

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

Юрій Корчак, Юрій Фургала, Сергій Рихлюк

ОПТОЕЛЕКТРОННА ІНФОРМАТИКА

Навчальний посібник

Том I

Основні принципи та прилади

Львів
ЛНУ імені Івана Франка
2016

УДК 621.38

ББК 32.854

Рецензенти:

д-р техн. наук, професор Б. П. Русин,

д-р фіз.-мат. наук, професор О. Г. Сливка,

д-р фіз.-мат. наук, професор М. П. Трубіцин

Рекомендовано до друку Вченою Радою Львівського університету імені Івана Франка (протокол № 12/12 від «23» грудня 2015 р.)

Корчак Ю.

К 96 Оптиелектронна інформатика. Том I. Основні принципи та прилади: навчальний посібник / Ю. Корчак, Ю. Фургала, С. Рихлюк. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 406 с.

Посібник містить теоретичний матеріал, опис лабораторних експериментів з оптиелектронної інформатики. У першому томі висвітлено загальні питання оптиелектроніки, зокрема, фізичні принципи та явища, які використовують в оптиелектроніці, описано її елементну базу, технологічні аспекти виготовлення оптиелектронних приладів. Наведено методику та техніку лабораторних експериментів з оптиелектроніки та характеристики відповідних приладів.

Для студентів 3–4 курсів спеціальностей «Комп'ютерні науки та інформаційні технології», «Мікро- та наносистемна техніка», а також для інженерів і науковців, які цікавляться питаннями електроніки, оптиелектроніки, інформатики.

УДК 621.38

ББК 32.854

ISBN ...

© Корчак Ю., Фургала Ю., Рихлюк С., 2016

© Львівський національний університет
імені Івана Франка, 2016

ЗМІСТ

Передмова	7
Розділ 1. Фізичні принципи роботи елементів оптоелектроніки	12
1.1. Оптоелектроніка як галузь науки і техніки, її поява та розвиток.	
Розширення меж оптоелектроніки	12
1.2. Фізичні принципи і явища оптоелектроніки	17
1.3. Складові частини ОЕ. Елементна база. Темпи розвитку. Вимоги до сучасної ОЕ	27
Лабораторна робота 1.1. Визначення ширини забороненої зони напівпровідників за краєм власного поглинання	33
Тестові завдання та контрольні питання до розділу 1	48
Розділ 2. Дискретні джерела оптичного випромінювання	52
2.1. Напівпровідникові джерела світла, конструкція і робота	52
2.2. Основні параметри СД та методи їх вимірювання	63
2.3. Модуляція випромінювання СД високочастотним та імпульсним збудженням. Термічне насичення	70
2.4. Напівпровідникові лазери та їх характеристики	72
2.4.1. Особливості напівпровідникових лазерів як джерел світла для ОЕ. Умови підсилення	72
2.4.2. Лазерні моди	82
2.4.3. Характеристики лазерів: вольт-амперні, ват-амперні, спектральні, частотні	86
2.4.4. Джерела довгохвильового випромінювання	94
2.4.5. Надійність НПЛ. Механізми деградації	95
Лабораторна робота 2.1. Вимірювання та аналіз основних характеристик джерел світла для оптоелектроніки	98
Тестові завдання та контрольні питання до розділу 2	103
Розділ 3. Приймачі оптичного випромінювання	110
3.1. Класифікація приймачів оптичного випромінювання	110
3.2. Поглинання світла різними структурами	112
3.3. Фоторезистори	113
3.4. Фотодіоди: принцип роботи, характеристики, види та особливості	

	5
функціонування	118
3.5. Фототранзистори та фототиристори	129
3.6. Частотні та часові характеристики фотоприймачів	142
3.7. Шуми та виявляюча здатність фотоприймачів	144
Лабораторна робота 3.1. Світлові характеристики фотоприймачів	148
Лабораторна робота 3.2. Часові характеристики фотоприймачів	150
Тестові завдання та контрольні питання до розділу 3	159
Розділ 4. Багатoeлементні приймачі випромінювання	162
4.1. Відикони	162
4.2. Сканістори	165
4.3. Фотодіодні лінійки і матриці	166
4.4. Прилади із зарядовим зв'язком	168
4.5. КМОН-фотоприймачі	193
Лабораторна робота 4.1. Керування роботою приладів із зарядовим зв'язком	210
Тестові завдання та контрольні питання до розділу 4	215
Розділ 5. Оптипарі, їхні переваги як елементів зв'язку	221
5.1. Оптипарі з прямим оптичним зв'язком	222
5.1.1. Резисторні оптипарі	222
5.1.2. Діодні оптипарі	224
5.1.3. Транзисторні оптипарі	225
5.1.4. Тиристорні оптипарі	227
5.2. Характеристики та параметри оптипар	228
5.3. Оптипарі з електрооптичним та зовнішнім оптичним зв'язком	234
5.4. Інтегральне виконання оптипар	237
5.5. Перспективні напрями розвитку і застосування оптипар	239
Лабораторна робота 5.1. Вивчення роботи різних видів оптипар	243
Тестові завдання та контрольні питання до розділу 5	244
Розділ 6. Особливості конструкції та принципи відображення інформації різними типами індикаторних пристроїв	250
6.1. Фізичні принципи в індикаторній техніці	250
6.1.1. Системи відображення інформації. Індикатори	250
6.1.2. Фізіологічні основи індикаторної техніки	254

	6
6.1.3. Фізичні принципи роботи індикаторів	261
6.2. Екрани та дисплеї	264
6.2.1. Екрани на електронно-променевих трубах	264
6.2.2. Напівпровідникові індикатори	267
6.2.3. Рідкокристалічні індикатори	270
6.2.4. Газорозрядні та плазмові індикатори	282
6.2.5. Дисплеї з електролюмінесцентним індикатором	291
6.2.6. Дисплеї з емісією полем	293
6.2.7. Екрани на основі органічних світлодіодів	295
6.3. Сучасні різновиди екранів	300
6.3.1. Екрани <i>E-Ink</i>	300
6.3.2. Екрани на холестеричних рідких кристалах	301
6.3.3. Рідкокристалічні дисплеї на основі нематиків з пам'яттю	309
6.3.4. Екрани <i>Pixel Qi</i>	314
6.3.5. <i>IMOD</i> -екрани	317
6.3.6. <i>P-Ink</i> -екрани	323
6.3.7. Електрохромні екрани	325
6.3.8. Електрофоретичні дисплеї із зворотною емільсією	329
6.3.9. Технологія <i>Liquavista</i>	331
6.3.10. Електрорідинні екрани <i>Gamma Dynamics</i>	339
6.3.11. Технологія <i>Bridgestone QR-LPD</i>	340
6.3.12. Екрани <i>SiPix</i>	343
Лабораторна робота 6.1. Дослідження характеристик людського зору	348
Тестові завдання та контрольні питання до розділу 6	350
Розділ 7. Технологія виготовлення оптоелектронних пристроїв	362
7.1. Технологічні операції при виготовленні електронних пристроїв	362
7.1.1. Очищення та підготовка вихідних речовин	362
7.1.2. Вирощування монокристалів	365
7.1.3. Орієнтування та розрізання монокристалів на пластини	371
7.1.4. Механічна та хімічна обробка поверхні	375
7.1.5. Літографічні процеси	378
7.1.6. Збирання та контроль параметрів	381
Лабораторна робота 7.1. Вирощування монокристалів	384

	7
Лабораторна робота 7.2. Вакуумні методи нанесення тонких плівок	388
Тестові завдання та контрольні питання до розділу 7	392
Список літератури	395
Предметний покажчик	400

Передмова

У другій половині ХХ ст. на перетині оптики та електроніки виник новий напрям в області засобів обробки інформації – оптоелектроніка. Оптоелектронікою називають розділ електроніки, який базується на комплексному застосуванні оптичних та електричних засобів обробки інформації. Основу оптоелектроніки складають процеси перетворення електричних сигналів у світлові та світлових сигналів у електричні, а також перетворення оптичних сигналів під впливом зовнішніх полів. Початково багато спеціалістів називали оптоелектронікою порівняно вузьку область науки та техніки, яка розглядала лише фотоприймачі та світловипромінювачі. Оптипари розглядалися як пасивні кола, головним призначенням яких вважали гальванічну розв'язку електричних кіл. Однак успіхи, досягнуті останнім часом у цій області, змінили поняття оптоелектроніки. З'явилися терміни «функціональна оптоелектроніка», «багатофункціональні оптоелектронні модулі» тощо. Отож сьогодні оптоелектроніка стала багатогранним науковим напрямом, який загалом спрямовано на вирішення завдань інформатики. В обіг увійшло поняття *оптоелектронної інформатики* – розділу інформатики, в якому створення, передачу, обробку, збереження та відтворення інформації здійснюють за допомогою оптоелектронних пристроїв та систем.

Оптоелектроніка володіє декількома специфічними властивостями, які обумовлюють її широкі можливості. Наприклад, на відміну від електричного сигналу світловий сигнал володіє двома просторовими вимірами, отож може бути промодульований не тільки за часом, а й у просторі. Внаслідок цього оптичний промінь є в інформаційному відношенні системою, яка складається із великої кількості взаємозв'язаних паралельних каналів, що відкриває величезні можливості для паралельної обробки інформації – необхідної умови створення надпродуктивних обчислювальних систем [17].

Іншою специфічною властивістю оптичних методів обробки інформації є безконтактність оптичних зв'язків. Ця властивість надає низку переваг оптоелектронним системам, оскільки безконтактний оптичний зв'язок

забезпечує ефективну електричну розв'язку, не вимагає механічних контактів, не вносить частотних обмежень і, як наслідок, не перешкоджає подальшій мікромініатюризації апаратури.

Важливою рисою сигналів, які формують оптоелектронні пристрої, є їхня візуальність – здатність сприймати їх органами зору людини безпосередньо, що дає змогу значно пришвидшити обмін інформацією між електронними системами та людиною.

Переваги оптоелектроніки полягають у значній інформаційній ємності оптичних каналів зв'язку, зумовленій високою частотою електромагнітних коливань світла ($\sim 10^{15}$ Гц), а також – високій енергетичній густині оптичного випромінювання всередині світловоду, що дає змогу мінімізувати поперечні розміри оптичного волокна.

Виокремлюють два головні напрями оптоелектроніки: когерентну (на основі застосування лазерної техніки) та некогерентну (на основі напівпровідникових світловипромінювачів та фотоприймачів). Ці два напрями доповнюють один одного та мають спільну мету – створити пристрої, які працюють на оптико-електронних чи електронно-оптичних принципах, де під час зберігання, обробки та передачі інформації використовують електричні заряди разом з електрично нейтральними фотонами.

Загальний розвиток галузі оптоелектронної обробки інформації відбувається за трьома напрямками: розробляють принципово нові методологічні основи побудови інформаційних систем; розвивають технічні основи побудови оптоелектронних систем; розробляють і створюють власне оптоелектронні системи обробки інформації. Поступово значне поширення отримають такі класи систем обробки оптичної інформації, як обчислювальні, оглядово-пошукові, відстежувальні, навігаційні та орієнтувальні системи; розпізнавальні і запам'ятовуючі, а також системи відображення й передавання інформації. З достатньою впевненістю можна передбачати, що майбутнє оптоелектронних систем насамперед необхідно базувати на голографічних методах обробки інформації, на методах асоціативності під час розподілу і вироблення інформації та на методах оптимального огляду інформаційних

областей. Зокрема, методи голографії вирішують проблему так званого повного виміру, який в оптичному діапазоні хвиль зводиться до задачі одночасної реєстрації амплітудної та фазової інформації про світлову хвилю, яка поширюється від предмета. На основі використання властивостей голограм можна створити високонадійні обчислювальні, запам'ятовуючі та розпізнавальні системи, а також системи тривимірного представлення інформації.

Використання принципів асоціативності дає змогу створювати оптоелектронні обчислювальні, запам'ятовуючі та розпізнавальні системи, які володіють принципово новими можливостями як за пропускну здатністю, так і за швидкістю.

Розробка методів оптимального огляду за пошуку в інформаційному просторі (чи площині) об'єктів, які володіють заданими характеристиками, має велике значення для низки класів оптоелектронних інформаційних систем. Зазначимо, що за використання різних стратегій огляду інформаційних просторів можна отримати істотно відмінні результати пошуку, причому найкращою результативністю володітиме такий процес пошуку, в якому максимально враховують апіорні відомості про простір огляду.

Сьогодні розроблено значну кількість елементних вирішень, на основі використання яких можна створити високоефективні оптоелектронні системи обробки інформації. Доволі перспективними елементами оптоелектронних систем можна вважати квантово-механічні генератори, волоконно-оптичні елементи, електролюмінесцентні пристрої, а також напівпровідникові мікроелектронні та інтегральні схеми.

Застосування оптоелектронної схемотехніки відкриває широкі можливості у підвищенні ефективності низки спеціалізованих інформаційно-вимірювальних та обчислювальних пристроїв. Саме з цих позицій висока сумісність і завадозахищеність схемотехніки функціональної оптоелектроніки вказує на нові перспективи під час організації однорідних обчислювальних середовищ у вигляді «операційних екранів» – спеціальних процесорів для обробки зображень з розширеними інтелектуальними властивостями

обчислювальної техніки. Отже, оптоелектронна схемотехніка досягла рівня розвитку, який дає змогу будувати різноманітні структури з розширеними функціональними можливостями зберігання та обробки великих масивів інформації. Наявність фотонного зв'язку оптичної ланки сприяє значному підвищенню густини інформації в каналі зв'язку, його швидкодії, завадозахищеності функціональних елементів та вузлів, їхній схемотехнічній гнучкості та надійності.

Оптоелектронна інформатика – один із базових навчальних курсів спеціальності «Комп'ютерні науки та інформаційні технології», адже її елементну базу, методи та засоби сьогодні значною мірою використовують для обробки, накопичення, зберігання інформації, розпізнавання та візуалізації зображень і текстів тощо. Мета першого тому цього навчального посібника – ознайомити студентів з головними оптоелектронними явищами і матеріалами, технологічними аспектами створення на їхній базі приладів та пристроїв, а також напрямками використання останніх. Під час вивчення теоретичного курсу, виконання лабораторних робіт з оптоелектронної інформатики студенти набувають відповідних теоретичних знань і практичних навичок. Викладення матеріалу базується на попередньому засвоєнні загальних курсів фізики, електроніки, математичних дисциплін, зокрема, основ математичного аналізу та лінійної алгебри. Окрім того, перед проходженням лабораторного практикуму з оптоелектронної інформатики студенти мають ознайомитись з охороною праці під час роботи з електричними джерелами та під час експлуатації джерел світла (зокрема, лазерів).

Для зручності користувача цей навчальний посібник поділено на сім розділів. Вони стосуються таких загальних питань оптоелектронної інформатики, як оптоелектронні явища та ефекти, некогерентні та когерентні джерела випромінювання, дискретні та багатоелементні фотоприймачі, оптопари, індикаторні пристрої, основи технології оптоелектронних пристроїв. Значну увагу в посібнику приділено сучасним досягненням у створенні елементної бази оптоелектронної інформатики.

Усі лабораторні роботи та експериментальні завдання, описані в посібнику, навряд чи реально виконати в рамках навчального часу, відведеного на практикум з оптоелектронної інформатики. Кожна навчальна лабораторія відповідного профілю може обрати роботи з будь-якого розділу, залежно від забезпеченості апаратурою, або ті, що краще відповідають спеціальностям і спеціалізаціям, за якими готують студентів.

Вибірковому вивченню матеріалів посібника сприятиме доволі розгорнутий список термінів. Наприкінці кожного розділу посібника наведено тестові завдання та контрольні питання для повторення, які можна використовувати з метою кращої підготовки до лабораторних і практичних занять та під час підготовки до підсумкового іспиту. Автори подали докладний список літератури, що допоможе читачам відшукати книги та електронні ресурси, де повніше описано те чи інше фізичне явище, експериментальну методику або апаратуру, а також самостійно ознайомитися з літературою за темами вузької спеціалізації.

Матеріал посібника відповідає програмі навчального курсу «Оптоелектронна інформатика» для спеціальності «Комп'ютерні науки та інформаційні технології», а також частково стосується спеціальних курсів «Оптичні методи запису та обробки інформації», «Візуалізація зображень», «Розпізнавання образів та оптоелектронні інформаційні системи», «Обробка зображень та голографія», «Інтелектуальні сенсорні системи» та ін.

Посібник призначено насамперед для студентів, які спеціалізуються з комп'ютерних наук та інформаційних технологій. Він знадобиться студентам під час виконання кваліфікаційних робіт за спорідненою тематикою, а також зацікавить інженерів і молодих науковців, які працюють у галузі оптики, електроніки, оптоелектроніки та інформатики.

Розділ 1. ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1. Оптоелектроніка як галузь науки і техніки, її поява та розвиток.

Розширення меж оптоелектроніки

Оптоелектроніка (ОЕ) – розділ електроніки, який охоплює ефекти взаємодії оптичного випромінювання з електронами у речовинах (здебільшого у твердих тілах) і методи створення приладів та пристроїв, які використовують ці ефекти для отримання, перетворення, передавання, зберігання та відображення інформації [17].

Як самостійний розділ науки і техніки ОЕ сформувалась наприкінці 50-х – на початку 60-х років ХХ століття, коли з'явилися перші лазери і випромінюючі діоди – прилади, достатньо зв'язані як з електронікою, так і з оптикою, проте з унікальними технічними характеристиками, відмінними від параметрів інших випромінювачів. Очевидно, що до цієї міждисциплінарної області можна було зачислити і значну кількість вже відомих фотоприймачів – фотоопорів, фотодіодів, фотоелементів і т.п. У наступному десятилітті створили перші зразки нових приладів оптоелектроніки, такі як: рідкокристалічні індикатори (1966–1968); прилад із зарядовим зв'язком (1969); оптичні запам'ятовуючі пристрої (1966–1967). Зокрема, 1969 року співробітники американської компанії *Bell Laboratories* Джордж Їлвуд Сміт (*Smith*) та Віллард Бойл (*Boyle*) вперше експериментально продемонстрували принцип зарядового зв'язку на прикладі аналогового регістра зсуву на 8 елементів, що у подальшому стало передумовою створення приладу із зарядовим зв'язком як твердотілого багатеlementного фотоприймача. За цей винахід 2009 року вони отримали половину Нобелівської премії з фізики.

Ідея створення волоконно-оптичних світлопроводів виникла 1966 року, а її реалізацію на практиці почали 1970 року. Автором ключових досліджень цього часу у галузі розробки та практичного застосування технологій, які значно вплинули на розвиток індустрії, слід вважати китайського інженера-

фізика Чарльза Куена Као (*Kao*). Зокрема, 1966 року у своєму звіті щодо досліджень у лондонській лабораторії *ITT Corporation* він описав головні особливості волоконно-оптичних телекомунікаційних технологій, зокрема: високі втрати у передаванні даних по волокну спричинені не самою технологією, а домішками в склі; задля перенесення інформації всередині волоконно-оптичних каналів без істотних втрат величина загасання повинна перевищувати 20 дБ/км, тобто встановили порогове значення величини загасання сигналу. Викладені у цьому документі ідеї щодо використання волокна для потреб зв'язку сьогодні є основою телекомунікацій. Враховуючи ці обставини, група вчених на чолі з Као протестувала різні матеріали і дійшла висновку, що ідеальним кандидатом для оптичного зв'язку є кварц, в якому спостерігали найменший рівень загасання сигналу. Саме Као першим запропонував використовувати волоконно-оптичні кабелі для передавання інформації на великі відстані (до цього їхня дальність становила кілька метрів). Отож 2009 року Као отримав половину Нобелівської премії з фізики за «новаторські досягнення в галузі передачі світла по волокнах для оптичного зв'язку».

У 60-х роках ХХ століття поступово зароджуються технології мікромініатюризації елементів та пристроїв ОЕ, які поклали початок інтегральній оптиці.

Справжню революцію у розробці та створенні напівпровідникових світлодіодів здійснили 1989 року японські інженери-електронники та фізики Акасакі Ісаму (*Isamu Akasaki*), Аmano Хіроші (*Hiroshi Amano*) та Накамура Шюджі (*Shiji Nakamura*), які створили світлодіод на основі нітриду галію, що випромінює блакитне світло, – нове енергозберігаюче та екологічне джерело світла. Їх оголосили лауреатами Нобелівської премії з фізики за 2014 рік.

Усе нове зароджується в надрах старого, у цьому сенсі ОЕ не є винятком. Її витoki можна відшукати у дослідженнях голландського вченого Христіана Гюйгенса (*Huygens*), який опублікував 1690 року роботу з хвильової теорії світла; у фундаментальній праці «Оптика» (1704) всесвітньо відомого англійського вченого Ісаака Ньютона (*Newton*), який відкрив дисперсію світла,

розвинув корпускулярну теорію світла, висловив гіпотезу, що об'єднувала корпускулярні та хвильові уявлення про світло, визначив склад білого світла на основі розкладу з допомогою призми сонячного променя на світло спектральних кольорів; у працях першого російського вченого-експериментатора світового значення Михайла Васильовича Ломоносова, який розвинув вчення про колір, створив низку оптичних приладів; у працях одного з перших російських електротехніків Василя Володимировича Петрова, який відкрив електричну дугу (1802), досліджував електропровідність речовин, люмінесценцію; у дослідженнях французького фізика Етьєна Луї Малюса (*Malus*), який відкрив поляризацію світла і встановив залежність (закон Малюса) інтенсивності лінійно поляризованого світла, що проходить крізь аналізатор, від кута між площинами поляризації світла і приладу (1810).

Ідея системного використання світлового потоку як носія інформації виникла близько ста п'ятидесяти років тому (у другій половині XIX – на початку XX століття), коли відкрили основні фізичні ефекти, що використовують в ОЕ. Дослідник електромагнітного поля, англійський фізик Майкл Фарадей (*Faraday*) розкрив зв'язок між електрикою і магнетизмом, магнетизмом і світлом. Він відкрив ефект повороту площини поляризації світла в магнітному полі (ефект Фарадея). Ідею електромагнітної природи світла висунув англійський фізик Джеймс Клерк Максвелл (*Maxwell*), а німецький фізик Генріх Рудольф Герц (*Hertz*) довів експериментально тотожність основних властивостей електромагнітних і світлових хвиль, відкрив зовнішній фотоефект (1887).

Дещо раніше (1873) внутрішній фотоефект (власне фотопровідність) у речовинах відкрив американець Уїлоубі Сміт (*Smith*). Винахідник телефону (1875) професор Бостонського університету (США) Александр Белл (*Bell*) 1880 року запропонував, фактично, перший оптоелектронний апарат – фотофон (прилад для передавання на відстань звуків з допомогою світла), робота якого базувалася на властивості фотопровідності селену, що змінювалася під дією світлових променів, відбитих вібруючим від звуку дзеркалом (перший «акустооптичний» модулятор).

Засновник фізичної лабораторії Московського університету Олександр Григорович Столетов створив 1886 р. експериментальний зразок вакуумного фотоелементу, відкрив 1888 р. перший закон фотоефекту (закон Столетова), який встановив зв'язок між світловим потоком і фотострумом приймача випромінювання. Цього ж року австрійський учений-ботанік Фрідріх Рейнітцер виявив рідкокристалічний стан у деяких органічних речовинах, наприклад у бензойнокислому холестерині (як зазначено вище, активно використовувати рідкі кристали почали лише через 80 років, оскільки у той час вчені не бачили перспектив їхнього практичного використання). Можливість поширення світла уздовж криволінійної траєкторії завдяки ефекту повного внутрішнього відбивання продемонстрував ще 1870 року англійський фізик Джон Тиндал (*Tyndall*), і лише через століття цей ефект почали активно використовувати у волоконних світловодах. Ще один фізичний феномен – п'єзоефект, який широко використовують сьогодні в ОЕ (а також у багатьох інших галузях науки і техніки), відкрив 1880 року майбутній нобелівський лауреат (1903) французький фізик П'єр Кюрі (*Curie*).

Німецький фізик Макс Планк (*Planck*), у подальшому лауреат Нобелівської премії (1918), засновник квантової теорії, увів 1900 року поняття кванту дії (постійна Планка, яка зв'язує частоту випромінювання з його енергією). Всесвітньо відомий фізик Альберт Айнштайн (*Einstein*) увів 1905 року поняття фотона, встановив закони фотоефекту, за що отримав Нобелівську премію (1921). А 1917 року А. Айнштайн зробив важливе відкриття: теоретично розглядаючи електронні переходи в атомах за генерації світла, він з'ясував, що можливим є процес вимушеного (індукованого) випромінювання, тобто підсиленої генерації світла активним середовищем. Росіяни Олександр Михайлович Прохоров і Микола Геннадійович Басов, а також, незалежно від них, американець Чарльз Хард Таунс (*Townes*) цей процес реалізували 1954 року у створеному ними молекулярному генераторі (мазері), який працював у радіочастотному діапазоні на довжині хвилі 1,24 см. За це відкриття Ч.Х. Таунс, О.М. Прохоров і М.Г. Басов отримали Нобелівську премію (1964).

Поява лазерів підштовхнула до розвитку голографії – способу запису світлових потоків когерентного випромінювання, які несуть інформацію не тільки в амплітуді й частоті світлових хвиль, а й у фазі коливань. Перші лазерні голограми отримали вже 1961 року, а принцип описав ще 1947 року вчений угорського походження (працював у Німеччині, Великобританії, США) Денніс (Денеш) Габор (*Gabor*), нагороджений Нобелівською премією з фізики (1971) за винайдення і розвиток голографії.

Зародженню ОЕ сприяли досягнення і в області дослідження властивостей напівпровідникових матеріалів. Виникнення подвійного променезаломлення в несиметричних кристалах, поміщених у постійне електричне поле («ефект Погкельса», який використовують в оптоелектронних приладах), відкрив 1894 р. німецький фізик Фрідріх Погкельс (*Pockels*). Російський радіофізик Олег Володимирович Лосєв створив напівпровідниковий приймач – кристадин (1922), відкрив низку явищ у кристалічних напівпровідниках («свічення Лосєва» тощо). Американські фізики Джон Бардін (*Bardeen*) та Уолтер Браттейн (*Brattain*) відкрили транзисторний ефект і створили перший транзистор (1948), а Уільям Шоклі (*Schockley*) 1949 року розробив теорію електронно-діркового переходу (який відіграє важливу роль у багатьох оптоелектронних перетвореннях). За ці досягнення Д. Бардін, У. Браттейн та У. Шоклі нагороджені Нобелівською премією (1956). Зазначимо, що Нобелівські премії присуджують за видатні наукові результати світового значення, і те, що ці досягнення активно використовують в оптоелектроніці, засвідчує її значимість і солідну наукову базу.

1.2. Фізичні принципи і явища оптоелектроніки

Згідно з теорією будови атомів (від грецьк. *atomos* – неподільний, оскільки *атом* є найдрібнішою частинкою хімічної речовини, яка зберігає її властивості), у центрі атома знаходиться позитивно заряджене ядро, в якому сконцентрована майже вся його маса, а навколо ядра обертаються електрони, утворюючи електронні оболонки. Кількість електронів залежить від маси і

заряду ядра. Від кількості електронів залежить кількість електронних оболонок атома. Атоми можуть приєднувати чи віддавати електрони, утворюючи позитивно чи негативно заряджені іони. Основні взаємодії атома з оточуючим середовищем здійснюють електрони зовнішньої оболонки. Ці електрони можуть поглинати чи віддавати певні порції енергії, переходячи при цьому на різні енергетичні рівні (різні відстані до атомного ядра) зовнішніх оболонок. Оскільки енергія електрона на тому чи іншому рівні ввідрізняється, прийнято говорити про нормальний чи збуджений стан електронів зовнішньої оболонки, а звідси – про такий самий стан їхніх атомів.

Збудження атомів може спричинити дія тепла, світла, електричного поля. Найдрібніші частинки – носії властивостей будь-якого фізичного поля – називають *квантами* (від нім. *quant* – зменшеного від лат. *quantum* – скільки; мінімальна кількість, на котру може змінюватися дискретна величина). *Фотон* (від грецьк. *photos* – світло) є квантом поля електромагнітного випромінювання оптичного діапазону.

Поглинаючи енергію фотона, електрон збуджується і переходить на вищий енергетичний рівень. Втрачаючи енергію, електрон ніби переходить у спокій, повертається у нормальний стан. Однак, згідно з квантовою теорією, втрачати (як і набувати) енергію електрони можуть тільки дискретними порціями, квантами. Тому перехід електрона в нормальний стан може супроводжуватися виділенням кванта світла – фотона.

Фотоефектом називають перерозподіл електронів за енергетичними станами внаслідок поглинання речовиною фотонів. Фотоефект спостерігається як у газах, так і в конденсованих середовищах. У результаті поглинання фотона електрон отримує додаткову енергію. Якщо набута електроном енергія перевищує енергію іонізації атома (молекули) в газах чи роботу виходу електронів у конденсованих середовищах, то є можливою емісія електронів у вакуум чи інше середовище. Такий фотоефект називають *зовнішнім*, чи *фотоелектронною емісією* (для конденсованих середовищ), чи *фотоіонізацією* (для газів). У напівпровідниках фотоефект проявляється зміною електропровідності (появою фотопровідності) чи виникненням

фотоелектрорушійної сили. Такий фотоефект називають *внутрішнім* або *фотогальванічним* [8].

Дія більшості оптоелектронних приладів базується на ефектах взаємодії фотонів і електронів, на фотоефектах. Причому в багатьох випадках як основні оптоелектронні матеріали використовують напівпровідники. Як відомо, напівпровідники за електропровідністю займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Відмінність в електропровідності цих матеріалів фізично пояснюють такою обставиною.

Для того, щоб стати електропровідною, речовина повинна володіти великою кількістю вільних, не зв'язаних з атомами електронів, переведених у збуджений стан. Енергетичні рівні нормального стану електрона називають *валентною зоною*, а рівні, на яких можуть знаходитися збуджені електрони, – *зоною провідності*. У провідників ці дві зони можуть дотикатися між собою чи навіть перекриватися; у діелектриків і напівпровідників між цими зонами знаходиться так звана *заборонена зона* (рис. 1.1), обумовлена дискретністю енергетичного квантового переходу електронів. Енергії, необхідні для подолання електронами забороненої зони, у різних речовин різняться.

Чим легше електрони речовини переходять у збуджений стан, тим менше необхідно енергії для цього. Електрони у провідниках настільки рухливі внаслідок дотику (чи накладання) меж між нормальним і збудженим енергетичними станами, що вони майже не потребують додаткової енергії. На атомному рівні енергію прийнято вимірювати в електрон-вольтах. Один електрон-вольт відповідає енергії, яку набуває електрон під час проходження прискорюючої різниці потенціалів в 1 В. Ширину забороненої зони часто виражають в електрон-вольтах: E_g [eV]. Речовини зі значенням $E_g > 4$ eV вважають *діелектриками* [8]. Для *провідників* $E_g = 0$, якщо валентна зона і зона провідності дотикаються, $E_g > 0$ – за їхнього накладання.

Для *напівпровідників*, які використовують в оптоелектроніці, $E_g = 0,16 - 3,7$ eV (наприклад, за температури 300 К у найтипівіших: кремнію (Si) – 1,11 eV, германію (Ge) – 0,67 eV, арсеніду галію (GaAs) – 1,43 eV, карбіду кремнію (SiC) – 2,2 eV, фосфіду галію (GaP) – 2,26 eV, нітриду галію (GaN) –

3,5-3,7 еВ [33]). Ці та деякі інші напівпровідникові матеріали мають особливе значення в оптоелектроніці, оскільки дають змогу керувати електронними процесами в речовині з допомогою електрично нейтрального світлового сигналу, і навпаки, піддаються впливу на оптичні властивості матеріалу електричними імпульсами.



Рис. 1.1. Схема енергетичних зон для різних матеріалів

Крім фотоефектів до основних ефектів оптоелектроніки відносяться такі ефекти [46]:

Нелінійні оптичні ефекти – це нелінійні відгуки на потужне оптичне випромінювання. До них належать ефект Рамана та ефект Бриллюена. *Ефектом Рамана* називають розсіяння монохроматичного випромінювання (випромінювання однієї довжини хвилі) в речовині, за якого у спектрі розсіяного світла з'являються нові, характерні для цієї речовини лінії, що відрізняються від спектральної лінії джерела. *Ефект Бриллюена* – це розсіяння, що виникає внаслідок взаємодії акустичного фонона з оптичним випромінюванням зі зміщенням ліній на частоту фонона. Вимушений ефект Бриллюена виникає під дією дуже інтенсивних світлових пучків збуджуючого світла.

Магнітооптичні ефекти – це зміна оптичних властивостей (відбивання, пропускання, поляризації та ін.) речовини залежно від її намагніченості чи від прикладеного до неї магнітного поля. Найвідоміший з магнітооптичних ефектів – *ефект Фарадея* (поворот площини поляризації світла за проходження через середовище, яке знаходиться в магнітному полі).

Електрооптичні ефекти – *ефект Поккельса* (зміна коефіцієнта заломлення пропорційно до прикладеного електричного поля – нелінійне явище другого порядку) та *ефект Керра* (зміна коефіцієнта заломлення пропорційно до квадрата прикладеного електричного поля – нелінійне явище третього порядку).

Акустооптичні ефекти – це явище заломлення, дифракції, відбивання чи розсіювання світла на періодичних неоднорідностях середовища, спричинених пружними деформаціями під час проходження ультразвуку. Акустооптичні ефекти бувають двох видів: за низької частоти ультразвуку і малої ширини фронту ультразвукової хвилі виникає *дифракція Рамана - Ната*. Якщо частота ультразвуку висока і ширина фронту велика, то виникає *дифракція Брегга*.

Вимушене випромінювання світла. Взагалі випромінювання світла може відбуватися двома способами. За першого способу електрони в атомі, які знаходяться на високому енергетичному рівні, без зовнішнього впливу переходять на нижчий енергетичний рівень, випромінюючи при цьому квант світла (так зване *спонтанне випромінювання*). За другого способу електрони, які знаходяться на високому рівні, зазнають впливу світла з певною довжиною хвилі, причому атом випромінює світло, яке за довжиною хвилі і фазою цілковито тотожне впливу. Це і є *вимушене (індуковане) випромінювання*.

Люмінесценція – це явище, за якого речовина, поглинаючи енергію світла чи будь-якого іншого випромінювання (або під впливом різних хімічних реакцій), переходить у збуджений стан, а далі, повертаючись у вихідний стан, випромінює отриману енергію у вигляді світла. Короткочасне люмінесцентне випромінювання, що припиняється майже відразу із закінченням збудження, називають *флуоресценцією*, а тривале, що продовжується і після закінчення

збудження, – *фосфоресценцією*. Залежно від способу збудження, люмінесценцію поділяють на декілька видів:

- *фотолюмінесценція* – свічення речовини за опромінення світлом;
- *катодна люмінесценція* – свічення речовини за опромінення пучком електронів;
- *електролюмінесценція* – свічення речовини під дією електричного поля;
- *хемілюмінесценція* – свічення, зумовлене хімічними реакціями, які проходять у речовинах;
- *антистоксова люмінесценція* – свічення, енергія (частота) котрого вище енергії (частоти) збуджуючого випромінювання, і *стоксова люмінесценція* – енергія (частота) свічення нижче енергії (частоти) збуджуючого випромінювання.

Окрім цього, згадаємо про такі характеристики світлового випромінювання, як поляризація і когерентність світла. *Поляризація* – це характеристика поведінки одного з ортогональних (площини яких завжди взаємно перпендикулярні) векторів E (напруженості електричного поля електромагнітної хвилі) чи H (напруженості магнітного поля електромагнітної хвилі). Розрізняють лінійну, колову та еліптичну поляризацію. За лінійної поляризації вектор H (чи вектор E , що в цьому випадку одне і те ж) поширюється вздовж осі Z (напрямок поширення) та знаходиться строго в площині $Y-Z$. За колової поляризації вектор H , поширюючись вздовж осі Z , обертається також і навколо цієї осі, не змінюючись за величиною. За еліптичної поляризації вектор H поширюється вздовж осі Z , обертається навколо неї і постійно змінює своє значення за певним законом. З наведених вище трьох типів поляризації найзагальнішим є еліптична поляризація, а лінійна і колова поляризації є частковими випадками еліптичної.

Когерентність – синфазність і синхронність вимушеного оптичного випромінювання, яке складається з великої кількості окремих мод (типів електромагнітних коливань). Когерентність притаманна лише вимушеним коливанням. Вона з'являється тільки за виконання певних умов і не є властивістю спонтанних (природних чи штучних) джерел випромінювання.

Когерентність є обов'язковою умовою лазерного випромінювання, саме вона надає йому специфічних особливостей – напрямленості та надзвичайно малої розбіжності лазерного пучка. Перетворювач некогерентного випромінювання в когерентне – це прилад, що перетворює випромінювання чи зображення, отримане у природному світлі, в когерентну картину. Він представляє собою оптичну пам'ять для запису зображення і просторовий модулятор для зчитування зображення шляхом опромінення запису лазером на основі ефекту Поккельса. Такі перетворювачі часто застосовують у голографії і в системах, які виконують кореляційні обчислення та Фур'є-аналіз у реальному часі.

Згідно з квантовою теорією Нільса Бора (*Bohr*), електрони в атомі можуть рухатися тільки уздовж визначених траєкторій (орбіталей). Чим ближча орбіталь електрона до атомного ядра, тим менший запас енергії атома, оскільки зі зменшенням відстані між різнойменними зарядами (протонами атомного ядра та електронами) їхня загальна енергія зменшується. Отож кожній орбіталі електрона відповідає свій енергетичний рівень. Як уже зазначено вище, перехід електрона з вищого енергетичного рівня на нижчий супроводжується виділенням кванта енергії. Існує взаємозв'язок між енергією, яка виділяється, і частотою електромагнітних коливань, що виникають при цьому. Частота коливань прямо пропорційна (коефіцієнт пропорційності називають постійною Планка) різниці енергій орбіталей електрона до і після переходу. Речовини, у котрих переходи електронів зумовлюють виникнення коливань з частотою, яка відповідає видимому діапазону спектра, є *світловипромінюючими*.

Світлом називають видиме для людського ока електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль від 380 до 780 нм, яке є частиною діапазону оптичного випромінювання. *Оптичним діапазоном* спектра електромагнітних коливань прийнято вважати діапазон коливань з довжиною хвилі від 1 мм до 1 нм (рис. 1.2). Враховуючи те, що, попри вказану залежність частоти коливань від енергії, яка виділяється під час переходу електронів з орбіталі на орбіталь, відомий обернено пропорційний зв'язок довжини хвилі коливань з їхньою частотою (добуток довжини хвилі на частоту рівний швидкості світла), величину оптичного діапазону можна виразити не тільки

шкалою довжин хвиль або частотою, а й енергією. Це відображає характерний для оптичного випромінювання дуалізм – в одних випадках проявляються його хвильові властивості, а в інших – квантові (корпускулярні). Ці властивості характерні для випромінювання не тільки видимої частини спектра, а й для інфрачервоного та ультрафіолетового, зведені в загальний оптичний діапазон.

Історично першою і тривалий час класичною була світлова система одиниць вимірювань, яка описує параметри оптичного випромінювання видимого діапазону. З виявленням факту приналежності світла до електромагнітних коливань почали користуватися енергетичною системою одиниць вимірювань, яка дає змогу виражати параметри випромінювань не тільки видимої частини спектра оптичного діапазону, а й його інфрачервоної та ультрафіолетової областей. Унаслідок інтенсивного розвитку техніки в цих областях сьогодні світлову систему вважають допоміжною, більшою мірою традиційною. Фактично за наявності тільки світлової системи вимірювань метрологія оптоелектроніки була б неможлива. Для розрізнення однакових параметрів у цих двох системах прийнято використовувати індекси *e* (*energetic*) і *v* (*visual*).

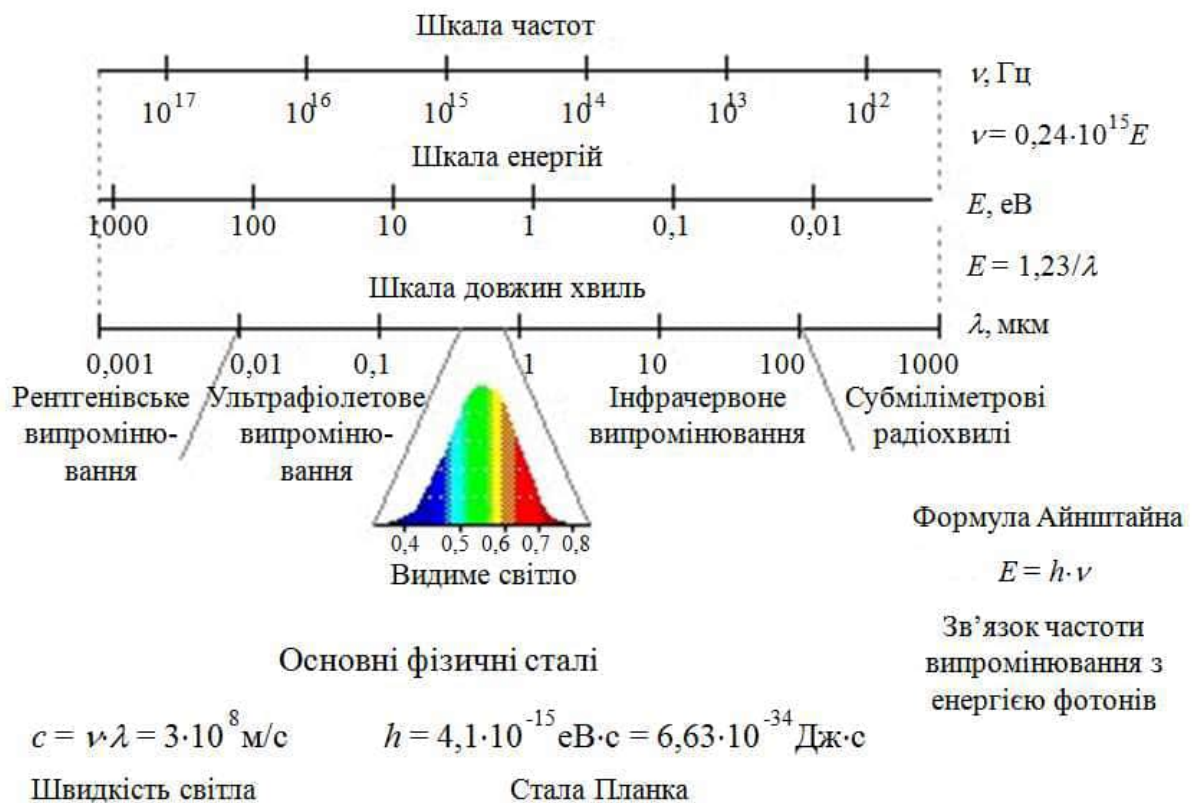


Рис. 1.2. Оптичний діапазон спектру електромагнітних коливань [8]

Головними параметрами (поряд зі згадуваними *частотами коливань* [герц], *довжинами хвиль* [мікрометр]), які описують оптичне випромінювання, є *потік випромінювань* Φ_e [ватт] (*світловий потік* Φ_v [люмен]), *сила випромінювання* I_e [ватт/стерадіан] (*сила світла* I_v [кандела]), *енергетична яскравість* L_e [ватт/м²·стерадіан] (*яскравість* L_v [кандела/м²]), *енергетична світність* M_e [ватт/м²] (*світність* M_v [люмен/м²]), *густина опромінення* E_e [ватт/м²] (*освітленість* E_v [люкс]).

Потоком випромінювання (світловим потоком) називають енергію випромінювання, яку переносить потік квантів за одиницю часу (у світловій системі вимірюють у люменах, в енергетичній – у ватах). Одиницю вимірювання світлового потоку люмен (позначають [лм]) визначають потоком світла всередині тілесного кута в один стерадіан (стерадіаном [ср] називають тілесний кут, який вирізає на поверхні сфери площадку, рівну квадрату радіуса цієї сфери) за сили світла в одну канделу. Кандела (від англ. *candle* – свічка) – одиниця сили світла, головна фотометрична одиниця, яка належить до основних одиниць СІ (позначають [cd] або [кд]).

Силою випромінювання (силою світла) називають просторову густину потоку випромінювання, що визначають відношенням потоку випромінювання точкового джерела до тілесного кута, в межах якого розміщений і рівномірно розподілений цей потік (у світловій системі вимірюють у канделах, в енергетичній – у ватах на стерадіан).

Енергетична яскравість (яскравість) – визначається як відношення сили світла, що випромінюється елементом поверхні уздовж заданого напрямку, до площі поверхні, що світиться (у світловій системі вимірюють у канделах на квадратний метр, в енергетичній – у ватах на квадратний метр і стерадіан).

Енергетична світність (світність) є відношенням густини потоку випромінювання до площі поверхні випромінювача (в енергетичній системі вимірюють у ватах на квадратний метр, у світловій – у люменах на квадратний метр).

Густина опромінення (освітленість) визначається відношенням густини потоку опромінення до площі опромінюваної поверхні (вимірюють у тих одиницях, що й світність, однак у світловій системі одиницю виміру освітленості позначають як люкс [лк]).

Оскільки одиниці вимірювань в енергетичній і світловій системах є просто мірами стосовно параметрів, то між ними існують взаємно однозначні відповідності у вигляді коефіцієнтів пропорційності: $\Phi_v = K_\phi \times \Phi_e$, де K_ϕ – коефіцієнт пропорційності у [лм/Вт]) і т. п.

Таблиця 1.1. Множники для утворення кратних і часткових одиниць [8]

Найменування	Степінь множника (числа 10)	Позначення	
		українське	латинське
акса-	18	Е	Е
пета-	15	П	Р
тера-	12	Т	Т
гіга-	9	Г	G
мега-	6	М	М
кіло-	3	к	К
гекто-	2	г	h
дека-	1	да	da
деци-	-1	д	d
санти-	-2	С	С
мілі-	-3	м	m
мікро-	-6	мк	м
нано-	-9	н	n
піко-	-12	п	p
фемто-	-15	ф	f
атто-	-18	а	a

Оскільки ОЕ утворилась на межі багатьох галузей природничих і технічних наук (фізики, хімії, матеріалознавства, інформатики тощо), вона оперує, природно, й одиницями вимірювань, які використовуються у цих галузях знань (наприклад: як одиниці інформації застосовують біти, байти і їхні

похідні; швидкість передавання можуть виражати в бодах, кількість елементів зображення в точках чи пікселях, частоту растровання півтонових зображень для поліграфічного відтворення – у лініях на метр). Оскільки надалі часто траплятимуться кратні і часткові величини багатьох параметрів (нанометри, мікросекунди, пікофаради, кілооми, мегагерци, гігабайти і т. п.), відношення цих одиниць до базових можна визначити, звіряючи з табл. 1.1.

Особливе місце у цьому ряді займає «ангстрем» (трапляється в оптиці і названий на честь шведського фізика А. Й. Ангстрема), рівний одній десятиміліардній частці метра (0,1 нм), – одиниця довжини, яку використовують для вимірювання довжини світлових хвиль.

1.3. Складові частини ОЕ. Елементна база. Темпи розвитку.

