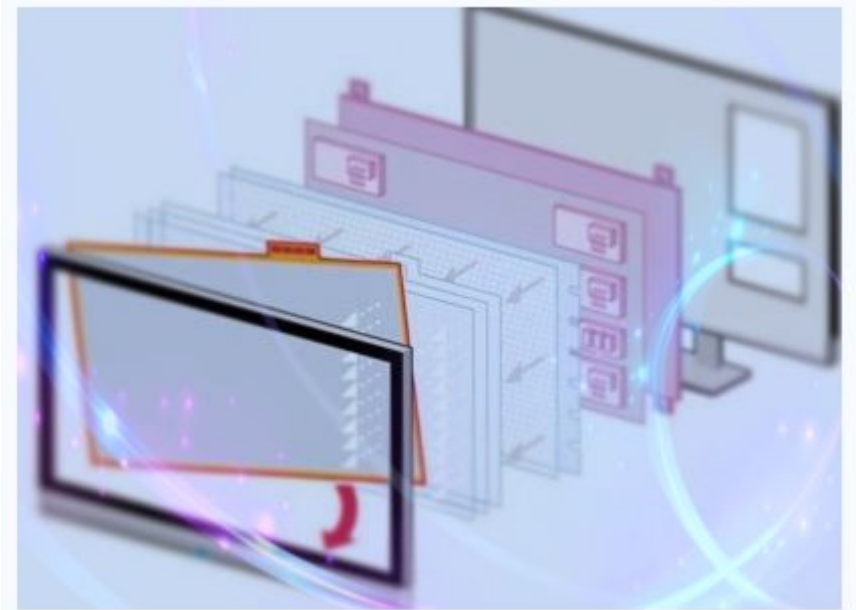


Л. В. КРИЛИК, О. О. СЕЛЕЦЬКА, І. В. СУХОЦЬКА

ЗАСОБИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ
Частина 1



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Л. В. КРИЛИК, О. О. СЕЛЕЦЬКА, І. В. СУХОЦЬКА

ЗАСОБИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ
Частина 1

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2018

УДК [621.38:004.353.2](075.8)

К82

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 26.06.2018 р.)

Рецензенти:

Й. Й. Білинський, доктор технічних наук, професор

В. М. Кичак, доктор технічних наук, професор

А. Я. Кулик, доктор технічних наук, професор

Крилик, Л. В.

К82 Засоби відображення інформації. Частина 1 : навчальний посібник / Л. В. Крилик, О. О. Селецька, І. В. Сухоцька. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 82 с.

В навчальному посібнику розглядаються актуальні питання аналізу та класифікації засобів відображення інформації, трактуються основні терміни та визначення, які відносяться до відображення інформації, розглядаються основні конструктивні і фізичні особливості засобів, аналізуються принципи їх роботи та параметри, якими вони характеризуються. Навчальний посібник розроблено відповідно до навчальної програми дисципліни «Засоби відображення інформації в мікро- та наносистемній техніці» для студентів спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» та інших спеціальностей, в навчальному плані яких є аналогічна дисципліна.

УДК [621.38:004.353.2](075.8)

© ВНТУ, 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
1 КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ	6
1.1 Класифікація засобів відображення інформації	6
1.2 Спектри поглинання	8
1.3 Фотоелектричний ефект та його різновиди.....	9
2 ТЕПЛОВІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	12
2.1 Чорне тіло	12
2.2 Лампи розжарення	15
2.3 Індикатори розжарення	16
3 ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ	19
3.1 Люмінесцентні лампи	19
3.2 Електролюмінесцентні індикатори на основі порошкових люмінофорів.....	21
3.3 Електролюмінесцентні індикатори на основі люмінофорної тонкої плівки.....	22
3.4 Вакуумні люмінесцентні індикатори	24
4 ГАЗОРОЗРЯДНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ	27
4.1 Знакові індикатори.....	29
4.2 Газорозрядні індикаторні панелі	30
4.3 Індикаторні тиратрони.....	35
5 ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ІНДИКАТОРИ.....	38
5.1 Монохромні електронно-променеві трубки	39
5.2 Кольорові електронно-променеві трубки	42
5.3 Запам'ятовувальні електронно-променеві трубки	46
6 СВІТЛОДІОДИ.....	48
6.1 Фізичні основи роботи.....	48
6.2 Електрофізичні характеристики	51
6.3 Корпуси світлодіодів малої та великої потужності.....	53
7 ВЕЛИКІ ЕКРАНИ	57
7.1 Світлоклапанні електронно-променеві трубки	57
7.2 Лазерні засоби відображення інформації	59

8 ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ІНДИКАТОРИ.....	60
8.1 Електрохімічні індикатори на основі неорганічних матеріалів	61
8.2 Електрохімічні індикатори на основі розчинів органічних речовин	63
8.3 Індикатори на основі колоїдних розчинів	64
9 РІДКОКРИСТАЛІЧНІ ІНДИКАТОРИ	66
9.1 Загальні властивості рідкокристалічної речовини	66
9.2 Типи рідкокристалічних індикаторів	69
9.3 Рідкокристалічні панелі.....	74
СЛОВНИК НАЙБІЛЬШ ВЖИВАНИХ ТЕРМІНІВ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	81

ПЕРЕДМОВА

Засоби відображення інформації (ЗВІ) є однією із областей сучасної електроніки, яка швидко розвивається, для якої характерне широке використання великих інтегральних схем та нових типів електронних індикаторів, основаних на різноманітних фізичних принципах. У розробках таких пристроїв використовується мікропроцесорна техніка.

Розвиток ЗВІ проходить в напрямку використання в них як удосконалених типів електронно-променевих індикаторів, так і плоских матричних індикаторів, які перспективні для високоякісного відтворення інформації. Над розробкою та вдосконаленням засобів і систем відображення, методів їх проектування та використання працюють провідні наукові колективи як в нашій країні, так і за кордоном.

Проектування складається зі створення інформаційної моделі з врахуванням поданої інформації і властивостей людини-оператора; вибору типу індикатора; розробки на цій основі структурної схеми ЗВІ, модулів системи тощо.

Для правильного проектування ЗВІ необхідно враховувати структуру і технічні характеристики індикаторів, особливості побудови модулів системи на основі сучасних інтегральних мікросхем, тобто проектування ЗВІ потребує комплексного підходу зі сторони спеціалістів.

Використання електронних ЗВІ дуже різноманітне: інформаційні та рекламні табло, телевізори, монітори ЕОМ та ін. Складовою частиною ЗВІ є електронні прилади, які здійснюють візуалізацію електричних сигналів – це індикатори (напівпровідникові, газорозрядні, рідкокристалічні, вакуумні, електронно-променеві трубки тощо). Принцип їх дії, характеристики, параметри, області застосування і методи управління ними розглядаються в цьому посібнику.

Навчальний посібник розроблено відповідно до навчальної програми дисципліни «Засоби відображення інформації в мікро- та наносистемній техніці» для студентів спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» та інших спеціальностей, в навчальному плані яких є аналогічна дисципліна.

Основною задачею авторів є ознайомлення студентів з конструктивними та фізичними особливостями різноманітних типів електронних індикаторів. Набуті знання будуть корисними для проектування електронних пристроїв різноманітного призначення з використанням інтегральних схем.

Зміст навчального посібника і послідовність викладеного матеріалу дозволяють використовувати його як для кращого засвоєння лекційного матеріалу, так і при підготовці до лабораторних та практичних занять. Цьому сприяє стислий характер поданого теоретичного матеріалу.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАСОБІВ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ

Велику частину інформації (близько 80%) людина одержує по зоровому каналу. Якщо інформація створюється або передається електронними засобами, то відтворюється вона за допомогою засобів відображення інформації, що є електронним перекладачем, це дозволяє сприйняти закодовану електричними сигналами інформацію.

До засобів відображення та реєстрації інформації (ЗВІ) відносяться пристрої колективного користування (стадіонні, вокзальні та інші інформаційні табло), дисплейні термінали для зв'язку з ЕОМ, індикатори, вбудовані в різні вимірювальні побутові чи електронні прилади. Відповідно розрізняють і пропоновані до цих засобів психофізіологічні, енергетичні, вартісні, габаритні та інші вимоги, які повинен враховувати розробник.

Основним вузлом ЗВІ є індикатор, що перетворює електричні сигнали у видиме зображення. Дотепер основним типом індикатора, використовуваним у ЗВІ, залишається електронно-променева трубка (ЕПТ), якій характерні типові недоліки електровакуумних приладів: велике споживання потужності, високі напруги живлення, великі маса та габаритні розміри. На зміну ЕПТ, особливо у застосуваннях, зв'язаних з ЕОМ, прийшли матричні індикаторні панелі різноманітних типів – газорозрядні, електролюмінісцентні, рідкокристалічні. На відмінні від ЕПТ керування ними побудовано на цифрових принципах, що відповідає сучасним тенденціям розвитку електроніки.

Іншим важливим компонентом ЗВІ є інтегральні мікросхеми (ІМС). Сучасні ЗВІ майже цілком розробляються на основі ІМС середнього і високого ступеня інтеграції. Крім того, широко в них використовуються мікропроцесорні засоби і мікро-ЕОМ.

1.1 Класифікація засобів відображення інформації

Під *дискретним індикатором* розуміють прилад, інформаційне поле якого складається з окремих фіксованих у просторі елементів відображення (ЕВ), а зображення створюється одним ЕВ або їх сукупністю. Кожен ЕВ являє собою неподільну конструкцію, керовану ззовні.

В основу класифікації дискретних індикаторів покладено дві групи ознак: призначення, що в основному задається формою, розташуванням та числом ЕВ, і фізичні процеси, що визначають дію приладу.

За призначенням розрізняють такі категорії індикаторів: *мнемосхеми*; *фіксовані* написи; *однорозрядні* буквено-цифрові індикатори, що відображають одне знакомісце; *багаторозрядні* буквено-цифрові індикатори, що містять безліч фіксованих знакомісць в одному або декількох текстових рядках; *екрани-індикатори* з інформаційною ємністю не менше 10000 еле-

ментів відображення, що не містять фіксованих знакомісць, *індикатори-модулі*, конструктивне виконання яких забезпечує створення з них складених екранів з великою площею індикації; *шкальні індикатори*, призначені для відображення інформації у вигляді точки або стовпця, які світяться з положенням або висотою, котрі змінюються залежно від вхідного сигналу; *цифроаналогові* індикатори, що являють собою сполучення шкального та багаторозрядного буквено-цифрового індикаторів.

За виглядом ЕВ буквено-цифрові індикатори поділяються на знаковинтезувальні та знакомодулювальні. *Знаковинтезувальні* індикатори можуть виконуватися як матричні з точковими ЕВ в місцях перетину електродів рядків та стовпців; мозаїчні (кожен ЕВ може вмикатись або вимикатись незалежно) та сегментні, ЕВ яких являють собою смужки-сегменти, згруповані в знакомісце.

У знакомодулювальних ЕВ виконується у вигляді набору готових знаків.

Знаковинтезувальні та знакомодулювальні індикатори можуть виконуватися як у вигляді однорозрядних (одне знакомісце), так і у вигляді багаторозрядних (декілька фіксованих знакомісць) приладів.

Найбільш широко використовуваною групою дискретних індикаторів є буквено-цифрові індикатори. При відображенні обмеженої кількості знаків вони дозволяють побудувати найпростішу, економічну, що має кращі масогабаритні показники і споживає меншу потужність, апаратуру, ніж на основі ЕПТ. Останнім часом при відображенні великих масивів буквено-цифрової та графічної інформації конкурувати з ЕПТ стали і плоскі екрани. Вони відрізняються від буквено-цифрових індикаторів прямокутною формою інформаційного поля, що містить не менше декількох тисяч ЕВ, а також відсутністю на цьому полі фіксованих знакомісць. Екранні індикатори використовують мозаїчний або матричний варіанти розташування ЕВ.

За принципом дії індикатори поділяються на дві основні групи: активні, у яких електрична енергія безпосередньо перетворюється у світло, і пасивні, які тільки модулюють зовнішній світловий потік. Основними перевагами активних індикаторів є висока швидкодія, здатність працювати при малій освітленості навколишнього середовища і великий кут огляду. За цими параметрами пасивні індикатори поступаються активним, але зберігають контраст при високій освітленості і споживають значно менше електричної енергії.

До групи активних індикаторів відносять: напівпровідникові, електролюмінісцентні, вакуумні люмінесцентні, газорозрядні, вакуумні розжарення. До пасивних індикаторів відносяться: рідкокристалічні, електрохімічні, електромеханічні.

1.2 Спектри поглинання

Спектром поглинання називається спектр випромінювання (суцільний), що пройшов через цю речовину. Іншими словами, *спектр поглинання* – залежність коефіцієнта поглинання від частоти. Поряд із спектрами випромінювання, спектрами люмінесценції та іншими спектроскопічними методами, спектри поглинання широко використовуються в науці й техніці для аналізу хімічного складу та інших властивостей речовин.

Спектр поглинання має вигляд суцільного спектра, у якому відсутні окремі спектральні лінії. Вигляд спектра поглинання залежить від поглинальної речовини. Для різних речовин області поглинання знаходяться в різних місцях спектра і мають різну ширину та інтенсивність. За виглядом спектра можна визначити, якою поглинальною речовиною він викликаний, тобто провести спектральний аналіз.

Тверді тіла та рідини мають широкі області поглинання. Гази та пари поглинають тільки випромінювання з тими довжинами хвиль, які вони самі випромінюють. Їм відповідають так звані *лінії поглинання*. Найбільш характерні спектри поглинання дають пари металів, що складаються з окремих атомів. Дослідження Кірхгофа показали, що лінії поглинання атомів точно відповідають їхнім лініям випромінювання.

Найбільш вивченим спектром поглинання є спектр Сонця. Суцільний спектр Сонця містить значну кількість чорних ліній. Ці лінії є лініями поглинання, що виникають при проходженні світла через газову оболонку зірки, названу *хромосферою*, і через атмосферу Землі. Вони одержали назву лінії Фраунгофера. Фраунгофер вперше спостерігав спектр Сонця та встановив, що чорні лінії в спектрі не випадкові і з'являються завжди на строго визначених місцях. Лінії Фраунгофера прийнято позначати прописними латинськими літерами від А до К (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Лінії Фраунгофера

Лінія	А	В	С	Д	Е
λ , нм	760,8	686,7	656,3	589,3	527,0
Колір	Темно-червоний	Червоний	Червоний	Жовтий	Зелений

Продовження таблиці 1.1

Лінія	Ф	Г	Н	К
λ , нм	486,1	430,8	396,8	393,4
Колір	Синьо-зелений	Синій	Фіолетовий	Фіолетовий

Згідно з Кірхгофом, лінії Фраунгофера являють собою лінії поглинання парів різних металів, розташованих між фотосферою (яскравою поверхнею) Сонця та місцем спостереження спектра. Спектр Сонця дає відомості

про спектр поглинання цих парів. Він показує, що в хромосфері є кальцій, водень, натрій, залізо та інші елементи, які зустрічаються на Землі. Спектральний аналіз за спектрами поглинання дозволяє визначити хімічний склад віддалених тіл.

1.3 Фотоелектричний ефект та його різновиди

Фотоелектричним ефектом або *фотоефектом* називається явище випромінювання електронів речовиною під дією світла. Дослідження показали, що фотоефект підлягає таким закономірностям:

- 1) енергія звільнених електронів, названих фотоелектронами, абсолютно не залежить від інтенсивності світла;
- 2) підвищення інтенсивності призводить до збільшення числа фотоелектронів, але не їхньої швидкості;
- 3) число фотоелектронів пропорційне інтенсивності світла;
- 4) швидкість електронів залежить тільки від частоти падаючого світла: зі збільшенням частоти енергія фотоелектронів зростає лінійно.

Ці закони фотоефекта не можуть бути пояснені з погляду хвильової природи світла.

Якісно картина механізму фотоефекта пояснюється тим, що фотон видає свою енергію електрону речовини. Якщо ця енергія достатня для того, щоб звільнити електрон від утримуючих його усередині сил (зв'язків), то він виходить за її межі. Кожен звільнений електрон поглинає енергію одного фотона, тому що ймовірність одночасного поглинання двох фотонів мізерно мала. Тому число звільнених фотоелектронів пропорційно числу поглинених фотонів, що визначають інтенсивність світла, а їхня енергія лінійно залежить від частоти ω , але не залежить від числа фотонів.

Кількісно фотоефект описується *рівнянням Ейнштейна*, який являє собою закон збереження енергії

$$\hbar\omega = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 + A, \quad (1.1)$$

де ω – частота світлової хвилі;

m – маса спокою електрона;

v_{\max} – максимальна швидкість звільненого електрона;

A – робота виходу електрона, що дорівнює найменшій енергії, яку необхідно надати електрону для того, щоб видалити його за межі речовини у вакуум;

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – стала Дірака;

h – стала Планка.

Максимальна кінетична енергія, яку буде мати електрон, що вилетів за межі речовини, описується виразом

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 + A = eU, \quad (1.2)$$

де e – заряд електрона;

U – гальмівний потенціал.

Гальмівний потенціал дорівнює напрузі, яку необхідно прикласти до речовини (катода) для того, щоб електрони, які мають швидкості v_{\max} , не змогли її (його) залишити.

З рівняння (1.1) випливає, що коли робота виходу A більша енергії кванта $\hbar\omega$, електрон не може залишити речовину. Частота ω_0 або довжина хвилі λ_0 обумовлені умовами

$$\omega_0 = \frac{A}{\hbar}, \quad \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar c}{A}, \quad (1.3)$$

називаються червоною (довгохвильовою) границею фотоэффекту. Фотоэффект можливий, якщо $\omega \geq \omega_0$ або $\lambda \leq \lambda_0$.

Якщо частота ω значно більша низькочастотної границі фотоэффекту ω_0 , $\omega \gg \omega_0$, тобто енергія світлових квантів значно більше роботи виходу A (рентгенівські промені), то величиною A можна знехтувати і рівняння (1.1) набуває вигляду

$$\hbar\omega = eU. \quad (1.4)$$

Ця формула описує не тільки прямий фотоэффект, у якому енергія фотонів переходить у кінетичну енергію фотоелектронів, але і зворотний фотоэффект, у якому фотони з'являються за рахунок кінетичної енергії електронів, які падають на поверхню речовини (металу). Такий процес відбувається у рентгенівських трубках. Формула (1.4) у цьому процесі визначає максимальну частоту ω , з якою можуть випромінюватись рентгенівські промені.

Фотоелектрони, які рухаються під дією зовнішнього електричного поля, утворюють фотострум. Фотоэффект називають *нормальним*, якщо величина $I_{\lambda}(\lambda)$, яка дорівнює силі струму насичення, монотонно збуває зі збільшенням довжини хвилі λ , прагнучи до нуля на довгохвильовій границі λ_0 (рис. 1.1).

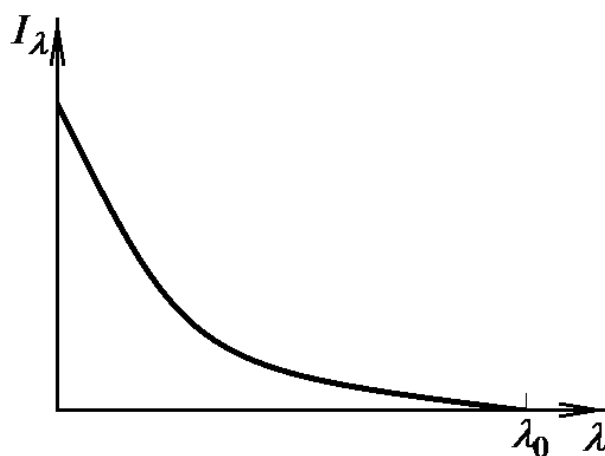


Рисунок 1.1 – Залежність сили струму від довжини хвилі, яка відповідає нормальному фотоелекту

Фотоелект називається *селективним*, якщо крива $I_{\lambda}(\lambda)$ характеризується максимумом при деякому значенні $\lambda = \lambda_m$ (рис. 1.2).

Всі розглянуті вище фотоелекти можна визначити як *зовнішні*, у результаті яких електрони залишають речовину. Крім того, можливий і *внутрішній* фотоелект, при якому електрони, залишаючись у речовині, змінюють у ній свій енергетичний стан. Так, у напівпровідниках і діелектриках частина електронів під дією світла з валентної зони переходить у зону провідності. При цьому збільшується електропровідність речовини. Таке явище називається *фотопровідністю*. Зміна енергетичних станів електронів (їхній перерозподіл) може привести до зміни внутрішнього електричного поля в кристалі і, як результат цього, до появи ЕРС, названої фотоЕРС.

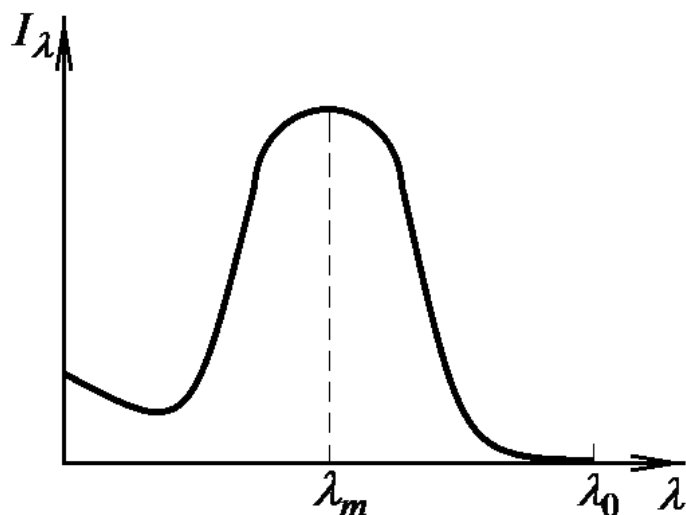


Рисунок 1.2 – Залежність сили струму від довжини хвилі, яка відповідає селективному фотоелекту

У газах явище фотоефекту полягає у фотоіонізації, при якій відбувається іонізація атомів і молекул під дією випромінювання.

Фотоефект знайшов широке застосування в різних технічних пристроях: фотоелементах, фотоопорах, фотодіодах, фотоелектронних множниках тощо.

Контрольні запитання

1. Як Ви розумієте термін «дискретний індикатор»?
2. За якими ознаками розроблена класифікація ЗВІ?
3. Які існують категорії індикаторів за призначенням?
4. В чому полягає різниця між знаковими та знакомодульованими індикаторами?
5. На які дві основні групи поділяються індикатори за принципом дії?
6. З якою метою на практиці використовують спектральний аналіз?
7. Яке явище називають фотоефектом?
8. Які передумови необхідні для існування нормального, селективного, внутрішнього та зовнішнього фотоефектів?

2 ТЕПЛОВІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

Теплові джерела випромінювання відносять до штучних джерел оптичного некогерентного випромінювання. При тепловому випромінюванні потік випромінювання і його спектральний склад визначає температура. Світлове випромінювання обумовлено спонтанними переходами електронів з високих рівнів на більш низькі. ІЧ-випромінювання виникає за рахунок зміни коливального та обертального рухів атомів. Теплове випромінювання виникає в широкому спектральному діапазоні і виходить з випромінювача у всі сторони.

2.1 Чорне тіло

Абсолютно чорне тіло – фізична абстракція, що застосовується у термодинаміці, тобто, це тіло, яке цілком поглинає промені (всіх довжин хвиль), що падають на нього. Не зважаючи на назву, абсолютно чорне тіло може випускати теплове випромінювання. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла визначається тільки його температурою.

Іншими словами, чорним тілом називається випромінювач, що поглинає все випромінювання, яке на нього падає. Чорне тіло – це еталонне джерело потоку випромінювання. Його застосовують для паспортизації різноманітних приймачів випромінювання, для визначення характеристик пропускання та поглинання різноманітних матеріалів, а також спектральних

характеристик монохроматорів та для контролю інших вимірювальних пристроїв.

За еталон чорне тіло прийнято тому, що потужність, яка випромінюється ним, можна підрахувати за допомогою законів теплового випромінювання.

Оскільки за законом Кірхгофа відношення спектральної густини енергетичного освітлення (СГЕО) та спектрального коефіцієнта поглинання є величина стала для певної температури і довжини хвилі, а спектральний коефіцієнт поглинання чорного тіла дорівнює одиниці, то СГЕО чорного тіла є максимально можливою для заданих T та λ . Саме тому чорне тіло називають повним випромінювачем.

В природі чорного тіла не існує, але штучно можна створити випромінювачі, властивості яких наближаються до властивостей чорного тіла.

Модель чорного тіла можна отримати у вигляді замкненої порожнини з невеликим у ній отвором. Випромінювання, що потрапляє всередину такого джерела багаторазово відбивається від стінок і сильно поглинається. Чим менший вхідний отвір, тим менша ймовірність виходу випромінювання, тобто тим більший коефіцієнт поглинання. Такий випромінювач за своїми властивостями наближається до чорного тіла.

Випромінювання порожнинного джерела завжди більше випромінювання плоского джерела. Відмінність випромінювальної можливості угнутої поверхні (або порожнини) та гладкого плоского зразка можна охарактеризувати *ефективним коефіцієнтом теплового випромінювання* або *коефіцієнтом почорніння* $\gamma(\lambda, T) > 1$.

Розглянемо випромінювання порожнинної сфери з отвором на поверхні.

Часто випромінювання будь-якої порожнини наближено оцінюють приведенням її до однакової за величиною сферичної поверхні, крім того, поверхні порожнин і площі отворів мають бути однаковими. Тому розглянемо випромінювання сфери, на поверхні якої є кругле вікно для виведення випромінювання.

Ефективний коефіцієнт теплового випромінювання сфери дорівнює:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{L(T, \xi, \eta)}{L_0(T)} = \frac{1 - \rho}{1 - \rho m},$$

де $m = S / S_{ef} < 1$;

$S = S_{ef} - S_{отв}$ – поверхня порожнини;

ξ, η – координати точок порожнини;

$L_0(T)$ – власна яскравість площі dS ;

ρ – коефіцієнт відбиття порожнини.

Величина m визначається діаметром отвору, тому випромінювання залежить від нього. Якщо отвір зменшується, то $m \rightarrow 1$, при цьому $\varepsilon_{ef} \rightarrow 1$.

Щоб отримати коефіцієнт випромінювання близьким до одиниці, необхідно мати велику порожнину і малий отвір.

Порожнини виготовляють із різноманітних матеріалів (сталі, алюмінію, міді), що мають гарну теплопровідність для отримання $T = const$ за всією порожниною. Їх форми можуть бути різноманітними (рис. 2.1). Поверхня зазвичай виконується шорсткою та оксидованою.

