

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

З-36

Автори:

**З. Ю. Готра, В. П. Кожем'яко, З. М. Микитюк,
С. В. Павлов, Г. Д. Дорощенко**

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)

З-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. Дорощенко, 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-променевої трубки. 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 електролюмінісценції 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-променевої 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	–	поліетилендіокситіофін
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 світломодулювальні [1-4]. На рис. 1.1 подано класифікацію сучасних електронних дисплеїв.

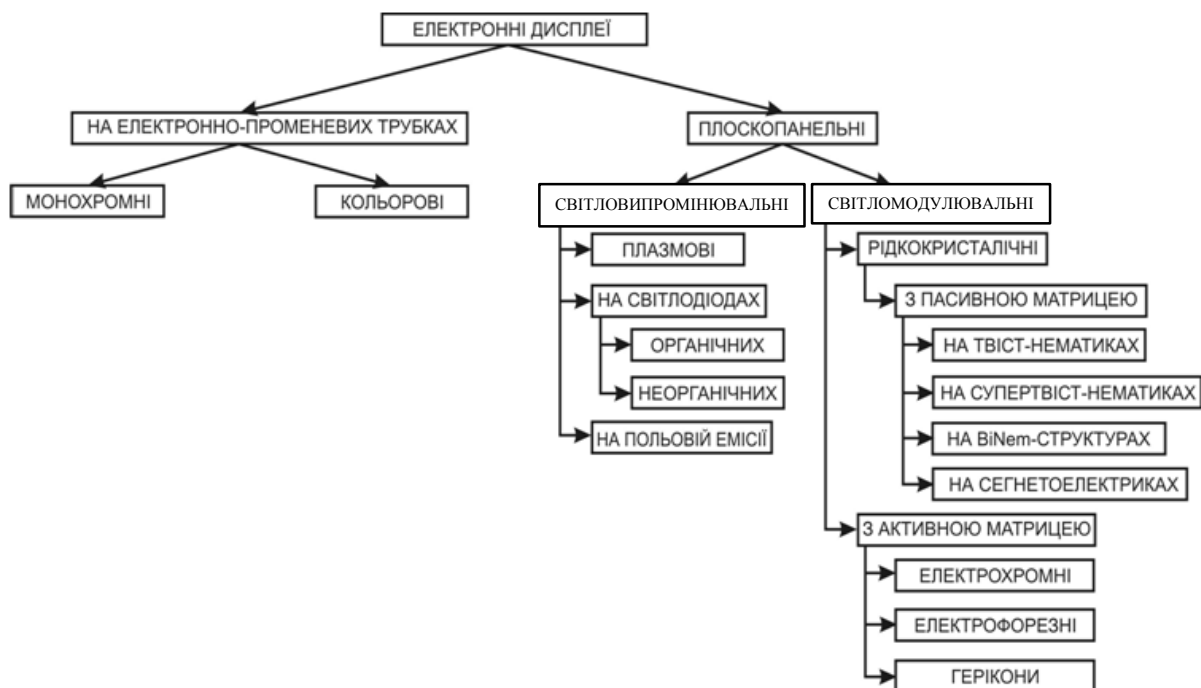


Рисунок 1.1 – Класифікація електронних дисплеїв

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 ($1 \text{ ніт} = 1 \text{ кд}/\text{м}^2$; $1 \text{ фут} \cdot \text{лб} = 3,426 \text{ ніт}$). 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 відтворюваного 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 одночас-

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

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

де B_c і B_m – відповідно яскравості найсвітлішої та найтемнішої ділянок зображення, B_g – 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 :

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

де L_σ – 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 розрізнити 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 ($\sim 0,1$ 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, електрофлоресцентних 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, *a*). 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.

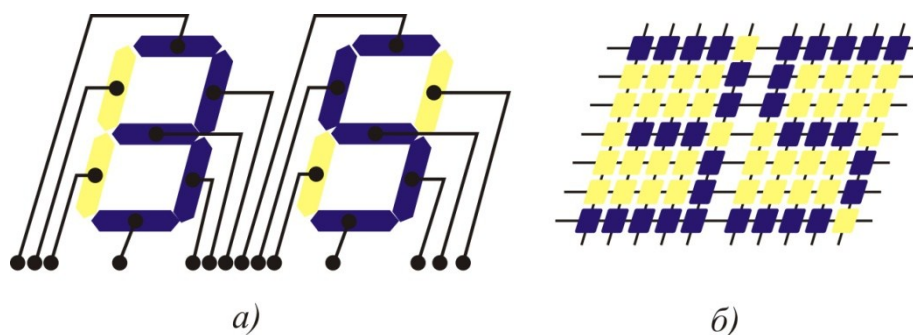


Рисунок 1.2 – Структура сегментного (*a*) та точково-матричного (*б*) дисплея

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.