Вимоги до сучасної ОЕ

Усе багатоманіття оптоелектронних приладів поділяють на такі групи виробів: джерела і приймачі випромінювання, індикатори, елементи оптики і світловоди, а також оптичні середовища, які сприяють створенню елементів керування, відображення і зберігання інформації (рис. 1.3). Джерело світла і фотоприймач, зв'язані між собою оптичним середовищем (у тому числі керованим), представляють собою елементарну ланку ОЕ (оптопару), яка у стані виконати найпростіші функціональні перетворення. Таку ланку можна використовувати як самостійний дискретний ОЕ елемент електричного кола, або ж вона може слугувати структурним елементом у топології дещо складніших ОЕ схем і пристроїв. Це визначає два аспекти ОЕ: *елементний*, предметом розгляду якого є оптопари та їхні елементи, і *схемотехнічний*, сутність якого – аналіз, синтез і розробка ОЕ систем і пристроїв заданої функціональної складності. Відомо, що будь-яка систематизація не може бути вичерпною, проте, як вірно зазначив 1869 року автор періодичного закону хімічних елементів Дмитро Іванович Менделєєв, наука розпочинається там, де з'являється рахунок, тобто оцінка, порівняння, класифікація, виявлення закономірностей, визначення критеріїв, загальних ознак. Враховуючи це, щоб

розпочати опис конкретних елементів, слід хоча б у загальних рисах надати особливу характеристику оптоелектронних, відмінну від інших.

Як зазначено вище, головною відмінною ознакою оптоелектроніки є зв'язок з інформацією. Наприклад, якщо у деякій установці для загартування сталених валів використовують лазерне випромінювання, то навряд чи закономірно вважати цю установку оптоелектронним пристроєм (хоча саме джерело лазерного випромінювання має на це право).

Зазначимо, що до оптоелектронних зачисляють зазвичай твердотільні елементи. Проте це правило не надто жорстке, оскільки в окремих виданнях з ОЕ детально розглядають роботу фотоелектронних помножувачів і електронно-променевих трубок, газових лазерів та інших пристроїв.

Наголосимо на трьох відмінних рисах, які, на думку відомого спеціаліста в області оптоелектроніки Юрія Романовича Носова, виокремлюють її як науково-технічний напрям.

Фізичну основу ОЕ становлять явища, методи, засоби, щодо яких принципові співіснування і нерозривність оптичних і електронних процесів. У широкому сенсі *оптоелектронний пристрій* визначають як прилад, чутливий до електромагнітного випромінювання у видимій, інфрачервоній (ІЧ) або ультрафіолетовій (УФ) областях, або прилад, що випромінює і перетворює некогерентне або когерентне випромінювання у таких самих спектральних областях.

Технічну основу ОЕ визначають конструктивно-технологічні концепції сучасної мікроелектроніки: мініатюризація елементів; переважний розвиток твердотільних площинних конструкцій; інтеграція елементів і функцій.

Функціональне призначення ОЕ полягає в розв'язуванні задач інформатики: генеруванні інформації шляхом перетворення різних зовнішніх впливів у відповідні електричні і оптичні сигнали; перенесенні інформації; перетворенні інформації за заданим алгоритмом; збереженні інформації, яке передбачає такі процеси, як запис, власне зберігання, неруйнуюче зчитування, стирання; відображення інформації, тобто перетворення вихідних сигналів інформаційної системи до вигляду, який може сприймати людина.

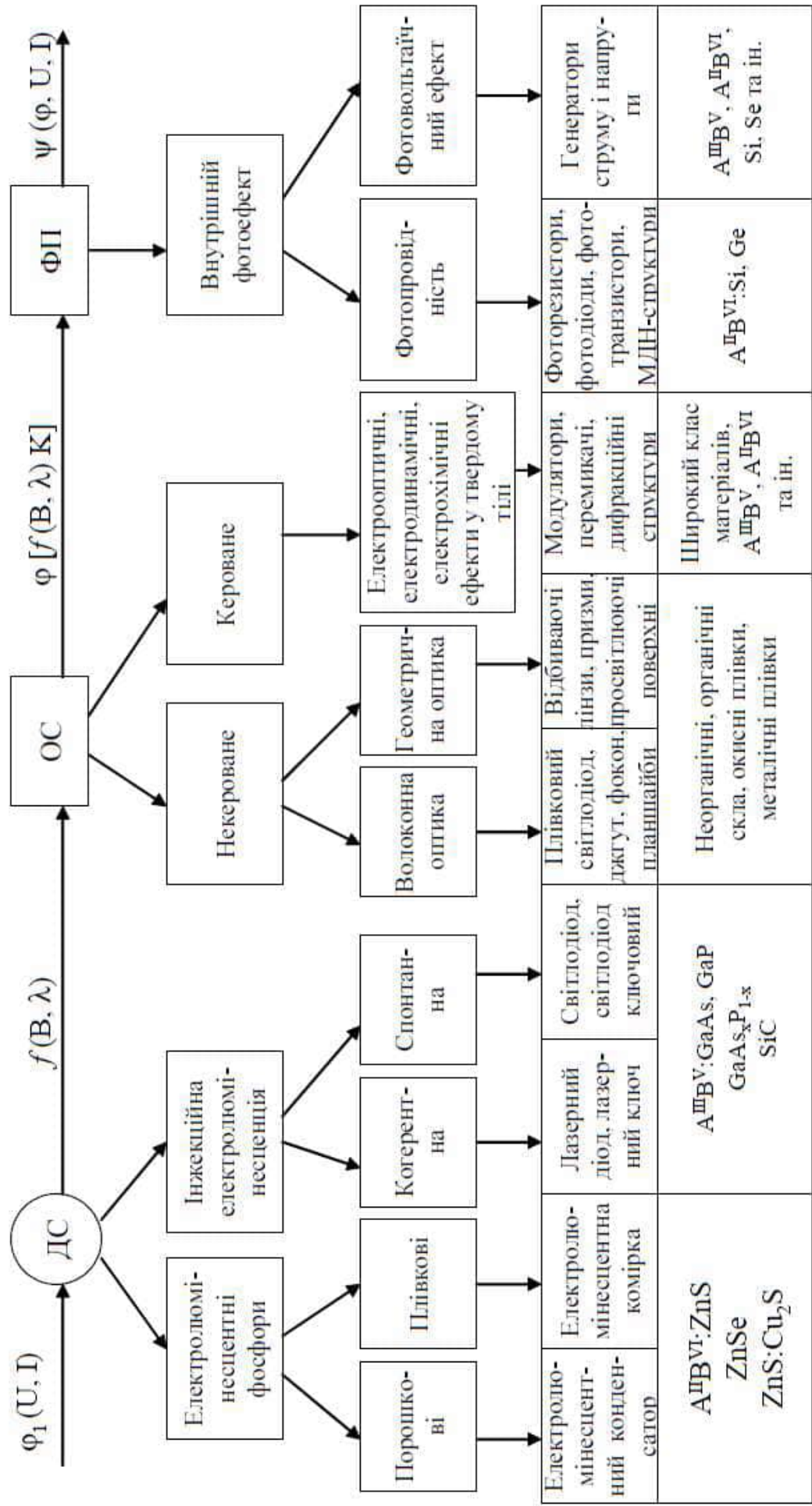


Рис.1.3. Структурні елементи оптоелектроніки: ДС – джерела світла; ОС – оптичні середовища; ФП – фотоприймачі [5].

На рис. 1.4 подано схему ОЕ, яка ілюструє головні напрями її розвитку та пріоритетні зв'язки.

Технічний рівень і темпи розвитку виробів ОЕ, у тому числі *твердотільних фоточутливих приладів* (ТФЧП), значною мірою визначають можливостями науково-технологічної бази їхнього створення та виробництва. ТФЧП відрізняються доволі широким багатоманіттям функціонального призначення, застосовуваних матеріалів і конструктивного виконання.

За фізичним принципом ТФЧП поділяють на дві групи:

- *фотонні* (фотоелектричні) приймальні пристрої, в чутливих елементах яких відбувається безпосереднє перетворення оптичного сигналу в електричний (напівпровідникові фоточутливі пристрої) та які утворюють найбільшу групу;
- *нефотонні* – теплові приймальні пристрої на основі піроелектриків і теплові приймальні пристрої болометричного типу на основі окислів металів, напівпровідників та надпровідників (перетворення оптичного сигналу в електричний відбувається не безпосередньо, а через тепловий сигнал).

Фізичні структури ТФЧП поділяють на:

- *резисторні* – на основі використання ефекту власної та домішкової фотопровідності, а також фотопровідності, зумовленої квантово-розмірними ефектами;
- *діодні* – з *p-n*-, *p-i-n*- чи МОН-структурою; структурою метал–резистор–напівпровідник (МРН); оптичним резонатором з бар'єром Шотткі чи з лавинним підсиленням;
- *транзисторні і тиристорні*.

Як матеріал для чутливих елементів напівпровідникових фоточутливих пристроїв можуть використовувати:

- власні напівпровідники: Si, Ge, PbS, CdS, PbSe, GaAs, InSb, InAs, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ і т. п.;

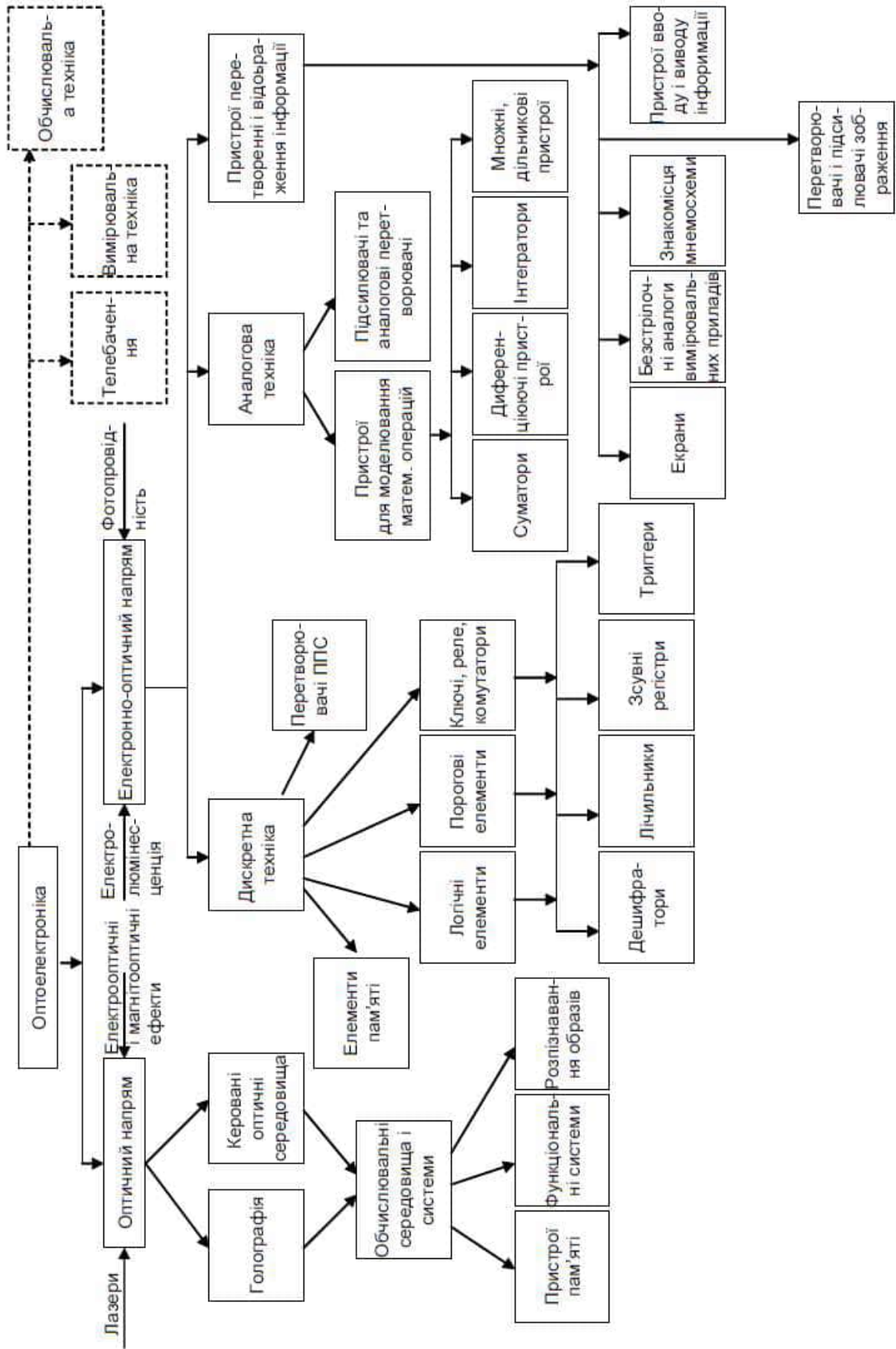


Рис. 1.4. Схема оптоелектроніки. Пунктиром показані деякі області, з якими оптоелектроніка тісно контактує [5].

- домішкові напівпровідники: легований кремній (Si:Ga, Si:In, Si:Tl, Si:Se, Si:Te, Si:As, Si:Sb), легований германій (Ge:Hg, Ge:Au), легований арсенід галію (GaAs:Mn, GaAs:Cu) і т. п.;
- класичні гетероструктури: InGaAs/InP, HgCdTe/Al₂O₃ і HgCdTe/CdZnTe;
- гетероструктури з бар'єром Шотткі на основі силіцидів металів: SiPt/Si, SiIr/Si, SiPd₂/Si і SiNi/Si;
- гетероструктури типу «надграток» на основі пар напівпровідників: AlGaAs/GaAs, InAsSb/InSb (напружені надгратки), HgTe/CdTe, SiGe/Si і т. п.

Фізичні структури чутливих елементів теплових приймачів, зазвичай, є багатошаровими гетероструктурами, в яких кожний шар виконує свою визначену функцію (іноді відбувається суміщення цих функцій).

У загальному випадку в фізичній структурі теплового приймача присутні такі основні шари:

- поглинаючий (він може бути водночас і узгоджувачим, і захисним);
- термочутливий;
- теплоізолюючий.

Між цими шарами можуть знаходитися перехідні (буферні чи узгоджувачі) шари, які є чисто технологічними.

Як матеріал для термочутливого шару піроелектричних приймачів застосовують такі сегнетоелектрики, як LiTaO₃, PbTiO₃, SrBaTiO₃, PLZT, TGS (DTGS), PVDF та ін. Усі вони володіють доволі високими функціональними характеристиками і прийнятною технологічністю. Як і у випадку чутливих елементів з бар'єром Шотткі, для підвищення ефективності чутливих елементів піроелектричних теплових приймачів застосовують структуру оптичного резонатора, яка забезпечує локалізацію поглинання випромінювання в тонкому термочутливому шарі.

У болометричних приймачах на основі надпровідників функцію термочутливого шару виконують YBaCuO і DyBaCuO, а в кремнієвих мікроболометрах – шари окису ванадію (VO_x) з відносно високим значенням температурного коефіцієнта опору.

Фоточутливі прилади становлять основу створення сучасних засобів відображення відеоінформації, з допомогою яких розв'язують широке коло як цивільних, так і військово-технічних завдань, у тому числі таких, як виявлення і розпізнавання цілей у спектральних діапазонах від УФ до далекого ІЧ.

Зазначимо, що сьогодні успішно розвиваються основні складові оптико-електронного приладобудування. Серед них можна виокремити: елементну базу ОЕ; дослідження процесів, що стосуються створення оптичних сигналів, їхнього поширення, прийому і перетворення в електричні сигнали; теорію і методи розрахунку окремих вузлів і приладів загалом [27].

Незважаючи на значні успіхи, досягнуті в розвитку ОЕ, перед цією галуззю науки і техніки, яка бурхливо розвивається, постали великі і серйозні виклики. Ще недостатньо реалізовані ті потенційні можливості, якими володіють ОЕ прилади, наприклад, за точністю, завадозахищеністю та іншими параметрами. Недостатньо вивчені УФ- і далекий ІЧ-діапазони оптичного спектра. Для їхнього освоєння необхідні нові оптичні матеріали, якісніші приймачі випромінювання. Окремі елементи й вузли ОЕ приладів складні в експлуатації, їхнє виготовлення доволі вартісне. Вони не завжди мають необхідні надійність і термін дії. Однією з головних тенденцій розвитку цих приладів є мікромініатюризація їхніх основних елементів, передусім приймачів випромінювання та електронних ланок.

Дійсно, вимога обробки значного обсягу інформації у малі проміжки часу на практиці часто спричиняє необхідність одночасного прийому чималої кількості оптичних сигналів з різних ділянок сканованого поля чи в різних спектральних діапазонах. З цією метою використовують складні багатоелементні приймачі і відповідні багатоканальні електронні схеми. За збільшення об'єму оброблюваної інформації збільшується кількість цих елементів і каналів, отож завдання їхньої мініатюризації виходить на перший план. Водночас першочерговими вважають проблеми вдосконалення технології виготовлення окремих елементів ОЕ приладів, а також широкого використання сучасної обчислювальної техніки, зокрема, мікропроцесорів, а в перспективі – створення оптичного комп'ютера.

Застосування ОЕ пристроїв у сукупності з ЕОМ чи введення до складу ОЕ приладів мікропроцесорів уже сьогодні дає змогу помітно розширити можливості ОЕ приладів, наприклад, значно підвищити їхню точність та швидкодію, а у низці випадків розв'язати недоступні для них раніше завдання.

Вихід людини в космос, створення лазерів, розвиток обчислювальної техніки є потужними стимулами розвитку ОЕ. Такі глобальні для всього людства проблеми, як забезпечення безпеки і збереження миру на Землі та в космосі, контроль метеорологічних та кліматичних процесів, оцінка стану природних ресурсів і впливу людської діяльності на оточуюче середовище, подальше освоєння космосу та низка інших, неможливо розв'язати без широкого використання ОЕ приладів та пристроїв.

Лабораторна робота 1.1

Визначення ширини забороненої зони напівпровідників за краєм власного поглинання

Мета роботи: визначити ширину забороненої зони напівпровідникових матеріалів і тип міжзонного оптичного переходу, зв'язаного із власним поглинанням.

Прилади і матеріали: експериментальна установка на основі монохроматора ЗМР–3, зразки кристалічних напівпровідників (Si, GaAs, GaP, CdS).

Різноманітні властивості твердого тіла визначаються чи істотно залежать від стану структурних електронів. На відміну від атомів і молекул електрони у твердому тілі можуть знаходитися як у зв'язаному щодо певного вузла кристалічної ґратки, так і у вільному стані. Вивчення властивостей твердого тіла пов'язане, насамперед, із вивченням енергетичного спектра електронів, які входять до його складу. Загалом тверде тіло містить чотири типи носіїв заряду: електрони внутрішніх оболонок атомів, які входять до складу твердого тіла; валентні електрони атомів твердого тіла; вільні носії зарядів (електрони і дірки); електрони, зв'язані із локалізованими домішковими центрами чи будь-якими дефектами ґратки. Усі типи електронів, окрім першого, визначають взаємодії світла із твердим тілом, які можна класифікувати як взаємодії зі збереженням кванта енергії (пропускання, розсіювання і відбивання світла твердим тілом) і взаємодії з перетворенням кванта енергії, в результаті котрих утворюються частинки, що не володіють електричним зарядом (фотолюмінесценція, перетворення в теплоту, генерування екситонів), чи заряджені частинки (внутрішній і зовнішній фотоефекти, генерування пари електрон-дірка). В усіх взаємодіях з перетворенням кванта енергії спостерігаємо *поглинання світла*. Серед механізмів поглинання світла у твердому тілі варто виокремити *власне поглинання*, обумовлене переходами між енергетичними зонами твердого тіла.

У металах, як зазначено вище, зона провідності частково заповнена електронами, у напівпровідниках і діелектриках зона провідності вільна від електронів, і для переходу до неї електронів їм необхідно надати енергію, достатню для подолання забороненої зони. На відміну від діелектриків, ширина забороненої зони котрих велика, переведення електронів у зону провідності у напівпровідниках можна реалізувати доволі легко, у тому числі шляхом опромінення напівпровідника світлом. Власне чи фундаментальне поглинання світла у напівпровідниках, зумовлене переходами електронів з валентної зони у зону провідності в результаті поглинання ними фотонів, енергія котрих перевищує ширину забороненої зони, є характерною особливістю для речовини, оскільки воно визначається структурою зон. Спектр поглинання є неперервною лінією, яка більш чи менш різко спадає в області більших довжин хвиль (рис. 1.5).

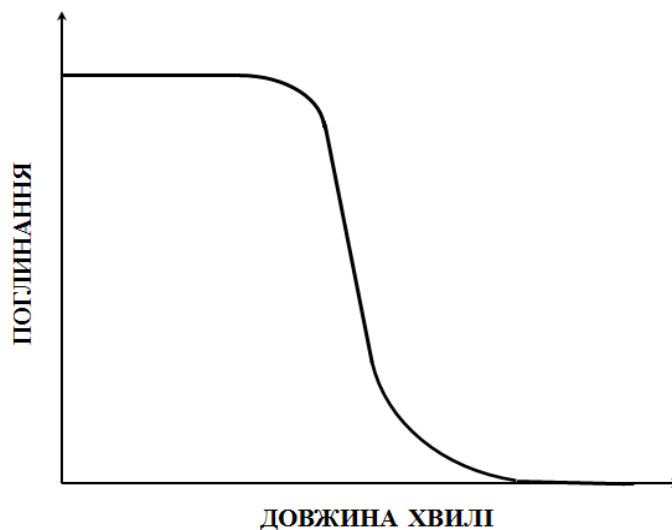


Рис. 1.5. Спектр власного поглинання напівпровідника

Електрон у твердому тілі пересувається у періодичному потенціальному полі кристалічної ґратки. Щоб зрозуміти, який енергетичний спектр матиме електрон у цьому випадку, необхідно розглянути просту одновимірну модель руху електрона уздовж ланцюжка атомів довжиною L з міжатомними відстанями a .

Як відомо, рух вільного електрона з енергією E та імпульсом p описує хвильова функція

$$\psi(x, t) = A \cdot \exp\left(i \frac{p}{h} x - i \frac{E}{h} t\right), \quad (1.1)$$

частота ω і хвильове число k якої зв'язані з енергією E та імпульсом p електрона співвідношеннями де Бройля:

$$\omega = \frac{E}{h} = \frac{1}{h} \frac{p^2}{2m}, k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{p}{h}. \quad (1.2)$$

Фізичний зміст хвильової функції (1.1) полягає в тому, що квадрат її модуля визначає ймовірність виявлення електрона у точці x у момент часу t , тобто хвиля $\psi(x, t)$ є хвилею ймовірності, яку назвали *хвилею де Бройля*. З іншого боку, якщо електрон розглядати як частинку, яка може вільно (без розсіяння) переміщатися уздовж ланцюжка атомів, то його енергія E збільшуватиметься за квадратичним законом зі збільшенням його імпульсу (1.2). На рис. 1.6 цю залежність $E(p)$ для вільного електрона представлено у вигляді кривої 1. Однак взаємодія електрона з атомами ланцюжка за певних значень імпульсу спричиняє гальмування електрона ґраткою, що зумовлює розривання параболічної залежності E від p . Щоб врахувати взаємодію електрона з атомами кристалічної ґратки, необхідно враховувати його хвильові властивості, тобто розглядати хвилю ймовірності електрона.

Збільшення p означає, згідно з (1.2), зменшення довжини хвилі. Якщо $\lambda \gg a$, то хвиля практично не розсіюється регулярною періодичною структурою. Однак за $\lambda \sim a$ необхідно враховувати явище дифракції, аналогічне до розсіяння (дифракції) рентгенівських променів у кристалах. Максимально сильне розсіяння відбувається за умови, коли відбиті від двох сусідніх атомів хвилі підсилюють одна одну, тобто коли різниця ходу між ними $2a$ дорівнює цілому числу n довжин хвиль:

$$2a = n\lambda_n. \quad (1.3)$$

Це співвідношення визначає значення хвильового вектора

$$k_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} = n \frac{\pi}{a}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

за яких хвиля не може поширюватися уздовж ланцюжка атомів і відбивається від неї. У корпускулярній інтерпретації це означає: коли імпульс електрона

У цьому випадку хвильові вектори, значення котрих k і k' відрізняються на $n(2\pi/a)$ (n – ціле число), тобто

$$k = k' + n \frac{2\pi}{a},$$

описують фізично нерозрізніми стани $\psi(x)$ і $\psi'(x)$: $|\psi(x)|^2 = |\psi'(x)|^2$:

$$\psi(x) = A(x) \exp\left[i \frac{2\pi}{a} nx\right] \exp[ik'x] = A'(x) \exp[ik'x] = \psi'(x),$$

тобто імпульси із значеннями p і $p' = p + \frac{2\pi}{a} n$ стають нерозрізними. Фізично однаковим значенням імпульсу повинні відповідати ті ж значення енергії, тому шматки розірваної залежності E від p на рис. 1.6 (криві 2) можна перенести паралельно до осі p на величину $h \frac{2\pi}{a} n$, n – ціле число (на рис. 1.6 цю операцію відображено пунктирними стрілками), у результаті чого енергія стає періодичною функцією імпульсу. Фізично відмінні p знаходяться в інтервалі $\Delta p = h \frac{2\pi}{a}$, кожен з яких називають *зоною Бриллюена*. Перша зона Бриллюена відповідає інтервалові $\left(-\frac{\pi h}{a}, \frac{\pi h}{a}\right)$.

Отже, електрон у періодичному полі кристалічної ґратки пересувається як деяка вільна квазічастинка, його рух описують рівнянням

$$\frac{dv_{\text{гр}}}{dt} = \frac{1}{h} \frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dk} \right) = \frac{1}{h} \frac{d^2 E}{dk^2} \frac{dk}{dt} = \frac{1}{h^2} \frac{d^2 E}{dk} \frac{dp}{dt} = \left(\frac{1}{h^2} \frac{d^2 E}{dk^2} \right) F, \quad (1.6)$$

тобто рівнянням Ньютона для опису руху точкової частинки масою m^* у потенціальному полі сили F , якщо m^* визначити як:

$$m^* = \frac{h^2}{\left(d^2 E / dk^2 \right)}. \quad (1.7)$$

Величина m^* називають *ефективною масою* квазічастинки, вона визначає крутість залежності E від p . Величину $p = \hbar k$ називають *квазіімпульсом*.

Енергетичне представлення, наведене на рис. 1.6, називають *представленням енергії у просторі квазіімпульсів*. Воно пояснює появу зон I, II, III і т. д. дозволених станів (заштриховані області), розділених інтервалами

заборонених значень енергії. Кількість енергетичних станів у зоні дорівнює кількості атомів у ланцюжку. Отримані результати можна узагальнити для тривимірного кристала. У цьому випадку межами зон Бриллюена є замкнені поверхні, розміщені одна в одній. Оскільки загалом вигляд періодичного потенціалу залежить від структури кристала і відрізняється залежно від напрямку, то залежність енергії від хвильового вектора також різна для різних напрямів у кристалі.

На рис. 1.6 бачимо, що поблизу верхнього краю дозволеної зони сила, яка діє на електрон з боку кристалічної ґратки, гальмуватиме його, тобто електрон набуватиме від'ємного прискорення. Такий рух, з погляду класичної механіки, рівносильний руху частинки із від'ємною масою. Це означає, що поблизу верхньої межі дозволеної зони ефективна маса електрона від'ємна. Якщо врахувати, що електрон володіє негативним електричним зарядом, то його рух у станах, які відповідають верхній частині енергетичної зони, можна розглядати як рух позитивно зарядженої частинки з позитивною ефективною масою – *дірки*.

Навпаки, поблизу нижнього краю дозволеної зони під дією поля кристалічної ґратки електрон набуває позитивного прискорення, тобто його ефективна маса є позитивною. Тому на енергетичній діаграмі у просторі квазіімпульсів поблизу меж зон кривизна параболічної залежності енергії від імпульсу різна: для валентної зони вона від'ємна, а для зони провідності – позитивна.

Якщо межі енергетичних зон розташовані так, що мінімум зони провідності розташований над максимумом валентної зони (рис. 1.7, *a*), то за взаємодії фотона з електроном повинні виконуватися закони збереження енергії та імпульсу:

$$\begin{aligned} p_v + p_{\text{фот}} &= p_c; \\ E_v + h\nu &= E_c, \end{aligned} \quad (1.8)$$

де p_v , p_c і E_v , E_c – імпульси та енергії електрона, відповідно, у валентній зоні та зоні провідності, а $p_{\text{фот}}$ і $h\nu$ – імпульс та енергія фотона. Оскільки в оптичному діапазоні імпульс фотона значно менший від імпульсу електрона, то після

поглинання фотона електрон з валентної зони переходить у зону провідності без зміни імпульсу. Такому переходу відповідає вертикальна стрілка на рис. 1.7, а, а власне перехід називають *прямим*, відповідний напівпровідник – *прямоzonним* (наприклад, сполуки типу InSb, GaSb, PbS, CdS, CdSe тощо).

Якщо мінімум зони провідності знаходиться при іншому значенні p , то після поглинання фотона електрон з валентної зони у зону провідності переходить зі зміною імпульсу, котрий передається фонону чи у нього відбирається

$$p_v + p_{\text{фон}} = p_c, \quad (1.9)$$

де $p_{\text{фон}}$ – імпульс фонона. Такі переходи називають *непрямими міжзонними переходами* (рис. 1.7, б), а напівпровідник, в якому їх спостерігають, – *непрямоzonним* (наприклад, германій, кремній).

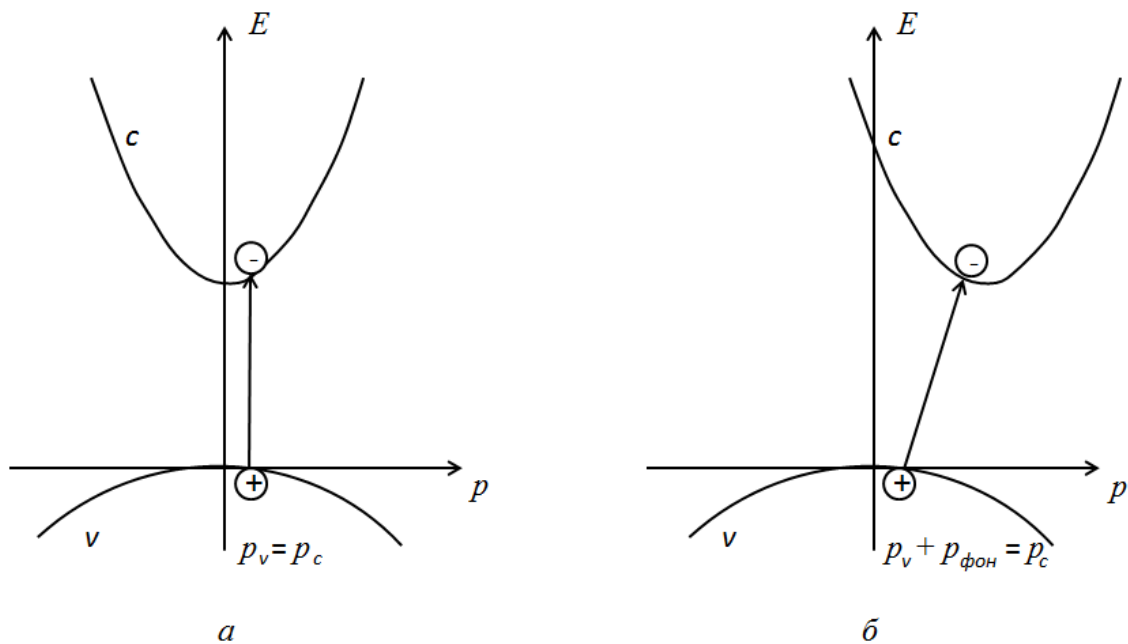


Рис. 1.7. Прямий (а) і непрямий (б) міжзонні переходи

Згідно з принципом невизначеності Гейзенберга ($\Delta x \Delta p = h$), об'єм, котрий займає один електрон у фазовому просторі координат та імпульсів, дорівнює

$$V = \int dx dy dz dp_x dp_y dp_z = h^3.$$

Усі стани, які класично зображують у межах фазової комірки h^3 , однакові, отожд їх вважають одним і тим же квантовим станом. Кількість станів $g(E)dE$, яка

припадає на інтервал енергій dE , дорівнює кількості елементарних об'ємів h^3 , що складають об'єм фазового простору dV , у межах якого енергія електрона змінюється від E до $E + dE$. Оскільки енергія електрона визначається його імпульсом

$$E = \frac{p^2}{2m^*}, \quad (1.10)$$

то фазовий об'єм dV є добутком геометричного об'єму тіла V_q і об'єму dV_p у просторі імпульсів, в якому імпульс електрона змінюється в межах від p до $p + dp$:

$$g(E)dE = \frac{V_q dV_p}{h^3}, \text{ де } dV_p = 4\pi p^2 dp. \quad (1.11)$$

З урахуванням того, що в одній фазовій комірці можуть знаходитися два електрони з протилежно орієнтованими спінами, отримуємо в одиничному геометричному об'ємі твердого тіла

$$g(e)dE = 2 \frac{dV}{h^3} = 2 \frac{4\pi p^2 dp}{h^3}. \quad (1.12)$$

Враховуючи (1.10), отримаємо вираз для густини енергетичних станів електрона у дозволених зоні:

$$g(E)dE = 8\pi \frac{\sqrt{2(m^*)^{3/2} E}}{h^3} dE. \quad (1.13)$$

Коефіцієнт поглинання світла з частотою ν за прямих міжзонних переходів визначається ймовірністю такого переходу та кількістю станів у валентній зоні та зоні провідності, розділених енергетичною відстанню $h\nu$. Очевидно, що за прямих переходів кожному стану у валентній зоні із заданим значенням хвильового вектора k_i відповідає лише один стан у зоні провідності з таким самим значенням k_i , тобто за переходу енергія електрона у валентній зоні E_i та енергія електрона у зоні провідності E_j однозначно визначаються енергією фотона $h\nu$.

Поблизу $k = 0$ залежність $E(k)$ має параболічний вигляд (1.10). Позначимо енергетичне положення дна зони провідності як E_c , а енергетичне положення стелі валентної зони як E_v . Тоді ширина забороненої зони

визначатиметься як $E_g = E_c - E_v$. У цьому випадку матимемо поблизу нижньої межі (дна) зони провідності

$$E_j - E_c = \frac{h^2 k^2}{2m_n^*}, \quad (1.14)$$

а біля верхньої межі (стелі) валентної зони

$$E_v - E_i = \frac{h^2 k^2}{2m_p^*}. \quad (1.15)$$

У цьому випадку зі співвідношення (1.13) можна визначити кількість енергетичних станів електрона на одиницю об'єму кристала поблизу дна зони провідності

$$g_c(E_j)dE_j = 4\pi \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} (E_j - E_c)^{1/2} dE_j \quad (1.16)$$

і поблизу стелі валентної зони

$$g_v(E_i)dE_i = 4\pi \frac{(2m_p^*)^{3/2}}{h^3} (E_v - E_i)^{1/2} dE_i. \quad (1.17)$$

У міжзонних переходах з поглинанням енергії фотона $h\nu$ беруть участь тільки стани E_i та E_j , які задовольняють умову

$$h\nu = E_j - E_i = E_c - E_v + \frac{h^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_n^*} + \frac{1}{m_p^*} \right),$$

звідки, з урахуванням (1.14), (1.15) і того, що $E_g = E_c - E_v$, отримаємо, що у процесі прямих переходів беруть участь тільки стани E_i та E_j , енергії котрих виражають як

$$E_i = \frac{m_n^*}{m_n^* + m_p^*} E \quad \text{і} \quad E_j = \frac{m_p^*}{m_p^* + m_n^*} E, \quad (1.18)$$

де $E = h\nu - E_g$. Тоді кількість станів, які беруть участь у прямих переходах із поглинанням світла в частотному інтервалі $[\nu, \nu + d\nu]$, дорівнюватиме

$$g(E)dE = \frac{4\pi}{h^3} \left(\frac{2m_p^* m_n^*}{m_n^* + m_p^*} \right)^{3/2} E^{1/2} dE. \quad (1.19)$$

Якщо ймовірність переходу не залежить від енергії, то коефіцієнт поглинання світла для прямих міжзонних переходів дорівнює

$$\alpha(\nu) = \text{const} \cdot (h\nu - E_g)^{1/2}. \quad (1.20)$$

Отже, власне міжзонне поглинання матиме місце, якщо енергія фотона перевищує ширину забороненої зони, тобто власне поглинання володіє суцільним спектром (рис. 1.5), довгохвильову межу котрого визначають за умовою

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{c}{\nu_{\text{гр}}} = \frac{hc}{E_g}. \quad (1.21)$$

Вираз (1.20) справедливий для *дозволенних* переходів, які спостерігають у випадку, коли хвильові функції валентної зони та зони провідності визначаються станами індивідуальних атомів, для котрих орбітальні квантові числа відрізняються на одиницю.

У протилежному випадку прямі міжзонні переходи будуть *забороненими*. Для коефіцієнта поглинання у випадку забороненого прямого міжзонного переходу можна отримати вираз, аналогічний (1.20):

$$\alpha(\nu) = \text{const}' \cdot (h\nu - E_g)^{3/2}. \quad (1.22)$$

Отож, довжина хвилі $\lambda_{\text{гр}}$, яка відповідає границі власного поглинання, дозволяє за формулою (1.21) визначити ширину забороненої енергетичної зони, а залежність коефіцієнта поглинання від частоти поблизу краю власного поглинання – тип оптичного переходу: для дозволеного прямого переходу $\alpha(\nu) \sim \nu^{1/2}$; для забороненого прямого переходу $\alpha(\nu) \sim \nu^{3/2}$; для дозволеного непрямого переходу $\alpha(\nu) \sim \nu^2$; для забороненого непрямого переходу $\alpha(\nu) \sim \nu^3$ [39].

Під час падіння світлового пучка з інтенсивністю I_0 на поверхню шару напівпровідника товщиною d частина його RI_0 відбивається від межі розділення повітря/напівпровідник (R – френелівський коефіцієнт відбивання), а частина $(1 - R)I_0$, яка залишилась, проходить всередину напівпровідника. За проходження у напівпровіднику інтенсивність світла, згідно із законом Бугера-Ламберта, експоненційно зменшується, а після часткового відбивання світла на іншій межі розділення напівпровідник/повітря з шару виходить світловий потік з інтенсивністю, яку визначають за формулою (рис. 1.8) [25]:

$$I_T = I_0(1-R)^2 \exp(-D), \quad (1.23)$$

де $D = \alpha d$ – оптична густина шару товщиною d ; α – коефіцієнт поглинання напівпровідника.

Для обчислення коефіцієнта поглинання напівпровідника α за нормального падіння, нехтуючи інтерференцією вихідних променів, можна використовувати два вирази.

У випадку, коли оптична густина зразка $D < 1$, інтенсивність світлового пучка, який пройшов крізь нього, дорівнюватиме сумі інтенсивностей усіх складових його компонентів і пропускання зразка оцінюватимуть як

$$T = \frac{I_{\text{вих}}}{I_0} = \frac{(1-R)^2 I_0 \exp(-D) + (1-R)^2 R^2 I_0 \exp(-D) + \dots}{I_0} = \frac{(1-R)^2 \exp(-D)}{1-R^2 \exp(-2D)}. \quad (1.24)$$

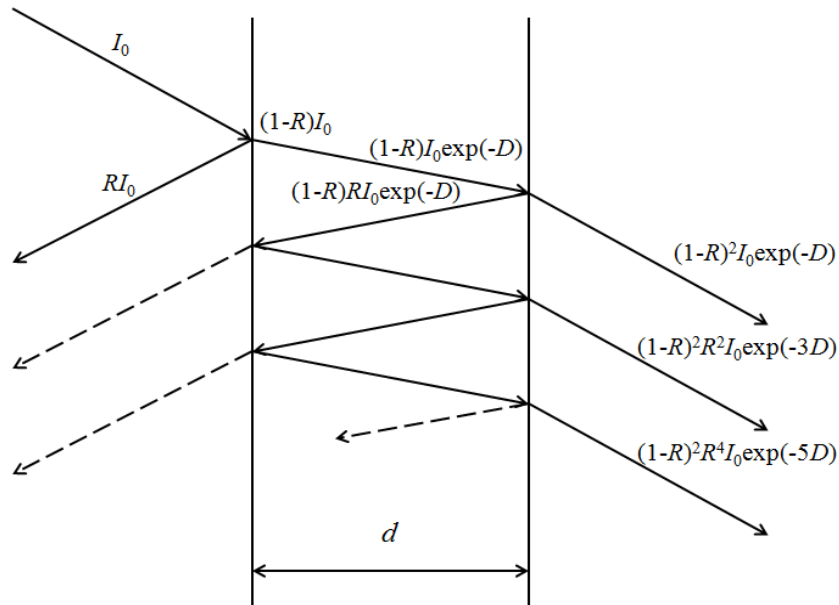


Рис. 1.8. Зміна інтенсивності світлового пучка за його проходження через шар напівпровідника

У випадку, коли $D > 1$, справедливим стає вираз

$$T = I_0(1-R)^2 \exp(-D). \quad (1.25)$$

Величина α у напівпровідникових матеріалах змінюється в широких межах: від 10^{-2} до 10^5 см^{-1} . Отож за вимірювання коефіцієнта поглинання зазвичай підбирають таку товщину зразка, щоб його оптична густина $D = \alpha d$ була порядку 1. У цьому випадку можна з допустимою похибкою користуватися виразом (1.25), котрий дає змогу за виміряними значеннями R

(для нормального падіння світлового пучка за формулою Френеля $R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$, де n – показник заломлення напівпровідника), T і d визначити коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-R)^2}{T}. \quad (1.26)$$

У лабораторній роботі досліджують зразки напівпровідникових матеріалів, границя власного поглинання котрих знаходиться у видимій та ближній інфрачервоній областях спектра (450 – 1100 нм). Головним елементом експериментальної установки є дзеркальний монохроматор ЗМР-3 (рис. 1.9).

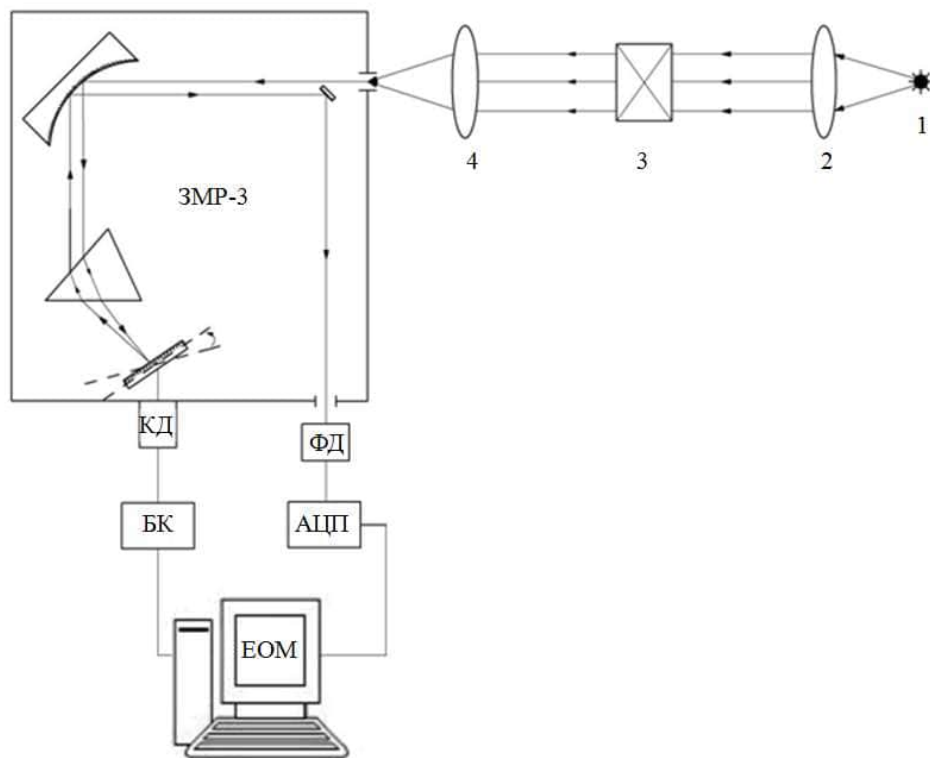


Рис. 1.9. Автоматизована установка для вимірювання спектрів поглинання

Світло від джерела 1 (галогенної лампи) спрямовується за допомогою лінзи 2 на зразок 3, який знаходиться у кристалотримачі. Після проходження через кристал світловий пучок фокусується лінзою 4 на вхідній щілині монохроматора, після якого потрапляє на фотодіод ФД.

Спектр поглинання досліджується з використанням кремнієвого фотодіода *Hamamatsu* S1336-18BK, спектральний діапазон чутливості якого 320 – 1100 нм.

Установка для вимірювання спектрів поглинання на базі описаної вище експериментальної методики, відповідно, автоматизована (див. рис. 1.9). У цьому випадку розроблено спеціальне програмне забезпечення, використання якого дало змогу здійснювати керування з допомогою блоку керування БК та крокового двигуна КД зміною довжини хвилі і отримання спектрів поглинання з фотодетектора через АЦП на ЕОМ.

Оскільки у формулу (1.26) входить коефіцієнт відбивання R , який не завжди відомий для того чи іншого кристала, можна використати *метод двох товщин*, котрий усуває врахування коефіцієнта відбивання. Цей метод базується на вимірюваннях спектра поглинання двох кристалів з різними товщинами: $d_1 = 50 - 100$ мкм і $d_2 = 0,3 - 0,5$ мм. Їх спектри поглинання описуються формулами:

$$I_1 = I_0(1 - R)^2 \exp(-\alpha d_1), \quad (1.27)$$

$$I_2 = I_0(1 - R)^2 \exp(-\alpha d_2). \quad (1.28)$$

Поділимо за фіксованої довжини хвилі відповідні частини (1.27) і (1.28), отримаємо:

$$\frac{I_1}{I_2} = \exp(\alpha \Delta d), \quad (1.29)$$

де $\Delta d = d_2 - d_1$ – різниця товщин зразків.

Як бачимо із (1.29), метод двох товщин автоматично враховує відбивання від граней кристала, в тому числі й спектральну залежність показника заломлення.

Якщо коефіцієнт поглинання визначається за використання того ж джерела ($I_0(\lambda)$ – постійна), а інтенсивність світла, що пройшло крізь зразок, – $I_1(\lambda)$ визначається без врахування відбивання, то за «зшивання» спектрів помилка на відбиванні буде скомпенсована. Отже, у методі двох товщин коефіцієнт поглинання визначається формулою:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta d} \ln \frac{I_1}{I_2}. \quad (1.30)$$

Вимірюючи спектральні залежності $I_1(\lambda)$ та $I_2(\lambda)$ і використовуючи формулу (1.30), отримуємо відповідні залежності $\alpha(\lambda)$. Відносна точність вимірювання становить $\approx 1\%$.

Хід роботи

1. Ознайомитись із експериментальною установкою для вимірювання спектрів поглинання.
2. Увімкнути блок живлення галогенної лампи та здійснити юстування оптичної схеми установки, зображеної на рис. 1.9.
3. Встановити отриманий від викладача зразок кристала кремнію товщиною 0,1 мм у спеціальному кристалотримачі між лінзами 2 і 4 (див. рис. 1.9).
4. Увімкнути комп'ютер та запустити на виконання відповідну програму для отримання спектрів поглинання кристалів. Отримати спектральну залежність інтенсивності світла $I_1(\lambda)$, яке пройшло через кристалічний зразок, у спектральному діапазоні довжин хвиль 450 – 1100 нм.
5. Повторити пп. 3, 4 для кристалічного зразка кремнію товщиною 0,5 мм та отримати спектральну залежність $I_2(\lambda)$.
6. Побудувати спектр поглинання α ($E = h\nu$), використовуючи формули (1.30) та E [eV] = 1239/ λ [мкм].
7. Побудувати графічні залежності $\alpha^2 = f(h\nu)$, $\alpha^{2/3} = f(h\nu)$, $\alpha^{1/2} = f(h\nu)$, $\alpha^{1/3} = f(h\nu)$.
8. Знайти на котрому із графіків п. 7 є ділянка спектра, де експериментальні точки задовольняють лінійній залежності. Наявність такої ділянки свідчить про той чи інший тип міжзонного оптичного переходу.
9. Екстраполювати лінійну залежність до перетину її з віссю абсцис. Точка перетину визначає ширину забороненої зони E_g , подану в eV.
10. Повторити пп. 3 – 9 для кристалічних зразків напівпровідників GaAs, GaP, CdS.
11. Відповідно до отриманих результатів сформулювати висновки.

