційні. В OLED на основі полімерів старіння переважно проявляється в утворенні дефектів – темних плям, які виникають через зменшення активності катода внаслідок взаємодії з водою та киснем, що з часом призводить до зменшення яскравості. Проникнення води та кисню більш критичне для полімерних та інших нескляних підкладок, оскільки ці матеріали можуть пропускати такі забруднювачі.

Таблиця 5.3 – Ефективність RGB OLED емітерів

Колір емітера	Електролюмінісцентна ефективність для 20 мА/см ² , кд/А	C _x	C _y
Червоний	3	0,63	0,37
Зелений	7	0,31	0,63
Синій	3	0,15	0,17
Білий	4	0,32	0,34

Хоча робоча стабільність свічення в OLED на основі полімерів пов'язана з кількома чинниками, включаючи органічну природу матеріалів та температурну нестабільність, вона переважно пропорційна кількості кулонівського заряду, що проходить крізь пристрій. Тому порівнювати стабільність яскравості різних OLED потрібно з урахуванням часу роботи та густини струму, на яку розрахований пристрій.

Більшість OLED дисплеїв складаються з прозорої підкладки, прозорого анода, непрозорого катода та непрозорого герметизувального шару. Емітоване світло виходить з пристрою крізь прозору підкладку. Така структура набула популярності завдяки прозорості, здатності скла не пропускати во-

ду й кисень, прозорості ITO анода та непрозорості металевго катода.

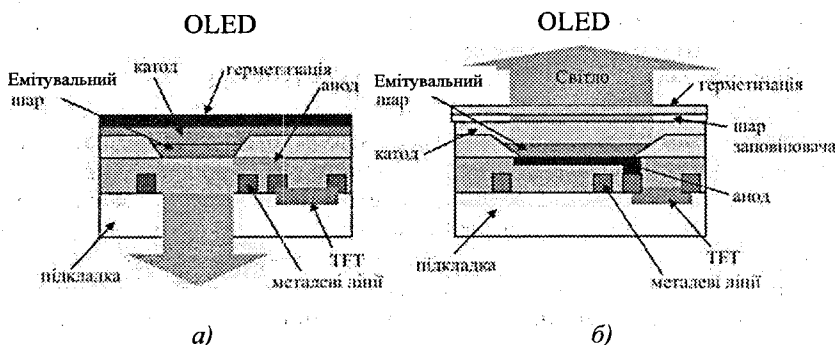


Рисунок 5.8 – Конструкція OLED з нижнім (а) та верхнім емітером (б)

Недоліком цієї структури “нижнього емітера” є те, що на підкладці крім емітувального шару потрібно розмістити також електронну частину пристрою, що зменшує ефективну площу пікселя (рис. 5.8, а). Цього можна уникнути, використовуючи конструкцію “верхнього емітера”, коли світло виходить із пристрою крізь прозорий катод та герметизувальний шар (рис. 5.8, б). Конструкція верхнього емітера дає змогу збільшити ефективну площу пікселів, тому таку саму яскравість свічення дисплея можна отримати за меншої густини струму.

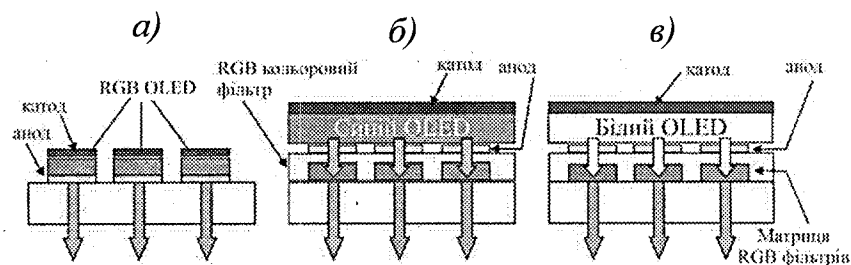


Рисунок 5.9 – Конструкція кольорових OLED: матрично розміщені RGB субпікселі (а); синій емітер з RGB кольоровим фільтром (б); білий емітер з матрицею кольорових фільтрів (в)

Для RGB емітерів існує кілька конфігурацій субпікселів, зокрема емітери трьох кольорів, конструкції перетворення кольору синього емітера та використання білого емітера в поєднанні з матрицею кольорових фільтрів

(рис. 5.9, а – 5.9, в). Емітери трьох кольорів у RGB субпікселях є найефективнішою конфігурацією, оскільки емітоване світло проходить мінімальну кількість оптичних шарів. Таку конфігурацію вибирають для більшості кольорових OLED дисплеїв. Ця схема потребує точного формування активних органічних шарів, у разі великої різниці стабільності свічення червоного, зеленого та синього емітерів може виникнути значна невідповідність кольорів зображення.

Методи перетворення кольору та матриці кольорових фільтрів спрощують формування активних органічних шарів та мінімізують невідповідність кольорів упродовж часу експлуатації дисплея. Вони мають малий ККД, що пов'язано з матеріалами, які спотворюють кольори матриці, та кольоровими фільтрами. У кольорових OLED дисплеях використовується пасивно- або активно-матрична адресація. Пасивно-матрична адресація використовується в дешевих інформаційних дисплеях, які відображають незначну кількість інформації. Кожний піксель у пасивно-матричному дисплеї утворюється перекриттям схрещених ліній анода та катода, а електричний струм проходить крізь піксель після подання напруги на відповідні лінії.

Формування відеосигналу забезпечується послідовним скануванням усіх рядків за період кадру, переважно 1/60 с. Оскільки на кожний піксель припадає частинка з цього циклу сканування, то дисплей керується імпульсами струму високої густини, що потрібно для досягнення високої яскравості. Висока густина струмів може спричинити додаткові механізми нестабільності OLED структури. Пасивно-матричні OLED дисплеї використовуються в автомобільних стереопрогравачах, кишенькових ігрових пристроях та мобільних телефонах.

Активно-матрична схема керування більше придатна для дисплеїв великого розміру, які мають вищу роздільну здатність та споживають менше енергії.

Завдяки чіткості зображення, насиченості кольорів, малому часу відгуку, широким кутам огляду, малій масі та малій товщині OLED мають великі перспективи для застосування в майбутньому.

Характеристики OLED. Передній електрод OLED дисплея виготовляють із прозорого провідного матеріалу, переважно з суміші ITO та поліетилendioкситіофіну (PEDOT) чи інших органічних напівпровідників. Такі електроди забезпечують гарну інжекцію дірок. Катод цих пристроїв повинен мати високу провідність і бути сумісним з рештою структури. Водночас в OLED катод повинен забезпечувати хорошу інжекцію електронів та мати малу роботу виходу.

На жаль, усі доступні метали та сплави, придатні для цього, мають високий коефіцієнт відбиття світла, що зумовлює ефект дзеркала. Більшість навколишнього освітлення, відбиваючись від електрода, може накладатись на зображення дисплея та погіршувати читабельність.

Читабельність можна описати як здатність дисплея відтворювати зруч-

не для читання зображення. Цю характеристику неможливо виразити однозначно, вона поєднує такі властивості дисплея, як яскравість зображення, контраст кольору, яскравість, колір фону та коефіцієнт відбиття.

Дослідження електролюмінісцентних пристроїв показують, що їхня читабельність залежить переважно від контрасту зображення. Контраст зображення дисплея задається сумою максимальної яскравості зображення, яку може забезпечити дисплей, та яскравості фону, поділеною на яскравість фону – найнижче значення яскравості, що може створити дисплей.

Тому для досягнення високого контрасту необхідна висока максимальна яскравість зображення та низька яскравість фону (включаючи яскравість відбитого зовнішнього світла). Компенсація високого коефіцієнта відбиття високою яскравістю може створити зорове напруження. Тому зниження відбивання світла досягається методом підвищення контрасту дисплея.

Для зменшення відбивання в електролюмінісцентних дисплеях пропонується кілька підходів. В одному з них для поглинання світла, що проходить крізь активний шар, використовують градієнтний діелектричний шар позаду пристрою.

Більш загальним підходом для підвищення контрасту є застосування фільтрів колової поляризації перед дисплеєм. Цей підхід істотно підвищує контраст, однак має кілька недоліків. По-перше, фільтри поглинають значну частину емітованого світла, по-друге, вони не усувають “цвітіння” пікселів, що впливає на чистоту зображення та завжди асоціюється з відбиванням від електродів. По-третє, використання фільтрів збільшує масу та товщину дисплея. Технологія виготовлення поляризаційних фільтрів трудомістка та дорога, внаслідок чого зростає ціна OLED дисплеїв.

На сьогодні розроблено альтернативний метод зменшення відбивання OLED дисплеїв.

Метод полягає у використанні інтерференційного фільтра, розміщеного між чорним діелектриком та Al електродом дисплея – фільтра підсилення контрасту (рис. 5.10).

У найпростішому випадку фільтр поєднує надтонкий ($\sim 20 \text{ \AA}$) напівабсорбувальний металевий шар, шар провідного оксиду (наприклад ITO чи матеріал на основі SiO_2) та товстий відбивальний шар металу. Ця структура отримала назву “чорний шар”. Товщина кожної плівки вибирається такою, щоб світлові хвилі, відбиті від першого та другого металевого шару, мали однакову амплітуду та були зміщені за фазою на 90° , внаслідок чого миттєва сума амплітуд двох відбитих хвиль завжди близька до нуля.

Використання оптичної інтерференції усуває відбивання в широкій смузі частот, що забезпечує чорний фон, незважаючи на відбивальний електрод дисплея. Перевагою CEF є відбивання інфрачервоного світла, тому, на відміну від дисплеїв, що використовують абсорбувальні світло методи підвищення контрасту, дисплеї з CEF не нагріваються під прямим сонячним світлом.

В OLED із “чорним шаром” значення відбивання меншим 2%, в той час, як у дисплеях без “чорного шару” воно становить 85%. Для мінімізації відбивання від поверхні можна використовувати стандартне антибликове покриття.

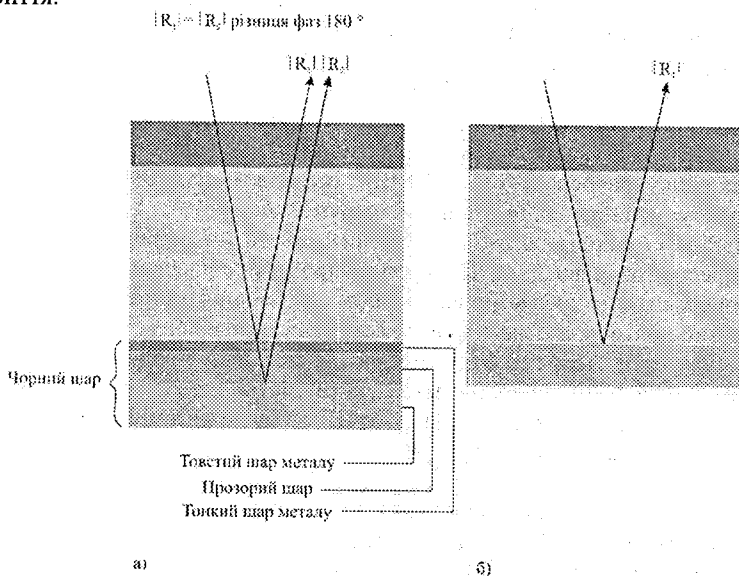


Рисунок 5.10 – Структура OLED з “чорним шаром” (а) та без “чорного шару” (б)

Для використання CEF в OLED потрібно створити хімічно та механічно сумісний з органічною структурою катод. Багато органічних матеріалів чутливі до присутності металів, тому необхідно використовувати буферний шар (наприклад LiF).

Дисплей із “чорним шаром” на основі полімерів має високий контраст і яскравість та споживає нижчу потужність, ніж аналогічні пристрої з коловим поляризатором.

Технології OLED на основі низькомолекулярних сполук (SMOLED) та OLED на основі полімерів (POLED) дають можливість створити тонкі, легкі, надійні дисплеї з точним відтворенням кольору, високою яскравістю, малим часом відгуку та широкими кутами огляду.

POLED можуть стати основою для великих дисплеїв, оскільки полімерну плівку можна виготовити, використовуючи такі процеси, як друк по екрану чи струминний друк. Завдяки своїй механічній гнучкості полімерні матеріали можна використовувати також для створення гнучких дисплеїв на пластикових підкладках.

Для того, щоб OLED дисплеї стали комерційно доступними, необхідно

їх подальше вдосконалення. Квантова ефективність емісії світла POLED не досягає і 5%, оскільки емісія відбувається лише з синглетного стану. Ефективність емісії SMOLED значно більша за рахунок використання фосфоресцентної низькомолекулярної сполуки (сполуки іридію), що емітує світло з триплетного стану. Зелені фосфоресцентні OLED показали зовнішню квантову ефективність ~20%.

Однак високоефективні фосфоресцентні SMOLED мають складну структуру – вони складаються з дірково-провідного шару, емітувального шару, шару блокування дірок та електронно-провідного шару. Для виробництва конкурентоспроможних OLED дисплеїв необхідно значно спростити структуру пристроїв і методику їх виготовлення.

Одним з підходів до цієї проблеми може стати використання в POLED фосфоресцентних домішок. Попередні спроби включали внесення домішки фосфоресцентного низькомолекулярного полімерного матеріалу в дірково-провідний полімер, що дало гарну ефективність зеленого свічення.

На сьогодні створено фосфоресцентні полімери з великою молекулярною масою та високою квантовою ефективністю для кожного з трьох первинних кольорів, а також отримано емісію білого світла з використанням синього та червоного фосфоресцентних полімерів. Випромінювання світла у фосфоресцентних полімерах відбувається з триплетних станів, і вся енергія синглетних станів переноситься в триплетні стани. Тому емісія світла в таких полімерах має, без сумніву, фосфоресцентну природу. Спектр електролюмінесценції для POLED має піки на довжинах хвиль 475 нм для синього, 523 нм для зеленого та 620 нм для червоного фосфоресцентних полімерів (рис. 5.11).

Зовнішня квантова ефективність є важливим параметром для оцінювання емісії матеріалів. Зараз максимальні квантові ефективності для оптимізованих POLED становлять 5,4% для червоного, 8,5% для зеленого та 3,5% для синього кольорів (рис. 5.12). Ці ефективності для червоного та зеленого є найвищими для POLED.

Відношення інтенсивностей червоного та синього кольорів є ключовим фактором для отримання білої емісії, що пов'язано з перенесенням енергії та генерацією світла в емісійному шарі. Зовнішня квантова ефективність білої емісії становить 4,5%, що є найвищим для POLED. Білі POLED можна використовувати для підсвічення плоских панелей.

Розвиток сучасної OLED технології. На основі OLED дисплеїв можна створити дуже тонкі, плоскі панелі великого розміру, що зможуть замінити громіздкі електронно-променеві трубки в телевизорах і комп'ютерних моніторах. Їх також можна використовувати в дисплеях високої роздільної здатності, на відміну від неорганічних напівпровідникових світлодіодів, значно обмежених у розмірах.

Найбільшою проблемою є малий термін експлуатації OLED, пов'язаний із процесом старіння органічних світлодіодів. У середньому він становить від кількох сотень до кількох тисяч годин. Для порівняння, елек-

тронно-променеві трубки можуть працювати майже 100000 годин або 12 років, а більшість інших видів дисплеїв – понад 50000 годин.

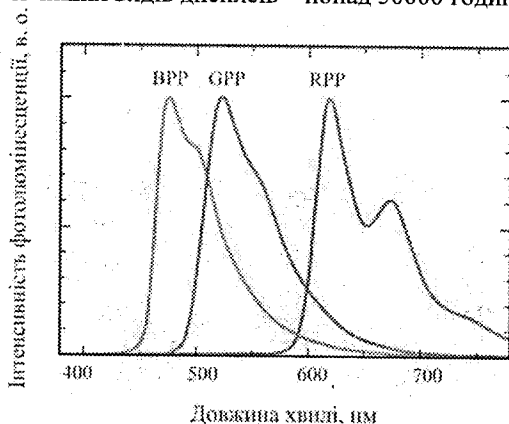


Рисунок 5.11 – Спектр електролюмінесценції для трьох кольорів емісії фосфоресцентних полімерів

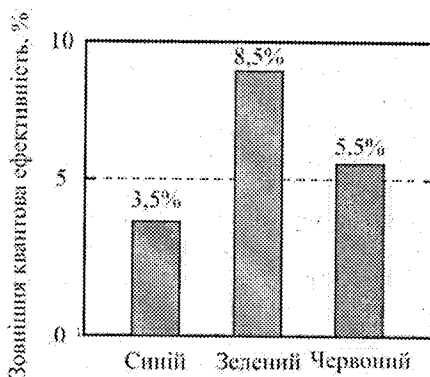


Рисунок 5.12 – Зовнішня квантова ефективність червоного, зеленого та синього кольорів фосфоресцентних POLED

Розрізняють два типи старіння органічних світлодіодів. Перший – це внутрішнє старіння, яке полягає в поступовому зменшенні яскравості дисплея внаслідок тривалого використання. Емітери синього кольору, які використовуються в OLED, старіють набагато швидше, ніж емітери червоного та зеленого кольорів, що створює проблеми в підтриманні балансу кольорів та значно скорочує термін служби дисплея.

Інший тип старіння полягає в утворенні “темних плям” (рис. 5.13) – круглих ділянок з відсутністю емісії, які поступово вкривають піксель. Зростання розміру темних плям зменшує яскравість OLED. На відміну від внутрішнього старіння, що виникає лише під час роботи дисплея, “темні плями” можуть рости незалежно від тривалості роботи. В результаті це явище також скорочує термін експлуатації OLED дисплея.

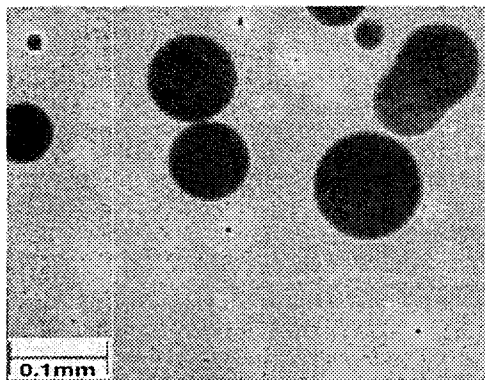


Рисунок 5.13 – Мікросвітлина “темних плям”

Існує кілька теорій внутрішнього старіння OLED. Однією з можливих причин є морфологічна нестабільність органічних шарів, особливо дірково-провідних. Такі шари переважно виготовляють з органічних матеріалів, які часто характеризуються порівняно низькими температурами склування, переважно в межах від 60 °C до 120 °C.

Введення буферного шару між ITO та дірково-провідним матеріалом значно покращує стабільність OLED. Завдяки введенню буферного шару з фталоціаніну міді (CuPc) отримано термін служби майже 3500 годин при початковій яскравості світла 510 кд/м².

Основним фактором, що впливає на старіння пристрою, є інжекція дірок в Alq₃. Поступовий спад висоти максимуму в спектрі Alq₃ свідчить про зменшення ефективності фотолюмінісценції (рис. 5.14).

Зменшення квантової ефективності фотолюмінісценції шару Alq₃ вказує на старіння, спричинене струмом. Оскільки шар переносить переважно дірки, то помітний спад флюоресценції показує, що катіони Alq₃, найімовірніше, спричиняють її гасіння.

Припускається, що причиною виникнення “темних плям” є різні механізми за участю вологи, які призводять до:

- руйнування електродів;
- морфологічних змін в електролюмінісцентних шарах;
- старіння контакту органічний шар – електрод.

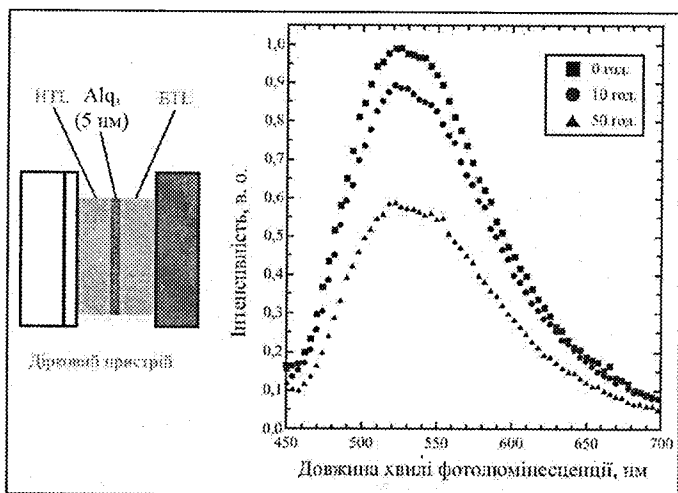


Рисунок 5.14 – Залежність інтенсивності світла від довжини хвилі при різній тривалості роботи

Оскільки вологість середовища відіграє важливу роль у цих механізмах, вважається, що на утворення “темних плям” можна ефективно впливати за допомогою герметизації OLED.

Незважаючи на існування кількох механізмів утворення темних плям, причини, що лежать в основі їх утворення, залишаються незрозумілими. Для повного розуміння природи темних плям та їх усунення потрібні подальші дослідження контакту.

Розглянемо зміни в конструкції AMOLED структури, які забезпечать підвищення струму пікселя, а відповідно і яскравості. Для прямого програмування AMOLED пікселів з *n*-канальним α -Si TFT необхідний контакт між керувальним TFT та OLED катодом. Сучасний процес виготовлення дає змогу з’єднати лише керувальний *n*-канальний α -Si TFT з OLED анодом. Запропоновано новий інвертований метод інтегрування, який уможливує пряме програмування внаслідок з’єднання керувального *n*-канального α -Si TFT з OLED катодом (рис. 5.15). Як результат, струм пікселя зростає на порядок. Водночас керувальний струм пікселя стає незалежним від характеристик OLED, тому старіння OLED не впливає на струм пікселя.

На сьогодні ефективність OLED становить 20 – 30 кд/А та може зрости до 50 – 60 кд/А, що знизить напруги перемикання і, в такий спосіб, споживання енергії.

Час життя пікселів дисплея становить 250000 годин для червоного кольору, 150000 годин для зеленого кольору та 50000 годин для синього ко-

льору. Можливим є збільшення цих значень та досягнення терміну експлуатації для дисплея понад 100000 годин при яскравості 1000 кд/м², що значно краще, ніж у LCD чи плазмових дисплеях.