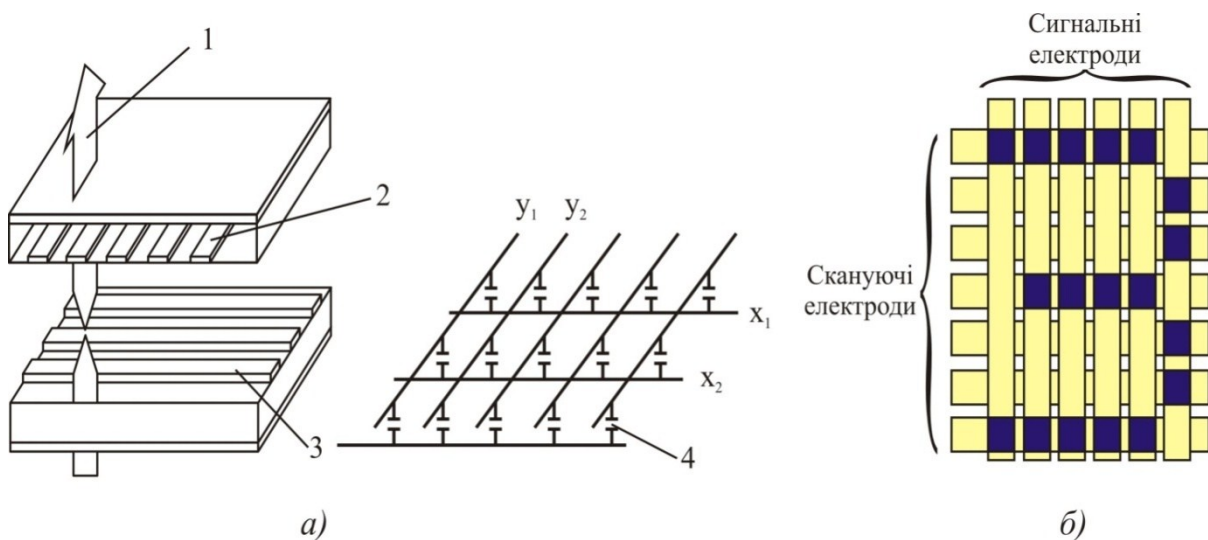


Рисунок 1.3 – Будова пасивної матриці (а) та пасивно-матричне керування (б): 1 – промінь світла; 2 – вертикальні електроди; 3 – горизонтальні електроди; 4 – піксель

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.