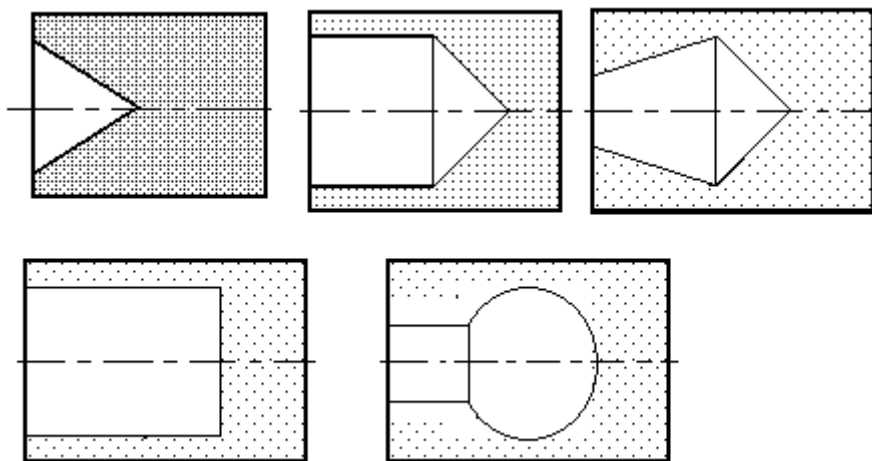


Рисунок 2.1 – Різновиди випромінювальних порожнин

Чорні тіла забезпечуються набором діафрагм різного розміру, що охолоджуються або водою, або повітрям. В останньому випадку вони мають радіатори. Незначні зміни форми порожнини слабо впливають на коефіцієнт випромінювання. Найважливіше підтримувати постійною температуру всередині порожнини. Температуру вимірюють термометрами або термопарами. Якщо температура чорного тіла вища 1273 К, зазвичай використовують кераміку. Гарними результатами характеризується чорне тіло на основі конічної поверхні з кутом при вершині $\psi \leq 15^\circ$. Якщо конус виконаний з коефіцієнтом випромінювання матеріалу $\varepsilon = 0,7 \div 0,75$ та $\psi = 5^\circ$, то ефективний коефіцієнт випромінювання чорного тіла буде більший 0,99.

Наближена формула розрахунку коефіцієнта випромінювання конічної поверхні має вигляд:

$$\varepsilon_{ef} \approx 1 - \rho \left[\frac{D^2 / 4l^2}{1 + D^2 / 4l^2} \right],$$

де D – вихідний діаметр конуса;

l – довжина конічної поверхні (рис. 2.2).

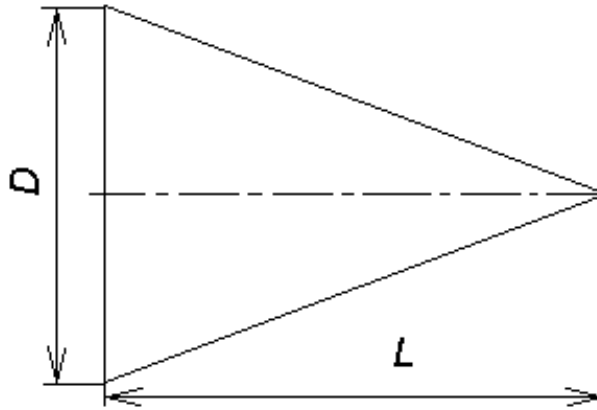


Рисунок 2.2 – Конічна випромінювальна площина

Гарні параметри мають випромінювачі у вигляді трубок з малим отвором або вузькою щілиною на циліндричній поверхні.

2.2 Лампи розжарення

Електричною лампою розжарення (ЕЛР) називається джерело випромінювання, яке отримують в результаті теплового випромінювання твердого тіла, нагрітого до високої температури електричним струмом, що через нього протікає. При цьому тверде тіло поміщено в скляний балон, заповнений газом. ЕЛР широко використовуються як джерело світла і джерело випромінювання в ближній ІЧ-області.

До переваг ЕЛР відносять: зручність експлуатації; суцільний спектр, що забезпечує в багатьох випадках належну передачу кольорів; відпрацьовану технологію виготовлення ламп в широкому діапазоні потужностей; малу вартість; достатньо високу надійність.

Недоліки: низька світлова віддача (світловий ККД $1 \div 3\%$); спектральний склад істотно відрізняється від спектрального складу сонячного випромінювання.

Важливе значення для характеристики ламп розжарення має світлова віддача, тобто світловий потік, що відноситься до одиниці потужності (лм/Вт). Максимальний коефіцієнт світлової віддачі $K_{\max} = 683$ лм/Вт.

Нитки розжарення сучасних ЕЛР виготовляють із вольфраму з різними домішками, оскільки нитка із чистого вольфраму недостатньо міцна і погано зберігає форму. Конструкція ЕЛР забезпечує отримання найкращих світлових характеристик і автоматизацію процесу складання в масовому виробництві.

Для виготовлення колб використовують спеціальні марки скла (БД-1, ЗС-5). Скло має бути міцним, жаростійким, мати постійний коефіцієнт лінійного розширення і мінімальну електропровідність.

Для металевих введень в колбу лампи використовують платиніт та мо-лібден (для колб із скла ЗС-5). Коефіцієнти лінійного розширення вказаних металів близькі до коефіцієнтів лінійного розширення скла.

Всі цоколі ламп розжарення поділяються на різьбові, фокусувальні штифтові, фокусувальні дискові, фокусувальні секторні. Цоколі забезпечують кріплення ламп в патроні та орієнтацію нитки відносно осі патрона. Якщо необхідно строго орієнтувати нитку розжарення, то використовують фокусувальні цоколі.

Лампи розжарення виготовляють відповідно до стандартів, які встановлюють певні допуски на розкид параметрів. Потужність обмежується верхньою межею ($8 \div 15\%$), світловий потік – нижньою межею ($10 \div 15\%$) залежно від типу ламп, світлова віддача – нижньою межею (10% від номінального значення). Нормуються також тривалість горіння та положення нитки розжарення для фокусувальних цоколів. При зміні напруги живлення лампи на 1% потужність змінюється на $\pm 1,5\%$; світловий потік – на $\pm 3,5\%$; світлова віддача – на $1,8\%$ і термін роботи – на $1,3\%$.

Заповнення колб інертним газом дозволяє підвищити температуру нитки розжарення до 2900 K , що істотно збільшує світлову віддачу. При цьому, незважаючи на збільшення втрат через газ, загальний потік випромінювання від лампи зростає.

В лампах розжарення для оптичних приладів існують особливі вимоги до скла балона, форми і розташування тіла розжарення.

Позначення ламп мають таку структуру: $ABCD$, де A – буквене позначення (ОП – оптична, ІК – інфрачервона з кремнієвим вікном); B – напруга живлення, В; C – електрична потужність, Вт; D – відмінність від базової моделі.

Світловимірювальні і температурні лампи розжарення використовують для відтворення світлових одиниць та градування світловимірювальних приладів. Структура їх позначення: $ABCD$, де A – буквене позначення (СВС – світловимірювальні для вимірювання сили світла; СВП – світловимірювальні для вимірювання світлового потоку; СВРШ – світловимірювальні робочі широкосмугові; ТЗ – температурні зразкові; І – для інфрачервоної області спектра; Ш – широкодіапазонні; ПТ – підвищеної точності); B – напруга живлення, В; C – номінальний світловий потік для ламп СВП, лм; номінальна сила світла для ламп СВС, кд; D – відмінність від базової моделі.

2.3 Індикатори розжарення

Вакуумні індикатори розжарення конструктивно являють собою вакуумний балон, всередині якого розташовані елементи відображення у вигляді вольфрамових спіралей. Робоча температура ниток розжарення не перевищує $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, що і забезпечує високу довговічність. Спіральна форма

нитки та невелика відстань між опорними штирями запобігають помітному провисанню при нагріванні. Для збільшення контрасту підкладка чорниться (рис. 2.3).

Збудження індикаторів здійснюється прикладанням постійної, змінної або імпульсної напруги між загальним виводом та окремими виводами збуджуваних сегментів. В будь-якому випадку нагрівання елемента відображення затримується, так що час готовності (інтервал часу від моменту прикладання електричного сигналу до досягнення яскравості 80% від встановленого значення) становить в середньому $0,2 \div 0,25$ с.

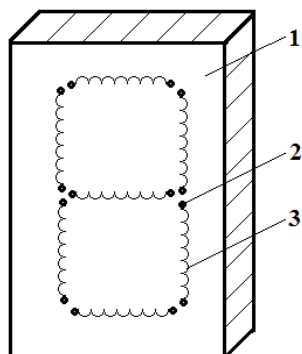


Рисунок 2.3 – Структура електродів вакуумного індикатора розжарення:
1 – підкладка; 2 – опорні штирі; 3 – спіралі розжарення

Типова вольт-амперна характеристика індикатора розжарення подана на рис. 2.4.

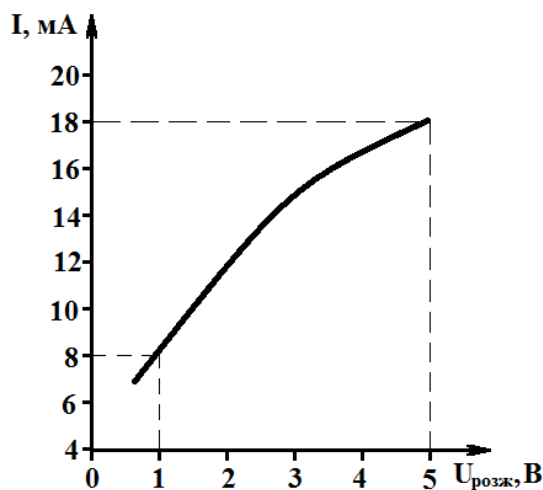


Рисунок 2.4 – Вольт-амперна характеристика індикатора розжарення

Яскравість індикаторів розжарення швидко зростає з напругою. Теоретично цю залежність можна пояснити так. Як і будь-яка лампа розжарення, вакуумний індикатор розжарення має малий ККД, тобто більша частина підведеної до нього потужності відводиться шляхом теплопровідності або

конвекції. Звідси витікає, що температура нитки в середньому пропорційна підведеній потужності, тобто:

$$T \sim I_{\text{розж}} U_{\text{розж}} \sim U_{\text{розж}}^n.$$

З врахуванням зростання опору при збільшенні струму можна взяти $n \approx 1,75$. Оскільки за законом Стефана-Больцмана випромінювання пропорційне четвертому степеню температури, тобто:

$$L_v \sim U_{\text{розж}}^7,$$

де $U_{\text{розж}}$ – діюче значення напруги.

ВАХ показують, що вакуумні індикатори розжарення працюють при порівняно великих струмах (в десятки мА). Необхідно врахувати, що в початковий момент через малий опір холодної нитки можливий стрибок струму (до дворазового значення), що триває декілька десятих часток секунди.

Індикатори розжарення мають *перевагу* перед іншими типами активних індикаторів за яскравістю, що досягається за рахунок великої потужності споживання. Перевагою цього різновиду індикаторів є також можливість отримання різноколірного світіння, для цього використовують світлофільтри, що вилучають (вирізають) певну частину спектра із широкої спектральної смуги, яка утворюється розжареною вольфрамовою ниткою.

При живленні імпульсною або змінною напругою з метою запобігання резонансу рекомендується використовувати частоти в діапазоні $0 \div 150$ або вище 500 Гц.

Контрольні запитання

1. Поясніть суть терміна «Чорне тіло».
2. З якою метою на практиці застосовують модель чорного тіла?
3. В який спосіб на практиці отримують модель чорного тіла?
4. Які матеріали використовують для отримання порожнини чорного тіла?
5. Чому чорні тіла забезпечують набором діафрагм?
6. Які матеріали використовують для виготовлення конструктивних елементів ламп розжарення?
7. Які існують допуски на розкид параметрів ламп розжарення?
8. Чому яскравість індикаторів розжарення зростає з напругою?
9. В який спосіб на практиці за допомогою вакуумних індикаторів розжарення можна отримати кольорове світіння?

3 ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

Люмінесцентні джерела випромінювання, як і теплові, відносять до штучних джерел оптичного некогерентного випромінювання. При люмінесцентному випромінюванні атоми та електрони спонтанно переходять з високих рівнів на більш низькі, збудження забезпечується електромагнітним полем. Люмінесцентне випромінювання виходить з випромінювача у всі сторони, але його спектральний діапазон значно вужчий, ніж у теплового.

3.1 Люмінесцентні лампи

Освітлювальні люмінесцентні лампи є ртутними лампами низького тиску. Їх зазвичай виготовляють у вигляді трубки діаметром $15 \div 50$ мм і довжиною $15 \div 80$ см, у ній розташовують декілька міліграмів ртуті і заповнюють її аргоном при тиску декілька сотень паскалів. На кінцях трубки впаяно оксидні вольфрамові електроди. Внутрішні поверхні трубки покривають тонким шаром люмінофора.

При вмиканні лампи в мережу електроди нагріваються струмом, що протікає через них, при цьому виникає термоемісія, що призводить до іонізації аргону і розігріву лампи. Ртуть випаровується, іонізується і в лампі виникає розряд. Подальше нагрівання електродів підтримується енергією розряду, і зовнішнє коло нагрівання електрода вимикається. Випромінювання розряду в парах ртуті зосереджено головним чином на двох лініях з $\lambda_1 = 0,2537$ мкм та $\lambda_2 = 0,1849$ мкм. Люмінофор перетворює УФ-випромінювання у видиме, що дозволяє отримати світлову віддачу до 80 лм/Вт. Яскравість люмінесцентних ламп не перевищує 7000 кд/м², а термін роботи 12 000 год.

Як люмінофор використовують суміш в різноманітних пропорціях: вольфрамати кальцію та магнію, силікати цинку, кадмію; фосфати кальцію, цинку тощо.

Спектр випромінювання люмінофора являє собою, як правило, неперервну смугу, в той же час збуджувальне випромінювання може бути і монохромним. Розподіл енергії в спектрі люмінесценції не залежить від довжини хвилі збуджувального випромінювання.

Коефіцієнт корисної дії люмінофора як джерела світла визначається світловим, енергетичним або квантовим виходами.

Світловий вихід – це відношення повного світлового потоку люмінесценції до потоку випромінювання, що поглинуто люмінофором.

Енергетичний вихід – це відношення енергії люмінесценції до енергії, поглинутої люмінофором.

Квантовий вихід – це відношення числа фотонів, випромінених при люмінесценції, до числа фотонів, поглинутих люмінофором.

Спектральною чутливістю люмінофора називають енергетичний вихід люмінесценції при збудженні люмінофора монохромним випромінюванням заданої довжини хвилі.

В люмінесцентних лампах зазвичай використовують порошкоподібні кристалічні люмінофори.

На рис. 3.1 подано схему вмикання люмінесцентної лампи в мережу за допомогою спеціального пускача.

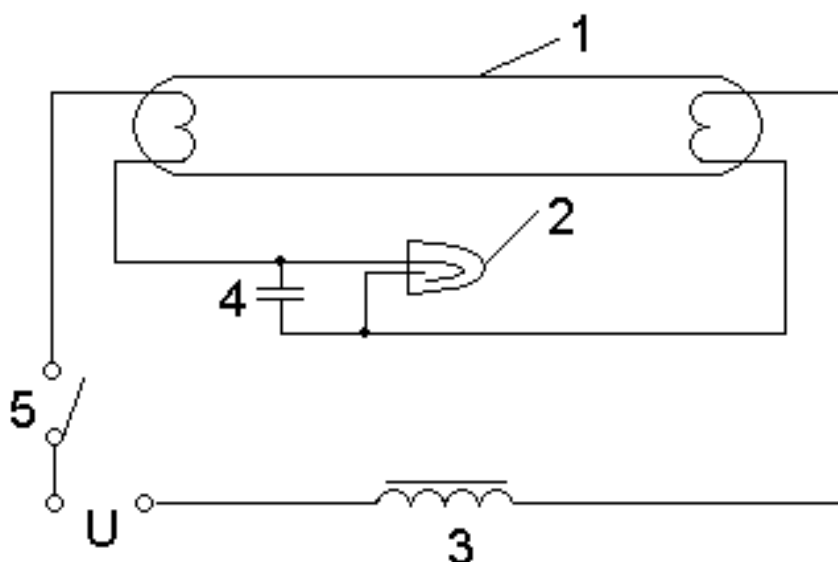


Рисунок 3.1 – Схема вмикання люмінесцентної лампи: 1– люмінесцентна лампа; 2 – пускач; 3 – дросель; 4 – конденсатор; 5 – вмикач

При замиканні контактів вмикача 5 напруга подається до лампи 1 пускача 2, який зазвичай виготовляють у вигляді реле тліючого розряду з біметалевою пластинкою як одного із електродів, він під'єднується паралельно з конденсатором 4. В пускачі між електродами виникає розряд, що нагріває біметалеву пластинку, контакти замикаються, і через електроди протікає струм. Електроди нагріваються, виникає термоємність, і лампа запалюється. Після замикання електродів в пускачі розряд у ньому згасає, біметалева пластинка остигає і розриває коло підігріву електродів. Після запалювання лампи розряд в пускачі не виникає через зменшення напруги на ній. Подальше нагрівання електродів здійснюється розрядом в трубці. Дросель 3 використовують для стабілізації струму, що протікає через лампу. Люмінофор має невелике післясвітіння ($0,1 \div 0,01$ с), тому при живленні лампи змінним струмом потік випромінювання модулюється. Глибина модуляції в лампі досягає 40%, частота – 100 Гц, що негативно впливає на зір.

Основною перевагою люмінесцентних ламп є їхня вища, ніж у ламп розжарення, світлова віддача. На сьогодні світлова віддача люмінесцентних ламп $70 \div 80 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ і середній термін роботи $7500 \div 10000$ год.

Люмінесцентні лампи мають просту конструкцію, але технологічний процес їх виготовлення складний. Крім того, для виготовлення конструктивних елементів ламп необхідні якісні матеріали. Люмінесцентні лампи дуже чутливі до зовнішніх впливів. За низьких температур та підвищеної вологості істотно погіршується запалювання ламп і знижується світлова віддача.

Люмінесцентні лампи виготовляються різних потужностей: 3, 4, 6, 8, 10, 13, 15, 20, 30, 40, 80 Вт. Лампи потужністю до 20 Вт призначені для роботи в мережах з напругою 127 В, а починаючи з 30 Вт і вище – в мережах з напругою 220 В.

3.2 Електролюмінесцентні індикатори на основі порошкових люмінофорів

Електролюмінесцентне випромінювання виникає в результаті прикладення електричного поля до люмінофорного матеріалу. Інтенсивність випромінювання залежить від потужності поля, а також частоти його зміни, якщо поле змінне. Світіння пов'язане з прискоренням руху носіїв заряду в люмінофорі, для чого необхідна велика напруженість поля (порядку $10^3 \div 10^6 \text{ В/см}$).

Найбільш поширеним люмінофором є сульфід цинку (ZnS) з домішками міді, марганцю і деяких інших елементів. Від типу люмінофора і кількості домішок залежить колір випромінювання, що перекриває практично всю видиму область спектра. Змішуючи різноманітні люмінофори в певних пропорціях, можна, змінюючи напругу, керувати кольором. Це виникає завдяки тому, що максимум інтенсивності світіння у різних матеріалів виникає при різних напругах

Основою електролюмінесцентного елемента постійного струму є порошкоподібний люмінофор, кристали якого разом з домішками розподілені у в'язкій речовині. Цю суміш наносять на прозору пластину з провідним покриттям (використовують шар оксиду олова). З іншої сторони до люмінофора прикладають тонку металеву пластину (фольгу). Вся конструкція розміщена в пластмасовому корпусі і герметизована (рис. 3.2).

Після прикладення до електродів постійної напруги в матеріалі люмінофора збуджується світіння в місцях контакту з неметалевою пластиною. За необхідності ця пластина може бути фігурною, що надає можливість висвітити певний символ. Інколи трафарет наносять на зовнішню скляну пластину, яка просвічується збудженим люмінофором.

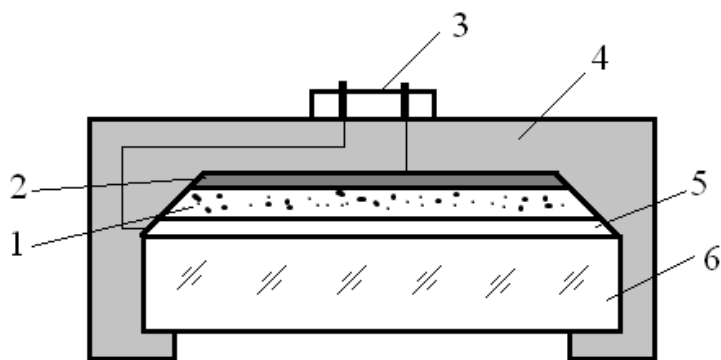


Рисунок 3.2 – Конструкція ЕЛІ постійного струму: 1– люмінофорний шар; 2 – металевий електрод; 3 – вивідні контакти; 4 – герметичний корпус; 5 – прозорий електрод (SnO_2); 6 – скляна підкладка

Основною перевагою є їхня мала товщина, яка дозволяє конструювати компактні індикатори. Керуються вони напругою порядку $50 \div 100$ В, але за яскравістю та контрастністю поступаються багатьом типам випромінювальних елементів.

Залежність, що зв'язує яскравість елемента з прикладеною до нього напругою, визначається за формулою:

$$L = KU^n,$$

де K – сталий коефіцієнт; $n > 1$.

В середньому для ЕЛІ постійного струму при напрузі живлення близько 100 В яскравість світіння становить ~ 300 кд/м².

Характерним для таких елементів є зменшення їхньої світлової потужності в процесі експлуатації, що обумовлено міграцією домішок в люмінофорі в зонах контакту з електродом. Строк служби елементів може бути збільшеним, якщо їх живлення здійснюється імпульсною напругою, що подається на низьковольтне постійне зміщення.

Зміна кольору випромінювання ЕЛІ залежно від прикладеної напруги, дозволяє здійснювати світлове кодування відображуваної інформації.

3.3 Електролюмінесцентні індикатори на основі люмінофорної тонкої плівки

Тонкоплівкові індикатори змінного струму найбільш перспективні прилади, що реалізують принцип електролюмінесценції. На відміну від ЕЛІ постійного струму, тут контактний зв'язок електродів з люмінофором замінений ємністю і сам елемент є конденсатором. Для цього шар люмінофора розміщують між шарами діелектрика, що забезпечує гальванічний розділ його з електродами (рис. 3.3). Всі шари створюються за допомогою технології напилювання в вакуумі на скляну підкладку.

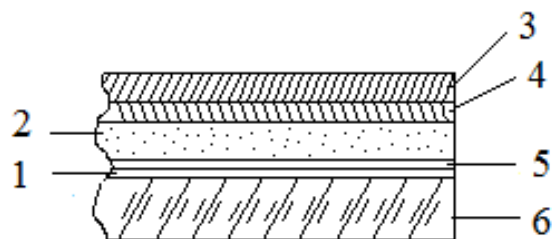


Рисунок 3.3 – Структура шарів тонкоплівкового електролюмінесцентного індикатора змінного струму: 1 – прозорий електрод; 2 – плівка люмінофора; 3 – металевий електрод; 4 – світлопоглинальний діелектрик; 5 – прозорий діелектрик; 6 – скляна підкладка

Один із електродів виконується прозорим, другий покритий чорним поглинальним шаром, що підвищує контрастність зображення. Довговічність таких ЕЛІ значно вища, ніж порошкових, а їхня високочастотна напруга живлення становить $150 \div 250$ В. Характерною відмінністю тонкоплівкових ЕЛІ є підвищення яскравості залежно від прикладеної напруги (рис. 3.4).

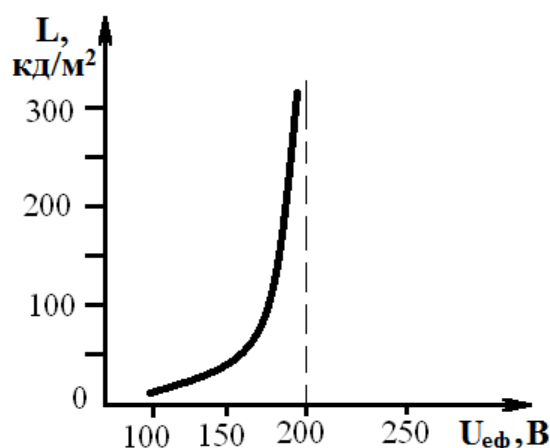


Рисунок 3.4 – Типова крива залежності яскравості від прикладеної напруги для тонкоплівкового люмінофора

Така характеристика, а також практична відсутність світіння при напругах, нижчих певного порогу, полегшує конструювання тонкоплівкових електролюмінесцентних панелей з X-Y-адресацією.

В таких панелях електроди виконані у вигляді тонких паралельних смужок, що складають систему взаємно перпендикулярних шин. Високочастотна напруга живлення за допомогою зовнішніх ключів комутується по шинах, при цьому забезпечується світіння тієї ділянки люмінофору, яка розташована на перетині активної пари електродів. Змінюючи енергію імпульсів, можна керувати яскравістю точки, що світиться. Відомі різноманітні розробки люмінесцентних панелей цього типу з роздільною здатністю 100×100 і більше елементів. Крім того, подальший розвиток техніки елек-

тролюмінісцентних панелей дозволить створити екран, за характеристиками, не гірших характеристик ЕПТ.

3.4 Вакуумні люмінесцентні індикатори

Вакуумні люмінесцентні індикатори (ВЛІ) відносяться до активних індикаторів, що перетворюють електричну енергію в світлову. ВЛІ є діодною або тріодною системами, в яких під дією електронного бомбардування засвічуються покриті низьковольтним катодолюмінофором сегменти.

Конструктивна схема однорозрядного індикатора подана на рис. 3.5. Деталі індикатора монтуються на керамічній або скляній платі 1.