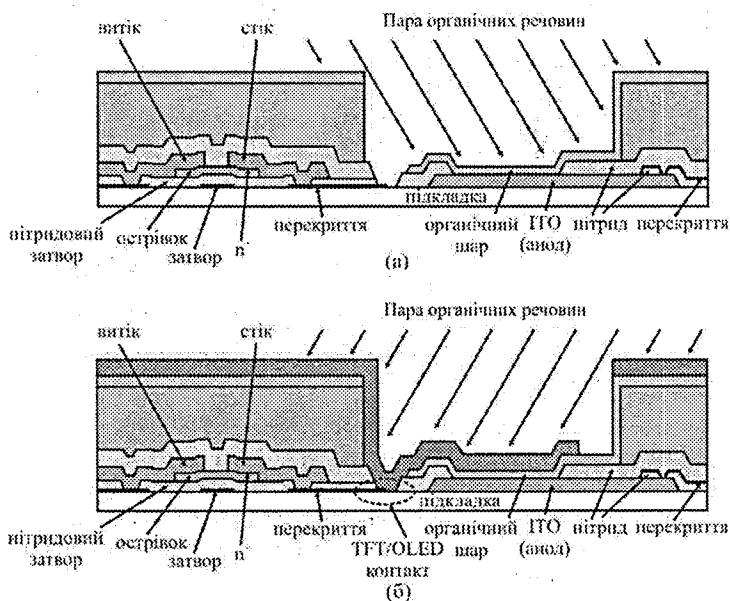


Рисунок 5.15 – Схема процесу напилювання органічних шарів (а) та катода (б) нової інвертованої AMOLED структури

Використовуючи OLED, можна створити гнучкі підкладки, які уможливають отримання нових форматів дисплеїв, здатних гнутися чи навіть скручуватися. Очікується, що першим застосуванням OLED на гнучких підкладках стануть пристрої для освітлення

На відміну від неорганічних світлодіодів, що зарекомендували себе як точкові джерела світла, OLED претендують на роль джерела світла для освітлення ділянок поверхонь та є прекрасними заміниками флюоресцентних ламп, оскільки працюють довше та не містять токсичних компонентів, зокрема ртуті.

Впродовж останніх 20 років рідкокристалічні дисплеї були домінуючою альтернативою електронно-променевих трубок, однак технологія на основі електролюмінісентної емісії з тонких плівок органічних матеріалів виявилась однією з найперспективніших технологій наступного покоління. Дисплеї на основі органічних світлодіодів (OLED) характеризуються широкими кутами огляду та можуть бути значно легшими за LCD, оскільки не потребують підсвічення.

Час відгуку OLED найчастіше становить кілька мікросекунд, що, в доповнення до насичених кольорів та прекрасного контрасту, робить OLED технологію привабливою для відтворення графічної інформації, зокрема відео високої роздільної здатності. На відміну від неорганічних електролюмінісцентних матеріалів, колір емісії OLED матеріалів можна легко змінювати, змінюючи склад емітувального шару. Як наслідок, було одержано емісію в усьому видимому спектрі. До того ж матеріали для OLED зазвичай аморфні. Такі властивості, в поєднанні з механічними якостями, дають змогу використовувати підкладки різних типів та збільшують імовірність створення гнучких кольорових OLED дисплеїв.

OLED можуть конкурувати в оптичних характеристиках з TFT-LCD, а менше споживання енергії робить їх гарними кандидатами для застосування насамперед у смартфонах та мобільних телефонах, а вже після цього – в ноутбуках чи тонких та економних телевізорах. Порівняння основних властивостей OLED та TFT-LCD дисплеїв наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Порівняння основних властивостей OLED та TFT-LCD дисплеїв

Властивість	Природа властивості
Використання матеріалу	Кількість емісійного OLED матеріалу становить 1% від кількості рідкокристалічного матеріалу для TFT-LCD. Відсутність кольорових фільтрів.
Вартість матеріалів	Емісійні матеріали дорогі порівняно з рідкими кристалами, проте немає потреби в застосуванні кольорових фільтрів та підсилювальних плівок.
Кут огляду	Широкий кут огляду без зміни коефіцієнта контрасту. Відсутність зміни кольорів при зміні кута спостереження.
Емісія світла	Відсутність підсвічення.
Час відгуку	Мікросекунди порівняно з мілісекундами в LCD технології. Час відгуку залишається малим за умови низької температури.
Прозорість	OLED панель може бути яскравою та прозорою.
Гнучкість	Легше створити гнучкий дисплей ніж LCD.
Споживання енергії	Споживання енергії OLED більше, ніж у TFT-LCD, однак зараз воно досягає конкурентних рівнів.
Термін експлуатації	Термін експлуатації OLED був надто коротким, проте зараз він значно покращений та сягає конкурентних рівнів.

В AMOLED споживання енергії залежить від типу відтворюваного зображення. Під час перегляду відео переважно використовується лише 10% максимальної потужності, а для типових веб-сторінок, що складаються переважно з білого зображення, затрачається 80% максимальної потужності. Існуючі алгоритми зменшення інтенсивності підсвічення для економії енергії під час переглядання відео здатні зменшити споживання енергії на десятки відсотків. Однак у веб-застосуваннях вони не дають бажаного результату.

Застосування телевізійних екранів дещо відрізняється від мобільних дисплеїв. Телевізійний екран здебільшого відтворює рухомі та змінні зображення і є більш чутливим до так званого вигорання екрана в певних місцях, що відбувається з часом.

Термін експлуатації дисплея визначається відрізком часу, за який його яскравість зменшується наполовину. В OLED різні кольори мають різний час життя. Для синього кольору це значення значно менше, ніж для червоного та зеленого, що може спричинити істотну зміну кольорів зображення на дисплеї після тривалого використання, наприклад, зображення матиме більше відтінків зеленого. Виробники дисплеїв можуть компенсувати малий час життя за рахунок збільшення розміру синього субпікселя. Проте загалом значення часу життя сьогодні такі, що спотворення кольорів стає помітним після 10 років використання.

Менше споживання енергії, прекрасні кольори, широкий кут огляду, відсутність втрати контрасту зі збільшенням кута огляду та тонка і проста структура роблять AMOLED дисплеї потенційно сильними конкурентами TFT-LCD. AMOLED дисплеї ще деякий час будуть дорожчими за TFT-LCD, однак вони мають усі шанси подолати цей недолік.

Розділ 6 ПЛАЗМОВІ ДИСПЛЕЇ

Плазмова панель (PDP) – це, по суті, матриця субміліметрових флюоресцентних ламп, які комплексно керуються електронними драйверами. Кожний піксель PDP складається з трьох елементарних газорозрядних комірок, які емітують ультрафіолетове світло. Ультрафіолетове світло перетворюється на видиме світло за допомогою люмінофорів трьох первинних кольорів. Плазма в кожній комірці плазмової панелі генерується з суміші інертних газів [5, 19].

Використання розряду в газі для відображення інформації розпочалось у 50-ті роки з винайденням знакового індикатора. Власне плазмову панель винайшли в 1960-х роках в Іллінойському університеті під час створення навчальних дисплеїв. В основу було покладено ідею використання для створення зображення на екрані матриці пікселів, розташованих на перетині електродів рядків і стовпців. Після прикладення напруги до певної пари електродів запалювався тліючий розряд у вибраних таким способом пікселях. Після формування початкової концепції дисплеїв постала необхідність ізоляції розряду з усіх боків. Спочатку розглядалась можливість використання резисторів, згодом резистивних листів, насамкінець – використання ємнісного опору. Використання ввімкнених послідовно з пікселями резисторів зумовило створення PDP, що працювали на постійному струмі (DC PDP). Перевагою ємнісного опору є те, що він може бути частиною структури панелі (діелектричні шари на поверхні електродів) та значно простіший у виготовленні. Крім того, дисплеї з ємнісними опорами можуть керуватись і постійним, і змінним (AC PDP) струмом, причому така конструкція має істотні переваги, зокрема забезпечує внутрішню пам'ять.

Перші PDP були монохромними дисплеями, в яких використовувались суміші Ne – Ar (переважно 0,1% Ar та 99,9% Ne), а емітоване світло мало червоно-оранжевий колір, що нагадував свічення неону. Розробка кольорових дисплеїв розпочалась у середині 1970-х років, а перші придатні для комерціалізації кольорові PDP з'явилися у кінці 1990-х років. До кінця 1990-х років домінуючими були три концепції: матрична структура змінного струму (ACM), компланарна структура змінного струму (ACC) та структура постійного струму. В ACM-структурі мікророзряд відбувається в області перехрещення електродів рядків і стовпців, покритих діелектричним шаром. В ACC структурі, створеній на початку 1980-х років, розряд відбувається між наборами паралельних електродів на одній підкладці (компланарними електродами), а адресація забезпечується електродами на протилежній підкладці, розміщеними ортогонально до компланарних електродів. Перший варіант цієї трьохелектродної структури був пропускнуго типу, тобто розряд відбувався за люмінофором, і видиме світло для того,

щоб вийти з дисплея, проходило крізь люмінофор. Висока продуктивність АСС структури була одержана у відбивальному варіанті, створеному в 1989 році. У такій загальноприйнятій зараз структурі розряд відбувається перед люмінофором, і видиме світло проходить лише крізь прозору передню підкладку дисплея. На кінець 1990-х років світлова ефективність становила $1 - 2 \text{ лм}\cdot\text{Вт}^{-1}$; яскравість – близько $500 - 700 \text{ кд/м}^2$ для 42 – 63-дюймової PDP, а контраст досягав 3000:1 у темряві та 120:1 при яскравому освітленні. Час експлуатації таких PDP міг становити 30000 годин.

Будова та принцип роботи АС PDP. В АС PDP кожна комірка є мікроскопічною газорозрядною камерою, утвореною діелектричними перегородками, електроди покриваються діелектричним шаром завтовшки 20 – 40 мкм. Для забезпечення ефективної роботи плазмової панелі в комірці необхідно створити тліючий розряд. В PDP міжелектродний проміжок становить приблизно 100 мкм, а тиск – $\sim 66650 \text{ Па}$, тому pd сягає $\sim 7 \text{ Па}\cdot\text{м}$. Тліючий розряд у газорозрядній камері виникає саме за таких умов.

Плазмовий дисплей складається з двох листів скла, розділених проміжком завтовшки $\sim 100 \text{ мкм}$, заповненим сумішшю інертних газів (переважно Хе – Не чи Хе – Не – Не), здатною емітувати УФ фотони під час розряду. На кожен пластину скла напилюють масив електродів, які покриваються товстим діелектричним шаром завтовшки 20 – 40 мкм.

Стандартною для комерціалізованих АС PDP є компланарна геометрія електродів, (рис. 6.1), коли розрядна комірка створюється трьома електродами: двома паралельними електродами на передній підкладці та одним електродом, ортогональним до двох компланарних електродів, на протилежному листі скла (задня підкладка).

Компланарні електроди в АСС PDP виготовляються з прозорого провідного матеріалу. Адресні електроди металеві, а їхня ширина для стандартної PDP становить $\sim 80 \text{ мкм}$. Послідовні пари компланарних електродів розділені діелектричними перегородками, сформованими на внутрішній поверхні скляних пластин. Діелектричний шар завтовшки 20 – 40 мкм покриває адресні та компланарні електроди. На діелектричну поверхню зверху компланарних електродів наносять шар MgO ($\sim 500 \text{ нм}$), який захищає діелектрик від розпилення та забезпечує високу вторинну електронну емісію під час іонного бомбардування.

Люмінофори трьох кольорів напилюють зверху на адресні електроди та діелектричні перегородки. Найчастіше перегородками є паралельні смуги, що розділяють рядки панелі та забезпечують взаємне відокремлення комірок. Остання тенденція полягає в тому, щоб закривати комірки в обох напрямках (плазмові панелі з вафельними перегородками). Таке розділення сприяє затриманню УФ фотонів у комірці та зменшує ефект взаємовпливу між сусідніми пікселями. На рис. 6.2 показано мікрофотографії внутрішніх перегородок рядкової та вафельної структур.

Світло, емітоване люмінофорами, виходить з PDP крізь передню скляну підкладку та компланарні електроди. Оскільки під час розряду також

випромінюється видиме червоно-оранжеве світло (як при неоновому свіщенні), то деякі виробники для покращення чистоти первинних кольорів вводять внутрішні кольорові фільтри, розміщені на передній скляній підкладці, перед формуванням діелектричного шару.

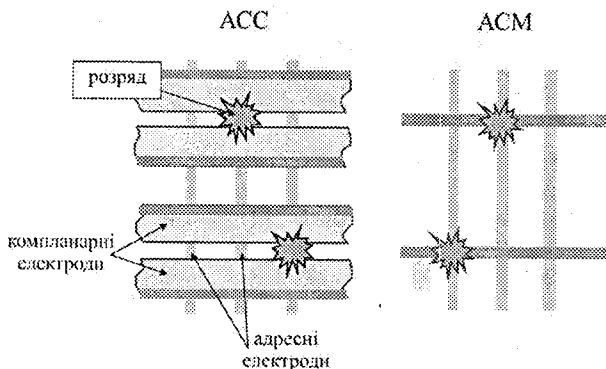


Рисунок 6.1 – Компланарна (ACC) та матрична (ACM) конфігурації електродів в AC PDP

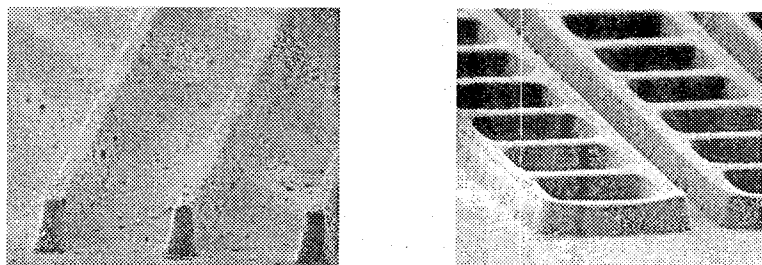


Рисунок 6.2 – Мікрофотографії внутрішніх перегородок рядкової та вафельної структури

В ACM (рис. 6.1) конфігурації масиви з паралельних електродів напилюють на кожну підкладку, а підкладки розміщують так, щоб електроди були ортогональними один до одного. Розряд створюється в газовому проміжку на перехресті стовпців і рядків після подавання на них напруги (рис. 6.3), тому кожна розрядна комірка створюється двома електродами. Адресація комірки в ACM структурі є порівняно простою (рис. 6.4). Підтримувальна змінна напруга V_s постійно прикладається між електродами рядків та стовпців. Амплітуда підтримувальної напруги повинна бути меншою, ніж амплітуда першого імпульсу, який запалює розряд.

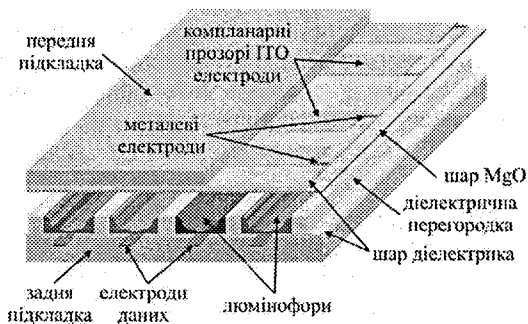


Рисунок 6.3 – Спрощений вигляд компланарної PDP

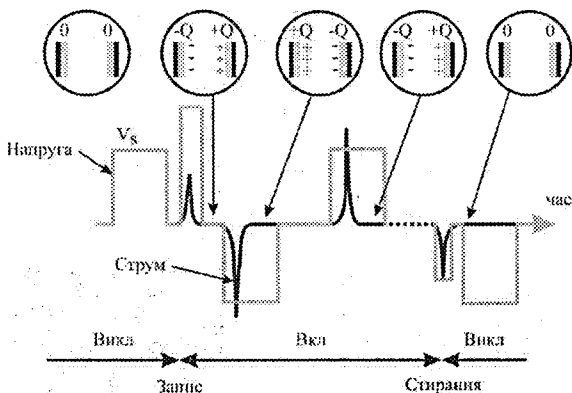


Рисунок 6.4 – Приклад послідовності записувальних, підтримувальних та стиральних імпульсів в ACM PDP. Показано імпульси напруги, струму та заряд у діелектричних шарах

Для ввімкнення певної комірки імпульс напруги прикладається між відповідними рядком і стовпцем. Амплітуда першого такого імпульсу напруги більша за напругу запалювання розряду в комірці. Відбувається іонізація газу, і електрони та іони рухаються до анода та катода, відповідно. Цей перший розряд створює перший спалах неоновому світінню та напругу (за рахунок накопичення зарядів на діелектричних шарах), протилежну зовнішній різниці потенціалів, яка гасить розряд. Тліючий розряд формується та швидко гасне через накопичення заряду в діелектричних шарах, що створює напругу, протилежну за знаком напрузі, прикладеній до електродів. У кінці такого імпульсу запису в діелектричних шарах накопичуються заряди $-Q$ та $+Q$. У момент часу t_1 полярність зовнішньої напруги змінюється, а сама напруга зменшується до значення, меншого за V_f . Ця зменше-

на прикладена напруга називається підтримувальною напругою комірки. Оскільки полярність прикладеної напруги змінилась, її напрямок тепер збігається з напрямком напруги на діелектричних шарах, утвореної під час першого запалювання. Сума цих двох напруг більша від напруги запалювання розряду, тому відбувається другий розряд, який створює новий світловий імпульс і протилежно напрямлені заряди на діелектричних шарах. У момент часу t_2 полярність знову змінюється, ініціюючи третій розряд, що викликає третій світловий спалах та протилежну напругу на діелектричних шарах.

Комірка виявляється ввімкненою або «записаною», і вона підтримується в цьому ввімкненому стані. Типові значення V_f та підтримувальної напруги становлять 150 і 90 В, відповідно.

Підтримувальна напруга не може забезпечити запалювання без допомоги напруги на діелектричних шарах; отже, для режиму стирання потрібна мала напруга запалювання, яка не може створити на діелектричних шарах напругу, достатню для наступного запалювання розряду. Це зменшення напруги на діелектричних шарах до нуля або майже до нуля здебільшого отримують, трохи зменшуючи амплітуду прикладеного змінного сигналу.

У схемі на рис. 6.4 показано заряди на діелектричних поверхнях після імпульсу запису, першого підтримувального імпульсу і т. д. Схема відповідає ідеальному випадку, коли стабільний режим досягається миттєво після імпульсу запису. Це можливо за точного вибору напруги запису, в іншому разі стабільний режим встановлюється через кілька імпульсів. Стирання проводять імпульсом напруги, амплітуда якого менша, ніж амплітуда підтримувального імпульсу. Після стирального імпульсу заряд на початку наступного циклу відсутній.

Адресація компланарних комірок в АСС структурі складніша, оскільки в ній комірка утворюється трьома електродами (рис. 6.5, 6.6). Коли комірка перебуває в увімкненому стані на компланарні електроди (рядки дисплея) подається послідовність імпульсів розряду. Третій електрод (на задній підкладці) отримав назву «адресного» та використовується для ввімкнення і вимкнення комірки.

На рис. 6.7 наведено схему послідовності імпульсів запису та підтримувальних імпульсів напруги в АСС PDP. Перший імпульс напруги подають на електрод А (адресний електрод) та електрод Y (сканувально-підтримувальний електрод), далі йдуть кілька підтримувальних імпульсів. Як і для АСМ, роль імпульсу запису виконують накопичені заряди на діелектричних поверхнях зверху підтримувальних електродів. Тому спад напруги на проміжку між підтримувальними електродами на початку наступної половини циклу стає більшим, ніж напруга запалювання: Розряд відбувається між сканувально-підтримувальним електродом Y та адресним електродом А (рис. 6.5, 6.6).

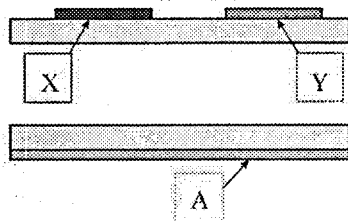


Рисунок 6.5 – Схема комірки в АСС структурі: А – адресний електрод, X та Y – підтримувальні електроди

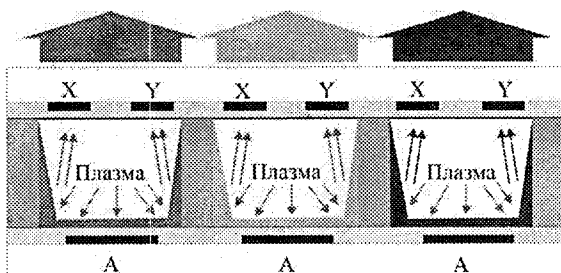


Рисунок 6.6 – Система електродів та принцип формування кольорів у PDP

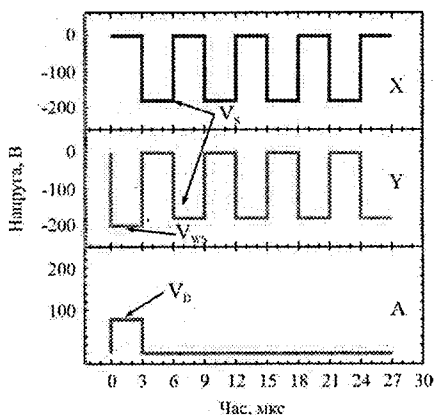


Рисунок 6.7 – Схема послідовності імпульсів запису (V_s) та підтримувальних імпульсів (V_s) напруги в АСС PDP. Першим подається імпульс запису (V_w). Сканувальний імпульс запису (V_{ws}) подається на електрод Y протягом першого імпульсу запису, водночас імпульс напруги даних (V_D) подається на адресний електрод А

Діелектричні шари, нанесені зверху електродів в PDP, повинні мати високу діелектричну проникність, високу прозорість для видимого світла та коефіцієнт термічного розширення, близький до коефіцієнта термічного розширення скляної підкладки. Товщина діелектричних шарів, виготовлених за стандартною товстоплівковою технологією, становить 20 – 40 мкм. На діелектричний шар наносять тонкий шар MgO (500 нм).

Розділ 7 ДИСПЛЕЇ НА ПОЛЬОВІЙ ЕМІСІЇ (FED)

Впродовж усієї довгої історії створення та вдосконалення електронно-променевої трубки перед розробниками стояло питання, як зменшити її розміри, зробити плоскою, а заодно позбутися інших недоліків, зберігши при цьому переваги. З розвитком мікроелектроніки проблема ставала все актуальнішою, оскільки об'єм елементів електроніки в дисплеях виявився настільки малим, що він абсолютно не впливав на їхні зовнішні розміри, які визначала електронно-променева трубка [3, 20].