1.5. Тестові завдання та контрольні питання

1. Який діапазон частот відповідає видимій області спектра:

- $4 \cdot 10^{13} \div 8 \cdot 10^{13}$ Гц;
- $8 \cdot 10^{13} \div 4 \cdot 10^{14}$ Гц;
- + $4 \cdot 10^{14} \div 8 \cdot 10^{14}$ Гц;
- $8 \cdot 10^{14} \div 4 \cdot 10^{15}$ Гц;
- $4 \cdot 10^{15} \div 8 \cdot 10^{15}$ Гц?

2. Які серед перелічених напівпровідникових матеріалів є прямозонними:

- Ge;
- + GaAs;
- Si;
- + GaP;
- + SiC?

3. Які серед перелічених напівпровідникових матеріалів є непрямоzonними:

- + Ge;
- GaAs;
- + Si;
- GaP;
- SiC?

4. Гетероперехід – це ...

- напівпровідниковий *p-n*-перехід, концентрації основних носіїв заряду з обидвох боків від якого різні;
- + напівпровідниковий *p-n*-перехід, ширини заборонених зон напівпровідникових матеріалів з обидвох боків від якого різні;
- перехід метал-напівпровідник.

5. Несиметричний p^+-n -перехід – це ...

- + напівпровідниковий $p-n$ -перехід, концентрація дірок в p -області з одного боку від якого вища, ніж концентрація електронів в n -області;
- напівпровідниковий $p-n$ -перехід, ширини заборонених зон напівпровідникових матеріалів з обидвох боків від якого різні;
- перехід метал-напівпровідник;
- напівпровідниковий $p-n$ -перехід, концентрація електронів в n -області з одного боку від якого вища, ніж концентрація дірок в p -області.

6. Перехід Шотткі – це ...

- напівпровідниковий $p-n$ -перехід, концентрації основних носіїв заряду з обидвох боків від якого різні;
- напівпровідниковий $p-n$ -перехід, ширини заборонених зон напівпровідникових матеріалів з обидвох боків від якого різні;
- + перехід метал-напівпровідник.

7. Яка енергія світлової хвилі відповідає довжині хвилі 500 нм:

- 1,48 еВ;
- 2,15 еВ;
- + 2,48 еВ;
- 2,84 еВ;
- 3,15 еВ?

8. Яка довжина хвилі світла відповідає енергії 2 еВ:

- + 620 мкм;
- 650 мкм;
- 700 мкм;
- 500 мкм;
- 570 мкм?

9. Якій довжині хвилі відповідає червона межа фотоефекту в Si:

- 0,90 мкм;
- 0,95 мкм;
- 1,00 мкм;
- +1,05 мкм;
- 1,10 мкм?

10. Якій довжині хвилі відповідає червона межа фотоефекту в Ge:

- 1,45 мкм;
- 1,50 мкм;
- 1,05 мкм;
- +1,65 мкм;
- 1,00 мкм?

11. Якій довжині хвилі відповідає червона межа фотоефекту в арсеніді галію:

- 0,756 мкм;
- 0,812 мкм;
- + 0,856 мкм;
- 1,456 мкм;
- 1,555 мкм?

12. Одиниці вимірювання яскравості свічення – це ...

- кд;
- лм;
- лк;
- + кд/м²;
- кд/м²ср.

13. Одиниці вимірювання освітленості – це ...

- кд;

- лм;
- + лк;
- кд/м²;
- кд/м²ср.

14. Охарактеризуйте особливі риси оптоелектроніки як галузі науки і техніки.

15. Складові частини ОЕ. Елементна база. Фізичні принципи роботи елементів ОЕ.

16. Базові технічні та технологічні рішення, що використовують під час побудови оптоелектронних пристроїв.

17. Основні ефекти та явища, що отримали широке застосування в оптоелектроніці.

18. Основні відкриття та винаходи, котрі визначають обличчя сучасної оптоелектроніки.

2. ДИСКРЕТНІ ДЖЕРЕЛА ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1. Напівпровідникові джерела світла, конструкція та робота

Визначальними рисами оптоелектронних пристроїв є їх мініатюрність, твердотільність та технологічна сумісність із пристроями «класичної» електроніки. Цим вимогам, безумовно, відповідають джерела випромінювання, які є складовими більшості оптоелектронних систем.

В основі роботи джерел випромінювання оптичного діапазону лежить одне з наступних фізичних явищ: теплове випромінювання, розряд у газовому середовищі, люмінесценція, індуковане випромінювання. Дія випромінюючих діодів базується на явищі люмінесценції, а точніше – електролюмінесценції. Для виникнення люмінесценції в напівпровіднику необхідно перевести його у збуджений стан з допомогою яких-небудь зовнішніх джерел енергії. Наприклад, як уже згадувалося, при впливі електричного поля чи струму виникає електролюмінесценція. При цьому спостерігається низка фізичних явищ, найважливішими з яких є інжекція неосновних носіїв в активну область структури електронно-дірковим гомо- чи гетеропереходом; випромінювальна рекомбінація інжектованих носіїв в активній області структури.

Історія створення випромінюючих діодів ведеться від «свічення Лосєва». У 1923 р. О.В. Лосєв, досліджуючи точково-контактні карбід кремнієві (SiC) детектори, виявив, що при пропусканні через них електричного струму може виникнути зеленувато-голубе свічення. Практичне застосування тоді цей ефект не отримав, але в 1955 р. вчені виявили інфрачервоне випромінювання при пропусканні струму через діод на кристалі арсеніду галію (GaAs). У 1962 р. інший напівпровідник (на основі фосфіду галію) засвітився червоним світлом. Ці дві дати і визначають час народження світлодіодів (СД).

Отже, *напівпровідниковий світлодіод* – це випромінюючий напівпровідниковий пристрій з одним чи декількома електричними переходами, призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії в енергію некогерентного світлового випромінювання.

Явище інжекції неосновних носіїв служить основним механізмом уведення нерівноважних носіїв в активну область структури світло випромінюючих діодів. В узагальненому вигляді інжекція носіїв p - n -переходом може бути представлена наступним чином. Коли в напівпровіднику створюється p - n -перехід, то носії в його околі розподіляються таким чином, щоб вирівняти рівень Фермі. В області контакту шарів n - та p -типів електрони з донорів переходять на найближчі акцептори і утворюється дипольний шар, який складається з іонізованих позитивних донорів з n -боку та іонізованих негативних акцепторів з p -боку. Електричне поле дипольного шару створює потенціальний бар'єр, який перешкоджає подальшій дифузії електричних зарядів (рис. 2.1).

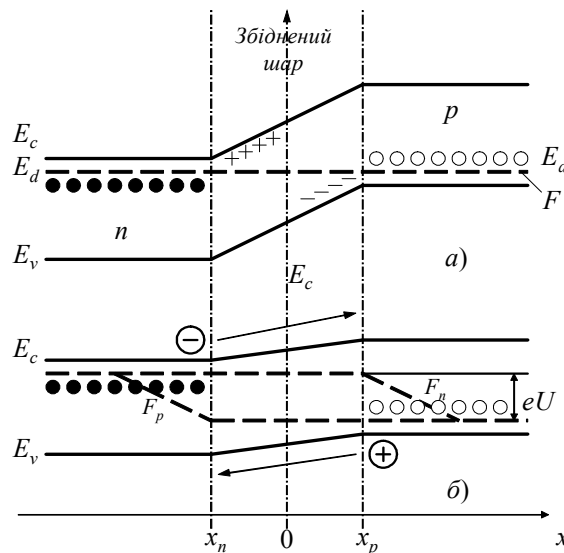


Рис. 2.1. Схематичне зображення зонної діаграми p - n -переходу при термодинамічній рівновазі (а) і при прямому зміщенні (б): E_c – енергія дна зони провідності; E_v – енергія стелі валентної зони; E_d і E_a – енергетичні стани донорів і акцепторів; F_n і F_p – квазірівні Фермі для електронів і дірок; x – віддаль від p - n -переходу [9].

При створенні на p - n -переході електричного зміщення в прямому напрямку потенціальний бар'єр зменшується, внаслідок чого в p -область увійде додаткова кількість електронів, а в n -область – дірок. Таке дифузійне введення неосновних носіїв називається *інжекцією*. Дифузійний струм I_n , обумовлений рекомбінацією інжектованих електронів, описується виразом

$$I_n = \frac{eD_n n_p}{L_n} \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.1)$$

де D_n – коефіцієнт дифузії електронів; n_p – концентрація рівноважних електронів у p -області. Дифузійний струм дірок I_p описується аналогічним виразом. У випадку, коли суттєвими є обидві компоненти струму (електронний і дірковий), загальний струм I задається формулою

$$I = (I_{n_0} + I_{p_0}) \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.2)$$

де $I_{n_0} = \frac{eD_n n_p}{L_n}$; $I_{p_0} = \frac{eD_p p_n}{L_p}$; L_n (L_p) – дифузійна довжина електронів (дірок); p_n – концентрація рівноважних дірок в n -області.

Особливість розв'язання питання інжекції при конструюванні світловипромінюючих діодів, в яких, як правило, одна з областей p - n -структури володіє високим внутрішнім квантовим виходом випромінювання, полягає в тому, що для одержання ефективної електролюмінесценції вся інжекція неосновних носіїв повинна скеровуватися в цю активну область, а інжекція в протилежний бік – приглушуватися. У деяких напівпровідниках високий коефіцієнт інжекції носіїв в одну з областей p - n -переходу може бути забезпечений різницею в рухливості електронів і дірок. Так, в арсеніді галію більшу рухливість мають електрони.

Кардинальне вирішення проблеми односторонньої інжекції дають гетеропереходи на границі двох напівпровідників з різною шириною забороненої зони. У зонній моделі гетеропереходу з'являються розриви у валентній зоні ΔE_v і в зоні провідності ΔE_c (рис. 2.2). Наявність цих потенціальних бар'єрів при зміщенні переходу в прямому напрямку приводить до односторонньої інжекції носіїв струму з широкозонного матеріалу в вузькозонний практично незалежно від ступеня легування n - і p -областей. Для забезпечення односторонньої інжекції достатня різниця в ширині забороненої зони $\Delta E_g \approx 0,1$ еВ, оскільки відношення I_n/I_p пропорційне до $\exp(\Delta E_g/kT)$.

Інша особливість гетеропереходів полягає в можливості одержання у вузькозонному напівпровіднику концентрації інжекттованих носіїв, яка

перевищує концентрацію основних носіїв у широкозонному напівпровіднику. Цей ефект називається *суперінжекцією*. Явище суперінжекції дозволяє одержати в активній області високу концентрацію інжектованих носіїв, недосяжну з допомогою гомопереходу.

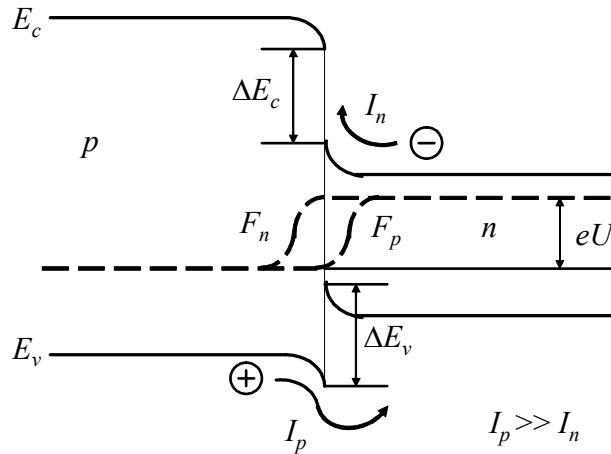


Рис. 2.2. Зонна модель p - n -гетеропереходу при прямому зміщенні [9].

Випромінювальна рекомбінація – єдиний фізичний механізм генерації світла в СД. Найважливішою є рекомбінація за рахунок прямих випромінювальних переходів зона-зона, вона реалізується в прямозонних напівпровідниках (GaAs, InAs, InSb, GaSb, GaN твердих розчинах $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ при $x < 0,4$; $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ при $x < 0,35$ та ін.). Повна кількість випромінювальних переходів в одиниці об'єму при міжзонній рекомбінації R пропорційна до концентрацій електронів і дірок

$$R = B_r n_p p, \quad (2.3)$$

де B_r – коефіцієнт рекомбінації; p – концентрація рівноважних дірок в p -області. З останньої формули випливає, що, чим вища концентрація основних носіїв в активній області, тим вища імовірність випромінювальної рекомбінації і тим менший час життя неосновних носіїв, який дорівнює

$$\tau_{\text{випр}} = \frac{1}{B_r p}. \quad (2.4)$$

Оцінка часу життя для випадку $p \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ дає величину $\tau_{\text{випр}} \approx 10^{-8} \text{ с}$.

Міжзонне випромінювання має спектральну смугу з максимумом, енергія якого $h\nu_{\text{макс}}$ на величину порядку kT більша від ширини забороненої

зони E_g . Для кожного прямозонного напівпровідника можна вказати приблизний максимум спектральної смуги, в якому буде спостерігатися випромінювання

$$\lambda_{\text{макс}} \approx \frac{1239}{E_g}, \quad (2.5)$$

де $\lambda_{\text{макс}}$ виражено в нм, а E_g – в еВ.

Отже, збуджені електрони (а збуджуються вони електричним полем), переходячи із зони провідності у валентну зону, випромінюють кванти енергії. Відповідно до залежності (2.5), яка зв'язує енергію і частоту випромінюваних коливань (добуток енергії [еВ] на довжину хвилі [нм] дорівнює числу 1239), для випромінювання у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах спектра потрібна енергія 1-3 еВ [$1239:1100 = 1,1$... $1239:400 = 3,1$]. Саме в цих межах знаходиться енергія, необхідна для подолання забороненої зони в арсеніді галію (GaAs), фосфіді галію (GaP) та нітриді галію (GaN): 1,4; 2,27; 3,57 еВ.

Створюючи напівпровідникові матеріали, за допомогою тих або інших домішок (у строго визначених пропорціях) вчені і технологи навчилися одержувати напівпровідникові джерела, які випромінюють у діапазоні від інфрачервоного до ультрафіолетового світла. Діапазони випромінювання СД, виготовлених з різних матеріалів, подані на рис. 2.3. Графіки спектральних характеристик свідчать про досить вузькі смуги випромінювання СД, що мають ширину (на рівні 0,5 від максимального випромінювання) у кілька десятків нанометрів.

Типові конструкції та позначення СД зображені на рис. 2.4, а окремі їх характеристики подані в табл. 2.1. Варто відзначити, що в більшості СД рівні граничних зворотних напруг також невеликі – у межах 2,5-5 В, тому в коло живлення СД необхідно, як правило, включати обмежувальний опір.

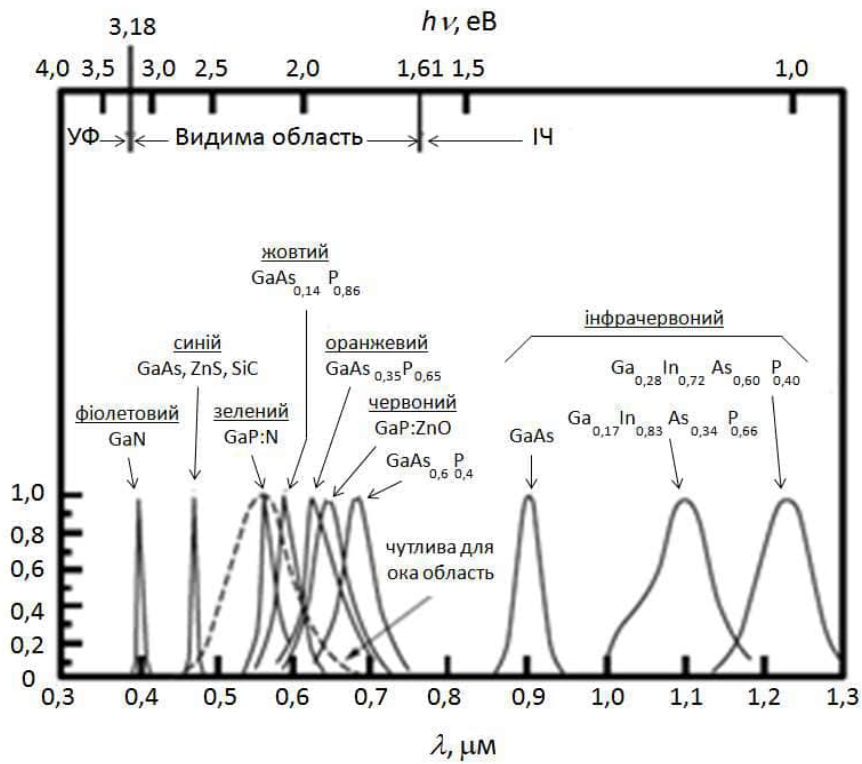


Рис. 2.3. Діапазони випромінювання світлодіодів, виготовлених з різних матеріалів [1].

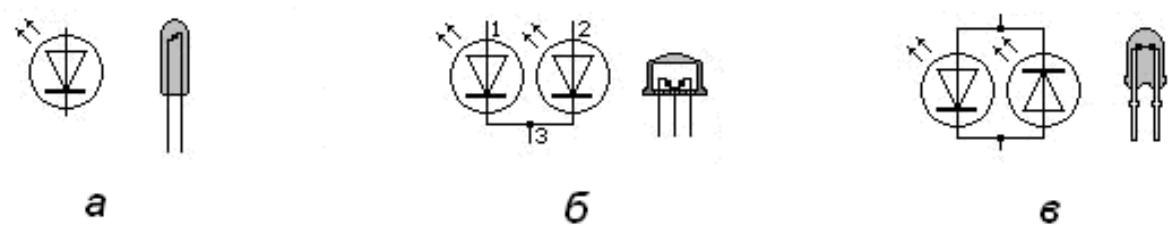


Рис. 2.4. Конструкції та позначення світлодіодів: звичайного (а), із змінюваним кольором свічення (б), призначених для роботи зі змінним струмом (в).

Швидкодія СД або максимальна частота модуляції випромінювання обмежується часом життя неосновних носіїв

$$\frac{P_{\omega}}{P_0} = \left[1 + (\omega \tau_{\text{випр}})^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \tag{2.6}$$

де P_{ω} – потужність випромінювання на частоті ω , P_0 – потужність немодульованого випромінювання.

Таблиця 2.1. Параметри різних за кольором свічення світлодіодів [2].

Колір	Довжина	Матеріал	Напруга	Потужність
-------	---------	----------	---------	------------

свічення	хвилі, нм	напівпровідника	живлення, В (при 10 мА)	випромінювання, мкВт (при струмі 10 мА)
Фіолетовий	400	Ga–N	3,4–3,8	3,0–10,0
Синій	465	Si–C (на GaAs)	1,3–1,5	3,0–5,0
Зелений	565	Ga–P	2,2–2,4	1,5–8,0
Жовтий	583	Ga–P–As	2,0–2,2	3,0–8,0
Оранжевий	635	Ga–P–As	2,0–2,2	5,0–10,0
Червоний	655	Ga–As–P	1,6–1,8	1,0–2,0
ІЧ	900	Ga–As	1,3–1,5	100,0–500,0

Значна частина процесів рекомбінації закінчується виділенням енергії у вигляді елементарних квантів теплових коливань кристалічної ґратки – фононів. Такі переходи електронів між енергетичними рівнями називають *безвипромінювальними*. Співвідношення між випромінювальними і безвипромінювальними переходами залежить від низки причин, зокрема від структури енергетичних зон напівпровідника, наявності у кристалі домішок з великою ефективністю безвипромінювальних захоплень електронів і дірок. Найкращими з точки зору величини внутрішнього квантового виходу є світлодіоди з GaAs, де отримано внутрішній квантовий вихід, близький до 50 %. *Внутрішня квантова ефективність* – це відношення швидкості генерації фотонів у напівпровіднику до швидкості, з якою носії інжектують в перехід. *Зовнішня квантова ефективність* – це відношення кількості фотонів, які вийшли з напівпровідника, до кількості носіїв, які пройшли через перехід. Зовнішня квантова ефективність завжди менша від внутрішньої у зв'язку з наступними основними видами втрат:

- втрати на повне внутрішнє відбивання;
- поверхневі втрати на френелівське відбивання;
- втрати, пов'язані з поглинанням випромінювання в приконтактних областях та в об'ємі напівпровідника.

Таким чином, із СД, який має найпростішу плоску структуру (рис. 2.5,а), в оточуюче середовище виходять тільки соті частки всіх квантів світла, які виникають у p - n -переході і поблизу нього. При такій конструкції СД основний внесок у втрати світла буде давати явище повного внутрішнього відбивання. Адже через границю розділу проходить лише та невелика частка світла, яка падає на границю розділу під кутом, меншим від критичного кута повного внутрішнього відбивання $\varphi_{кр} = \arcsin(1/n_r)$, де n_r – коефіцієнт заломлення світла в напівпровіднику становить, наприклад, 3,3 і 3,6 відповідно для фосфіду і арсеніду галію, для яких $\varphi_{кр} \leq 10-16^\circ$. Зовнішній квантовий вихід вдається збільшити при використанні більш складних конструкцій СД зі структурою у вигляді напівсферичного монокристалу напівпровідника (рис. 2.5,в) чи площинної структури з кульовою лінзою (рис. 2.5,д).

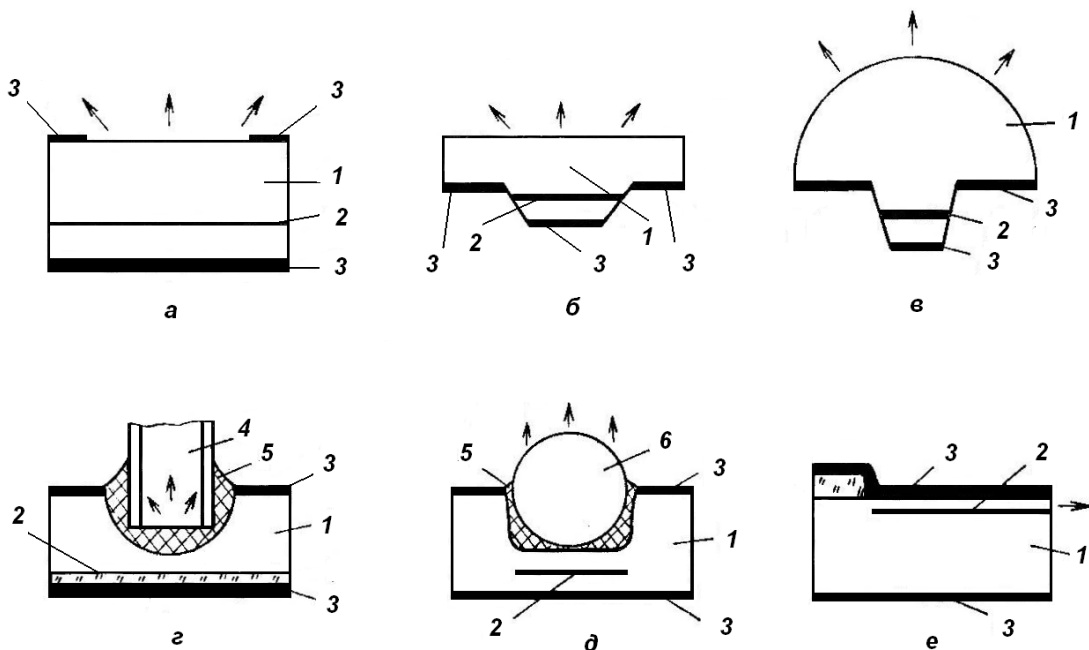


Рис. 2.5. Конструкції напівпровідникових світлодіодів: а) площинна структура, б) меза структура, в) меза структура з лінзою, г) баррас діод, д) світлодіод з кульовою лінзою, е) суперлюмінесцентний діод. 1 – область формування свічення, 2 – область p - n переходу, 3 – електроди, 4 – оптичне волокно, 5 – імерсійна речовина, 6 – кульова лінза [10].

У СД з напівсферичною поверхнею для усієї поверхні кут падіння квантів світла виявляється меншим за критичний кут повного внутрішнього

відбивання при великому відношенні радіусів R і r (рис. 2.5,в) (де R і r – відповідно радіуси n - і p -областей), тобто при

$$\frac{R}{r} \geq \frac{n_r}{n_{\text{сер}}},$$

де n_r і $n_{\text{сер}}$ – коефіцієнти заломлення світла у напівпровіднику і середовищі, оточуючому світлодіод ($n_{\text{сер}} = 1$ для повітря).

Однак у СД з напівсферичною конструкцією дещо зростають втрати квантів світла в результаті поглинання в самому напівпровіднику через збільшення довжини шляху квантів світла від місця появи до поверхні. Однак СД з напівсферичною структурою мають зовнішній квантовий вихід на порядок вищий у порівнянні із СД з площинною структурою.

Значно простіша технологія виготовлення СД з прозорим напівсферичним покриттям зі скла чи з різних пластичних матеріалів з високим показником заломлення для збільшення критичного кута повного внутрішнього відбивання в напівпровіднику.

Для підвищення зовнішнього квантового виходу застосовують різні просвітлюючі покриття зовнішньої поверхні СД, тобто прозорі шари речовини товщиною в чверть хвилі з показником заломлення, рівним $n_r^{1/2}$. Просвітлюючі покриття збільшують зовнішній квантовий вихід приблизно в 1,5 рази незалежно від структури СД. Застосування багат шарових просвітлюючих покриттів дозволяє підвищити зовнішній квантовий вихід, але ускладнює технологію виготовлення СД.

У зв'язку з великим коефіцієнтом поглинання арсеніду галію з електропровідністю p -типу в порівнянні з коефіцієнтом поглинання арсеніду галію з електропровідністю n -типу виведення випромінювання із СД на основі арсеніду галію роблять звичайно через область діода з електронним типом провідності.

Площа випромінюючого p - n -переходу СД звичайно не перевищує 1 мм^2 . Вона обмежується параметрами джерела живлення, тобто струмом, який може забезпечити джерело живлення (звичайно 5-10 мА).

СД можуть мати один *p-n*-перехід чи декілька *p-n*-переходів (матричні СД), розташовані на одному монокристалі. При відповідному вмиканні окремих *p-n*-переходів матричного СД можна отримати цифру, букву чи знак, які світяться.

Природним розвитком елементної бази класу випромінюючих діодів можна вважати також появу *світлодіодних збірок* у вигляді цифрових, буквенно-цифрових і графічних індикаторів, широко використовуваних в індикаторних панелях і табло.

Для того, щоб висвітлити той чи інший символ, необхідно керувати свіченням (або гасінням) кожного елемента. З цією метою живлення на окремі елементи світлодіодних лінійок і матриць подається в мультиплексному режимі. При цьому, якщо в збірці загальна кількість елементів дорівнює m , то кожний з елементів працює ніби в миготливому режимі, запалюючи на $1/m$ часу циклу пробігання всіх елементів. Якщо частота циклів мультиплексування вище 10-15 Гц, то за законом Тальбота миготливі елементи здаються світними постійно, але з меншою яскравістю (яскравість може бути підвищена шляхом пропускання через СД більшого струму).

Світлодіодні лінійки, які випускаються в різних виконаннях, і матриці (рис. 2.6) знайшли застосування в поліграфічних скануючих і записуючих пристроях. У сканерах вони використовуються як лінійні освітлювачі. У записуючих голівках рекордерів, іміджсеттерів, цифрових друкуючих машин світлодіодні лінійки і матриці здійснюють запис інформації на світлочутливий матеріал – фотоплівку, фоторезисторну плівку, електрографічний циліндр і т.п.

Особливістю цих елементів є необхідність синхронізації їхньої роботи з високочастотним інформаційним сигналом (кожен імпульс сигналу призначається певному світлодіоду в лінійці або матриці). Задача під'єднання в необхідний момент того чи іншого СД до джерела сигналу виконується електронними комутаторами, керованими за циклічними алгоритмами.

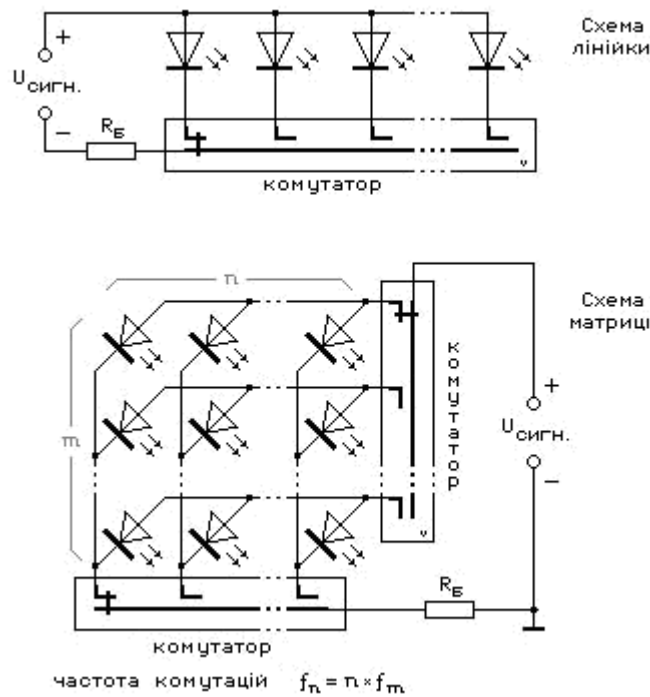


Рис. 2.6. Схеми багатоелементних світлодіодних випромінювачів [2].

Ще одним різновидом СД є світлодіод з керованою геометрією поля свічення (*керований СД*) (рис. 2.7,а). Область з електронним типом провідності такого СД низькоомна і тому є практично екіпотенціальною. Область з дірковим типом електропровідності порівняно високоомна і тому при прикладанні зовнішніх напруг до електродів не буде екіпотенціальною. Розподіл потенціалу в p -області буде залежати від величини напруги, поданої на керуючий електрод (рис. 2.7,б). Відповідно від величини поданої на керуючий електрод напруги буде залежати і протяжність у просторі світної ділянки керованого СД. Такі світлодіоди можуть бути використані як індикатори величини (рівня) сигналу, для запису аналогової інформації на фотоплівку, як шкала вимірювальних приладів та для інших цілей.

Основним методом формування p - n -переходів при створенні СД з фосфіду і арсеніду галію є метод епітаксійного нарощування. Звичайно це рідкофазна епітаксія, іноді – епітаксія з газової фази. Для формування p - n -переходів у карбіді кремнію використовують метод дифузії домішок, а іноді методи планарної технології, які дозволяють отримати p - n -переходи різної конфігурації.

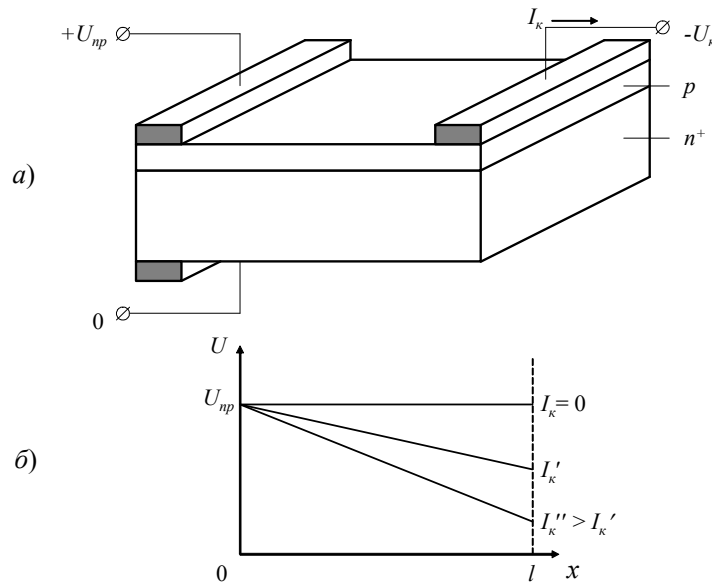


Рис. 2.7. Конструкція керованого світлодіода [2].

2.2. Основні параметри СД та методи їх вимірювання

Яскравість випромінювання. Одиницею яскравості в системі СІ є *кандела на квадратний метр* ($\text{кд}/\text{м}^2$) – яскравість джерела випромінювання, кожний квадратний метр випромінювальної поверхні якого має в заданому напрямі силу світла, рівну одній канделі.

Яскравісна характеристика (світлова характеристика). СД, *p-n*-перехід якого увімкнутий у прямому напрямі, володіє відносно малим опором. Тому СД слід вважати пристроями, які живляться від генератора струму. Відповідно яскравісною характеристикою СД є залежність яскравості від струму, який проходить через СД (рис. 2.8). Струм, вище якого інтенсивність свічення не зростає, називається *струмом насичення* світлодіода ($I_{\text{н}}$).

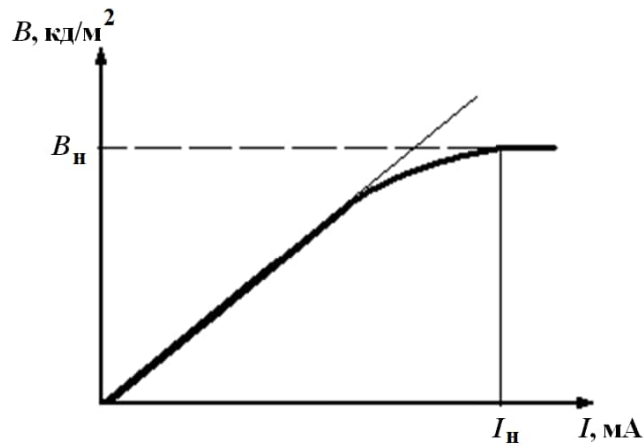


Рис. 2.8. Типова форма яскравісної характеристики світлодіодів.

При малих струмах і відповідно при малих напругах на СД випромінювання принципово бути не може аж до напруги на СД, чисельно рівної енергії випромінюваного кванту світла. Тому початкова ділянка яскравісної характеристики нелінійна. При великих струмах яскравісна характеристика сублінійна, оскільки при великих густинах струму в шарі, де відбувається рекомбінація носіїв заряду, буде істотне відхилення від рівноважного стану. Тому розташування квазірівнів Фермі для електронів і дірок буде відрізнятися від положення рівня Фермі в умовах термодинамічної рівноваги. Із збільшенням відхилення від рівноважного термодинамічного стану аналогічно зміщуються і демаркаційні рівні. Отже, кількість домішкових рівнів пасток захоплення зменшується, а кількість рекомбінаційних рівнів збільшується. Тепер частина носіїв може рекомбінувати без випромінювання квантів світла чи з випромінюванням фотонів з енергією, що відповідає енергії квантів видимого світла.

Нижня і верхня границі діапазону робочих напруг. Нижня межа робочої напруги СД чи порогова напруга СД визначається енергією випромінюваних квантів світла. Чисельно значення цього параметра у вольтях повинно бути дещо вище від енергії випромінюваних квантів світла в електронвольтах. Верхня межа робочої напруги визначається допустимою потужністю розсіяння СД. Її значення залежить від величини контактної різниці потенціалів p - n -переходу та від опору бази СД.

Спектральна характеристика СД – залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі випромінюваного світла чи від енергії випромінюваних квантів. У першому наближенні спектральний склад випромінювання можна характеризувати кольором свічення (рис. 2.3). Колір випромінювання у видимому діапазоні може бути визначений з допомогою трьох кольорів на двовимірному графіку МКО (рис. 2.9). На цьому графіку розміщення спектрально чистих кольорів має форму підкови, а біле світло, отримане змішуванням однакових за яскравістю трьох основних кольорів, розміщене в центрі графіка з координатами $x = 0,33$ і $y = 0,33$. Цей кольоровий графік *RGB* був прийнятий у 1931 році Міжнародною комісією з освітлення, де як основні кольори були вибрані кольори монохроматичних випромінювань: *R* (*red* – червоний) – $\lambda_R = 700$ нм; *G* (*green* – зелений, лінія ртутного розряду) – $\lambda_G = 546,1$ нм; *B* (*blue* – синій, лінія ртутного розряду) – $\lambda_B = 435,8$ нм. Оскільки будь-який колір можна задати лінійною комбінацією цих трьох кольорів, тобто $W = rR + gG + bB$ (r , g , b – частки трьох основних кольорів у сумарному кольорі, так звані кольорові координати), і $r + g + b = 1$, тому сумарний колір можна виразити через дві незалежні змінні, наприклад $W = rR + gG + (1 - r - g)B$. Тому по осях координат на кольоровому графіку МКО відкладаються дві кольорові координати, в цьому випадку $r \equiv x$, $g \equiv y$.

Приклади спектральних характеристик СД на основі різних матеріалів подані на рис. 2.3. Оскільки перехід електронів при рекомбінації носіїв заряду звичайно відбувається не між двома певними енергетичними рівнями, а між двома або й більше групами близько розташованих енергетичних рівнів, то спектр випромінювання характеризують півшириною спектральної характеристики, яка вимірюється в нанометрах чи мікрометрах на висоті 0,5 від максимуму.

Спектр випромінювання СД з GaP:ZnO складається з домінуючої смуги червоного свічення ($h\nu_{\text{макс}} = 1,76$ еВ, ширина 0,3 еВ при $T = 293$ К) і значно менш інтенсивної смуги зеленого свічення.

кут випромінювання, вольт-амперна характеристика і пряма напруга. Розроблені відповідні методики для вимірювання цих параметрів.

Параметри СД як елемента електричної схеми визначаються його вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Відмінності прямих гілок ВАХ СД з різних напівпровідникових матеріалів зв'язані з різною шириною забороненої зони. Зворотні гілки ВАХ відповідають відносно малим пробивним напругам, що пояснюється малою товщиною *p-n*-переходів у СД, в основному не призначеним для вмикання у зворотному напрямі. Типові значення *прямої напруги* при струмі 10 мА складають для GaP-діодів 1,9-2,2 В; для $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ – 1,65-1,7 В. *Диференціальний опір* на лінійній ділянці прямої гілки складає 3-10 Ом для GaP і 0,7-1,2 Ом для $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$. Зворотна напруга в процесі експлуатації для всіх типів СД є небажаною і допускається не вище за 2 В.

Важливою характеристикою будь-якого випромінювача є *спрямованість випромінювання*. Просторовий розподіл випромінювання характеризується фотометричним тілом випромінювача, а у випадку його симетрії – *діаграмою спрямованості*. На рис. 2.9 наведено кілька типових діаграм, характерних для випромінювачів різних видів (неспрямовані характерні для ламп розжарення, промінь – для лазерів). Діаграми зі слабо вираженою спрямованістю характерні для індикаторних СД у пластмасових корпусах (для них важливий сам факт свічення або гасіння), а для випромінюючих діодів, які використовуються у давачах або записуючих пристроях, характерні спрямовані та гостроспрямовані діаграми випромінювання.

Оскільки робоче живлення на випромінюючі діоди подається в прямому напрямку (свічення виникає при позитивному потенціалі на анодному полюсі діода), для роботи на змінному струмі випускаються діодні збірки, у яких (див. рис. 2.4) два діоди увімкнуті паралельно. У цьому варіанті кожен діод працює тільки півперіода синусоїдального циклу. При цьому важливо не забути, що обмежувальний опір у колі живлення діода не повинен допустити підвищених зворотних напруг на замкненому діоді.

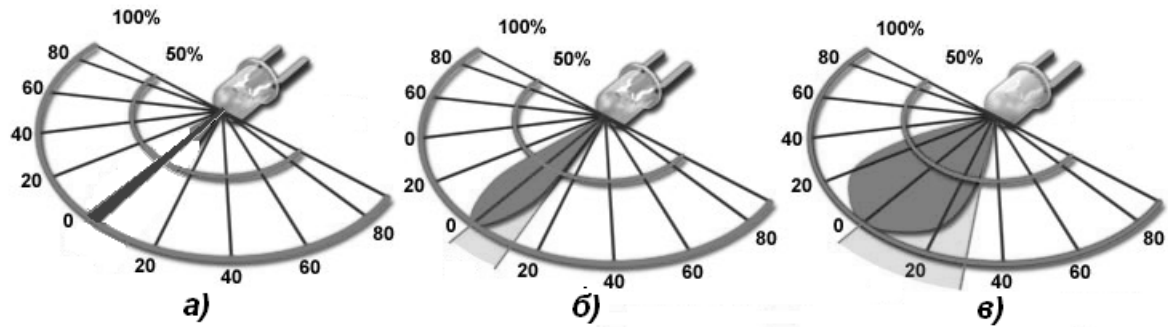


Рис. 2.10. Діаграми спрямованості різних випромінювачів: напівпровідникового лазера (а), світлодіода з фокусуючою лінзою (б), світлодіода з розсіювальною лінзою (в).

Випускаються також діодні збірки (див. рис. 2.4, в), що дають світловий потік зі змінюваним кольором свічення. У таких збірках поєднуються два діоди з різним кольором свічення (як правило, зелений і червоний), що дозволяє випромінювати не тільки той або інший основний колір, але і проміжні (наприклад, жовто-зелений, жовтий, жовтогарячий).

Строго говорячи, під світлом маємо на увазі видиме для людського ока випромінювання, тому й світлодіодами варто називати діоди, які випромінюють у видимому діапазоні спектра. Однак фізичні параметри випромінювання, прилягаючого до видимої зони, зокрема, інфрачервоної області спектра мало чим (крім частоти коливань) відрізняються від світлових хвиль, тому термін «світлодіод» часто застосовують і до ІЧ-діодів, хоча термін «випромінюючий діод» у цьому випадку більш точний.

Напівпровідникові СД, які випромінюють в інфрачервоному діапазоні, завдяки високій ефективності, швидкодії, довговічності, надійності, сумісності з фотоприймачами на основі Si, а за параметрами живлення з інтегральними мікросхемами, знаходять широке використання в оптоелектроніці.

Інерційність СД характеризується постійними часу розгорання і затухання електролюмінесценції при імпульсному збудженні СД, які прийнято вимірювати між яскравостями випромінювання, які становлять 0,1 і 0,9 від максимальної. Інерційність СД може визначатися часом перезаряджання бар'єрної ємності p - n -переходу і процесами накопичення та розсмоктування

неосновних носіїв заряду. Постійні часу затухання електролюмінесценції не перевищують часток мікросекунди.

Коефіцієнт корисної дії, чи ефективність СД залежить від внутрішнього квантового виходу і конструкції СД. К.к.д. СД хоч і становить до десяти відсотків, проте є більшим, ніж к.к.д. ламп розжарення та малопотужних газорозрядних ламп. Основні втрати світлової енергії відбуваються в результаті повного внутрішнього відбивання і через поглинання квантів світла в напівпровідниковому матеріалі СД, на контактах чи інших частинах конструкції СД.

За своїм призначенням СД сьогодні можна поділити на три групи: 1) діоди для різноманітних фотоелектричних пристроїв; 2) діоди для використання в оптронах; 3) діоди для волоконно-оптичних ліній зв'язку. До цих приладів ставляться дещо різні вимоги, але спільними є: висока ефективність, висока швидкодія, сумісність з фотоприймачами, економічність.

Представниками першої групи є СД на основі GaAs, які володіють високою ефективністю, але порівняно невисокою швидкодією (0,2-3 мкс). Типовими представниками ІЧ-діодів з кристалом GaAs є АЛ-106 (в металоскляному корпусі) і АЛ-107 (напівсферичної будови). Потужність випромінювання (енергетичний світловий потік) СД P (Φ_e) можна виміряти за допомогою фотоприймачів (як правило фотодіодів типу ФД-7К чи ФД-24К), використовуючи співвідношення

$$P = \frac{I_\Phi}{S_\lambda}, \quad (2.7)$$

де I_Φ – струм фотодіода, А; S_λ – спектральна чутливість фотодіода, А/Вт.

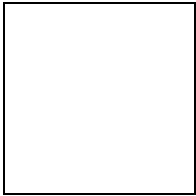
Таким чином, винятковими властивостями СД є їх висока надійність, великий термін служби, малі інерційність, габарити, маса, споживана потужність, можливість виготовлення світлодіодних матриць і світлодіодів з різним кольором свічення, сумісність з інтегральними мікросхемами у зв'язку з низькими робочими напругами.

2.3. Модуляція випромінювання СД високочастотним та імпульсним збудженням. Термічне насичення

Характерною рисою СД є практично лінійна залежність потужності випромінювання від струму накачування: $P = f(I_n)$. Це дозволяє використовувати аналогові системи передачі для модуляції оптичного випромінювання. При використанні СД у системах зв'язку застосовується тільки пряма модуляція інтенсивності випромінювання за допомогою зміни струму інжекції. СД є приладами з низьким входним опором і споживають великий струм, тому для їхньої нормальної роботи варто використовувати низькоомні транзистори, що забезпечують великий струм і необхідну лінійність. Порівняно проста конструкція СД, їхня висока надійність і досить слабка залежність характеристик випромінювання від температури роблять їх особливо придатними для ВОСП (волоконно-оптичних систем передавання) на короткі відстані при невисокій швидкості передавання.

Типова частотна характеристика СД

$$\frac{P_1 / J_1}{P_0 / J_0} = \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau_p^2)^{1/2}}, \quad (2.8)$$

де ; P_1, P_0 – відповідно залежна від часу і стаціонарна компоненти повної потужності оптичного випромінювання; J_1, J_0 – відповідно змінна та стаціонарна складові повної густини струму при прямому зміщенні p - n -переходу СД; ω – кругова частота; τ_s, τ_o – часи життя носіїв відповідно при випромінювальній та безвипромінювальній рекомбінаціях; τ_p – час життя носіїв, який визначає граничну частоту модуляції $f_m = \frac{1}{2\pi\tau_p} = \frac{1}{2\pi\eta_{\text{внутр}}\tau_s}$ (тут

$\eta_{\text{внутр}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_s}{\tau_o}}$ – внутрішня квантова ефективність).

Формула (2.8) має велике значення для розгляду процесу високочастотної модуляції джерела випромінювання. На частотах вище за f_m ефективність джерела істотно падає, адже

$$\frac{P_1 / J_1}{P_0 / J_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\omega^2}{(2\pi f_m)^2}\right)^{1/2}}. \quad (2.9)$$

Зменшення τ_p призведе до зростання граничної частоти, але зменшення τ_p за рахунок зменшення часу життя при безвипромінювальній рекомбінації τ_b не дає збільшення оптичної потужності на високих частотах — лише зменшиться потужність на низьких частотах, оскільки знизиться внутрішня квантова ефективність. Отже, необхідно по можливості зменшити випромінювальний час життя τ_b . При цьому зростає як квантова ефективність на низьких частотах модуляції, так і високочастотна границя. Зменшення τ_b , тобто збільшення $\eta_{\text{внутр}} f_m$ можна досягнути, збільшуючи ступінь легування та рівень інжекції. Обмеження обумовлене тим, що при значних рівнях легування зменшується безвипромінювальний час життя і падає квантова ефективність. У випадку арсеніду галію це відбувається при концентрації домішки порядку 10^{24} м^{-3} , при цьому $\tau_b \approx 10 \text{ нс}$. Тобто частоти модуляції значно вище 20 МГц можуть бути досягнуті тільки за рахунок квантової ефективності. Учетверо більшу смугу модуляції без зниження ефективності вдається отримати в СД на основі InGaAsP/InP, які випромінюють в області 1,3-1,5 мкм.