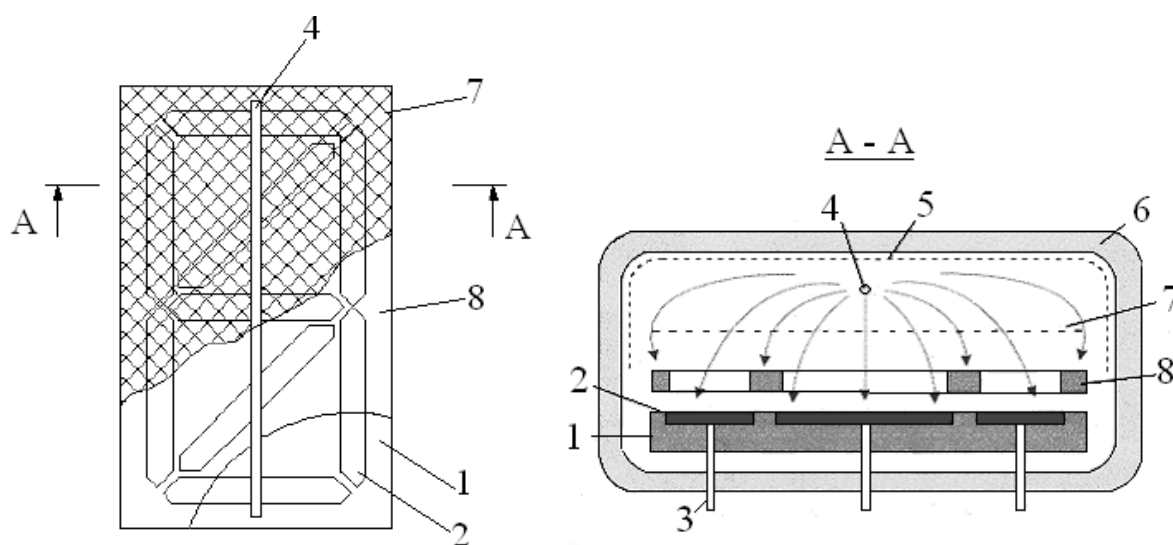


Рисунок 3.5 – Схема будови ВЛІ: 1 – плата; 2 – аноди-сегменти; 3 – виводи анодів; 4 – оксидний катод; 5 – струмопровідне покриття; 6 – скляний балон; 7 – сітка; 8 – екрануючий електрод-маска

Ділянки плати, на які нанесено люмінофор, утворюють аноди-сегменти 2; під люмінофором знаходиться струмопровідний шар. Кожен з анодів має свій вивід 3. Джерелом електронів служить оксидний катод прямого розжарення 4. Керування електронним потоком здійснюється сіткою 7. Електронний потік, що опромінює сегменти, обмежується екранувальним електродом-маскою 8. Вся арматура індикатора розташовується в скляному балоні 6, в якому створюється вакуум. Штриховими лініями вказано орієнтовні траєкторії руху електронів. На внутрішню поверхню балона нанесено струмопровідне покриття 5, прозоре для всього діапазону видимого спектра. Електрично воно з'єднано з окремим виводом або катодом; покриття забезпечує стікання електричних зарядів з поверхні балона, що можуть спотворити траєкторії електронів.

Катод ВЛІ є відрізком вольфрамового дроту діаметром $6 \div 60$ мкм, покритий тонким (кілька мікрон) шаром окислів лужно-земельних металів

(оксидом). Робоча температура катода ($900 \div 1000$ К) вибирається, за змоги, низькою, для того, щоб нитка, яка знаходиться при спостереженні перед анодами, не заважала спостереженню засвічених символів. Зниження температури сприяє збільшенню терміну роботи і зменшує нагрівання люмінофора, що світиться.

Сітка ВЛІ керує електронним потоком. Оскільки сітка має позитивний відносно катода потенціал, вона розсіює електрони і прискорює їх в напрямку анодних сегментів. Розсіювальна дія сітки забезпечує рівномірність засвічування поверхонь, покритих люмінофором.

Конструктивно сітка має бути рідкою, «прозорою» для електронів з тим, щоб зменшити частку електронів, нею перехоплених. В багаторозрядних ВЛІ сітка також забезпечує вибір розряду, працюючого в поточний момент. Сітка виготовляється з вольфрамового або нікелевого дроту. В однорозрядних індикаторах форма випромінювальної поверхні анодів визначається металевою маскою, електрично з'єднаною з керівною сіткою.

Зображення літер, цифр та інших символів у ВЛІ формується висвічуванням необхідної комбінації анодів-сегментів, тобто при вмиканні індикатора, позитивний потенціал подають на сітку і до тих анодних сегментів, які потрібні для формування символу. Решта сегментів знаходяться під катодним потенціалом. Сітка створює в площині анодів майже рівномірний потік електронів. Струм катода індикатора та струми сегментів практично не залежать від кількості включених сегментів. Колектовані включеними анодами-сегментами електрони збуджують люмінофор. Люмінофор включених сегментів, тобто тих, що мають в цей момент позитивний відносно катода потенціал, світиться під впливом падаючого на них електронного потоку. Електрони, що попадають на включені сегменти, заряджають їх від'ємно і відбиваються. Вторинні електрони, і ті електрони, що не беруть участі у висвічуванні певного знака, перехоплюються екранувальним електродом.

Для подавлення небажаного світіння люмінофору в вихідному стані на сітку подається негативна напруга зміщення – кілька вольт відносно катода. Екранувальний електрод, що має потенціал екранувальної сітки, також покращує умови запирання електронного потоку.

Зміна зображення досягається шляхом відповідної комутації анодів-сегментів. Аноди-сегменти – це покриті люмінофором шари струмопровідного матеріалу заданої конфігурації, нанесені на скляну або керамічну плату. В ряді ВЛІ струмопровідні шари отримують напилюванням у вакуумі тонких металевих плівок на всю поверхню плати, а формування рисунку анодів – фотолітографією. Кількість, конфігурація та взаємне розташування сегментів утворюють структурний рисунок індикатора, за яким розрізняють цифрові, літерно-цифрові, матричні та шкальні індикатори.

В багаторозрядних індикаторах одноіменні аноди-сегменти з'єднуються всередині балона паралельно, що дозволяє різко скоротити кількість виводів.

Зображення ВЛІ високо контрастне, яскравість досягає 500 кд/м^2 і більше. Для порівняння варто нагадати, що яскравість екрана сучасного кінескопа не перевищує 300 кд/м^2 . У ВЛІ використовується явище низьковольтної катодолюмінесценції (НВК), при якому світло випромінюється кристалофосфором, що бомбардується електронами з відносно низькою енергією $10 \div 100 \text{ еВ}$. Для речовин, у яких спостерігається такий ефект, потенціал початку НВК становить всього декілька вольт.

При напругах в інтервалі $10 \div 100 \text{ В}$ існує монотонна лінійна залежність яскравості від анодної напруги U_a , а також від густини струму, яку можна виразити так:

$$L_v \sim jU_a,$$

де j – густина струму.

При НВК-люмінесценції збудження світлового випромінювання бомбардуєчими люмінофор електронами проходить всього в кількох його приповерхневих шарах. При високовольтному збудженні, наприклад в електронно-променевих трубках, швидкі електрони збуджують світіння в об'ємі кристала люмінофору. У ВЛІ як люмінофори широко використовуються окис цинку, активований цинком (ZnO:Zn), що забезпечує інтенсивне синьо-зелене свічення, або сульфід металів. Використовуючи світлофільтри, можна отримати кольори символів від синього до червоного за умови, що яскравість вхідного світіння достатньо велика (порядку 1000 кд/м^2). Крім того, існує достатньо широка номенклатура люмінофорів, що мають різні кольори світіння.

До переваг ВЛІ належить віднести: високу яскравість, що забезпечує гарну видимість відтворених знаків; низькі робочі напруги, що допускають керування ними МОН-мікросхемами; мале споживання енергії, що дозволяє використовувати їх в пристроях з живленням від батарей. Умови експлуатації катодів в ВЛІ можна рахувати екстремальними: вони працюють при низькій температурі і високому відборі струму; ці обставини в більшості випадків визначають довговічність ВЛІ.

Необхідність використання джерел живлення розжарення індикатора може виявитись його недоліком. В ряді випадків досить важко виключити відблиски, які заважають сприйняттю зображення та створюються відбиттям світла від скляних балонів індикатора.

Вакуумні люмінесцентні індикатори використовують для відображення інформації в пристроях найрізноманітнішого призначення: в мікрокалькуляторах та ЕОМ, касових апаратах, електронних годинниках, електро- та радіовимірювальних приладах, медичних приладах тощо.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте конструктивні особливості люмінесцентних ламп.
2. Який принцип роботи люмінесцентних ламп?

3. Охарактеризуйте конструктивні особливості ЕЛІ постійного та змінного струму.
4. Який принцип роботи ЕЛІ постійного струму?
5. Який принцип роботи ЕЛІ змінного струму?
6. Охарактеризуйте конструктивні особливості ВЛІ.
7. Який фізичний ефект слугує основою принципу дії ВЛІ?
8. Наведіть області застосування ВЛІ.

4 ГАЗОРОЗРЯДНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

Відомо, що атоми газу генерують світло при переході електронів з високого енергетичного рівня на більш низький. Крім того, ефективно цей процес виникає в іонізованому газі, коли концентрація вільних електронів та іонів в ньому висока. Іонізація забезпечується прикладенням електричного потенціалу, при певному значенні якого виникає газовий розряд. Типову вольт-амперну характеристику газового розряду подано на рис. 4.1.

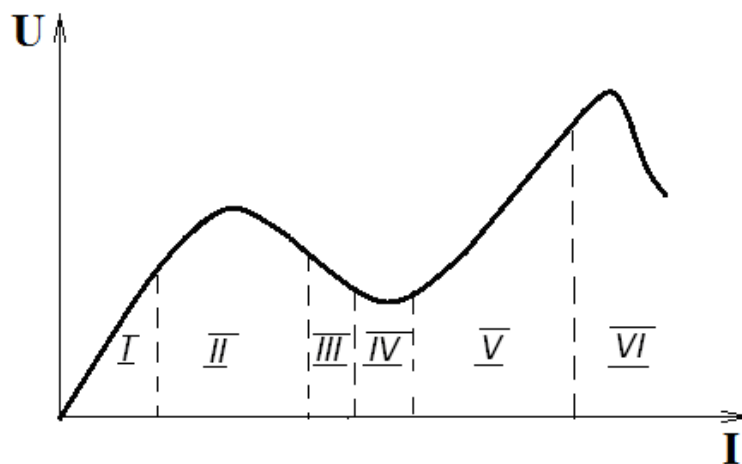


Рисунок 4.1 – Вольт-амперна характеристика газового розряду

При низьких напругах (ділянка I) розряд відсутній, і газ має великий електричний опір. При досягненні певного рівня напруги починається іонізація газу, і струм швидко зростає (ділянка II). Процес іонізації розвивається, оскільки електрони, що мають високу енергію, зіштовхуються з неіонізованими атомами, звільняють нові електрони і так далі. Розвиток цього процесу призводить до виникнення розряду в газі (III), який підтримується при напрузі, яка менша за напругу запалювання. Ділянка, що світиться (IV), називається *ділянкою тліючого розряду*, зазвичай і використовується в різноманітних індикаторах.

Розряд можна зупинити лише при зменшенні напруги, нижче напруги горіння. При збільшенні напруги струм різко зростає, виникає аномальне

світіння (V), а далі дуговий розряд (VI). Щоб тліючий розряд не переходив в дуговий, послідовно з газорозрядним елементом включають баластний резистор. Практично всі типи газорозрядних індикаторів являють собою комбінацію діодних проміжків, а струм в такому проміжку обмежується баластним резистором (рис. 4.2).

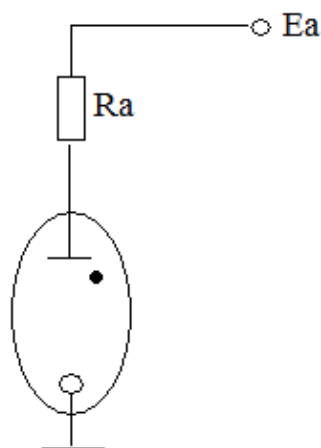


Рисунок 4.2 – Схема підключення газорозрядного діода

Порівняно висока робоча напруга (сотні вольт) газорозрядних індикаторів і визначає їх використання в апаратурі з мережевим електроживленням. В той же час аморфність газового середовища дає можливість створювати прилади великих розмірів, а його властивість дозволяє будувати функціональні індикатори, в яких адресація інформації по індикаторному полю або її запам'ятовування здійснюється всередині індикатора.

За принципом дії і конструкції газорозрядні індикатори поділяються на три групи: знакові (цифрові в основному); індикаторні тиратрони та газорозрядні індикаторні панелі.

Взагалі, будь-який газорозрядний прилад являє собою заповнену інертним газом ізольовану від зовнішнього середовища комірку, всередині якої на близькій відстані один від одного розташовано два електроди. Після пробою у катода створюється пляма, що світиться і водночас покриває катод.

Напруга пробою залежить від тиску газу, відстані між електродами і типу газової суміші (зазвичай неону з домішками аргону та гелію). Для більшості елементів ця напруга становить $150 \div 250$ В.

4.1 Знакові індикатори

Найбільш прості за конструкцією і принципом дії знакові (цифрові) індикатори містять множину катодів, оточених загальним анодом. Електродна структура знакомодельовального цифрового індикатора містить набір із десяти катодів, кожен із яких має форму цифри, оточеної зі всіх сторін анодним електродом (рис. 4.3). Для виведення випромінювання верхня частина анода виконана у вигляді оптикопрозорої сітки. Прилад працює в режимі слабо аномального тліючого розряду, тобто при струмах, що ледь перевищують струм повного покриття катода світіння I_n .



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд знакового індикатора

Оскільки тиск газу в приладі становить декілька тисяч паскалів, то світіння тліючого розряду створює тонку (товщиною у десяті частки міліметра) ділянку, що щільно оточує катод. Через це область світіння має форму достатньо близьку до контура катода, тобто відображуваної цифри.

Недоліки: екранування одних символів іншими ускладнює спостереження, а велика товщина катодного пакету зменшує кут огляду і обмежує кількість використовуваних знаків (довжину алфавіту).

Через це в останніх розробках знакомодульовальні індикатори були замінені знаковисинтезувальними, які були виконані багаторозрядними. Конструктивно такі індикатори нагадують вакуумні люмінесцентні, але, на відміну від останніх, вони містять не три, а два електроди. В газорозрядних індикаторах на місці анодів ВЛІ розташовуються холодні катоди, а на місцях сіток – аноди, що виконані шляхом напилювання прозорого провідникового покриття на внутрішню поверхню лицьової частини приладу, цей тип індикаторів використовується, в основному, для відображення символів великих розмірів.

4.2 Газорозрядні індикаторні панелі

Значно розширилась область використання газорозрядних індикаторів з появою матричних цифрових панелей (плазмові панелі). Вони являють собою плоский екран, на якому різноманітне зображення створюється великою кількістю світловипромінювальних газорозрядних елементів, створених на перерізі горизонтальних і вертикальних електродів.

Перші зразки плазмових панелей були монохромними і базувались на принципі газового розряду постійного струму. Однак, з тих пір як був здійснений перехід на технологію змінного струму, конструкції панелей радикально не змінилися.

Принцип дії панелей оснований на плазмовій технології: використовується ефект світіння інертного газу під дією електрики. Формування зображення на плазмовій панелі відбувається в просторі, шириною приблизно 0,1 мм між двома скляними пластинами, заповненому сумішшю благородних газів – ксенону і неону. На передню, прозору, пластину нанесено найтонші прозорі провідники, або електроди, а на задню – відповідні провідники. Таким чином плазмова панель тонка, а електронна частина може довести товщину пристрою до 10 ÷ 15 сантиметрів. Подаючи на електроди електричну напругу, можна викликати пробій газу в потрібній комірці, який супроводжується випромінюванням світла, що і формує необхідне зображення. Перші панелі заповнювались, в основному, неоном, були монохромними і мали характерний помаранчевий колір. Проблема створення кольорового зображення була вирішена шляхом нанесення в триадах сусідніх комірок люмінофорів основних кольорів – червоного, зеленого і синього та підбору газової суміші, що випромінює при розряді невидимий газом ультрафіолет, який збуджує люмінофори та створює вже видиме кольорове зображення (три комірки на кожен піксель).

Розглянемо більш детально.

Панелі постійного струму зі зовнішньою адресацією мають плоску тришарову конструкцію, в якій між двома скляними пластинами з нанесеною на її внутрішню поверхню системою взаємно перпендикулярних напівпрозорих електродів розташована перфорована ізолювальна матриця (див. рис. 4.4).

Отвори в матриці заповнені газом і розташовуються в місцях перерізу електродів. Світіння виникає при подачі на відповідну пару електродів напруг, сума яких перевищує напругу запалювання. Для отримання стійкого зображення необхідно: послідовно подавати високовольтну напругу на необхідні точки, здійснюючи розгортання. Зі збільшенням кількості елементів поля середня яскравість їх світіння зменшується, і тому цей недолік і обмежує використання панелей такого типу.

Значне поширення отримали газорозрядні панелі постійного струму зі самоскануванням, які хоча значно складніші за конструкцією, але вільні від деяких недоліків, властивих панелям із зовнішньою адресацією. Крім

того, в них існує можливість паралельного введення інформації у всі рядки, що значно спрощує керівні кола.

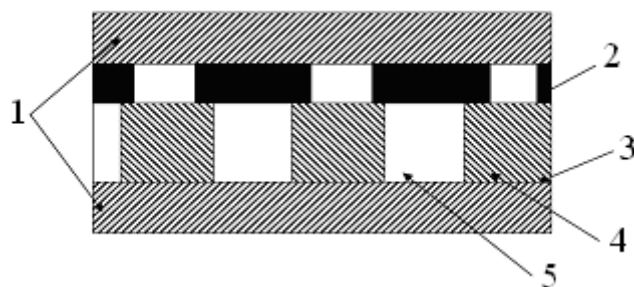


Рисунок 4.4 – Газорозрядна панель постійного струму: 1– скляні пластини; 2 та 3 – перпендикулярні катоди та аноди, відповідно; 4 – матриця ізоляції з отворами 5, що розташовуються на перехресті анодів та катодів

Всі конструкції плазмових панелей постійного струму не наділені можливістю запам'ятовування інформації, але це може бути забезпечене шляхом подання на комірку напруги, достатньої для підтримки устанавленого розряду. Для цього послідовно з кожною коміркою необхідно підключити резистор, що практично важко здійснити.

Однак у традиційних плазмових екранів на панелях з розрядом постійного струму є і ряд *недоліків*, викликаних фізикою процесів, що відбуваються в даному типі розрядної комірки. Справа в тому, що при відносній простоті і технологічності панелі постійного струму, вразливим місцем є електроди розрядного проміжку, що піддаються інтенсивній ерозії. Це помітно обмежує термін служби приладу і не дозволяє досягти високої якості зображення, обмежуючи струм розряду. Як наслідок не вдається отримати достатньої кількості відтінків кольору, обмежуючись в типовому випадку шістнадцятьма градаціями, і швидкодії, придатних для відображення повноцінного телевізійного або комп'ютерного зображення. З цієї причини плазмові екрани використовувалися як табло для демонстрації алфавітно-цифрової і графічної інформації.

Панелі змінного струму зі запам'ятовуванням інформації

Проблема запам'ятовування інформації вирішується в плазмових комірках змінного струму. Газорозрядна комірка змінного струму відрізняється від комірки постійного струму тим, що її електроди гальванічно ізольовані від газової суміші діелектричними прокладками і в дійсності комірка являє собою конденсатор, через який протікають імпульси струму тривалістю близько сотні наносекунд і амплітудою в десятки амперів в моменти перезарядки. При цьому алгоритм управління стає більш складним і високочастотним. Частота повторення імпульсів складної форми може досягати двохсот кілогерц. Все це ускладнює схемотехніку системи управління, проте дозволяє більш ніж на порядок підвищити яскравість і довговічність екра-

на і дає можливість відображати повноцінне телевізійне та комп'ютерне зображення зі стандартними кадровими частотами.

При подачі на обкладинки конденсатора напруги запалювання виникає розряд в газі, заряджені частинки потрапляють на ізолювані стінки комірки, створюючи різницю потенціалів, перешкоджаючи горінню, якщо у відповідний момент змінити полярність прикладеної напруги, то його напрямок збігатиметься з напрямком напруги, створеної зарядом, і знову виникає розряд в газі. Таким чином, якщо будь-яка комірка була ввімкнена, то її горіння може підтримуватися подачею зовнішньої напруги змінної полярності. Ця напруга значно менша, ніж необхідна при початковому запалюванні (типові значення становлять приблизно 90 і 150 В, відповідно), оскільки вона складається з напруги заряду на обкладинках. Така комірка не потребує використання обмежувальних резисторів: їх прототипами є реактивні опори конденсаторів, що забезпечують спад напруги в колі.

Конструкцію панелі змінного струму подано на рис. 4.5.

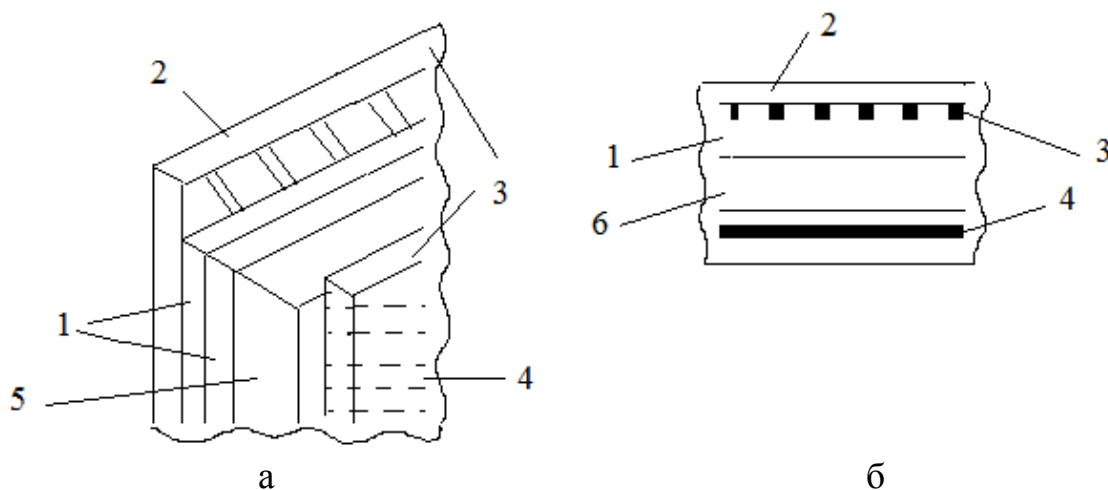


Рисунок 4.5 – Загальний вигляд: а – поперечний розріз; б – фрагмент конструкції плазмової панелі змінного струму

На двох скляних підкладках 3 розміщено набір паралельних провідників, вертикальних 2 і горизонтальних 4, покритих шаром прозорого діелектрика 1. Між обкладинками за допомогою герметизованої рамки 5 створюється камера, яка заповнена газовою сумішшю 6. Набори провідників взаємно перпендикулярні і в точках їх перетину створюються газорозрядні елементи. При запалюванні елемента створюється точка, яка світиться. Набори точок забезпечують відображення необхідної інформації. Яскравість точок, що світяться, достатньо висока і не залежить від розмірності матриці.

Для керування такою панеллю необхідно генерувати напругу складної форми (рис. 4.6).

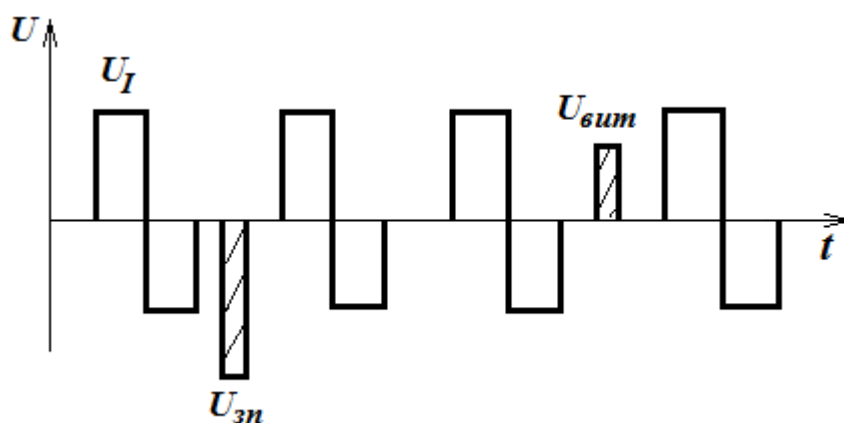


Рисунок 4.6 – Часова діаграма напруги керування плазмової панелі змінного струму

Розглянемо процес керування детально: імпульсна напруга U_I недостатня для виникнення розряду, але достатня для його підтримки. При записуванні інформації в комірку на відповідну пару електродів, що перетинаються, в інтервалі між імпульсами підтримки подають імпульси записування $U_{зн}$, сумарна амплітуда яких достатня для забезпечення розряду.

Після запалювання комірки режим горіння підтримується. Аналогічно для припинення розряду (витирання інформації) у відповідний момент подається імпульс $U_{вим}$, який викликає розряд конденсатора комірки, знижуючи напругу в газовому проміжку до значення, при якому виникнення повторного розряду від напруги підтримки є неможливим. Для селективного переведення комірок з одного стану в інший використовуються стабілізовані за рівнем імпульси записування і витирання половиною амплітуди, синхронізовані з напругою підтримки.

У *сучасних плазмових* панелях (рис. 4.7) використовується технологія *plasmavision* – це безліч комірок, інакше кажучи пікселів, що складаються з субпікселів, які відтворюють кольори – червоний, зелений і синій.

Газ в плазмовому стані використовується для реагування з фосфором в кожному субпікселі та створення кольору (червоного, зеленого або синього). У деяких конструкціях люмінофор наноситься на передню поверхню комірки, в інших – на задню, а передня поверхня при цьому виготовляється прозорою. Кожен субпіксель індивідуально управляється електронікою і виробляє більше 16 мільйонів різних кольорів. У сучасних моделях кожна окрема точка червоного, синього або зеленого кольору може світитися з одним з 256 рівнів яскравості, що при перемноженні дає близько 16,7 мільйонів відтінків комбінованого кольорового пікселя (тріади).

Необхідно зазначити, що кут огляду стандартного телевізора 45 градусів, в той же час для плазмового екрану кут огляду становить, як мінімум, 160 градусів. Це забезпечує видимість зображення з більшої частини простору перед телевізором. Сучасні плазмові панелі мають високу яскравість

(до 650 кд/м²) та контрастність (до 3000:1), а також великі розміри – від 30 до 50 дюймів.