Відомі ранні спроби створення плоскої електронно-променевої трубки. У 1972 році був розроблений аналог електронно-променевої трубки, в якому поверхня з розігрітих провідників виконувала функцію джерела вільних електронів, а набір цифровим способом адресованих сіток керував потоком електронів до люмінофора. Проблеми виробництва таких виробів та висока потужність керувальних сигналів перешкодили перетворенню прототипу на продукт.

Ідея використання в ЕПТ замість трьох катодів (по одному для кожного кольору) індивідуального катода для кожного елемента пікселя виникла давно (рис. 7.1). Таку панель можна зробити доволі тонкою, внаслідок чого зникає необхідність використання розгортки. Відомі численні спроби реалізувати ідею з використання ефекту польової емісії (звідси й перша назва таких панелей – FED-дисплеї (Field Emission Display)).

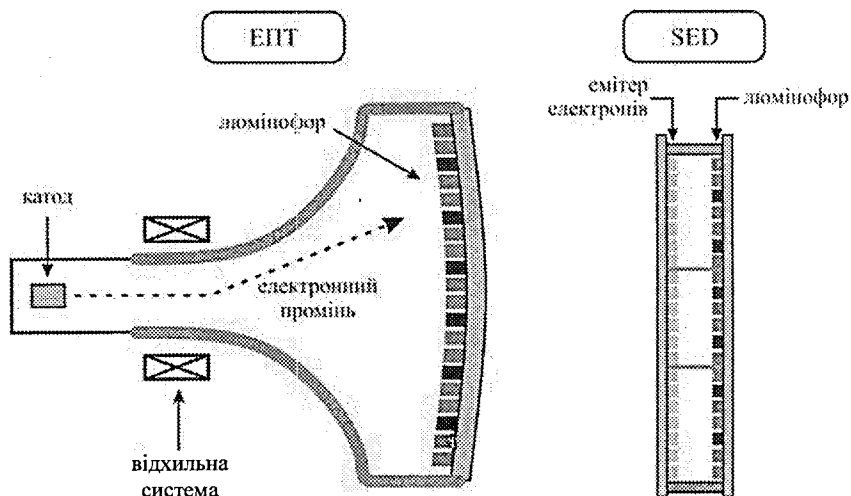


Рисунок 7.1 – Порівняння традиційної ЕПТ та SED дисплея

У них, як і в ЕПТ, для отримання зображення використовується випромінювання світла люмінофором внаслідок його бомбардування електронами. Конструкція дає змогу теоретично зменшити товщину панелі до 10 мм. Друга перевага такого дисплея порівняно з ЕПТ – відсутність системи розгортки. Порівняно з рідкокристалічними дисплеями FED-дисплеї не потребують лампи підсвічування, мають широкий кут огляду, малий час відгуку (високу швидкодію) та досконале відтворення кольору. Основною проблемою у подальшому вдосконаленні FED-дисплеїв стало створення ефективних емітерів електронів, як такі використовували голчасті та пірамідальні катоди.

На сьогодні FED-дисплеї активно використовуються японськими компаніями у такій техніці, як стільникові телефони, екрани для відеокamer тощо. Однак до початку серійного виробництва таких екранів довелося вирішити ряд проблем, зокрема вибрати найкращий матеріал для створення катодів та розробити метод нанесення люмінофора. Зараз шар люмінофора наносять за допомогою модифікованого струминного принтера, а мікрокатоди формують на основі тонких плівок алмазоподібного вуглецю.

Поряд з високою ефективністю нові дисплеї мають ще цілу низку не менш важливих переваг:

- ефективність перетворення електричної енергії у світлову становить 5 лм/Вт (тобто енергоспоживання в таких панелях втричі менше, ніж у PDP та вдвічі менше, ніж у ЕПТ);

- висока яскравість і контрастність зображення;

- необмежений кут огляду;

- мінімальна товщина (кілька міліметрів), що уможливило зручне закріплення на стіні;

- порівнянна простота створення панелей з високою роздільною здатністю для телебачення.

В основі роботи мікрокатодів лежить явище автоелектронної емісії, яке ми розглянемо нижче.

Автоелектронна емісія мікрокатодів. Автоелектронна емісія (автоемісія) – це явище випускання електронів металевими чи напівпровідниковими об'єктами за умови існування біля поверхні об'єкта сильного зовнішнього електричного поля (10^8 – 10^9 В/м).

Автоемісія характеризується густиною струму, величина якої значною мірою залежить від напруженості електричного поля. Теорія автоелектронної емісії напівпровідників на сьогодні не повністю розроблена. Експериментальні дані показують, що для напівпровідників залежність між густиною автоемісійного струму $\ln(J)$ та напруженістю поля $1/F$ нелінійна, якщо концентрація носіїв у зоні провідності низька.

Густину автоемісійного струму напівпровідників можна розрахувати за рівнянням Фаулера-Нордгейма для металів, враховуючи, що:

- електричне поле глибоко проникає в напівпровідник, що зумовлює зміщення енергетичних зон і зміну поверхневої концентрації носіїв заряду;

– концентрація електронів у напівпровіднику значно менша, ніж у металі, що обмежує значення густини струму J та зумовлює її залежність від зовнішніх впливів;

– поверхневі стани носіїв заряду впливають на характеристики автоемісії;

– вольт-амперні характеристики та енергетичні спектри автоемісійних електронів відображають зонну структуру напівпровідників;

– струм у напівпровіднику перерозподіляє його потенціал і впливає на енергетичний спектр електронів.

Рівняння Фаулера-Нордгейма для густини струму автоелектронної емісії металів має вигляд:

$$J(F) = \frac{A \cdot F^2}{\phi \cdot t^2(y)} \exp\left(-B \cdot \frac{\phi^{3/2}}{F} \cdot v(y)\right), \quad (7.1)$$

де $A = 1,5 \cdot 10^{-6}$;

$B = 6,87 \cdot 10^7$;

$t^2(y) \cong 1,1$;

$v(y) = 0,95 - y^2$;

$y = 3,79 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{F} / \phi$.

У потенціалі сил електростатичного відображення потрібно врахувати те, що напівпровідники мають значно меншу діелектричну проникність, ніж метали:

$$V(x) = -\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 1} \cdot \frac{e^2}{4x}$$

Цей факт враховується також у параметрі у функції Нордгейма $v(y)$, $t(y)$:

$$y = \left(\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 1}\right)^{1/2} \frac{\sqrt{e^3 F}}{|\varphi_{Ex}|}, \quad (7.2)$$

де ε_s – відносна діелектрична проникність напівпровідника;

F – напруженість електричного поля;

φ_{Ex} – поверхневий потенціал.

Під час автоелектронної емісії тунелювання електронів можливе як із зони провідності, так і з валентної зони. Для електронів зони провідності висота поверхневого потенціального бар'єра дорівнює електронній спорідненості χ , а для валентної зони $\chi + \varphi_{Ex}$, де φ_{Ex} – ширина забороненої зони.

Вважаючи, що $\phi = \chi$ для зони провідності та $\phi = \chi + \varphi_{Ex}$ для валентної зони, та підставляючи рівняння (7.2) в (7.1), можна розрахувати струм автое-

Підставляючи вираз (7.3) у вираз потенціалу ефективної роботи виходу $\phi_{ef} = \chi - \nu F^{4/5}$, отримуємо поправку на пониження поверхневого потенціального бар'єра

$$y = \left(\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 1} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{e^3 F}}{\chi - \nu F^{4/5}}$$

Уточнене значення y в рівнянні (7.1) дає змогу розрахувати густину струму автоелектронної емісії із зони провідності з урахуванням проникнення зовнішнього електричного поля F у напівпровідник.

Акумуляційний шар у валентній зоні не створюється через відсутність вакансій, тому електрони тунелюють переважно з верхніх рівнів валентної зони. Вважаючи, що $\phi = \chi + \varphi_{E_g}$ (для кремнію $\varphi_{E_g} = 1,12$ В при 300 К), отримуємо поправку до величини поверхневого потенціального бар'єра

$$y = \left(\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 1} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{e^3 F}}{\chi + \varphi_{E_g}}$$

Підставивши y у рівняння (7.1), можна розрахувати густину струму автоелектронної емісії з валентної зони напівпровідника під дією зовнішнього електричного поля F .

Форма потенціального бар'єра й автоелектронна емісія з обох зон напівпровідника n -типу провідності показані на рис. 7.2.

Для розрахунку густини струму автоелектронної емісії напівпровідника потрібна проста алгебраїчна апроксимація для функцій Нордгейма $\nu(y)$, $t(y)$. На рис. 7.3 показано розраховані значення функції Нордгейма.

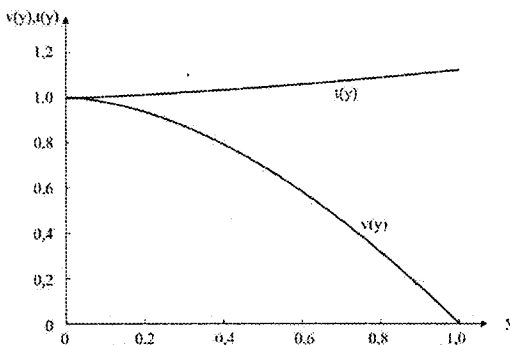


Рисунок 7.3 – Розраховані графіки функцій Нордгейма

Для практичного використання розраховані значення функцій Нордгейма $v(y)$, $t(y)$ апроксимовано методом найменших квадратів з отриманим поліномів, дійсних в області значень $0 \leq y \leq 1$

$$\begin{aligned} v(y) &= -0,7555y^2 - 0,2676y + 1,0138, \\ t(y) &= 0,0443y^2 + 0,0716y + 0,9967. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Отже, розрахувати густину струму для двозонної емісії напівпровідника можна за рівняннями (7.1) і (7.4), використовуючи уточнені значення змінних для зони провідності

$$\phi = \chi - vF^{4/5}, \quad y = \left(\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 1} \right)^{1/2} \frac{3,79 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{F}}{\chi - vF^{4/5}}, \quad (7.5)$$

$$v = 4,5 \cdot 10^{-7} \varepsilon_s^{-2/5}$$

та валентної зони

$$\phi = \chi + \varphi_{Eg}, \quad y = \left(\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 1} \right)^{1/2} \frac{3,79 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{F}}{\chi + \varphi_{Eg}}, \quad (7.6)$$

де ε_s – відносна діелектрична проникність напівпровідника;

F – напруженість електричного поля;

φ_{Eg} – ширина забороненої зони;

χ – електронна спорідненість.

Використовуючи рівняння Фаулера-Нордгейма (7.1) з функціями (7.4) та уточненими значеннями змінних (7.5), (7.6), побудовано графіки прозорості потенціального бар'єра (рис. 7.4) та густини автоемісійного струму (рис. 7.5) для кремнієвого мікрокатода.

У рівняння Фаулера-Нордгейма для розрахунку густини автоемісійного струму входить напруженість електростатичного поля на поверхні мікрокатода, значення якої залежить як від прикладених до електродів потенціалів, так і від геометричних форм цих електродів.

Напруженість електростатичного поля E пов'язана з градієнтом потенціалу U векторним рівнянням $E = -gradU$, а розподіл потенціалу у вакуумі з просторовим зарядом для декартових координат описується рівнянням Пуассона:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon},$$

де ρ – густина заряду.

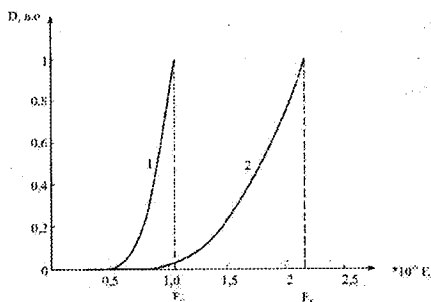


Рисунок 7.4 – Прозорість потенціального бар'єра: 1 – зона провідності; 2 – валентна зона

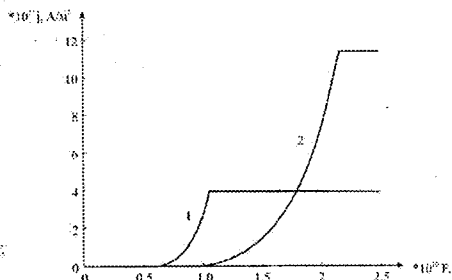


Рисунок 7.5 – Теоретична густина струму автоелектронної емісії: 1 – зона провідності; 2 – валентна зона

Для області, яка не містить заряду $\rho = 0$, рівняння Пуассона перетворюється на рівняння Лапласа. За результатами розрахунків побудовано еквіпотенціальні поверхні та градієнти потенціалів (рис. 7.6).

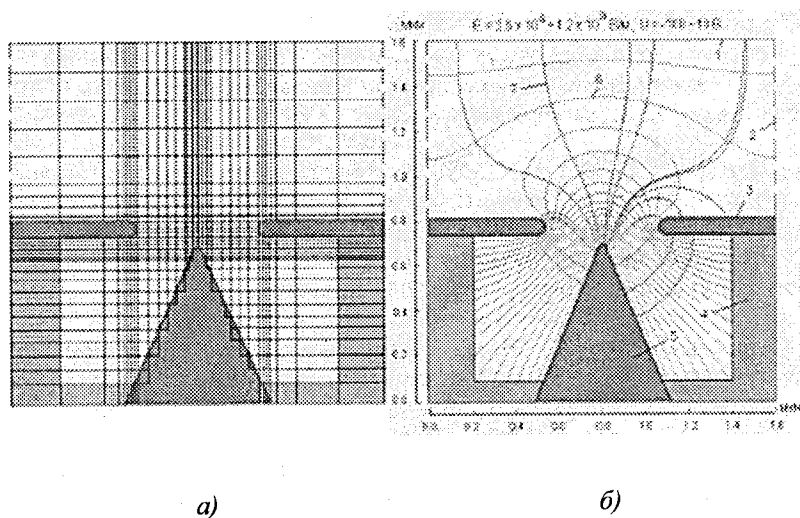


Рисунок 7.6 – Потенціали та напруженість електричного поля одноелектронного кремнієвого автоемісійного мікрокатада: а) прямокутна сітка зі змінним кроком; б) 1 – анод; 2 – вісь симетрії; 3 – екстракційний електрод; 4 – діелектрик; 5 – кремнієвий катод; 6 – еквіпотенціальні поверхні; 7 – лінії напруженості електричного поля

Електростатичний аналіз дає розподіл потенціалів і напруженості поля в міжелектродному просторі мікрокатода, на основі якого розраховується автоемісійний струм.

Рух електронів в електростатичному полі описується рівнянням Лоренца

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E}. \quad (7.7)$$

Здебільшого рівняння (7.7) використовується у формі проєкцій на координатні осі

$$m\ddot{x} = eE_x; m\ddot{y} = eE_y; m\ddot{z} = eE_z. \quad (7.8)$$

Рівняння (7.8) можна записати у вигляді задач Коші 2-го порядку. Так, для проєкції на координатну вісь X отримаємо

$$\ddot{x}(t) = f(t, x(t), \dot{x}(t)), \quad x(t_0) = x_0, \quad \dot{x}(t_0) = V_0. \quad (7.9)$$

Позначивши $\ddot{x} = V(t)$, можна записати (7.9) у вигляді системи рівнянь, яка розв'язується стандартним методом Рунге – Кутта порядку $N = 4$.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V, & \text{якщо } x(t_0) = x_0; \\ \frac{dV}{dt} = f(t, c, V), & \text{якщо } V(t_0) = V_0. \end{cases} \quad (7.10)$$

Оскільки мікрокатод з одним екстракційним електродом під час автоемісії утворює розбіжний пучок електронів (рис. 7.7), то для експозиції пікселів заданої форми та розмірів у площині анода потрібен додатковий фокусувальний електрод. Результати розрахунку траєкторій електронів для 30 точок емісії на поверхні мікрокатода з додатковим фокусувальним електродом і різними потенціалами на електродах з урахуванням просторового заряду показано на рис. 7.8.

Як видно з рис. 7.8, а, додатковий електрод дає змогу фокусувати електронні промені в площині анода та забезпечує практично однорідну експозицію пікселя розміром 0,8 мкм.

Принцип дії FED. FED-дисплей складається з сотень тисяч окремих комірок, які є, фактично, мікроскопічними кінескопами, хоча не мають відхильної системи та електронних гармат. Зате FED, як і традиційна електронно-променева трубка, має катод, який випускає електрони, позитивно заряджений анод і кольорові люмінофори, що світяться під дією електронного бомбардування. Однак існують і принципові відмінності. В кінескопах для створення потоку електронів використовують підігрівний катод і

прискорювальні електроди, а сканування екрана забезпечується відхильною системою. Кольорові кінескопи містять три електронні гармати та роздільний екран (тіньова маска), який перешкоджає попаданню електронного пучка на «чужі» люмінофори. Як бачимо, сучасний кінескоп – дуже складний пристрій, що потребує ювелірного юстування всіх частин. Розжарення катода помітно підвищує енергоспоживання, необхідне також відведення тепла.

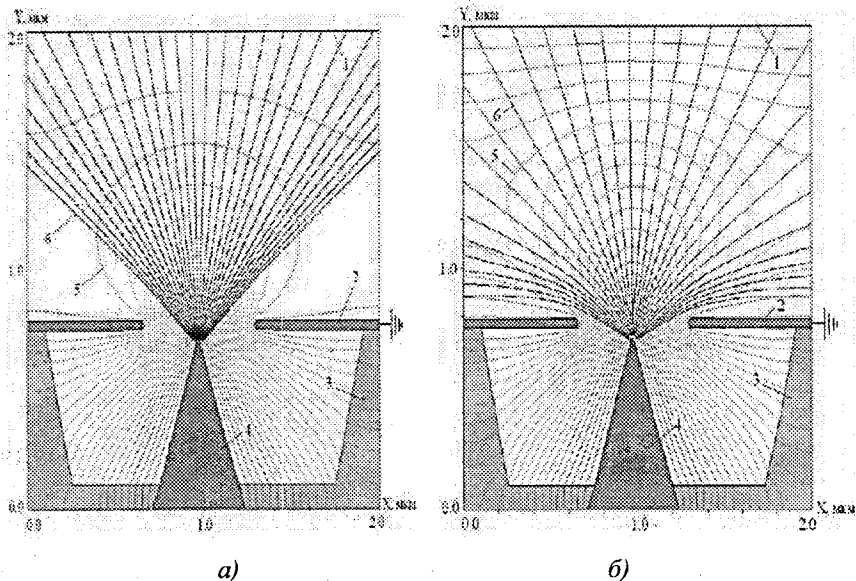


Рисунок 7.7 – Траєкторії електронів одноелектродного автоемісійного мікрокатада: *а)* без урахування просторового заряду; *б)* з урахуванням просторового заряду; 1 – анод; 2 – молібденовий екстракційний електрод; 3 – діелектрик SiO_2 ; 4 – кремнієвий катод; 5 – екіпотенціальні поверхні; 6 – траєкторії руху електронів

Однак кінескопи мають свої переваги, насамперед більш природне зображення, яке набагато приємніше спостерігати навіть у разі мерехтіння екрана (в моделях з 50-герцовою розгорткою).

Бажання поєднати переваги дисплеїв різних типів стало одним зі стимулів створення FED. Сама ідея дуже елегантна: навпроти кожної комірки з люмінофором потрібно розмістити власне мікроскопічне джерело електронів. Під дією електричного поля, створеного анодом, розміщеним під люмінофором, електрони будуть прискорюватися і, досягаючи поверхні екрана, ініціювати випромінювання люмінофорів. Для регулювання яскра-

вості свічення комірки достатньо змінювати струм, що йде від катода до анода.

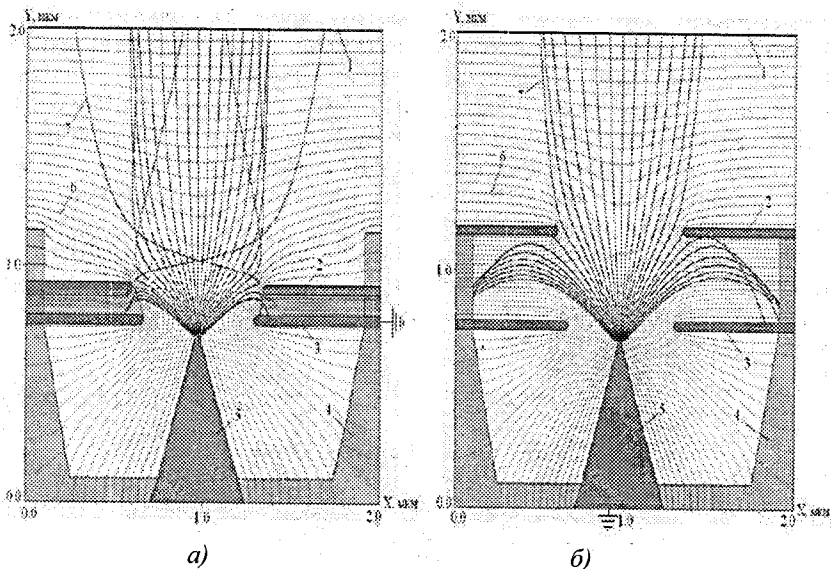


Рисунок 7.8 – Траєкторії електронів двохелектродного автоемісійного мікрокатода: а) 1 – анод; 2 – фокусувальний електрод; 3 – екстракційний електрод; 4 – діелектрик SiO_2 ; 5 – катод; 6 – екіпотенціальні поверхні; 7 – траєкторії руху електронів; б) 1 – анод; 2 – фокусувальний електрод; 3 – екстракційний електрод; 4 – діелектрик SiO_2 ; 5 – катод; 6 – екіпотенціальні поверхні

Конструктивно FED складається з двох скляних пластин, складених у спільний герметичний пакет, в якому створено високий вакуум (рис. 7.9).



Рисунок 7.9 – Конструкція типового дисплея на польовій емісії (FED)

На одному його внутрішньому боці нанесено люмінофори первинних кольорів, а на другому – численні катоди у вигляді мікроскопічних пірамідок (катодна матриця). Якщо між катодами та екраном (анодом) створити доволі високу різницю потенціалів, напруженість електричного поля на кінчиках пірамідок викличе емісію електронів. Якщо напруга перевищує 10 кВ, електрони набувають необхідного прискорення і летять у бік екрана, де, потрапивши на люмінофор, викликають його свічення. Для формування зображення на екрані такого дисплея достатньо лише організувати індивідуальне керування кожним катодом за допомогою електронної матриці, приблизно так, як це робиться у плазмових панелях із використанням окремих драйверів для рядків і стовпців.