Як вже зазначалося, основним параметром СД є потужність випромінювання. Вона визначається конструкцією приладу. Чим більший струм можна пропускати через СД без істотного його підігріву, тим більша потужність випромінювання. При великих струмах СД починає розігріватися через електричні втрати на омичних опорах, і тоді можуть спостерігатися три ефекти: змінюється розподіл випромінювання за довжинами хвиль, падає внутрішня квантова ефективність внаслідок зростання швидкості безвипромінювальної рекомбінації, падає термін служби СД. Внаслідок цього зменшення вихідної потужності на 50% відповідає зростанню температури від

кімнатної до 90-100°C. Взагалі у приладах на основі GaAs і GaAlAs температура переходу не повинна перевищувати 50-100°C.

Робота СД можлива і в імпульсному режимі. Імпульсні СД та джерела ІЧ випромінювання випромінюють світлові імпульси при пропусканні електричних імпульсів через *p-n*-перехід у прямому напрямі. При цьому через СД можна пропускати достатньо великі струми і, звідси, отримувати в імпульсі велику потужність випромінювання. При великому струмі у неперервному режимі роботи СД просто не встигає розсіяти тепло і може згоріти. При імпульсному струмі СД працює не постійно, тому випромінюване тепло менше, що дозволяє збільшити струм через СД (до 20-30 мА), не боячись перегріву.

Відмінною рисою СД є їх мала інерційність. Вона становить 10^{-8} - 10^{-9} с. Завдяки малим часам життя неосновних носіїв можлива робота СД на частотах до 100 МГц. Так, наприклад, на основі сплавного карбідокремнієвого переходу створено випромінювач наносекундних імпульсів світла із власними фронтами наростання і спаду світлового імпульсу порядку 3 нс і стабільністю амплітуди світлового спалаху у часі близько 1%.

Світлові імпульси спостерігаються і при зворотному увімкненні СД. В цьому випадку світло випромінюється електронно-дірковою плазмою, яка виникає при пробії. Однак при прямому увімкненні СД світловихід звичайно в 3 рази перевищує світловихід при зворотному увімкненні.

2.4. Напівпровідникові лазери та їх характеристики

2.4.1. Особливості напівпровідникових лазерів як джерел світла для ОЕ.

Умови підсилення

Особливий клас випромінюючих діодів складають так звані *лазерні діоди (напівпровідникові лазери)*, частка і роль яких у сучасній оптоелектроніці постійно зростає. З точки зору електроніки вони є звичайними діодами, проте їх свічення володіє рядом особливостей, які в цілому формують поняття лазерного випромінювання.

Основними відмінними рисами лазерного випромінювання є монохроматичність, когерентність і променева спрямованість. Щоб представити, наскільки лазерне випромінювання «монохроматичніше» від світлодіодного (яке здається теж одноколірним), можна співставити за допомогою відношення ширини смуги спектру випромінювання до довжини хвилі максимуму спектральної характеристики. Для СД ступінь монохроматичності оцінюється величинами порядку 0,05 - 0,1, а для лазерів – менше 0,000001. Тобто довжину хвилі лазерного випромінювання визначають з точністю до третього-четвертого знаку після коми, інакше кажучи, лазер випромінює практично строго на одній довжині хвилі.

Лазер є джерелом випромінювання, у якого принцип дії і параметри випромінюваного потоку світла докорінно відрізняються від характеристик усіх попередніх джерел, так що іноді ці джерела в оптоелектроніці називають «долазерними випромінювачами». Лазерне випромінювання відноситься до індукованого випромінювання, передбаченого А. Айнштейном у 1917 р. і реалізованого в перших лазерах (1954 р.).

Сьогодні основними видами лазерів є газові (на вуглекислому газі, гелій-неоні, аргоні), рідинні (до рідинних відносять і лазери на склі, яке з огляду на аморфність, вважається переохолодженою рідиною), твердотільні (на рубіні, гранаті, неодимі) і напівпровідникові (на кристалах напівпровідникових матеріалів, наприклад GaAs). Перший напівпровідниковий лазер був виготовлений в СРСР у 1962 р. науковою групою під керівництвом Н.Г.Басова, в якому використовувався дифузійний гомоперехід на GaAs. Схеми конструкції твердотільних, газових і напівпровідникових лазерів зображені на рис. 2.11, а технічні характеристики деяких з них – у табл. 2.2 [11].

Лазерне випромінювання фізично зароджується там, де в атомах або молекулах активної речовини під дією зовнішніх сил (світла, електричного поля і т.п.) утвориться «перенаселеність» верхніх енергетичних шарів зовнішніх електронних оболонок (зони провідності) збудженими електронами, що приводить до активного утворення фотонів при природному намаганні електронів перейти в нормальний, незбуджений стан (тобто при переході у

валентну зону). Таким чином, в активній речовині (газовому середовищі, кристалі, у тому числі напівпровідниковому) виникає та постійно поповнюється кількість квантів світла – фотонів, які володіють, що важливо відзначити, однією частотою, оскільки в однорідній речовині при подоланні електроном забороненої зони виділяється однакова кількість енергії.

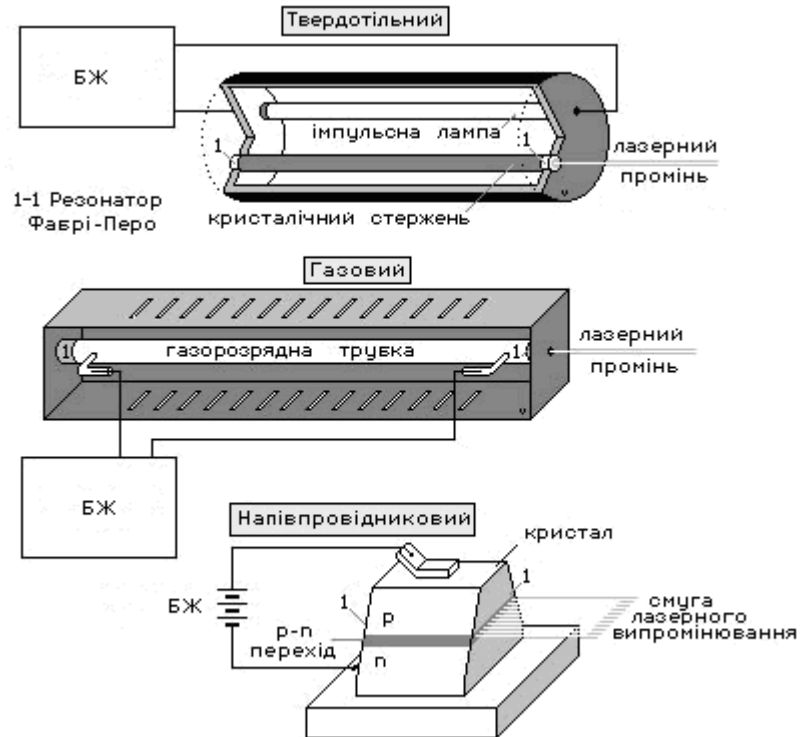


Рис. 2.11. Види лазерів (БЖ – блок живлення) [2].

Наявність коливань однієї і тієї ж частоти є умовою (не єдиною) одержання когерентного випромінювання. Наступна задача – домогтися співнапрявленого поширення цих коливань. Це досягається за допомогою використання резонаторів (як правило, резонаторів Фабрі-Перо). Резонатор Фабрі-Перо – це два співвісних, паралельно розташованих і обернених назустріч одне до одного дзеркал, між якими, відбиваючись від цих дзеркал, переміщуються в активному середовищі фотони, генеровані зовнішнім збудженням. Напрямок руху кожного з фотонів у момент появи визначається випадковим чином. Внаслідок цього багато фотонів залишають активне середовище, утворюючи навколо нього свічення (у кращому випадку, який-небудь електрон, «захопивши» енергію такого фотона, переходить у зону провідності). Лише ті з фотонів, напрямок руху яких співпав з віссю

резонатора, залишаються в активному середовищі і беруть участь в утворенні лазерного випромінювання. Ці фотони, відбиваючись десятки і сотні разів від дзеркал резонатора, пробігають уздовж активного середовища, сприяючи генерації нових фотонів.

Таблиця 2.2. Параметри деяких напівпровідникових лазерів [2].

Матеріал	Довжина хвилі випр., нм	Потужність випр., мВт	Режим роботи
$(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/$ $(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ на GaAs	630 – 670	0,5 – 10	Неперервний або імпульсний з $t_{\text{имп}} < 1$ нс та частотою до 200 кГц
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ на GaAs	750 – 910	1 – 1000	Неперервний або імпульсний з $t_{\text{имп}} = 1$ нс - 1 мс
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ на InP	1060 – 1058	1 – 17	Неперервний або імпульсний з $t_{\text{имп}} = 1$ нс - 1 мкс

Суть теоретично відкритого Альбертом Айнштайном індукованого (вимушеного) випромінювання полягає в тому, що в умовах «перенаселеності» верхніх енергетичних рівнів фотони, що пролітають повз атоми з перенаселеними рівнями енергетичної структури, можуть «збивати» збуджені електрони з цих рівнів на нижні, самі при цьому зберігаючись. «Збитий» електрон породжує новий фотон; таким чином, замість одного фотона з'являється два, що і сприяє наростанню світлового потоку. Важливо відзначити, що новоутворений фотон володіє такою ж енергією і, як правило, фазою, що й збуджуючий, а це, в свою чергу, забезпечує монохроматичність та когерентність випромінювання. Таке збільшення кількості фотонів – важлива обставина в зародженні лазерного випромінювання.

Чим більше зароджується фотонів, тим більша їхня кількість залишається в просторі резонатора, беручи участь у нагромадженні світлової

енергії. Відстань між дзеркалами підбирається таким чином, щоб довжина хвилі випромінювання, що випускається лазером, укладалася в ньому ціле число разів. Таким чином, резонатор розв'язує дві важливі задачі: організує односпрямований рух фотонів уздовж осі лазера і вибирає співпадаючі за довжиною хвилі і фазою коливання (інші загасають у процесі постійного накладання хвиль однієї на одну). Так виникає когерентне випромінювання. Схеми додавання когерентних коливань подані на рис. 2.12.

Одне з дзеркал резонатора є повністю непрозорим, а інше – напівпрозорим (у випадку неперервного випромінювання), або/і у вихідному вікні лазера встановлюється оптичний затвор. При наявності затвора лазер може накопичувати світлову енергію, щоб потім випустити її одномоментно у вигляді потужного імпульсу світла – імпульсні лазери створюють лазерний промінь, що набагато перевищує за потужністю неперервне випромінювання. У протилежному випадку після нагромадження світлової енергії, достатньої для подолання непрозорості дзеркала, лазер починає випромінювати світло, набираючи потужність у промені до рівня насичення в сталому процесі роботи.

Таким чином, лазерний пристрій повинний містити активну речовину (в якій зароджується випромінювання), резонатор і джерело збудження активного середовища. Для газових лазерів таким джерелом збудження слугує газорозрядна трубка, для твердотільних – потужне джерело світла (імпульсна лампа, що опромінює стержень кристалу), для напівпровідникових – прямий електричний струм через *p-n*-перехід напівпровідника. Кожне з цих джерел приводить електрони атомів і молекул активної речовини в збуджений стан (іноді це називають «накачуванням»).

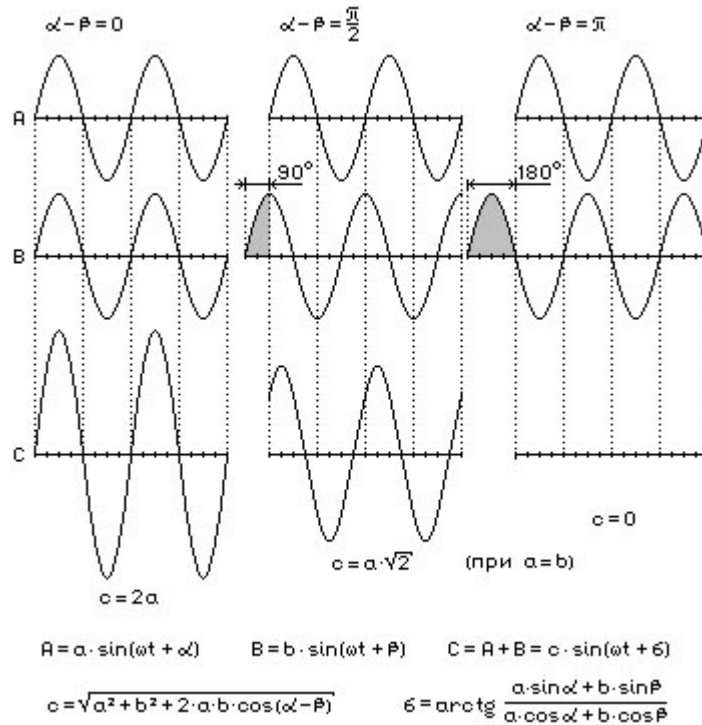


Рис. 2.12. Схеми додавання когерентних коливань [2].

Спрямованість випромінювання (розбіжність променя) прямо залежить від довжини тіла активної речовини (відстані між дзеркалами резонатора), адже кут розбіжності $\varphi \approx (\lambda / l_p)^{1/2}$, де l_p – довжина резонатора. Чим більша ця відстань, тим менший кут розбіжності і, отже, тим більше вузьконаправленим є лазерний промінь. Довжина газорозрядної трубки газового лазера складає, як правило, десятки сантиметрів (нерідко і більш метра), що дозволяє одержати промінь з розбіжністю в кілька кутових хвилин (див. дані табл. 2.2). Сучасні технології вирощування кристалів дозволяють одержувати стержні довжиною 250-400 мм, що дає можливість досягати у твердотільних лазерах розбіжності променя в десятки кутових хвилин. У напівпровідникових же лазерах використовуються кристали розміром 0,5×0,5 мм (і менше), тому розбіжність променя, а точніше смужки випромінювання, набагато більша – 20-30 кутових градусів.

Напівпровідниковий лазер у чомусь подібний на випромінюючий діод (часто його і називають лазерним діодом). Володіючи звичною діодною структурою, при невеликих прямих струмах він і працює як звичайний випромінюючий діод. Але дві протилежні грані кристала робляться дзеркально відбиваючими (резонатор Фабрі - Перо), і при збільшенні прямого струму до

певного граничного значення (раніше для цього були потрібні десятки ампер і, як наслідок, серйозні заходи для охолодження), коли створюється «інверсія заселеності» (перевищення числа збуджених електронів над незбудженими на зовнішніх електронних оболонках атомів і молекул), з'являється справжнє когерентне лазерне випромінювання.

Кожен тип лазера має свої переваги і відповідно сферу застосування. Наприклад, газові лазери, володіючи найбільшою потужністю випромінювання, застосовуються в поліграфії в пристроях запису зображення безпосередньо на друковану форму, тому що вони здатні з прийнятною швидкістю випалювати шар пробільного матеріалу, оголюючи друкуючі елементи. Через великі розміри вони використовуються в стаціонарному великогабаритному устаткуванні. Твердотільні лазери досить компактні і застосовуються в рекордерах середнього розміру для запису зображення на плівки, пластмаси й інші світлочутливі і випалювані матеріали (з низьким коефіцієнтом теплопровідності). Лазерні діоди використовуються в записуючих головках лазерних принтерів, цифрових друкованих машин, а також в оптичних лініях зв'язку, пристроях збереження інформації.

Розглянемо детальніше саме напівпровідникові лазери. Як уже згадувалося, щоб СД почав генерувати когерентне оптичне випромінювання, його необхідно помістити у відкритий резонатор, що забезпечує позитивний оптичний зворотний зв'язок. У напівпровідникових лазерах (LASER – *lightwave amplification by stimulated emission of radiation* – підсилення світла шляхом вимушеної емісії випромінювання) дзеркалами резонатора служать грані напівпровідникового кристала. Через різницю показників заломлення на границі кристал-повітря виходить досить високий коефіцієнт відбивання і велике підсилення. Узагалі *лазер* – це випромінювач світлових хвиль, що складається з генератора та системи позитивного зворотного зв'язку. Напівпровідникові лазери, виготовлені з одного типу напівпровідника (найчастіше арсеніду галію – GaAs), називаються *гомолазерами*. У такому лазері дуже великі втрати в об'ємному резонаторі. Через це для підвищення порогу генерації необхідні значні струми, що викликають сильне нагрівання

кристала та швидке його руйнування. Але лазерний діод, призначений для оптичного зв'язку, повинен надійно працювати при нормальних зовнішніх умовах з будь-якими модулюючими струмами і не вимагати при цьому зовнішнього охолодження. Тому гомолазер застосовується для генерування одиночних імпульсів великої потужності і для оптичного зв'язку не використовується (лише у вимірювальних приладах). Значно більш ефективніші *гетеролазери*, у яких зменшення густини струму і покращення інших характеристик було досягнуто за рахунок використання багат шарових напівпровідників. Гетеролазери – це інжекційні лазери на основі гетеропереходів, в яких використовують два види напівпровідників (зазвичай це GaAs і GaAlAs – арсенід галію з домішкою алюмінію, наприклад структура *p-GaAlAs–n-GaAlAs–n-GaAs*). За допомогою таких лазерів вдалося одержати імпульсний режим роботи при кімнатній температурі, а для деяких спеціальних конструкцій виявилася можливою робота й у неперервному режимі. Основним параметром, який визначає коефіцієнт підсилення, є ефективна густина струму

$$J_{ef} = \frac{\eta_{внутр} J}{d}, \quad (2.10)$$

де J – густина струму через діод; d – глибина активної області. Вище порогу (J_{ef}) підсилення росте майже лінійно.

Трохи пізніше з'явилися нові лазери на основі подвійної гетероструктури – *смугові лазери* (інша назва – лазери із смуговими контактами або лазер зі смуговою геометрією). У цих лазерів активна область була виготовлена у вигляді вузької смужки, укладеної всередині значно ширшої пасивної частини кристалу. Ці лазери мають три важливих переваги перед іншими подібними приладами: 1) випромінювання виходить через площадку малої потужності, що спрощує узгодження лазера із світловодом; 2) значно спрощується тепловідведення, тому що активна область (у якій виділяється тепло) знаходиться всередині холоднішого напівпровідника; 3) зменшується робочий струм лазера.

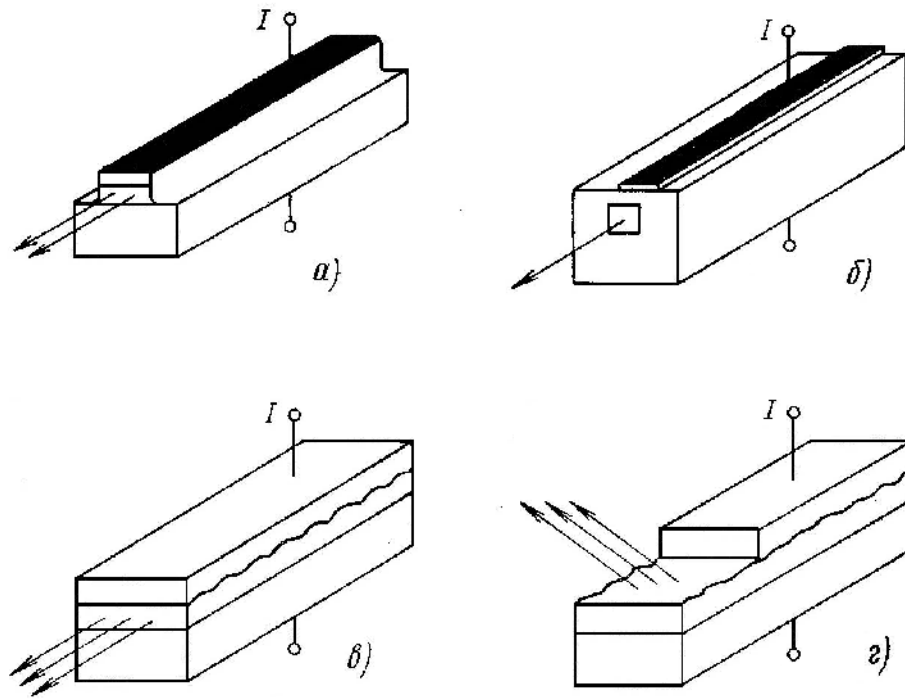


Рис. 2.13. Схематичне зображення конструкції лазерів зі смужковою геометрією: із смужковою мезаструктурою (а); із зарощеною гетероструктурою (б), з періодичною структурою зворотного зв'язку (в), із розподіленим зворотнім зв'язком в активній області (г) [10].

Смужкова геометрія може бути виконана різними способами. При використанні для формування смужки оксидних високоомних шарів типу SiO_2 , отримуваних протонним бомбардуванням чи дифузією цинку (рис. 2.13,а) досягається локалізація оптичної потужності чи носіїв струму. При цьому струм локалізується в смужці шириною менше 10 мкм. Такі прилади носять назву лазерів з «хвильовим підсиленням» (*gain-guided*), оскільки світло локалізується в області з максимальною інверсією заселеності, яка у свою чергу визначається розподілом густини струму. Значно більш сильна бокова локалізація забезпечується в конструкції, представлений на рис. 2.13,б, яку називають «зарощеною гетероструктурою» (*buried heterostructure*). У таких лазерах утворюється «хвильовий канал» (*index-guided*), оскільки зарощуючий шар GaAlAs зі зниженим показником заломлення утворює границю хвильовода і обмежує оптичне випромінювання, в той час як границя гетеропереходу обмежує носії струму. Структура, зображена на рис. 2.13,б, може бути отримана із звичайного лазера на подвійній гетероструктурі витравлюванням *n*-

GaAlAs шару з будь-якого боку активної смужки і наступним вирощуванням n - і p -GaAlAs шарів на витравленій області. У зарощеній гетероструктурі ширина смужки може бути доведена до 2 мкм, що дозволяє знизити пороговий струм до 10 мА і менше, але при цьому повна випромінювана у повітря потужність не перевищує 1-2 мВт. Лазери із зарощеною гетероструктурою дозволяють отримати генерацію в одній моді, володіють кращою часовою стабільністю і підвищеною лінійністю потужності вихідного випромінювання. У зв'язку з цим вони є найбільш перспективними для волоконно-оптичного зв'язку, не дивлячись на технологічні труднощі при їх виготовленні.

Для зменшення кількості генерованих мод (що є необхідною умовою збільшення швидкості передачі інформації) був розроблений лазер з *розподіленим зворотним зв'язком* (РЗЗ). Системи зворотного зв'язку лазерів бувають дискретними – у вигляді розташованого поза лазерним середовищем оптичного резонатора, що складається в більшості випадків з напівпрозорих дзеркал, і розподіленими – у вигляді структури, де відбивання створюється періодичною зміною показника заломлення уздовж шляху світла (рис. 2.13, в, г). У лазері з РЗЗ для зменшення числа мод у резонаторі створюється або періодична неоднорідність показника переломлення, або періодична зміна оптичної товщини активного шару, в якому поширюється світлова хвиля. Такі періодичні структури називаються дифракційними ґратками, що мають для створення дзеркального ефекту кілька сотень штрихів (іншими словами – сотень періодів). У результаті дифракції на таких ґратках залишаються тільки ті моди, довжина хвилі яких кратна періодові ґратки. При цьому відстань між штрихами l (період) повинна задовольняти умові Брегга:

$$l = m\lambda / 2n_{\text{еф}} ,$$

де m – порядок дифракції, λ – довжина хвилі світла в матеріалі, $n_{\text{еф}}$ – ефективний показник заломлення хвилеводу [2].

У лазері з РЗЗ періодична структура розподілена по всій активній області генерації. Позитивний зворотний зв'язок створюється за рахунок зворотного розсіювання Брегга. Лазер з РЗЗ – це хвилевід з виступами і западинами у вигляді дифракційних ґраток. Світлова хвиля, що проходить

уздовж такого хвилевода, розсіюється всіма штрихами дифракційних ґраток. У багатьох місцях світло потроху розсіюється в протилежних напрямках, але в цілому виходить розсіювання великої інтенсивності. Довжина хвилі в такому лазері визначається показником заломлення і від температури практично не залежить.

Одне із застосувань розподіленого зворотного зв'язку – *лазер з розподіленим брегівським відбиванням (РБВ)*, в якому така система розташована з обох боків активного шару. Лазери з такою структурою генерують тільки одну поздовжню моду, що робить їх зручними для використання як джерел випромінювання при роботі з одномодовим волокном й у системах передачі із спектральним ущільненням. Недоліком такого лазера є вища густина робочого струму.

2.4.2. Лазерні моди

Активна область смугового лазера утворює прямокутну порожнину, яка відіграє роль резонатора для лазерного випромінювання. У такому резонаторі може існувати декілька типів коливань (мод), кожне з яких характеризується своєю частотою. На цих частотах може збуджуватися лазерна генерація і, звідси, такі складові з'являються у вихідному випромінюванні лазера. Кожна мода характеризується трьома цілими числами (i, j, k), які відповідають кількості максимумів розподілу електромагнітного поля вздовж трьох взаємно перпендикулярних напрямів всередині резонатора (рис. 2.14).

У спрощеному вигляді умова резонансу відповідає цілому числу півхвиль, які вміщуються на довжині резонатора. В дійсності питання ускладнюється характером зміни діелектричної проникності на границях, формою розподілу підсилення всередині резонатора, наявністю вільних носіїв, які викликають локальні зміни коефіцієнта заломлення, і локальними змінами температури. Якщо не враховувати ці ефекти, легко показати, що відстань між поздовжніми модами обернено пропорційна довжині резонатора. Умова поздовжнього резонансу

$$k \frac{\lambda_k}{2} = \mu_{ep} l_p, \quad (2.11)$$

де k – поздовжнє модове число; λ_k – довжина хвилі k -ої моди у вільному просторі; μ_{ep} – груповий показник заломлення напівпровідника на цій довжині хвилі; l_p – довжина лазерного резонатора. Підставивши $f_k = c/\lambda_k$, отримаємо для частоти k -ої моди

$$\lambda_k = \frac{2l_p}{k} \quad (2.12)$$

Таким чином міжмодова відстань

$$\Delta f = f_k - f_{k-1} = \frac{c}{2\mu_{ep}l} \quad (2.13)$$

Або в припущенні, що $\Delta f \ll f_k$

$$\Delta \lambda = \lambda_k (\Delta f / f_k) = \frac{\lambda_k^2}{2\mu_{ep}l} \quad (2.14)$$

При $\mu_{ep} = 4$ (GaAs) і довжині резонатора 500 мкм $\Delta f = 75$ ГГц і $\Delta \lambda \approx 0,2$ нм.

Товщина активного шару в лазерах на подвійній гетероструктурі завжди менше одного мікрметра. В результаті у резонаторі може збуджуватися тільки найнижча *поперечна перетинаюча (transverse)* мода. Кількість *поперечних бокових (lateral)* мод принципово залежить від ширини резонатора, але ширина смужки також важлива.

У лазерах із шириною смужки більше 20-30 мкм звичайно спостерігається досить різкий перехід через поріг, після чого збуджуються моди високого порядку. З ростом струму накачування вихідна потужність росте лінійно до тих пір, поки розігрів не приведе до деякого насичення. Насправді процес не настільки простий – розподіл підсилення сприяє виникненню самофокусування, завдяки чому випромінювання концентрується в нитці всередині лазерного резонатора. При зменшенні смужки до 20 мкм і менше зростають втрати для мод високих порядків. Тоді відразу за порогом з'являється тільки основна поперечна бокова мода. При подальшому збільшенні струму накачування з'являються бокові поперечні моди високих порядків поступово при досягненні їх порогу збудження. Зменшення ширини смужки до 10 мкм і менше збільшує пороги мод високих порядків до рівнів, які

перевищують можливості лазера. Наявність бокових поперечних мод виявляє вплив як на просторовий розподіл, так і на ширину спектру лазерного випромінювання.

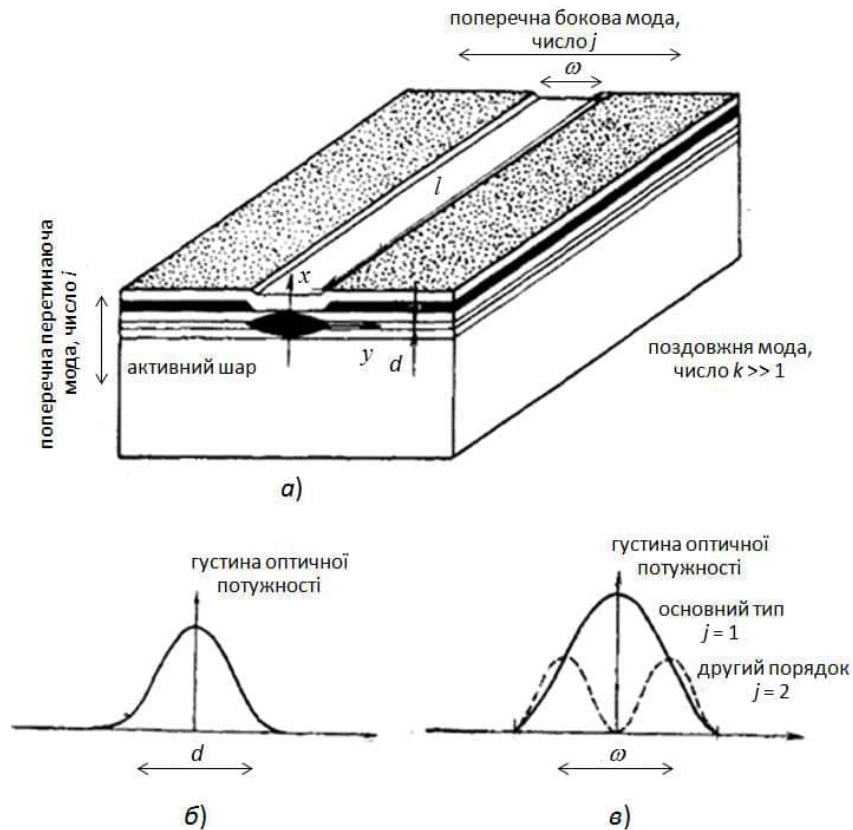


Рис. 2.14. Моді резонатора: схематичне зображення смугового лазера з позначеннями індексів основних мод і розподілом густини потужності (а); розподіл у ближній зоні для основної поперечної перетинаючої моди (б); розподіл у ближній зоні для основної бокової поперечної моди і моди другого порядку ($j = 1, 2$) (в) [10].

Можна користуватися двома способами опису просторового розподілу. Розподіл у ближній зоні відповідає змінам густини потужності по вихідному торцю лазера, як показано на рис. 2.15. У ближній зоні спостерігається тенденція до утворення ниток при розширенні смужкових лазерів. Розподіл у дальній зоні відноситься до характеристик спрямованості генерованого випромінювання. Той факт, що збуджується тільки нижча поперечна перетинаюча мода, підтверджується тим, що в напрямі, перпендикулярному до площини переходу, спостерігається єдиний максимум, як у ближній, так і в дальній зоні. Кутова розбіжність випромінювання залежить від товщини

активного шару і стрибка показника заломлення в гетероструктурі. Звичайно діапазон кутів, в якому інтенсивність перевищує половину максимальної, складає приблизно 40° . Деякі типові розподіли в ближній і дальній зоні в площині, паралельній переходу, показані на рис. 2.15. Як можна відзначити, у цій площині розбіжність не перевищує $5\text{--}10^\circ$ для режиму роботи з нижчими модами.

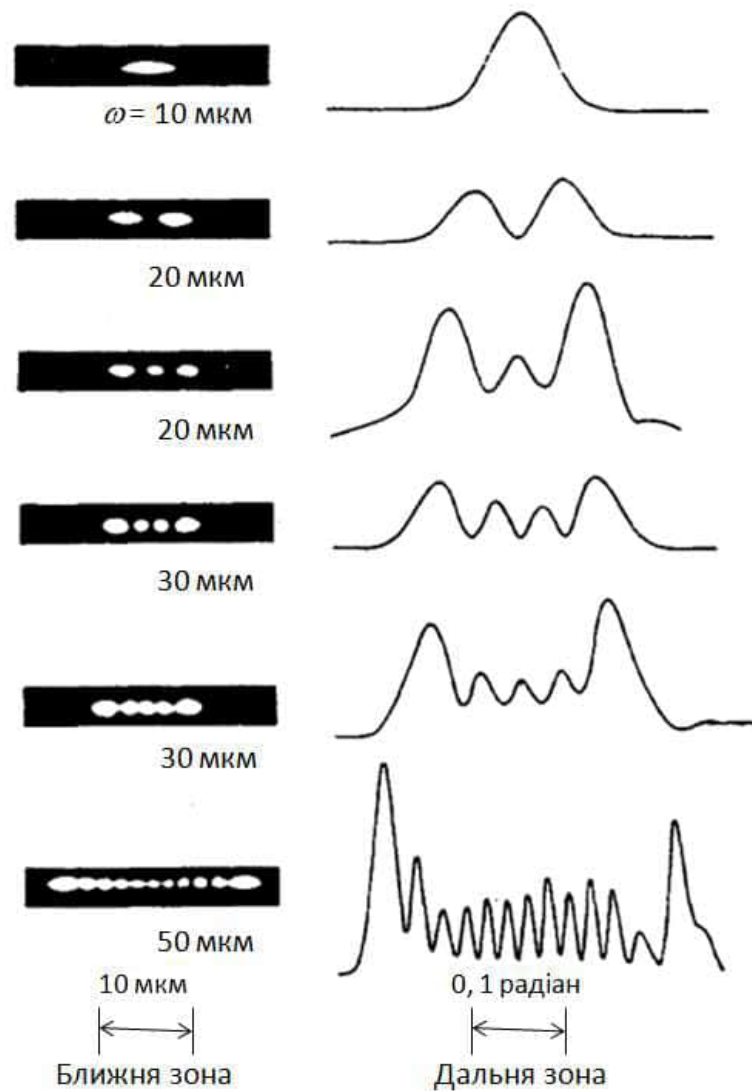


Рис. 2.15. Розподіл інтенсивності у ближній і далекій зоні при різних ширині смужки [10].

2.4.3. Характеристики лазерів: вольт-амперні, ватт-амперні, спектральні, частотні

На рис. 2.16 показано типові залежності вихідної потужності і напруги на діоді від струму для GaAlAs/GaAs смужкового лазера з хвилеводним

підсиленням. При зменшенні ширини смужки лазерний поріг таких приладів стає «м'якшим», тобто вихідна потужність залишається пропорційною до спонтанного випромінювання. Це приводить до розширення окремих лазерних мод. Нижче порогу *вольт-амперна характеристика* (ВАХ) описується формулою $I = I_0 \times [\exp(eU/akT) - 1]$ при $a = 2$, якщо опір діода можна вважати постійним. Звичайно опір діода складає 1-10 Ом. Падіння напруги при нормальному струмі звичайно становить 1,5-2 В для GaAlAs/GaAs лазерів і близько 1,2 В для InGaAsP/InP приладів. Наявність перегину *ватт-амперної характеристики* (ВТАХ), показаного на рис. 2.16, відчутно впливає на роботу лазерного діода.

Показані на рис. 2.16 перегини характерні для лазерів з хвильоводним підсиленням при ширині смужки 10-20 мкм. Ці перегини стають серйозною перешкодою, коли вимагається висока лінійність, утруднюють роботу в імпульсному режимі і роблять неможливою роботу в аналоговому режимі. Причину їх появи зв'язують зі змінами в розподілі поперечних мод. Внаслідок перестрибування мод вихідна потужність зростає зі струмом повільніше чи навіть падає до тих пір, поки не встановиться новий модовий склад. Перегин з'являється в лазерах з хвильоводним підсиленням, тому що для них характерні слабке каналювання, яке може бути подолане шляхом зменшення показника заломлення, обумовленого високою концентрацією носіїв. Проблему вдається вирішити, застосовуючи дуже вузькі (менше 10 мкм) смужки. Головна причина нестабільності залишається, але рівень вихідної потужності, при якому з'являється перегин, вдається зсунути за межі нормального робочого режиму лазера. З іншого боку, наявність канального хвильовода полегшує лазерну генерацію на визначеній основній моді. Оскільки стрибок показника заломлення в зарощеній гетероструктурі великий, для роботи на одній боковій поперечній моді вимагаються дуже вузькі (1-2 мкм) смужки. У будь-якому випадку вдається уникнути перегинів і отримати лінійну вихідну характеристику, але за рахунок значного зниження вихідної потужності.

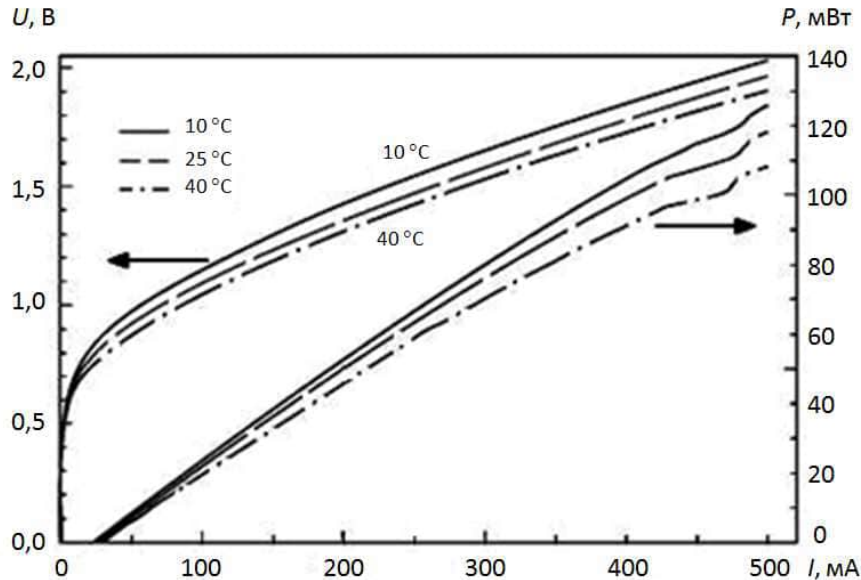


Рис. 2.16. Ватт-амперні і вольт-амперні характеристики для типових смужкових AlGaAs/GaAs лазерів [10].

На рис. 2.17 представлено типову залежність вихідної потужності напівпровідникового лазера від струму. При низькому струмі (ділянка *a*) оптичне випромінювання визначається спонтанними переходами, і лазер фактично є світлодіодом з торцевим випромінюванням. В області кривої *б* зростає частка індукованого випромінювання; це режим суперлюмінесценції. При струмах вище порогу (ділянка *в*) у випромінюванні лазера переважає частка індукованого (вимушеного) випромінювання. З рис. 2.17 видно, як можна визначити пороговий струм. Крутизна ВтАХ в області спонтанного випромінювання відповідає зовнішній квантовій ефективності. Крутизна ж цієї характеристики в лазерному режимі називається диференціальною квантовою ефективністю

$$\eta_D = \left(\frac{e}{\varepsilon_\phi} \right) \left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta I} \right), \quad (2.15)$$

де ε_ϕ – енергія випромінюваних фотонів. Необхідно зазначити, що збільшення струму накачування за порогом не супроводжується ростом коефіцієнта підсилення, величина якого залишається практично незмінною

$$g(\varepsilon_\phi) = a_{\text{розс}} + \frac{\ln(1/R_1 R_2)}{2l} = a_{\text{розс}} + \frac{1}{2l} \ln\left(\frac{1}{R}\right), \quad (2.16)$$

якщо коефіцієнти відбивання на торцях відповідно рівні $R_2 = 1$, $R_1 = R$; $a_{\text{розс}}$ – коефіцієнт розсіювання, аналогічний до коефіцієнта поглинання у напівпровіднику; l – довжина резонатора. Очевидно, що коефіцієнт підсилення і концентрація носіїв насичуються вище порогу, а оптична потужність росте майже повністю за рахунок процесу вимушеного випромінювання.

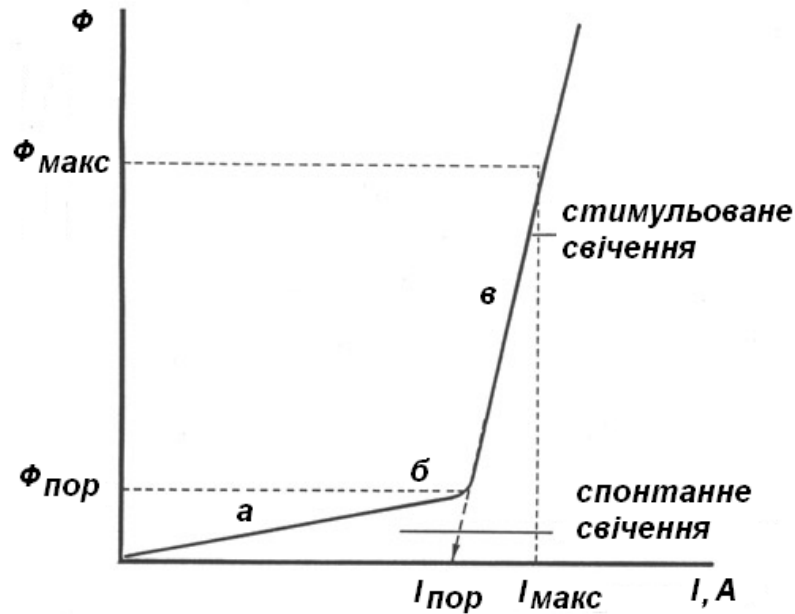


Рис. 2.17. Типова експериментальна залежність вихідної потужності напівпровідникового лазера від струму [10].

Залишається проблемою вплив температурних змін в активній області, які в першу чергу впливають на лазерний поріг. Ці та інші зміни характеристик можна бачити на рис. 2.16. При достатньо високій температурі діод взагалі перестає діяти як лазер. Зміни температури викликають зміну довжини хвилі окремих поздовжніх мод, що приводить до зміни розподілу потужності за модами. Таким чином, змінюються спектральні характеристики. Часто оптична потужність однієї поздовжньої моди передається іншій під час імпульсу. Цей ефект відомий як перестрибування мод.

Основний вплив на спектральні характеристики виявляє кількість збуджених поздовжніх мод. При вузькій смужці в лазерах з хвилеводним підсиленням звичайно збуджується багато мод і спостерігається досить широка лінія генерації, зображена на рис. 2.18,а. У лазерах з хвилеводним каналом відразу за порогом генерується декілька лазерних мод, але поступово зі

збільшенням струму одна чи дві моди стають домінуючими над рештою, як показано на рис. 2.18,б. Зменшення довжини резонатора приводить до зростання міжмодової відстані, так що тільки деякі моди можуть потрапити в межі лінії підсилення. З цієї причини краще використовувати короткі резонатори (не більше 100 мкм). Вони дають можливість працювати з однією поздовжньою модою при більш високій вихідній потужності.

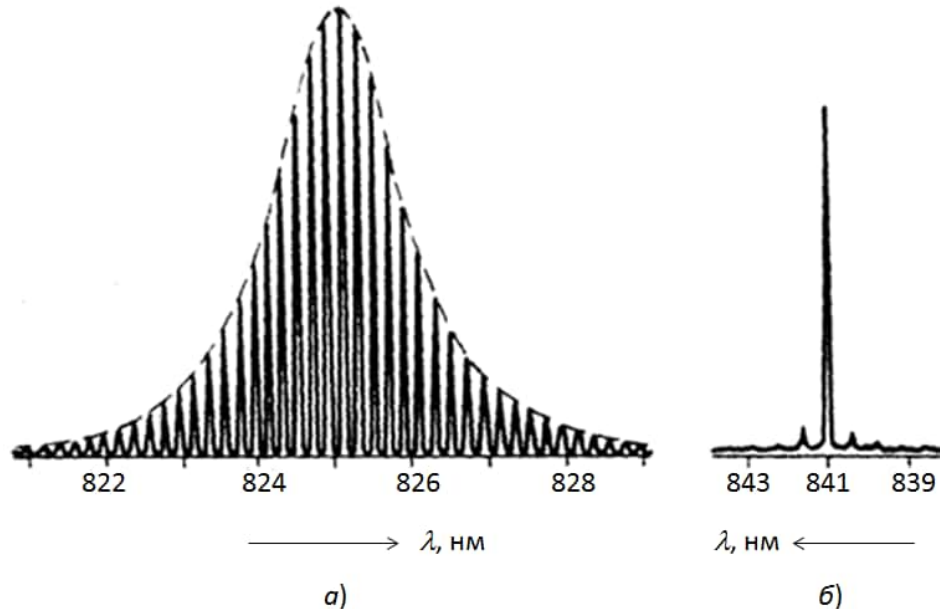


Рис. 2.18. Типовий спектр AlGaAs/GaAs лазера: а – лазер з хвилеводним підсиленням; б – лазер з хвилеводним каналом [10].

Ширина спектральної лінії окремої моди не перевищує 0,1 нм. Однак у більшості випадків результат таких вимірювань визначається роздільною здатністю спектрального приладу. Детальніші виміри, які базуються на визначенні довжини когерентності (відстань, у межах якої зберігається постійність різниці фаз випромінених хвиль, – вона зв’язана із спектральною шириною джерела), дають результат на порядок менший (тобто 0,01 нм, чи декілька гігагерц) для лазерів із хвилеводним підсиленням і порядку 10^{-4} нм (30 МГц) для лазерів із хвилеводним каналом. Наявність бокових поперечних мод збільшує ширину лінії кожної окремої поздовжньої моди.

Розглянемо можливість високочастотної модуляції лазера, зокрема випадок, коли струм перевищує пороговий, а синусоїдальна модуляція накладається на постійну складову струму. У більшості типів лазерів, окрім

лазерів з дуже вузькою смужкою, залежність глибини модуляції від частоти має резонансний характер. Як видно з рис. 2.19, величина резонансної частоти змінюється зі зміною струму накачування, але залишається в діапазоні 0,2-2 ГГц. Резонансний характер цієї залежності пояснюється взаємодією між надлишковими носіями і оптичним випромінюванням у резонаторі, тобто існує два резервуари, між якими може відбуватися обмін енергією. Зокрема, можна провести порівняння з електричним резонансним контуром, в якому відбувається обмін енергією між котушкою індуктивності і конденсатором. Дійсно, характеристики, подані на рис. 2.19, нагадують резонансну криву паралельного коливального контура RLC .

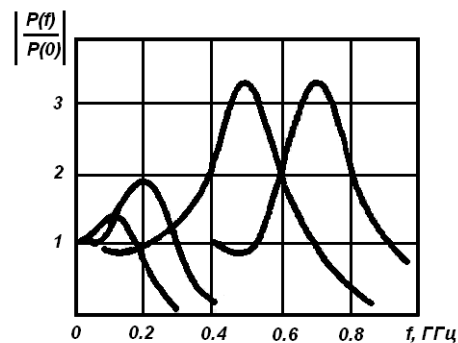


Рис. 2.19. Типова залежність потужності модульованого оптичного випромінювання від частоти модуляції. (Резонансне значення зростає і зсувається у високочастотну область, оскільки росте перевищення струму над порогом) [1].