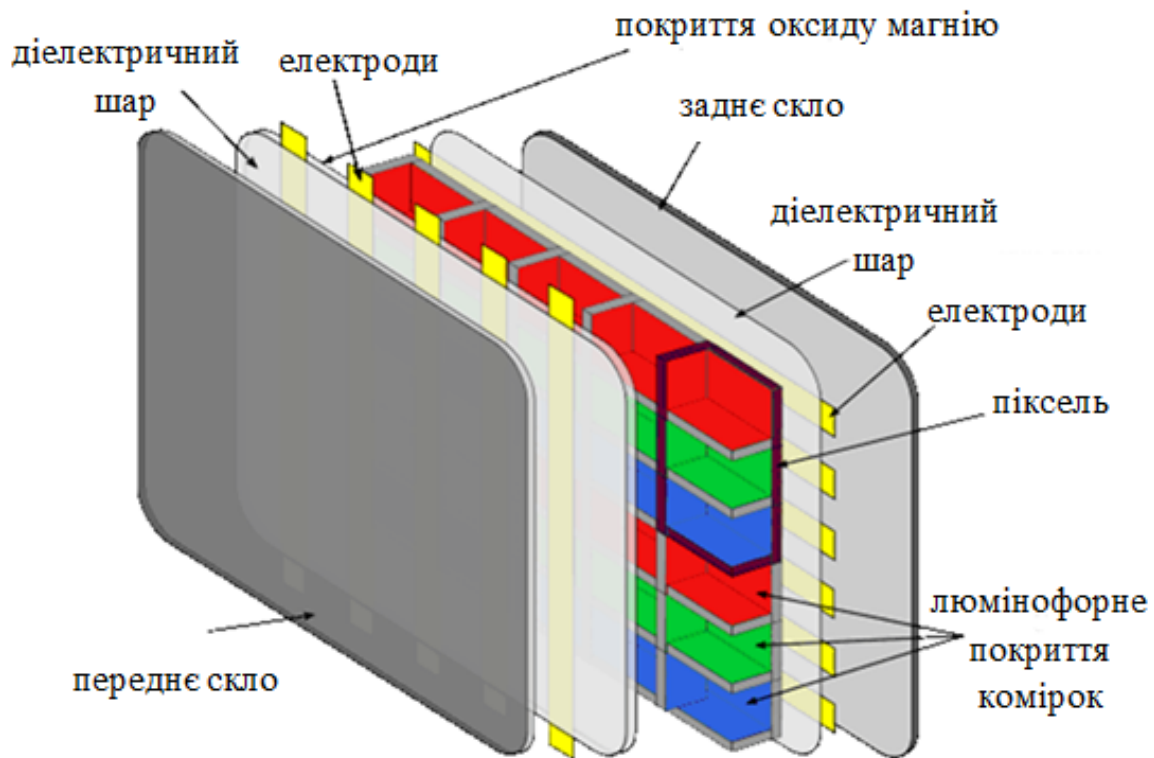


Рисунок 4.7 – Структура сучасної плазмової панелі

Одним із способів боротьби зі спотвореннями передачі кольору, викликаними жовтогарячим світінням неону, є застосування спеціального кольорового фільтра – ССФ, який виконаний у вигляді смужок, розташованих поверх світловипромінювальних комірок кожного з трьох базових кольорів. Цей фільтр «придушує» паразитне жовтогаряче випромінювання неону, що міститься в газовій суміші, тим самим підвищуючи точність передачі кольору, а в поєднанні з висококонтрастною системою керування він дає можливість розширити діапазон відтворення відтінків у 1,6 рази. Крім того, фільтр ССФ дозволяє «придушувати» відблиски від зовнішніх джерел світла.

Необхідно зазначити, що основною складністю є забезпечення однорідності характеристик комірок панелі при виробництві, внаслідок чого вартість їх достатньо висока, але *переваги* плазмових панелей такі як: плоскість екрану, висока роздільна здатність (1024×1024 точок), можливість роботи в безперервному режимі без мерехтіння і спотворення зображення, гарна видимість при яскравому освітленні, стійкість до електромагнітних полів робить їх найбільш перспективними індикаторами для використання в системах відображення високої інформативності.

4.3 Індикаторні тиратрони

Тиратрон – іонний (газорозрядний) прилад для керування електричним струмом за допомогою напруг, поданих на його електроди, являє собою герметичний балон, наповнений газом, в якому вміщено, як мінімум, три електроди. Для наповнення використовуються інертні гази, водень або пари ртуті. Електроди тиратрона називаються анодом, катодом і сіткою. Електрод сітки розташований в балоні між анодом і катодом, він використовується для запалювання газового розряду в просторі між анодом і катодом. Простір між анодом і катодом слугує для утримання іонізованого газу, що проводить електричний струм. Для виконання більш складних функцій, ніж вмикання та вимикання електричного струму, тиратрони можуть мати дві і більше сіток. Залежно від кількості сіток тиратрони називаються: одна – тріод, дві – тетрод, три і більше – пентод, гексод. У найпростішому тиратроні – тріоді – розряд запалюється при подачі на сітку позитивної відносно катода напруги певної величини. Якщо при цьому на аноді є позитивна відносно катода напруга, то газ між анодом і катодом іонізується і починає проводити струм. На відміну від вакуумних тріодів, при знятті керівної напруги на сітці струм між анодом і катодом існує, поки напруга на аноді не зменшиться нижче напруги підтримки розряду (не стане, грубо кажучи, негативною). Умовно прийнято розділяти тиратрони за призначенням на малопотужні і потужні. Малопотужні тиратрони призначені для індикації та виконання логічних функцій в автоматичних пристроях. Потужні тиратрони призначені для управління струмами значної величини в пристроях електроживлення і електроприводу. В сучасній електроніці малопотужні тиратрони використовуються рідко, вони практично повністю витіснені напівпровідниковими приладами. Сучасні потужні тиратрони застосовуються при комутації імпульсів струму до 10 кА і напруги до 50 кВ.

Тиратрони розрізняються способом подачі керівного сигналу (способом підпалу):

- тиратрони, керовані струмом (триелектродні);
- тиратрони, керовані напругою (чотириелектродні);

а також

- керовані позитивною напругою;
- керовані негативною напругою.

Індикаторні тиратрони – особливий клас тиратронів тліючого розряду, призначених, як і випливає з їх назви, не стільки для комутації електричних кіл, скільки для індикації. На відміну від простих неонових ламп, вони керуються низькими напругами, а також запам'ятовують свій стан, розвантажуючи керуючу ними обчислювальну систему для виконання інших завдань. Деякі індикаторні тиратрони є люмінофорними, і дозволяють отримувати кольори, відмінні від властивого неону помаранчево-червоного.

Вітчизняні індикаторні тиратрони презентовані моделями: МТХ-90 – триелектродний; ТХ5Б – чотириелектродний, ТХ16Б – п'ятиелектродної,

ТХ17Б – п'ятиелектродної люмінофорний зелений, ТХ18А – триелектродний, ТХ19А – шестиелектродний люмінофорний, існує у варіантах ТХ19АЖ – жовтий, ТХ19АЗ –зелений, ТХ19АК – червоний, ТХИ2С – чотириелектродний, ИТС1 – семисегментний люмінофорний (зелений) газорозрядний індикатор з функцією запам'ятовування стану кожного сегмента за принципом тиратрона.

Індикаторні тиратрони відрізняються малою потужністю керування, наявністю декількох входів, що дозволяє ефективно організувати матричну адресацію і внутрішню пам'ять.

Розглянемо структуру типового індикаторного тиратрона ТХ19А, що зображена на рис. 4.8.

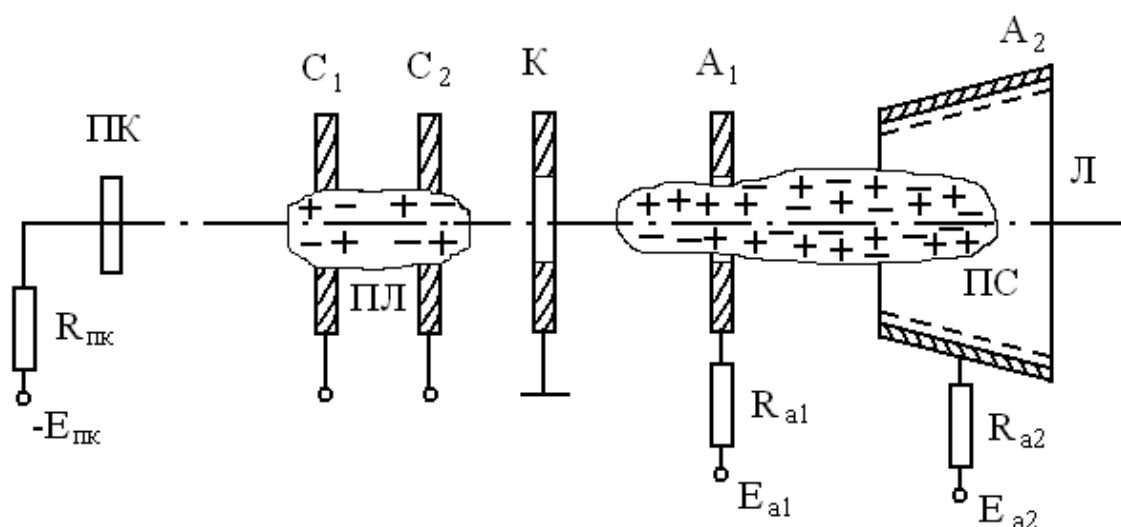


Рисунок 4.8 – Індикаторний тиратрон ТХ19А (електродна структура):

ПК – підкатод; ПЛ – плазмовий катод; C_1 , C_2 – сітки; К – катод;

A_1 , A_2 – аноди; ПС – позитивний стовпчик; Л – люмінофор

Підготовчий розряд на підкатоді *ПК* існує постійно і плазма *ПЛ* цього розряду, що прилягає до першої сітки C_1 і другої сітки C_2 створює так званий плазмовий катод.

Керування виникненням основного розряду на допоміжний анод A_1 та анод індикації A_2 здійснюється за допомогою сіток C_1 і C_2 , які впливають на потенціал плазмового катода (останній визначається найбільш позитивною із сіток, а якщо потенціали сіток однакові – сіткою, яка ближче розташована до анодів). При позитивному потенціалі хоча б на одній із сіток C_1 і C_2 , між плазмовим катодом *ПЛ* і катодом *К* виникає гальмівне електричне поле, що перешкоджає проходженню електронів у простір $K-A_1, A_2$ (суцільна лінія на рис. 4.9). Однак, якщо C_1 і C_2 знаходяться під потенціалом, близьким до катодного, то електрони проникають в проміжок $K-A_1, A_2$, в якому і можливе збудження розряду (пунктир на рис. 4.9).

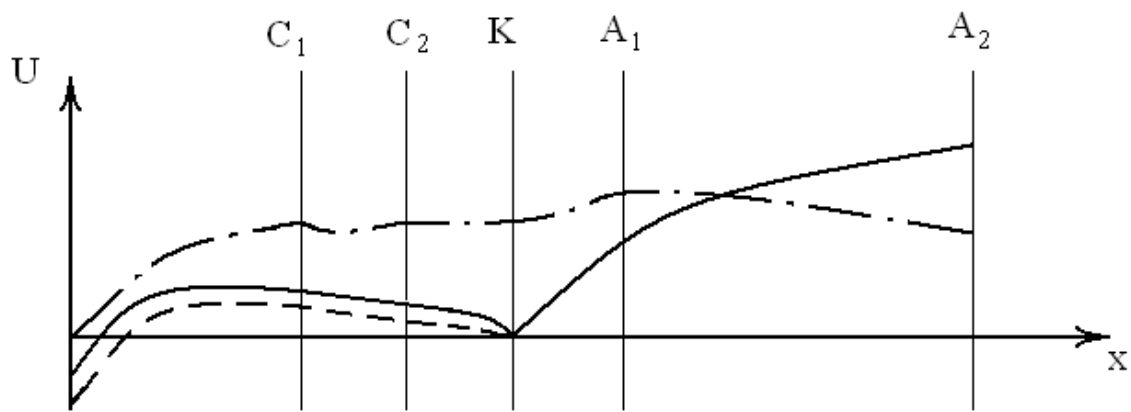


Рисунок 4.9 – Розподіл потенціалу в робочому просторі індикаторного тиратрона TX19A

Розподіл потенціалу після виникнення розряду на A_1 , A_2 (штрихпунктирна лінія на рис. 4.9) показує присутність ще однієї плазмової області – позитивного стовпчика *ПС*, що прилягає до анодів. Ультрафіолетове випромінювання позитивного стовпчика збуджує люмінофор *Л*, що випромінює видиме світло. Тобто для виникнення розряду в індикаторному тиратроні необхідно мати низькі рівні напруги на його сітках при високих рівнях на анодах A_1 і A_2 .

Однак, низькі значення напруг керування отримуються тільки за C_1 і C_2 , по A_1 і A_2 вони значно вищі, і тому частіше використовують управління сіткою. Зручність керування сіткою пов'язана з тим, що входи C_1 і C_2 майже незалежні, а зміна напруг на них після вмикання не впливає на яскравість *ЕВ* (елемента відображення).

Індикаторні тиратрони наділені особливістю запам'ятовувати інформацію, тобто анодний розряд в них зберігається, поки є напруга хоча б на одному з анодів A_1 або A_2 , навіть якщо на C_1 і C_2 – напруга закриття.

Індикаторні тиратрони використовуються як одиничні елементи відображення при створенні матричних полів великого розміру. Оскільки розмір балона приладу становить близько 10 мм, то отримати індикаторне поле з великою роздільною здатністю на їх базі неможливо. Крім того, кожний елемент відображення приєднується до схеми за допомогою шести виводів, що і створює великі конструктивні і технологічні ускладнення.

Для ліквідації цих недоліків створено тиратронні матричні індикатори, що містять в одному балоні декілька однотипних комірок, а також вбудованих резисторів $R_{ПК}$. Нині випускаються 16-точкові тиратронні матриці ИТМ1 (всі точки зеленого кольору світіння) та ИТМ2 (чотири квадратних поля по чотири різноколірних точки в кожному), сегментний тиратронний індикатор ИТС1, що містить сім елементів відображення для синтезу араб-

ських цифр, і 40-елементний індикатор (формат 5×8) для відображення буквено-цифрової інформації ИВГ-1-5×8Л.

Маркування тиратронів:

- ТГ («тиратрон з газовим наповненням») – тиратрони з розжареним катодом, наповнені інертним газом;
- ТГИ («тиратрон з газовим наповненням, імпульсний») – імпульсні тиратрони, наповнені газом (як правило, воднем);
- ТР («тиратрон ртутний») – ртутні тиратрони з розжареним катодом;
- ТГР («тиратрон газово-ртутний») – тиратрони з розжареним катодом зі змішаним наповненням;
- ТХ, МТХ («тиратрон холодний») – тиратрони тліючого розряду;
- ТПИ – тиратрони з порожнистим катодом;
- ТДИ – тиратрони з дуговою формою розряду.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте вольт-амперну характеристику газового розряду.
2. Який принцип дії знакових індикаторів?
3. Які фактори визначають величину напруги пробою газового проміжку індикаторів?
4. Який принцип дії газорозрядних індикаторних панелей постійного струму?
5. Які конструктивні розходження між плазмовими панелями постійного та змінного струмів?
6. В панелях якого типу вирішується проблема запам'ятовування інформації? Охарактеризуйте її.
7. Який принцип дії та область застосування індикаторних тиратронів?
8. Які конструктивні особливості індикаторного тиратрона ТХ19А?

5 ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ІНДИКАТОРИ

Робота ЕПТ основана на створенні керованого сфокусованого пучка електронів, що впливає на покритий люмінофорною речовиною екран і спричиняє світіння окремих його ділянок. Конструктивні відмінності трубок і специфіка їх використання визначаються способами керування променем, конфігурацією електродів трубки і властивостями люмінофора. З безлічі типів трубок розглянемо ті, які знайшли масове застосування в сучасних дисплеях. Це монохромні і кольорові трубки типу телевізійних (чи аналогічні їм) з електромагнітним відхиленням променя і ЕПТ «прямого бачення» (чи запам'ятовувальні).

Довгий час ЕПТ була єдиним пристроєм, здатним давати якісне зображення при відносно доступній ціні, однак розвиток конкуруючих технологій відтіснив ЕПТ (CRT)-телевізори в нішу товарів економ-класу.

Переваги: На сьогоднішній день – це низька ціна.

Недоліки: великі розміри (глибина) і вага (в той час як LED телевізори при діагоналі в 55 дюймів можуть мати товщину всього 3 см (28 см разом з підставкою) і вагу в 21 кг, ЕПТ-телевізору з діагоналлю 29 дюймів для розміщення потрібно близько 40 ÷ 45 см в глибину, і підставку, здатну витримати вагу в 35 ÷ 50 кг, високе для свого розміру енергоспоживання; геометричні спотворення зображення; чутливість до магнітних полів; мерехтіння екрана, що викликає стомлення очей.

5.1 Монохромні електронно-променевої трубки

На рис. 5.1 подано схематичне зображення монохромної електронно-променевої трубки (ЕПТ) з електростатичним фокусуванням і електромагнітним відхиленням променя.

Трубка являє собою вузький скляний циліндр із розширенням на кінці до прямокутного чи круглого екрана. Всередині циліндра вбудовано набір електродів, що становлять електронно-оптичну систему, на поверхні циліндра розташовано пару котушок відхилення, *КВ*. Вакуумний простір усередині трубки, по якому поширюється пучок електронів, може бути розділений на три ділянки.

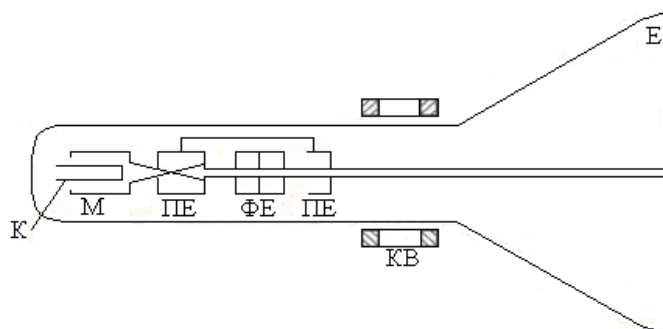


Рисунок 5.1 – Конструкція монохромної електронно-променевої трубки

Перша ділянка містить у собі катод, *К*, покритий оксидною плівкою і випромінюючий електрони при підвищенні його температури за допомогою окремого нагрівача. Електрони емігрують з катода, коли їхня енергія перевищує роботу виходу з верхніх енергетичних рівнів атома: ця енергія залежить як від матеріалу катода, так і від його температури. Звільняючись, електрони мають деяку початкову швидкість (см/с), що визначається за відомою формулою кінетичної теорії газів

$$v = \sqrt{\frac{2kT}{m}},$$

де *k* – стала Больцмана;

T – абсолютна температура, К;

m – маса електрона.

Розташований поблизу катода керівний електрод-модулятор M , виконаний у вигляді циліндра з торцевим отвором, має потенціал негативний відносно катода, тому через нього пролітають лише електрони, що потрапляють в отвір. Цим створюється ніби точкове джерело електронів. Керуючи потенціалом на модуляторі, можна регулювати інтенсивність пучка.

Електрони, що потрапляють наприкінці свого шляху на внутрішню поверхню екрана E з люмінофорним покриттям, мають мати достатню енергію для збудження люмінофора.

Крім того, пляма, що світиться, має бути якомога меншого розміру, щоб забезпечити гарну роздільну здатність зображення. Це потребує відповідного фокусування променя і його прискорення, що забезпечується декількома електродами, які мають певні потенціали відносно катода.

За допомогою певної конфігурації електродів і підбору їхніх потенціалів можна здійснювати різні електронно-оптичні ефекти: фокусування променя, розсіювання, відображення і так далі. Показані на рис. 5.1 електроди, що прискорюють PE і фокусують ΦE , утворюють систему двох електронних лінз – катодної (чи імерсійної) і головної фокусувальної. Хід променів у кінескопі спрощено подано на рис. 5.2.

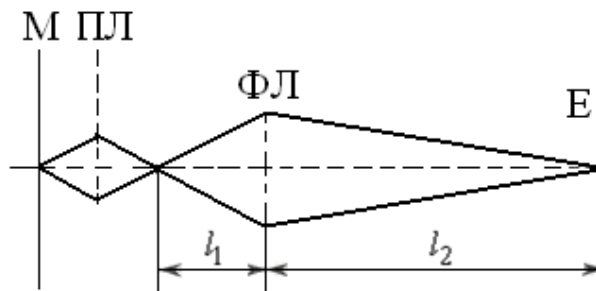


Рисунок 5.2 – Хід електронного променя в кінескопі: М – модулятор; ПЛ – електронна лінза попереднього фокусування; ФЛ – головна фокусувальна лінза; Е – екран

Перша лінза забезпечує фокусувальну дію між модулятором і першим прискорювальним електродом, друга лінза, утворена фокусувальним електродом і другим ПЕ, забезпечує максимальне сходження променя на поверхні екрана. Електроди являють собою циліндри з одною чи декількома діафрагмами, що слугують для затримки пучка електронів, який розсіюється в сторону осі.

Фокусувальний електрод розташований між двома половинами прискорювального, завдяки чому зміни потенціалу на ньому не впливають на роботу модулятора. Це дозволяє здійснювати фокусування променя практично без зміни яскравості. Залежність між діаметром променя в точці перетину ним екрана d_e і напругою фокусувального електрода $U_{\Phi E}$ визначається за виразом:

$$d_e = d_0 \frac{l_1}{l_2} \sqrt{\frac{U_{\Phi E}}{U_{PE}}},$$

де d_0 – діаметр променя в місці першого сходження;

U_{PE} – напруга на прискорювальному електроді.

Усю систему електродів на першій ділянці ЕПТ, що забезпечує формування і підсилення променя, іноді називають електронною гарматою. У деяких кінескопах використовується електромагнітне фокусування променя за допомогою котушки, розміщеної на горловині трубки. Дія магнітного поля на електрони, що рухаються, полягає в тому, що останні завжди прагнуть рухатися уздовж магнітної силової лінії, яка проходить по осі трубки. Електрони, що відхиляються від осі, переміщаючись по спіралі, повертаються у вихідне положення і сходяться в одній точці екрана. Необхідний ступінь фокусування досягається за допомогою керування струмом, що проходить через котушку. Через ряд складностей магнітне фокусування використовується лише в індикаторах з дуже високою роздільною здатністю. На другій ділянці кінескопа розташована система відхилення. Дія системи відхилення полягає в спрямованій зміні прямолінійного шляху електронів і, таким чином, адресації плями, що світиться на площині екрана. Для відхилення пучка електронів може використовуватися як електростатичне поле, так і магнітне. Для створення електростатичного поля усередині трубки встановлюються дві пари електродів, що відхиляють промінь у взаємно перпендикулярних напрямках. Напруги на електродах відхилення мають бути дуже високими, причому тим вищими, чим більша швидкість руху електронів, тобто яскравість плями. Це визначає застосування електростатичного відхилення лише у випадках, що потребують високої точності адресації і швидкості відхилення, наприклад в осцилографії.

При методі електромагнітного відхилення на невеликій ділянці електронного пучка прикладається магнітне поле, яке створюється двома парами котушок, установлених зовні трубки. Одна пара котушок KB зверху і знизу трубки відхиляє промінь у горизонтальному напрямку, інша пара з боків трубки (на рис. 5.1 не показана) відхиляє промінь у вертикальному напрямку. Електрон, що потрапляє в магнітне поле, починає рухатися по дузі і залишає ділянку відхилення під деяким кутом до напрямку початкового руху.

Відзначимо, однак, що електромагнітні системи відхилення забезпечують обмежену швидкість зміни напрямку променя. В основному, це пов'язано з реактивними параметрами котушок. Для збільшення швидкодії необхідно зменшувати число їхніх витків і відповідно збільшувати струми. Керування великими струмами високої частоти з необхідною точністю є складною задачею.

Екран ЕПТ покритий шаром люмінофора. На ньому створюється зо-

браження з необхідною яскравістю, часом післясвітіння і кольором. Причиною світіння є передача енергії від прискорених електронів променя електронам, зв'язаним із кристалом люмінофора, у результаті чого останні переходять у збуджений стан. При їхньому поверненні в нормальний стан надлишкова енергія виділяється у вигляді світла. Цей фізичний ефект називають катодною люмінесценцією. Люмінофори зазвичай складаються із суміші солей кальцію, кадмію, цинку і деяких інших елементів. Найбільш широке застосування знайшли сульфідні люмінофори (сульфіди цинку і цинку-кадмію, активовані сріблом чи міддю). Шляхом зміни складу компонентів можна одержати широкий спектр кольорів випромінювання.

Найбільше поширення в монохромних трубках одержали білий і зелений кольори. Колір люмінофора, як правило, обирають з ергономічних міркувань з урахуванням умов сприйняття операторами.

Час післясвітіння екрана (тобто час, необхідний для спадання яскравості світіння від номінальної до первісної після припинення дії електронного променя) також залежить від складу компонентів, що входять у люмінофор, і може знаходитися в діапазоні від декількох мікросекунд до десятків секунд. Загасання світіння відбувається приблизно за експонентним законом. Вибір типу люмінофора за цим параметром визначається частотою зміни образів, що спостерігаються. Для кожного з люмінофорів може бути визначена та мінімальна частота регенерації зображення, при якій око не сприймає мигтіння. Очевидно, що ця частота обернено пропорційна часу післясвітіння. Однак, якщо частота зміни образів велика, то надлишкове післясвітіння буде викликати «змазаність» зображення. У звичайних телевізійних трубках час післясвітіння становить кілька десятків мілісекунд.

Іншим важливим фізичним явищем, що має враховуватися при використанні ЕПТ, є вторинна електронна емісія. Вона полягає у випускненні вторинних електронів з матеріалу люмінофора при впливі на нього пучка первинних електронів. Із збільшенням інтенсивності пучка кількість емітованих вторинних електронів зростає і при певному рівні енергії світіння люмінофора не збільшується. Таким чином, існує поріг максимальної яскравості світлової плями на екрані, вище якого вона не змінюється зі збільшенням потенціалу прискорювального електрода. Для відведення вторинних електронів на внутрішню поверхню конуса трубки наносять шар графіту, що знаходиться під позитивним потенціалом.

5.2 Кольорові електронно-променеві трубки

Кольорові кінескопи вже багато років застосовуються в телебаченні. Завдяки значному поліпшенню технічних характеристик останнім часом вони стали широко використовуватися й у пристроях відображення інформації, особливо графічних.

Відомо кілька різних конструкцій кольорових ЕПТ, що відрізняються способами генерації кольору, однак найбільш вдалою і широко використовуваною виявилася ЕПТ із тіньовою маскою, у якій застосовано метод діафрагмування електронного променя. Маска поміщена між трьома електронними гарматами і триколірним люмінофором екрана. Вона перешкоджає влученню кожного променя на ділянки люмінофора невідповідного йому кольору. Екран виконаний або у вигляді безлічі точкових тріад, що містять по одній точці на кожний з основних кольорів – червоний, зелений та синій або з тонких вертикальних смужок. Останній спосіб нині став основним, тому що забезпечує кращі експлуатаційні характеристики трубок.

На рис. 5.3 показано схему кольорового кінескопа з дельтаподібним (компланарним) розташуванням електронних гармат.