Катодна матриця дисплея складається з мікроскопічних катодів та провідників у формі рядків і стовпців, напилених на діелектричну підкладку, які розділені шаром діелектрика. Пікселі утворюються в місцях перетину рядків і стовпців (рис. 7.10).

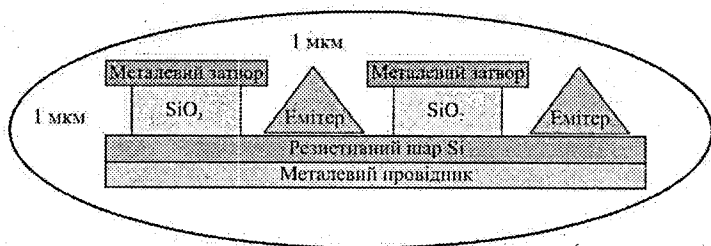


Рисунок 7.10 – Розріз катодної матриці

Електронна емісія з кожного пікселя керується напругою між затвором і катодом. Якщо до цих мікрокатодів прикласти напругу, майже вся енергія електричного поля концентрується на їхніх вістрях. Напруженість поля настільки висока, що буквально вириває електрони з матеріалу катода, забезпечуючи високу ступінь емісії (рис. 7.11). Емітовані електрони прискорюються в напрямі люмінофорного екрана. Напруга екрана (анода) повинна бути такою, щоб електрони зберігали достатню енергію після проходження крізь шар алюмінію, що вкриває люмінофор.

Перспективною технологією формування мікрокатодів для FED є використання для їх виготовлення тонких плівок алмазоподібного вуглецю.

Для фокусування електронного потоку використовується фокусувальна матриця у вигляді перфорованої металеві пластини з отворами, зробленими точно навпроти катодів. Вона виконує приблизно ту саму функцію, що й тінюва маска в кольоровому кінескопі – перешкоджає засвічуванню «чужих» люмінофорів.

Зараз FED з малим розміром екрана мають яскравість 600 кд/м² та роздільну здатність 1280×960 пікселів і використовуються переважно в автомобілях.

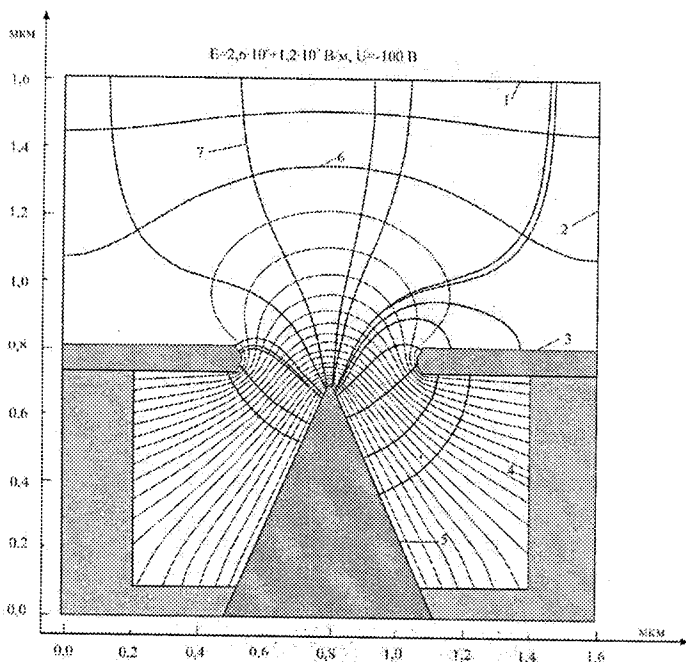


Рисунок 7.11 – Розподіл напруженості електричного поля мікрокатада:
 1 – анод, 2 – вісь симетрії, 3 – екстракційний електрод, 4 – ізолятор,
 5 – кремнієвий катод, 6 – екіпотенціальні поверхні,
 7 – лінії напруженості електричного поля

SED-дисплей. SED-дисплей – це різновид FED-дисплея, у якому катодом є плоскі мікроскопічні точки оксиду паладію (PdO), нанесені на електродну матрицю на задній скляній підкладці. Спрощена структура однієї комірки пікселя показана на рис. 7.12, а принцип дії SED панелі – на рис. 7.13.

Енергоспоживання SED-дисплея дуже мале. Ефективність перетворення електричної енергії на світло в ньому становить ~ 5 лм/Вт. SED-дисплей з великою діагоналлю споживає не більше половини енергії, необхідної дисплею на електронно-променевої трубці з екраном аналогічного розміру, і лише третину від того, що необхідно плазмовій панелі. SED-дисплей з екраном 42" споживає менше електроенергії, ніж дисплей на електронно-променевої трубці з екраном 32".

Для підвищення контрастності зображення в SED-дисплеях між смужками люмінофорів напильють матеріал, що поглинає світло, створюючи так звану «чорну матрицю», а для кращого передавання кольору використовують додаткові світлофільтри. Зазор між пластинами величиною 0,2 – 2 мм, створюється скляними циліндриками чи пластинками.

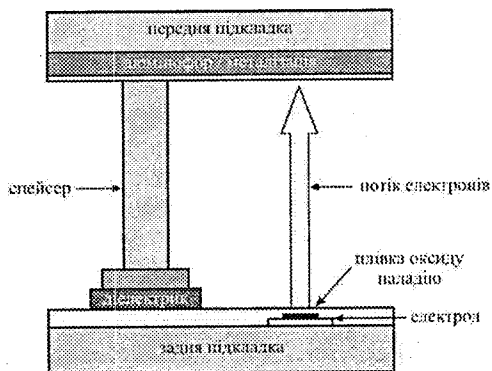


Рисунок 7.12 – Спрощена структура комірки SED-дисплея

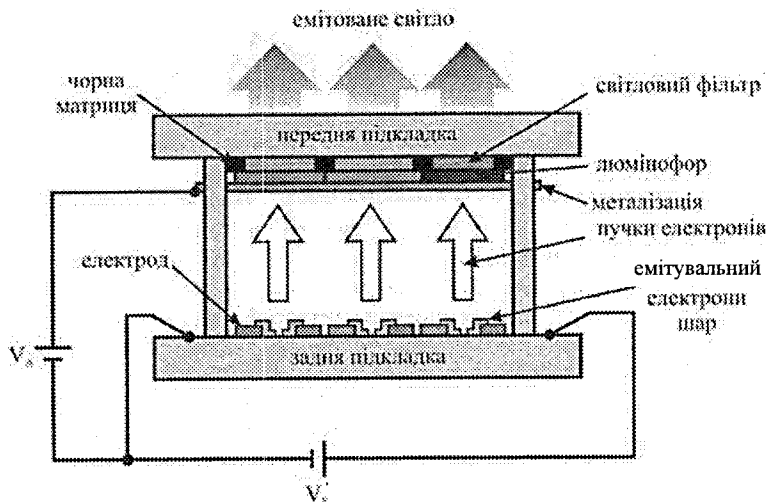


Рисунок 7.13 – Принцип дії SED панелі

Для забезпечення роботи дисплея необхідно подати на кожний анод відносно катода напругу ~ 10 кВ, а також керувальні сигнали на сканувальні та сигнальні електроди (рис. 7.14). Для катода використовують додаткове джерело напруги, завдяки якому електрони починають дрейфувати по поверхні катода, тунелюючи крізь тонку плівку оксиду паладію. Внаслідок тунельного ефекту струм кожного мікрокатода може досягати 40 мА, якщо активувальна напруга становить усього 22 В.

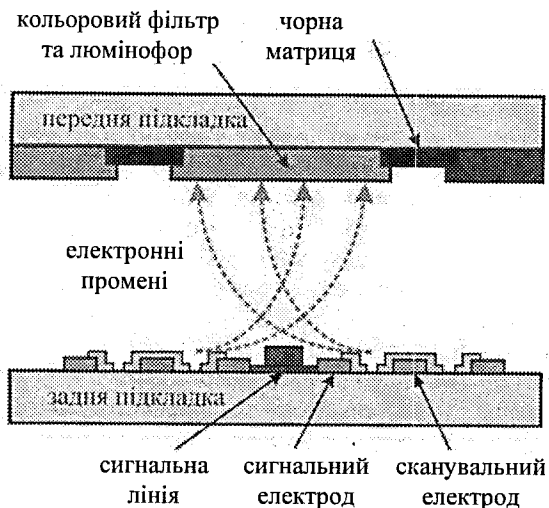


Рисунок 7.14 – Фокусування електронних пучків усередині комірки

CNT FED-дисплей. Подальший розвиток FED-технології неможливий без підвищення емісійної здатності мікрокатодів, якого можна досягти, використовуючи спеціальні композити, складовою частиною яких є нанотрубки. Пастоподібна форма композиту дає змогу наносити його на поверхню скляної пластини дисплея на вуглецевих нанотрубках (Carbon NanoTube FED або скорочено CNT FED). Інші елементи конструкції такого дисплея є типовими для FED-дисплеїв (рис. 7.15). Якщо анодна напруга становить 7 кВ, а густина струму $2 - 3 \text{ mA/cm}^2$, то ефективність перетворення дорівнює $7,7 \text{ лм/Вт}$, а яскравість дисплея – 600 кд/м^2 .

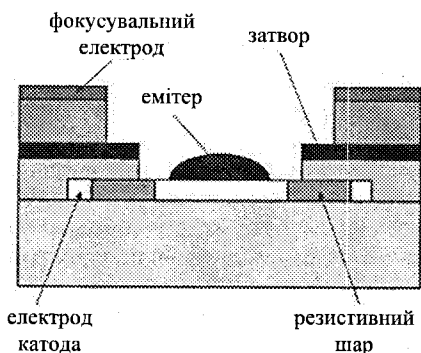


Рисунок 7.15 – CNT комірка

Розділ 8 ЕЛЕКТРОХРОМНІ ДИСПЛЕЇ

Електрохромізм належить до явищ, які викликають селективне поглинання світла у видимому діапазоні. Електрохромним матеріалам властива зміна кольору внаслідок пропускання через них електричного струму. Ця зміна кольору повинна бути оборотним процесом у разі зміни полярності прикладеної напруги. Відомі неорганічні та органічні електрохромні матеріали [21, 22]. Вперше це явище було описано в 1961 році, хоча ще в 1951 році було показано, що вольфрамова бронза, яка використовувалася в електрохімічному елементі, змінює свій колір залежно від того, є вона катодом чи анодом. Перші згадки про електрохромні дисплеї з'явилися лише в 1969 році. Саме тоді був описаний ефект в аморфних плівках WO_3 .

Електрохромізм вивчався багато років, його властивості детально описані в багатьох джерелах. Основною електрохромною речовиною є триокис вольфраму (WO_3) та суміші на основі солей 4,4-біпіридину, відомих як віологени.

Триокис вольфраму та багато інших електрохромних оксидів металів використовується в пристроях для утворення тонких плівок на поверхнях прозорих провідних оксидів, як, наприклад, оксид олова та індію (ITO). Введення малих позитивних іонів у кристали триокису вольфраму (WO_3) спричиняє, завдяки утворенню забарвленого комплексу, зміну кольору матеріалу (рис. 8.1).

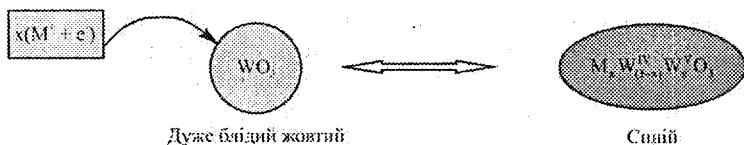


Рисунок 8.1 – Схематичне зображення зміни кольору WO_3 після введення позитивних іонів у кристалічну ґратку

Дифузія іонів у таку структуру є повільним процесом, що для малих пристроїв (менших за квадратний сантиметр) вимірюється десятками секунд. Така швидкість перемикавання аж ніяк не підходить для дисплеїв. Зворотний процес дифузії іонів зі структури кристала зазвичай ще повільніший. Проте такі дисплеї стабільніші до впливу ультрафіолету та температури, що робить їх, імовірно, більш придатними для застосування в пристроях, де необхідний час експлуатації до 25 років.

Явище електрохромізму створило передумови для промислового виготовлення дисплеїв, однак деякі фактори уповільнили цей процес. Основним фактором став великий час перемикавання електрохромних матеріалів.

Нестабільність матеріалів упродовж значного періоду часу та в різних умовах роботи також перешкодила ефективній комерціалізації електрохромної технології в дисплейній промисловості.

Останні дослідження матеріалів, переважно наноматеріалів, та успішна комерційна демонстрація електрохромної технології в автомобільних пристроях показують, що проблеми продуктивності та стабільності вирішені і комерціалізація електрохромних дисплеїв тепер можлива в пристроях різного роду. Така можливість дуже важлива, оскільки електрохромні пристрої значно легше виготовити, ніж пристрої інших технологій, що використовують дискретні компоненти та демонструють значно кращі оптичні характеристики, ніж дешеві твіст-нематичні рідкокристалічні дисплеї (TN-LCD). Процес виробництва електрохромних дисплеїв дуже подібний до виробництва LCD, тож необхідна для виробництва електрохромних пристроїв початкова матеріальна інфраструктура вже створена в LCD промисловості.

Електрохромізм. Цей ефект нагадує ефект забарвлення F-центрів. Розглянемо оптичні властивості F-центрів у іонних кристалах. Заборонена зона іонних кристалів (LiF, NaCl, KCl тощо) доволі широка, тому їх можна вважати діелектриками, прозорими в усій видимій області спектра. Виникнення у кристалічній ґратці різного роду точкових дефектів призводить до утворення в забороненій зоні додаткових рівнів, а відповідно, до виникнення додаткових смуг поглинання у спектрі поглинання кристала.

Точковий дефект – це порушення кристалічної структури, розміри яких у всіх трьох вимірах сумірні з міжатомною відстанню. Найпростішими точковими дефектами є вакансії – відсутність атома чи іона у вузлі кристалічної ґратки. В лужно-галоїдних кристалах електрон, локалізований в області аніонної вакансії кристалічної ґратки, утворює найпростіший точковий дефект.

Якщо смуга поглинання міститься у видимій області, то кристал набуває забарвлення. Комплекси точкових дефектів, які мають власну частоту поглинання, називаються F-центрами. F-центри або власні центри забарвлення в іонних кристалах є одним із видів дефектів кристалічної структури (рис. 8.2).

Аналогічно утворенню центрів забарвлення в лужно-галоїдних кристалах електрохромний ефект є наслідком інжекції електронів у кристалічну ґратку з наступним їх захопленням кисневими вакансіями для утворення F-центрів. Для роботи дисплея на основі плівок WO_3 необхідною є наявність води. Електричне поле викликає дисоціацію води у плівці WO_3 , після чого протони мігрують у полі до катода, де вони компенсують інжектвані з катода електрони. Ця область із високою концентрацією електронів і протонів перетворюється на воднево-вольфрамову бронзу H_xWO_3 ($0 < x < 1$). Через те, що для компенсації заряду потрібен іон H^+ , швидкодія приладу визначається рухливістю протонів. Оскільки рухливість протонів у WO_3 аномально висока, забарвлення відбувається доволі швидко.

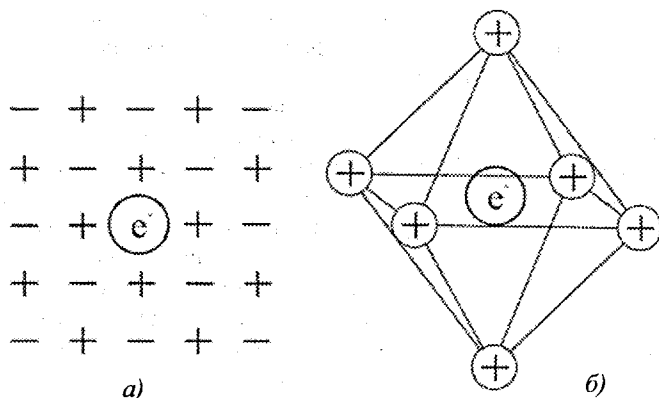


Рисунок 8.2 – Схема (а) та модель (б) F-центрів у лужно-галогідних кристалах

Типова структура електрохромного дисплея наведена на рис. 8.3. Для забарвлення WO_3 плівки використовуються два протилежних електроди – ITO та вуглецевий. Коли на вуглецевий електрод подається негативний потенціал, з нього в плівку WO_3 інjektуються електрони, а з електроліту – катіони. Цей процес триває доти, доки WO_3 не перетвориться на вольфрамову бронзу H_xWO_3 . Величина $x \sim 0,5$ є верхньою межею для кількості водню, яку можна інjektувати в плівку. Процес забарвлення можна припинити і за менших значень x . За відсутності потенціалу на електродах колір плівки зберігається впродовж деякого часу. Тому електрохромні дисплеї мають властивість довготривалої пам'яті відтвореного зображення. Для знебарвлення плівки змінюється полярність прикладеної напруги, і електрони нейтралізуються анодом, а катіони – катодом, тобто тими самими електродами, з яких вони вводилися в плівку. Струм протікає доти, доки вся плівка не повертається до початкового знебарвленого стану. Процес забарвлення та знебарвлення комірки електрохромного дисплею можна розглядати як зарядження та розрядження батареї.

Інжектований іон не відіграє істотної ролі в утворенні кольорових центрів; він вводиться в кристал лише для компенсації заряду. За однією з теорій забарвлення виникає, коли електрон, захоплений W^{5+} іоном, здійснює оптично індукований перехід до іона W^{6+} .

Розглянемо детальніше механізм забарвлювання. На рис. 8.4 показано схему механізму забарвлювання для приладу з сандвіч-структурою, зображеною на рис. 8.3. Прозорий електрод із окису індію та олова створює контакт до WO_3 , який інjektує електрони. Найчастіше використовують електроліт з низьким рН, який може легко переносити протони до WO_3 . Задній

електрод можна виготовляти з вуглецю, металу чи композиційного матеріалу. Припускається, що спад напруги на електродах нехтовно малий.

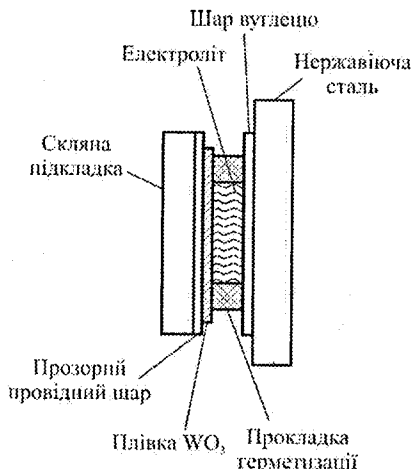


Рисунок 8.3 – Типова структура електрохромного дисплея

Оскільки WO_3 та задній електрод є різномірними матеріалами, між ними виникає ЕРС, пропорційна різниці їхніх хімічних потенціалів. Величина та напрямок цієї ЕРС залежать від природи заднього електрода, а також від того, забарвлена чи знебарвлена плівка WO_3 . Коли плівка забарвлюється (WO_3 перетворюється на H_xWO_3), її хімічний потенціал змінюється так, що вона стає більш позитивною відносно заднього електрода. Це значною мірою впливає на роботу приладу, оскільки ЕРС, що виникає при цьому, направлена проти прикладеної напруги, якщо плівка забарвлена, та вздовж неї, якщо плівка знебарвлена.

Динаміка процесу забарвлювання ускладнюється тим, що потенційно існує багато різних механізмів, які обмежують величину забарвлюючого струму.

Цими механізмами є: 1) перенесення електронів і протонів через об'єм плівки WO_3 ; 2) бар'єр на контакті, який інjektує електрони; 3) бар'єр на контакті, який інjektує протони (межі розділу електроліт – WO_3); 4) бар'єр біля протилежного електрода; 5) перенесення заряду в електроліті.

Оскільки електрод із окису індію та олова утворює омичний контакт до WO_3 , то механізм 2 в усіх випадках не має істотного значення. Вибираючи електроліт із низьким питомим опором, можна мінімізувати вплив механізму 5 за винятком дуже високих струмів. Механізм 4 можна виключити,

правильно вибравши задні електроди. Вважається, що найчастіше домінуючим є механізм 3.

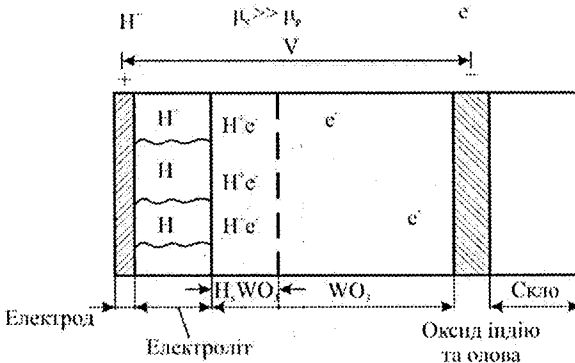


Рисунок 8.4 – Схематична діаграма процесу електрозабарвлення у WO_3

Ситуація, коли струм обмежений термічною активацією над бар'єром, добре відома та приводить до експоненціальної залежності струму від прикладеної напруги. Ці положення можна застосувати до межі розділу електроліт – WO_3 , щоб одержати вольт-амперну характеристику. Однак електрохромні прилади на основі WO_3 мають ще одну особливість. Коли відбувається забарвлення і x збільшується, на межі розділу виникає ЕРС, яка перешкоджає протіканню струму. Вона виникає через те, що з підвищенням концентрації водню в H_xWO_3 збільшується хімічний потенціал. Ця зворотна ЕРС V_r точно дорівнює зміні хімічного потенціалу, викликаний забарвленням. Якщо плівка забарвлюється до максимального значення $x \sim 0,5$, то V_r може досягати $\sim 0,7$ В. Отже, якщо прикладена напруга менша від цієї величини, струм припиняється, коли значення x менше за 0,5. Струм припиняється, оскільки V_r збільшується доти, доки її величина не зрівняється з прикладеною напругою. Отже, для забарвлення необхідно використовувати високу напругу. Оскільки із забарвленням плівки, V_r збільшується, струм зменшується. Ці положення використовувалися під час виведення формули для часової залежності забарвлюючого струму, яка пояснює його обернено пропорційну залежність від квадратного кореня з часу. Цей результат одержано для доволі швидкої дифузії протонів у плівці, коли нею можна знехтувати. У цьому разі забарвлюючий струм дорівнює:

$$J_c = J_0 \exp(V_a / 2RT) [(1-x)/x],$$

де J_0 – обмінний струм;

x_1 – стала, $x_1 \sim 0,1$;

R – газова стала;

T – абсолютна температура;

V_a – прикладена напруга.