Походження лазерного резонансу можна пояснити наступним чином. Збільшення струму з деякою затримкою приводить до зростання концентрації носіїв. Підвищена концентрація, в свою чергу, викликає зростання рекомбінаційного випромінювання, яке, знову із затримкою, збільшує індуковану рекомбінацію, що приводить до падіння концентрації носіїв. Наявність затримок приводить до того, що це падіння проходить через рівноважне значення і процес стає коливним. Власна частота системи f_0 залежить від оптичної постійної часу τ_ϕ і постійної часу рекомбінації τ_{sp} . Однак взаємодія є нелінійною, так що аналіз ускладнюється, а резонансна частота виявляється залежною (див. рис. 2.19) від того, наскільки струм накачування I_0

перевищує порогове значення $I_{\text{пор}}$. Наведені графіки можна апроксимувати теоретичною залежністю

$$\frac{P(\omega)}{P(0)} = \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} + j\beta\omega, \quad (2.17)$$

$$\text{де } \omega = 2\pi f, \quad \omega_0^2 = \frac{(I_0 - I_{\text{пор}})}{\tau_{\text{сп}} \tau_{\text{ф}} I_{\text{пор}}} \quad \text{і} \quad \beta = \frac{I_0}{\tau_{\text{сп}} I_{\text{пор}}}.$$

Оптична постійна часу $\tau_{\text{ф}}$ фактично є часом життя фотона в резонаторі, її зміст можна пояснити наступним чином. Загальні оптичні втрати на одиницю довжини резонатора виражаються формулою

$$a = -\frac{1}{P} \frac{dP}{dz} = a_{\text{розс}} + \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right), \quad (2.18)$$

де $a_{\text{розс}}$ – коефіцієнт розсіювання; l – довжина резонатора; R_1 і R_2 – коефіцієнти відбивання на торцях резонатора. Можна використовувати це співвідношення, щоб записати оптичні втрати за одиницю часу

$$\frac{1}{\tau_{\text{ф}}} = -\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{c}{\mu} a = \frac{c}{\mu} \left(a_{\text{розс}} + \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right). \quad (2.19)$$

Якщо типові значення $a = 2000 \text{ м}^{-1}$, тоді при $\mu = 3,6$ $\tau_{\text{ф}} = 6 \text{ нс}$. Оскільки $\tau_{\text{сп}} = 10 \text{ нс}$, то при $I_0 = 1,2 I_{\text{пор}}$ можна очікувати резонансну частоту $f_0 = \omega_0/2\pi = 0,3 \text{ ГГц}$.

Електрон-фотонний резонанс відіграє важливу роль також і при вмиканні лазера. Нехай струм вмикається миттєво. Величина стрибка може не доходити до порогу чи перевищувати його. Внаслідок резонансного характеру лазера такий стрибок приводить до так званого *дзвону*, як показано на рис. 2.20. Хоча максимальне значення струму виявляє деякий вплив на збільшення частоти дзвону і звуження спектру, значно істотнішою є величина зміщення. Зі зростанням струму зміщення від нуля до порогового значення і далі часова затримка t_3 зменшується, середня за час імпульсу ширина спектру звужується. Тому звичайно працюють при малих перевищеннях над порогом.

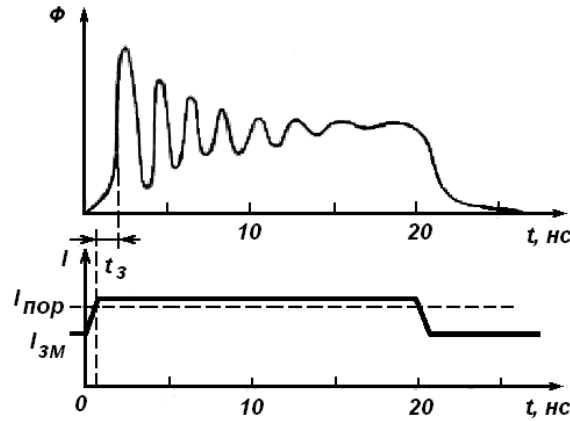


Рис. 2.20. Типовий дзвін, який спостерігається в імпульсному лазері. Часова затримка t_3 визначається часом наростання концентрації носіїв до лазерного порогу і часом встановлення рівня оптичної потужності. Оскільки система володіє резонансними властивостями, з'являється дзвін [6].

З простих теоретичних міркувань можна виразити час затримки t_3 через струм зміщення I_D , пороговий струм $I_{\text{пор}}$ і час рекомбінації τ . На практиці t_3 вимірюють для визначення величини τ . Вважається, що струм зростає достатньо швидко від I_0 до деякої нової величини I , яка перевищує порогове значення. Густина електронного струму $J = I/A$ в активному шарі подвійної гетероструктури приводить до збільшення концентрації електронів у відповідності з

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{J}{ed} \right) - \left(\frac{n}{\tau} \right), \quad (2.20)$$

де A і d – відповідно, площа і товщина активного шару, а крім того, нехтується витіканням носіїв через другий гетероперехід і дірковим струмом. Вихідна рівноважна концентрація електронів

$$n(0) = \frac{J\tau}{ed}, \quad (2.21)$$

концентрація на порозі

$$n(t_3) = n_{\text{пор}} = \frac{J_{\text{пор}}\tau}{ed}, \quad (2.22)$$

де $J_{\text{пор}} = I_{\text{пор}}/A$. Розв'язок рівняння (2.20) дає

$$n(t) \frac{ed}{\tau} = J - (J - J_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (2.23)$$

Підставляючи (2.22) у (2.23), отримаємо

$$J_{nop} = J - (J - J_0) \exp\left(-\frac{t_3}{\tau}\right), \quad (2.24)$$

тобто

$$t_0 = \tau \ln \left[\frac{J - J_0}{J - J_{nop}} \right] = \tau \ln \left[\frac{I - I_0}{I - I_{nop}} \right]. \quad (2.25)$$

Зрозуміло, що поступово при $I_0 \rightarrow I_{nop}$ можна очікувати $t_3 \rightarrow 0$. При такому аналізі вважається, що τ не залежить від електронної концентрації. При виконанні умови сильної інжекції швидкість рекомбінації пропорційна до n^2 , і можна показати, що

$$t_3 = \tau \left(\frac{I_{nop}}{I} \right)^{1/2} \left[th^{-1} \left(\frac{I_{nop}}{I_0} \right)^{1/2} - th^{-1} \left(\frac{I}{I_0} \right)^{1/2} \right]. \quad (2.26)$$

Встановлено, що лазери з хвилеводним підсиленням при ширині смужки менше 5 мкм не проявляють осциляцій генерації, показаних на рис. 2.20. Це свідчить про м'якший режим збудження. Такі прилади подібні до суперлюмінесцентних діодів. Резонанси сильно гасяться спонтанним випромінюванням і характеристики стають подібними до характеристик світлодіодів на подвійній гетероструктурі, в яких час наростання випромінювання визначається часом життя носіїв $\tau_{сп}$. Цей факт ілюструє рис. 2.21. Однак, навіть при роботі із вузькосмуговими лазерами, які «не дзвенять», бажано використовувати близьке до порогового зміщення, щоб звести до мінімуму необхідну зміну напруги і зв'язаний з цим додатковий струм для заряджання ємності діода.

В усіх лазерах вплив змін температури на вихідні характеристики (див. рис. 2.16) призводить до необхідності підтримувати рівень зміщення поблизу порогу, а максимальне значення — у відповідності з потрібною вихідною потужністю. В оптичних волоконних системах звичайно випромінювання, яке виходить через заднє дзеркало, скеровують на фотодіод, що дозволяє контролювати і рівень зміщення, і вихідну потужність. Імпульси струму, які поступають на лазерний діод, на який подано попереднє зміщення порядку

10 мА, отримуються від стандартної інтегральної схеми. При використанні GaAs-лазера можна отримати швидкість передачі інформації понад 1 Гбіт/с.

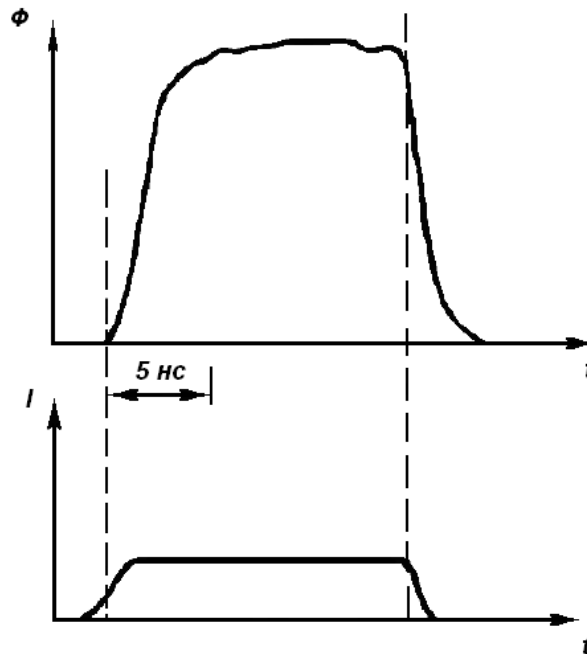


Рис. 2.21. Перехідна характеристика вузькосмугового лазера.

2.4.4. Джерела довгохвильового випромінювання

Оскільки більше поширення, особливо в системах оптичного зв'язку, набули GaAlAs/GaAs лазери, розглянемо саме ці структури більш детально. Довжина хвилі випромінювання цих лазерів змінюється від 0,8 до 0,9 мкм при зміні вмісту Al в активному шарі. Щоб використовувати область, найбільш вигідну за дисперсією і затуханням випромінювання у волокнах, необхідно перейти до більш довгохвильового випромінювання, яке можна отримати, працюючи з вузькозонними напівпровідниками. Такою системою може слугувати InGaAsP, вирощений методом рідкофазної епітаксії на підкладці InP. Низький пороговий струм має також система GaAlAsSb, вирощена на GaSb, але довжина хвилі випромінювання не перевищує 1,2 мкм.

Перевагою InP і InGaAsP є те, що вони не містять Al. Висока хімічна реактивність цього матеріалу призводить до ускладнення технології виготовлення, оскільки вимагається ізоляція від кисню і парів води. Добре узгоджені ґратки отримуються при відносній концентрації компонентів в In_{1-x}

$x\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$, яка відповідає $y \approx 2,2x$. Вдається виготовити лазери на подвійній і зарощеній гетероструктурі для діапазонів 1,2-1,3 і 1,5-1,7 мкм. Обмежуючі шари робляться з InP, а активний шар з четверної сполуки, причому співвідношення компонентів підбирається таким, щоб забезпечити випромінювання на потрібній довжині хвилі. Отримана порогова густина струму 10 А/мм^2 при товщині активного шару близько 0,2 мкм.

Залишається проблемою залежність порогового струму від температури ($J_{\text{пор}} = J_0 \exp(T/T_0)$). Типове значення параметра T_0 лежить в діапазоні 50-70 °С. Таким чином, при збільшенні температури від 20 до 60 °С величина $I_{\text{пор}}$ подвоюється. Є надія, що ситуація покращиться поступово з удосконаленням якості підкладки. В усіх інших відношеннях лабораторні зразки таких лазерів переважають лазери на GaAs.

2.4.5. Надійність НПЛ. Механізми деградації

Напівпровідникові лазери мають обмежений термін служби, обумовлений *поступовою* і *катастрофічною* деградацією. Поступова деградація залежить від густини струму і шпаруватості імпульсів, а причиною катастрофічної деградації є перегрівання лазерного діода, що призводить до руйнування торців. Розглянемо ці процеси детальніше.

При густинах потужності близько 10 кВт/мм^2 розпочинається катастрофічна деградація. Це пов'язано з поглинанням оптичної потужності поблизу поверхні, яке викликає плавлення напівпровідника. Для смужкових лазерів із шириною смужки близько 10 мкм, тобто при площі випромінюючої поверхні порядку декількох квадратних мікрометрів, це відповідає вихідній потужності в декілька десятків міліватт. Точне значення визначається розподілом поля у ближній області. Покриття граней, наприклад, корундовою плівкою збільшує поріг цього процесу. Спостережувана ерозія граней, можливо, зв'язана з фотоокислюючими процесами, але залишається незрозуміло, наскільки це відіграє суттєву роль для деградації лазерів.

Процеси в об'ємі матеріалу можна розділити на локальні і однорідно розподілені по активній області. Перші відомі як дефекти темних ліній, які з'являються в областях з інтенсивною безвипромінювальною рекомбінацією, обумовленою дислокаціями. Вони можуть відбуватися навіть від одиничного дефекту в діоді. Дефекти темних ліній збільшують поріг і зменшують вихідну потужність, що призводить до швидкого їх виходу з ладу. Для усунення дефектів темних ліній слід використовувати високоякісні, вільні від дислокацій матеріали підкладки (~ 10 дислокацій на квадратний міліметр), а також за можливістю усувати механічні напруження в приладі. Необхідно акуратно встановлювати прилад у головку, контакти припаювати спеціальним припоєм з низькою температурою плавлення (наприклад, індієм) і звести до мінімуму механічний тиск тримача. Крім дотримання цих вимог, прилади повинні бути відібрані за видимими дефектами і підлягають тривалому «відпалу», який виявляє приховані дефекти темних ліній.

Пороговий струм росте, а лазерна потужність при постійному струмі падає протягом роботи і незалежно від утворення дефектів темних ліній. Це спостерігається як у лазерному режимі, так і у світлодіодному, причому швидкість процесу залежить від густини струму і температури та описується залежністю $\Phi_T(t) = \Phi_T(0) \exp(-\beta t)$ (оптична потужність; β – величина, обернена до постійної часу) і $\beta = \beta_0 \exp(-\varepsilon_a / kT)$ (β_0 , ε_a – емпіричні коефіцієнти, які становлять, наприклад, для GaAlAs/GaAs $\beta_0 = 10^2$ год⁻¹; для InGaAsP/InP – $\beta_0 = 2 \cdot 10^7$ год⁻¹). Можна вважати, що енергія, яка вивільняється при безвипромінювальній рекомбінації носіїв, збільшує кількість точкових дефектів у кристалі, які діють як пасткові рівні. В результаті збільшується швидкість безвипромінювальної рекомбінації (зменшення τ_0) і, як наслідок, знижується внутрішня ефективність. Швидкість створення таких пасток залежить від енергії активації ε_a і температури $\exp(-\varepsilon_a/kT)$. У результаті дослідження терміну служби СД встановлено, що енергія активації для приладів на основі GaAlAs/GaAs становить близько 0,6 еВ. Для лазерів в аналогічних вимірах отримані величини 0,5-1 еВ. Той факт, що в

довгохвильових джерелах при безвипромінювальній рекомбінації вивільняється менша енергія, може означати, що для створення дефектів вимагається вища енергія активації. Це підтверджується дослідженнями терміну служби СД на InGaAsP/InP, для яких $\varepsilon_a = 1$ еВ.

При дотриманні усіх вище наведених вимог середній термін служби напівпровідникових лазерів при кімнатній температурі становить більше 10^5 годин (понад 12 років).

2.5. Лабораторна робота 2.1

Вимірювання та аналіз основних характеристик джерел світла для оптоелектроніки

Мета роботи: освоїти методику визначення основних характеристик джерел світла для оптоелектроніки.

Прилади і устаткування: лабораторний стенд із змінним модулем для світлодіодів та напівпровідникових лазерів.

В основі роботи напівпровідникових світловипромінюючих діодів і лазерів, як зазначалось вище, лежить низка фізичних явищ, найважливішими з яких є інжекція неосновних носіїв в активну область структури електронно-дірковим гомо- чи гетеропереходом і подальша випромінювальна рекомбінація інжектованих носіїв в активній області структури.

Явище інжекції неосновних носіїв служить основним механізмом введення нерівноважних носіїв в активну область структури світловипромінюючих діодів. Фізика протікання інжекційного струму та подальшого випромінювання в p - n -переходах висвітлена у розділі 2.1. Основні параметри та характеристики подані у розділі 2.4.3, а особливості їх визначення розглядаються у цій роботі.

Оптичні характеристики. Спектральний склад випромінювання у видимому діапазоні може бути визначений з допомогою трьох кольорів на двовимірному графіку МКО (рис. 2.9, 2.22) На цьому графіку розміщення спектрально чистих кольорів має форму підкови, а біле світло, отримуване змішуванням однакових за яскравістю трьох основних кольорів, розміщене в центрі графіка з координатами $x = 0,333$ і $y = 0,333$. Вміст третьої складової z , що відповідає синій ділянці спектру, визначається із співвідношення:

$$x + y + z = 1. \quad (2.27)$$

Довжина хвилі монохроматичного випромінювання $\lambda_{\text{дом}}$, що найточніше відповідає заданому поліхроматичному, визначається з точки перетину

променя, який розпочинається у точці білого кольору ($x = 0,333$, $y = 0,333$) та проходить через точку заданого кольору, з дугою спектрально чистих кольорів.

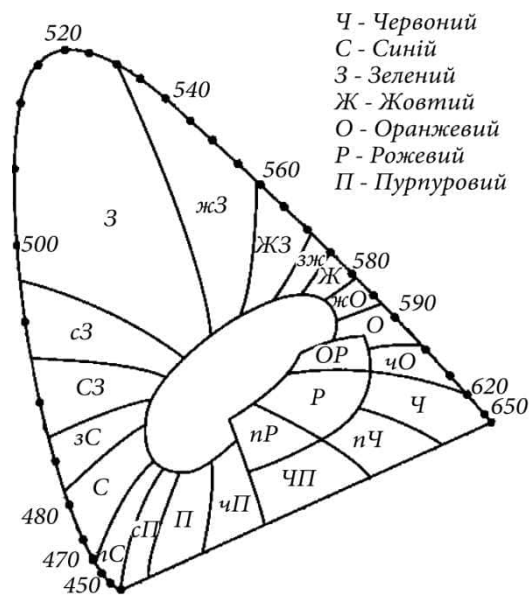
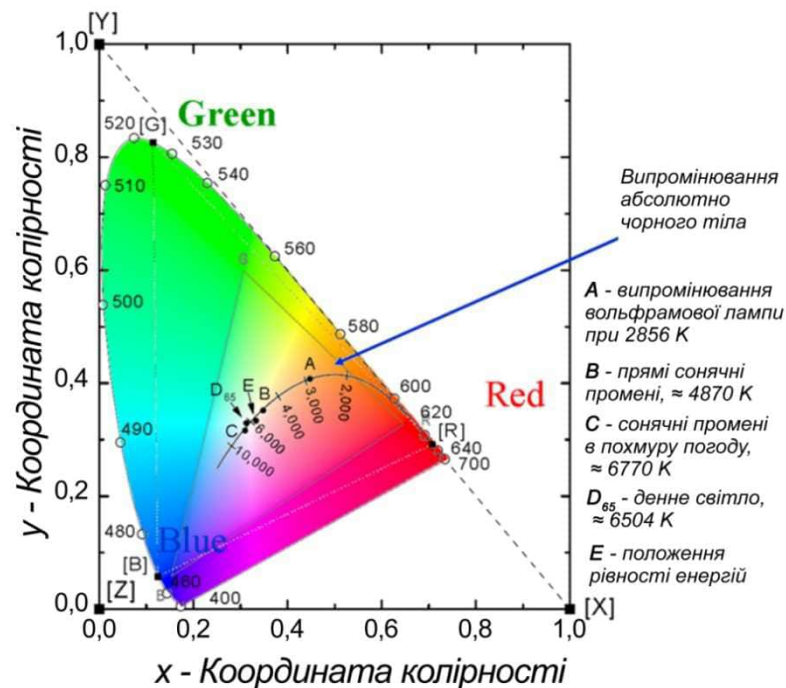


Рис. 2.22. Кольоровий графік МКО (Міжнародна комісія з освітленості, СІЕ – фр. *Commission internationale de l'éclairage*). Цифрами на кривій позначені довжини хвиль в нанометрах.

Власне сам спектр випромінювання вимірюється за допомогою експериментальної установки, що складається з монохроматора і фотоприймача (напівпровідникового чи фотоелектричного), та еталонного джерела світла (світловимірювальної лампи розжарення) і подається у вигляді графіка, зображеного на рис. 2.23.

Рис. 2.23. Спектр електролюмінесценції СД з $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ (300 K) .

Просторовий розподіл випромінювання визначається за допомогою двохкоординатного гоніометра, який дозволяє реєструвати інтенсивність випромінювання на фіксованій віддалі від джерела для повного тілесного кута.

Електричні характеристики. Вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових елементів оптоелектроніки виконується на комп'ютеризованій установці (рис. 2.24), яка складається з персонального комп'ютера (ПК), керованого блока живлення, оптоелектронного модуля (ОЕМ), цифрового вольтметра та інтерфейса зв'язку і керування.

Досліджуваний елемент увімкнений в електричне коло послідовно з опором R_H , тому струм, який протікає у колі, можна визначити шляхом вимірювання напруги на R_H :

$$I_H = \frac{U_R}{R_H}, \quad (2.28)$$

де U_R – напруга на опорі навантаження, що вимірюється з допомогою мультиметра. Тоді напруга на досліджуваному елементі U_{CD} дорівнюватиме

$$U_{CD} = U - U_R, \quad (2.29)$$

де U – напруга на блоці живлення, яка задається програмно і змінюється з певним кроком. З отриманої таким чином ВАХ визначається *пряма напруга* U_p (точка перетину продовження лінійно наростаючої ділянки ВАХ з віссю напруг) та *диференціальний опір* R_d (котангенс кута нахилу лінійно наростаючої ділянки ВАХ).

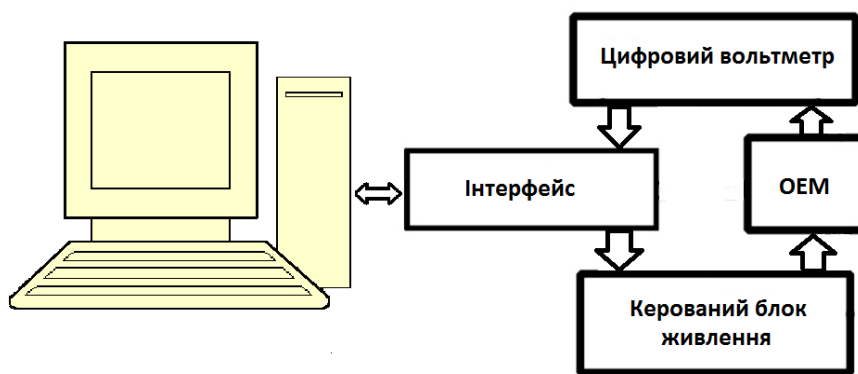


Рис. 2.24. Блок-схема вимірювальної установки.

Для вимірювання інтенсивності джерела світла до цифрового вольтметра під'єднується фотодіод ФД–7К, який працює в фотогальванічному режимі. Фото-ЕРС буде пропорційна до інтенсивності СД, однак лише для значень, які не перевищують 100 мВ. Характерний вигляд залежності інтенсивності свічення Φ від величини струму I поданий на рис. 2.8. З цієї залежності визначається струм насичення світлодіода (I_n).

Хід роботи

1. Вивчити схеми апаратури та програмне забезпечення до неї.
2. Увімкнути апаратуру та перевірити її роботу. Записати послідовність дій, які виконуються при вимірюванні.
3. Отримати напівпровідникове джерело світла (світлодіод чи лазерний діод) та під'єднати до схеми, враховуючи при цьому полярність.
4. Зняти ВАХ джерела за допомогою відповідної програми. Звернути увагу на вхідні параметри, які задаються програмно і визначають остаточні значення напруги та струму. Обробити файл з результатами вимірювання та побудувати графік, використовуючи для цього відповідний програмний пакет.
5. З вольт-амперної характеристики визначити: пряме падіння напруги на напівпровідниковому джерелі світла та диференціальний опір.
6. Виміряти залежність інтенсивності свічення джерела від струму через

нього. Для цього встановити в макет фотодіод ФД–24К або ФД–7К та подбати про його захист від стороннього світла. Визначити струм насичення світлодіода.

7. Дослідити характер свічення досліджуваних джерел (його спектральний склад $I(\lambda)$ та просторовий розподіл $I(\phi)$ в залежності від робочого струму, де I – сила фотоструму через приймач світла. Для цього можна використати монохроматор з багатоелементним або дискретним фотоприймачем для реєстрації спектру та для визначення просторового розподілу свічення. Графічне представлення просторового розподілу $I(\phi)$ потрібно побудувати в полярних координатах.
8. Дати пояснення одержаним результатам і оформити відповідний звіт з аргументованими висновками.

2.7. Тестові завдання та контрольні питання

№ 2.1

Виберіть серед наведених джерела некогерентного світлового випромінювання.

- + лампа розжарення;
- газовий He-Ne-лазер;
- + напівпровідниковий світлодіод;
- напівпровідниковий лазер;
- + газорозрядна трубка.

№ 2.2

Виберіть серед наведених джерела когерентного світлового випромінювання.

- лампа розжарення;
- + газовий He-Ne-лазер;
- напівпровідниковий світлодіод;
- + напівпровідниковий лазер;
- газорозрядна трубка.

№ 2.3

Виберіть серед наведених ті фізичні явища, які сприяють генеруванню випромінювання в дискретних напівпровідникових джерелах світла.

- внутрішній фотоефект;
- + інжекція основних носіїв заряду через p - n -перехід;
- зовнішній фотоефект;
- екстракція неосновних носіїв заряду через p - n -перехід;
- + рекомбінація пар електрон-дірка.

№ 2.4

В якому році був вперше виготовлений перший напівпровідниковий світлодіод?

- 1923;
- 1955;
- + 1962;
- 1970;

№ 2.5

Яка частота електромагнітної хвилі відповідає довжині хвилі випромінювання гелій-неонового лазера?

- $4,74 \cdot 10^{13}$ Гц;
- + $4,74 \cdot 10^{14}$ Гц;
- $4,74 \cdot 10^{15}$ Гц;
- $5,74 \cdot 10^{13}$ Гц;
- $3,74 \cdot 10^{14}$ Гц.

№ 2.6

У випадку якого серед нижче наведених джерел випромінювання кут розбіжності світлового пучка найбільший?

- + лампа розжарення;
- газовий лазер;
- напівпровідниковий лазер;
- напівпровідниковий світлодіод.

№ 2.7

У випадку якого серед нижче наведених джерел випромінювання кут розбіжності світлового пучка найменший?

- лампа розжарення;
- + газовий лазер;
- напівпровідниковий лазер;
- напівпровідниковий світлодіод.

№ 2.8

Ступінь монохроматичності джерела випромінювання – це ...

- відношення ширини смуги випромінювання $\Delta\lambda$ до довжини хвилі в максимумі смуги випромінювання $\lambda_{\text{макс.}}$;
- + відношення півширини смуги випромінювання $\Delta\lambda_{1/2}$ до довжини хвилі в максимумі смуги випромінювання $\lambda_{\text{макс.}}$;
- ширина смуги випромінювання джерела $\Delta\lambda$.

№ 2.9

Виберіть серед наведених визначення порогової густини струму при отриманні випромінювання напівпровідникового лазера.

- густина струму через p - n -перехід, яка відповідає порогу генерування спонтанного випромінювання;
- + густина струму через p - n -перехід, яка відповідає порогу генерування вимушеного випромінювання;
- густина зворотного струму через p - n -перехід, при якій взагалі припиняється генерування випромінювання в лазері.

№ 2.10

Диференціальний опір напівпровідникового випромінювача – це...

- тангенс кута нахилу прямолінійної ділянки вольт-амперної характеристики після моменту початку помітного свічення напівпровідникового випромінювача;
- тангенс кута нахилу прямолінійної ділянки вольт-амперної характеристики до моменту початку помітного свічення напівпровідникового випромінювача;
- + котангенс кута нахилу прямолінійної ділянки вольт-амперної характеристики після моменту початку помітного свічення напівпровідникового випромінювача.

№ 2.11

Пряме падіння напруги напівпровідникового випромінювача – це ...

- текуча пряма напруга, яка подається на напівпровідниковий випромінювач;
- текуча зворотня напруга, яка подається на напівпровідниковий випромінювач;
- + напруга, при якій напівпровідниковий випромінювач починає генерувати випромінювання.

№ 2.12

Внутрішня квантова ефективність світлодіода – це ...

- + відношення кількості випромінювальних переходів до кількості інжектованих носіїв заряду в $p-n$ -перехід;
- відношення кількості фотонів, які вийшли зі світлодіода до кількості носіїв заряду, які пройшли через $p-n$ -перехід;
- відношення кількості носіїв заряду, інжектованих в $p-n$ -перехід, до кількості рекомбінаційних переходів.

№ 2.13

Зовнішня квантова ефективність світлодіода – це ...

- відношення кількості випромінювальних переходів до кількості інжектованих носіїв заряду в $p-n$ -перехід;
- + відношення кількості фотонів, які вийшли зі світлодіода, до кількості носіїв заряду, які пройшли через $p-n$ -перехід;
- відношення кількості рекомбінаційних переходів до кількості носіїв заряду, інжектованих в $p-n$ -перехід.

№ 2.14

Яка з наведених квантових ефективностей світлодіода більша?

- + внутрішня;
- зовнішня.

№ 2.15

У випадку якої конструкції світлодіода зовнішня квантова ефективність більша?

- + сферичної;
- плоскої;
- хвилеподібної.

№ 2.16

Яскравісна (світлова) характеристика світлодіода – це ...

- залежність яскравості свічення від напруги;
- + залежність яскравості свічення від струму;
- залежність яскравості свічення від відстані від світлодіода.

№ 2.17

Кольоровий графік МКО – це ...

- + залежність відносного внеску зеленого кольору (546,1 нм) від відносного внеску червоного кольору (700 нм) у загальному кольорі свічення випромінювача;
- залежність відносного внеску синього кольору (435,8 нм) від відносного внеску червоного кольору (700 нм) у загальному кольорі свічення випромінювача;
- залежність відносного внеску зеленого кольору (546,1 нм) від відносного внеску синього кольору (700 нм) у загальному кольорі свічення випромінювача.

№ 2.18

Інерційність світлодіода становить ...

- 10^{-2} – 10^{-3} с;
- 10^{-4} – 10^{-5} с;
- 10^{-6} – 10^{-7} с;
- + 10^{-8} – 10^{-9} с;
- 10^{-10} – 10^{-11} с.

№2.19

Світлодіоди, виготовлені з арсеніду галію, генерують свічення в ... області спектру.

- ультрафіолетовій
- видимій – зелене свічення
- видимій – синє свічення
- + інфрачервоній

№ 2.20

Світлодіоди, виготовлені з нітриду галію, генерують свічення у ... області спектру.

- ультрафіолетовій
- видимій – зелене свічення
- + видимій – синє свічення
- інфрачервоній

№ 2.21

Світлодіоди, конструкція та робота. Переваги гетероструктур для їхньої побудови.

№ 2.20

Інжекційна люмінесценція. Випромінювальні переходи. Довжина хвилі та півширина спектру випромінювання СД.

№ 2.21

Особливості напівпровідникових лазерів (НПЛ) як джерел світла для ОЕ. Характеристики лазерів: вольт-амперні, ватт-амперні, спектральні та частотні. Лазерні моди.

№ 2.22

Характеристики напівпровідникових випромінювачів світла. Джерела довгохвильового випромінювання.

3. ПРИЙМАЧІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1. Класифікація приймачів оптичного випромінювання

Фотоприймачі призначені для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричний сигнал. Їх також називаються фотодетекторами, оскільки вони здійснюють детектування оптичного сигналу, тобто його демодуляцію. До фотоприймачів також відносять фотоперетворювачі, основним завданням яких є ефективне перетворення світлової енергії заданого спектрального складу у зміну електричних параметрів приймача. Типовими прикладами є фоторезистор, у якого внаслідок дії світла змінюється величина електричного опору, та сонячна батарея, яка генерує електричний струм пропорційно до її освітленості. Узагальнюючи, можна сказати, що *фотоприймач* – це прилад, в якому під дією оптичного випромінювання відбуваються зміни, що дозволяють зареєструвати це випромінювання і/або визначити його (випромінювання) характеристики.

Фотоприймач є першим і основним елементом системи демодуляції і обробки оптичного сигналу. Як і в радіоелектроніці, з точки зору перетворення сигналу, системи детектування в оптоелектроніці ділять на дві групи:

- безпосереднє (пряме) детектування;
- детектування з перетворенням.

Оптичне детектування з перетворенням, як правило, здійснюється у довгохвильовому оптичному діапазоні з $\lambda > 10$ мкм. В інших діапазонах переважно використовуються схеми прямого детектування.

За видом інформації, яку дозволяють реєструвати фотоприймачі, їх поділяють на дві групи: *фотоприймачі інформаційних сигналів* та *фотоприймачі образів* [1]. Відповідно вимоги до пристроїв у кожній з цих груп суттєво різні, що зумовлене областю їх застосування. Приймачі інформаційних сигналів повинні мати:

- високу чутливість до випромінювання з певною довжиною хвилі; (довжини хвиль випромінювання основних лазерів, світлодіодів та в діапазоні «вікон прозорості» атмосфери 3-5 та 8-14 мкм);
- високий ККД енергетичного перетворення світлового сигналу в електричний;
- високу швидкодію: мкс-пс, що зумовлює використання малих опорів навантаження, тобто роботу далеко від нижньої межі чутливості для забезпечення високого співвідношення сигнал/шум. Ця ж вимога веде до пониження власної ємності приймачів, а, отже, і їх лінійних розмірів.

Натомість приймачі образів повинні володіти наступними властивостями:

- багатoeлементність;
- сумісність (апаратна, сигнальна, технологічна) світлочутливої частини та електронної частини зчитування інформації;
- широкий діапазон спектральної чутливості;
- наявність режиму фотонного накопичення;
- широкий динамічний діапазон чутливостей;
- мінімальний рівень власних шумів.

За принципом дії фотоприймачі можна розділити на дві великі групи: теплові і фотонні. У свою чергу фотонні приймачі діляться на фотодетектори, дія яких базується на:

- зовнішньому фотоефекті (фотоелектронні помножувачі і вакуумні фотоелементи, електронно-оптичні перетворювачі);
- внутрішньому фотоефекті (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори і т.п.).

Саме на останніх ми детальніше зупинимось, оскільки перші, у строгому розумінні, не належать до пристроїв оптоелектроніки. Пристрої на внутрішньому фотоефекті у переважній більшості виготовлені з напівпровідникових матеріалів. Принцип дії такого фотоприймача ґрунтується на внутрішньому фотоефекті. Використовуються дві форми внутрішнього фотоефекту: фотогальванічний ефект (у напівпровідниках з *p-n*-переходом – фотодіодах (ФД), фототранзисторах (ФТ), фототиристорах (ФТр) тощо) і ефект

фотопровідності (в однорідних напівпровідниках – фоторезисторах (ФР)). Для внутрішнього фотоефекту, так само як і для зовнішнього, існує червона межа $\lambda_{\text{тр}}$ – довгохвильова границя спектральної чутливості матеріалу. Ефективність протікання фотоелектричних процесів характеризується квантовим виходом, який дорівнює відношенню числа генерованих пар електрон-дірка до числа падаючих квантів випромінювання. З різних причин це відношення завжди менше одиниці.

3.2. Поглинання світла різними структурами

Світлова хвиля затухає експоненціально в напівпровіднику. *Глибину поглинання* можна визначати як товщину шару напівпровідника, після проходження якого потік випромінювання зменшується в $e = 2,718$ разів. Поглинання призводить до експоненціального зменшення густини потужності випромінювання

$$P(x) = P(0)\exp(-\alpha x). \quad (3.1)$$

Коефіцієнт поглинання α змінюється в залежності від матеріалу і сильно залежить від довжини світлової хвилі поблизу порогу поглинання. Деякі характерні значення для прямозонних і непрямоzonних напівпровідників показані на рис. 3.1.

У прямозонних напівпровідниках немає обмежень на процес утворення пар носіїв, і коефіцієнт поглинання швидко росте при зменшенні довжини хвилі. У непрямоzonних напівпровідниках, таких як Ge і Si, вимагається одночасна взаємодія з кристалічною ґраткою, щоб імпульс зберігався при генеруванні носіїв. У цьому процесі можуть брати участь коливання ґратки, домішки і дефекти кристалічної структури. В результаті коефіцієнт поглинання α поступово зростає при довжині хвилі нижче порогу. При коротших довжинах хвиль, коли стає можливим збудження через заборонену зону ($\sim 1,4$ еВ для Si і $\sim 0,8$ еВ для Ge), α знову зростає. Порогова довжина хвилі залежить від температури і ступеня легування, оскільки при цьому змінюється ширина забороненої зони і форма країв зон.

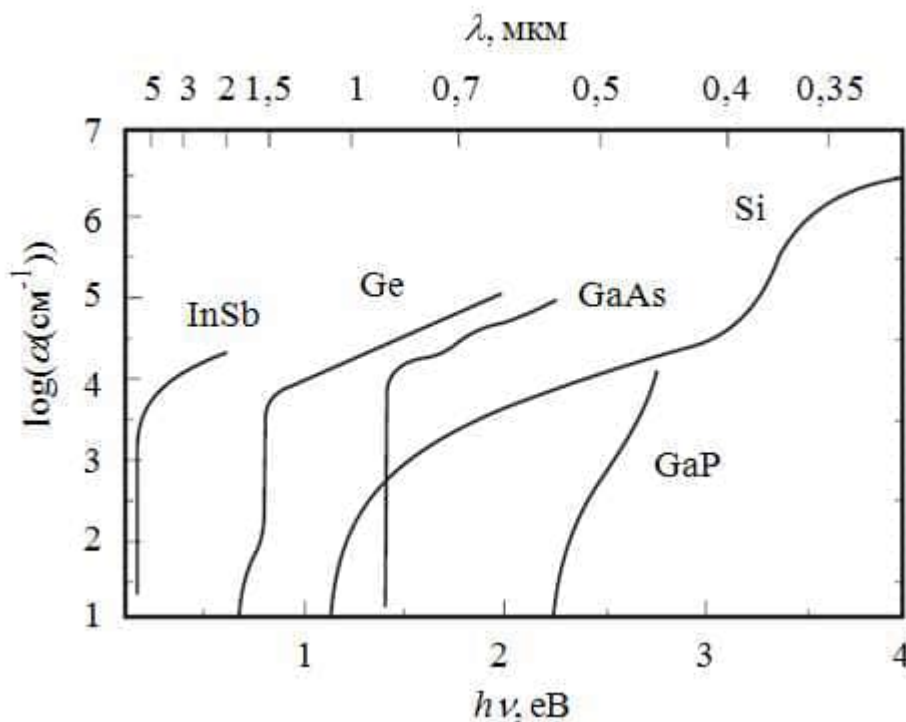


Рис. 3.1. Залежність коефіцієнта поглинання напівпровідників від енергії фотонів [12].

3.3. Фоторезистори

Фоторезистор – напівпровідниковий елемент, який змінює свій електричний опір під дією зовнішнього випромінювання оптичного діапазону. Його принцип дії заснований на внутрішньому фотоефекті в напівпровідниках. Фоторезистор – це шар (монокристал або плівка) напівпровідникового матеріалу на підкладці (або без неї) з нанесеними на нього омичними електродами, за допомогою яких прилад вмикається до електричного кола (рис. 3.2). Внаслідок дії потоку випромінювання, що падає на робочу поверхню фоторезистора, його внутрішній опір зменшується внаслідок генерування пар вільних носіїв заряду (електронів і дірок), за рахунок чого збільшується електропровідність напівпровідника.

Розрізняють три групи фоторезисторів: *плівкові*, *монокристалічні* та *леговані* домішками. До плівкових відносять ФР із свинцевих сполук сірки (PbS), селену (PbSe) і телуру (PbTe). Монокристалічні виготовляють з антимоніду індію (InSb), телуридів кадмію і ртуті ($\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$), сульфїду (CdS) і селенїду (CdSe) кадмію. Леговані ФР (з германію, легованого різними

домішками) працюють лише при низьких температурах. Матеріали на основі кадмію чутливі до випромінювань у видимій і ближній інфрачервоній областях, а на основі свинцю – на довжинах хвиль 1-5 мкм. Уявлення про параметри і характеристики поширених фоторезисторів, можна одержати, ознайомившись з даними табл. 3.1.

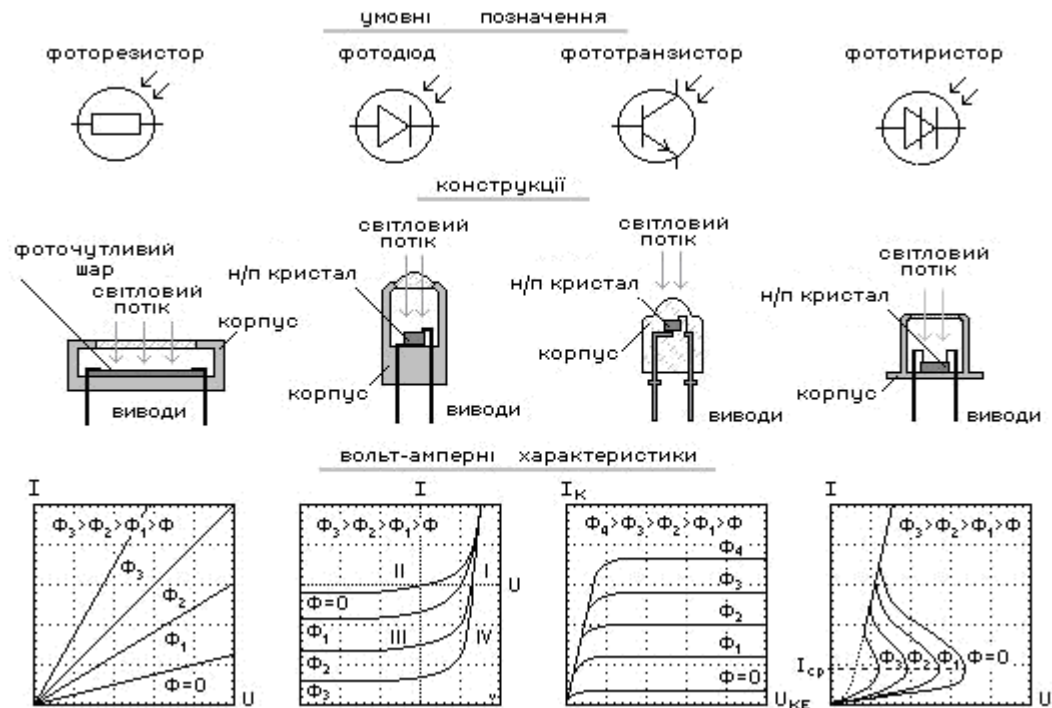


Рис. 3.2. Позначення, конструкції та типові вольт-амперні характеристики напівпровідникових фотоприймачів [2].

Світлова характеристика фоторезистора $I(\Phi)$ зберігає лінійність при невеликих світлових потоках і відповідає закономірності Столетова, який встановив, що кількість електронів, звільнених світлом за одиницю часу (тобто струм), прямо пропорційна до світлового потоку при незмінному його спектральному складі:

$$I = S_I \Phi, \quad (3.2)$$

де I – фотострум, Φ – світловий потік, S_I – коефіцієнт пропорційності, який називається *струмовою чутливістю* фотоприймача. *Інтегральна чутливість* S , $\text{м}^2/\text{Вт}$, визначається відношенням відносної зміни опору ФР $\Delta R/R$ до зміни його освітленості:

$$S = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) / \Delta E. \quad (3.3)$$

Чутливість називають інтегральною, оскільки її вимірюють при освітленні ФР світлом складного спектрального складу: від джерела світла з кольоровою температурою 2840 К при освітленості 200 лк. Іноді користуються таким параметром як *питома інтегральна чутливість* S_0 , яку визначають як відношення фотоструму до світлового потоку і до прикладеної напруги. Ці величини для різних ФР становлять від 1 до 600 мА/(В·лм).

Поріг чутливості – мінімальний потік випромінювання, який викликає на виході фотоприймача сигнал, що дорівнює напрузі шумів або перевищує її в m разів:

$$\Phi_n = m \sqrt{\frac{\overline{U_0^2}}{S_U}}, \quad (3.4)$$

де $S_U = \Delta U / \Delta \Phi$ – *вольтова чутливість*.

Діапазон світлових потоків $\Delta \Phi$, в якому спостерігається лінійність світлової характеристики ФР, визначає динамічний діапазон, що виражається в децибелах (дБ):

$$\Delta \Phi = 10 \cdot \lg \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}}, \quad (3.5)$$

де $\Phi_{\max}$ - $\Phi_{\min}$ – область значень світлового потоку Φ , у межах якої енергетична характеристика залишається лінійною. Фоторезистор поводить як омичний опір, тобто його опір не залежить ні від прикладеної напруги, ні від її знаку. При малих значеннях освітленості опір ФР істотно залежить від температури. Настільки ж помітним недоліком фоторезисторів при малих освітленостях є інерційність – при освітленості менше 1 лк час встановлення нового значення може складати декілька секунд.

Темновий опір – це опір чутливого шару R_T при відсутності опромінення ФР. У різних типів ФР величина R_T коливається від десятків Ом до десятків МОм (див. табл. 3.1). З усіх параметрів це найменш стабільна величина, значення якої сильно залежить від температури. Темновий опір прийнято визначати через 30 с після затемнення ФР, який попередньо знаходився при

освітленості 200 лк. Це обумовлено інерційністю звільнення пасток захоплення після припинення освітлення.

На рис. 3.3 показана типова схема ввімкнення ФР для реєстрації світлового потоку. Оскільки ФР є пасивним фотоприймачем, для його роботи необхідна зовнішня напруга живлення. Залежність фотоструму від прикладеної до ФР напруги при сталій освітленості називають вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Ці характеристики, як правило, лінійні (рис. 3.2).

Таблиця 3.1. Параметри окремих фоторезисторів.

Тип	Матеріал	Розміри елементу, мм	Темновий R_T опір, МОм	$R_T/R_{св}$ не менше	Темновий струм, мкА	Струм (при $E =$ 200 лк), мА
ФСК-0	CdS	4×7,2	1	140	15	15
СФ2-1	CdS	0,5×1,5	15	1000	1	1
ФПФ7-1	CdS	3,7×2	6	50	6	0,3
ФСД-1	CdSe	4×7,2	2	150	10	1,5
СФ3-2	CdSe	6×12	5	500	1	0,5
ФСА-4	PbS	4×6	0,04	1,2	-	-
СФ4-3Д	PbSe	3×3	0,2	-	-	-

Важливим параметром ФР є *постійна часу* τ – це час, протягом якого фотострум ФР наростає після початку освітлення чи спадає після затемнення ФР на 63% ($1 - e^{-1}$) по відношенню до встановленого значення. Таким чином, постійні часу характеризують швидкість реакції ФР на зміну світлового потоку, тобто характеризують інерційність ФР. Числові значення постійних часу різних фоторезисторів становлять від десятків мікросекунд до десятків мілісекунд. Постійні часу вимірюють при освітленості 200 лк, температурі оточуючого середовища 20°C і опорі навантаження, увімкнутому в схему вимірювання, меншому 1 кОм. Освітлення при визначенні постійних часу проводять від звичайного джерела випромінювання з кольоровою температурою 2840°C.

Наявність суттєвої інерційності у ФР призводить до того, що із збільшенням частоти модуляції світлового потоку ефективне значення виникаючого змінного струму зменшується. Максимальна частота модуляції світлового потоку для ФР не перевищує десятків кілогерц.

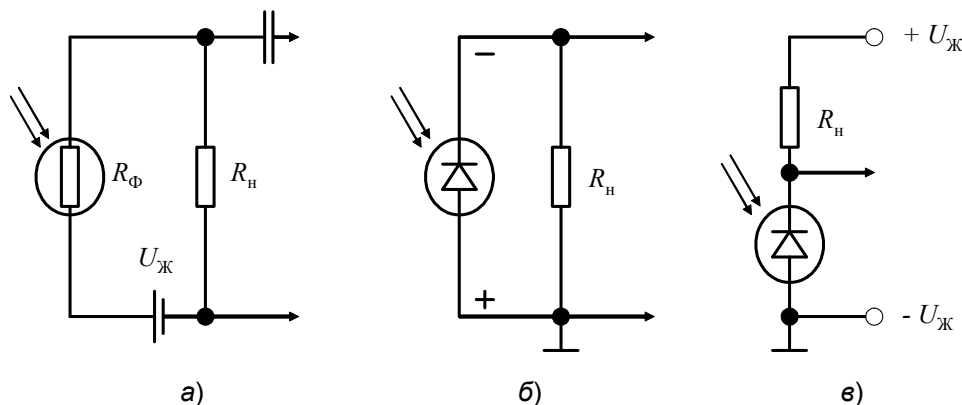


Рис. 3.3. Схеми ввімкнення фоторезистора (а) і фотодіода в фотогальванічному (б) та фотодіодному (в) режимах. Позначення: R_{Φ} – опір ФР, R_n – опір навантаження, $U_{\text{ж}}$ – напруга живлення [13].