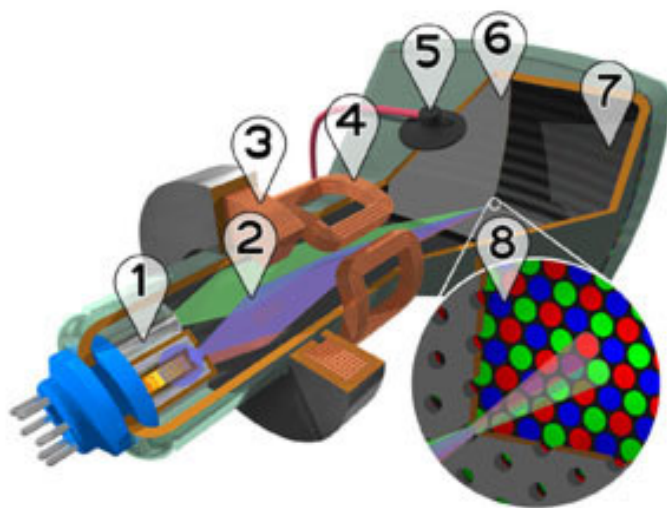


Рисунок 5.3 – Схема кольорового кінескопа з дельтаподібним розташуванням електронних гармат

Електронні промені (2), що випромінюються катодами (електронними гарматами) (1) проходять через магнітне поле фокусувальної котушки та пристрої зведення променів (3). Потім магнітне поле відхиляльних котушок (4) відповідним чином відхиляє промінь по вертикалі і горизонталі. На анод (5) подається висока напруга (до $25 \div 27$ кВ). Прискорені електричним полем анода, електрони проходять через тіньову маску (6), яка слугує для того щоб промінь від відповідної електронної гармати потрапляв тільки на елементи люмінофора (7) відповідного кольору. Під впливом електронного бомбардування люмінофор світиться. Цифрою (8) на рис. 5.3 відзначений збільшений фрагмент тіньової маски і решітки. Оскільки в будь-який окремо взятий момент часу промінь активує тільки один піксел, зображення в цілому будується шляхом розгортки: нескладене зображення ділиться на рядки, і промінь по черзі «промальовує» їх на екрані. При по-

вільному русі в одну сторону промінь «малює» зображення, потім він гаситься і переходить в початок наступного рядка. Аналогічно відбувається і рух променя по вертикалі: коли «промальований» весь кадр, промінь гаситься і переміщається в початок наступного кадру.

Як видно зі схеми, кінескоп з дельтаподібним (компланарним) розташуванням електронних гармат отримав свою назву через те, що осі гармат утворюють рівносторонній трикутник, схожий на грецьку букву «дельта» Δ .

На рис. 5.4 схематично показано розташування електродів, маски й екрана в кольоровій ЕПТ із так званим компланарним розташуванням гармат. У середині трубки гармати зорієнтовані таким чином, що їхні промені, поширюючись в одній площині під деяким кутом один до одного і проходячи через кожний з отворів у масці, потрапляють кожний на смужку люмінофора

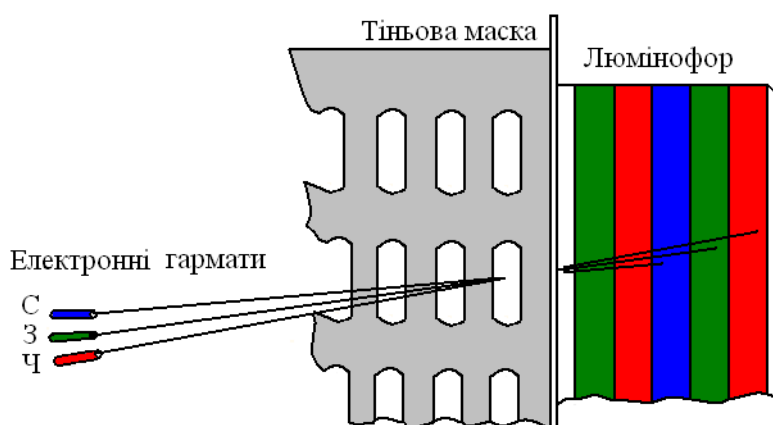


Рисунок 5.4 – Розташування електродів, маски й екрана в кольоровій ЕПТ із компланарним розташуванням гармат (Ч, З, С – червоний, зелений, синій)

Кольорові плями, що збуджені променем, завдяки близькому розташуванню, сприймаються оком як одна пляма деякого похідного кольору. Цей колір залежить від пропорцій основних кольорів. Пропорції можна змінювати, керуючи напругою модулятора незалежно в кожній з гармат. Відхилення всіх трьох променів здійснюється за допомогою загальної обмотки, розміщеної на горловині трубки. Кольорові ЕПТ значно складніші у виготовленні, ніж монохромні. Вони потребують дуже точного установлення елементів у процесі виробництва, а також додаткових регулювальних електронних вузлів у зовнішній схемі керування індикатором. Роздільна здатність кольорових ЕПТ обмежена кількістю отворів у масці і для телевізійних кінескопів становить приблизно 400 помітних ліній у кожному з напрямків екрана. В останні роки спеціально для графічних дисплеїв розроблено кольорові ЕПТ із роздільною здатністю у 1000 рядків і вище, однак застосування їх обмежене високою вартістю.

Інший варіант – це так зване планарне розміщення гармат – їх осі лежать в одній площині. Відповідно їх маски мають іншу будову, як показано на рисунках – по центру і справа. Стрілками позначений крок пікселя (рис. 5.5).

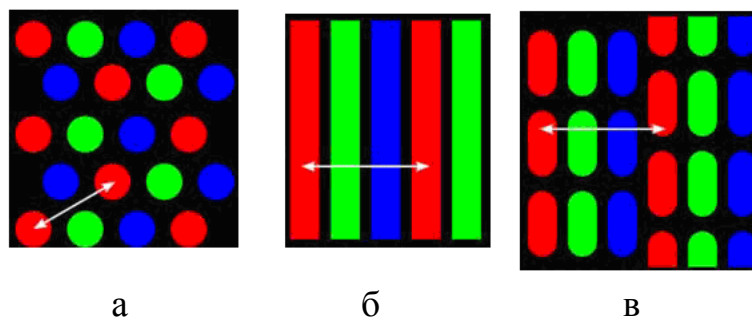


Рисунок 5.5 – Конструкції масок при планарному та компланарному розташуванні гармат: а – тіньова маска; б – апертурна ґратка; в – щілинна маска

Зазвичай, в ефірному мовленні використовується так зване *черезрядкове розгортання*: це значить, що промінь спочатку «малює» всі непарні рядки, а потім всі парні. Це було зроблено для того, щоб підвищити частоту мерехтіння екрана і зробити його менш помітним. В результаті замість 25 цілих кадрів в секунду передається 50 півкадрів – полів.

Оскільки час післясвітіння люмінофора становить близько 1 мс, а поле «малюється» $1000/50=20$ мс, то насправді в будь-який момент часу на екрані є лише вузька смужка зображення, що «біжить» зверху вниз. Людина бачить ціле зображення завдяки тому, що нервова система «запам'ятовує» окремі частини. Проте сам процес періодичного «пробігання» світної смуги сприймається як мерехтіння, більш помітне на телевизорах з великою (для ЕПТ) діагоналлю – 25 дюймів і більше. Особливо ж помітно мерехтіння якщо в магазині одночасно працюють кілька телевизорів, які показують один і той самий канал. Для зниження стомлювального впливу мерехтіння використовують *подвоєння частоти розгортки* до 100 Гц.

Складність конструкції тригарматних ЕПТ привела до пошуків інших методів реалізації кольорових зображень на екрані. Найбільшу популярність одержали два типи трубок: тринітрон та елмітрон. У ЕПТ типу «тринітрон» всі електронні промені генеруються за допомогою однієї гармати. Вона має три незалежних катоди і модулятори: два бічних і один центральний. Бічні промені відхиляються електронними призмами так, що забезпечується перетин їх у центрі загальної електронної лінзи, яка здійснює фокусування променів.

В обох з описаних типів трубок гранична роздільна здатність визначається кількістю і розмірами отворів у масці. Тому інтерес становляють кольорові трубки типу «елмітрон», у яких маски не використовуються, а колір світіння люмінофора залежить від глибини проникнення електронного

променя і, отже, від енергії останнього. У відомих конструкціях екран покритий двома шарами люмінофора, кожний з яких має свій колір світіння. При малій енергії променя (низькій напрузі прискорення) світиться лише перший шар люмінофора. При підвищенні напруги промінь проникає глибше і виникає світіння другого шару люмінофора. Як і в монохромних ЕПТ, роздільна здатність тут, в основному, визначається розмірами світлової плями і може бути високою. Недоліком є те, що в схемі керування індикатором має бути передбачений швидкодійний високовольний перемикач. З метою уникнення цього іноді використовуються двогарматні ЕПТ. Трубки типу «елмітрон» використовуються в техніці відображення, коли необхідно одержати високу роздільну здатність при обмеженому кольоровому діапазоні.

5.3 Запам'ятовувальні електронно-променеві трубки

Запам'ятовувальні ЕПТ, чи ЕПТ «прямого бачення», використовуються для перетворення сигналів, що одноразово подаються на систему відхилення, у видиме зображення, яке зберігається на екрані протягом тривалого часу. У таких трубках керований електронний промінь не впливає безпосередньо на люмінофор екрана, що має невеликий час післясвітіння, а створює «потенційний рельєф» зображення на спеціальній плоскій мішені, розташованій усередині трубки. Конструкція запам'ятовувальної ЕПТ схематично подана на рис. 5.6.

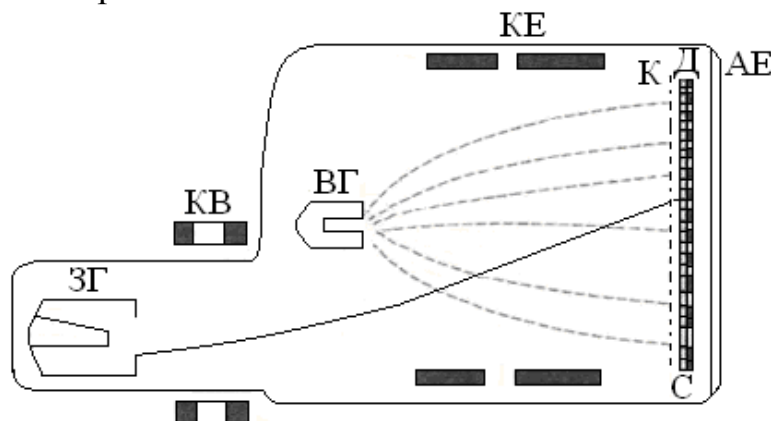


Рисунок 5.6 – Схематичне зображення конструкції запам'ятовувальної трубки: ЗГ – записувальна гармата; ВГ – відтворювальна гармата; КВ – котушки відхилення; К – колекторна сітка; С – сітка мішені; Д – діелектрик; КЕ – кільцеві електроди; АЕ – алюмініований екран

Запам'ятовувальна поверхня складається з тонкої металевої сітки, на яку з боку екрана осаджено шар діелектрика. Усередині колби розміщені дві електронні гармати: записуюча, яка формує модульований і адресований системою відхилення високоенергетичний потік електронів, і відтво-

рувальна, у якій створюється інтенсивний розбіжний потік електронів з невисокою енергією. Спеціальні кільцеві електроди розташовані на стінках трубки і знаходяться під певним потенціалом, створюють електростатичне поле, завдяки якому повільні електрони рухаються перпендикулярно до мішені, рівномірно розподіляючись по її поверхні.

Цикли запису інформації і її відображення на екрані розділені в часі. При первісному включенні ЕПТ електрони від відтворювальної гармати, потрапляючи на мішень, за невеликий час установлюють на ній потенціал, що дорівнює потенціалу катода.

Це пов'язано з тим, що при малій швидкості опромінювального потоку коефіцієнт вторинної емісії менший одиниці, тобто запам'ятовувальна поверхня випускає менше електронів, ніж одержує. Записувальна гармата, що працює так само, як і в звичайній трубці, створює прискорений вузький пучок електронів, енергія яких забезпечує вторинну емісію з коефіцієнтом, значно більшим одиниці. Тому із рухом променя ділянки мішені заряджаються позитивно до різних рівнів, відповідно до енергії модульованого променя.

Отриманий на поверхні мішені «потенційний рельєф», що відповідає відображуваній інформації, зберігається тривалий час (10 ÷ 15 хв) і забезпечує різні умови для проходження в бік екрана повільних електронів, генерованих відтворювальною гарматою. Ті частини сітки, що залишилися зарядженими негативно, відштовхують електрони, через позитивні ж ділянки вони проходять вільніше і потрапляють на люмінофор. Енергія електронів, які оминають мішень, збільшується за рахунок високого позитивного (відносно катода) потенціалу, поданого на поверхню екрана, покриту алюмінієм, що забезпечує необхідну яскравість зображення.

Оскільки електрони від відтворювальної гармати мають малу енергію, вони незначно впливають на накопичувальну поверхню, дозволяючи довго зберігати незмінним розподіл зарядів на ній. Для зняття зарядів достатньо на короткий час подати на сітку позитивний імпульс. Електрони від відтворювальної гармати спрямовуються до мішені, знижуючи її потенціал до напруги катода і вирівнюючи «рельєф». Зображення при цьому стирається і трубка готова до нового циклу запису.

Основною перевагою запам'ятовувальних ЕПТ є простота індикаторів, створених на їх базі (немає необхідності у вузлах регенерації зображення), відсутність мерехтіння і висока яскравість. Роздільна здатність екрана у них також висока та визначається розміром і кількістю отворів у сітці мішені. Однак, важливим недоліком індикаторів на запам'ятовувальних трубках, що обмежує їхнє використання в багатьох галузях, є неможливість вибіркового стирання інформації, а отже, інтерактивного режиму роботи з ЕОМ. Застосовуються вони як пристрій виведення графічних даних з машини й у радіолокаційних системах.

Контрольні запитання

1. Який фізичний ефект слугує основою принципу дії монохромних ЕПТ? Охарактеризуйте принцип дії монохромних ЕПТ.
2. В який спосіб здійснюється фокусування та відхилення електронного променя в монохромних ЕПТ?
3. З якою метою на внутрішню поверхню конуса трубки монохромних ЕПТ наносять шар графіту?
4. Як впливає потенціал модулятора на інтенсивність електронного променя?
5. З якою метою в кольорових ЕПТ використовують маски?
6. Яке призначення трубок «тринітрон» та «елмітрон»?
7. Який принцип роботи ЕПТ «прямого бачення»?

6 СВІТЛОДІОДИ

6.1 Фізичні основи роботи

Напівпровідникові індикатори широко використовуються для відображення знакової інформації при відносно невеликих розмірах символу і обмеженій кількості знакомісць. Ці прилади характеризуються великою надійністю, низьким рівнем напруг керування і великою швидкістю перемикавання.

Перші напівпровідникові світловипромінювальні прилади (на основі карбїду кремнію) були створені радянським вченим О. В. Лосєвим в 1922 р., який також був засновником сучасних уявлень про механізми випромінювання (електролюмінісценції) і можливих використань світловипромінювальних *p-n* переходів. Принцип дії світлодіодів базується на явищі електролюмінісценції при протіканні струму в структурах з *p-n* переходом.

Розрізняють електролюмінісценції:

- а) інжекційну, що виникає при проходженні струму через прямозміщений *p-n* перехід (ефект Лосєва),
- б) передпробійну, що з'являється при накладанні на шар електролюмінофора сильного електричного поля (ефект Дестрію). На першому із цих ефектів базується дія напівпровідникових індикаторів, на другому – електролюмінісцентних індикаторів.

Світлодіоди виконують функції, протилежні функціям фотоприймачів, тобто ефективно перетворюють електричну енергію в світлову. Когерентне монохромне або спонтанне випромінювання (люмінісценцію) в напівпровіднику можна отримати шляхом таких методів збудження: оптичним збудженням, впливом на напівпровідник променем швидких електронів з високою енергією, збудженням напівпровідникових матеріалів імпульсами електричного поля (ударною іонізацією).

На практиці найбільш поширеним методом є збудження при інжекції носіїв через p - n перехід. Розглянемо інжекційне збудження на прикладі p - i - n переходу (рис. 6.1).

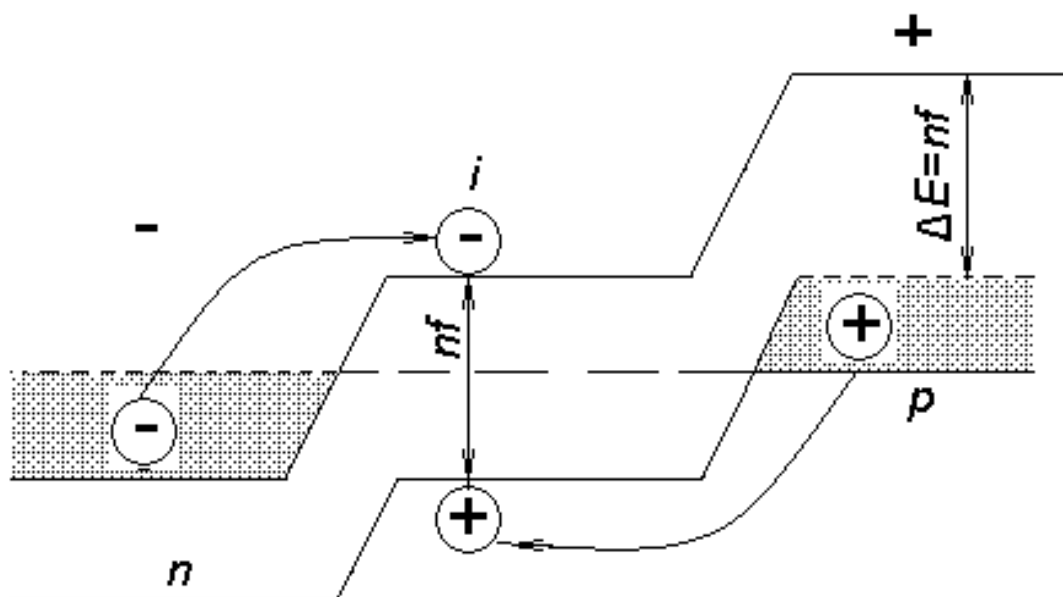


Рисунок 6.1– Розташування енергетичних зон та рівня Фермі світлодіода з p - i - n переходом

В ідеальному напівпровіднику при температурі абсолютного нуля валентна зона повністю занята електронами, а зона провідності повністю вільна, і напівпровідник є ізолятором. При температурі вищій абсолютного нуля за рахунок теплового збудження частина валентних електронів переходить в зону провідності; у валентній зоні при цьому виникають вільні місця – дірки.

Термодинамічна рівновага характеризується наявністю рівноважної концентрації основних носіїв – дірок та електронів – відповідно в областях p та n , які можуть рекомбінувати з носіями протилежного знаку і у випадку інжекції останніх ззовні.

Якщо прикласти до переходу типу p - i - n напругу в прямому напрямку, то у зоні i з'являються носії обох знаків. При рекомбінації цих носіїв енергія від зовнішнього джерела напруги передається ґратці напівпровідника у вигляді теплової або виділяється у вигляді світлової енергії. Потенціальний бар'єр між областями p та n знижується, і електрони із області n дифундують в область об'ємного заряду (зона i на рис. 6.1) та в область p , створюючи там надлишкову (нерівноважну) концентрацію.

Аналогічно виникає надлишкова концентрація дірок в області n і шарі об'ємного заряду. На рис. 6.2 на прикладі зоно-домішкової структури напівпровідника подано основні явища при рекомбінації.

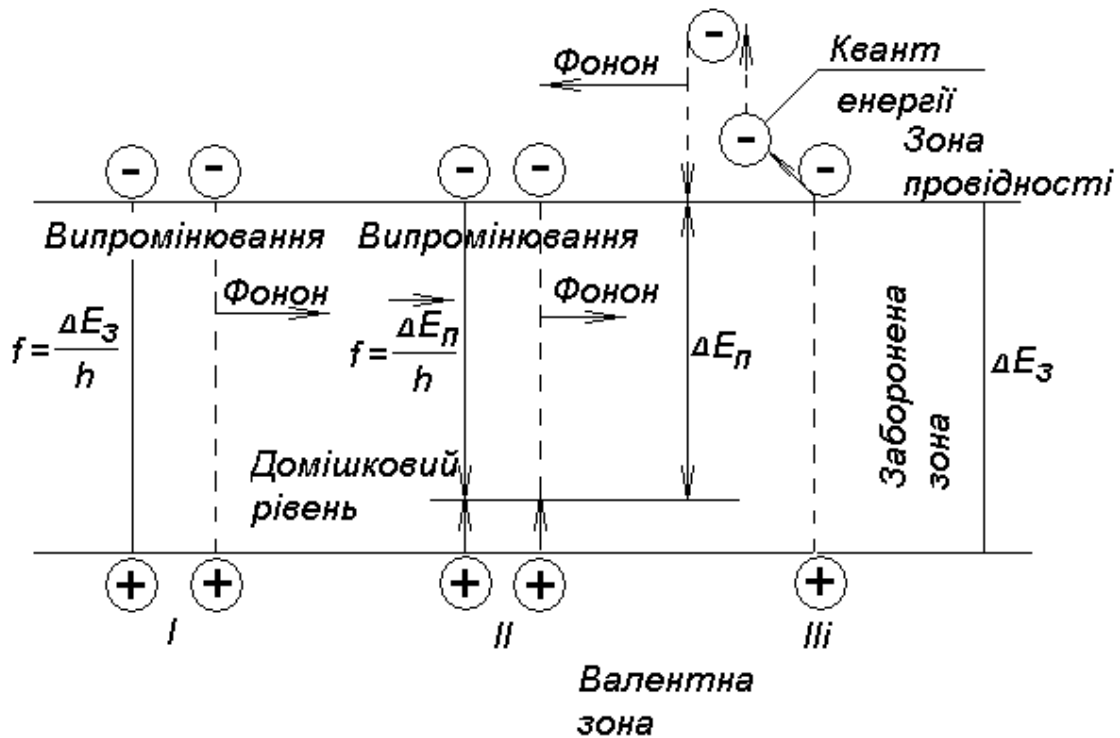


Рисунок 6.2 – Механізм рекомбінації в моделі зон напівпровідника:
 I – переходи типу зона-зона; II – зонно-домішковий рівень;
 III – перехід зі збудженням електрона в зоні провідності;
 (суцільна лінія – випромінювальні переходи;
 пунктирна лінія – невипромінювальні переходи)

Якщо електрон або дірка переходять із одної зони в іншу, рекомбінація називається міжзонною, або власною (I). У другому випадку (II) перехід здійснюється через домішковий рівень. Така рекомбінація називається домішковою. Можливий і третій випадок рекомбінації (III). У результаті міжзонної або домішкової рекомбінації при зникненні пари (електрон та дірка) виділяється енергія, що визначається у першому випадку шириною забороненої зони ΔE_z , а у другому – шириною ΔE_p від зони провідності до домішкового рівня. Енергія може виділятися у вигляді світлового кванту ($f = \Delta E / h$) або передаватися у вигляді тепла (фонона) кристалічній ґратці. У третьому випадку енергія пари, що рекомбінує, передається третьому вільному носію струму, який в подальшому віддає отриману енергію у вигляді фонона. Переходи з виділенням світлових квантів називають випромінювальними, а у випадку виділення фононів – безвипромінювальними.

Найкращі властивості для випромінювальної рекомбінації має арсенід галію GaAs. Залежно від числа інжекттованих носіїв відносно стану термодинамічної рівноваги в зоні провідності збільшується, а у валентній зоні зменшується рівень заселеності допустимих станів. При малому рівні інжекції це відхилення може призвести до спонтанних переходів, тобто до люмінесценції, а при великій інжекції – після досягнення інверсії заселе-

ності – до лазерного ефекту (інтенсивного, когерентного, монохромного світіння з малим кутом розбіжності променя).

Для отримання високої світлової ефективності напівпровідникових індикаторів необхідно, щоб основна частка енергії, яка звільняється при рекомбінації, витрачалась на випромінювання. Ймовірність випромінювальної рекомбінації, насамперед, пов'язана із специфічною формою зонної діаграми напівпровідника.

6. 2 Електрофізичні характеристики

Вольт-амперна характеристика прямозмщеного діода визначається рівнянням

$$I_a = A \exp\left[\frac{eU_a}{kT}\right] + B \exp\left[\frac{eU_a}{2kT}\right], \quad (6.1)$$

де A і B – сталі;

e – заряд електрона ;

k – стала Больцмана;

T – температура, К;

U_a – напруга на p - n переході.

Перша складова в (6.1) – дифузійний струм I_δ , а друга складова – рекомбінаційний струм I_p у збідненій області p - n -переходу. Так, останній обумовлений рекомбінацією на глибоких рівнях, тому він і не впливає на випромінювальні процеси. А випромінювальні процеси пропорційні тільки дифузійному струму, тобто яскравість випромінювання визначається за виразом

$$I_v \sim I_\delta^2. \quad (6.2)$$

Рівняння (6.1), використовуючи ряд перетворень, можна подати у вигляді

$$I_a = I_\delta + \frac{B}{A} \sqrt{I_\delta}. \quad (6.3)$$

Звідси, для області малих напруг, де переважає рекомбінаційний струм

$$I_v \sim I_a^2, \quad (6.4)$$

а для проміжних і великих струмів, де переважає дифузійний струм

$$I_v \sim I_a. \quad (6.5)$$

Спектральні характеристики люмінесцентних світлодіодів. Розглянемо фактори, що визначають спектральний склад випромінювання *p-n* переходу. Відомо, що довжина хвилі λ рекомбінаційного випромінювання пов'язана з шириною забороненої зони E_g формулою:

$$\lambda = \frac{ch}{E_g} = \frac{1238}{E_g}, \quad (6.6)$$

де c – швидкість світла;

λ – довжина хвилі, нм;

E_g – ширина забороненої зони, еВ.

Оскільки довгохвильовий поріг чутливості ока відповідає $\lambda = 700$ нм, то мінімальна ширина забороненої зони в напівпровідникових індикаторах за формулою (6.6) має приблизно дорівнювати 1,7 еВ. Такі матеріали IV групи як германій або кремній мають малу ширину забороненої зони E_g (германій – 0,7 еВ і кремній – 1,1 еВ). Оскільки відповідна довжина хвилі рекомбінаційного випромінювання лежить в інфрачервоній області спектра, то такі матеріали не можна використовувати для індикації.

Для створення індикаторів широко використовуються тверді розчини потрійних сполук III–V груп періодичної системи $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Змінюючи значення x , можна регулювати E_g і отримувати матеріали з різноманітним кольором світіння.

Практично можна використати прямозонний напівпровідник з $x=0,4$, $E_g=1,8$ еВ і довжиною хвилі $\lambda = 687\text{нм}$, що припадають на червону частину спектра. Для непрямозонних сполучень $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ можливе збільшення x до одиниці з одночасним зсувом λ в сторону зеленої частини спектра.

При $x=1$ $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ перетворюється на фосфід галію GaP. При легуванні N в ньому виникає зелена люмінесценція, при легуванні Zn, O – червона.

Спектральні характеристики світлодіодів залежать від робочого діапазону температур. Наприклад: спектр світлодіода на основі GaAs, легованого Zn та Fe, при кімнатній температурі має максимальну довжину хвилі $\lambda_{\text{max}} = 0,91\text{мкм}$. При підвищенні температури λ_{max} збільшується, а при зниженні – зменшується. Зміна λ_{max} становить приблизно 0,3 нм/К.

Спектральні характеристики світлодіодів залежать також від густини струму в *p-n* переході. При малих густинах вільних носіїв в зонах випромінювальна рекомбінація мало ймовірна. Підвищення концентрації носіїв збільшує інтенсивність рекомбінаційного випромінювання.