Знебарвлення супроводжується зміною знака прикладеної напруги, протони переходять з H_xWO_3 в електроліт, а електрони – в електрод з окису індію та олова. На противагу забарвленню, знебарвлення не лімітується переходом протонів над бар'єром межі розділу електроліт – WO_3 , причому основою причиною є те, що зворотна ЕРС вносить внесок у струм, оскільки її напрямок збігається з напрямком прикладеної напруги.

Під час циклу знебарвлювання у плівку не надходять ні електрони з електроліту, ні протони з електрода на основі окису індію та олова. Отже, в області, прилеглої до електроліту, струм, який протікає в H_xWO_3 , є суто протонним, який обмежений просторовим зарядом (ПЗ) протонів. Аналогічно біля поверхні електрода з окису індію та олова існує електронний струм. Однак через більшу рухливість електронів ПЗ електронів не обмежує протікання струму і ним можна знехтувати. Отже, протікання струму визначатиметься струмом протонів в відповідній області ПЗ.

На рис. 8.5 показано, що відбувається в плівці через короткий час після початку знебарвлення. Протони виходять із області III, залишаючи тільки струм електронів, але ця область настільки тонка, що спадом напруги на ній можна знехтувати. Область II містить нейтральну H_xWO_3 з низьким питомим опором. Однак електрони пішли з області I, залишивши просторовий заряд протонів. Область II має малий питомий опір порівняно з областю I, тому на ній спостерігається малий спад напруги. Отже, можна припустити, що прикладена напруга діє в області I.

Область II є джерелом протонів, які живлять область I. Товщина області II зменшується з часом, оскільки протони та електрони переходять до межі розділу II–I і II–III, відповідно. Отже, область I розширюється. Струм протонів J_B в області I дорівнює

$$J_B = K\varepsilon_0\mu_p V_a^2 / x_1^3(t),$$

де K – відносна діелектрична стала;

ε_0 – діелектрична проникність вакууму;

μ_p – рухливість протонів;

x_1 – товщина області I.

Струм J_B зменшується з часом внаслідок збільшення x_1 . Часову залежність x_1 можна одержати з урахуванням того, що заряд, екстрагований із області II за одиницю часу, і є J_B . Це приводить до експериментально підтвердженого результату: $J_B \sim t^{-3/4}$. Аналогічно час t_B , необхідний для знебарвлення зразка, тобто час, за який значення x_1 стає рівним товщині зразка l , описується виразом:

$$t_B = ex\rho l^4 / 4\mu_p V_a^2 K\varepsilon_0.$$

Це вказує на сильну залежність часу знебарвлення від товщини плівки. Водночас, чим менша рухливість, тим більше часу потрібно для знебарвлення. Більша інтенсивність забарвлення (високі x) також викликає збільшення часу знебарвлення.

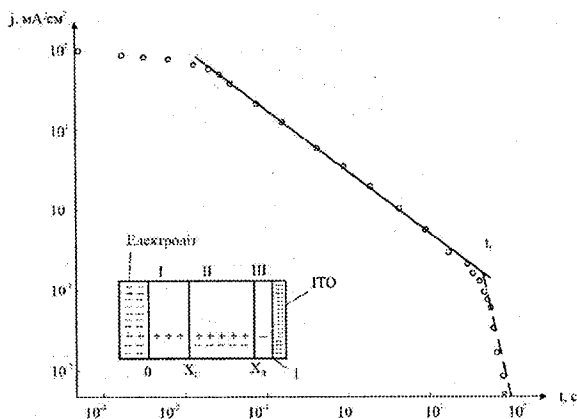


Рисунок 8.5 – Часова залежність знебарвлення електрохромної плівки WO_3

У перших електрохромних приладах найчастіше використовувалися аморфні плівки триокису вольфраму та молібдену. Велика рухливість іонів та інжекція електронів у цих матеріалів викликає сильне оптичне поглинання у видимій області спектра. Висока рухливість іонів необхідна, оскільки виникнення забарвлення спричиняє інжекцію позитивних іонів, а знебарвлення викликає екстракцію. В електрохромних приладах на основі WO_3 використовувалися такі іони, як Li^+ , Na^+ , Ag^+ . Недоліком їх застосування є мала швидкодія приладу.

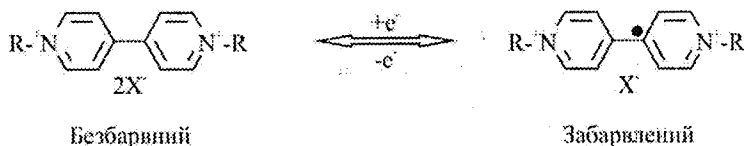


Рисунок 8.6 – Схема виникнення забарвлення молекули віологену

Віологени є електронними акцепторами; коли електрони проникають в матеріал, формуються інтенсивно забарвлені радикали (рис. 8.6). Прилад на основі віологенів – це дві паралельно розташовані на певній віддалі пластини (електроди), на одну з яких нанесено віологен. Відновлення віо-

логенів з розчину відбувається на катоді, а окислення – в розчині.

Ці пристрої відповідають вимогам автомобільної промисловості, до яких входять: діапазон робочих температур від -40 до $+85$ °С, час експлуатації – 10 років, здатність витримувати вплив ультрафіолетового опромінення.

Обмеженням віологенових систем на основі розчинів є малі швидкості перемикавання через повільну дифузію молекул із фази розчину в напрямі електрода. До того ж, архітектура навіть простіших дисплеїв прямого керування ускладнюється тим, що під час адресації доріжки до пікселів істотно забарвлюються віологенами. Цю проблему можна вирішити ізоляцією ділянок навколо пікселя, що надзвичайно складно для дисплеїв малого розміру.

Рішення для зменшення швидкостей перемикавання прийшло із введенням електродів великої площі, що використовують наноматеріали, до яких можна безпосередньо приєднати багато сотень наночарів віологену. Це усуває повільну дифузію віологену в розчині, а також дає змогу формувати пікселі безпосередньо під час друкування матеріалу електродів великої площі. Цікаво, що LCD технологія – домінуюча технологія дисплеїв, яка перешкождала ранній комерціалізації електрохромних пристроїв, – зараз створила технології виробництва, які можна використовувати для створення електрохромних пристроїв.

Дисплеї на нанокристалічних матеріалах. Розглянемо конструкцію електрохромного дисплея, в якому нанокристалічну та нанопористу плівку використовують як забарвлювальний електрод (катод), на якому закріплено моношар електрохромних молекул віологену (рис. 8.7).

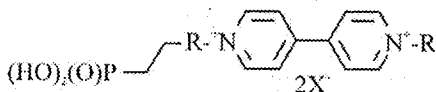


Рисунок 8.7 – Молекула віологену, з'єднана з наноструктурованою плівкою двооксиду титану (TiO_2)

Молекули характеризуються високою стабільністю та здатністю обертано змінювати колір протягом кількох мільйонів циклів. У пристрої електрохромний ефект отримують за допомогою верхніх електродів (анодів), що можуть зберігати заряд. Це забезпечує бістабільність пристрою і відповідно мале споживання енергії (рис. 8.8).

Дисплей працює в режимі постійного струму; на катод подається негативний потенціал до 1 В. Внаслідок цього молекули заряджаються та змінюють колір на глибокий синій. У відкритому колі розділення зарядів на катоді й аноді забезпечує пам'ять дисплея, що переважно зберігається протягом десятків годин. Матеріал анода покривається дифузійним білим від-

бивачем, що, в поєднанні з глибоким синім кольором молекул у забарвленому стані, зумовлює більшу читабельність дисплея порівняно з дисплеями будь-якої іншої технології.

Дисплеї на нанокристалічних матеріалах значно дешевші від TN LCD. Ці переваги зумовлені відсутністю поляризаторів, орієнтувальних шарів та деяких етапів виробництва, що впливають на вартість. Технологія таких дисплеїв не така чутлива до товщини комірки, як LCD технологія, оскільки всі перетворення кольору пристрою відбуваються в наноструктурованому електроді (рис. 8.8).

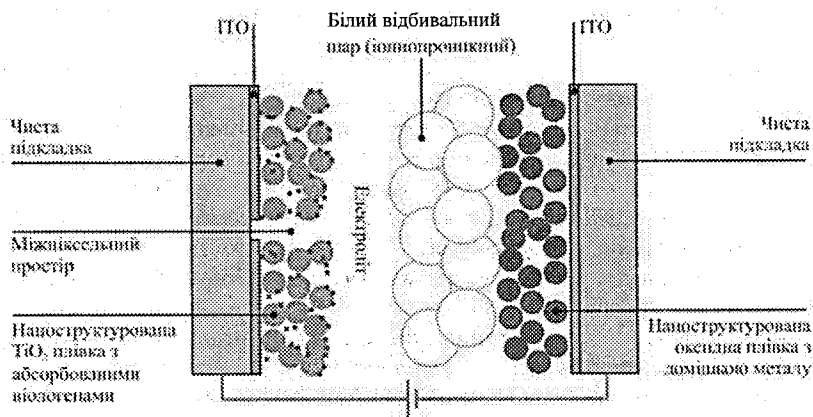


Рисунок 8.8 – Структура електрохромного дисплея на основі наноструктурованої плівки TiO_2

Важливою перевагою електрохромних дисплеїв є простота схеми керування. Для дисплея необхідні лише драйвери низької напруги (0,5 – 1,0 В). Дисплей споживає мало енергії, оскільки для збереження заряду, що підтримує колір, не потрібно подавати струм. Яскравий білий фон дисплеїв на нанокристалічних матеріалах є унікальним серед відбивальних дисплеїв.

Розділ 9 ЕЛЕКТРОФОРЕЗНІ ДИСПЛЕЇ

Електрофорезний дисплей (EFD) – це невипромінювальний дисплей, принцип дії якого ґрунтується на перенесенні заряджених пігментних частинок у колоїдній суспензії. Заряджені пігментні частинки переносяться за допомогою прикладеного електричного поля – це явище відоме під назвою електрофорез [23]. Першою спробою використання електрофорезу для записування чи відображення інформації була розробка процесів рідинної обробки для електрофотографії.

У 1973 році вперше були описані області використання та наведені попередні характеристики електрофорезного індикатора, відомого під назвою EFD. На основі цього була висунута ідея використання EFD як нового плоскопаралельного невипромінювального дисплея.

Конструкція та принцип дії. Електрофорезний дисплей складається з тонкого шару (50 мкм) колоїдної суспензії, розміщеної між прозорими електродами, нанесеними на дві скляні пластини. Колоїдна суспензія складається з пігментних частинок, завислих у кольоровій неводній рідкій суспензії контрастного відносно пігменту кольору. Пігментні частинки субмікронного розміру мають однополярний електричний заряд. На рис. 9.1 показано поперечний переріз EFD, частинки в якому заряджені негативно.

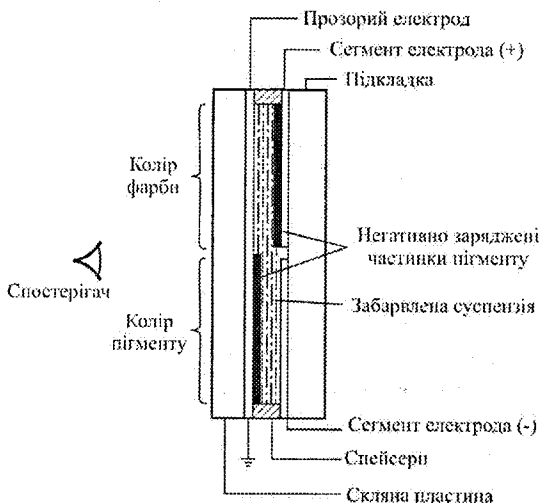
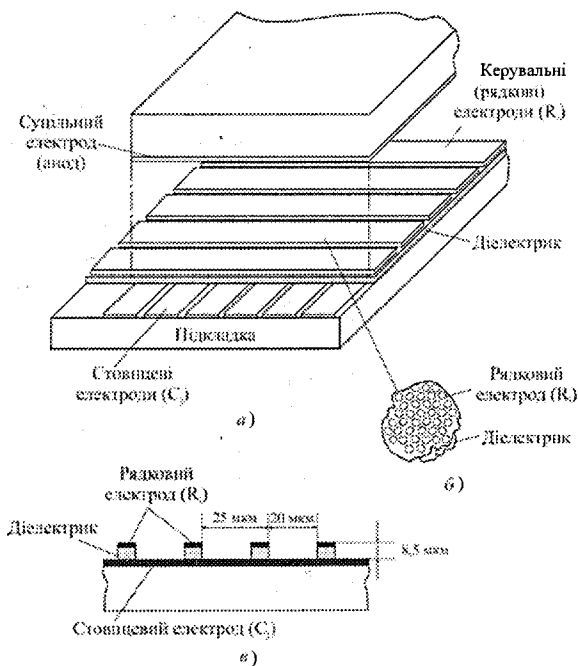


Рисунок 9.1 – Схематичне зображення EFD

Відобразити інформацію ним можна, надавши одному з прозорих електродів форму сегментів за допомогою стандартних методів фотолітографії. Якщо після цього один із сегментів з'єднати з позитивним полюсом джерела напруги, а другий – з негативним, то пігмент буде переміщуватися до протилежних скляних пластин, як показано на рисунку. В тій області, де пігмент заповнить ділянку перед ближнім електродом, спостерігач побачить колір пігменту, а в області, де пігмент перебуває біля заднього електрода, буде видно лише частину навколишнього засвічування, пропущену барвником та розсіяну пігментом.

Відома конструкція електрофорезного дисплея на основі двох різних пігментів: позитивно заряджених чорних та негативно заряджених білих мікрокапсул діаметром ~ 80 мкм, які містяться в рідині. Кожний дисплей містить мільйони таких мікрокапсул. Залежно від того, який потенціал прикладений до переднього електрода, виникає чорне або біле зображення.

Для здійснення електричної адресації найчастіше використовують метод, який ґрунтується на використанні керувального електрода (рис. 9.2).



Рисуюнок 9.2 – Схематичне зображення електрофорезного дисплея:
 а, в – типова конфігурація електродів;
 б – фрагмент керувального електрода

Одним боком елемента є протяжний прозорий електрод – анод. З другого боку елемента прозорий електрод розбитий на ряд ізольованих електродних смужок, названих електродами стовпців. Електроди стовпців покриті діелектриком, а електродний шар зверху над ізолятором розділений на другий ряд ізольованих електродних смужок – електроди рядків, які орієнтовані перпендикулярно до електродів стовпців. Електроди рядків розбиті на щільну сітку або решітку отворів, ізолятор між якими усунено, як показано на рисунку. Прикладаючи відповідну напругу між електродами рядків і стовпців та анодом, можна доволі просто фіксувати пігмент або усувати його з будь-якого елемента дисплея.

Розглянемо основні вимоги до колоїдної суспензії. Колоїдна суспензія – це активна та найбільш критична частина EFD. Вона складається з рідкої частини, стабілізуювальних агентів і субмікронних пігментних частинок. Склад суспензії значною мірою визначає довговічність, оптичні властивості та час відгуку дисплея.

В ідеальній суспензії пігмент має бути гравітаційно стійким – він не повинен ні осідати, ні спливати на поверхню рідини. По-друге, суспензія має бути колоїдно стабільною, тобто, окремі завислі частинки пігменту не повинні злипатися та утворювати агломерати під час роботи дисплея. Водночас взаємодія між рідиною та пігментом, тобто гідродинамічні ефекти, повинні бути контрольованими для підтримання сталої товщини шару пігменту. Необхідно також, щоб складові частини суспензії були хімічно сумісними між собою та з іншими матеріалами EFD.

Вибираючи оптимальні складові частини суспензії, потрібно пам'ятати, що рідка частина суспензії має значний вплив на електрофорезну рухливість. Електрофорезна рухливість частинки в рідкій частині суспензії описується виразом

$$\mu = \varepsilon \xi / 6\pi\eta ,$$

де ε – діелектрична стала;

ξ – нульовий потенціал;

η – в'язкість.

Отже, для швидкодіючих дисплеїв потрібно вибирати рідини з найбільшим відношенням ε/η . Водночас необхідно враховувати інші вимоги до рідкої частини суспензії, серед яких: широкий діапазон робочих температур, низька токсичність, висока хімічна стабільність, відповідна питома вага, хімічна інертність, високий питомий опір ($>10^{12}$ Ом·см).

Вибір барвника в суспензії ґрунтується на таких вимогах: розчинність у рідкій суспензії, хімічна стабільність, хімічна сумісність зі складовими частинами суспензії та висока оптична густина.

Пігменти, що використовуються в EFD, можуть бути органічними та неорганічними. Загальними вимогами до пігментів є: прийнятні оптичні

характеристики (розсіювальна здатність, колір, непрозорість тощо), нерозчинність у рідинах, мале набухання чи розм'якшення, здатність легко та стабільно заряджатися, хімічна стабільність та специфічна питома вага, яку можна узгодити з відповідною рідкою частиною суспензії.

Стабілізуювальні агенти, які використовуються в суспензіях, дуже важливі, однак їхня взаємодія з поверхнею пігменту вивчена ще недостатньо. Тому ефективні стабілізуювальні матеріали для певного пігменту найчастіше визначаються емпірично, причому їх підбирають на основі хімічної структури та прогнозованої хімічної взаємодії пігменту та стабілізатора.

Найзручніший метод досягнення гравітаційної стабільності полягає в забезпеченні однакової питомої ваги пігменту та рідкої частини суспензії. Досягають цього виготовленням суспензії з двох рідин, одна з яких має доволі велику питому вагу, а друга – досить малу. Ці рідини змішують так, щоб сумарна питома вага була такою, як у частинок.

Колоїдні суспензії – це нестабільні системи, оскільки велика поверхнева вільна енергія суспензії зменшується, коли частинки з'єднуються, утворюючи агломерати. Для стабілізації системи та уникнення агломерації між частинками повинна існувати сила відштовхування, яку можна створити, заряджаючи пігментні частинки та створюючи в такий спосіб електростатичне відштовхування. У неводних системах, де електростатична стабілізація малоефективна, велике значення має альтернативний механізм, так зване просторове відштовхування. Можна запобігти агломерації колоїдних частинок за наявності на їхній поверхні полімерних молекул (50 – 200 Å). Відштовхування в цьому разі зумовлене взаємопроникненням і/або стисканням полімерних ланцюжків. Отже, цей тип відштовхування виникає тільки тоді, коли відстань між частинками близька до подвійної довжини полімерного ланцюжка. Можна поєднувати електростатичний та просторовий механізми стабілізації для найефективнішого забезпечення колоїдної стабільності.

Необхідно також, щоб суспензія мала високу хімічну стабільність, оскільки хімічні реакції в суспензіях можуть негативно впливати на термін служби дисплея, швидкість відгуку та контраст. Тому, вибираючи матеріали для суспензії, особливу увагу необхідно приділити їхній хімічній сумісності та інертності.

Однією з основних технічних характеристик електрофорезних дисплеїв є контраст. Покажемо, як впливає склад суспензії на контрастні характеристики електрофорезних дисплеїв.

Суспензія складається з прозорої рідини та розподіленого в ній пігменту. Зрозуміло, що без барвника контрасту не було б. Якщо додати в суспензію барвник, пігмент поблизу заднього електрода стає непомітним і контраст збільшується. За деякої концентрації барвника контраст досягне максимуму, а потім почне зменшуватися з подальшим збільшенням концентрації барвника. Спад відбувається з моменту, коли непрозорість барвника починає зменшувати яскравість у ввімкненому стані, тобто пігменту з

боку спостерігача стає більше, ніж необхідно для досягнення непрозорості у вимкненому стані (пігменту з заднього боку елемента).

На рис. 9.3 показано залежність коефіцієнта контрасту від концентрації барвника та пігменту.

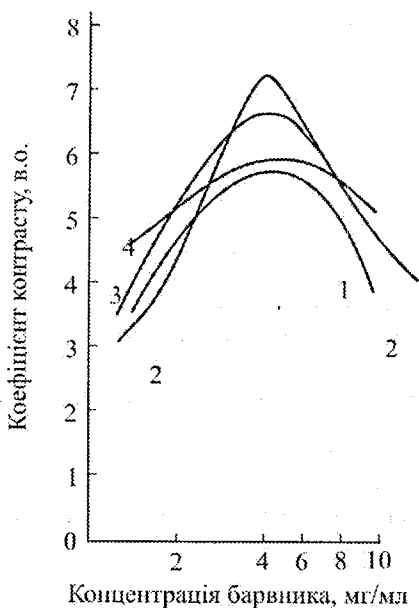


Рисунок 9.3 – Залежність контрасту від концентрацій барвника та пігменту для типового EFD завтовшки 50 мкм.

Концентрація пігменту, мг/мл: 1 – 25; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 45

Другою принциповою характеристикою дисплея, яка визначає контраст, є його товщина.

На рис. 9.4 показано, що для заданого складу суспензії та прикладеного електричного поля контраст зі збільшенням товщини елемента спочатку збільшується, а потім спадає, коли практично все світло, яке входить в елемент і розсіюється пігментом біля заднього електрода, поглинається шаром рідкого барвника. Однак, зменшуючи концентрацію барвника та збільшуючи товщину дисплея, можна одержати більший контраст, оскільки підвищується яскравість пігменту біля переднього електрода.

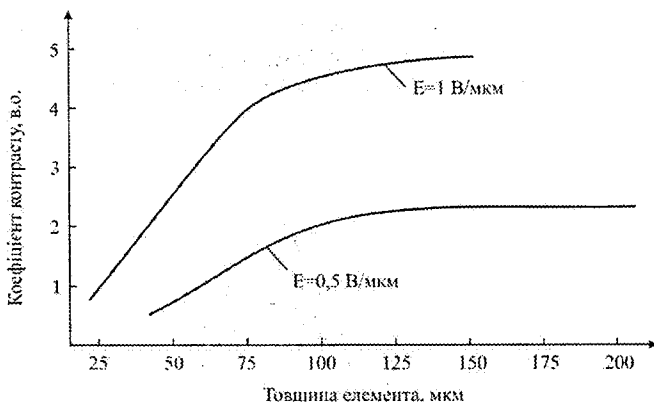


Рисунок 9.4 – Залежність контрасту від товщини EFD: прикладене електричне поле дорівнює 0,5 В/мкм і 1 В/мкм

Третьою характеристикою дисплея, яка визначає контраст, є прикладене електричне поле. Яскравість дисплея для заданого складу суспензії та товщини елемента залежить від щільності елементів, які розсіюють світло (частинок пігменту) біля електрода. Вплив прикладеного електричного поля, яке впорядковує шар пігменту, на яскравість показано на рис. 9.5.