Перевагами фоторезисторів є їх відносна простота та невеликі робочі напруги, порівняно з фотопомножувачами. До позитивних характеристик ФР варто віднести можливість створення робочих поверхонь приймача різної площі і довжини, що дозволяє використовувати їх як елемент керування досить значними струмами, а також як давачі переміщень об'єктів контролю в діапазоні декількох міліметрів (наприклад, у системах спостереження за положенням краю паперового полотна в рулонних друкованих машинах). Потужність розсіяння цілої низки ФР є достатньою для керування електричним колом потужністю в декілька ватт.

До недоліків ФР можна віднести високу інерційність, значну залежність характеристик і параметрів від температури, малу лінійну зону світлової характеристики, залежність вихідного сигналу від площі освітлення чутливого шару.

3.4. Фотодіоди: принцип роботи, характеристики, види та особливості функціонування

Фотодіод – фоточутливий напівпровідниковий діод з p - n -переходом (між двома типами напівпровідника або між напівпровідником і металом). При освітленні p - n -переходу в ньому виникають електронно-діркові пари. Потенціальний бар'єр неоднорідної напівпровідникової структури просторово розділяє утворені нерівноважні електрони і дірки.

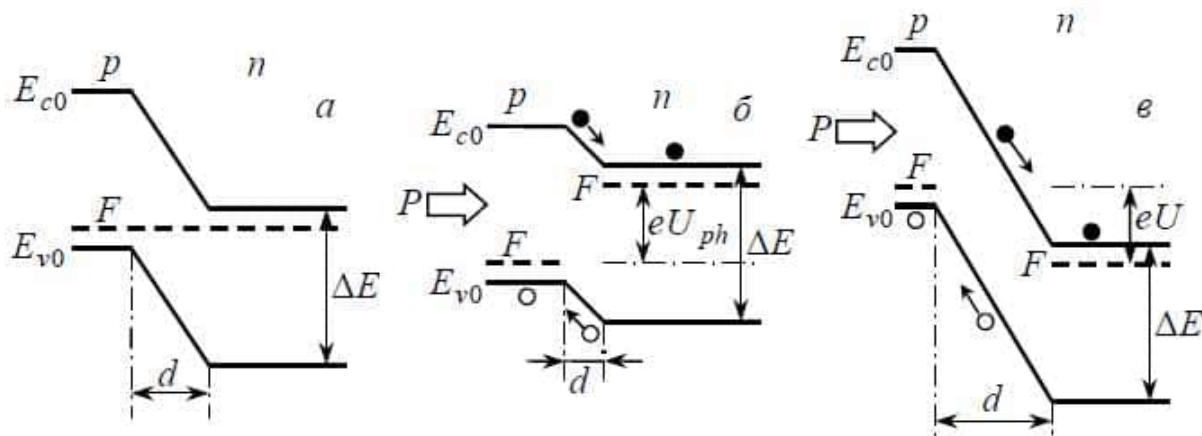


Рис. 3.4. Зонна енергетична схема p - n -переходу в стані рівноваги (а), фотогальванічному (б) та фотодіодному (в) режимах [14].

Якщо концентрація акцепторів у p -області дорівнює концентрації донорів в n -області, електронно-дірковий перехід є симетричним. У прийमाках випромінювання найчастіше використовують несиметричні переходи, коли ступені легування p - і n -областей різні. Тоді фотострум тече з області з вищим ступенем легування в область з нижчим ступенем легування, тобто в базу ФД. Напрямок струму носіїв збігається з напрямком зворотного струму переходу (рис. 3.4), тобто із збільшенням освітленості зростає зворотний струм фотодіода.

Фотодіод може працювати в двох режимах – фотодіодному та фотогальванічному. Схеми увімкнення ФД в електричне коло у цих режимах його роботи зображені на рис. 3.3. У *фотодіодному режимі* прилад підключається до джерела живлення, при цьому на анод повинен подаватися «-», а на катод «+» (рис. 3.4,в). Цьому режимові відповідають залежності в III квадранті вольт-амперної характеристики. Залежності, наведені в IV квадранті, відображають *фотогальванічний режим* роботи, коли ФД може використовуватися без джерела живлення, тому що сам стає джерелом фото-

ЕРС, генеруючи (під дією світла) носії зарядів – вільні електрони (рис. 3.4,б). Завдяки цьому фотодіод придатний для одержання електроенергії (один фотодіод здатний генерувати напруги у діапазоні 0-0,4 В в залежності від струму навантаження, який, як правило, становить мікроампери).

ФД виготовляють на основі: *p-n*-переходу на основі одного матеріалу (гомопереходу); гетеропереходу, який утворюється на межі двох областей різних матеріалів з домішками протилежного типу; контактного бар'єру, що виникає на межі метал – *n*-напівпровідник і метал – *p*-напівпровідник; різних МДН-структур (бар'єру Шотткі) та низки інших схем.

Матеріалами для виготовлення фотодіодів найчастіше слугують германій і кремній. Спектральна чутливість германієвих фотодіодів знаходиться в діапазоні 0,5 - 1,7 мкм (з максимумом на довжині хвилі 1,2 - 1,65 мкм), а кремнієвих – між 0,6 - 1 мкм (максимум на довжині хвилі 0,8 - 0,95 мкм). Фотодіоди мають більшу швидкодію (особливо в фотодіодному режимі), ніж фоторезистори – вони звичайно здатні реагувати на сигнали частотою до 10 МГц. Фотодіоди з *p-i-n*-переходом (введення *i*-області підвищує швидкодію) здатні працювати з високочастотними сигналами порядку 1 ГГц. Але про ці ФД-и мова йтиме дещо нижче. Характеристики окремих фотодіодів подані в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Параметри окремих фотодіодів [2].

Фотодіод	Матеріал	Розміри елемента, мм	Темн. струм, мкА	Робоча напруга, В	Макс. спектр. чутливості, мкм	Інтегр. чутливість, мА/лм
ФД-8К	Si	2×2	1,0	20	0,85–0,92	6×10^{-6}
ФД-27К	Si	1,9×1,9	1,0	20	0,80–0,95	$7,5 \times 10^{-6}$
ФД-256	Si	1,4×1,4	0,005	10	0,75–0,90	6,0
ФД-1	Ge	Ø 5	30,0	20	1,50–1,60	30,0
ФД-7Г	Ge	Ø 2,5	8,0	10	1,50–1,55	10,0

Основними характеристиками ФД є спектральна, частотна і енергетична (світлова). *Світловою характеристикою*, як уже згадувалося, називають залежність фотоструму I_Φ від світлового потоку Φ , який падає на чутливу поверхню при сталій напрузі ($U_\Phi = \text{const}$). У випадку ФД світлові характеристики будують в залежності від освітленості їх поверхні $E = \Phi/A$ (A – площа чутливої поверхні), а не від величини світлового потоку, оскільки розміри чутливого шару незначні. За світловою характеристикою визначається основний параметр будь-якого фотоприймача, в тому числі і ФД, – інтегральна чутливість $S = I_\Phi/(A\Phi)$. Для багатьох напівпровідникових фотоприймачів інтегральна чутливість залежить від прикладеної напруги (у тому числі для ФД у фотодіодному режимі), тому, як і у випадку ФР, користуються поняттям питомої чутливості:

$$S_0 = \frac{I_\Phi}{AU_\Phi \Phi} \quad (3.6)$$

Для забезпечення високої чутливості до випромінювання необхідно, щоб у ФД дифузійна складова фотоструму була мінімальною. Тому ФД працює або взагалі без джерела напруги (фотогальванічний режим), або при зворотній напрузі (фотодіодний режим). У загальному випадку (для довільної полярності джерела напруги U) струм ФД описується виразом

$$I_{\Phi D} = I_\Phi - I_{pn} = I_\Phi(\Phi) - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (3.6)$$

де I_Φ – фотострум; I_{pn} – струм p - n -переходу; I_0 – тепловий струм p - n -переходу. При різних потоках випромінювання Φ цей вираз задає сімейство ВАХ ФД (рис. 3.5). Квадрант I – це не робоча область для ФД, тут дифузійна складова струму набагато більша від фотоструму ($I_{pn} \gg I_\Phi$).

Квадрант III – це фотодіодна область напруг. У робочому діапазоні зворотних напруг фотострум практично не залежить від величини напруги і опору навантаження. ВАХ резистора навантаження R_n є прямою лінією, рівняння якої має вигляд

$$U_z - I_\phi R_n = U, \quad (3.7)$$

де U_z – величина зворотної напруги.

Оскільки у фотодіодному режимі (рис. 3.3,в) ФД і резистор навантаження з'єднані послідовно, через них протікає однаковий струм. Його можна визначити за точкою перетину ВАХ ФД і резистора у III квадранті (рис. 3.5). Таким чином, у фотодіодному режимі при заданому потоці випромінювання ФД є джерелом струму I_ϕ по відношенню до зовнішнього кола. Значення цього струму практично не залежить від параметрів зовнішнього кола.

Квадрант IV відповідає фотогальванічному режиму роботи ФД (рис. 3.6). Точки перетину ВАХ з віссю напруг відповідають значенням фото-ЕРС або напругам холостого ходу ($R_n = \infty$). Тоді з виразу (3.6) легко одержати напругу на переході, яка дорівнює фото-ЕРС

$$U_x = \frac{e}{kT} \ln \left(1 + \frac{I_\phi}{I_0} \right). \quad (3.8)$$

Точки перетину ВАХ з віссю струмів відповідають значенням струмів короткого замикання ($R_n = 0$). Проміжні значення опору навантаження визначаються лініями, які для різних значень R_n виходять з початку координат під різними кутами. При заданому значенні струму можна вибрати оптимальний режим роботи ФД у фотогальванічному режимі, коли на опорі буде виділятися найбільша електрична потужність. Оптимальному режиму відповідає для світлового потоку Φ_1 лінія навантаження R_1 (площа заштрихованого прямокутника з вершиною в точці А буде найбільшою – рис. 3.6).

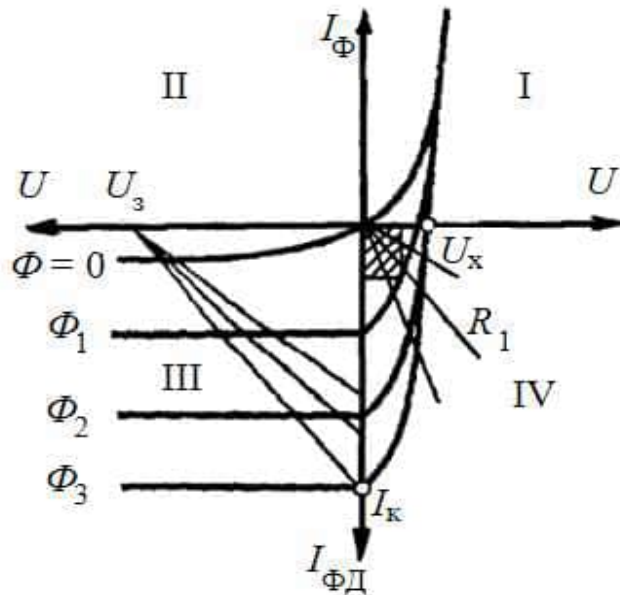


Рис. 3.5. Сімейство вольт-амперних характеристик фотодіода для різних рівнів світлових потоків Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 і для $\Phi = 0$ [13].

Завдяки простоті і мініатюрності конструкції, широкій спектральній чутливості, високій швидкодії, можливості автономного (власного) живлення і варіантності схем включення фотодіоди знайшли широке промислове застосування як сенсори положення, обліку об'єктів, світлових бар'єрів, високочастотних перетворювачів світлових сигналів в електричні (в оптичних лініях зв'язку) і т.п.

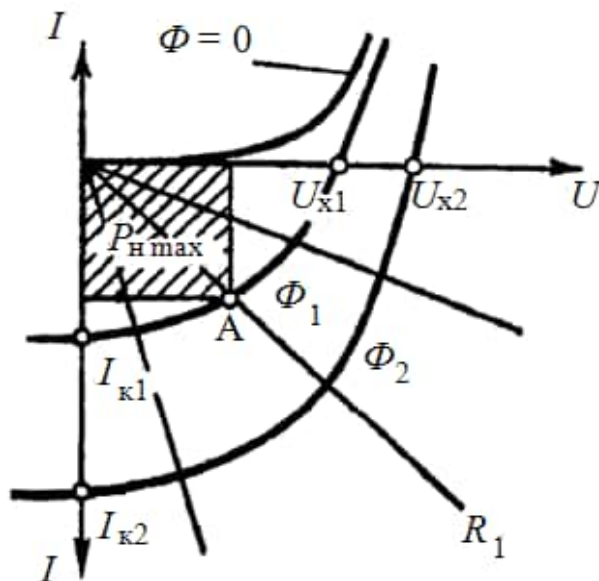


Рис. 3.6. ВАХ фотодіода у фотогальванічному режимі [13].

Різноманітні модифікації будови фотодіодів дають можливість набувати ним особливих, як правило екстремальних характеристик чи параметрів, зокрема за чутливістю чи швидкодією. Так, намагання збільшити чутливість і зменшити постійну часу привело до розробки *p-i-n-фотодіодів*. Типовий *p-i-n*-фотодіод складається із трьох послідовних областей: тонкої сильно легованої *n*-області, товстішого шару (*i*-області) з дуже малою концентрацією домішки (питомий опір в 10^6 - 10^7 разів більший, ніж у сусідніх сильно легованих областях) і сильно легованої *p*-області (рис. 3.7). В результаті звільнення *i*-області від носіїв при дії зворотного зміщення у ній встановлюється сильне і майже постійне електричне поле. Падаюче випромінювання поглинається в *i*- (~ 90%) та *n*-областях і створює електронно-діркові пари. Електрони та дірки розділяються електричним полем і залишають *i*-область, а пари, що виникають в *n*-області, дифундують до переходу, де дірки захоплюються сильним прискорюючим електричним полем і проходять через перехід, а електрони залишаються в *n*-області. При падінні світлового потоку потужністю P , який складається з $P/h\nu$ фотонів за одиницю часу утворюються носії з квантовим виходом η ; в результаті виникає імпульсний струм із середнім значенням

$$I = \eta q P / (h \nu), \quad (3.9)$$

де q – заряд носіїв.

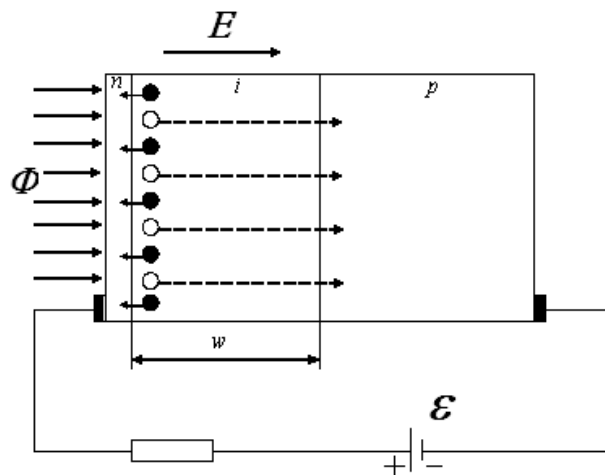


Рис. 3.7. Фотодіод з *p-i-n*-структурою [2].

Підвищення швидкодії обумовлене тим, що процес дифузії через базу, характерний для звичайної структури, в *p-i-n*-структурі замінюється дрейфом

носіїв через i -область у сильному електричному полі. Час дрейфу дірок t_{dp} через i -область шириною w складає

$$t_{dp} = \frac{w}{v_p} = \frac{w}{\mu_p E}, \quad (3.10)$$

де E – напруженість електричного поля в i -області; μ_p – рухливість дірок; $v_p = \mu_p E$ – швидкість дрейфу дірок в електричному полі. При напруженості електричного поля приблизно 10^6 В/м досягається максимальна швидкість дрейфу носіїв $v = (6 \div 8) \cdot 10^4$ м/с. У цьому випадку при $w = 10^{-2}$ см отримуємо $t_{dp} \approx 10^{-9} \div 10^{-19}$ с. Діапазон частот для цього діода $\Delta f \approx 10^9$ Гц.

Відношення часу дрейфу носіїв через i -область у $p-i-n$ -фотодіоді до часу дифузії через базу в $p-n$ -фотодіоді можна представити у вигляді

$$\frac{t_{dp}}{t_{diff}} = \frac{w}{L_p} \cdot \frac{\mu_p}{D_p}, \quad (3.11)$$

оскільки $D_p / \mu_p = kT / q = \phi_T$; D_p – коефіцієнт дифузії. Звідси, вже починаючи з $U_{36} = 0,1 \div 0,2$ В $p-i-n$ -фотодіоди мають перевагу в швидкодії.

Таким чином, фотодіоди з $p-i-n$ -структурою володіють такими основними перевагами [2]:

- одночасно висока чутливість (на довжині хвилі $\lambda \approx 0,9$ мкм практично досягнуто теоретичної межі чутливості $S_\phi \approx 0,7$ А/Вт) і висока швидкодія;
- можливість забезпечення високої чутливості у довгохвильовій області спектру при збільшенні ширини i -області;
- мала бар'єрна ємність;
- малі робочі напруги у фотодіодному режимі, що забезпечує електричну сумісність $p-i-n$ -фотодіодів з інтегральними мікросхемами.

До недоліків $p-i-n$ -структури слід віднести вимогу високої чистоти i -бази і погану технологічну сумісність з тонкими легованими шарами інтегральних схем.

Фотодіоди зі структурою метал-напівпровідник (фотодіоди Шотткі – ФДШ) також дозволяють підвищити швидкодію до 10^{-10} с і вище. Їх конструкція наведена на рис. 3.8.

З точки зору застосування контакту метал-напівпровідник у фотодіодах слід підкреслити такі основні особливості. По-перше, у ФДШ з'являється можливість поглинання квантів випромінювання з енергією, меншою за ширину забороненої зони, в металі контакту. При цьому, якщо енергія кванту випромінювання більше висоти потенціального бар'єру, збуджені електрони з металу можуть перейти у напівпровідник через потенціальний бар'єр. В результаті довгохвильова границя спектральної характеристики ФДШ зсувається у бік менших енергій фотона.

По-друге, у ФДШ з ростом енергії квантів область поглинання зсувається у шар об'ємного заряду, де існує поле, яке розділяє фотоносії. У ФД з p - n -переходом при малій глибині поглинання фотострум практично дорівнює нулю. Звідси, короткохвильова границя спектральної характеристики ФДШ розташована в області вищих енергій. Взагалі спектральна характеристика ФД на основі контакту метал-напівпровідник значно ширша, ніж спектральна характеристика ФД з p - n -переходом з цього ж напівпровідника.

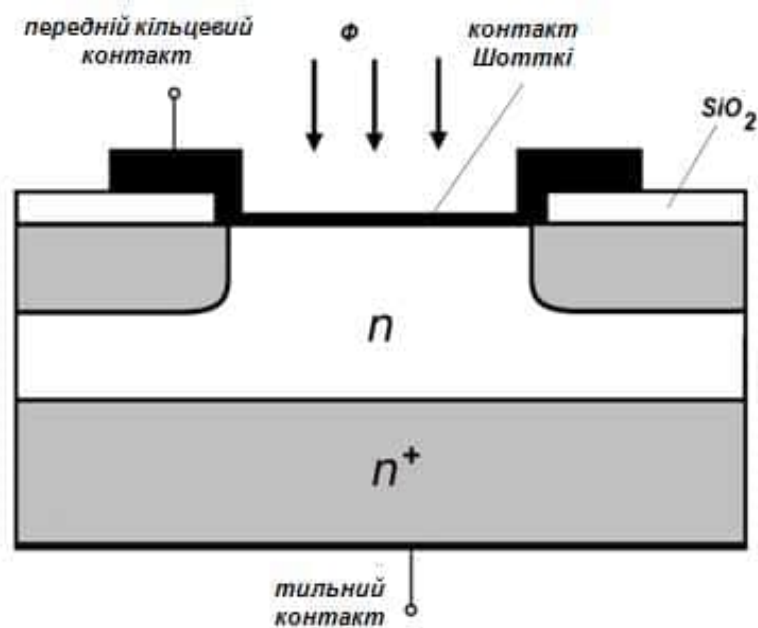


Рис. 3.8. Схематичний поперечний перетин GaAs фотодіода, в якому використовують випрямляючий контакт метал-напівпровідник (бар'єр Шотткі). Поверхня витоку зменшена шляхом пасування SiO_2 і обмеженням активної області матеріалом, який зазнав протонного бомбардування [10].

ФДШ характеризуються низкою переваг, важливих з точки зору застосування приладів в оптоелектроніці:

- малим опором бази фотодіода. Тому постійна часу бар'єрної ємності $C_{\text{бар}} r_{\text{Б}}$ у ФДШ порядку 10^{-12} с та інерційність цих пристроїв визначається лише часом прольоту фотоносіїв через область об'ємного заряду і складає 10^{-10} - 10^{-11} с;
- одночасно високою швидкістю і високою чутливістю ($S_{\phi} = 0,5$ А/Вт);
- простотою створення випрямляючих фоточутливих структур на найрізноманітніших напівпровідниках (зокрема й на таких, в яких не вдається створити p - n -перехід) і, як наслідок цього, можливістю керування висотою потенціального бар'єру Шотткі.

ФД з гетероструктурою є одним з найбільш перспективних типів оптоелектронних фотоприймачів. По суті, гетероструктура відкриває принципову можливість отримання ФД з ККД, близьким до 100%. Конструкція гетерофотодіода зображена на рис. 3.9.

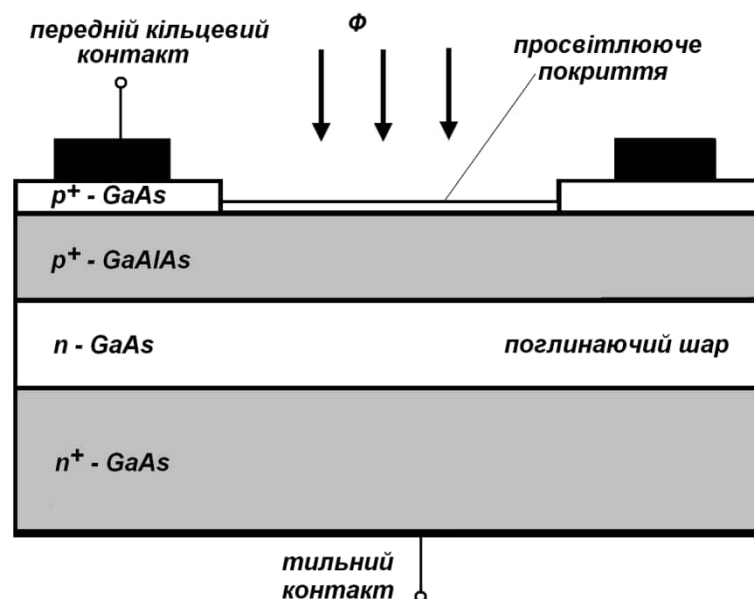


Рис. 3.9. Схематичний поперечний перетин фотодіода на базі GaAs/GaAlAs гетероструктури, в якій p^+ -GaAs частково витравлений і випромінювання потрапляє безпосередньо на прозорий шар p^+ -GaAlAs [10].

Шар GaAlAs відіграє роль вікна, що пропускає випромінювання, яке, у свою чергу, поглинається в середній n -області (GaAs). Різниця у ширині заборонених зон по обидва боки від гетеропереходу близько 0,4 еВ. Генеровані

в n -області під дією оптичного випромінювання дірки безперешкодно переносяться в p^+ -область. Ширина активної n -області вибирається такою, щоб забезпечити поглинання всього випромінювання. Висока ступінь чистоти активної області, низька густина поверхневих станів границь між шарами забезпечують малі рекомбінаційні втрати фотонів.

Таким чином, при виключно високому ККД гетерофотодіоди зберігають переваги розглянутих вище структур: високу чутливість, високу швидкодію, малі робочі напруги.

Гетероструктура дозволяє, вибравши відповідні пари напівпровідників для фотодіодів, працювати практично в будь-якій частині оптичного діапазону довжин хвиль. Ця перевага обумовлена тим, що в гетероструктурі робоча довжина хвилі визначається різницею ширини заборонених зон і не зв'язана із спектральною характеристикою глибини поглинання. Внаслідок широких можливостей вибору матеріалу бази вдається досягнути значень фото-ЕРС в гетерофотодіодах 0,8-1,1 В (в 2-3 рази вищих, ніж у кремнієвих фотодіодів). Основним недоліком гетерофотодіодів є характерна взагалі для всіх гетероструктур складність виготовлення.

Одним із шляхів створення швидкодіючих фотоприймачів з високою чутливістю є використання лавинного пробою, зокрема створення *лавинних фотодіодів*. Якщо поле в активній зоні фотодіода велике і енергія, набута фотоніями струму (електронами і дірками) у цьому полі перевищує енергію утворення електронно-діркових пар, то розпочинається лавиноподібний процес помноження носіїв. Процес помноження розпочинається з генерації носіїв під дією випромінювання, тобто маємо справу із ФД з лавинним помноженням носіїв.

Підсилення первинного фотоструму у лавинному фотодіоді (ЛФД) визначається коефіцієнтом лавинного помноження:

$$M = \frac{I_{\phi}}{I_{\phi 0}}, \quad (3.12)$$

де I_ϕ – струм на виході ФД з врахуванням помноження; $I_{\phi 0}$ – струм при відсутності помноження. Таким чином, коефіцієнт лавинного помноження у ЛФД є коефіцієнтом підсилення фотоструму.

Відомо, що коефіцієнт помноження залежить від напруги на переході:

$$M = \frac{1}{[1 - (U / U_{\text{проб}})^m]}, \quad (3.13)$$

де $U_{\text{проб}}$ – пробивна напруга; U – напруга на p - n -переході; $m = 1,5$ -2 для кремнію p -типу; $m = 3,4$ -4 для кремнію n -типу (для германію $m = 2,5$ -9).

Періодичні коливання фотоструму не відтворюються з повним підсиленням M , визначеним для постійного струму, а послаблюються і затримуються за рахунок інерції в утворенні лавини. Для змінної компоненти фотоструму частотою ω амплітуда

$$I_\omega = I_0 M / (1 + i\omega\tau_L), \quad (3.14)$$

де $\tau_L = M\tau$, τ – час вільного пробігу носіїв.

Підсилення змінного струму зменшується при $\omega = 1/M\tau$ в $\sqrt{2}$ разів порівняно з помноженням M для постійного струму. Звідси можна отримати величину добутку підсилення струму на ширину смуги пропускання Δf при лавинному процесі:

$$M\Delta f = 1/(2\pi\tau). \quad (3.15)$$

Для τ порядку 1 пс цей добуток може дорівнювати приблизно 150 ГГц. ВАХ ЛФД можна представити у вигляді

$$I_\phi = \frac{I_{\phi 0}}{[1 - (U / U_{\text{проб}})^m]}. \quad (3.16)$$

На рис. 3.10 представлені типові для ЛФД ВАХ. Лавинні фотодіоди перспективні при виявленні слабких оптичних сигналів. Ширше застосування ЛФД зв'язане із значними труднощами. Насамперед, ці труднощі визначаються тим, що у передпробійному режимі коефіцієнт підсилення фотоструму M різко залежить від напруги. Дійсно, з (3.16) можна отримати вираз для розрахунку

відносної зміни коефіцієнта підсилення фотоструму при зміні напруги на переході:

$$\frac{dM}{M} = \frac{mM}{U} dU \left(\frac{U}{U_{\text{проб}}} \right)^m \approx mM \frac{dU}{U} \quad (3.17)$$

Очевидно, що нормальна робота ФД можлива тільки при достатньо стабільному вихідному струмі I_{ϕ} , тобто при стабільному значенні коефіцієнта підсилення M . Нехай ми бажаємо мати відносні зміни коефіцієнта підсилення не більше 10% ($dM/M = 0,1$). Тоді для кремнієвого фотодіода ($m = 3,5$; $M = 300$) отримаємо $dU/U = 0,0001 = 0,01 \%$, тобто для надійної роботи ЛФД необхідна дуже висока стабілізація напруги живлення. Потрібно також підкреслити, що типові значення $U_{\text{проб}} = 30-100$ В. Це призводить до великих втрат енергії $U_{\text{проб}} I_{\phi}$ у ФД. Розвиток пробою відбувається не одночасно по усій площі p - n -переходу, а в окремих «мікроплазмах». Це викликає додаткову нестабільність M і збільшує шуми. Особливо небезпечними є краї, вони повинні бути захищеними від перевищення напруженості поля відповідним формуванням профілю легування. Перелічені недоліки разом із розкидом параметрів в окремих зразках обмежує застосування ЛФД.

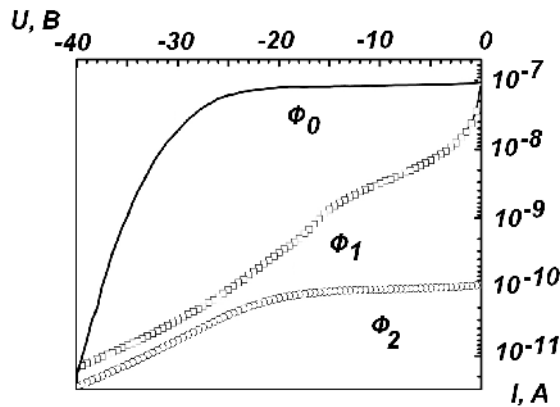


Рис. 3.10. Типова ВАХ лавинного фотодіода ($\Phi_0 < \Phi_1 < \Phi_2$).

3.5. Фототранзистори та фототиристри

Фототранзистором (ФТ) називають напівпровідниковий прилад з двома p - n -переходами, який перетворює світловий потік в електричний струм одночасно підсилюючи його. Фототранзистори відносяться до дискретних

оптоелектронних фотоприймачів, найбільш характерними рисами яких є наявність механізму вбудованого підсилення (звідси висока фоточутливість) і схемотехнічна гнучкість, обумовлена наявністю третього (правда, не завжди виведеного), керуючого, електрода. У схемах заміщення фототранзистор розглядається як транзистор з фотодіодом, включеним між базою (анодом до бази) і колектором цього транзистора (як правило, типу n - p - n). Струм згаданого фотодіода є базовим струмом транзистора і керує струмом його колектора.

Конструктивно ФТ, як і звичайний транзистор, є напівпровідниковим кристалом із областями електронної та діркової електропровідності p - n - p чи n - p - n , які чергуються. На рис. 3.11 подана структура ФТ типу n - p - n з освітленням базової області. Практично може освітлюватися будь-яка область: базова, емітерна, колекторна чи навіть усі області одночасно. При цьому світловий потік може падати на кристал паралельно до p - n -переходів чи перпендикулярно. Найбільша ефективність досягається при перпендикулярному напрямі світлового пучка відносно переходу колектор-база та при освітленні базової області.

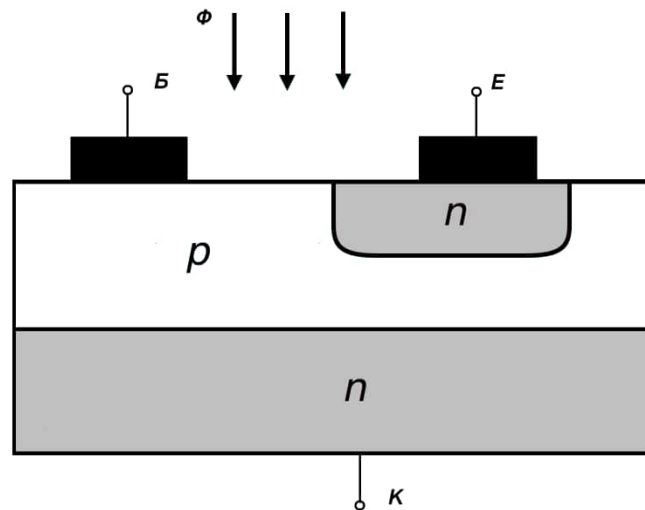


Рис. 3.11. Структура біполярного фототранзистора (Е – емітер, Б – база, К – колектор) [2].

ФТ можна вмикати у вимірювальні схеми і як звичайний транзистор у схемі із спільним емітером, спільною базою і спільним колектором, і як діод з відключеною базою, емітером чи колектором (рис. 3.12). При вмиканні ФТ, як двополюсника, останні дві схеми не відрізняються від схеми вмикання ФД у

фотодіодному режимі. Найбільше поширення отримала схема вмикання ФТ із спільним емітером і від'єднаною чи під'єднаною базою. Рішення про те, чи потрібно під'єднувати до схеми (у якій використовується фототранзистор) базовий електрод чи залишити його непід'єднаним, залежить від обраної схеми. ФТ, в якому базовий електрод узагалі не виведений, іноді називають подвійним фотодіодом.

Розглянемо роботу ФТ при від'єднаній базі (рис. 3.12,в). До колекторного переходу прикладено зворотну напругу, а емітерний перехід зміщений в прямому напрямку. В області бази при освітленні виникають електронно-діркові пари. Неосновні носії дифундують до колекторного переходу і під дією його електричного поля переносяться в колекторну область. В базовій області відбувається накопичення основних нерівноважних носіїв, при цьому змінюється її заряд, а звідси, і потенціал між базовою і емітерною областями. Це приводить до збільшення потоку носіїв, які переходять в базу з емітера. Частина носіїв рекомбінує в базі, а більша частина переходить в колекторну область. Колекторний струм майже дорівнює струму емітера і визначається виразом

$$I_K = \beta I_\phi + I_T, \quad (3.18)$$

де β – коефіцієнт передачі струму бази; I_T – темновий струм; I_ϕ – фотострум бази. Коефіцієнт $\beta \gg 1$. Тому первинний фотострум, який виникає в базі, виявляється підсиленням в β разів. Якщо ФТ затемнений ($I_\phi = 0$), то через нього протікає темновий струм, що дорівнює

$$I_T = \frac{1}{1 - \alpha} I_{зв.к.} = \beta I_{зв.к.}, \quad (3.19)$$

де $I_{зв.к.}$ – зворотний струм колекторного переходу в схемі із спільною базою, оскільки α – коефіцієнт передачі струму емітера (близький до 1). Тобто темновий струм ФТ значно більший за темновий струм ФД (приймаючи перехід колектор-база за ФД).

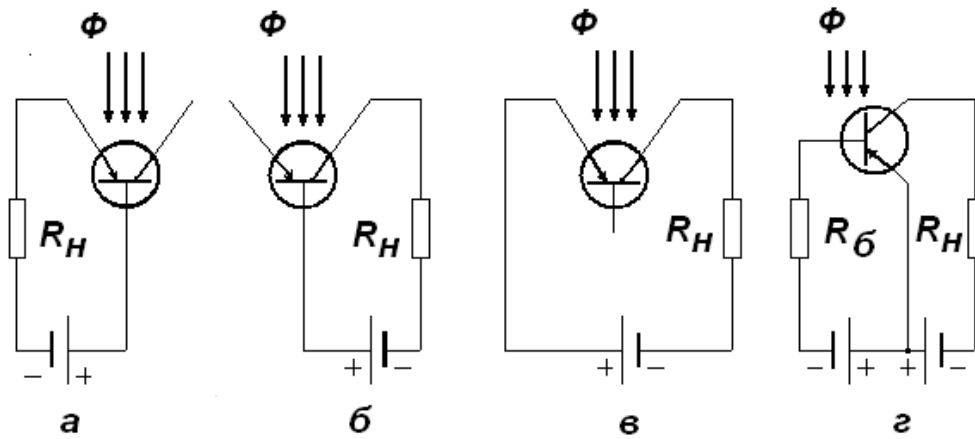


Рис. 3.12. Схеми вмикання фототранзистора: з вільним колектором (а); з вільним емітером (б); з вільною базою (в); із спільним емітером (г) [10].

Рівняння (3.19) описує статичні вихідні вольт-амперні характеристики ФТ. Вихідні ВАХ ФТ при різних значеннях світлового потоку подані на рис. 3.13. Порівнюючи ці характеристики з вихідними ВАХ звичайного транзистора, можна відзначити, що приріст колекторного струму в першому випадку відбувається за рахунок збільшення базового фотоструму від світлового потоку чи від збільшення струму бази у другому випадку.

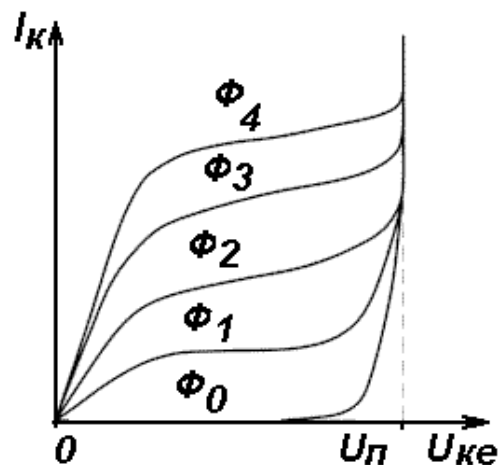


Рис. 3.13. Вихідні вольт-амперні характеристики фототранзисторів ($\Phi_0 < \Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3 < \Phi_4$) [10].

Залежність струму колектора від світлового потоку можна записати як

$$I_K = K\Phi, \quad (3.20)$$

де K – інтегральна чутливість ФТ (у порівнянні з ФД вона більша в β разів). Чутливість ФТ значно вища, ніж у ФД, за рахунок внутрішнього підсилення

(коефіцієнт підсилення β звичайно дорівнює 50-200). Ще більше підсилення може бути отримане в складеному ФТ ($\beta = 1000 - 10000$). Порівнюючи (3.20) з виразом $I_k = \beta I_6$ для струму колектора при електричному входному сигналі, отримуємо

$$K\Phi = \beta I_6.$$

Ця рівність вказує на те, що ФТ-и володіють двома входами: оптичним і електричним. Використання оптичного і електричного сигналів значно розширює можливості ФТ. Звичайно електричний вхід використовується для стабілізації робочої точки на лінійній ділянці характеристики і компенсації різних зовнішніх впливів.

Поряд з біполярними як фотоприймачі використовують і польові транзистори – каналні та МОН-транзистори. Вони володіють: високим входним опором, що дозволяє працювати при великих рівнях сигналів; високою фоточутливістю (до десятків А/лм); широкою смугою пропускання (до $10^6 - 10^7$ Гц). На рис. 3.14 представлена структура польового фототранзистора з вбудованим каналом.

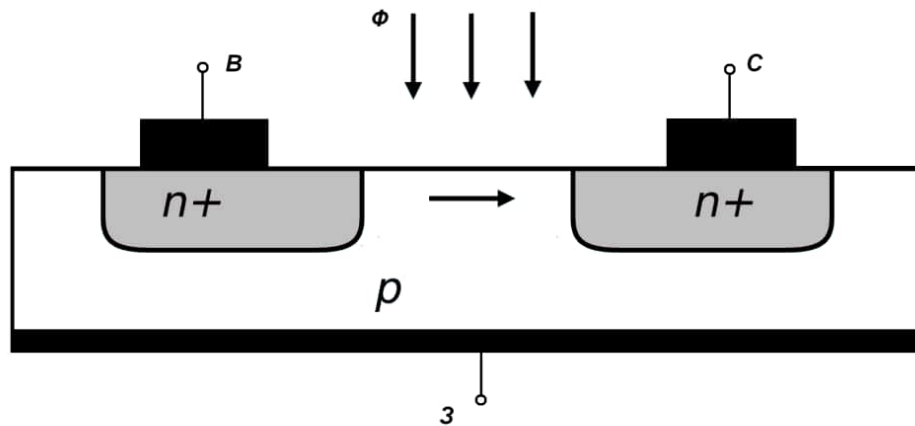


Рис. 3.14. Структура польового каналного фототранзистора (B – витік, C – стік, 3 – затвор) [10].

Між областями витік та стік в об'ємі напівпровідника утворюється провідний канал, по якому тече струм основних носіїв. Від ширини області просторового заряду, утвореного потенціалом на затворі, залежить перетин

каналу і величина струму витоку. При освітленні поблизу переходу створюються електронно-діркові пари. Під дією електричного поля переходу неосновні носії генерованих пар переходять в область затвору. Фотострум, який протікає через коло затвору, викликає на зовнішньому опорі R_3 падіння напруги і змінює потенціал затвору

$$U_3 = E_3 - I_{\phi 3} R_3.$$

Зміна струму витоку визначається як і у звичайному каналному транзисторі:

$$I_{\phi} = KU_3 = KR_3 I_{\phi 3},$$

де K – крутизна ВАХ транзистора.

Як і у звичайного транзистора основними характеристиками ФТ є вихідні та входні характеристики. На рис. 3.13 представлено типові *вихідні характеристики* ФТ. З рисунка видно, що реальні характеристики ФТ мають нахил, який збільшується із підвищенням освітленості. Це можна пояснити модуляцією товщини бази при зміні U_c і зменшенням струму по поверхні колекторного переходу. Важливим параметром є *темновий струм*. Його величина, як правило, не перевищує десятків мікроампер для германієвих ФТ і одиниць мікроампер для кремнієвих. *Чутливість* ФТ до світлового випромінювання характеризується інтегральною чутливістю і визначається як відношення вихідного струму ФТ до світлового потоку, який викликав цей струм (рис. 3.15):

$$K = I_c / \Phi \text{ чи } K = I_{\Phi} / \Phi.$$

Чутливість ФТ залежить від величини струму колектора, подібно до того як і коефіцієнт передачі струму бази β (рис. 3.15). При роботі в мікрорежимі чутливість різко падає. Інтегральна чутливість біполярних ФТ досягає 2-10 А/лм, а в каналних ФТ складає від десятків до сотень ампер на люмен.

Вхідні характеристики ФТ такі ж, як і у звичайних транзисторів. *Спектральні характеристики* ФТ практично не відрізняються від спектральних характеристик інших фотоприймачів, виготовлених з аналогічних матеріалів.

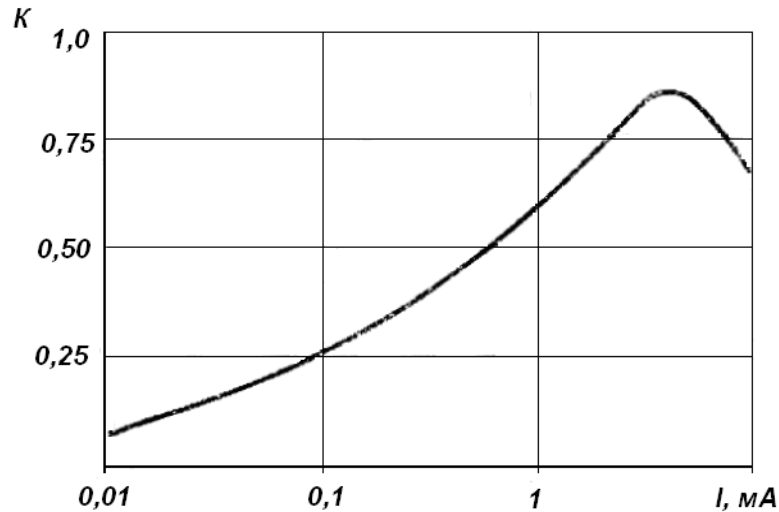


Рис. 3.15. Залежність інтегральної чутливості ФТ від колекторного струму [2].

Однією з найважливіших характеристик ФТ є *світлова характеристика*. На рис. 3.16 подані сімейства світлових характеристик біполярного та польового (канального) ФТ. Видно, що вихідні струми I_K і I_C зростають із збільшенням світлового потоку. Причому струм I_K росте швидше при вищих напругах на проміжку колектор-емітер. Для канальних ФТ, які звичайно вмикаються за схемою із автоматичним зміщенням на затворі, спостерігається лінійна ділянка характеристики, обмежена мінімальним і максимальним світловим потоком $\Delta\Phi$. При малих рівнях світлового потоку струм витоку близький до нуля, оскільки транзистор практично закритий. А при дуже великих потоках потенціал на затворі майже перестає впливати на струм стоку.

ФТ властива помітна *інерційність* (див. табл. 3.3), що обмежує область їхнього застосування в основному пристроями автоматики і керування силовими колами. Швидкодія біполярних ФТ буде залежати від швидкості зміни напруги $U_{\text{еб}}$ і часу прольоту неосновних носіїв через базу. Якщо знехтувати впливом ємності емітера, то струм емітера буде змінюватися безінерційно, а струм колектора зміниться через час: $t_{\text{прол}} \approx W^2/2D$, де W – товщина бази; D – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв.

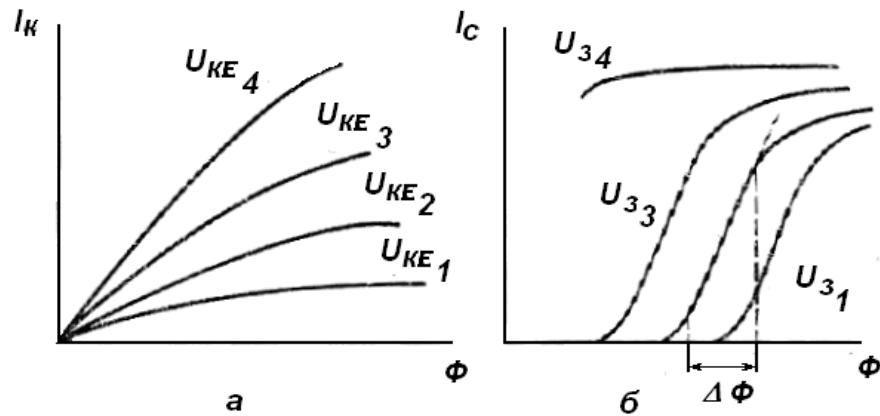


Рис. 3.16. Світлові характеристики ФТ: біполярного (а); польового (канального) (б) ($U_1 < \dots < U_4$) [1].

Постійна часу у схемі із спільним емітером у $(\beta+1)$ рази більша, ніж у ФД, і складає практично 10^{-5} с. Смуга пропускання становить до 10^5 Гц.

Для канального ФТ інерційність визначається часом прольоту основних носіїв через канал: $t_{\text{прол}} = l_k / U_0$, де l_k – довжина каналу; U_0 – швидкість прольоту основних носіїв. Оскільки $l_k \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ м, то $t_{\text{прол}} \approx 10^{-9}$ с. З врахуванням інерційності кола затвору маємо постійну часу $10^{-5} \div 10^{-6}$ с і смугу пропускання до $10^7 \div 10^8$ Гц. Величина вхідної ємності досягає $5 \div 15$ пФ.

У ФТ основними шумами є тепловий і дробовий шуми, і в порівнянні з ФД шумовий струм у $(\beta+1)$ разів більший. Однак, оскільки інтегральна чутливість ФТ у $(\beta+1)$ рази більше за інтегральну чутливість ФД, то поріг чутливості ФТ, який визначається світловим еквівалентом шуму, не залежить від величини β .

$$F_n = \frac{U_{\text{ш}}}{K R_n}, \quad (3.21)$$

де $U_{\text{ш}}$ – напруга шуму; K – інтегральна чутливість; R_n – опір навантаження.

Таблиця 3.3. Порівняння параметрів фотоприймачів різних типів, що використовуються в оптопарах [2].