Важливою характеристикою напівпровідникових індикаторів є зовнішній квантовий вихід (світлова ефективність).

Світлова ефективність – відношення світлового потоку, створеного індикатором, до підведеної потужності (одиниця вимірювання лм/Вт).

Для оптико-електронних приладів зовнішній квантовий вихід менший за внутрішній, що обумовлено поглинанням генерованого в p - n переході випромінювання як в товщині напівпровідника, так і в контактах, а також втратами на відбивання на межі напівпровідник-середовище, в яке виходить випромінювання.

Інжекційні світлодіоди, як правило, є точковими джерелами випромінювання. Діаграма направленості випромінювання у них істотно залежить від конструкції та оптичних властивостей матеріалів p та n типів. Найбільш високий зовнішній квантовий вихід при кімнатній температурі мають вітчизняні світлодіоди із GaAs. При струмі 100 мА потужність їх випромінювання становить 21 мВт, що відповідає зовнішньому квантовому виходу 16%. Якщо контакти для них виготовлені із золота та титану, то термін їх роботи – 20000 год (за період роботи потужність випромінювання при заданому струмі зменшується вдвічі порівняно з початковим).

Таким чином, залежно від конструкції і використаного матеріалу світлола ефективність напівпровідникових індикаторів змінюється від сотих часток до одиниць люмен на ват.

6.3 Корпуси світлодіодів малої та великої потужності

До складу корпусів світлодіодів обов'язково входять два електричних виводи та оптично прозоре вікно для виведення випромінювання. Корпуси для потужних світлодіодів, як правило, також мають тепловідвід для розсіювання залишків тепла. Матеріалам для вікон корпусу мають бути характерні такі властивості: оптична прозорість, високий показник заломлення, хімічна інертність, стабільність при високій температурі та герметичність. Монтаж кристала у корпус з вікном, показник заломлення якого знаходиться між повітрям та напівпровідником, збільшує ефективність виведення випромінювання. Більшість корпусів світлодіодів виготовляється з полімерів з показниками заломлення у діапазоні від 1,5 до 1,8. Зменшення різниці показників заломлення на поверхні напівпровідника збільшує кут повного внутрішнього відбиття, що розширює конус виводу випромінювання та збільшує ефективність виведення випромінювання.

На рис. 6.3, а показано варіант корпусу *малопотужного світлодіода*. Кристал світлодіода закріплюється виводами вверху, приклеюється або припаюється на дні чашкоподібного заглиблення (чашки відбивача), що з'єднаний з одним з електричних контактів (зазвичай з катодом). Провід до верхнього контакту світлодіода з'єднується з другим виводом (анодом). Такий корпус часто називають корпусом T1-3/4 або 5 мм-корпусом.

У малопотужних світлодіодах корпуси, як правило, мають форму півсфер, як показано на рис. 6.3, а. Тому проміні вихідного світла завжди потрапляють на межу розділу корпус–повітря під прямими кутами. Таким чином, на цій межі розділу не виникає повне внутрішнє відбиття. Існують і несферичні типи корпусів, наприклад прямокутні й циліндричні з плоскими верхніми поверхнями (рис. 6.3, б).

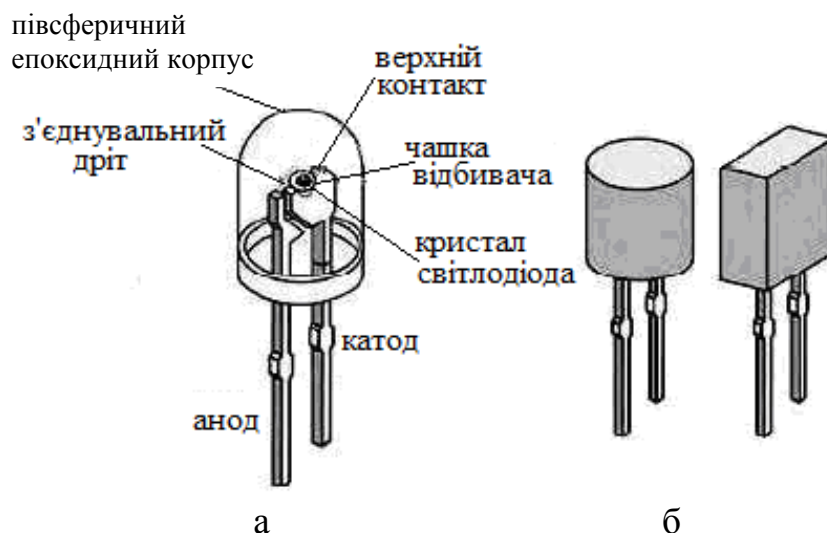


Рисунок 6.3 – Типові корпуси світлодіодів: а – світлодіод у півсферичному корпусі; б – світлодіоди у циліндричному та прямокутному корпусах

Плоскі поверхні застосовують, якщо світлодіоди мають бути врівень з поверхнею пристрою, в який вони вбудовуються, або якщо на них будуть дивитись тільки під кутами, близькими до прямих. Корпуси мають захищати світлодіоди від небажаних механічних дій, вологості та хімічних реагентів. Корпуси скріплюють конструкцію, що складається з анодних та катодних виводів, кристала світлодіода та з'єднувальних проводів.

На рис. 6.4 показано *корпус потужного світлодіода*. Корпуси для потужних СД, як правило, відводять тепло від кристала світлодіода до радіатора. Такий шлях може забезпечувати спеціально виготовлена друкована плата. Корпус, що показаний на рис. 6.4, має три характерні особливості.

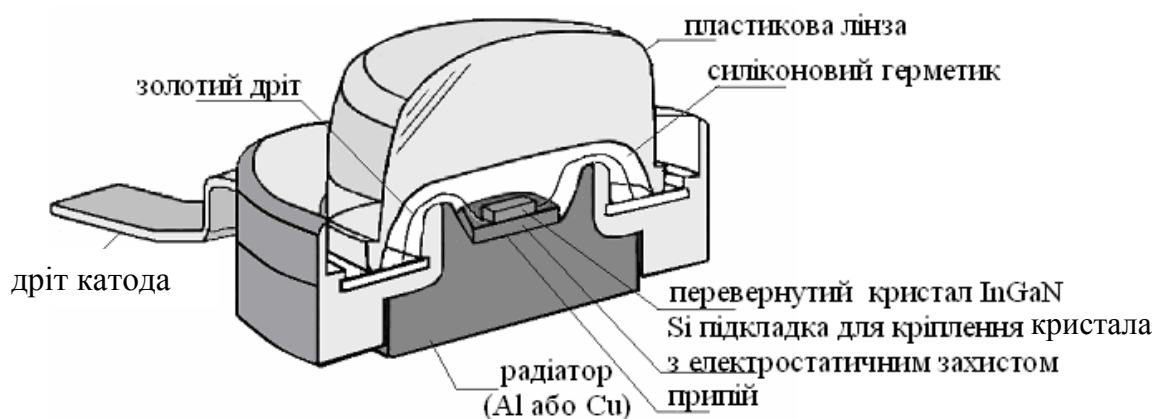


Рисунок 6.4 – Поперечний переріз корпусу потужного світлодіода

По-перше, до його складу входить алюмінієвий або мідний радіатор з низьким тепловим опором, до якого за допомогою припою, що містить метал, закріплюється кристал світлодіода. По-друге, кристал світлодіода гер-

метизується силіконом, що забезпечує відсутність механічних напружень під час експлуатації. На силікон наноситься пластикове покриття, яке відіграє роль лінзи. По-третє, кремнієва підкладка, на яку закріплюється світлодіод, забезпечує конструкції захист від електростатичних розрядів. Для ефективного тепловідведення радіатор може припаюватись до спеціальної друкованої плати.

Світлодіоди видимого спектра. Спочатку світлодіоди застосовували там, де не потребувалося високої яскравості світіння, наприклад як індикаторні лампи. Їх використовували якщо ефективність та загальна оптична потужність не були параметрами першочергової важливості. Для інших застосувань, наприклад у світлофорах, де випромінювання світлодіода мало бути видно з великої відстані навіть в яскравий сонячний день. В таких випадках потрібні світлодіоди, що мають високу ефективність та яскравість. Там, де не потрібна висока яскравість, можуть використовуватись світлодіоди на основі GaAsP та GaAsP:N, що леговані азотом. Світлодіоди на основі AlGaAs застосовують у тих випадках, коли необхідна як низька, так і висока яскравість. У пристроях підвищеної яскравості використовуються світлодіоди на основі AlInGaP та InGaN.

Світлодіоди на основі твердих розчинів GaAsP, GaP, GaAsP:N і GaP:N. Тверді розчини GaAs_{1-x}P_x, GaAs_{1-x}P:N застосовують у пристроях, що випромінюють у червоній, оранжевій, жовтій та зеленій областях видимого спектра. Оскільки шари GaAsP й підкладки з GaAs мають різні параметри кристалічних ґраток, світлодіоди на їх основі мають порівняно низький внутрішній квантовий вихід випромінювання. Вони застосовуються тільки там, де не потрібна висока яскравість світіння.

Одні з перших світлодіодів видимого спектра були створені на основі твердого розчину GaAs_{1-x}P_x. Великою проблемою світлодіодів на основі GaAsP є неузгодження параметрів ґраток підкладок GaAs та епітаксіальних шарів GaAsP. Вони різняться майже на 3,6%, тому при товщині шару GaAsP на підкладці GaAs, більшої за деяку критичну, виникають дислокації невідповідності. При збільшенні концентрації фосфору у твердому розчині GaAsP ефективність люмінесценції значно знижується. Тому світлодіоди GaAsP мають невисоку яскравість світіння.

Світлодіоди на основі AlGaAs/GaAs. У 70-х роках були розроблені гетероструктури Al_xGa_{1-x}As/GaAs, а на початку 80-х років на їх основі були реалізовані перші світлодіоди з високою яскравістю світіння. Оскільки алюміній та галій мають близькі атомні радіуси (1,82Å и 1,81Å), система Al_xGa_{1-x}As (або просто AlGaAs) залишається узгодженою за параметрами ґратки з підкладкою GaAs в усьому діапазоні зміни молярної частки алюмінію у трикомпонентному складі. Систему AlGaAs можна використовувати для виготовлення над'яскравих світлодіодів червоного світіння.

Надійність світлодіодів на основі AlGaAs завжди нижча, ніж на основі AlInGaP без шарів AlGaAs. Високий вміст алюмінію у шарах AlGaAs є

причиною їх окислення та корозії, що значно знижує строк служби пристроїв, в яких вони застосовуються. Для запобігання процесів окислення та гідролізу шарів AlGaAs необхідно використовувати герметичні корпуси.

Світлодіоди на основі AlInGaP/GaAs. Тверді розчини AlInGaP були розроблені в кінці 80-х та – початку 90-х років; в наш час вони є основою для виготовлення над'яскравих світлодіодів, які випромінюють у довгохвильовій частині видимого спектра.

Твердий розчин AlInGaAs підходить для створення над'яскравих світлодіодів, що випромінюють у червоному, оранжевому та жовтому діапазонах видимого спектра.

Світлодіоди на основі InGaN. Твердий розчин InGaN з'явився на початку 90-х років, а у другій половині 90-х років на його основі уже були створені промислові світлодіоди, що випромінюють у синьому та зеленому діапазонах спектра. Зараз світлодіоди на основі InGaN – основні над'яскраві світлодіоди синього та зеленого світіння.

Світлодіоди на основі AlInGaP. Світлодіоди на основі AlInGaP темно-жовтого та оранжевого світіння мають високу світлову віддачу, що частково пояснюється високою чутливістю людського ока у цьому діапазоні довжин хвиль. Через те, що максимальна чутливість ока відповідає довжині хвилі 555 нм, світлодіоди, які випромінюють зелене світло на цій хвилі, здаються яскравішими світлодіодів такої ж оптичної потужності, але працюючих у другому спектральному діапазоні.

Оскільки світлодіоди темно-жовтого світіння на основі AlInGaP мають високі значення світлової віддачі та недорогі у виробництві (порівняно зі світлодіодами зеленого світіння на основі InGaN), вони використовуються у пристроях, де потрібна висока яскравість та низька потужність споживання, наприклад у системах освітлення дорожніх знаків.

Контрольні запитання

1. Які різновиди електролюмінесценції Вам відомі?
2. На якому фізичному явищі базується принцип дії напівпровідникових індикаторів?
3. Які галузі застосування світлодіодів?
4. Охарактеризуйте принцип роботи світлодіодів на прикладі *p-i-n*-переходу.
5. Які існують механізми рекомбінації в моделі зон напівпровідника?
6. Які матеріали використовуються для виготовлення світлодіодів ?
7. Які фактори визначають спектральний склад випромінювання *p-n* переходу ?
8. Розкрийте суть терміна «зовнішній квантовий вихід».

7 ВЕЛИКІ ЕКРАНИ

Для відображення інформації, що використовується одночасно групою людей, застосовують екрани великих форматів з робочою поверхнею від одного до десятка квадратних метрів. Перетворення інформації, яка виводиться на великий екран, базується на найрізноманітніших принципах. Багато відомих пристроїв працює з проміжним носієм інформації: фотоплівкою, фотонапівпровідниковою пластиною, термопластичним матеріалом тощо. Отримане на такому носії зображення проектується за допомогою оптичної системи на екран.

На сьогодні широко ведуться роботи із створення принципово нових, зокрема й лазерних, пристроїв відображення, що працюють або за телевізійним стандартом, або за спільномірною швидкістю поновлення даних.

Проекційні ЕПТ вже давно відомі і в останні роки значно удосконалені. Основні вимоги до таких трубок – підвищена яскравість при малих габаритних розмірах. Це досягається використанням люмінофорів з високою світловіддачею та збільшенням анодної напруги (до 40÷80 кВ). При відносно невеликих розмірах трубки з її поверхні вдається отримати світловий потік близько 1000 лм. Трубка входить до складу проекційної системи, що працює на відображення і складається із сферичного дзеркала та корегувальної лінзи. На базі такої трубки будуються системи з розміром екрана до 3×3 м.

Недоліки: необхідність використання примусового охолодження трубки через велику потужність електронного променя та спеціальний захист від рентгенівського випромінювання. Другим недоліком є чутливість до рівня зовнішнього засвічування екрана, що обмежує галузь використання таких пристроїв.

7.1 Світлоклапанні електронно-променеві трубки

Ці проекційні системи забезпечують кращу якість зображення в умовах засвічування та великі розміри екрана, хоча і складніші за конструкцією, ніж системи з проекційними ЕПТ. Під загальним терміном «світлоклапанні» об'єднано всі пристрої, які модулюють світло зовнішнього джерела, змінюючи параметри середовища, яке його пропускає. Реальний масштаб часу забезпечується завдяки використанню для модуляції керівного електронного променя. Найбільш поширеними є пристрої, в яких змінюваним середовищем є тонка масляна плівка з певними оптичними і електричними характеристиками. Принцип роботи світлоклапанного пристрою в спрощеному варіанті подано на рис. 7.1.

Світло від потужного джерела з лінзовою оптикою 1, яка забезпечує рівномірність потоку, потрапляє на щілинне дзеркало 2 і відбивається ним на сферичне дзеркало 6, що покрите масляною плівкою 7. Дзеркало зорієн-

товане таким чином, що при гладенькій плівці світло, відбиваючись, повертається в напрямку до джерела, а екран 4 залишається незасвіченим.

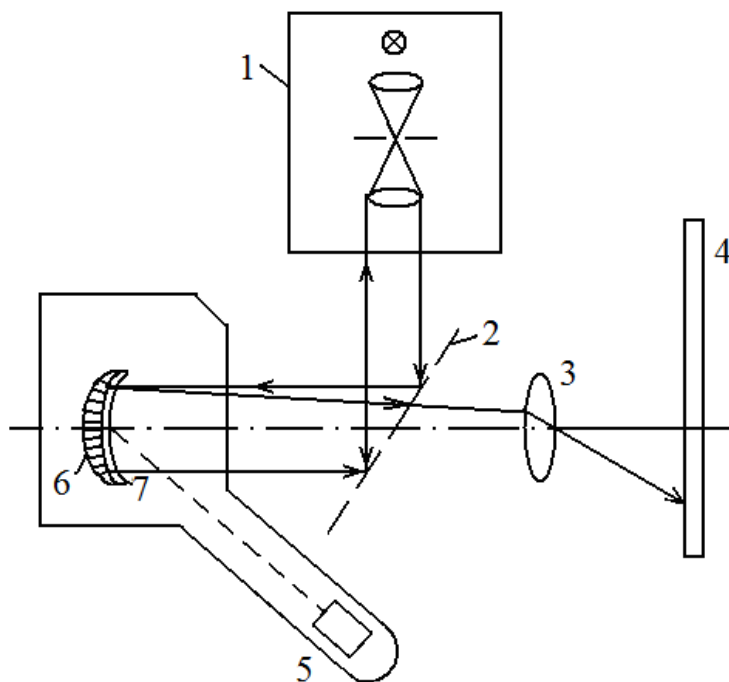


Рисунок 7.1 – Спрощена схема розташування елементів світлоклапанного пристрою

Деформація плівки в будь-якій точці викликає відхилення відбитого від неї променя, який, проходячи через щілину дзеркала 2, попадає за допомогою проєкційної оптики 3 в певну точку екрана. Яскравість світіння плями на екрані визначається ступенем деформації плівки, яка залежить від величини заряду, встановленого на її поверхні електронним променем. При знятті заряду плівка досить швидко повертається до вихідного стану. Швидкість процесу деформації і відновлення залежить від в'язкості плівки і температури. Електронна гармата 5, що генерує електронний промінь, замкнена в загальну із сферичним дзеркалом скляну оболонку, в якій підтримується вакуум. Промінь фокусується, відхиляється електромагнітною системою і модулюється за потужністю аналогічно, як це відбувається у звичайних ЕПТ. Відображення інформації здійснюється растровим способом за телевізійним стандартом. В деяких пристроях досягається і більш висока роздільна здатність (до 1000 рядків).

Використовуючи ксенонові джерела світла, можна отримати світлові потоки, що перевищують 7000 лм. Площа поверхні екрана може досягати декількох десятків квадратних метрів.

Для підтримання роботоздатності описаного пристрою застосовують ряд заходів, що ускладнюють його конструкцію, адже необхідно підтримувати постійний хімічний склад і температуру плівки, видаляючи домішки і

залишкові заряди, забезпечувати роботоздатність катода тощо. Але, не дивлячись на це, системи цього типу знайшли досить широке використання.

Перспективною конструкцією проєкційних систем є системи безвакуумного типу, де як світлоклапанні елементи використовуються деформовані під впливом прикладеного електростатичного поля тонкі шари спеціального діелектричного матеріалу, нанесеного на світловідбивальну металізовану поверхню. Для створення зарядів, розподілених відповідно до зображення, використовується фотопровідний шар, що безпосередньо прилягає до діелектрика. Експонування фотопровідного шару здійснюється будь-яким джерелом світлового зображення.

7.2 Лазерні засоби відображення інформації

Лазерні засоби відображення на великий екран знаходяться на стадії експерименту. До переваг таких пристроїв відносять: високу роздільну здатність, швидкодію, можливість кольорових зображень, відсутність необхідності в проміжних носіях. Це дозволяє вважати їх найбільш перспективними із усіх використовуваних засобів колективного користування. Лазери, що використовуються з цією метою, мають безперервний режим роботи зі стабільною вихідною потужністю. До них відносять звичайні кріптоніві іонні лазери, що випромінюють червоне світло, а також аргоніві, що випромінюють синій або зелений колір.

Найбільш розвинутими є методи, при яких зображення створюється безпосередньо променями лазера, що направлені на екран. Для цього має бути забезпечена амплітудна модуляція променя і його відхилення для створення растрової системи, аналогічної телевізійній.

В спрощеному вигляді схема лазерного пристрою відображення подана на рис. 7.2.

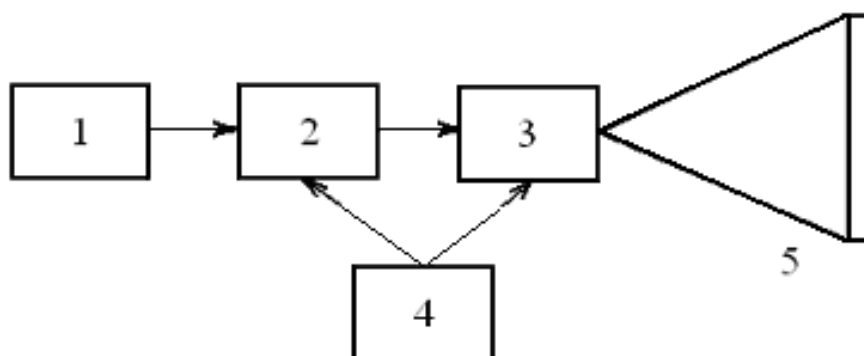


Рисунок 7.2 – Схема лазерного пристрою відображення: 1 – лазер; 2 – електрооптичний модулятор; 3 – система відхилення (дефлектор); 4 – керування модулятором і дефлектором; 5 – екран

Електрооптичний модулятор працює за принципом обертання площини поляризації. На виході модулятора діє аналізатор, що пропускає амплі-

туду когерентного випромінювання, пропорційну косинусу кута поляризації. Кут поляризації змінюється залежно від прикладеної до модулятора електричної напруги. Однією із проблем є складність відхилення променя для створення на екрані растрового поля. В різноманітних конструкціях використовуються механічні, рефракційні та інші способи відхилення; вони відрізняються або невисокою швидкістю, або малими кутами розгорнення.

Основною проблемою в розвитку лазерних пристроїв відображення є висока складність електрооптичних блоків керування, забезпечення стабільності їх роботи в звичайних умовах. Проблемою також є досягнення достатньої яскравості зображення на великому екрані, оскільки випромінювання лазерів має значно нижчу світлову віддачу, ніж випромінювання звичайних джерел.

Контрольні запитання

1. Наведіть області застосування великих екранів.
2. Які проміжні носії використовують при проектуванні великих екранів?
3. Охарактеризуйте принцип роботи світлоклапанних великих екранів.
4. Які профілактичні заходи застосовують для підтримання роботоздатності світлоклапанних великих екранів?
5. Охарактеризуйте конструкції проекційної системи безвакуумного типу.
6. Охарактеризуйте принцип роботи лазерних засобів відображення на великий екран.

8 ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ІНДИКАТОРИ

Розвиток електрохімічних індикаторів (ЕХІ) та їх практичне використання стало можливим тільки з використанням останніх досягнень теоретичної електрохімії, приладобудування і електроніки. Електрохімічні індикатори дозволяють створювати малогабаритні пристрої для відображення інформації про різноманітні процеси з низьким рівнем сигналів, низькими та інфранизькими частотами корисних сигналів із забезпеченням можливості швидкого зчитування в широкому куті спостереження та з розширеним інтервалом робочих температур.

В рідких і, рідше, твердих електролітах ЕХІ носіями зарядів є іони. Рухливість їх в $10^6 \div 10^8$ разу менша рухливості носіїв заряду в напівпровідниках з електронною і дірковою провідностями, а швидкість рекомбінації і теплова потужність, що виділяється, також набагато менші.

В ЕХІ реалізуються характеристики, які важко або практично недосяжні в приладах, оснований на інших фізичних явищах. До таких переваг можна віднести низький рівень корисних керівних сигналів і досить малу потужність споживання на одне перетворення (сотні мкВт – сотні мВт); можливість роботи при тривалих (безперервних або дискретних) процесах в десятки тисяч годин при низьких частотах змін рівнів сигналів керування (від тисячних або сотих часток герца і вище) і при одночасній можливості керування елементом; протікання фізико-хімічних процесів у тонких біля-електродних шарах (близько 1 мкм), що дозволяє створювати мініатюрні схемні елементи в рідинних мікросхемах; широкий динамічний діапазон перетворення (до 80 дБ); високу функціональну щільність; одночасну наявність декількох носіїв струму, що розширює функціональні можливості ЕХІ; можливість самовідновлення при електричних пробоях і деяких інших видах відмов завдяки молекулярній рухливості середовища-носія, яке забезпечує високу потенційну надійність приладів.

ЕХІ не є джерелами радіозавад, малочутливі до електромагнітних і електричних полів. Вони роботоздатні в середовищі, що містить агресивні пари і гази, в глибокому вакуумі та в середовищах з тиском в десятки атмосфер.

На сьогодні відомо близько 20 електрооптичних ефектів у робочих середовищах ЕХІ, тобто явищ зміни ступеня поглинання або смуги пропускання речовини під час дії електричного поля.

8.1 Електрохімічні індикатори на основі неорганічних матеріалів

В ЕХІ на основі неорганічних матеріалів використовуються, в основному, ефекти зворотного осадження металів або електрохромізм в неорганічних окислах. *Електрохромізм* називають зсув спектральних смуг поглинання молекул під дією зовнішнього поля. Ефект електрохромізму протікає завдяки двом різноманітним фізичним процесам. По-перше, зовнішнє електричне поле змінює орієнтаційне розташування молекул, що викликає зміну інтенсивності спектра.

По-друге, поле, що викликає зміну відстаней між різними енергетичними рівнями молекули, призводить до зсуву спектральних смуг поглинання і до зміни перехідних моментів.

Індикатори на основі електроосадження металів зазвичай являють собою два електроди (робочий – прозорий з оксиду олова або оксиду індію і протиелектрод – металевий), між якими знаходиться розчин комплексної солі металу. Використання робочої речовини у вигляді комплексної сполуки обумовлено необхідністю підвищити перенапругу на робочому електроді для отримання дрібнозернистої плівки осадженого металу. Порогова напруга робочої речовини електролітичних індикаторів має бути незначною для того, щоб за час $0,1 \div 0,5$ с був досягнутий контраст не більше 2:1.

Такій умові нині відповідають тільки робочі речовини на основі солей срібла та міді, хоча можна використовувати речовини на основі солей всіх металів.

Плівка осадженого на робочому електроді металу може зберігатись довго і не зникає навіть при замиканні електродів, що дозволяє створювати на основі принципу електроосадження металів матрично керовані індикатори. Зображення в таких індикаторах здійснюється зміною полярності електрода, при чому метал, осаджений на електроді, окислюється до вихідної солі. В електролітичних індикаторах за густини струму $0,5 \text{ mA/cm}^2$ і при часу запису $0,1 \text{ s}$ досягається контраст $5:1$, за великого часу запису (приблизно 1 s) на робочому електроді створюється доволі товста плівка металу, що починає дзеркально відбивати падаюче світло.

Недолік: найбільше серед усіх ЕХІ споживання електроенергії.

Перевага: можливість рівномірно перекривати світло в широкому спектральному діапазоні, що обумовлює широке їх застосування при розробці електронних діафрагм – електрично керованих нейтральних світлофільтрів зі змінною оптичною густиною.