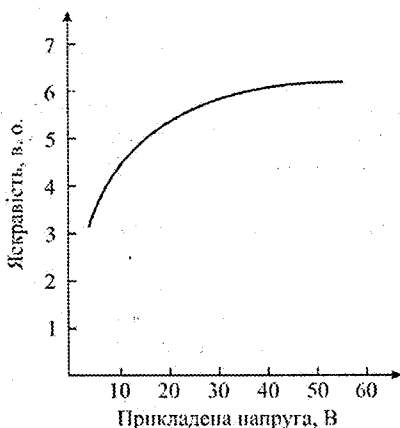


Рисунок 9.5 – Залежність яскравості EFD у ввімкненому стані від прикладеної напруги

На рис. 9.6 наведено залежність коефіцієнта контрасту від кута огляду для деяких дисплеїв.

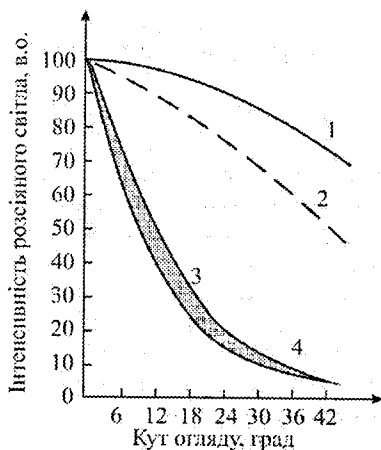


Рисунок 9.6 – Залежність коефіцієнта контрасту від кута огляду для деяких дисплеїв: 1 – крива Ламберта; 2 – електрохромний дисплей; 3 – PLZT кераміка; 4 – рідкокристалічний дисплей

Технічні характеристики електрофорезного дисплея наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Технічні характеристики електрофорезного дисплея

Розмір панелі	72 × 96 мм
Роздільна здатність	320 × 240 (85 точок на дюйм)
Частота зміни кадрів	50 Гц
Час оновлення	800 мс
Кількість пікселів	76800
Розмір пікселя	300 мкм × 300 мкм
Тип дисплея	Електрофоретичне чорнило
Товщина дисплея	300 мкм
Маса дисплея	7 г
Гнучкість	Радіус кривизни менший 2 см

Розділ 10 ЕЛЕКТРОННИЙ ПАПІР

Швидкий розвиток за останні 20 років цифрових мультимедійних засобів, зокрема персональних комп'ютерів та Інтернету, уможливив доступ до інформації через екрани та клавіатури комп'ютерів. Це привело до дискусії про настання «ери без паперу». Однак цифрові медіа насправді спричинили зростання споживання паперу.

Щорічно в світі використовується понад 300 мільйонів тонн паперу, з якого виготовляють понад 2 мільярди книжок, 350 мільйонів журналів та 24 мільярди газет. Це приблизно відповідає 45 трильйонам друкованих сторінок, значна частина яких друкується в кольорі. При цьому не враховують таких різноманітних паперових продуктів, як упаковки товарів, пости, картки тощо.

Незважаючи на різноманітність застосування, всі ці продукти паперової промисловості мають спільні ознаки:

- вони забезпечують висококонтрастну читабельну інформацію на гнучкому матеріалі;
- вони придатні для дешевого тиражування;
- вони здатні відтворювати широкий діапазон природних кольорів.

Отже, для створення електронного засобу, здатного конкурувати чи витіснити звичайний друк на папері в деяких його типових застосуваннях, промисловості інформаційних дисплеїв необхідно врахувати кілька чинників. По-перше, враження користувача від електронного дисплея має відповідати тому, яке людина отримує, читаючи друкований на папері текст. По-друге, електронний папір повинен бути доступним для різноманітного використання за дуже низької ціни. У цьому плані звичайний папір є вдалим та унікальним. І також, що не менш важливо, необхідно, щоб такі дисплеї могли відтворювати багаті та природні кольори.

Електронний папір було розроблено для подолання недоліків комп'ютерних моніторів. Наприклад, через використання для підсвічення рідкокристалічних моніторів імпульсних газорозрядних ламп людське око може сильно втомлюватися, тоді як електронний папір відбиває світло як лист звичайного паперу з надрукованою на ньому інформацією. Кут огляду таких дисплеїв більший, ніж у рідкокристалічних дисплеїв. Електронний папір легкий, надійний, а дисплеї на його основі можуть бути гнучкими, хоча і не настільки, як звичайний папір [22, 24-26].

Технології електронного паперу мають ряд переваг: у деяких з них використовують пластикові підкладки, завдяки чому дисплеї набувають гнучкості; завдяки стабільності зображення дисплеї з електронного паперу забезпечують комфортне читання; кути огляду таких пристроїв більші, а відсутність підсвічування та використання відбитого світла дають змогу читати тривалий час з помітно меншим навантаженням на очі. До того ж

контрастність цих дисплеїв і звичайних паперових газет сумірні, а вага навть менша. Значним недоліком на сьогодні є недостатнє відтворення кольорів.

Перші комерційні продукти, що використовують технологію електронного паперу, з'явилися на ринку недавно. Це портативні електронні засоби для читання текстів та цінники товарів, що автоматично оновлюються.

Найпоширенішою на сьогодні технологією електронного паперу є електрофорезні дисплеї, що забезпечують хорошу читабельність, низьке споживання енергії та сумісність із гнучкими підкладками.

Термін «електронний папір» означає не сформовану єдину технологію, а скоріше технологію, що складається з кількох методик виготовлення дисплеїв. Стандартів для цієї технології на сьогодні ще не існує. Проте загалом можна визначити технологічну сферу застосування, що характеризується властивостями як електронних, так і паперових медіа. Функціональні характеристики електронного паперу включають можливість електронного перезаписування відображеної інформації, запам'ятовування зображень (з мінімальними витратами на це енергії або ж зовсім без них), високу гнучкість дисплея та зручність створюваного зображення для читання.

Перший прототип електронного паперу, названий гіріконом, складався з поліетиленових сфер діаметром від 20 до 100 мкм (рис. 10.1). Кожна сфера складалася з негативно зарядженої чорної та позитивно зарядженої білої половини. Сфери містились у прозорому силіконовому листі, заповненому маслом, де вони могли вільно обертатись. Полярність напруги, поданої на кожну пару електродів, визначала, яким боком кожна сфера розвертається до лицевої поверхні дисплея, що забезпечує формування зображення.

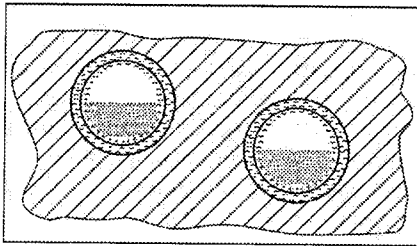


Рисунок 10.1 – Структура гірікона

Зараз існує багато технологій, пов'язаних з електронним папером. Ці технології можна наближено поділити на 3 категорії (типи):

- з використанням рідких кристалів;
- зі зміною положення кольорових заряджених частинок;
- з використанням оборотних реакцій забарвлення /знебарвлення.

На рис. 10.2 показано структуру гнучкого активно-матричного дисплея, в якому використовується зміна положення кольорових заряджених частинок.

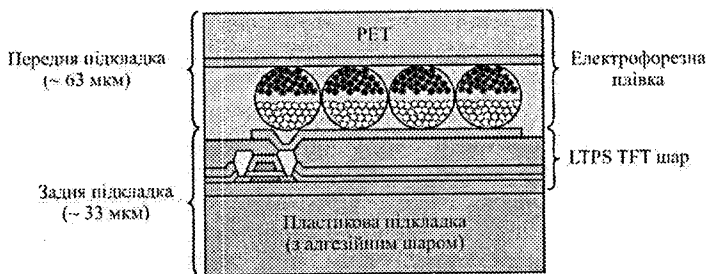


Рисунок 10.2 – Структура активно-матричного дисплея

Найвідомішими серед сучасних продуктів, що використовують електронний папір, них є мобільні пристрої індивідуального використання, призначені для читання інформації – так звані "e-book" або електронні книги.

Електронна книга є першою категорією продуктів із застосуванням технології електронного паперу. У 2004 році пристрій для читання під назвою LIBRIe, став першим продуктом побутової електроніки, де використано електронний папір. Його дисплей створено з використанням технології електрофорезного електронного паперу мікрокапсульного типу. Зображення цього дисплея формується завдяки використанню електронного чорнила, що складається з крихітних капсул, заповнених ізолювальною рідиною, в якій плавають заряджені білі та чорні частинки. На відміну від звичайних дисплеїв, наприклад, LCD, цей дисплей може створювати зображення, близькі до надрукованих на звичайному папері, за допомогою справжнього чорнила, що дуже важливо для пристрою, призначеного для книжок.

У 2006 році було випущено аналогічний, призначений для читання пристрій під назвою iLiad, за допомогою якого в 2007 році розпочався продаж електронних газет, які можна було завантажувати через Internet.

Сьогодні створюються складніші пристрої, що мають функцію бездротового інтерфейсу, товщину 3,7 мм, розмір дисплея, що дорівнює листу паперу формату A4, та вагу 600 г.

Більшість випущених у продаж пристроїв, що використовують електронний папір, містять жорстку панель для підкладки дисплеїв. Тому їх де-що важко відрізнити від звичайних дисплеїв. Сьогодні електронний папір повинен мати не лише зовнішній вигляд паперу, але також і його товщину, вагу та гнучкість.

Необхідність для електронного паперу мати характеристики справжнього паперу зумовлена функціональними перевагами останнього – папір не можна розбити у разі падіння та легко транспортувати. Можна припустити також, що форма, близька до традиційного листа паперу, уможливить краще сприйняття та розуміння відображеної інформації.

Прикладом електронного паперу, що має вигляд і характеристики

справжнього паперу, є електронний папір з оптичною адресацією. Цей гнучкий електронний папір утворений тонкими та легкими плівковими підкладками. Дисплей не містить ніяких додаткових компонентів, зокрема схем керування, та уможливорює миттєвий запис зображення за допомогою оптичного проектування зовнішнього шаблону після подання однорідного імпульсу напруги до всього середовища дисплея.

Структура складається з пари пластмасових підкладок із шаром прозорого електрода, сформованого на їхніх внутрішніх поверхнях, між якими міститься шар холестеричного рідкого кристала, світлопоглинальний шар та органічний фотопровідний шар.

Склад холестеричної рідкокристалічної суміші можна підібрати так, щоб відбивалось тільки падаюче світло певної довжини хвилі. Кольорові дисплеї з широкою кольоровою гаммою можна отримати, накладаючи три шари трьох первинних кольорів світла.

Водночас розробляються гнучкі пристрої з використанням електронного паперу, що містить усі внутрішні компоненти, характерні для звичайних дисплеїв. Очікується, що ці технології прискорюють розроблення персонального мобільного інформаційного пристрою з екраном великої площі, який можна буде легко розмістити на стіні чи стелі.

За останні кілька років дисплеї з електронного паперу з'явилися на ринку у формі електронних книг. Основою для цих пристроїв найчастіше є активно-матричні дисплеї розміром 6 дюймів чи більше. Електронний папір було вибрано для цих застосувань з кількох причин, серед яких: низьке споживання енергії, подібні до паперу візуальні характеристики, високий контраст зображення, хороша читабельність при освітленні денним світлом та кут огляду 180° . Ці ж переваги можна використовувати і в пристроях з активно-матричними дисплеями меншого розміру. Проте керувальна електроніка, що переважно використовується в системах із дисплеями з електронного паперу, складніша та має більше можливостей, ніж це потрібно в таких кишенькових портативних пристроях.

Зараз в електронних книгах використовується інтегрований підхід до керування живленням, який дозволяє замінити необхідні для роботи дисплея з електронного паперу та незручні в застосуванні інтегральні схеми з дискретними компонентами на одну інтегральну схему з кількома пасивними дискретними компонентами.

Дисплеї з електронного паперу малого розміру можуть бути дуже корисними для застосування в багатьох пристроях, де дисплеї зараз не використовуються. До таких застосувань належать такі:

Динамічні сенсорні панелі: Сенсорні панелі в ноутбуках можуть мати дисплей, що відобразить інформацію відповідно до активної програми, з якою працює користувач.

Електронні цінники. Цінники в магазинах роздрібної торгівлі, інформація на яких може оновлюватись бездротовим методом, для відображення найсвіжіших цін або додаткової інформації про товар, як-то країна вироб-

ництва, склад продукту тощо (такі цінники вже існують, але використовуються рідко).

Портативні накопичувачі жорстких дисків. Дисплеї з електронного паперу можна використовувати для відображення статичних зображень, що міститимуть інформацію про статус диска, наприклад, кількість вільних байтів, використаних байтів, інформацію про каталоги та файли.

Динамічні клавіатури в мобільному телефоні.

Це лише деякі з численних можливостей застосування дисплеїв з електронного паперу.

Електрохромні дисплеї в електронному папері. Останні вдосконалення електрохромної технології на основі електродів, виготовлених із модифікованих пористих нанокристалічних плівок, уможливили використання цієї технології в новітніх цифрових дисплеях. Це, наприклад, подібні до паперу оптичні властивості, високий контраст за будь-якого освітлення, великі швидкості перемикання, дуже мале споживання енергії, тривале збереження інформації, широка кольорова гама та сумісність структури пристрою з дешевим адитивним процесом друку.

Розглянемо структуру монолітного дисплея NanoChromics™ (рис. 10.3), який складається з кількох пористих шарів, друкованих один на одному та утворених на підкладці, модифікованій прозорим провідником. Кожний друкований шар виконує певну функцію. Шар TiO_2 з адсорбованим віологеном змінює колір за рахунок відновлення чи окислення молекул віологену. Білий відбивальний шар виконує функцію підвищення контрасту та електрично ізолює TiO_2 шар від АТО. АТО шар має високу ємність та зрівноважує заряд, накопичений у TiO_2 шарі, що забезпечує нейтральність пристрою загалом. Провідний вуглецевий шар додає додаткову ємність та слугує високопровідним заднім контактом для АТО.

На останньому етапі процесу друку пориста монолітна структура покривається рідким або гелеподібним полімером, висушується та покривається поліетилентерефталатною (PET) плівкою. Пристрій вмикається негативним електричним потенціалом, прикладеним між прозорою провідною підкладкою та шаром вуглецю. Це спричиняє відновлення молекул віологену (забарвлення) в TiO_2 шарі. При протилежному потенціалі віологен окислюється і пристрій біліє.

Унікальною особливістю електрохромного моноліту є порівняно низька напруга (-1 В), потрібна для утворення кольору та відбілювання дисплея. Це можна пояснити незначним потенціалом, необхідним для керування рухом іонів, що компенсують заряд, у порах моноліту. Внаслідок роботи при низькій напрузі також знижується споживання енергії самим пристроєм, час перемикання міститься в мілісекундному діапазоні.

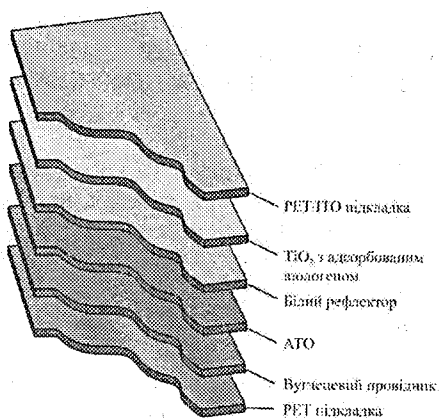


Рисунок 10.3 – Структура друкованого дисплея NanoChromics™

Ступінь забарвлення можна регулювати величиною інжектваного заряду. Використовуючи прозорі TiO₂ шари з великою щільністю адсорбованих віологенів у поєднанні з оптимізованим білим відбивачем, можна отримати інтенсивні кольори з високим коефіцієнтом контрасту. А правильно проектуючи та комбінуючи молекули барвників, можна досягти відтворення всієї гами кольорів.

Чорнило, що використовується для друку, виготовляється на основі не-токсичних компонентів, що легко синтезуються, зокрема вуглецю, TiO₂, ATO та невеликої кількості барвника. Всі активні шари можна нанести за допомогою типових процесів, наприклад друком по екрану.

Перехід до гнучких підкладок із друкованою монолітною архітектурою забезпечує істотне покращення гнучкості пристроїв та знижує ціну. Монолітна архітектура створює всі шари на єдиній підкладці (подібно до друкованих матеріалів сьогодні) і в такий спосіб забезпечує гнучкість, неможливу в звичайних дисплеях на основі двох паралельних підкладок. Крім того, вартість таких дисплеїв робить їх конкурентоздатними.

Сьогодні більшість плоскопанельних дисплеїв для утворення кольору використовують планарний RGB фільтр. Така схема забезпечує широкую гаму кольорів у дисплеях емісійного типу. У відбивальному дисплеї значна частина світла поглинається в дисплеї, внаслідок чого зменшується яскравість і звужується кольорова гама.

Розділ 11 АРХІТЕКТУРА TFT LCD ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ МОНІТОРІВ ТА НОУТБУКІВ

Архітектура TFT LCD дисплеїв. Типова схема керування TFT-дисплеєм монітора чи екрана ноутбука показана на рис. 11.1. Основними функціональними модулями TFT-дисплея є:

- приймачі вхідного інтерфейсу;
- дисплейний контролер (TCON, Timing CONtroller);
- драйвери рядків;
- драйвери стовпців;
- формувачі опорної напруги для драйверів стовбців;
- перетворювач напруги для живлення вихідних формувачів драйверів.

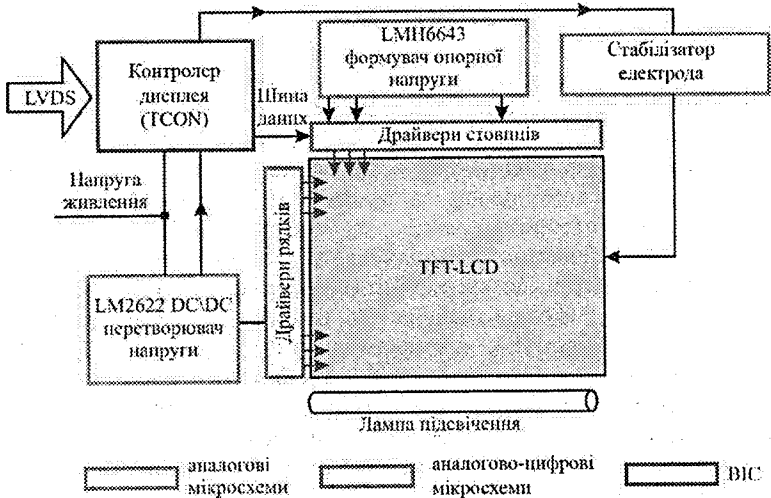


Рисунок 11.1 – Типова схема керування TFT-дисплеєм

Керування LC коміркою з активною транзисторною структурою адресації на основі аморфного кремнію. Передавання відеоінформації для TFT-дисплеїв може відбуватись як у цифровій, так і в аналоговій формі, а керування коефіцієнтом пропускання LC комірок екрана здійснюється за допомогою модуляції керувальної напруги. Значення контрасту визначається середньоквадратичним значенням напруги. Модуляційна характеристика (залежність контрасту від вхідної напруги) пікселя визначається двома передавальними характеристиками – вольт-контрастною характери-

стикою комірки LC-модулятора та передавальною характеристикою транзисторного ключа матриці активної адресації. На рис. 11.2 показано структуру одного елемента матричної активної структури TFT-дисплея.

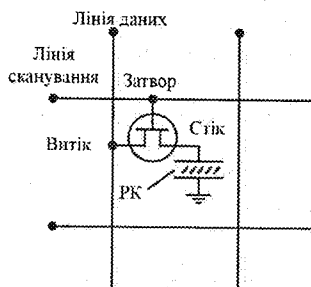


Рисунок 11.2 – Принцип активно-матричної адресації в TFT-дисплеї

Розрізняють пряму модуляцію, коли в кожному кадрі розгортки для кожного пікселя забезпечується модуляція контрасту за рахунок використання перетворення коду на аналогове значення напруги, яка подається на елемент пам'яті та впливає на LC-матеріал. На рис. 11.3 показана вольт-контрастна характеристика комірки LC-модулятора. Для прямої модуляції використовується лише похила ділянка характеристики. Точність передавання півтонів зображення визначається точністю формування напруги керування, причому робоча область цієї характеристики нелінійна.

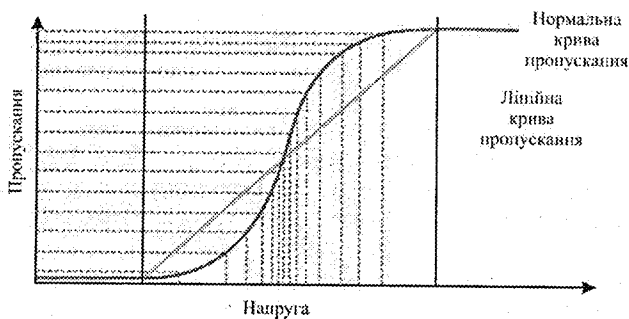


Рисунок 11.3 – Типова вольт-контрастна характеристика LCD

На рис. 11.4 зображено фрагмент типової структури активної матричної адресації дисплея.

Драйвери рядків мають доволі просту структуру – регістр зсуву зі схемою зміщення рівня напруги. Регістр зсуву забезпечує послідовний вибір рядків один за одним. Конденсатор елемента пам'яті в схемі керування дік-

селем утворюється, як правило, електродами стоку та шиною затвора наступного рядка. Аналоговий сигнал даних проходить із виходів драйвера стовпця через електроди стовпців на виточки керувальних TFT-транзисторів матриці. Рівні сигналів на затворах відкривають канали транзисторів, і рівень напруги на шині виточу заряджає конденсаторну комірку пам'яті. Потенціал на комірці пам'яті повинен зберігатися до наступного циклу запису цього рядка. Насправді, за рахунок паразитних витоків, за час кадру (18 – 20 мс) конденсатор пам'яті частково розряджається, проте цю величину можна скоректувати під час запису. Діюча на LC напруга утворюється між потенціалами на електроді пікселя, сполученого зі стоковим електродом конденсатора пам'яті, та протилежному йому спільному електроді.