Фотоприймач	Коефіцієнт передачі, %	Смуга частот, МГц
Фотодіод	0,1	0–10
Фототранзистор	30	0–0,3

Складений фототранзистор	300	0–0,03
-----------------------------	-----	--------

Параметри ФТ у значній мірі залежать від температури оточуючого середовища. Зміна температури в першу чергу впливає на величину темного струму і чутливість ФТ. З ростом температури чутливість ФТ збільшується. На рис. 3.17 представлені типові залежності темного струму германієвих і кремнієвих ФТ. З підвищенням температури у германієвих ФТ швидкість росту темного струму падає до 10%/К. Вихідний струм ФТ слабше залежить від температури. Так, для кремнієвих ФТ зміна струму колектора в діапазоні температур від -50°C до $+125^{\circ}\text{C}$ складає при малих струмах (близько міліампера) приблизно 0,02 мА/К, при струмі в десятки міліампер – 0,17 мА/К.

При виготовленні ФТ використовують сплавно-дифузійну, дифузійну та планарну технології. Область застосування фототранзисторів схожа з областю застосування фотодіодів, але з врахуванням їхньої меншої швидкодії і більшого коефіцієнта передачі, наприклад, при слабких світлових сигналах, дозволяє використовувати ФТ при великих (у порівнянні з ФД) відстанях між джерелом світла і фотоприймачем. Параметри деяких фототранзисторів подані в табл. 3.4. ФТ застосовують як аналогові і ключові приймачі випромінювання, а також в транзисторних оптопарах.

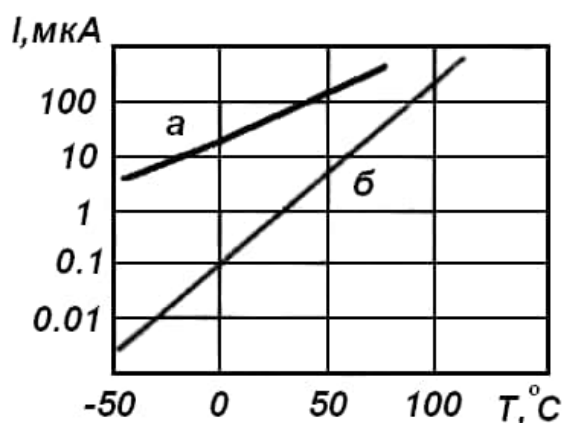


Рис. 3.17. Залежність темного струму германієвого (а) та кремнієвого (б) фототранзисторів [2].

Таблиця 3.4. Параметри окремих фототранзисторів [2].

Фото- тран- зистор	Розміри ел-та, мм^2	Темновий струм, мкА	Робоча напруга, В	Максимум спектр. чутливості, мкм	Інтегр. чутл., мкА/лк	Імп. постійна часу, мкс
ФТ-1К	2,8	3	5	0,8–0,9	0,4	80
ФТ-2Г	1,0	500	12–24	1,5–1,6	2,0	10
ФТ-3	3,0	60	5–10	1,5–1,55	1,0	100
ФТГ-5	3,0	50	5–10	1,5–1,55	1,0	20

Фототиристор (ФТр) – це триністор, у якого світловий потік є керуючим сигналом, який за своїм впливом аналогічний до прикладання напруги до керуючого електрода. При освітленні ФТр у напівпровіднику генеруються носії заряду обох знаків (електрони і дірки), що приводить до збільшення струму через тиристор на величину фотоструму.

Фототиристор має чотиришарову *p-n-p-n*-структуру (рис. 3.18), яку, як і в звичайному тиристорі, можна представити у вигляді комбінації двох транзисторів, що мають позитивний зворотний зв'язок за струмом. Перехід фототиристора під дією світлового керуючого сигналу із закритого стану у відкритий здійснюється при досягненні певного рівня напруги між його електродами $U_{\text{вкл}}$, що відповідає струму спрацьовування $I_{\text{вкл}}$ (рис. 3.18).

При відсутності світлового сигналу і керуючого струму ФТр буде знаходитися в закритому стані і через нього буде текти темновий струм. Під дією світла в структурі ФТр утворюються електронно-діркові пари. В залежності від глибини проникнення світла кількість пар експоненційно зменшується. Носії, генеровані на відстані дифузійної довжини від *p-n*-переходів, розділяються останніми і створюють первинні фотоструми. Решта носіїв, особливо біля поверхні, рекомбінують. Із збільшенням інтенсивності світлового випромінювання, величина фотоструму росте. При досягненні фотострумом достатньо великого значення $I_{\text{вм}}$ ФТр перемкнеться у провідний (відкритий) стан.

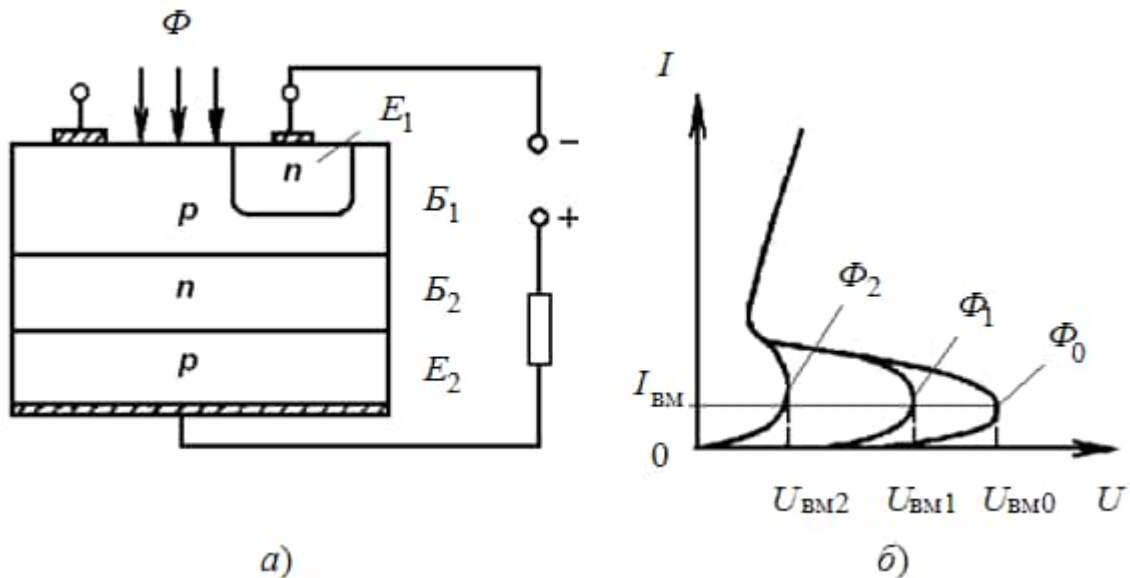


Рис. 3.18. Будова (а) та семейство ВАХ (б) фототиристора ($\Phi_0 < \Phi_1 < \Phi_2$) [10].

Розглянемо основні характеристики і параметри фототиристорів.

Вольт-амперні характеристики ФТр виражають залежність вихідного струму ФТр від напруги на аноді при різних світлових потоках. Із збільшенням світлового потоку і керуючого струму перемикання ФТр буде відбуватися при менших напругах (рис. 3.19). Залежність напруги вмикання $U_{\text{вм}}$ від світлового потоку називають *характеристикою керування* $U_{\text{вм}} = f(\Phi)$ (рис. 3.19,а). Робоча область ФТр обмежується пороговим світловим потоком $\Phi_{\text{пор}}$ і світловим потоком спрямлення $\Phi_{\text{спр}}$. Пороговий світловий потік визначає мінімальний світловий потік, до якого нечутливий ФТр. Типові значення напруги вмикання 20-1500 В.

Максимальний світловий потік $\Phi_{\text{спр}}$ характеризує спрямлення характеристики ФТр в характеристику діода. Залежність $U_{\text{вм}} = f(\Phi)$ можна наближено представити виразом

$$U_{\text{вм}}(\Phi) = U_{\text{вм}}(\Phi = 0) \exp\left(-\frac{B(\Phi - \Phi_{\text{пор}})}{\Phi_{\text{спр}}}\right),$$

де B – постійний коефіцієнт.

Крутизна характеристики керування представляє собою диференціальну чутливість ФТр за напругою:

$$S_{\text{д.ФТр}} = \frac{\Delta U_{\text{вм}}}{\Delta \Phi}.$$

У момент вмикання струм ФТр дорівнюватиме

$$I = I_T + S_{\text{ФТр}} \Phi_{\text{вм}}. \quad (3.22)$$

Внаслідок наявності у ФТр внутрішнього зворотного зв'язку його фоточутливість значно вища від фоточутливості ФД та ФТ.

Спектральна характеристика ФТр це залежність спектральної чутливості від довжини хвилі падаючого світлового випромінювання. Форма характеристики визначається використанням матеріалом напівпровідника і практично співпадає з формою для інших фотоприймачів, які мають *p-n*-переходи. Тобто, спектральна характеристика кремнієвого ФТр має такий же характер, як і кремнієвого ФТ. Звичайно, в залежності від конструкції приладу, структури і технологічних особливостей максимум характеристики може зміщуватися у бік довших чи коротших довжин хвиль.

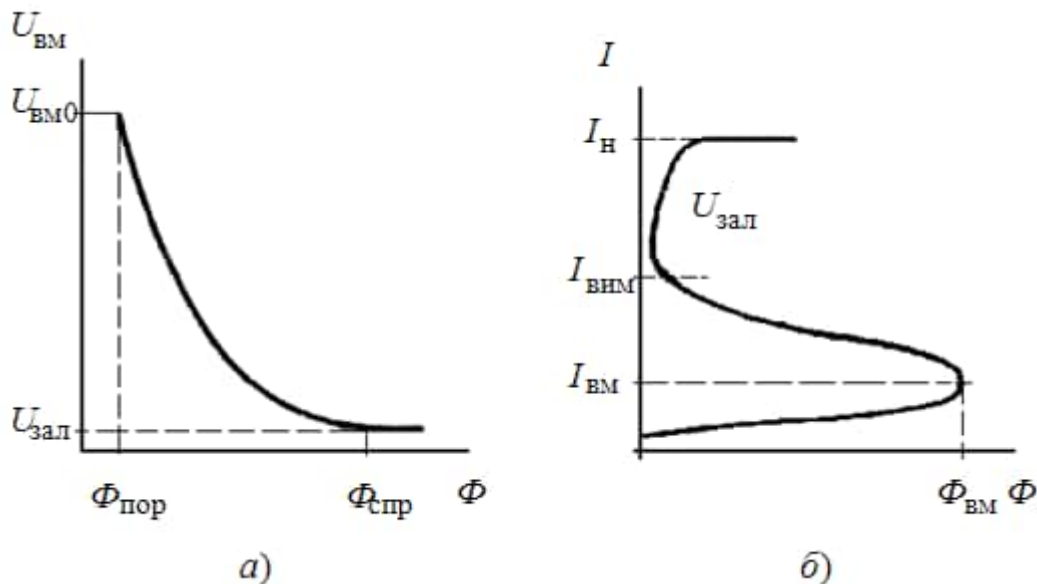


Рис. 3.19. Характеристика керування (а) та світлова характеристика (б) ФТр [10].

Світлова характеристика ФТр представляє собою залежність фотоструму, який протікає через ФТр, від величини світлового потоку $I = f(\Phi)$. При деякій величині фотоструму відбувається перемикання ФТр із закритого стану у відкритий. Цьому значенню фотоструму відповідає світловий потік $\Phi_{\text{вм}}$ (типові значення 0,6-10 мА, 15-50 мВт/см²) (рис. 3.19,б). Початкову ділянку світлової характеристики можна записати у вигляді

$$I_{\Phi} = S_{\text{ФТр}} \Phi, \quad (3.23)$$

де $S_{\text{ФТр}}$ – інтегральна чутливість ФТр.

Істотний вплив на характеристики і параметри ФТр виявляє температура оточуючого середовища. Подібно до звичайного тиристора, температурно залежними виявляються зворотний струм внутрішнього переходу і коефіцієнти підсилення за струмом транзисторів, об'єднання яких і утворює тиристор. Вони із ростом температури збільшуються, що призводить до росту темного струму ФТр (типові значення темного струму 200-300 мкА) і зміни вольт-амперних характеристик. Основний параметр ФТр – напруга вмикання – з ростом температури падає, а при зниженні температури – росте (рис. 3.20).

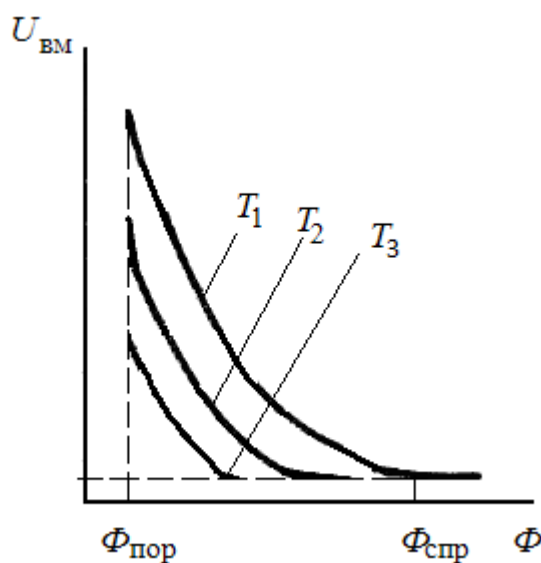


Рис. 3.20. Сімейство характеристик керування фототиристора при різних значеннях температури ($T_1 < T_2 < T_3$) [10].

Швидкодія ФТр залежить від часу перехідних процесів при вмиканні чи вимиканні. Час вимикання визначається часом затримки, обумовленої наростанням фотоструму в базі, і часом розвитку лавинного зростання струму за рахунок позитивного зворотного зв'язку. Із збільшенням світлового потоку час затримки зменшується, тому і час вмикання зменшується. Швидкодія ФТр співмірна із швидкодією ФД і вища, ніж у ФТ.

Інерційність різних типів ФТр знаходиться в межах $10^{-5} \div 10^{-8}$ с. Часи $10^{-7} \div 10^{-8}$ с досягаються на ФТр, виготовлених за епітаксiallyно-планарною технологією з напругою перемикавання 100÷200 В і прямих струмах до десятків міліампер.

При роботі із малими світловими потоками істотну роль відіграють *шуми* самого ФТр. Проявляються два типи шумів: дробовий і низькочастотний. Для оцінки мінімального пускового світлового потоку введено *світловий еквівалент шуму*

$$\Phi_{ш} = \frac{I_{ш}}{\sqrt{\Delta f \cdot S_{ФТр}}},$$

де $I_{ш}$ – шумовий струм; Δf – смуга частот, у якій вимірюється $I_{ш}$. Світловий еквівалент шуму дозволяє оцінити поріг чутливості ФТр.

Основна перевага фототиристорів – здатність перемикати значні струми і напруги слабкими світловими сигналами – використовується в пристроях «силової» електроніки, таких, як системи керування виконавськими механізмами, випрямлячами і перетворювачами. Як і фототранзистори, фототиристори часто застосовуються разом з підібраними за характеристиками випромінювачами, у вигляді оптопар (тиристорні оптопари).

3.6. Частотні та часові характеристики фотоприймачів

Швидкодія фотоприймачів описується їх частотними та/або часовими характеристиками, які є взаємно пов'язаними. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) показує залежність амплітуди вихідного сигналу фотоприймача, наприклад ФД, від частоти модуляції світлового потоку, який падає на ФД. На рис. 3.21 подані частотні характеристики ФД для різних опорів навантаження.

Оскільки величина фотоструму у кожний момент часу пропорційна до кількості неосновних носіїв, швидкість наростання фотоструму залежить від часу життя неосновних носіїв τ і часу дифузії (прольоту) неосновних носіїв від місця генерування до p - n -переходу $t_{\text{прол}}$. У ФД $t_{\text{прол}}$ значно менше за час життя τ . Постійну часу можна визначити з виразу

$$\tau \approx \frac{W_0^2}{2D},$$

де W_0 – товщина бази (відстань від p - n -переходу до поверхні); D – коефіцієнт дифузії дірок. Товщина бази у сплавних ФД складає десятки мікрометрів, а у дифузійних – 3-5 мкм. Коефіцієнт дифузії дірок (електрони мають більшу швидкість) складає для кремнію $10 \text{ см}^2/\text{с}$. Тоді для $W_0 = 10 \text{ мкм}$ маємо постійну часу порядку 10^{-7} с . У реальних ФД ця величина нижча, до 10^{-5} с . Смуга пропускання для сплавних ФД близько 100 кГц, а у дифузійних досягає декількох мегагерц.

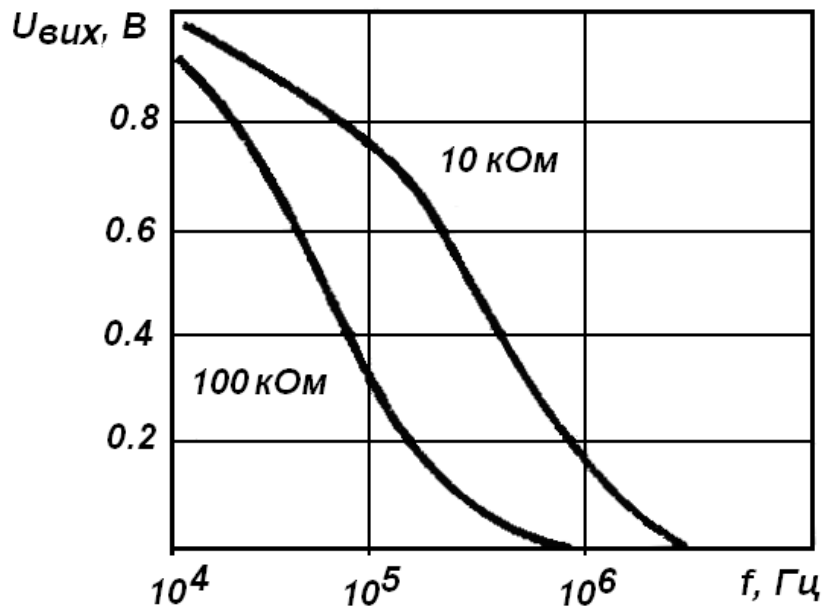


Рис. 3.21. АЧХ фотодіода для різних опорів навантаження [15].

З АЧХ приймача можна визначити граничну частоту $f_{\text{гр}}$ як частоту синусоїдально-модульованого потоку випромінювання, при якій чутливість фотоприймача падає до значення 0,707 від чутливості при не модульованому потоці. Вимірювати АЧХ фотоприймача, які володіють малою постійною часу (біля 10^{-7} - 10^{-6} с), важко і не завжди можливо через низьку чутливість приймача і малу потужність випромінювання неперервних випромінювачів порівняно з імпульсними. Часові характеристики таких приймачів доцільно визначати за їх часовими характеристиками, до яких відносять імпульсні $H(t)$ та перехідні $h(t)$ характеристики.

Тривалість імпульсної характеристики ($\tau_{0,1}$) приймача це інтервал часу, протягом якого значення функції, що описує зміну сигналу приймача під дією імпульсного випромінювання у вигляді δ -функції, досягає рівня 0,1 від

максимального значення. *Час наростання перехідної характеристики* ($\tau_{0,1-0,9}$) приймача означається як інтервал часу, протягом якого зміна сигналу приймача під дією імпульсу у вигляді одиничного стрибка наростає від рівня 0,1 до рівня 0,9 максимального значення. Детальніше опис часових характеристик подано в лабораторній роботі 3.2.

Імпульсна і перехідна характеристики взаємозв'язані:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial t} = h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(i\omega) e^{i\omega t} d\omega .$$

Аналогічно встановлюється зв'язок з АЧХ з допомогою $h(i\omega)$ -комплексної частотної характеристики:

$$h(i\omega) = R(i\omega) + iI(\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} ,$$

$$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} .$$

3.7. Шуми та виявляюча здатність фотоприймачів

Поряд із корисним сигналом на виході фотоприймача завжди існує хаотичний сигнал із випадковою амплітудою і спектром, на який не має впливу розробник, – це *шум фотоприймача*. Джерела шуму можуть бути відносно фотоприймача як внутрішніми, так і зовнішніми. Шум не дозволяє реєструвати достатньо мале значення вхідного випромінювання, оскільки воно не виділяється на фоні шуму. В оптимально сконструйованому фотоприймачі чутливість до малих вхідних сигналів визначається лише рівнем власних шумів приладу. Шуми визначаються випадковими (флуктуаційними) процесами, тому рівень шумів характеризують імовірнісними параметрами: математичним очікуванням (середній рівень шуму), середньоквадратичним значенням чи дисперсією. Розподіл потужності шуму за спектром часто задається *спектральною густиною шуму* – шумом в одиничній смузі частот.

У фотоприймачах поряд із звичайними для напівпровідників видами шумів (тепловим, дробовим та ін.) додаються також радіаційний (фотонний

шум), який визначається флуктуаціями оптичного сигналу, який потрапляє на фотоприймач.

Звичайно шум фотоприймача кількісно характеризують струмом шуму чи напругою шуму. Під *струмом шуму* $I_{ш}$ розуміють середньоквадратичне значення флуктуації струму, який протікає через фотоприймач у вказаній смузі частот. *Напруга шуму* – це середньоквадратичне значення флуктуації напруги на заданому опорі навантаження в колі фотоприймача.

Як уже зазначалось, власні шуми ФД відіграють істотну роль при малих світлових потоках. Шумовий спектр ФД можна розділити на область низькочастотного шуму і область білого шуму (спектральна густина шуму не залежить від частоти). На низьких частотах переважають надлишкові (поверхневі) шуми, а область білого шуму обумовлена дробовим шумом і тепловим шумом омичного опору бази. *Дробовий шум* породжується в результаті випадкового квантового процесу детектування оптичного сигналу у фотоприймачі:

Тепловий шум (шум Джонсона) обумовлений випадковим тепловим рухом носіїв заряду:

$$I_{т.ш.} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}},$$

де R – омичний опір приймача. Шуми визначають поріг чутливості фотоприймача, тобто мінімальний світловий потік, що викликає на виході сигнал, який можна відрізнити на фоні власних шумів. Поріг чутливості оцінюється *світловим еквівалентом шуму*

$$\Phi_{п} = \frac{I_{ш}}{\sqrt{\Delta f K}},$$

де $I_{ш}$ – шумовий струм, виміряний у смузі частот 1 Гц; K – інтегральна чутливість. Величина шумового струму ФД складає соті і десяті частки мікроампера.

Рівень шумів фотоприймача залежить від площі фоточутливого елементу. Для характеристики цієї залежності введено параметр Φ_{Π}^* – питомий пороговий потік фотоприймача:

$$\Phi_{\Pi}^* = \frac{\Phi_{\Pi}}{A}, \quad (3.24)$$

де Φ_{Π} – поріг в одиничній смузі частот; A – площа фоточутливого елемента фотоприймача. Таким чином, *питомий пороговий потік* – це пороговий потік фотоприймача в одиничній смузі частот, віднесений до одиничного за площею фоточутливого елемента.

Оскільки інтенсивність білого шуму пропорційна до кореня квадратного зі смуги пропускання Δf , то вводять таку характеристику, як *еквівалентна потужність шуму* (NEP - Noise Equivalent Power, *англ.*) – величина світлового потоку, яка на виході фотоприймача в одиничній смузі частот викликає сигнал, що дорівнює шуму:

$$\Phi = NEP = \frac{2\Delta f h \nu}{\eta}, \quad (3.25)$$

де $\Delta f = 1$ Гц, η – квантова ефективність.

Досить часто використовується також такий параметр як *виявляюча здатність* D – величина, обернено пропорційна до еквівалентної потужності шуму:

$$D = \frac{1}{NEP}. \quad (3.26)$$

Оскільки ця величина залежить від площі приймача A , то було введено таку характеристику як *детектуюча здатність* D^* , яка називається також *нормованою виявляючою здатністю*:

$$D^* = D\sqrt{A}. \quad (3.27)$$

Вона є найбільш об'єктивною і важливою характеристикою фотодетектора, оскільки не залежить від його площі і смуги частот.

3.8. Лабораторна робота 3.1

Світлові характеристики фотоприймачів

Мета роботи: освоїти методику визначення основних характеристик напівпровідникових приймачів оптичного випромінювання, визначити їх параметри.

Прилади і устаткування: лабораторний стенд із змінним модулем для фотоприймачів, фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори, оптопари.

Фотоприймач (ФП) – це оптоелектронний прилад для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію. Принцип дії фотоприймача ґрунтується на внутрішньому фотоефекті в напівпровіднику. Використовується дві форми внутрішнього фотоефекту: фотогальванічний ефект (в напівпровідниках з $p-n$ -переходом – фотодіодах, фототранзисторах, фототиристорах тощо) і ефект фотопровідності (в однорідних напівпровідниках – фоторезисторах). Ефективність протікання фотоелектричних процесів характеризується квантовим виходом, який дорівнює відношенню кількості генерованих пар електрон - дірка до кількості падаючих квантів випромінювання. З різних причин це відношення завжди менше від одиниці. Світлова хвиля затухає експоненціально в напівпровіднику. Коефіцієнт поглинання змінюється в залежності від матеріалу і сильно залежить від довжини світлової хвилі. Глибину поглинання можна визначити як товщину шару напівпровідника, після проходження якого потік випромінювання зменшується в $e = 2,718$ разів.

Основними характеристиками ФП є спектральна, частотна і енергетична (світлова). Вони детально описані вище у цьому ж розділі. При виконанні роботи передбачається використання широкого набору як випромінювачів, так і фотоприймачів. Їх заміна проводиться лише за участю викладача. При цьому слід також ознайомитися з їх описом та паспортними характеристиками.

Хід роботи

1. Вивчити схему установки, програмне забезпечення до неї та інструкції з експлуатації електроприладів, що використовуються при виконанні роботи.
2. Після співбесіди з викладачем одержати дозвіл на ввімкнення апаратури та перевірити її роботу.
3. Отримати набір напівпровідникових фотоприймачів та по чергово під'єднати їх до схеми.
4. Виміряти вольт-амперні характеристики фотоприймача для різних рівнів їх освітленості. Виконати обробку результатів вимірювання.
5. Побудувати світлові характеристики фотоприймачів для декількох різних напруг. Визначити діапазон робочих напруг для кожного з них.
6. Розрахувати оптимальні робочі параметри фотодіода для фотогальванічного режиму.
7. Порівняти чутливості фотоприймачів. Зробити аргументовані висновки за результатами виконання роботи.

3.9. Лабораторна робота 3.2

Часові характеристики фотоприймачів

Мета: ознайомитись із методикою визначення часових характеристик фотоприймачів, визначити їх за різних умов роботи.

Прилади і матеріали: генератор імпульсів, осцилограф, джерело живлення, світлодіод, набір фотоприймачів.

Однією з важливих характеристик фотоприймачів є їх швидкодія, яка в цілому описується часовими та/або частотними характеристиками приймача випромінювання (ПВ). У багатьох практичних випадках еквівалентна схема ввімкнення приймача випромінювання може бути подана у вигляді аперіодичного резистивно-ємнісного каскаду (рис. 3.22). При цьому приймач випромінювання є генератором з паралельно під'єднаними до нього ємністю $C_{пв}$ і вихідним опором $R_{пв}$. ПВ навантажений на опір R_H і з'єднаний з попереднім підсилювачем через роздільну ємність C_p . Еквівалентний вхідний опір попереднього підсилювача $R_{ВХ}$, його вхідна ємність $C_{вх}$, а ємність монтажу схеми C_m .

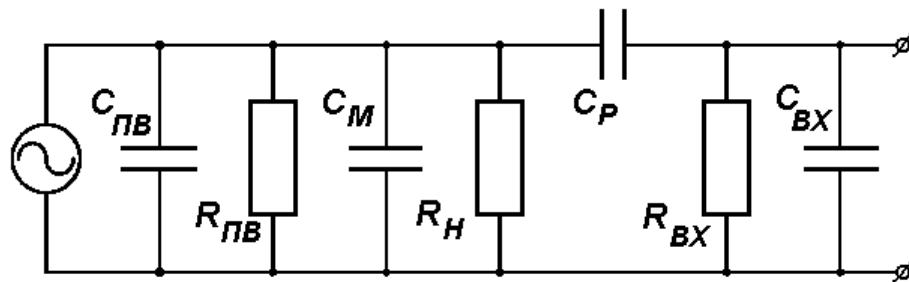


Рис. 3.24. Еквівалентна схема увімкнення приймача випромінювання [15].

Комплексна частотна характеристика $K(i\omega)$ такої ланки має вигляд:

$$K(i\omega) = \frac{K_0}{1 + i \left(\omega \tau_B - \frac{1}{\omega \tau_H} \right)}, \quad (3.28)$$

а частотно-фазова характеристика $\phi(i\omega)$:

$$\varphi(i\omega) = \arctg\left(\frac{1}{\omega\tau_H} - \omega\tau_B\right), \quad (3.29)$$

де введені наступні позначення:

$$\tau_B = C_0 \frac{R_H^E R_{BX}}{R_H^E + R_{BX}}; \quad R_H^E = \frac{R_{ПВ} R_H}{R_{ПВ} + R_H}; \quad \tau_H = C_P R_{BX}^E; \quad C_0 = C_{ПВ} + C_M + C_{BX}.$$

Формули (3.28) і (3.29) справедливі при $C_0 \ll C_P$, $R_{BX} \gg R_H$. З цих формул випливає, що при $\omega \rightarrow 0$ фаза $\varphi \rightarrow \pi/2$, при $\omega \rightarrow \infty$ – $\varphi \rightarrow -\pi/2$, а при

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{\tau_B \tau_H}} = \omega_p - \varphi = 0. \text{ Частота } \omega_p \text{ називається кваліфікованною частотою, на}$$

якій коефіцієнт передачі схеми вмикання приймача випромінювання має максимальне значення, а фазовий зсув, який ним вноситься дорівнює нулеві.

В області нижніх частот швидкодія ПВ описується постійними часу τ , що залежать в основному від ємності роздільного конденсатора. В області верхніх частот відчувається шунтуючий вплив сумарної ємності C_0 , яка визначає постійну часу τ .

Іноді інерційність ПВ, яка вноситься фізичними процесами перетворення випромінювання в електричний сигнал, розглядають окремо від його інерційності в сукупності зі схемою ввімкнення. Практично *постійна часу затухання* сигналу приймача τ_z визначається як інтервал часу після припинення дії випромінювання, протягом якого величина сигналу зменшується в e разів. Інтервал часу від початку дії випромінювання, протягом якого наростаючий сигнал досягне значення, що дорівнює $(1 - e^{-1})$ від свого максимального значення, називається *постійною часу наростання* сигналу τ_H .

Розглянемо типові випадки дії оптичного випромінювання (світлового потоку) на фотоприймач з деякою інерційністю. На рис. 3.25,а показана зміна потоку Φ на поверхні ПВ, на рис. 3.25,б – відповідна зміна фотоструму від часу. Протягом дії потоку випромінювання фотострум наростає, після закінчення дії – спадає. Зміна реального фотоструму від часу може носити складний характер, проте у більшості випадків ця залежність досить близька до експоненціальної і може бути описана за допомогою співвідношення:

$$I'_{\Phi} = I_{\Phi 0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}} \right). \quad (3.30)$$

У свою чергу $I_{\Phi 0} = S_j \Phi$, де S_j – інтегральна чутливість за струмом при постійному світловому потоці Φ ; t – час, який відраховується від переднього фронту імпульсу потоку випромінювання в межах тривалості імпульсу t_i .

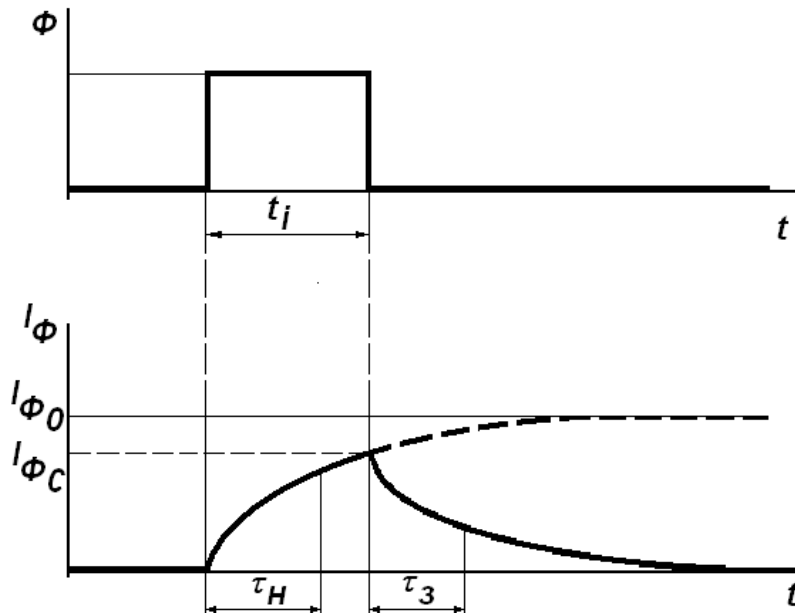


Рис. 3.25. Залежність фотоструму I_{Φ} від часу t при одиночному імпульсі потоку оптичного випромінювання Φ [15].

Переважно фотострум не досягає свого найбільшого значення $I_{\Phi 0}$ за час дії імпульсу. Він наростає до деякого значення $I_{\Phi C}$, що залежить від співвідношення між постійною часу і тривалістю імпульсу потоку випромінювання (рис. 3.25).

Після припинення дії випромінювання фотострум існує ще деякий час та зменшується до нуля за законом:

$$I'_{\Phi} = I_{\Phi C} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \quad (3.31)$$

де t – час, який відраховується від заднього фронту збуджуючого імпульсу.

Крім одиночних імпульсів випромінювання, на ПВ часто діє їх послідовність. У цьому випадку прийнято розрізняти три можливі випадки [15].

1. Постійна часу $\tau \gg t_i$.

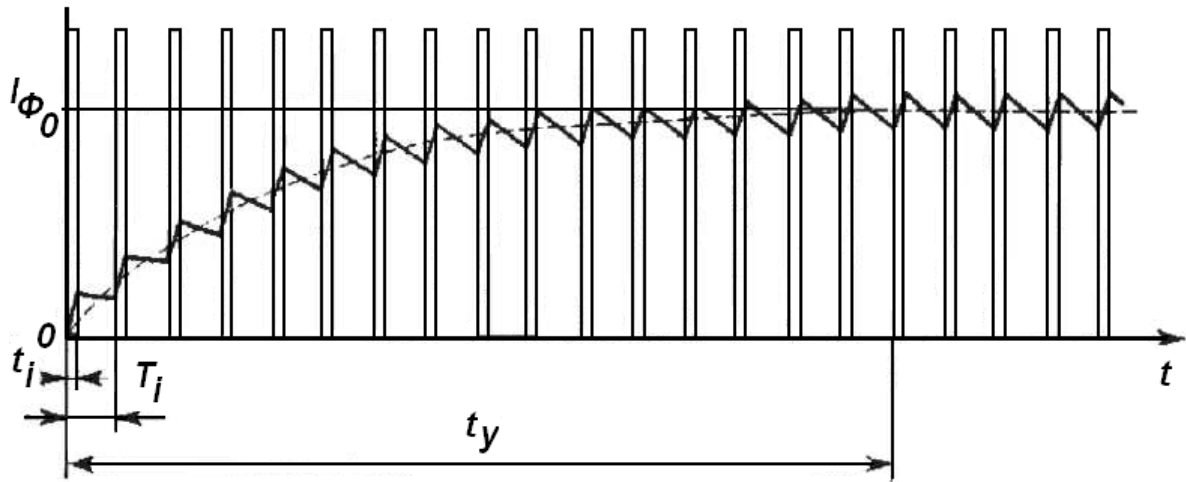


Рис. 3.26. Залежність фотоструму від часу при дії послідовності імпульсів потоку випромінювання: t_i - тривалість імпульсів; T_i - період їх повторення [15].

Згідно з формулою (3.30) швидкість наростання фотоструму

$$\frac{dI_{\phi}}{dt} = \frac{I_{\phi 0}}{\tau_H} e^{-\frac{t}{\tau_H}},$$

а за формулою (3.31) швидкість спадання дорівнює

$$\frac{dI_{\phi}}{dt} = -\frac{I_{\phi C}}{\tau_3} e^{-\frac{t}{\tau_3}}.$$

Якщо постійна часу ПВ $\tau \gg t_i$ і $\tau \gg T_i$, то можна одержати приблизні значення швидкостей наростання і спадання фотоструму:

$$v_H = \frac{dI_{\phi}}{dt} \approx \frac{I_{\phi 0}}{\tau_H}, \quad v_3 = \frac{dI_{\phi}}{dt} \approx -\frac{I_{\phi C}}{\tau_3}.$$

У межах тривалості імпульсу струм зростає, а в інтервалі між імпульсами він спадає (рис. 3.26). Спочатку приріст струму більший від його зменшення. Однак через деякий час, який приблизно дорівнює $2,2\tau$, зростання і зменшення стають однаковими і встановлюється середнє значення фотоструму. Його коливання відносно середнього значення при великому τ виявляються дуже малими (струм практично постійний). Якщо в параметрах імпульсів міститься якась інформація, то вона в даному випадку повністю втрачається. Реєстрація з допомогою інерційного ПВ використовується тоді, коли необхідно знати середнє значення потоку

світлового випромінювання.

2. Постійна часу ПВ $\tau \gg t_i$, але $\tau \ll T_i$.

Якщо імпульси малої тривалості повторюються з великим періодом, то при дії випромінювання струм зростає згідно співвідношення (3.31), а в інтервалах між ними встигає зменшитися до нуля (рис. 3.27).

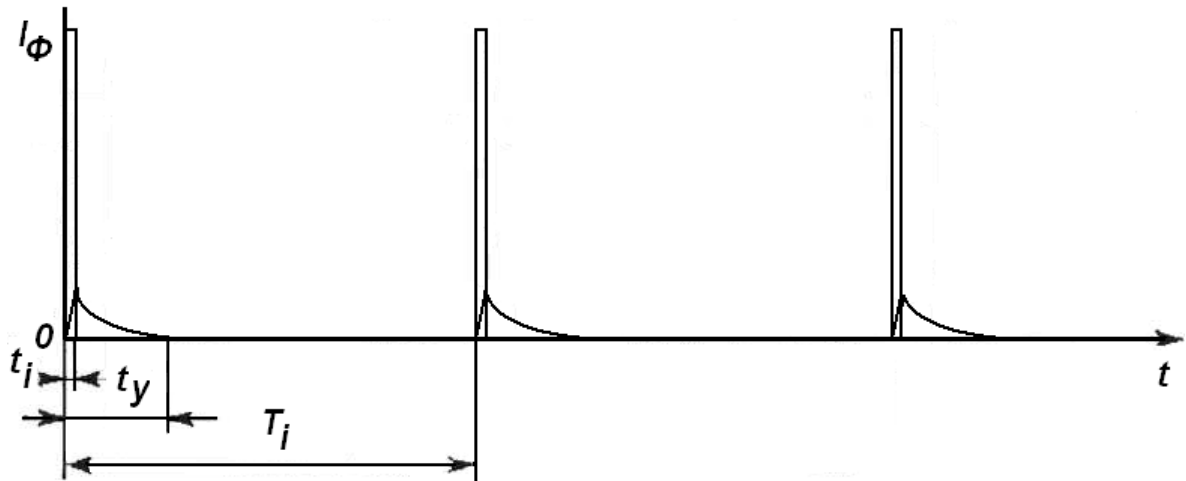


Рис. 3.27. Часова залежність фотоструму інерційного ПВ при дії на нього коротких імпульсів з великим періодом повторення [15].

У цьому випадку не реєструється ні форма імпульсів, ні середнє значення. Інерційний ПВ не придатний для реєстрації одиночних імпульсів чи імпульсів, які повторюються з великим періодом.

3. Постійна часу приймача випромінювання $t \ll t_i$.

При малій постійній часу і відповідно малому часові встановлення фотострум встигає досягнути максимального значення $I_{\phi 0}$ до моменту закінчення імпульсу потоку випромінювання (рис. 3.28). Інформація, якщо вона містилася у тривалості імпульсів чи періоді їх повторення, повністю зберігається у змінах фотоструму.

Для спрощення розгляду вважатимемо, що зміни потоку випромінювання відповідають гармонічному закону. Оскільки світловий потік (потужність випромінювання) величина додатна, то цей закон зміни містить постійну складову

$$\Phi' = \Phi_0 + m\Phi_0 \cos wt.$$

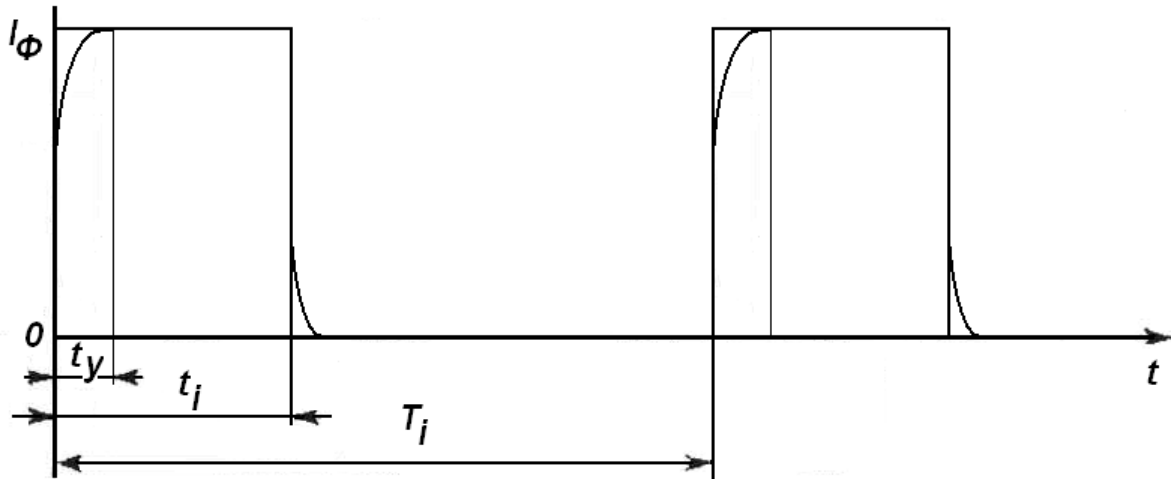


Рис. 3.28. Залежність фотоструму від часу для малоінерційного приймача випромінювання [15].

Тут Φ_0 – постійна складова; m – глибина модуляції (число менше від одиниці). При дії такого потоку на ПВ фотострум також матиме постійну та змінну складові

$$I_\phi = I_{\phi 0} + I_{\phi m} \cos \omega t$$

Внаслідок інерційності ПВ чутливість його до змінної складової буде меншою, ніж до постійної. При постійній часу ПВ $\tau > T = 2\pi/\omega$ фотострум не буде встигати відтворювати часові зміни потоку. Інтегральна чутливість на частоті ω :

$$S_\omega = \frac{S_I}{\sqrt{1 + (\omega \cdot \tau)^2}},$$

де S_I – інтегральна чутливість ПВ при постійному струмові, яка лише при умові $\omega \tau \ll 1$ не зменшується суттєво для змінного сигналу. Частотна характеристика ПВ, яка може бути отримана при вимірюванні його відгуку на гармонічні зміни світлового потоку різної частоти, в загальному випадку є комплексною і найпростішим чином визначається як

$$K_1(i\omega) = \frac{1}{1 + i\omega \cdot \tau}$$

Відомий і вираз для частотно-фазової характеристики:

$$\varphi_1(\omega) = -\arctg(\omega \cdot \tau),$$

де τ – постійна часу процесу генерування носіїв заряду в напівпровіднику.

Якщо ПВ під'єднано до електронної ланки, яка володіє своєю частотною характеристикою $K_2(i\omega)$, то загальна комплексна частотна характеристика визначається добутком

$$K(i\omega) = K_1(i\omega)K_2(i\omega),$$

а частотно-фазова характеристика – сумою

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega).$$

Інерційність приймача випромінювання найповніше описується його амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ), оскільки більшість приймачів не володіють однією постійною часу. Однак постійну часу можна ввести як параметр, апроксимуючи АЧХ заданого приймача іншою АЧХ, яка описується однією постійною часу $\tau_{ПВ}$. Така власна постійна часу $\tau_{ПВ}$ приймачів випромінювання пов'язана з параметрами АЧХ наступним співвідношенням:

$$\tau_{ПВ} = \frac{1}{2\pi f_{ГР}} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot f_{0,5}},$$

де $f_{0,5}$ – частота, при якій чутливість приймача зменшується вдвічі порівняно з чутливістю до немодульованого випромінювання.

За АЧХ приймача можна визначити граничну частоту $f_{ГР}$ як частоту синусоїдально модульованого потоку випромінювання, при якій чутливість ПВ падає до значення 0,707 від чутливості при немодульованому потоці. Вимірювати АЧХ ПВ, які володіють малою постійною часу (близько 10^{-7} – 10^{-6} с), важко і не завжди можливо через низьку чутливість приймача і малу потужність свічення неперервних випромінювачів порівняно з імпульсними.

Часові характеристики таких приймачів доцільно визначати за імпульсними $H(t)$ і перехідними $h(t)$ характеристиками. При цьому постійна часу наростання τ_H зв'язана із $\tau_{0.1-0.9}$ таким чином:

$$\tau_{0.1-0.9} = 2,2 \tau_H.$$

Схема вимірювання часових характеристик фотоприймачів складається з генератора імпульсів амплітудою 0 – 10 В, тривалість і період повторення яких можна змінювати від 10 нс до 1 с. Імпульси генератора через опір R_1

(рис. 3.29) подаються на світловипромінювальний діод. Часи наростання і спаду світлових імпульсів СД є не більшими, ніж 20 нс. Це означає, що його можна використовувати для вимірювання часових характеристик ПВ з постійною часу більшою за 10^{-7} с. Досліджуваний фотоприймач знаходиться в одному світлонепроникному корпусі разом із світлодіодом (СД), який закритий від потрапляння зовнішнього випромінювання. Сигнал відгуку ПВ на світлові імпульси, які створюються СД, реєструється осцилографом. Передбачено увімкнення зовнішньої напруги зміщення, якщо вивчаються часові характеристики фоторезисторів, або при роботі з фотодіодами у фотодіодному режимі. Опір навантаження R_2 , який увімкнено послідовно з ПВ, є змінним, що дозволяє визначити його вплив на часові характеристики. у роботі пропонується дослідити часові характеристики фоторезистора та фотодіода у фотогальванічному та у фотодіодному режимах при різних напругах зворотного зміщення.

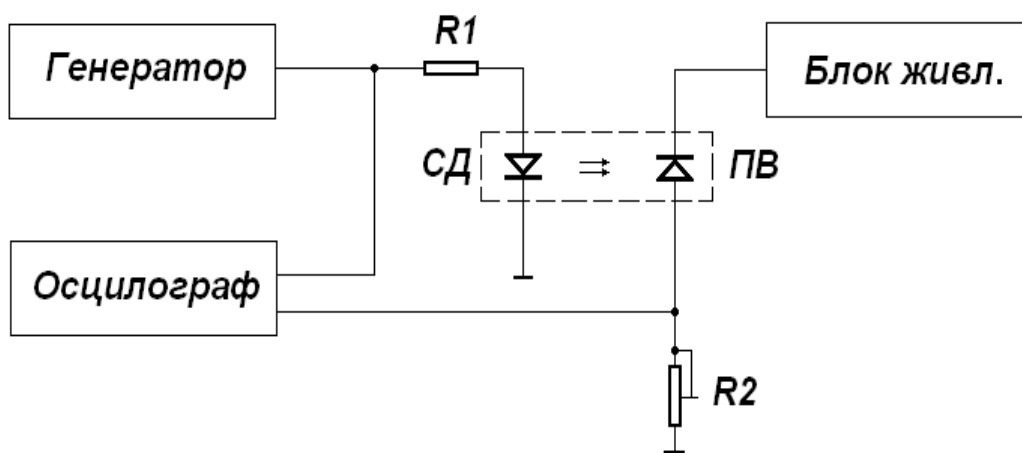


Рис. 3.29. Схема установки для вимірювання часових характеристик ПВ. СД – світлодіод, ПВ – приймач випромінювання.