В *електрохімічних* індикаторах на неорганічній основі як робочу речовину використовують напилені на робочі електроди тонкі плівки ($\sim 0,1 \div 0,5 \text{ мкм}$) оксидів металів зі змінною валентністю. Матеріалом протиелектрода в цьому випадку може слугувати електрохімічно інертна речовина. Простір між електродами заповнений розчином індиферентного (такого, що не взаємодіє з іншими речовинами, тобто хімічно інертного) електроліту в кислоті або органічним електролітом. При подачі на електроди електрохімічного індикатора різниці потенціалів $0,5 \div 2,0 \text{ В}$ виникає зворотне електрохімічне окислення, або відновлення оксиду, в результаті чого прозора безбарвна плівка оксиду інтенсивно забарвлюється. Це забарвлення може зберігатись при розімкнутих електродах від декількох хвилин до кількох годин і швидко зникає при замиканні електродів. При напилюванні на робочий електрод суміші органічних оксидів в електрохімічному індикаторі можна реалізувати різні кольори та багатоколірне зображення. Їх контраст становить $3:1$ за $0,1 \text{ s}$ при густині перенесеного заряду 10 мКл/cm^2 .

Недолік: невеликий контраст (не більше $6:1$), що пов'язано з обмеженнями на товщину плівки оксиду, яка не перевищує $0,5 \text{ мкм}$.

Переваги: можливість створювати твердотілі індикатори з використанням твердих електролітів та простота створення індикаторів великих розмірів, оскільки проміжок між електродами в такому випадку істотно не впливає на робочі параметри. Крім того, в таких індикаторах робоча речовина безпосередньо напилюється на сегменти.

8.2 Електрохімічні індикатори на основі розчинів органічних речовин

В ЕХІ на основі розчинів органічних речовин використовуються електрохімічні реакції, що супроводжуються створенням інтенсивно забарвлених стабільних іон-радикалів, тобто реалізується *ефект електрохемихромізму*. Робоча речовина в таких індикаторах або розчинена в електроліті, або нанесена у вигляді тонкої прозорої плівки на робочий електрод.

При подачі на електроди постійної напруги $0,5 \div 2,0$ В молекули робочої речовини зворотно окислюються або відновлюються до забарвлених іон-радикалів. Наявність у іон-радикалів електричних зарядів перешкоджає зближенню і є причиною їх підвищеної стабільності.

Молекули таких іон-радикалів утворені з кількох сполучених ароматичних кілець, завдяки чому неспарений електрон рівномірно делокалізований в молекулі, що і є причиною появи забарвлення.

ЕХІ на органічній основі бувають трьох типів: індикатори, в яких робоча речовина створена в електроліті, але здатна осаджуватись на робочому електроді у вигляді забарвленої плівки при подачі напруги; індикатори, в яких робоча речовина нанесена на робочий електрод у вигляді тонкої прозорої плівки; індикатори, в яких безбарвна і прозора робоча речовина завжди знаходиться в розчині між електродами.

Індикатори першого типу за принципом дії аналогічні електролітичним індикаторам, але у них на робочому електроді осаджується не метал, а забарвлена сіль іон-радикалів.

Особливістю індикаторів другого типу є наявність забарвлення робочої речовини у вихідному стані, тобто індикатор при записуванні та стиранні тільки змінює своє забарвлення, але ніколи не буває повністю безбарвним. Розглянуті два типи індикаторів містять «пам'ять». Індикатори третього типу не містять «пам'яті», оскільки їх забарвлена речовина добре розчиняється в електроліті, аналогічно безбарвній. В таких індикаторах зазвичай обидва електроди прозорі і процес забарвлення виникає як на аноді, так і на катоді, що значно зменшує час записування.

Речовини, що зафарбувались на аноді та катоді в результаті зворотного електрохімічного окислення і відновлення, дифундують в глибину розчину, де при зустрічі обмінюються неспареними електронами, повертаються у вихідний безколірний стан і знову дифундують до електродів (рис. 8.1).

Індикатори на основі розчинів органічних речовин споживають на порядок менше електроенергії, ніж індикатори на неорганічній основі.

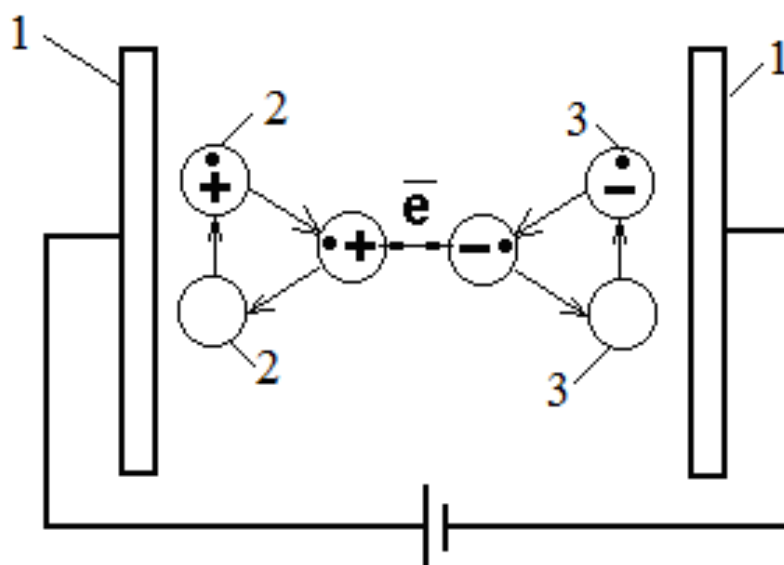


Рисунок 8.1 – Конструкція індикаторів другого типу: 1 – електроди; 2 – молекули робочої речовини, що зворотно окислюються; 3 – молекули робочої речовини, що зворотно відновлюються

Крім того, деякі органічні речовини можуть забарвлюватись в 2 – 3 кольори залежно від полярності та прикладеної до електродів напруги.

8.3 Індикатори на основі колоїдних розчинів

Робота індикаторів з колоїдними розчинами базується на різних електрооптичних ефектах в анізотропних суспензіях. Споживання електроенергії в таких індикаторах незначне, як і у рідкокристалічних (густина струму індикатора не перевищує 10 мкА/см^2). Протікання струму в таких індикаторах є небажаним побічним ефектом.

Серед індикаторів на основі колоїдних розчинів значного поширення на сьогоднішній день отримали електрофоретичні індикатори, принцип роботи яких базується на явищі електрофорезу – направлено руху заряджених частинок в колоїдному розчині при дії зовнішнього електричного поля. Зазвичай такий колоїдний розчин складається з чотирьох компонентів: пігменту – дрібнодисперсних білих частинок (TiO_2 , BaSO_4 , MgSO_4 тощо), полімеру з довжиною молекули $5 \div 50 \text{ нм}$, неводяного розчинника з високою температурою кипіння (дибутилфталат, різні масла) і органічного барвника, який надає розчину інтенсивного забарвлення. Пігмент в чистих органічних речовинах не розчинений, але при добавленні в розчин полімеру та перемішуванні молекули полімеру адсорбуються на частинках пігменту і надають їм заряд, який перешкоджає злипанню частинок і випадінню їх в осад (рис. 8.2).

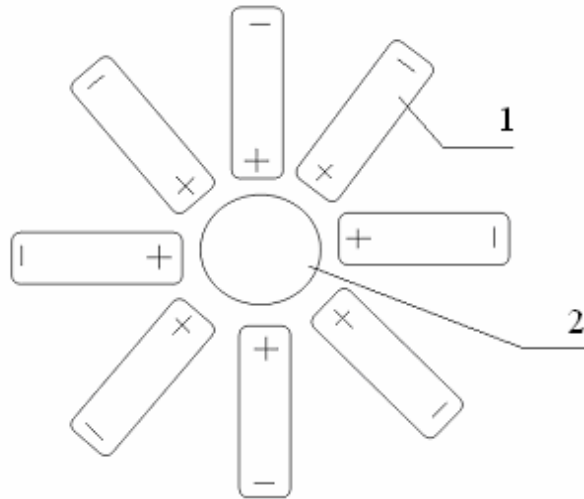


Рисунок 8.2 – Модель сферичної частинки в колоїдному розчині:
1 – стабілізуючий полімер; 2 – пігмент

В електрофоретичному індикаторі колоїдний розчин знаходиться між двома прозорими електродами на поверхні скляних підкладок, проміжок між якими становить близько 50 мкм.

При прикладенні до електродів постійної напруги $15 \div 100$ В заряджені частинки пігменту переміщуються до електрода з потенціалом протилежного знаку, прилипають до нього і створюють біле зображення на темному фоні. Колір фону визначається барвником. При зміні полярності частинки пігменту переміщуються до протиелектрода, в результаті чого електрод набуває забарвлення навколишнього фону.

Переваги: гарний контраст, який не залежить від кута спостереження, час записування і стирання близько 20 мс, «пам'ять», довготривалість $\sim 10^8$ циклів перемикань, незначна потужність споживання електроенергії (густина струму $\sim 0,2$ мкА/см²), доволі широкий температурний інтервал роботи і зберігання. На основі електрофорезу можуть створюватись матрично керовані індикатори.

Недоліки електрофорезу: велика робоча напруга і малий проміжок між електродами, що ускладнює виробництво індикаторів великих габаритних розмірів. Існують і проблеми зберігання, що обумовлені випадінням пігменту в осад.

Принцип дії інших індикаторів з колоїдними розчинами базується на явищі світлорозсіювання в дисперсних системах. Під дією електричного поля хвилі падаючого світла електрони в розсіювальній частинці пігменту починають здійснювати вимушені коливання і самі випромінюють світло у всіх напрямках з тією ж частотою. Сумарний наведений диполь в частинці випромінює коливання з частотою, що дорівнює частоті хвилі падаючого світла. Наведений диполь P дорівнює добутку поляризованості частинки α на напруженість електричного поля E .

Згідно з електромагнітною теорією, інтенсивність світла пропорційна квадрату амплітуди хвилі, яка випромінюється електричним диполем. Амплітуда ж хвилі пропорційна квадрату частоти коливань диполя. Таким чином, інтенсивність розсіюваного світла пропорційна частоті коливань диполя в четвертому степені (якщо розмір розсіювальної частинки менше 0,1 довжини хвилі падаючого світла), тобто світло з меншою довжиною хвилі сильніше розсіюється. І тому, при розсіюванні білого світла дисперсною системою з дрібними частинками розсіюване світло – блакитне, а прохідне – червоне.

Контрольні запитання

1. Які ефекти використовуються в ЕХІ на основі неорганічних матеріалів ?
2. В чому полягає ефект електрохромізма ?
3. Охарактеризуйте принцип роботи індикаторів на основі електроосадження металів. Наведіть їх переваги та недоліки.
4. Які ефекти використовуються в ЕХІ на основі розчинів органічних речовин? Охарактеризуйте принцип їх роботи. Наведіть їхні переваги та недоліки.
5. Охарактеризуйте принцип роботи індикаторів на основі колоїдних розчинів. Наведіть їхні переваги та недоліки.
6. Наведіть галузі застосування електрохімічних індикаторів.

9 РІДКОКРИСТАЛІЧНІ ІНДИКАТОРИ

9.1 Загальні властивості рідкокристалічної речовини

Рідкокристалічні індикатори (РКІ) не генерують світло, а тільки керують його проходженням, це і обумовлює надзвичайно малу їхню потужність споживання. До переваг відносять також малу напругу керування, що і дозволяє безпосередньо узгоджувати їх із цифровими інтегральними схемами.

Можливість практичного використання РКІ визначається діапазоном робочих температур. Розрізняють два діапазони температур: зберігання та експлуатації.

РКІ, що використовуються у виробництві мікрокалькуляторів, наручних та настільних електронних годинників, багатофункціональних приладів у промислових пристроях управління та контролю, мають мати діапазон температур зберігання від -45 до $+70$ °С, експлуатації – від 0 до $+60$ °С. Індикаторні пристрої для автомобільної промисловості мають зберігатись при температурах від -60 до $+100$ °С, а експлуатуватись – від -40 до $+80$ °С.

Ймовірність синтезу індивідуальної РК речовини з таким діапазоном температур надто мала. Тому у виробництві індикаторів як робочі РКМ-ли використовують багатокомпонентні суміші.

Ці матеріали, як правило, розробляються на базі одного певного хімічного класу РК-сполуки, наприклад, на основі бензоєфірів, ціанобіфінілів тощо. До цього матеріалу (базового) додають мезофазні та ізотропні компоненти, що змінюють електропровідність, температуру мезофазних переходів, в'язкість, пружність та інші параметри РК матеріалу. Кількість компонентів в кінцевому матеріалі може становити $12 \div 15$.

Із усієї множини РК-речовин найбільш широко використовують органічні класи РК, до яких, насамперед, відносяться похідні алкокситоланів, алкіл-трансциклогексанових кислот, алкіл-бензойних кислот та інші.

Обмеження у виборі компонентів для отримання промислових матеріалів визначається технологічністю синтезу речовин, можливістю їх очищення та контролю якості, собівартістю та відтворюваністю складу.

Рідкокристалічна речовина – це анізотропна речовина, що наділена звичайними властивостями рідини: текучістю, поверхневим натягом і в'язкістю та незвичайною для рідини властивістю – упорядкованою орієнтацією. Як результат, такі макроскопічні параметри як діелектрична проникність ε і показник заломлення $n_{\text{зал}}$ залежать від орієнтації.

Для рідкокристалічної рідини характерна анізотропна геометрія молекул. В більшості випадків вони мають витягнуту паличкоподібну форму. Упорядкованість структури створюється відносно слабкими силами взаємозв'язку між молекулами або між молекулами і межовими поверхнями. Оскільки ці сили незначні, то при підвищенні температури РК перетворюється на звичайну ізотропну рідину. При зниженні температури кристал переходить у твердий стан і втрачає властивості рідини. Поки структура кристала залишається рідиною, вона легко перебудовується під дією механічних, електричних або магнітних полів.

Структуру типової молекули РК-речовини подано на рис. 9.1.

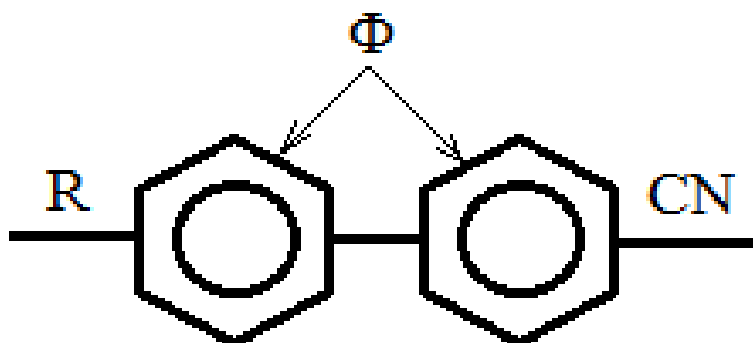


Рисунок 9.1 – Структура молекули РК-речовини

Молекула складається із двох фенилових кілець Φ , до яких приєднані короткі полярні групи у вигляді алкідних ланцюжків R-CN.

Орієнтація окремої молекули РК-речовини підлягає безперервним тепловим флуктуаціям, але в будь-якій точці рідини існує середня орієнтація, що характеризується одиничним вектором, який називається директором D . Залежно від напрямку директора і взаємного положення центрів ваги молекул розрізняють три основні фази: смектичну, нематичну і холестеричну.

Розташування молекул в цих фазах подано на рис. 9.2. В найбільш упорядкованій смектичній фазі молекули орієнтовані паралельно, а їхні центри ваги лежать в одній площині (рис. 9.2, а). Якщо паралельна орієнтація зберігається, але центри ваги молекул розташовуються довільно, то виникає нематична фаза (рис. 9.2, б), в холестеричній фазі існує закручування директора і як результат створюється гвинтова структура (рис. 9.2, в).

Коли РК-речовина займає великий об'єм, то в останньому автоматично з'являються області з незалежними орієнтаціями директора. Для надання однакової орієнтації у всьому робочому просторі РК-речовину поміщають у вузький (товщиною в декілька десятків мікрометрів або менше) простір між підкладками.

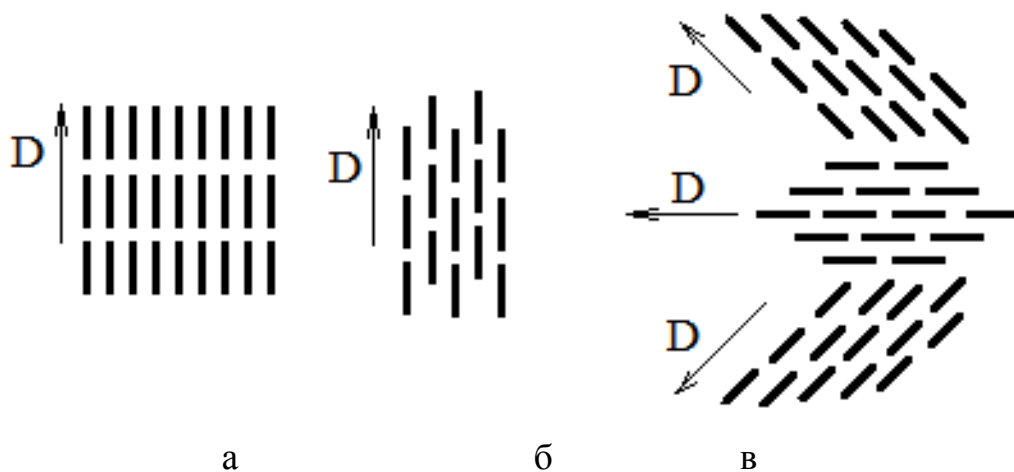


Рисунок 9.2 – Орієнтація молекул в різноманітних фазах РК:
а – смектична; б – нематична; в – холестерична

В результаті чого специфічна орієнтація молекул рідкого кристала визначається і сусідніми молекулами та межевою поверхнею підкладки. Орієнтувальна дія досягається натиранням поверхні підкладки або напилюванням на неї під кутом тонких плівок SiO_2 .

В нематичній фазі орієнтувальна дія підкладок може привести до виникнення: а) планарної (гомогенної), б) нормальної (гомеотропної) і в) закрученої (твістованої) орієнтації. Орієнтація молекул одна відносно одної

в перших двох випадках однакова, але вони або паралельні, або перпендикулярні підкладці залежно від її обробки. Для створення закрученої орієнтації підкладки обробляють таким самим чином як і для створення планарної, але при складанні приладу повертаються одна відносно одної на кут, близький до 90° . Директор всередині РК-шару, розташованого між підкладками, плавно повертається.

За своїми електричними властивостям РК-речовини відносяться до діелектриків і характеризуються малою питомою електропровідністю $\sigma_{np} = 10^{-6} \div 10^{-9}$ См/м, що залежить від кількості провідних домішок.

Важливим параметром РК, що керує його оптичними властивостями за допомогою електричного поля, є діелектрична анізотропія:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp},$$

де ε_{\parallel} і ε_{\perp} – паралельні і перпендикулярні складові відносно діелектричної проникності.

Значення і знак $\Delta\varepsilon$ визначаються постійними диполями всередині молекул.

Оптичні властивості РК-речовин визначаються різними показниками заломлення для світла з різними відносно D напрямками поляризації. Оптична анізотропія характеризується різницею показників заломлення:

$$\Delta n = n_e - n_o,$$

де n_e – показник заломлення для світла з поляризацією, що паралельна директору (незвичайний промінь);

n_o – показник заломлення для світла з поляризацією, що перпендикулярна директору (звичайний промінь).

Оптична анізотропія призводить до виникнення ефекту двопроменезаломлення, який полягає в тому, що падаючий на РК-промінь розділяється на два, при цьому звичайний промінь відхиляється досить слабо, а незвичайний – сильно. Напрямок директора може істотно змінюватись при прикладенні до РК-речовини електричного поля, що слугує однією із можливостей електрооптичного керування світлом.

9.2 Типи рідкокристалічних індикаторів

На практиці нематичні рідкі кристали використовуються в електрооптичних комірках для керування світловим потоком. Конструкція такої комірки схематично подана на рис. 9.3.

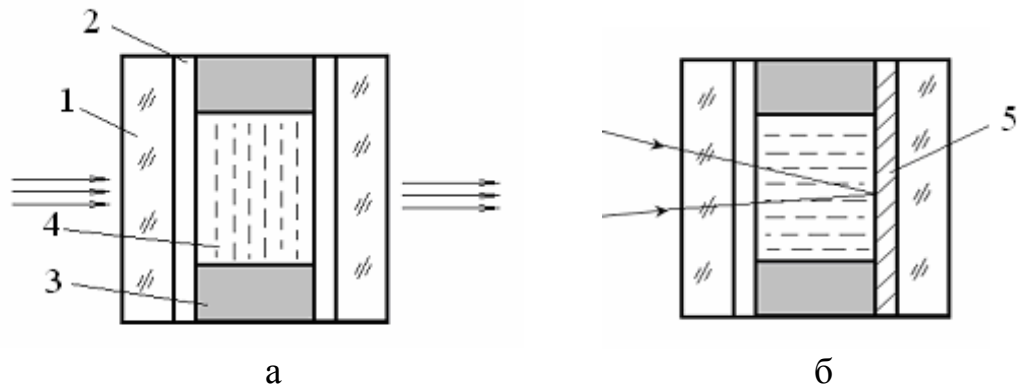


Рисунок 9.3 – Електрооптична комірка на РК-кристалах:
 а – робота на просвіт (гомогенна орієнтація молекул);
 б – робота на відображення (гомеотропна орієнтація молекул);
 (1 – скляна підкладка; 2 – прозорі електроди (SnO_2);
 3 – діелектричні прокладки; 4 – РК;
 5 – непрозорий електрод (для відбиття))

Між двома скляними пластинами, розділеними діелектричними прокладками, знаходиться шар рідкого кристала товщиною $5 \div 30$ мкм. На внутрішні поверхні підкладок наносяться керівні електроди. Комірка може працювати як на просвіт (рис. 9.3, а), так і в режимі відображення (рис. 9.3, б). В останньому випадку один із електродів виконують непрозорим.

При створенні засобів відображення інформації на рідких кристалах найбільш широке застосування знайшли ефект динамічного розсіювання світла та польовий «твіст-ефект» (розкручування нематичної фази).

Індикатори на основі динамічного розсіювання. Динамічне розсіювання світла проявляється в рідких кристалах з від'ємною діелектричною анізотропією і невеликим питомим опором (приблизно 10^6 Ом·м). Вихідному стану відповідає гомеотропна орієнтація молекул мезофази (молекули перпендикулярні до підкладки). Завдяки внутрішній упорядкованості комірка прозора для падаючого світла. Під впливом зовнішньої напруги виникає поворот диполів (їхній електричний момент перпендикулярний до довгих осей молекул) і орієнтація змінюється на гомогенну. Одночасно сильне електричне поле ініціює потік іонів, який порушує упорядковане статичне розташування молекул. При вирівнюванні молекулярних осей за напрямком руху іонів в рідині виникають вихрові рухи, які призводять до локальних змін показника заломлення, тобто виникають центри, що розсіюють світло. Зовнішньо це проявляється як помутніння комірки. Інтенсивність світлорозсіювання, а відповідно і контрастність оптичного відгуку, збільшуються зі збільшенням напруги керування. Геометрія висвічуваного знака задається формою електрода. При знятті поля комірка повертається у вихідний прозорий стан.

Ефект динамічного розсіювання світла проявляється як на постійному, так і на змінному полі низької частоти (до $10^2 \div 10^4$ Гц залежно від матері-

алу). Електрохімічні реакції між РК-речовиною і матеріалом електродів є причиною поступової деградації комірок (втрати контрасту). Однак, при використанні змінної напруги процеси електролізу можна значно зменшити та збільшити термін роботи індикаторів до десятків тисяч годин.

Робота РК-індикатора на основі ефекту динамічного розсіювання (струмовий ефект) подана на рис. 9.4.

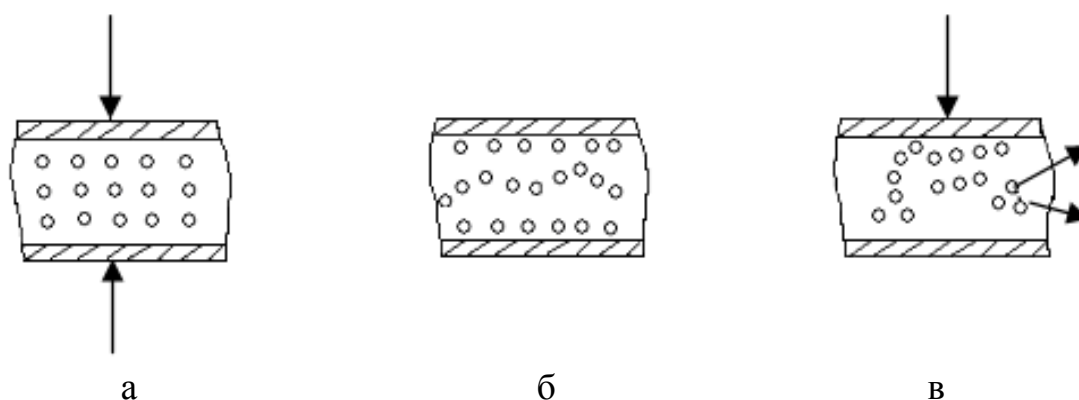


Рисунок 9.4 – Робота РК-індикатора на ефекті динамічного розсіювання при напругах: а – нульовій, б – пороговій, в – напрузі, що перевищує порогову

В комірці, заповненій нематиком з негативною діелектричною анізотропією, при планарній орієнтації при відсутності або при малій напрузі на електродах речовина однорідна і прозора (рис. 9.4, а). При прикладенні до комірки порогової напруги, що не залежить від товщини шару і слабо залежить від температури, виникає хвиляста доменна структура – незвичайний рисунок, що обумовлений упорядкованою зміною напрямку директора (рис. 9.4, б). При перевищенні порогової напруги доменна структура перетворюється в комірчасту (рис. 9.4, в).

При напругах, що значно перевищують порогову, в рідині виникає вихровий рух. В результаті виникнення вихрів РК повністю втрачає оптичну однорідність і розсіює світло у всіх напрямках. Цей електрооптичний ефект і називається динамічним розсіюванням.

Індикатори на основі твіст-ефекту. Нині поширеними є індикатори, що використовують польовий твіст-ефект. Комірка складається із перехрещеного поляризатора P і аналізатора A . За відсутності напруги молекули в ній закручені приблизно на 90° завдяки орієнтувальній дії підкладки. В такому випадку світло, що падає на комірку зверху, поляризується таким чином, що його вектор поляризації збігається з напрямком директора D у верхній підкладці. При проходженні через шар РК-речовини, площина поляризації світла крутиться і при потраплянні в нижню підкладку виявляється перпендикулярною до площини. Як результат – світло вільно виходить через аналізатор і потрапляє до спостерігача (рис. 9.5).