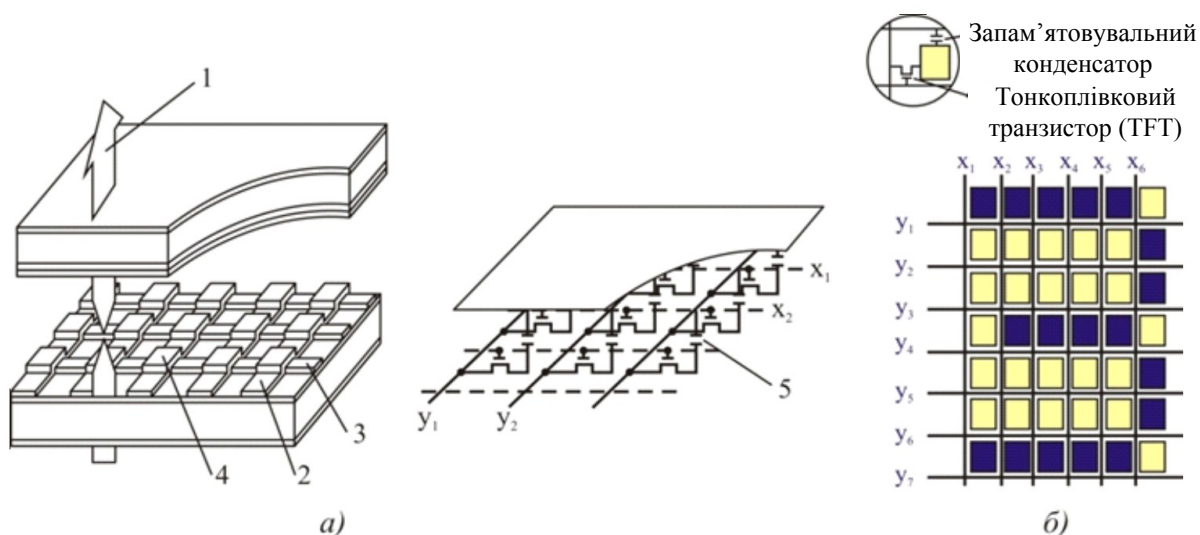


Рисунок 1.4 – Будова активної матриці (а) та активно-матричне керування (б): 1 – промінь світла; 2 – вертикальні електроди; 3 – горизонтальні електроди; 4 – тонкоплівковий транзистор (ТФТ); 5 – піксель

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, *a*. 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.

Розділ 2

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

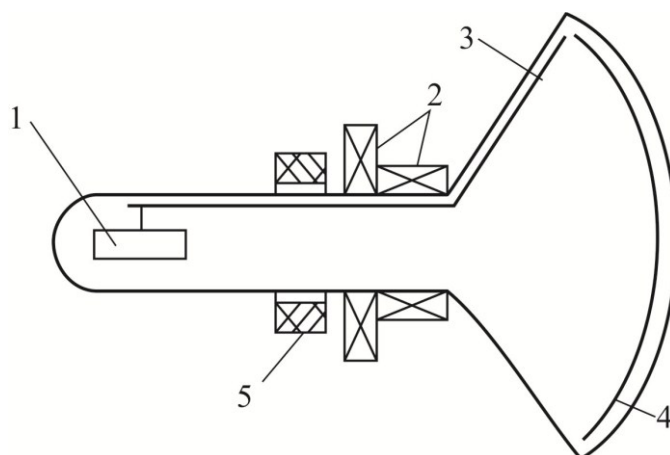


Рисунок 2.1 – Схема електронно-променевої трубки з магнітним фокусуванням

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 уможливорює 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.

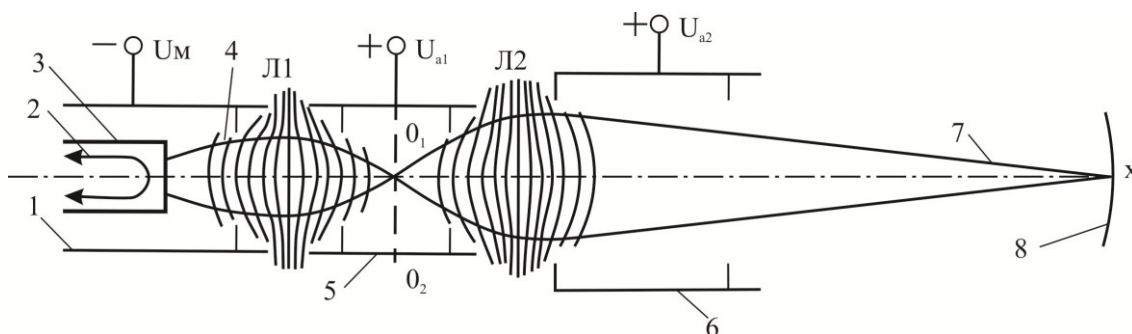


Рисунок 2.2 – Електронний прожектор:

- 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-променеви́х приладів ґрунтуються на дволінзовій оптичній схемі. Використання дволінзового прожектора з першою сильною (короткофокусною) лінзою та другою слабкою

(довгофокусною) уможливилює 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 (двогнutoї) 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, суміщуючи 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.

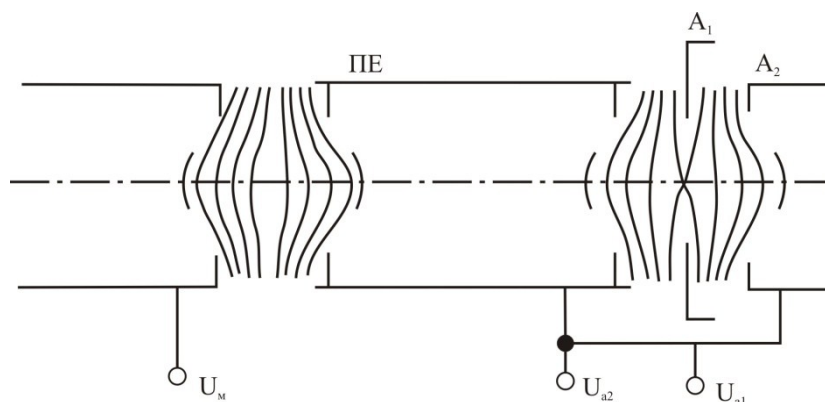


Рисунок 2.3 – Тріодний прожектор з нульовим струмом першого анода:
 A_1 – перший анод; A_2 – другий анод; ПЕ – прискорювальний електрод