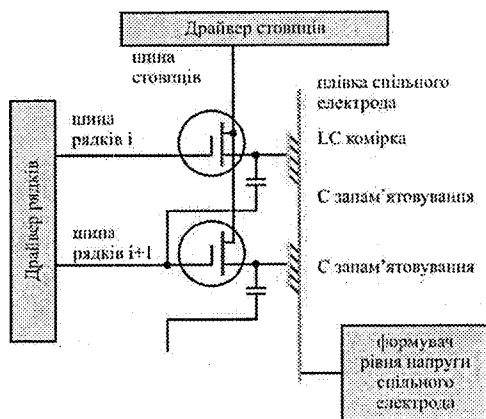


Рисунок 11.4 – Типова структура активно-матричної адресації дисплея

Для нормального режиму роботи LC комірки необхідна періодична зміна полярності напруги, прикладеної до електродів комірки. Напруга задається різницею потенціалів на електроді пікселя та спільному електроді. Тому зміна полярності може забезпечуватися двома методами.

За першим методом, зі зміною фази полярності одночасно змінюється полярність на спільному електроді та на електроді пікселя. Зміна напруги на електроді пікселя здійснюється через інверсію імпульсу напруги, що керує стовпцями. Зміна полярності робочої напруги може здійснюватися з різною періодичністю – через рядок, через декілька рядків або через кадр. Може також застосовуватися спосіб, коли в кожному рядку активної матриці відбувається чергування полярності керувальної напруги в суміжних пікселях.

Можливий також інший спосіб зміни полярності, за яким потенціал спільного електрода залишається постійним і виконується зсув відносно цього потенціалу рівнів напруги на електродах пікселя вгору або вниз. Цей

метод називається «direct», тобто прямий.

На рис. 11.5 показано відносні рівні керувальних сигналів для двох методів керування транзистором TFT матриці на аморфному кремнії.



Рисунок 11.5 – Відносні рівні сигналів для двох методів керування

Для першого методу використовується менша кількість робочих рівнів напруги та менша різниця між найвищим і найнижчим потенціалами. У другому методі використовується більше рівнів напруги та більша різниця між найвищою та найнижчою напругами задіяних сигналів керування. Проте, незважаючи на менші амплітуди керувальної напруги, за рахунок більшої кількості змін сигналу і перезарядження ємностей, у першому методі потужність споживання є більшою, ніж у методі з прямим керуванням. Для першого методу потрібно також формувати сигнал керування напругою спільного електрода. У другому випадку – це постійний рівень напруги. У структурі драйвера стовпця може застосовуватися лише один з описаних способів керування транзистором LC комірки.

На рис. 11.6 показана структура схеми формувача рівнів напруги для драйверів рядків і стовпців.

Ємнісні помножувачі напруги (помножувач напруги 1 та помножувач напруги 2) формують з напруги джерела живлення TFT-панелі (5 В або 3,3 В) напругу V_{LCD} для живлення вихідних каскадів драйверів рядків і стовпців, приблизно 15 – 20 В. Генератор імпульсів зміщення – мікросхема формувача рівнів напруги, які використовуються в драйверах рядків і стовпців, контролер – мікросхема контролю рівнів напруги.

Вхідний інтерфейс з відеоконтролером. У перших моделях TFT-панелей цифровий інтерфейс між відеоконтролером і схемою керування TFT-панеллю виконувався через паралельну шину сигналів. Сигнал кожного кольору мав свою шину. Розрядність шини визначалася кількістю бітів кодування кожного кольору. Останнім часом через зростання роздільної здатності та розмірів екрана виникла необхідність збільшення ширини смуги пропускання шини передачі сигналів відеоданих. На зміну порів-

няно повільній паралельній шині був розроблений інтерфейс, у якому відбувалось перетворення паралельної шини в послідовний код, який потім по диференціальних парах сигналів транлювався в модуль LC-панелі.

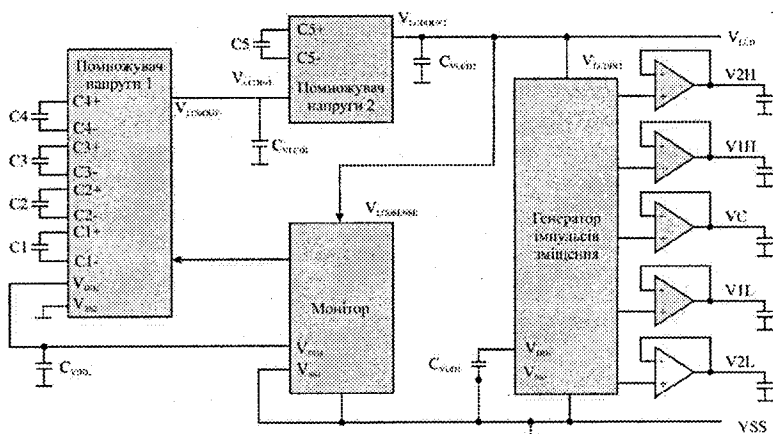


Рисунок 11.6 – Схема формування рівнів напруги для драйверів

На рис. 11.7 показана структура передавання даних через інтерфейс FPD Link між платою графічного контролера та LC-панеллю. Через цей інтерфейс транлюються не лише сигнали даних для основних кольорних сигналів, але й сигнали синхронізації рядкової та кадрової розгортки.

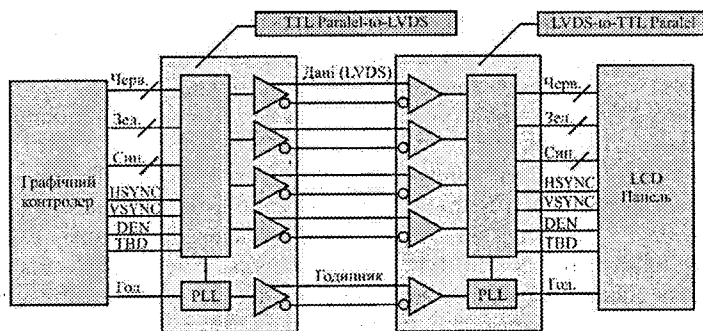


Рисунок 11.7 – Блок-схема інтерфейсу FPD Link (FLAT Link)

На блок-схемі інтерфейсу FPD Link (рис. 11.7) показано:

– PLL – синтезатор частоти для тактування вихідних сигналів приймача та передавача. Використовується для формування помноженої частоти, "прив'язаної" до вхідного сигналу тактування пікселів паралельної вхідної

шини;

- TTL Parallel-to-LVDS – конвертор сигналів паралельних шин у послідовні диференціальні сигнали LVDS;
- DATA (LVDS) – 4 послідовні канали передачі даних;
- Clock – канал передачі сигналу тактування даних LVDS шини;
- LVDS-to-TTL Parallel – конвертор послідовних сигналів шини LVDS у сигнали паралельних шин.

Цифровий інтерфейс LCD представлений сигналами LVDS. Здебільшого LVDS інтерфейс реалізують на окремій мікросхемі приймачів LVDS, які перетворюють вхідні дані RGB-формату та сигнали керування розгорткою (HSYNC, VSYNC, DE), що надходять з графічного контролера, на сигнали TTL, розташованого на платі контролера розгортки (TCON). Контролер розгортки далі здійснює переформатування і трасування даних до драйверів стовпців (CD – Column Drivers), розміщених на окремій друкованій платі схеми керування LCD. У контролері розгортки синтезуються спеціальні сигнали TTL для керування драйверами рядкової розгортки, зміною полярності вихідних сигналів драйверів рядків і стовпців, а також електронікою заднього підсвічування.

Інтерфейс внутрішньої шини дисплея. На сьогодні використовують три типи драйверів стовпців і відповідно три типи контролерів розгортки відносно організації шини передачі даних стовпцями. У першому типі використовується паралельна шина з TTL-сигналами, у другому – послідовні канали типу LVDS (шина RSDS або шина WisperBus). У третьому типі інтерфейсу використовується 5 диференціальних пар послідовних шин і сигнал тактування.

В інтерфейсі першого типу дані від TCON трасувалися в драйвери стовпців через паралельну шину разом із сигналами, що мають TTL-рівні. Ця шина даних, залежно від архітектури дисплея і глибини кольору (6 або 8 біт/колір), фізично реалізовувалася через одну чи дві магістралі, кожна з яких складалася з 18 або 24 провідників. Для XGA TFT-дисплея, в якому застосовувалися TTL-шини даних, використовувалися дві магістралі по 18 провідників (разом 36 провідників). Під час використання сигналів TTL-рівнів швидкість передачі даних шиною була обмежена рівнем 65 МГц. З підвищенням швидкостей передачі даних із використанням TTL-сигналів різко зростає рівень електромагнітних імпульсів та споживана потужність.

Інтерфейс RSDS. RSDS (Reduced Swing Differential Signaling) сигнали внутрішньої шини даних LCD дають змогу зменшити довжину та кількість провідників для передавання даних із високими швидкостями, кількість з'єднань, потужність споживання та рівень електромагнітного випромінювання, що виникає під час передавання високочастотних сигналів. Сигнали шин RSDS і LVDS дуже схожі за своїми характеристиками, вони відрізняються переважно лише призначенням. Ця технологія передавання даних застосовує низькорівневі диференціальні сигнали (± 200 мВ), має малий рівень електромагнітних імпульсів і забезпечує малу потужність спожи-

вання. Однак, на відміну від інтерфейсу LVDS, у якому застосовується схема типу 7:1 для перетворення паралельних даних у послідовну, в RSDS застосовується простіша схема 2:1, яка дає менші енергетичні витрати під час приймання та перетворення даних.

Через застосування низьких рівнів сигналів (на відміну від TTL) дані можуть передаватися з більшою швидкістю, що забезпечує високу роздільну здатність екрана TFT дисплеїв. На сьогодні частота сигналу синхронізації послідовного потоку становить 65 МГц. Оскільки це послідовний інтерфейс, загальна площа, яку займають провідники шини, значно менша, ніж у паралельних шин з архітектурою TTL. У TTL-шині використовується 6-розрядне кодування на кожен колір і застосовуються дві однакові магістралі для розпаралелювання передавання даних по двох групах мікросхем стовпців. У результаті отримуємо $[6 \times 3] \times 2 = 36$ провідників. Якщо до них додати 2 сигнали синхронізації, то утворюється система з 38 провідників. Архітектура RSDS аналогічної пропускну здатності має лише одну магістраль, яка складається з 9 диференціальних пар даних та однієї пари диференціальних сигналів синхронізації. В результаті потрібно 20 провідників. Якщо застосувати технологію передачі RSDS, кількість провідників та їхня площа на друкованій платі зменшаться на 47%.

Мікросхеми National Semiconductor для керування TFT дисплеями. Фірма National Semiconductor з початку 90-х років є одним з лідерів у розробленні мікросхем для TFT-дисплеїв. Тому далі як приклад схемотехніки базових мікросхем електроніки сучасних TFT-дисплеїв розглядаються мікросхеми саме цього виробника.

Архітектура контролера розгортки FPD85310. Контролер розгортки (TCON) задає всі часові діаграми роботи вхідного інтерфейсу, роботу з внутрішніми шинами даних, виконує перетворення форматів даних і масштабування зображення, а також формування сигналів розгортки. На сьогодні всі функції контролера розгортки реалізуються в одній великій інтегральній схемі (BIC). Рівень інтеграції BIC контролера розгортки продовжує збільшуватися. До його структури додаються нові функціональні блоки, а також інтегруються елементи, які раніше реалізовувалися в додаткових компонентах, зокрема приймачі інтерфейсу LVDS.

Логіка TCON складається з програмованих логічних блоків для приймання та обробки даних відеозображення та сигналів синхронізації. З вхідного потоку сигналів виділяються сигнали рядкової та кадрової синхронізації, а також приймання даних. У цій мікросхемі контролера розгортки для передачі даних у стовпцеві драйвери використовується паралельна шина з сигналами TTL-типу.

Вхідні 8-розрядні дані для кожного кольору перетворюються в 6-бітовий формат для зменшення глибини відтворюваних кольорів методом відкидання 2 молодших розрядів або ж використанням технології Time Multiplexed Dithering з генерацією псевдовипадкових 8-розрядних даних на колір.

Контролер розгортки FPD87310. У контролері FPD87310 використовується дисплейний інтерфейс FPD-Link. Модуль приймачів здійснює приймання та перетворення послідовних RGB LVDS сигналів у паралельний формат з TTL рівнями. Сигнали трьох 8-розрядних шин потім проходять крізь модуль стискання 8-розрядного коду RGB в 6-розрядний. Це перетворення виконується лише в разі застосування стовпцевих драйверів з 6-розрядним кодуванням пікселів. Далі дані надходять у блок формування сигналів інтерфейсу з драйверами стовпців, де відбувається перетворення даних у послідовні сигнали RSDS шин. Передавачі RSDS виконують перетворення TTL рівнів у диференціальні сигнали інтерфейсу RSDS.

Драйвери рядків і стовпців TFT дисплея. Основними параметрами мікросхем драйверів є: кількість виходів, напруга живлення, напруга вихідних сигналів. Для драйверів стовпців до цих параметрів додається тип інтерфейсу та кількість градацій, а також режими зміни полярності робочих сигналів.

Рядковими драйверами для керування TFT дисплеями можуть бути будь-які драйвери, призначені для застосування в STN-дисплеях. Їхня структура є простою – двонаправлений регістр зсуву та схема зсуву рівнів. Схема зсуву рівнів перетворює логічні рівні з виходів регістра зсуву у відповідні рівні напруги для керування закритим і відкритим станами TFT-транзистора. Тому в усіх розглянутих схемах керування TFT-дисплеями не вказується конкретний тип рядкового драйвера.

Драйвер стовпців FPD33684 виробництва National Semiconductor характеризується низьким рівнем споживаної потужності. FPD33684 є драйвером з прямим керуванням, який забезпечує 64 рівні градації яскравості та має 384 робочих виходи. Пряме керування виключає необхідність модуляції напруги на спільному електроді. Цей спосіб дає змогу істотно зменшити потужність споживання дисплея, скоротити кількість компонентів, а також зменшити рівень паразитного підсвічування пікселів і забезпечити кращу якість зображення.

Іншою модифікацією цього сімейства є драйвер стовпців FPD33680. Він має такі самі характеристики, як і драйвер FPD33684, проте більшу кількість виводів – 480. Цей драйвер призначений для підтримання формату SXGA з частотою кадрової розгортки до 75 Гц, а також формату UXGA з частотою кадрової розгортки 60 Гц. Основними застосуваннями драйвера цього типу є TFT-панелі формату UXGA для ноутбуків.

Топологія внутрішньої шини TCON – драйвери стовпців. Залежно від формату, в TFT-дисплеях можуть застосовуватися різні поєднання драйверів стовпців. Залежно від конструктивного розташування контролера розгортки і драйверів стовпців можуть бути реалізовані різні варіанти реалізації топології шини даних. На рис. 11.8' показана L-подібна топологія шини даних TCON-CD. Топологія застосовується, якщо мікросхеми контролера розгортки та драйвери стовпців розташовані на різних друкованих платах. Проте варіант топології L має недоліки. Якщо довжина шини зрос-

тає, неможливо забезпечити малий рівень спотворення сигналів у зоні крайніх драйверів. Такий варіант може застосовуватися для дисплеїв малого формату з малими розмірами екрана.

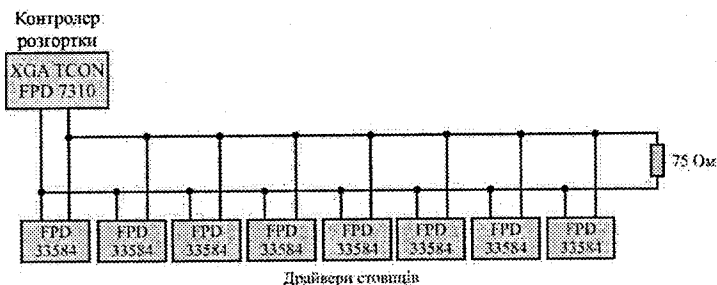


Рисунок 11.8 – L-подібна конфігурація шини даних

Рівень спотворення сигналів можна зменшити, якщо контролер розгортки розмістити на одній платі з драйверами стовпців або розташувати його в центральній частині шини, симетрично відносно розміщення драйверів стовпців. На рис. 11.9 показано варіант T-подібної топології RSDS шини. Варіант з T-конфігурації може використовуватися для дисплеїв більшої роздільної здатності та з великим розміром екрана. Проте цей варіант не забезпечить передавання сигналів без спотворень для великих екранів. Довжина друкованої плати з драйверами стовпців у таких дисплеях досягає 40 – 50 см.

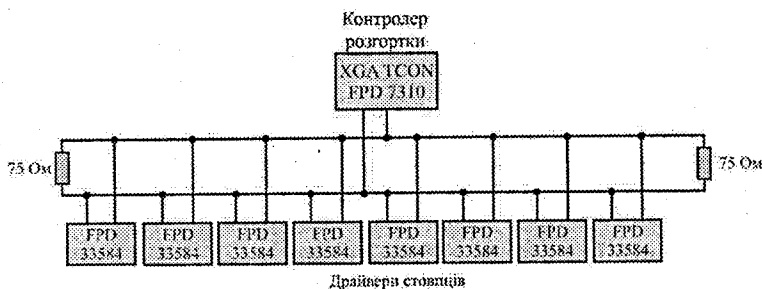


Рисунок 11.9 – T-подібна конфігурація шини даних

Для дисплеїв з великою роздільною здатністю, наприклад UXGA, необхідно забезпечити передавання високочастотних даних на великі відстані, оскільки самі дисплеї мають великі лінійні розміри. Відповідно, потрібно використовувати більшу кількість драйверів стовпців. У цьому разі для досягнення кращих умов передавання сигналів даних застосовуються дві

окремі шини, кожна з яких обслуговує свою половину драйверів стовпців. На рис. 11.10 показана топологія розташування подвійної шини RSDS в TFT дисплеї з роздільною здатністю 1600×1200 (RGB).

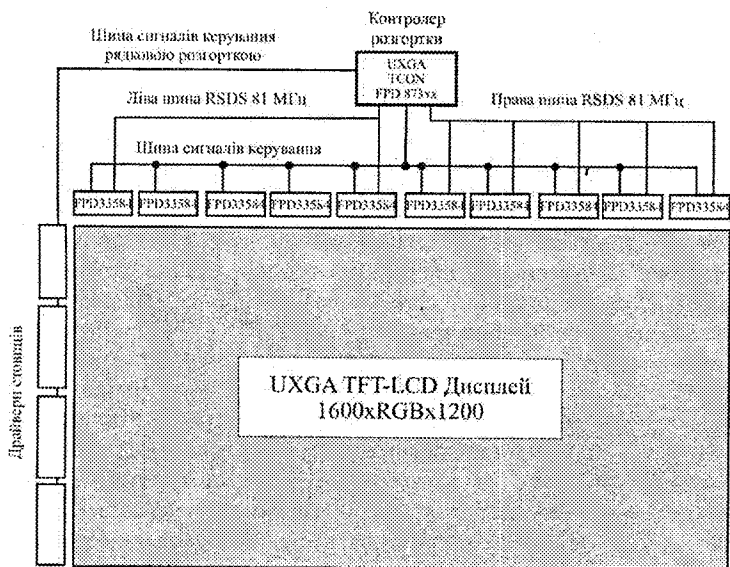


Рисунок 11.10 – Застосування шин у дисплеях високої роздільної здатності

PPDS архітектура для телевізійних LCD-панелей високої роздільної здатності. На рис. 11.11 показано типову архітектуру TFT LCD панелі високої роздільної здатності. Дані та сигнали керування розгорткою надходять з відеоконтролера персонального комп'ютера чи модуля радіоканалу телевізора в модуль контролера розгортки TCON LCD панелі. Контролер розгортки забезпечує виділення сигналів синхронізації та формування на їх основі сигналів керування синхронізацією драйверів стовпців і рядків, форматування даних для передавання по внутрішній шині дисплея в драйвери рядків. Вихідні відеосигнали не можуть забезпечити керування електродами стовпців. Потрібно виконати їх корекцію за амплітудою відповідно до передавальних характеристик LCD матеріалу та транзистора активної матриці. Необхідно також враховувати нелінійність спектральних характеристик кольорових фільтрів LCD-панелі. У схемі керування сучасних TFT LCD дисплеїв нелінійна корекція цифрових сигналів RGB здійснюється табличним методом драйверами стовпців. Перетворення цифрових сигналів у сигнали керування електродами стовпців забезпечують нелінійні цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), причому для кожного керу-

вального виходу потрібен свій ЦАП. Донедавна для зменшення розрядності ЦАП застосовувалася комбінація нелінійного ЦАП і масиву опорної напруги, коли на кожен драйвер стовпця окрім сигналів керування надходить декілька опорних напруг, сформованих окремою схемою. Опорна напруга для спільного електрода LC-панелі в цьому разі, як правило, формується тією ж самою мікросхемою.

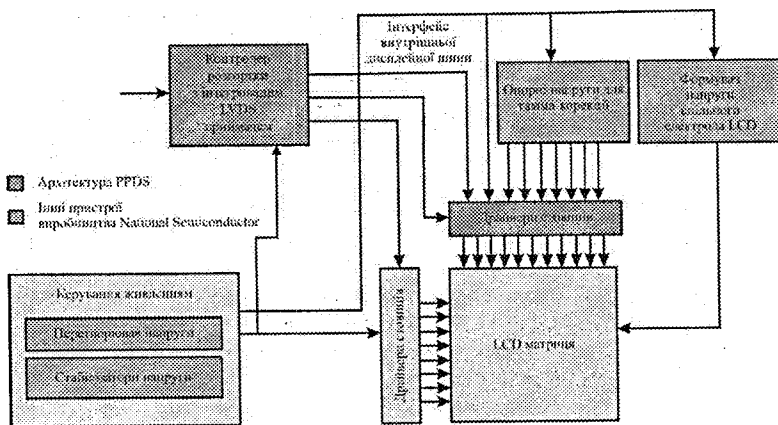


Рисунок 11.11 – Архітектура PPDS National Semiconductor для LCD

Сигнали внутрішньої шини дисплея забезпечують передавання та розподіл даних із буфера TCON по драйверах стовпців. У 1996 році для TFT LCD панелей формату 1024×768 пікселів була запропонована шина RSDS із диференціальними сигналами. На рис. 11.12 показано структуру внутрішньої дисплейної шини RSDS.

Цей інтерфейс став стандартним для всіх TFT LCD дисплеїв як у ноутбуках, так і в LCD-моніторах. Зі збільшенням розмірів екрана та його роздільної здатності зростають необхідна швидкість передачі даних і довжина провідників. Оскільки таких нових потрібних параметрів шина RSDS забезпечити не може, виникла необхідність розроблення нових інтерфейсів, які відповідають сучасним вимогам і мають резерви для подальшого вдосконалення.