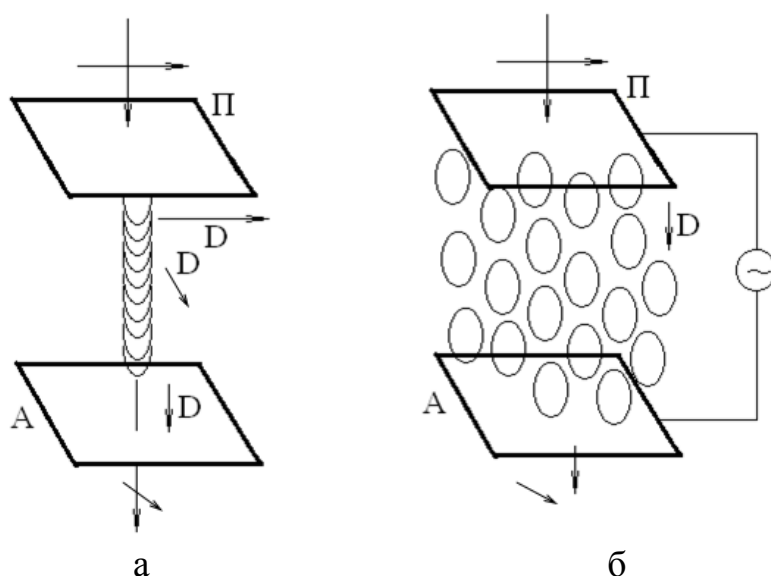


Рисунок 9.5 – Робота РК-індикатора на твіст-ефекті при напругах:

а – нульовій; б – більшій $U_{пор}$

При накладанні на комірку напруги, що створює поле значно вище порогового, речовина з позитивною діелектричною анізотропією прагне повернутись за електричним полем і його директор D набуває вертикального напрямку. Тепер уже РК-комірка не крутить площину поляризації, а аналізатор не пропускає світло.

Переваги (порівняно з індикаторами на ефекті динамічного розсіювання): малі робочі напруги ($3 \div 10$ В замість $15 \div 40$ В), велика довготривалість, що обумовлена незначними робочими струмами (густина струму $1 \div 3$ мкА/см² замість 10 мА/см²).

Недоліки: менший ніж у індикаторів на ефекті динамічного розсіювання кут огляду, що пов'язано з вузькою діаграмою направленості світла при твіст-ефекті і впливом поляризаторів. Шляхом підвищення напруги керування до $5 \div 6$ В цей кут можна збільшити до $\pm 45^\circ$; необхідність використання поляризаторів, що призводить до більше 50%-х втрат світла, підвищує вартість індикатора і зменшує його довговічність.

Індикатори на основі ефекту «господар-гість». Індикатори без поляризаторів можуть створюватись на основі ефекту «господар-гість» (рис. 9.6). Для отримання кольорових зображень в рідкі кристали вводять молекули барвника, які також мають подовжену паличкоподібну форму і орієнтуються паралельно молекулам мезофази за рахунок пружного дисперсійного взаємозв'язку. Спектр поглинання таких молекул є функцією їх орієнтації відносно напрямку поляризації падаючого світла. Поглинання максимальне, якщо довгі осі молекул паралельні коливанням електричного вектора світлової хвилі. Зовнішнє поле змінює статичну орієнтацію молекул, відповідно змінюється спектр поглинання лінійно поляризованого світла і обумовлений ним кольоровий контраст електрооптичної комірки.

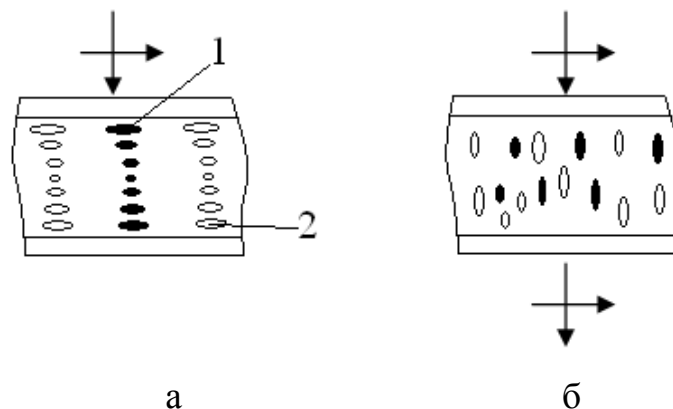


Рисунок 9.6 – Робота РК-комірки на ефекті «господар-гість»:
 а – нульова напруга; б – $V > V_{пор}$; 1 – молекули барвника; 2 – молекули
 рідкого кристала

Оскільки молекули барвника поглинають світло з поляризацією вздовж довгої осі молекул і пропускають світло з перпендикулярною орієнтацією, то керуючи орієнтацією РК, можна регулювати проходження світла.

Як основний електрооптичний ефект в такому РК можна використовувати перехід із холестеричного в нематичний стан. Для початкового холестеричного стану речовина містить спіральну структуру і світло з будь-яким напрямком поляризації поглинається (рис. 9.6, а). При накладанні сильного електричного поля РК-речовина переходить в нематичний гомеотропний стан, в якому всі молекули барвника орієнтовані вертикально, а світло, що падає на комірку, вільно проходить через неї (рис. 9.6, б). Така система перспективна, оскільки дозволяє отримати майже чорне зображення на білому фоні при високій яскравості і досить широкому куті огляду.

Характеристики індикаторів. Оскільки РК-індикатори відносяться до класу пасивних, то основним їхнім оптичним параметром є не яскравість, а контрастність.

Вольт-контрастна характеристика РК-індикатора залежить не від амплітудного, а від діючого значення прикладеної напруги.

Для параметричного визначення кривої можна взяти напруги, що відповідають 5, 10, 50 і 90% контрасту; позначають їх $U_5, U_{10}, U_{50}, U_{90}$.

Відносна зворотна крутизна електрооптичної характеристики визначається виразами:

$$\begin{aligned} \gamma_{90-10} &= (U_{90} - U_{10}) / U_{10}, \\ \gamma_{50-10} &= (U_{50} - U_{10}) / U_{10}, \\ \gamma_{50-5} &= (U_{50} - U_5) / U_5. \end{aligned}$$

Динамічні параметри РК-індикаторів визначаються часом реакції $\tau_{рк}$ і релаксації $\tau_{рл}$. Крива зміни контрасту при накладанні імпульсу напруги

містить ділянки: затримку вмикання, час зростання, затримку вимикання і час спаду, в сумі вони дорівнюють часу реакції, дві останні в сумі дають час релаксації.

Температурний діапазон роботи РК-індикатора часто обмежується τ_{pk} і τ_{pl} , типові значення яких становлять десятки мілісекунд при кімнатній температурі та істотно зростають при її зниженні. І тому, якщо при зниженні температури робоча речовина залишається в рідкому стані, індикатор може бути нероботоздатним через невідповідність динамічних параметрів. Прилади, що розраховані на роботу при низьких температурах навколишнього середовища заповнюються сумішшю РК-речовин, що мають при такій температурі малу в'язкість.

9.3 Рідкокристалічні панелі

Рідкокристалічний дисплей (англ. *liquid crystal display* (LCD)) – це електронний пристрій візуального відображення інформації (дисплей). Дисплей складається з довільної кількості кольорових або монохромних точок (пікселів) і джерела світла або відбивача (рефлектора).

Кожна з кольорових точок рідкокристалічного дисплея складається з кількох комірок (як правило, з трьох), перед якими встановлюються світлові фільтри (найчастіше – червоний, синій і зелений). Тобто колір певної точки і її яскравість визначається інтенсивностями світіння комірок, з яких вона складається.

Керування кожною рідкокристалічною коміркою здійснюється за допомогою напруги, яку подає на комірку один з транзисторів тонкої підкладки (TFT – аббревіатура англійського виразу «Thin Film Transistors»).

Рідкокристалічні дисплеї мають низьке енергоспоживання, тому вони знайшли широке застосування, як в кишенькових пристроях (годинниках, мобільних телефонах, кишенькових комп'ютерах), так і в комп'ютерних моніторах, телевізорах тощо.

Будова. Екран LCD є масивом маленьких сегментів (пікселів), котрими можна маніпулювати для відображення інформації. LCD має кілька шарів, де ключову роль відіграють дві панелі, зроблені з вільного від натрію і дуже чистого скляного матеріалу, який називають субстратом або підкладкою (рис. 9.7).

Проміжок між шарами заповнений тонким шаром рідкого кристала. На панелях є борозенки, що надають їм спеціальної орієнтації. Борозенки розташовані паралельно між собою в межах кожної панелі, але борозенки однієї панелі перпендикулярні до борозенок іншої. Поздовжні борозенки утворюються внаслідок нанесення на скляну поверхню тонких плівок прозорого пластику, що потім спеціальним чином обробляється.



Рисунок 9.7 – Структура LCD екрана

Борозенки орієнтують молекули рідкого кристала однаково у всіх комітках. Молекули одного з типів рідких кристалів (нематиків) за відсутності напруги повертають вектори електричного (і магнітного) полів світлової хвилі на деякий кут у площині, перпендикулярній до напрямку поширення світлового променя. Нанесення борозенок на поверхню скла дозволяє забезпечити однаковий кут повороту площини поляризації для всіх комірок. Проміжок між панелями дуже тонкий.

Технологічні характеристики

- Тип матриці – технологія виготовлення РК дисплея.
- Роздільна здатність – кількість пікселів в кожному з вимірів, що може бути відображена.
- Розмір піксела – відстань між центрами сусідніх пікселів.
- Яскравість – світлова характеристика тіл, які є джерелами світла.
- Контрастність – міра виявлення об'єкта на фоні.
- Час відгуку – мінімальний час, необхідний пікселу для зміни своєї яскравості.
- Кут огляду – кут відносно перпендикуляра до центра матриці, при спостереганні котрого контрастність зображення у центрі матриці спадає до 10:1.

Типи матриць

- **TN+FILM** – (Twisted Nematic + film), інколи можна зустріти назву TN. Один з найстаріших і найпоширеніших типів матриць. Термін Film означає додаткове зовнішнє покриття, що збільшує кут огляду із стандартних 90° (по 45° з кожної сторони) до приблизно 140°.

- **IPS(SFT)** – IPS(In-Plane Switching)/SFT(Super Fine TFT). Технологія була розроблена компаніями Hitachi та NEC. На сьогодні – єдиний тип матриць, котрі передають повну глибину кольору RGB – 24 біти, по вісім бітів на канал. Починаючи з 1998 року розвитком цієї технології зайнялися компанії: Hitachi, NEC та LG. Окрім цього також була створена технологія ACE (Advanced Coplanar Electrode) від компанії Samsung, але ця технологія не використовується при створенні моніторів.

- **MVA** – (Multi-Domain Vertical Alignment). Розроблена компанією Fujitsu у 1996 році. MVA має ті самі переваги, що і IPS матриці та при цьому мають менший час відгуку. Недоліком є те, що час переходу молекул кристалів у проміжні стани триває менше, ніж у крайові – це може призвести до змазування зображення при перегляді фільмів або у динамічних іграх.

- **PVA** – (Patterned Vertical Alignment). Розроблена компанією Samsung як альтернатива MVA. Цей тип матриць демонструє гарну контрастність, але, як і MVA, матриці мають проблеми з яскравістю та часом відгуку.

Принцип дії. Робота РК-дисплея основана на явищі поляризації світлового потоку. Кристали-поляроїди здатні пропускати тільки ту складову світла, вектор магнітної індукції якої лежить у площині, паралельній оптичній площині поляроїда. Для решти світлового потоку поляроїд буде непрозорим. У такий спосіб поляроїд ніби просіває світло. Цей процес називається поляризацією світла. Із відкриттям класу рідких речовин, довгі молекули яких чутливі до електростатичного й електромагнітного поля та здатні повертати площину поляризації світла, з'явилася можливість керувати поляризацією. Ці аморфні речовини через схожість із кристалічними речовинами за електрооптичними властивостями, а також через здатність набувати форми посудини, назвали рідкими кристалами.

Проходження світла. Рідкокристалічна панель освітлюється джерелом світла (залежно від того, де воно розташоване, рідкокристалічні панелі працюють на відображення або на проходження світла). Площина поляризації світлового променя повертається на 90° при проходженні однієї панелі.

Якщо до комірки прикласти електричне поле, молекули рідких кристалів частково вибудовуються вертикально уздовж поля, кут повороту площини поляризації світла стає відмінним від 90 градусів.

Поворот площини поляризації світлового променя непомітний для ока, тому виникає необхідність додати до скляних панелей ще два інших шари, що виконують роль поляризаційних фільтрів. Ці фільтри пропускають тільки складову світлового променя із заданою поляризацією. Тому при проходженні поляризатора пучок світла буде ослаблений залежно від кута між його площиною поляризації та віссю поляризатора. За відсутності напруги комірка прозора, тому що перший поляризатор пропускає тільки світло з відповідним вектором поляризації. Завдяки рідким кристалам вектор поляризації світла повертається і до моменту проходження пучком до другого поляризатора він уже повернутий так, що проходить через другий поляризатор без перешкод.

За наявності електричного поля поворот вектора поляризації відбувається на менший кут, тим самим другий поляризатор стає тільки частково прозорим для випромінювання. Якщо різниця потенціалів буде такою, що повороту площини поляризації в рідкому кристалі не відбудеться зовсім, то світловий промінь буде цілком поглинутий другим поляризатором, і

освітлений ззаду екран буде здаватися чорним (промені підсвічування цілком поглинаються екраном). Якщо розташувати велике число електродів, що створюють різні електричні поля в окремих місцях екрана (комірках), то з'явиться можливість при правильному керуванні потенціалами цих електродів відображати на екрані елементи зображення. Електроди інкапсулюють в прозорий пластик і надають їм будь-якої форми. Технологічні нововведення дозволили обмежити їхні розміри величиною маленької точки, відповідно на маленькій ділянці екрана можна розташувати більше число електродів, що збільшує роздільну здатність LCD-монітора і дозволяє відображати навіть складні зображення в кольорі. Для виведення кольорового зображення необхідним є підсвічування монітора ззаду таким чином, щоб світло виходило із задньої частини LCD. Це необхідно для того, щоб можна було спостерігати зображення з гарною якістю, навіть якщо навколишнє середовище не є світлим. Для отримання кольорового зображення використовують три фільтри, що виділяють з випромінювання джерела білого світла три основні компоненти. Завдяки комбінуванню трьох основних кольорів для кожної точки або пікселя екрана з'являється можливість відтворити будь-який колір.

РК панелі на основі TN-кристалів. TFT технологія основана на активних матрицях на базі тонкоплівкових транзисторів. В цьому випадку на скляну підкладку наноситься шар аморфного кремнію, на якому формуються транзистори – по одному на кожний піксел. Транзистори виконують роль посередника між системою адресації та РК-комірками. Існують і панелі на основі тонкоплівкових діодів (TFD). В активних матрицях виключається вплив процесу адресації на сусідні комірки, кожний піксел ізольований. Завдяки цьому затримки при «перемиканні» РК-комірок скорочено до 25 мс. Як тільки комірка отримує заряд, вона подібно конденсатору зберігає його досить довго. Коли сканування матриці завершується, комірки, що оброблені першими, починають втрачати заряд. Щоб уникнути неоднорідності зображення, до кожної комірки підключають додатковий конденсатор, який «підживлює» її протягом циклу сканування.

Принцип дії: Світло від неонові лампи проходить через систему відбивачів, направляється через перший поляризаційний фільтр і потрапляє в шар рідких кристалів, що контролюються транзисторами (рис. 9.8). Потім світло проходить через колірні фільтри (кожен піксел матриці складається з трьох компонентів кольору – червоний, зелений, синій).

Транзистор створює електричне поле, що задає просторову орієнтацію рідких кристалів. Світло, пройшовши через таку упорядковану молекулярну структуру, змінює свою поляризацію, і залежно від неї буде або повністю поглинутий другим поляризованим фільтром на виході (утворюючи чорний піксел), або не буде поглинатися, або поглинатиметься частково (утворюючи різні кольорові відтінки, аж до чистого білого).

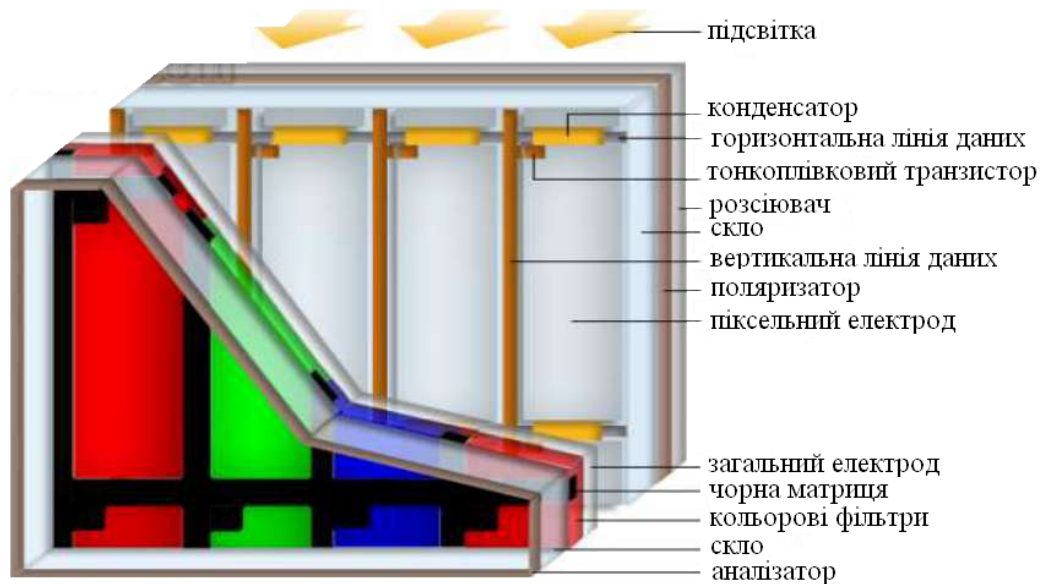


Рисунок 9.8 – Структура РК панелі на основі TN-кристалів

Кольорові фільтри для червоного, зеленого та синього кольорів інтегровані в скляну основу і розташовані близько один до одного. Кожний піксел складається з трьох комірок вказаних кольорів (субпіксел). Це означає, що при роздільній здатності 1280×1024 точок екран містить 3840×1024 транзисторів та піксельних елементів.

Пікселі TFT-дисплея. Лівий верхній кут комірки містить тонкоплівковий транзистор (рис. 9.9).

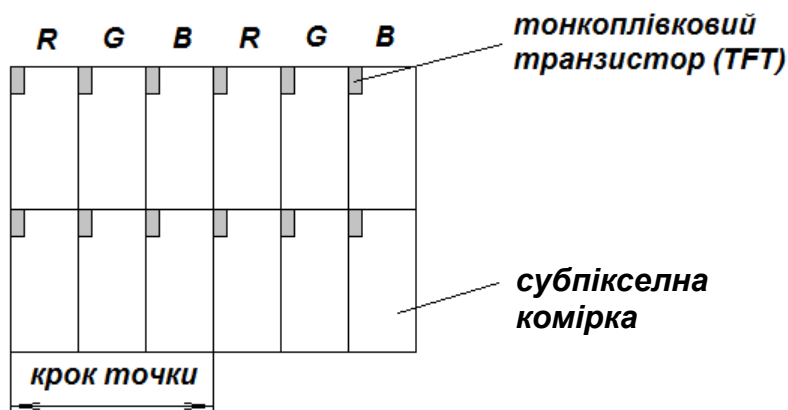


Рисунок 9.9 – Будова пікселя TFT-дисплея

Колірні фільтри дають можливість коміткам змінювати свої природні кольори RGB. Точки суттєво різні; чим менша відстань між ними, тим максимально велика роздільна здатність.

Однак TFT мають фізичні обмеження, які визначаються максимальною площею екрана.

Поширений тип цифрових панелей базується на технології TN TFT або TN + Film TFT. Термін Film означає додаткове зовнішнє покриття, що збі-

льшує кут огляду зі стандартних 90° (по 45° з кожної сторони) до $\approx 140^\circ$.

Робота TN TFT дисплея. Коли транзистор знаходиться у виключеному стані, тобто не створює електричне поле, молекули рідких кристалів перебувають у нормальному стані і вилаштовані так, щоб змінювати кут поляризації світлового потоку, який проходить через них на 90° (РК утворюють спіраль). Оскільки кут поляризації другого фільтра перпендикулярний до кута першого, то світло, що проходить через неактивний транзистор, буде без втрат виходити назовні, утворюючи яскраву точку, колір якої задається кольоровим фільтром.

Коли транзистор генерує електричне поле, всі молекули рідких кристалів вилаштовуються в лінії, що паралельні куту поляризації першого фільтра, і тим самим не впливають на світловий потік, який через них проходить. Другий поляризаційний фільтр поглинає світло повністю, утворюючи чорну точку на місці однієї із трьох кольорових компонент.

Недоліки технології TN.

По-перше, вирівняти рідкі кристали строго перпендикулярно до поляризаційного фільтра досить складно. У результаті практично неможливо домогтися ідеального відображення чорного кольору.

По-друге, при несправності транзистора неможливо подати напругу на відповідні 3 субпікселі. Як результат – на екрані з'являється біла точка.

Контрольні запитання

1. В який спосіб можна отримати холестеричну структуру ?
2. Який принцип роботи РК-індикаторів на основі динамічного розсіювання ?
3. Який принцип роботи РК-індикаторів на основі польового твіст-ефекту?
4. Який принцип роботи РК-індикаторів на основі ефекту «господарність» ?
5. Охарактеризуйте будову та принцип дії РК панелей.
6. Які технологічні характеристики РК панелей Вам відомі ?
7. Які існують типи матриць РК панелей ?
8. Який принцип роботи РК панелей на основі TN-кристалів ?
9. Який принцип роботи тонкоплівкових транзисторних (TFT) РК дисплеїв ?

СЛОВНИК НАЙБІЛЬШ ВЖИВАНИХ ТЕРМІНІВ

<i>Засіб</i>	mean	средство
<i>Відображення інформації</i>	display information	отображение информации
<i>Індикатор</i>	indicator	индикатор
<i>Лампа</i>	lamp	лампа
<i>ВАХ (вольт-амперна характеристика)</i>	current-voltage characteristic	вольт-амперная характеристика
<i>Знакомодулювальний індикатор</i>	signmodulator indicator	знакомодулирующий индикатор
<i>Знакосинтезувальний індикатор</i>	sign synthesis indicator	знакосинтезирующий индикатор
<i>Екран</i>	screen	экран
<i>Енергетичний вихід</i>	energy efficiency	энергетический выход
<i>Діафрагма</i>	diaphragm	диафрагма
<i>ЕПТ (електронно-променева трубка)</i>	electron beam tube	электронно-лучевая трубка
<i>Тіньова маска</i>	shadow mask	Теневая маска
<i>Люмінофор</i>	luminoaphore	люминофор
<i>Люмінесценція</i>	luminescence	люминесценция
<i>Анод</i>	anode	анод
<i>Катод</i>	cathode	катод
<i>Сегмент</i>	segment	сегмент
<i>Квантовий вихід</i>	quantum yield	квантовый выход
<i>Коефіцієнт теплового випромінювання</i>	thermoreflectance coefficient	коэффициент излучения
<i>ККД (коефіцієнт корисної дії)</i>	energy conversion efficiency	коэффициент полезного действия
<i>Колоїдний розчин</i>	colloidal solution	коллоидный раствор
<i>Катушка відхилення</i>	deflection coil	катушка отклонения
<i>Плазмова панель</i>	plasma panel	плазменная панель
<i>Піксел</i>	pixel	пиксель
<i>Світлодіод</i>	LED	светодиод
<i>Рідкий кристал</i>	liquid crystal	жидкий кристалл
<i>Рідкокристалічна панель</i>	liquid crystal display	жидкокристаллическая панель
<i>Світловий вихід</i>	light yield	световой выход
<i>Спектр поглинання</i>	absorption spectrum	спектр поглощения
<i>Спектральна чутливість</i>	spectral sensitivity	спектральная чувствительность
<i>Фотоефект</i>	photo effect	фотоэффект

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алиев Т. М. Системы отображения информации : учеб. пособие для вузов по спец. «Автом. сист. обр. информации и упр.» / Алиев Т. М., Вигдоров Д. И, Кривошеев В. П. – М. : Высшая школа, 1988. – 223 с.
2. Яблонский Ф. М. Средства отображения информации : учебник для вузов спец. «Промышленная электроника» / Ф. М. Яблонский, Ю. В. Троицкий. – М. : Высшая школа, 1985. – 200 с.
3. Кочин Л. Б. Методы и средства отображения цветовой видеoinформации / Кочин Л. Б. – СПб. : БГТУ, 2012. – 268 с.
4. Источники и приемники излучения : учеб. пособие для студентов оптических специальностей вузов / [Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев и др.]. – СПб. : Политехника, 1991. – 240 с.
5. Солдатов А. И. Электронные средства обработки и отображения информации : учебное пособие / Солдатов А. И. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 177 с.
6. Вениаминов А. В. Оптические системы записи, хранения и отображения информации : учебное пособие / А. В. Вениаминов, В. Н. Михайлов. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 94 с.
7. Якимов О. П. Газоразрядные матричные индикаторные панели / Якимов О. П. – М. : Сов. радио, 1980. – 72 с. (Серия «Элементы радиоэлектронной аппаратуры». Вып. 41).
8. Быков Р. Е. Основы телевидения и видеотехники : учебник для вузов / Быков Р. Е. – М. : Горячая линия-Телеком, 2006. – 399 с.
9. Павлов В. А. Устройства отображения ПК : учебное пособие / Павлов В. А. – Саратов : СарФТИ, 2003. – 305 с.
10. Кожем'яко В. П. Сучасні методи відображення інформації. Ч. 1. Дискретні системи відображення інформації : навчальний посібник / Кожем'яко В. П., Васюра А. С, Дорощенко Г. Д. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 106 с.
11. Применение полупроводниковых индикаторов / [Н. Н. Васерин, Н. К. Дадерко, Г. А. Прокофьев и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
12. Смирнов В. М. Устройства отображения информации : учебное пособие / Смирнов В. М. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2007. – 91 с.
13. Мочалкина О. Р. Элементы оптоэлектроники / О. Р. Мочалкина, Ю. А. Воронов. – М. : МИФИ, 1989. – 61 с.
14. Мазур А. И. Электрохимические индикаторы / А. И. Мазур, В. Н. Грачев. – М. : Радио и связь, 1985. – 128 с. – (Массовая библиотека инженера «Электроника». Вып. 47).
15. Амосова Л. П. Полупроводниковые и жидкокристаллические устройства для систем оптической обработки информации : учебное пособие / Л. П. Амосова, В. Л. Комолов. – СПб. : НИУ ИТМО, 2014. – 122 с.

Навчальне видання

**Крилик Людмила Вікторівна
Селецька Олена Олександрівна
Сухоцька Ірина Володимирівна**

ЗАСОБИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ Частина 1

Навчальний посібник

Рукопис оформила Л. Крилик

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет виготовив О. Ткачук

Підписано до друку 29.11.2018 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 4,92.
Наклад 50 (1–21) пр. Зам. № 2018-211.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.