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 проєкційна 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 $F_{m\tau}$, зумовлена U_A і B_r , скерована з-за площини креслення до читача. Векторний добуток $[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$ – це права

трійка векторів, однак під час визначення напрямку \mathbf{F} необхідно враховувати від'ємний знак заряду електрона. Сила $F_{m\tau}$ викликає обертання електронів навколо осі ОС, тобто виникає азимутальна складова швидкості U_τ , яка разом з B_A утворює силу $F_{m\tau}$, 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 напрямком радіальної складової індукції магнітного поля B_r змінюється на протилежний, отже, сила $F'_{m\tau}$ буде направлена назустріч силі $F_{m\tau}$. Однак після перетину площини O_1O_2 електрони вже відхилились у напрямку до осі, значення B_r зменшилися, тому сила $F'_{m\tau} < F_{m\tau}$, а поперечна сила $F_{m\tau}$, як і раніше скерована в той самий бік. Тангенціальна сила $F'_{m\tau}$ 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 С), забезпечуючи цим фокусування електронного потоку.

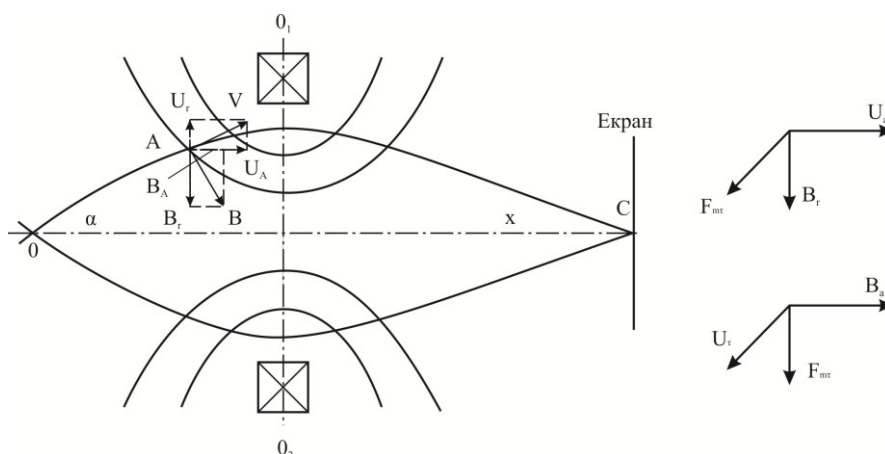


Рисунок 2.4 – Принцип фокусування електронного променя неоднорідним магнітним полем

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 \mathbf{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.

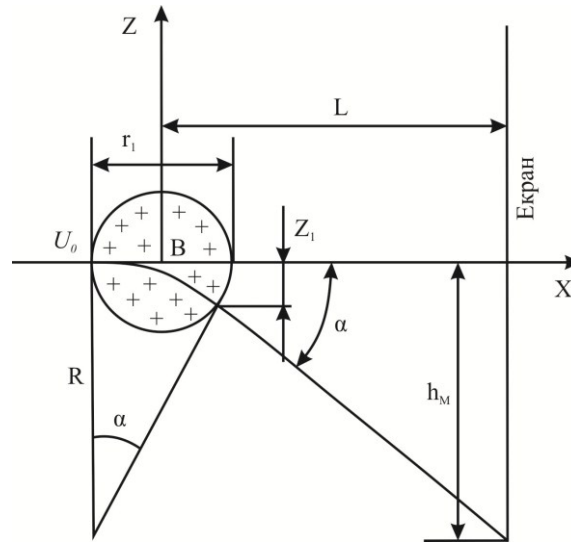


Рисунок 2.5 – Відхилення електрона однорідним магнітним полем

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_c . Діаметр l_1 відхильних котушок, як правило, значно менший за R , тому на виході з них електрон відхилиться від осі трубки на деяку величину $z_1 \approx l_1 \operatorname{tg} \alpha$ (рис. 2.5) і рухатиметься далі прямолінійно. Якщо кути малі, $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha \approx z / l_1$ і шлях, пройдений всередині котушок, мало перевищує їхній діаметр, тому

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Дисплеи : [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 um // 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 Zenon 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.