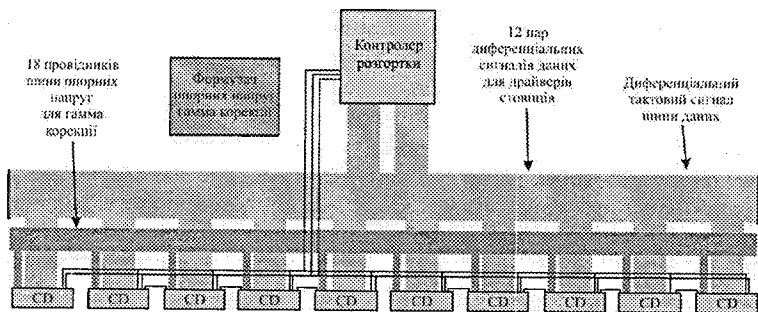


Рисунок 11.12 – Архітектура паралельної диференціальної шини RSDS

Point-to-Point Differential Signaling (PPDS, диференціальне передавання сигналів за схемою точка–точка) – це інтерфейс внутрішньої шини дисплея нового покоління великоформатних дисплеїв високої роздільної здатності.

Оптимізація з'єднань, запропонована в новій архітектурі, дала змогу значно зменшити розмір друкованої плати з драйверами та мінімізувати ширину кріпильної рамки LC панелі. До інтерфейсу, окрім звичайного фізичного рівня, додано також логічний рівень, що дає змогу зменшити кількість керувальних сигналів із TTL рівнями.

Основними характеристиками архітектури PPDS є:

- 10-розрядне кодування кожного каналу кольору;
- висока якість передавання кольорів за рахунок розширення динамічного діапазону;
- підтримання 4-колірної мозаїки кольорових фільтрів типу Pentile для розширення діапазону передавання кольорів;
- підтримання балансу кольору для всіх півтонів;
- можливість незалежного регулювання гами для кожного каналу кольору;
- підтримання одночасного відображення декількох вікон з незалежною, оптимізованою для кожного вікна кольоровою гамою;
- режим Black Frame Insertion для зменшення часу реакції LCD екрана під час відтворення відео;
- краща якість передавання рухомого зображення;
- вбудований апаратний RTC прискорювач для збільшення швидкодії LCD екрана.

Архітектура шини точка–точка. Інтерфейс PPDS базується на використанні послідовної шини передачі даних у мікросхемах драйверів стовпців, причому кожна мікросхема отримує дані від TCON контролера по окремій лінії зв'язку. Така конструкція, порівняно з паралельною передачею даних спільною шиною (як наприклад в інтерфейсі RSDS), істотно зменшує рівень відбитих сигналів, збільшує завадостійкість системи та знижує паразитне випромінювання. Оптимізована топологія шини PPDS

дає змогу реалізувати всі провідники в одному шарі. Самі мікросхеми драйверів стовпців також використовують подібну архітектуру для керування окремими стовпцями за рахунок застосування регістра зсуву (для перетворення послідовних даних у паралельні) та окремих ЦАП для кожного стовпця. Хоча застосування архітектури PPDS і потребує збільшення кількості драйверів, зміна формату передавання даних привела до збільшення допустимого часу циклу ЦАП, а використання простіших за структурою циклічних ЦАП дало змогу значно зменшити їхню площу на кристалі порівняно з ЦАП, що використовувались разом із резистивними матрицями.

Порівняння традиційної RSDS архітектури і PPDS архітектури
 На рис. 11.13 показано архітектури RSDS і PPDS шин дисплея.

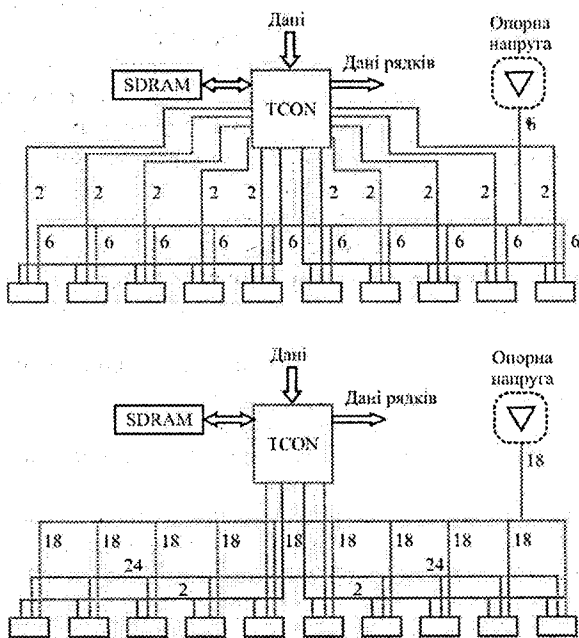


Рисунок 11.13 – Архітектура RSDS і PPDS шин дисплея

У системі передавання RSDS дані передаються по паралельній диференціальній шині в драйвери стовпців послідовно в часі. Спочатку передаються дані для драйвера першого стовпця, потім другого і т. д. Для узгодження шини на кінцях провідників для кожного диференціального сигналу необхідно встановлювати погоджувальні резистори на дальніх кінцях провідників.

У системі PPDS дані, отримані драйвером стовпців по послідовній шині, спочатку записуються в регістр зсуву, а потім переписуються в буферний регістр. До виходів буферного регістра підключені 10-розрядні ЦАП, кількість яких дорівнює кількості електродів стовпців, якими потрібно керувати. На виході кожного ЦАП встановлюється струмовий повторювач для роботи на ємнісне навантаження (електрод стовпця). Приймання даних і цифро-аналогове перетворення проводяться паралельно. Спочатку приймаються старші кодові розряди з усіх 384 виходів, дані переписуються в буферний регістр і виконується перший такт цифро-аналогового перетворення. Далі здійснюється приймання у регістр зсуву стовпців інших розрядів та виконується другий такт і т. д.

Для передавання сигналів у шині RSDS необхідно 64 провідники, а шина PPDS використовує з цією метою втричі меншу кількість провідників – 21.

Протокол PPDS забезпечує ряд функціональних можливостей, які неможливо реалізувати в інших інтерфейсах. Насамперед, це можливість збільшення розрядності кодування кольорів без зміни архітектури системи. Інтерфейс PPDS підтримує як 8-розрядне, так і 10-розрядне кодування кольору. Можна одночасно випускати дисплеї з 8- і 10-розрядним кодуванням кольору без зміни елементної бази, а також зменшити кількість типів мікросхем у виробі, використовуючи драйвери одного типу для декількох модифікацій дисплеїв. Використовуючи драйвер стовпців з 420 виходами, можна створювати дисплеї з пропорціями екрана 15:9, якщо кількість виводів дорівнює 414 або 420 можна забезпечити пропорції екрана 16:9. Тип використаного драйвера (кількість виводів) також передається в кадрі PPDS протоколу. Для керування однією панеллю протокол допускає використання комбінації драйверів двох різних типів з кількістю виводів 384 і 420.

В архітектурі PPDS також передбачено використання ще одного методу для покращення якості зображення. У світломодульовальних дисплеях, якими є LCD, під час сканування та візуалізації реалізовується принцип Scan-and-Hold (сканування-і-запам'ятовування). У світлоемітувальних дисплеях застосовується принцип Scan-and-Erase (сканування-і-стирання).

В LCD підтримування зображення забезпечують ємнісні елементи адресації та в'язкість рідкокристалічної структури. Метод Scan-and-Hold має переваги під час відтворення статичних зображень, зокрема текстових сторінок. Проте для передавання рухомого зображення потрібні швидкі півтонові переходи, інакше контури зображення будуть розмитими. Ефект запам'ятовування зображення впродовж усього кадру розгортки в цьому разі відіграє негативну роль. Для зменшення впливу цього ефекту в архітектурі PPDS до складу TCON вводять апаратний модуль аналізу характеру зображення, яке передається. У разі виявлення динамічних переходів для локальних областей зображення застосовується алгоритм форсування перемикання між півтонами. При цьому використовують два методи. За метою

дом «Black Frame Insertion» після запису кожного кадру та певної затримки відбувається примусове стирання зображення в матриці пікселів «чорним полем». Запис «чорного поля» здійснюється розрядженням усієї матриці пам'яті в LC панелі під час кадрового імпульсу гасіння. За такий короткий час повне «розрядження» записаного зображення не відбувається, проте за певних умов це готує комірки екрана до переходу зі світлого в темний стан. За своєю суттю це імітація роботи люмінофора в CRT. Другий метод реалізований у спеціальному модулі RTC (Response Time Compensation, компенсація часу відгуку). Для зменшення часів реакції та релаксації LC комірок цей модуль використовує спеціальну корекцію сигналів, форсуючи в такий спосіб перехідні процеси в LC комірках за допомогою введення попередніх спотворень у вихідні відеосигнали. Така екстраполяція можлива, оскільки в розпорядженні процесора, що реалізує цей алгоритм, є певна буферна кадрова пам'ять зображення.

Інтерфейс PPDS – це двопровідний диференціальний інтерфейс, електрично еквівалентний сигналам RSDS, що не потребує, на відміну від останнього, зовнішніх погоджувальних резисторів. Ця особливість дає змогу використовувати для реалізації PPDS інтерфейсу технологію COG, а також недорогі двошарові друковані плати замість чотиришарових. На рис. 11.14 і 11.15 показано ескізи топології друкованих плат драйверів стовпців RSDS і PPDS архітектури.

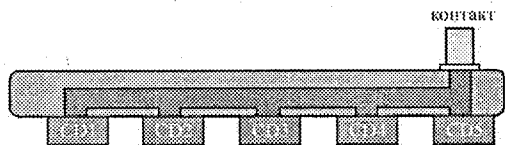


Рисунок 11.14 – Ескіз топології плати драйверів стовпців RSDS

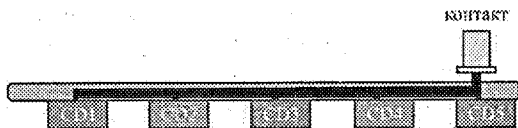


Рисунок 11.15 – Ескіз топології плати драйверів стовпців PPDS

Внутрішня шина PPDS забезпечує передавання даних у драйвери стовпців на швидкості до 600 Мбіт/с. Така швидкість забезпечує підтримання формату WUXGA (1920×1200). Для формату WXGA (1280×768) достат-

ньою є швидкість 200 Мбіт/с. При цьому шина PPDS забезпечує передавання сигналів зі швидкостями до 400 МГц на відстані до 150 см.

Архітектура PPDS відображає тенденції розвитку дисплейної електроніки нового покоління LCD. Закладена в її основу концепція, з одного боку, сприяє значному покращенню візуальних характеристик LCD, а з іншого – дає змогу здешевити та прискорити розроблення нових виробів. Розроблений National Semiconductor чіп може використовуватися і в моніторах наступного покоління. Нова архітектура дала змогу зменшити загальну площу кремнієвих кристалів схем керування (контролер розгортки та драйвери стовпців) [27].

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

Розділ 1

1. Як класифікуються електронні дисплеї?
2. Наведіть основні характеристики дисплеїв.
3. Що таке яскравість дисплеїв?
4. Дайте означення контрасту дисплеїв.
5. Що таке роздільна здатність дисплеїв і як вона визначається?
6. Як відбувається формування зображень у дисплеях?
7. Як відбувається формування зображення в сегментному дисплеї?
8. Поясніть суть формування зображення в точково-матричному дисплеї.
9. Що таке пасивна матриця та як відбувається формування зображення в пасивно-матричних дисплеях?
10. Що таке активна матриця та її відмінність від пасивної матриці?
11. Що таке піксель активно-матричного дисплея і принцип його дії?

Розділ 2

1. Поясніть конструкцію основних елементів електронно-променевої трубки.
2. В чому полягає принцип дії електронно-променевих приладів?
3. Наведіть будову електронного прожектора.
4. В чому суть електростатичного та магнітного фокусування електронного променя?
5. Поясніть принцип дії магнітних відхильних систем.
6. В чому призначення масок в електронно-променевих трубках?
7. Які маски застосовуються в електронно-променевих трубках?
8. Що таке щілинна маска та принцип її роботи?
9. Що таке тіньова маска та принцип її роботи?
10. В чому відмінність апертурної решітки від щілинної маски?

Розділ 3

1. Явище електролюмінісценції в напівпровідниках як основа роботи світлодіодів.
2. Поясніть принцип роботи гетеропереходу та світлодіодів на гетеропереходах.
3. Який принцип роботи світлодіодів на бар'єрі Шоттки?
4. Як відбувається формування пікселя повноколірного світлодіодного інформаційного дисплея?
5. Як формується світлодіодний модуль?

6. Наведіть основні характеристики світлодіодних модулів для світлодіодного табло.

7. Що таке індикатриса випромінювання та її вплив на якість відображення інформації?

8. Наведіть блок-схему світлодіодного екрана та поясніть принцип її роботи.

Розділ 4

1. Охарактеризуйте рідкокристалічні матеріали та електрооптичні ефекти в них, які використовуються в LCD.

2. Що таке пасивноматричний BiNem дисплей та принцип його дії?

3. Явище сегнетоелектрики в рідкокристалічних матеріалах.

4. Поясніть принцип роботи пасивно-матричного рідкокристалічного дисплея.

5. Як працюють дисплеї на сегнетоелектричних РК?

6. Як формується зображення в кольорових TFT-LCD дисплеїв?

7. Що являє собою комірка відбивального BiNem дисплея?

8. Дайте характеристику антисегнетоелектричної мезофази.

9. Наведіть порівняльну характеристику TN та BiNem дисплеїв.

10. Покажіть будову пікселя та його еквівалентну схему в LCD.

11. Які рідкокристалічні матеріали використовуються в LCD?

12. В чому полягає принцип роботи TFT з конденсатором в LCD?

13. Як працює FLC?

14. У чому відмінність U і T станів в BiNem дисплеях? ?

Розділ 5

1. Наведіть енергетичну структуру органічних напівпровідників.

2. Поясніть природу електролюмінесценції в органічних матеріалах.

3. Структура двошарового OLED та принцип його дії.

4. Структура багатошарових OLED дисплеїв.

5. Відмінності конструкції OLED з верхнім та нижнім емітером.

6. Поясніть будову кольорових OLED дисплеїв.

7. Що таке OLED з «чорним шаром» та призначення «чорного шару»?

8. В чому суть проблеми сучасної OLED технології?

9. Поясніть структуру OLED дисплея на низькомолекулярних сполуках.

10. Які полімери застосовуються в OLED?

11. Наведіть характеристики OLED.

12. Дайте порівняльну характеристику параметрів OLED та LCD.

Розділ 6

1. Дайте загальну характеристику плазмових дисплеїв.
2. Поясніть принцип адресації у плазмових дисплеях.
3. Наведіть схему комірки в АСС структурі та поясніть принцип її роботи.
4. Наведіть схему комірки в АСМ структурі та поясніть принцип її роботи.
5. Покажіть принцип адресації комірки плазмового дисплея.
6. Особливості конструкції компланарного плазмового дисплея.
7. Дайте характеристику газових сумішей для плазмових дисплеїв.
8. Порівняйте рядкову та вафельну структури комірок плазмового дисплея.
9. Як формується колір в пікселях плазмового дисплея?
10. Особливості конструкції комірки плазмового дисплея.
11. Система електродів та принцип формування кольорів у плазмових дисплеях.

Розділ 7

1. В чому полягає принцип дії дисплеїв на польовій емісії?
2. Дайте порівняльну характеристику CRT та FED дисплеїв.
3. Наведіть структуру та поясніть принцип дії CNT комірки (FED дисплеї).
4. В чому відмінність між SED і FED дисплеями?
5. Конструкція мікрокатада та розподіл напруженості електричного поля в ньому.
6. Охарактеризуйте принцип роботи комірки SED дисплея.
7. Особливості структури катодної матриці FED дисплея.
8. Конструкція та принцип дії FED дисплея.

Розділ 8

1. Поясніть явище електрохромізму та дайте характеристику процесу забарвлення в електрохромних дисплеях.
2. Наведіть типову структуру електрохромного дисплея.
3. Як працює електрохромний дисплей?
4. В чому суть принципу забарвлення та знебарвлення в електрохромних дисплеях?
5. Поясніть принцип роботи електрохромного дисплея на наноструктурованих плівках.

Розділ 9

1. Поясніть принцип дії електрофорезного дисплея.
2. В чому полягає принцип адресації в електрофорезному дисплеї?
3. Дайте характеристику явища електрохромізму та електрофорезу.
4. Наведіть типову конфігурацію електродів в електрофорезних дисплеях.
5. Дайте характеристику технології виготовлення колоїдної суспензії для електрофорезного дисплея.
6. Що таке контраст електрофорезного дисплея та від чого він залежить?

Розділ 10

1. Гірікон. Принцип його роботи.
2. Що таке електронний папір?
3. Які основні вимоги до електронного паперу?
4. Які дисплеї використовують для електронного паперу?
5. Структура активноматричного гіріконового дисплея.
6. Наведіть схему керування дисплеєм в електронному папері.
7. Особливості застосування електрохромних дисплеїв в електронному папері.

Розділ 11

1. Охарактеризуйте типову схему керування TFT-дисплеєм.
2. Поясніть структуру адресації в активно-матричному дисплеї.
3. Дайте характеристику схеми формування напруги для драйверів.
4. Характеристика інтерфейсу з відеоконтролером.
5. Наведіть і поясніть блок-схему інтерфейсу FPD Link.
6. Що являє собою архітектура контролера розгортки?
7. Драйвери рядків і стовпців TFT-дисплея.
8. Що являє собою архітектура шини точка-точка?
9. Порівняйте RSDS і PPDS архітектури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дисплей : [пер. с англ. / под ред. Панкова Ж.] – М. : Мир, 1982. – 320 с.
2. Шерр С. Электронные дисплеи : [пер. с англ.]. / С. Шерр – М. : Мир, 1982. – 624 с.
3. Беляев В. Современные электронные дисплеи / В. Беляев // Электронные компоненты. – 2002. – № 1. – С. 24 – 27.
4. Daily News from Display Week 2013 by Information Display. www.informationdisplay.org
5. Кожем'яко В. П. Сучасні методи та засоби відображення інформації. Частина I. Дискретні системи відображення інформації / Кожем'яко В. П., Васюра А. С., Дорощенко Г. Д. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 106 с.
6. Рідкокристалічна електроніка : монографія / [за ред. проф. Готри З.]. – Львів : Видавництво "Апріорі", 2010. – 532 с.
7. Sang Soo Kim. Electronic Aspects of AMLCDs // Information Display, № 8, 2001, P. 22 – 26.
8. S. Komura K. Kuwabara O. Itou M. Abe K. Funahata K. Kondo N. Hoshino Y. Iwakabe. An optical design for reflective color STN-LCDs. // Information Display, № 4, 2000, P. 269 – 275.
9. Doo-Hwan You Ju-Hyun Lee Seong-Sik Park Sin-Doo Lee. Antiferroelectric LCD with one polarizer in a reflective configuration // Information Display, № 4, 2000, P. 277 – 281.
10. Bernard J. Lechner. History Crystallized: A First-Person Account of the Development of Matrix-Addressed LCDs for television at RCA in the 1960s // Information Display, № 1, 2008, P. 26 – 30.
11. Paul Surguy. How Ferroelectric Liquid-Crystal Devices Work // Information Display, № 2, 1998, P. 24 – 27.
12. Kathleen M. Vaeth. OLED-Display Technology // Information Display, № 6, 2003, P. 12 – 17.
13. Gu Xu. Fighting OLED Degradation // Information Display, № 6, 2003, P. 18 – 21.
14. Shizuo Tokito, Mitsunori Suzuki, and Fumio Sato. Phosphorescent-Polymer OLEDs // Information Display, № 6, 2003, P. 22 – 24.
15. Bahman Hekmatshoar Alex Z. Kattamis Kunigunde Cherenack Sigurd Wagner James C. Sturm. A novel TFT-OLED integration for OLED-independent pixel programming in amorphous-Si AMOLED pixels // Information Dis-

- play, № 1, 2000, P.13 – 18.
16. Antti Laaperi. Disruptive Factors in the OLED Business Ecosystem // Information Display, № 9, 2009, P. 23 – 27.
 17. Barry Young. OLEDs - Promises, Myths, and TVs // Information Display, № 9, 2009, P. 20 – 26.
 18. Alexey N. Krasnov. ELDs Rise on Organic Wings // Information Display, № 3, 2002, P. 32 – 34.
 19. J. P. Boeuf. Plasma display panels: physics, recent developments and key issues. J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) R53–R79.
 20. Robert T. Smith. Electronics development for field-emission displays // Information Display, № 2, 1998, P. 12 – 15.
 21. David Corr. Commercializing Electrochromic-Display Technology // Information Display, № 7, 2005, P. 22 – 25.
 22. Chris Giacomponello, Henrik Lindstrom. Electrochromics: Unlocking Color in Electronic Paper // Information Display, № 1, 2008, P. 12 – 15.
 23. Taimei Kodaira Saichi, Hirabayashi Yuko, Komatsu Mitsutoshi, Miyasaka Hideyuki, Kawai Satoshi, Nebashi Satoshi Inoue, Tatsuya Shimoda. A flexible 2.1-in. active-matrix electrophoretic display with high resolution and a thickness of 100 μm // Information Display, № 1, 2008, P. 33 – 38.
 24. Jacques Angele. From Lab to Fab: A Look at BiNem E-Paper Manufacturing // Information Display, № 1, 2008, P. 16 – 21.
 25. Minoru Koshimizu. The Past, Present, and Future of Electronic paper // Information Display, № 1, 2008, P. 22 – 25.
 26. Matthew Aprea. Enabling Small-Format Electronic Paper in Smart Surfaces // Information Display, № 7, 2009, P. 26 – 31.
 27. Рибалочка А. В. Дворівневі способи запису інформації для бістабільних холестеричних рідкокристалічних дисплеїв : дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.12.20 / Рибалочка А. В. – Київ, 2009. – 128 с.

Навчальне видання

**Готра Зенон Юрійович
Кожем'яко Володимир Прокопович
Микитюк Зіновій Матвійович
Павлов Сергій Володимирович
Дорощенко Геннадій Дмитрович**

ЗАСОБИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРОННІ ДИСПЛЕЇ

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено Г. Дорощенковим

Підписано до друку 13.10.2014 р.
Формат 29,7×¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний Ум. друк. арк. 10,4.
Наклад 300 (1-й запуск 1-100) прим. Зам. № 2014-078.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.