Хід роботи

1. Ознайомтесь з роботою приладів та засобами керування ними. Складіть схему відповідно до рис. 3.29.
2. Одержіть осцилограми, як показано на рис. 3.25, та визначте постійні часу наростання та затухання сигналу τ_H та τ_3 для фотогальванічного режиму

фотодіода та при різних напругах зворотного зміщення для фотодіодного режиму. Такі ж вимірювання здійсніть для фоторезистора.

3. Отримайте осцилограми для встановлення параметрів $\tau_{0,1}$, $\tau_{0,1-0,9}$ та визначте тривалість імпульсної та перехідної характеристик фотоприймачів.
4. З часових характеристик ПВ визначте їх граничні частоти.
5. Проаналізуйте та поясніть отримані результати.

3.10. Тестові завдання та контрольні питання

№ 3.1

Чутливість фотодіода – це ...

- відношення зміни його опору до зміни освітленості;
- + відношення зміни зворотного струму до зміни освітленості;
- відношення зміни прямого струму до зміни освітленості;
- відношення зміни зворотної напруги до зміни освітленості.

№ 3.2

Чутливість фоторезистора – це ...

- + відношення зміни його опору до зміни освітленості;
- відношення зміни зворотного струму до зміни освітленості;
- відношення зміни прямого струму до зміни освітленості;
- відношення зміни зворотної напруги до зміни освітленості.

№ 3.3

Найширшою спектральною областю чутливості володіють ...

- фотодіоди з класичним $p-n$ переходом;
- фотодіоди з $p-i-n$ переходом;
- + фотодіоди з бар'єром Шотткі;
- лавинні фотодіоди.

№ 3.4

Найвищою питомою чутливістю серед фотодіодів володіють ...

- фотодіоди з класичним $p-n$ переходом;
- фотодіоди з $p-i-n$ переходом;
- фотодіоди з бар'єром Шотткі;
- + лавинні фотодіоди.

№ 3.5

Який параметр фототиристора змінюється при зміні його освітленості?

- питомий опір;
- струм пропускання;
- + напруга увімкнення;
- питома провідність.

№ 3.6

Чутливість біполярного фототранзистора – це ...

- відношення зміни його опору до зміни освітленості;
- відношення зміни струму бази до зміни освітленості;
- + відношення зміни струму колектора до зміни освітленості;
- відношення зміни напруги між емітером та колектором до зміни освітленості.

№ 3.7

Роботі фотодіода у фотодіодному режимі відповідає ... координатна чверть на вольт-амперній характеристиці.

- перша;
- друга;
- + третя;
- четверта.

№ 3.8

Тривалість перехідної характеристики фотоприймача – це інтервал часу, протягом якого вихідний сигнал:

- зменшується в e разів;
- зростає в e разів;
- досягає рівня 10% свого максимального значення;
- + зростає від 10% до 90% свого максимального значення.

№ 3.9

Постійна часу затухання сигналу фотоприймача – це інтервал часу, протягом якого вихідний сигнал:

- + зменшується в e разів;
- зростає в e разів;
- досягає рівня 10% свого максимального значення;
- зростає від 10% до 90% свого максимального значення.

№ 3.10

Шуми фотоприймача. Які параметри використовуються для їх опису?

№ 3.11

Імпульсна та перехідна характеристики фотоприймача, яким чином вони між собою пов'язані?

№ 3.12

Що таке колірна діаграма МКО?

Розділ 4. БАГАТОЕЛЕМЕНТНІ ПРИЙМАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

4.1. Відикони

На відміну від розглянутих вище фотоприймачів точкового типу (або дискретних, від *discrete* – розглядати окремо, розчленовано), існують фотоприймачі, здатні сприймати зображення загалом, з усіма його перепадами яскравостей (або світла), кольорів, півтонів. До таких приймачів зачислено великий клас приладів, розроблених для телебачення, вони представляють інтерес у цьому випадку як природний (і історичний) місток між вакуумними приладами (типу фотоелектронного помножувача) і твердотільними матричними приймачами (типу приладів із зарядовим зв'язком). У телебаченні ці прилади називають *передавальними трубками*.

Ідея створення передавальної трубки з фотопровідною мішенню належить російському вченому, електротехніку Олександру Олексійовичу Чернишову, який висловив її 1925 року. Однак перші експлуатаційні зразки таких трубок з'явилися лише 1950 р., після розробки напівпровідникових шарів, які змінюють свою електропровідність під дією світла. Прикладом такої передавальної трубки є *відикон* (рис. 4.1).

Відикон – електронно-променевий пристрій з фотопровідною мішенню, яка перетворює оптичне зображення в електричний сигнал. Як фотопровідний шар, який володіє внутрішнім фотоефектом, використовують кремній, окис свинцю, селенід кадмію та ін. Часто найменування приладу залежить від хімічного складу фотопровідного шару; наприклад, відикон з фотопровідним шаром на основі кремнію (Si) називають *кремніконом*, на основі свинцю (Pb) – *плумбіконом*, на основі кадмію (Cd) – *кадміконом*.

Головними елементами відикона є фотомішень та електронний прожектор. *Фотомішень* є скляною пластиною, закріпленою в торці передавальної трубки, на яку нанесений тонкий прозорий для світла (прозорість понад 90 %) провідний шар золота, платини або ж іншого провідника, зверху якого випаровуванням у вакуумі напилено фотошар товщиною 1-3 мкм з

перелічених вище матеріалів на основі Si (у випадку кремнію) або іншого напівпровідника.

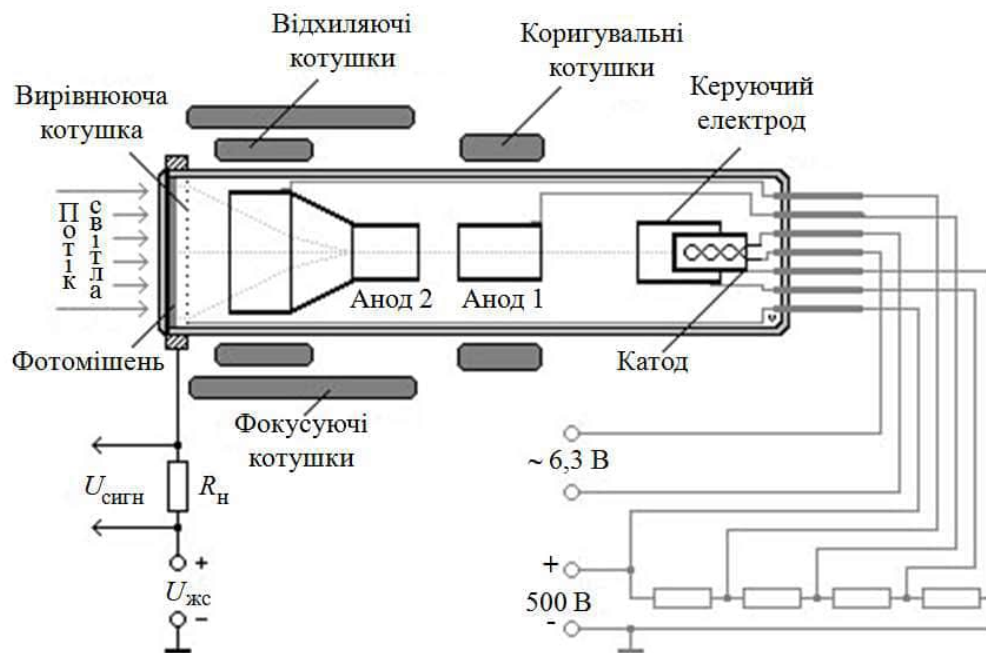


Рис. 4.1. Схема відикона [8]

Виводом сигнальної пластини слугує металеве кільце, яке електрично контактує з провідним шаром пластини. У неосвітленому стані фотошар має дуже високий опір (близько 1 000 ГОм/см), отож два його боки (один з яких контактує з провідним прозорим шаром і звернений до об'єкта зйомки, а другий «прощупується» електронним променем прожектора і звернений усередину трубки) утворюють ніби панель (матрицю) мініатюрних конденсаторів, площу обкладки кожного з яких визначає діаметр електронного променя, що пробігає за цикл опитування (кадр) по чергові всі елементи (конденсатори) фотомішені. Якщо елемент фотомішені освітлений, то його опір падає приблизно в 100 разів. Оскільки елементарний конденсатор заряджений раніше, за час між опитуваннями він може розряджатися до рівня напруги, що залежить від величини освітленості.

Електронний промінь у відиконі одночасно виконує роль елемента, що розгортає, і комутатора кола заряду кожного елемента мішені. Діаметр променя визначає роздільну здатність мішені. За розміру мішені $9,5 \times 12,5 \text{ мм}$ та діаметра променя близько 15 мкм площа мішені розкладається на $527\,300$ (633×833)

елементарних фотоприймачів, що цілком достатньо для передавання високоякісного телевізійного зображення. Пучок електронів, що випускається підігрітим катодом і який скеровується до мішені системою електродів (керуючих, першого і другого анодів, що вирівнює сітки) та електромагнітних сил коригувальних і фокусуючих котушок, замикає коло між катодом та «обкладкою» елементарного конденсатора, дозаряджаючи останній до потенціалу катода. Струм заряду, пропорційний різниці потенціалів катода й «обкладки» (яка, своєю чергою, пропорційна світловому потоку, що падає на елемент), протікає по опору навантаження R_n , створює вихідний сигнал U_c .

Мішені відиконів відрізняються великою різноманітністю, однак їх можна класифікувати як фоторезистивні і фотодіодні. У фоторезистивних мішенях процес розряду визначається опором фотопровідного шару. У фотодіодних мішенях розряд визначається ще й властивостями p - n -переходу напівпровідникового матеріалу, що забезпечує краще розділення світлових носіїв, велику лінійність світлової характеристики, безінерційність і високу чутливість. Зокрема, мішень кремнікона є фотодіодною матрицею з мозаїкою p - n -переходів (понад 1 000 000 переходів).

Володіючи безумовними перевагами (багатoelementність сприйняття зображення, швидкодія), відикони зберігають недоліки, властиві для вакуумних електронно-променевих приладів: об'ємність, а, отже, й нетехнологічність виготовлення (порівняно з площинними), високовольтне живлення з усіма наслідками. Бажання звільнитися від цих недоліків, за збереження переваг, привело розроблювачів, конструкторів і технологів виробництва електронно-оптичних приладів до створення матричних фотоприймачів, до яких належать сканістори, фотодіодні матриці, фоточутливі прилади із зарядовим зв'язком.

4.2. Сканістори

Сканістор (від слів *скан*[ування] і *[транзи]стор*) є напівпровідниковим перетворювачем просторового розподілу світлового потоку в адекватну для нього послідовність електричних сигналів (відеосигнал). Сканістор вважають

твердотільним аналогом передавального електронно-променевого приладу, дія якого базується на внутрішньому фотоефекті. Перетворюючим світлочутливим елементом сканістора є транзисторна структура p - n - p - або n - p - n -типу. Як вихідний напівпровідниковий матеріал транзисторної структури зазвичай використовують кремній. Відмінними рисами сканістора є висока швидкодія, надійність в експлуатації, тривалий термін служби, малі габаритні розміри і маса.

Еквівалентну схему транзисторної структури сканістора можна представити у вигляді доволі великої кількості фотодіодів і вентильних діодів, з'єднаних попарно, й увімкнутих назустріч сусідніх діодних ланцюжків. До низькоомної емітерної області прикладається пилкоподібна напруга розгортання, яка послідовно відкриває вентильні діоди, здійснюючи в такий спосіб сканування (опитування) кожної пари діодів.

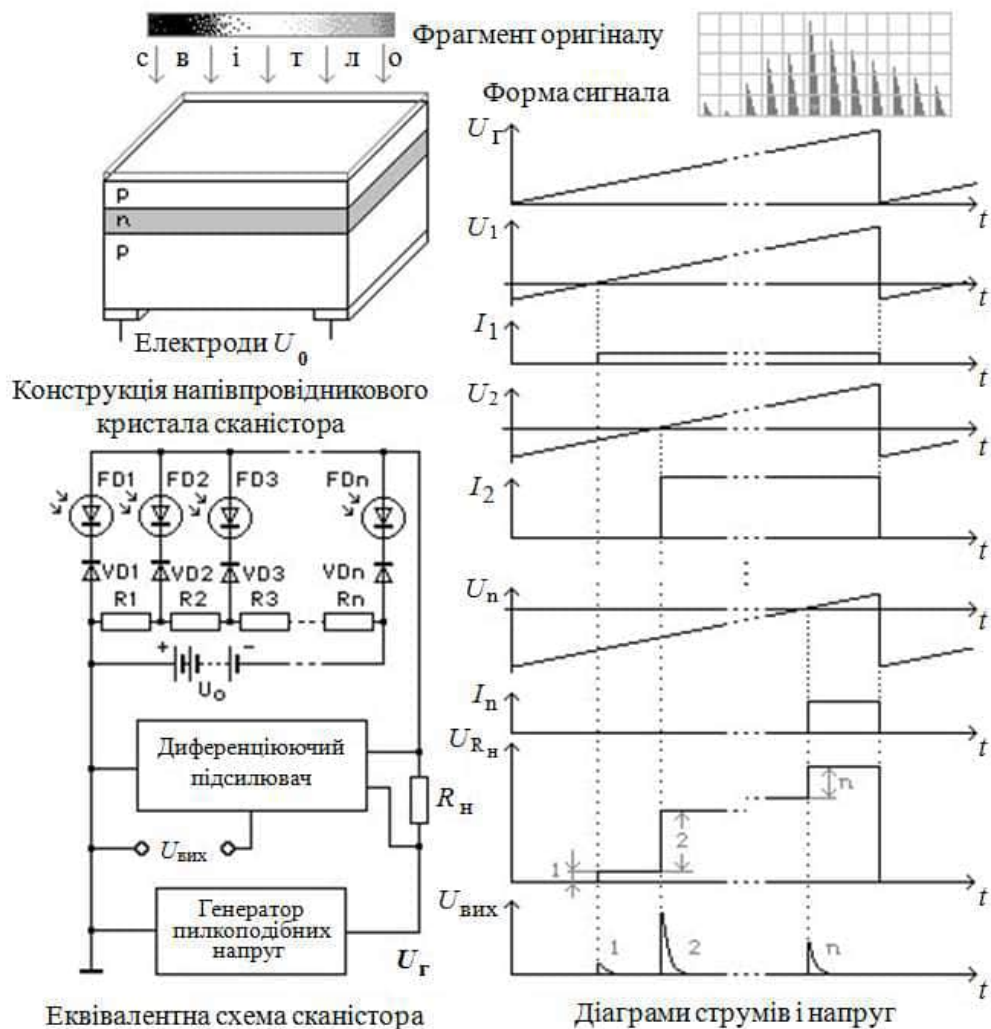


Рис. 4.2. Пристрій, схема і діаграми, які ілюструють роботу сканістора [8]

За відсутності світлового потоку сигнал на виході ланцюжка *фотодіод – вентильний діод* дорівнює нулеві, оскільки струми витоку фотодіодів і вентильних діодів однакові за значенням, хоча протилежні за напрямом. За впливу світлового потоку на сканістор у фотодіодах виникають фотоструми, які сумуються і створюють східчастий вихідний сигнал, величина кожної сходинки якого пропорційна світловому потокові, що падає на відповідний діод. Диференціюючий підсилювач сканістора перетворює східчастий вихідний сигнал у послідовність відеоімпульсів, амплітуда яких також пропорційна світловому потокові, що й відображено на діаграмах рис. 4.2.

Розроблено конструкції сканісторів рядкового і матричного типів з однорідним і комірковим (у вигляді окремих *p-n*-переходів) растрами. Сканістори застосовують у фототелеграфії, у системах оптичної обробки інформації, а також у колориметрах і спектрофотометрах.

4.3. Фотодіодні лінійки і матриці

Багатоелементні фотодіодні приймачі призначені для перетворення двовимірної (розподіленої за площею) оптичної інформації від зображення в одномірну послідовність електричних сигналів. Вони продукуються у вигляді лінійок і матриць. У лінійках фотодіоди розташовані в ряд (рядок, лінію) з рівномірним невеликим кроком, а матричні є набором таких лінійок. Параметри деяких багатоелементних твердотільних фотодіодів (*Multi-Element Monolithic Type Photodiodes*), які виробляє японська фірма *Hamamatsu Photonics K. K. (Solid State Division)*, наведено в табл. 4.1.

Розгортання зображення здійснюється послідовним зчитуванням сигналів з кожного фотодіода лінійки, а в матричному варіанті – шляхом почергового опитування кожної лінійки (і кожного фотодіода в лінійці). У лінійці одні електроди (наприклад, аноди фотодіодів) об'єднані в одну шину (рис. 4.3), а інші, у цьому випадку – катоди, виведені на комутатор (наприклад, на транзисторних ключах). Комутатор під'єднує кожен фотодіод до вимірювального кола, яке у найпростішому випадку може містити в собі

джерело живлення та опір навантаження. В електроніці режим послідовного опитування станів великого числа елементів і їхнє передавання на один вхід називають *мультиплексним* (а пристрій, що організовує таке опитування, – *мультиплексором*).

Таблиця 4.1. Параметри деяких багатоелементних фотодіодів [8].

Шифр приладу	Кількість елементів	Розміри елементу, мм	Область спектральної чутливості, мкм	Основна сфера застосування
S1651	2×2	0,30×0,60	0,40–1,06	Дисководи оптичних дисків
S1671	2×2	1,70×2,80	0,40–1,06	Сенсори позиціонування
S2311	35...46	4,40×0,94	0,19–1,10	Багатоканальні спектрофотометри, аналізатори кольору, оптичного спектра
S2312	35...46	4,40×0,94	0,19–1,00	– //–
S2313	35...46	4,40×0,94	0,19–1,05	– //–

У матричному варіанті фотодіоди під'єднують одним електродом до горизонтальної шини (ті ж аноди), а іншим – до вертикальної (катоди). Шини, своєю чергою, також під'єднані до комутаторів (мультиплексорів), що, як у випадку з лінійкою, вмикають послідовно кожен з фотодіодів у вимірювальне коло. В результаті організованого мультиплексування послідовне під'єднання вертикальних шин утворить розгортання по стрічці, а перехід з однієї горизонтальної стрічки на іншу – розгортання по кадру. Отож на виході схеми утвориться послідовність імпульсів (відеосигнал), амплітуда яких відповідає освітленості того або іншого елемента матриці.

Фотодіодні лінійки і матриці використовують у сучасних спектрофотометрах, сканерах та інших пристроях введення оптичної інформації.

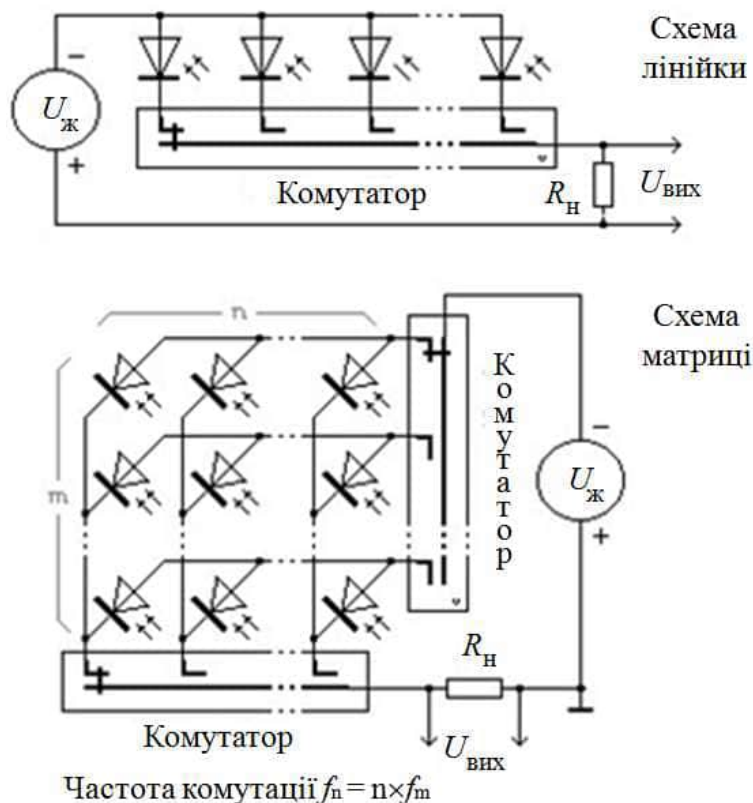


Рис. 4.3. Схеми багатоелементних діодних приймачів [8]

4.4. Прилади із зарядовим зв'язком

Фоточутливий *прилад із зарядовим зв'язком* ПЗЗ (англ. *charge coupled device* CCD) – це фотоприймач, який сприймає зображення, здійснює його розкладання на елементарні фрагменти, поелементне електронне зчитування (сканування) і формування на виході відеосигналу, адекватного до зображення. Цей пристрій належить до виробів функціональної електроніки.

Співробітники фірми *Bell Laboratories* У. Бойл і Дж. Сміт 1970 р. під час пошуку електричного аналогу схем на циліндричних магнітних доменах запропонували – і продемонстрували експериментально – принцип зарядового зв'язку (саме за ці розробки 2009 році вони отримали Нобелівську премію з фізики). Перший ПЗЗ представляв собою аналоговий регістр зсуву на 8 елементів, виготовлений за *p*-МОН (аббревіатурою МОН прийнято позначати мікросхеми на основі структур метал-оксид-напівпровідник) технологією з молібденовими затворами, а невдовзі з'явилися і двовимірні матриці. Дуже швидко з'ясували, що характерна для ПЗЗ властивість самосканування (про це

пізніше) усуває необхідність в регістрах зсуву, які створювали стільки проблем у попередніх типах сенсорів.

Подальший стрибок у технології та параметрах ПЗЗ стосувався появи прихованого каналу переносу (про це згодом) і використання прозорих електродів з полікристалічного кремнію, що різко підвищило чутливість приладів. Уже в середині 70-х років XX ст. з'явилися перші комерційні матриці виробництва фірм *Fairchild*, *Bell* і *RCA* в США та *Philips* у Європі, сумісні з ТВ стандартом (тобто з роздільною здатністю по вертикалі 476 чи 576 стрічок – відповідно для американського чи європейського стандартів розкладу, і принаймні 350 елементів розкладу по горизонталі). Невдовзі в Японії налагодили масове виробництво недорогих ПЗЗ прийнятної якості для побутової електроніки – і на зміну кінокамерам прийшли відеокамери.

ПЗЗ, як багатоелементний фотоприймач, продукується в матричному або лінійному вигляді, досягаючи в сучасних зразках декількох тисяч елементів для лінійок і декількох мільйонів – для матриць. Характеристику деяких ПЗЗ наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Параметри деяких ПЗЗ [8]

Тип приладу	Кількість елементів	Діапазон спектральної чутливості, мкм	Вольтова чутливість, мВ/лк	Частота опитування, МГц	Габаритні розміри, мм
ФПЗС1Л	500	0,5–0,1	3,0	Даних немає	29,5×14, 7×3,3
ФПЗС3М	256×288	0,4–1,0	30,0	Даних немає	19,5×15, 75×2,98
1200ЦЛ1	1024	0,5–1,0	2,4	0,05–3	29,1×14, 7×3,95
1200ЦЛ2	2048	0,36–1,0	8,0	0,1–3	29,1×14, 7×3,95
1200ЦМ2А	576×360	0,5–1,0	10,0	Даних немає	42,5×24, 7×5,5

Для ПЗЗ характерне розташування елементів один поблизу іншого – відстані між ними вимірюють одиницями мікрометрів, що спричиняє часткове перекривання електричних полів сусідніх елементів і виникнення власне явища перенесення заряду від одного елемента до іншого (явище зарядового зв'язку).

Принцип зарядового зв'язку проілюстровано на рис. 4.4. ПЗЗ є мікросхемою на напівпровідниковому кристалі (кремній), поверхня якого покрита шаром (0,1 мкм) діелектрика (окис кремнію), а на цей шар нанесені прозорі електроди (алюміній або полікремній). Розміри електродів становлять одиниці мікрометрів, а відстані між ними – менше 1–2 мкм. Рядок від рядка відокремлюють вузькі області так званої стоп-канальної дифузії (про це також згодом).

Якщо на електрод подати напругу 5–10 В, то під ним, за тонким шаром діелектрика, утвориться так звана потенціальна яма (глибиною близько 5 мкм), оскільки носії зарядів однойменного (+) з потенціалом електрода знака будуть зсунуті в глибину кристала під дією сил, які відштовхують (за законом Кулона) однойменні заряди. За освітлення цієї ділянки в результаті поглинання фотонів з'являються вільні електрони (внутрішній фотоефект), які накопичуватимуться (завдяки силам притягання того ж кулонівського закону) під їхнім електродом, який притягає, у так званий *зарядовий пакет*. Чим більший світловий потік на цій ділянці, тим більшим буде зарядовий пакет. Максимальний питомий заряд, який може знаходитися в потенціальній ямі, дорівнює $Q_{\text{макс}} = C_{\text{ок}}U$, де $C_{\text{ок}}$ – ємність оксиду на одиницю площі; U – потенціал електрода. Отже, елементарна комірка ПЗЗ є мініатюрним МОН-конденсатором, здатним утримувати заряд, пропорційний до світлового потоку, що падає на елемент.

Час збереження заряду невеликий – 1–100 мс (може змінитися освітленість ділянки, електрони можуть рекомбінувати з дірками або притягтися іншим електричним полем – «розсмоктуватися» тощо, проте за високих частот опитування ці процеси не встигають реалізуватися).

Унаслідок близькості електродів зарядовий пакет може переміститись під сусідній електрод, якщо потенціал там виявиться вищий і, отже, потенціальна яма глибша. Чергуючи різницю потенціалів на сусідніх електродах певним чином, можна перемістити сформований під дією світла зарядовий пакет уздовж лінійки або уздовж рядка в матриці і «зняти» його з останнього елементу ряду. Послідовність зарядових пакетів, передана по елементах рядка на її вихід, утворить відеосигнал. У випадку матричного ПЗЗ

відеосигнали окремих стрічок, які передаються послідовно один за іншим, утворюють відеосигнал кадру зображення.

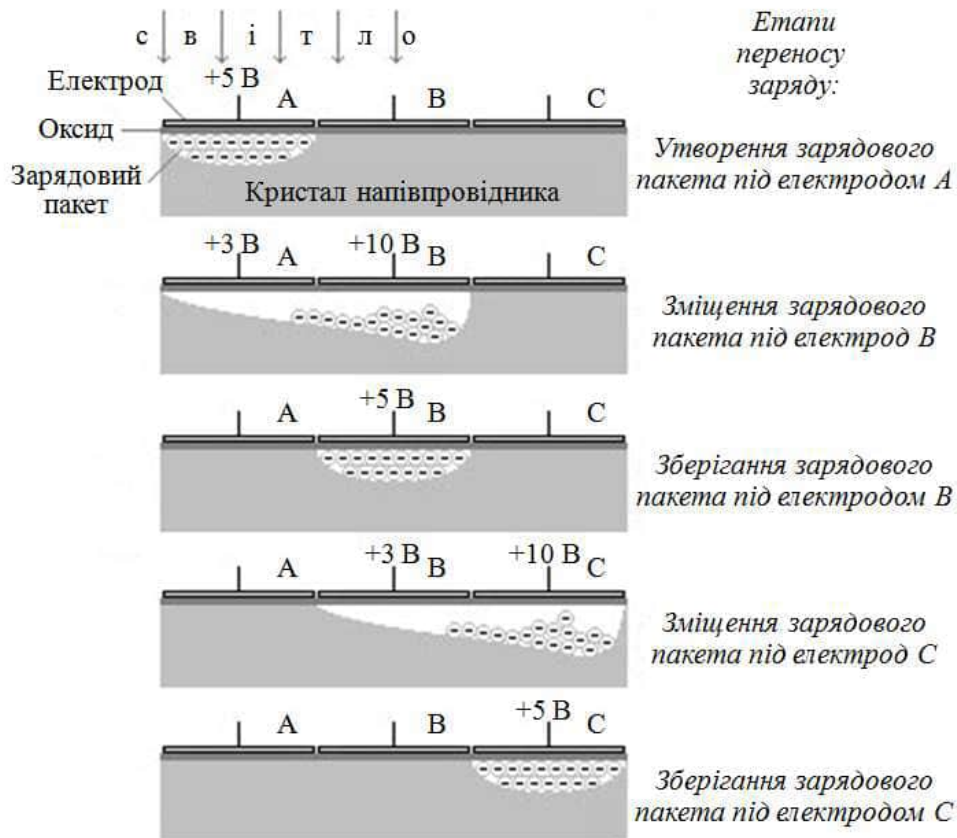


Рис. 4.4. Схема дії ПЗЗ [8]

Власне ПЗЗ можна використати і за іншим призначенням – як елемент пам'яті, збереження інформації або як лінію затримки електричного сигналу. Для відмінності від цих застосувань часто використовують абревіатуру ФПЗЗ. Однак на практиці літеру «Ф» часто не вживають, якщо в якійсь галузі ці прилади використовують лише за одним призначенням – як фотоприймачі. Отож у літературі поширене вживання термінів «ПЗЗ-лінійка», «ПЗЗ-матриця».

Розглянемо детальніше структуру і принцип дії ПЗЗ на прикладі *тритактової схеми регістра зсуву*, яку можна представити як схему МДН-транзистора із багатьма затворами (рис. 4.5, а). Властивість *самосканування* полягає в тому, що для керування ланцюгом затворів будь-якої довжини достатньо усього трьох тактових шин. Дійсно, для передавання зарядових пакетів необхідно і достатньо послугуватись трьома електродами: передавальним, приймальним та ізолюючим, який розділяє пари приймальних і

передавальних електродів один від іншого, причому однойменні електроди таких трійок можуть бути з'єднані між собою в одну тактову шину, яка вимагає лише одного зовнішнього виводу. Це і є найпростіший трифазний регістр зсуву на ПЗЗ. Цей прилад складається із трьох секцій.

Вхідна секція містить *стік* з p^+ -областю під ним і вхідний затвор, який виконує роль ключа для керування рухом дірок з дифузійної p^+ -області стоку в першу потенціальну яму.

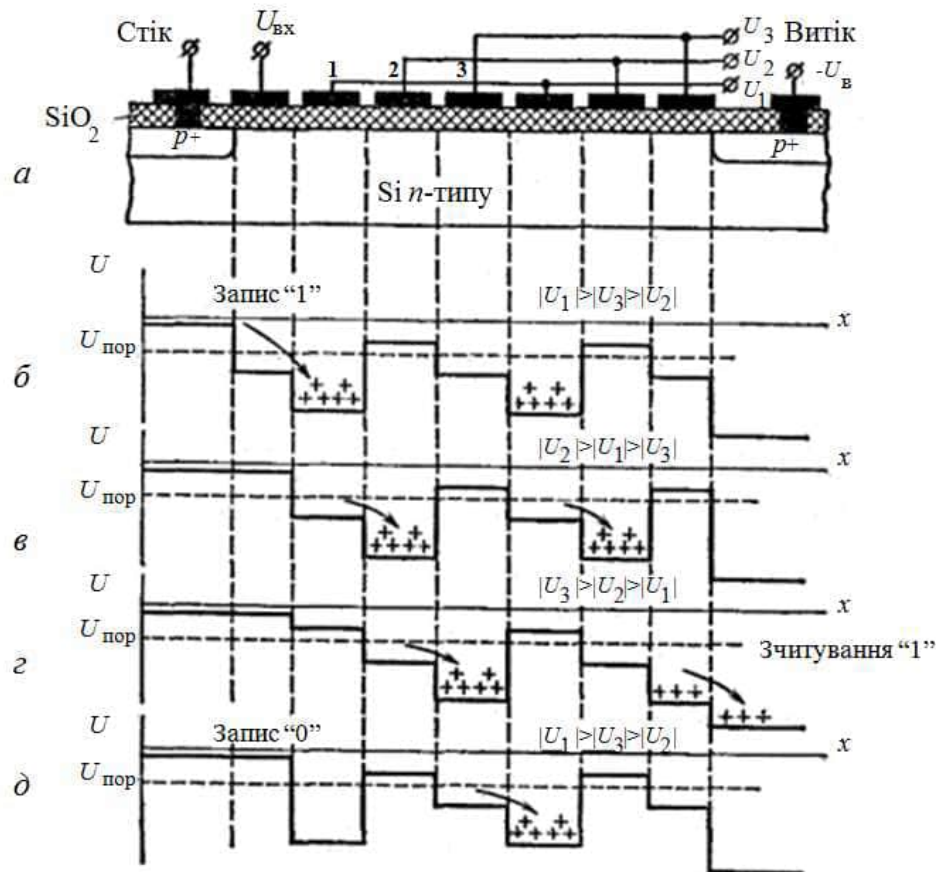


Рис. 4.5. Структура ПЗЗ з тритактовим живленням затворів секції перенесення (а) і тлумачення його дії (б–г): б – запис логічної одиниці шляхом інжекції пакета дірок у потенціальну яму під першим затвором секції перенесення; в – перенесення інформаційного заряду – пакета дірок у наступні потенціальні ями за зміни потенціалів на електродах затвора; г – зчитування логічної одиниці на виході приладу за екстракції дірок з потенціальної ями в p^+ -область витоку; д – запис логічного нуля за відсутності негативного потенціалу на вхідному затворі [21]

Друга секція – *секція перенесення* – складається з низки затворів, які керують потенціалом на межі кремній–двоокис кремнію. Ці затвори з'єднані

між собою через два. Напруги на затворах секції перенесення мають вигляд імпульсів різної амплітуди, які змінюються шляхом циклічної перестановки (рис. 4.5, б-д). За такої зміни напруги на затворах потенціальні ями переміщуються до виходу приладу, захоплюючи із собою пакети носіїв заряду.

Третя секція приладу – *вихідна секція* – є *p-n*-переходом витоку, зміщеним у зворотному напрямі, напруга на якому змінюватиметься за надходження пакета носіїв заряду (рис. 4.5, е).

Нехай на початковому такті роботи на вхідний затвор подано напругу $U_{\text{вх}}$, достатню для утворення каналу над вхідним затвором ($U_{\text{вх}} > U_{\text{пор}}$), який проводить носії заряду. Якщо при цьому на першому затворі секції перенесення існує достатньо велика від’ємна напруга (під першим затвором секції перенесення існує глибока потенціальна яма для дірок), то дірки виходитимуть зі стоку, проходять каналом під вхідним затвором і накопичуватимуться в потенціальній ямі під першим затвором секції перенесення (рис. 4.5, б)

До початку наступного такту напругу на вхідному затворі $U_{\text{вх}}$ знімають. Отож канал під вхідним затвором, який проводить дірки, закривається. Отже, відбувається запис інформації (наприклад, логічної одиниці), оскільки під першим затвором секції перенесення залишився пакет дірок. Для запису логічного нуля на початковому такті роботи приладу на вхідний затвор не подають від’ємну напругу.

Після зміни напруг на затворах секції перенесення найбільш негативною буде напруга на другому затворі, отож пакет дірок переміститься у потенціальну яму під другим затвором секції перенесення (рис. 4.5, в). Під час наступних тактів зміни напруги на затворах секції перенесення відбуватиметься подальше переміщення пакета дірок до вихідної секції (рис. 4.5, г, д).

Якщо в потенціальних ямах, які підходять до *p-n*-переходу витоку, немає носіїв заряду – дірок, то зміни струму у колі витоку не спостерігатиметься. І тільки у тому випадку, коли потенціальна яма, яка містить дірки, підійде до *p-n*-переходу витоку, дірки втягнуться в нього й у колі витоку пройде імпульс струму або ж зміниться напруга на резисторі навантаження у колі витоку (рис. 4.5, е).

Конструкція ПЗЗ із тритактовим живленням затворів секції перенесення має низку недоліків:

- 1) металеві електроди – затвори необхідно розташовувати на дуже малій відстані один від іншого (близько 2–3 мкм), що ускладнює їхнє виготовлення;
- 2) за малої відстані між затворами можливе забруднення домішками з атмосфери тонкого шару двоокису кремнію, розташованого між електродами;
- 3) неусувні перетини ліній металізації для з'єднання затворів між собою ускладнюють технологію.

Ці недоліки частково можна усунути в інших конструкціях подібних приладів, зокрема використовуючи *двотактове живлення затворів секції перенесення*. Структура двотактового ПЗЗ чи ПЗЗ зі східчастим діелектриком відрізняється чергуванням областей напівпровідника (кремнію) з товстим і тонким шарами двоокису кремнію (рис. 4.6, а). Електрод кожного затвору секції перенесення розташований на поверхні товстого і тонкого шару двоокису кремнію. За прикладання напруги на затвор під ним автоматично утворюється асиметрична потенціальна яма, конфігурація якої забезпечує скероване переміщення пакета носіїв заряду до витoku (рис. 4.6, б, в). Зрозуміло, що схема керування секцією перенесення такого ПЗЗ значно простіша, ніж у тритактовому ПЗЗ. З'єднання затворів між собою у двотактових ПЗЗ може бути виконане без перетинів ліній металізації, що спрощує технологію виготовлення таких приладів.

У структурі секції перенесення *ПЗЗ із ланцюгом прихованих затворів (із двошаровою металізацією)* частину затворів виготовлено із полікристалічного кремнію (чи з тугоплавкого металу, наприклад, молібдену). У проміжках між кремнієвими затворами на поверхні шару двоокису кремнію розташовані металеві затвори (рис. 4.7), відокремлені від затворів з полікристалічного кремнію шаром двоокису кремнію, який наносять після створення затворів з полікристалічного кремнію. У такій структурі вдається зменшити відстань між електродами затворів до величини, рівної товщині шару двоокису кремнію.

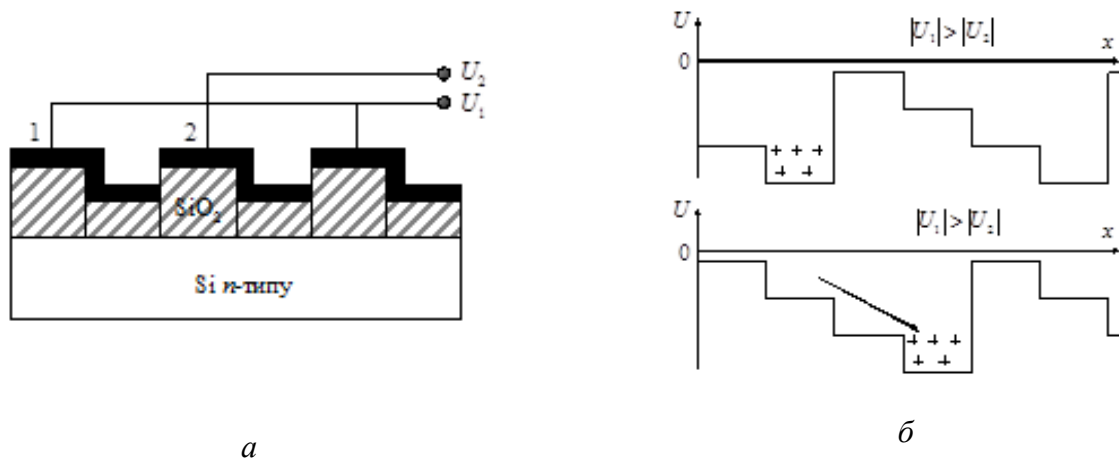


Рис. 4.6. Структура секції перенесення ПЗЗ зі східчастим діелектриком (а) і тлумачення принципу перенесення інформаційного заряду за двотактового живлення затворів секції перенесення (б, в) [19]

Ще одним різновидом двотактових приладів є *ПЗЗ на ланцюгах МДН-транзисторів* (рис. 4.8, а). Дифузійні області з електропровідністю *p*-типу, які є витокom для одного і стоком для іншого МДН-транзистора, не під'єднують до джерела живлення, на відміну від звичайних МДН-транзисторів.

Інформаційний заряд у вигляді пакета дірок може зберігатися у дифузійних областях з електропровідністю *p*-типу, оскільки потенціальний бар'єр електронно-діркового переходу між дифузійною областю та підкладкою перешкоджає розтіканню дірок у режимі збереження, незважаючи на деяке пряме зміщення цього переходу через позитивний заряд пакета дірок у дифузійній *p*-області (рис. 4.8, б, в).

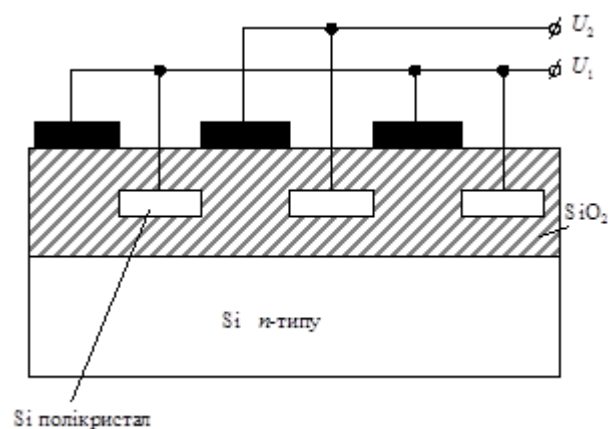


Рис. 4.7. Структура секції перенесення ПЗЗ з ланцюгом прихованих затворів [19]

У режимі передавання інформації (зарядового пакета) на кожний другий затвор надходить імпульс від'ємної полярності, амплітуда якого вища від значення $U_{\text{пор}}$. Унаслідок цього під кожним другим затвором у напівпровіднику виникає канал. Через несиметричність розташування металевого електрода відносно дифузійних областей кожна друга дифузійна область виявляється під більшим негативним потенціалом, що забезпечує спрямований рух дірок із однієї дифузійної області в іншу, тобто у глибшу яму (рис. 4.8, в).

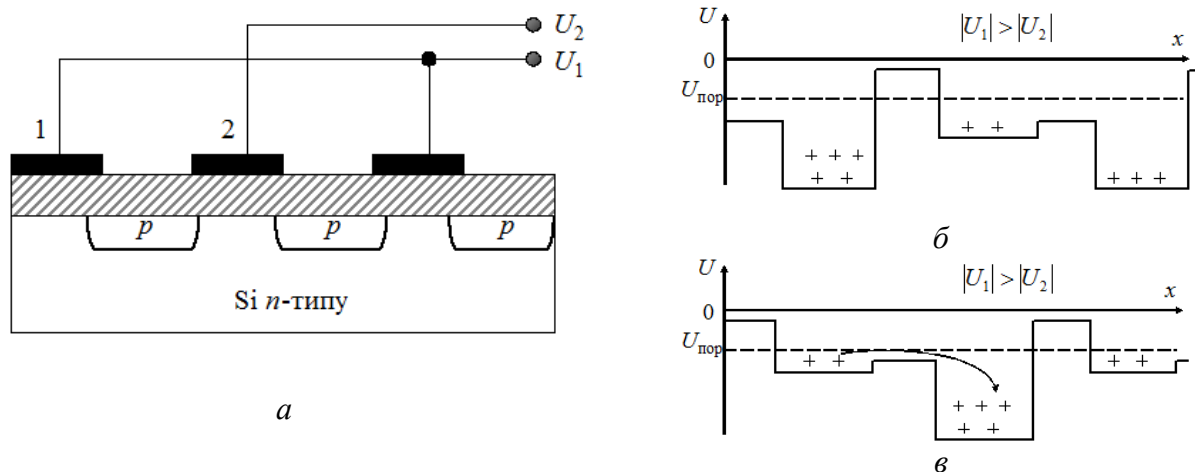


Рис. 4.8. Структура секції перенесення ПЗЗ на ланцюгах МДН-транзисторів (а) і розподіл поверхневого потенціалу в режимі переносу інформаційного заряду (б, в) [19]

Отже, принцип дії ПЗЗ на ланцюгах МДН-транзисторів аналогічний до принципу дії ПЗЗ інших конструкцій і структур, розглянутих раніше. Відмінність ПЗЗ на ланцюгах МДН-транзисторів від інших ПЗЗ полягає в тому, що структура їхніх секцій перенесення містить доволі значну кількість електронно-діркових переходів, що робить її недосконалою з технологічної точки зору.

До цього часу ми розглядали лише ПЗЗ-лінійки. Далі детальніше розглядатимемо принципи конструювання та особливості ПЗЗ-матриць. Насамперед слід згадати про *стоп-канали* – вузькі смужки із підвищеною концентрацією основної легуючої домішки, що йдуть уздовж каналу перенесення (рис. 4.9), які використовують для локалізації зарядових пакетів у поперечному напрямі. Справа в тому, що від концентрації легуючої домішки залежить напруга, за якої на затворі під ним утвориться збіднена область (цей

параметр є фактично граничною напругою МОН-структури). З інтуїтивних міркувань зрозуміло: чим більша концентрація домішки, тобто чим більше електронів (чи дірок) у напівпровіднику, тим важче їх відігнати всередину, тобто тим вища гранична напруга, або ж (за однієї напруги) тим нижчий потенціал у потенціальній ямі (якщо вона взагалі утворилася).



Рис. 4.9. Вигляд реєстра «згори» [42]

Зазначимо, що канал перенесення в боковому напрямі обмежений стоп-каналами. Різними кольорами на рис. 4.9 відображено електроди трьох різних фазових шин керування.

Повернімося до структури *двовимірної матриці ПЗЗ*. Найпростіший її варіант зображено на рис. 4.10. У ньому можна виокремити два вертикальні реєстри зсуву на ПЗЗ, які утворюють секцію накопичення і секцію зберігання з рівною кількістю стрічок (кожна стрічка секції утворена однією трійкою електродів), горизонтальний реєстр зсуву і вихідний пристрій. Розглянемо докладніше роботу такої структури.

Протягом часу прямого ходу по кадру секція накопичення стоїть, тобто на неї подають незмінні напруги, що формують потенціальні ями тільки під одним електродом кожної трійки, скажімо, під електродом першої фази (ФН1), причому потенціальні ями утворюються у всіх елементах усіх стрічок секції. Уздовж горизонталі кожна комірка накопичення відокремлена стоп-каналами (виділені червоним кольором). Зображення, проєктоване на секцію накопичення, спричиняє фотогенерацію – утворення електронно-діркових пар. При цьому фотогеновані дірки залишатимуться в потенціальній ямі (у випадку використання як підкладки напівпровідника *n*-типу провідності), а електрони розмістяться у підкладці або уздовж поверхні в стоп-каналах. Отже, під дією світла у комірках накопичується зарядовий рельєф, тобто в кожній

комірці збирається заряд, пропорційний до її освітленості і до часу накопичення.

Після закінчення прямого ходу по кадру на обидві секції подають тактові імпульси, які спричиняють синхронне перенесення заряду. Важливо (і це відображено на рисунку), щоб обидві секції утворили безперервний регістр зсуву. Після кількості тактів, рівній кількості стрічок у кожній секції (нагадаємо, що кожна стрічка утворена трьома електродами), весь накопичений зарядовий рельєф цілковито переміститься в секцію зберігання, закриту від світла, а секція накопичення буде очищена від заряду. Таке перенесення із секції в секцію відбувається доволі швидко (фактично він становить малу частину часу зворотного ходу по кадру). Під час наступного циклу накопичення (це наступне поле кадрового розгортання) секція накопичення формує наступний кадр зображення, а із секції пам'яті заряди пострічково, під час зворотного ходу по стрічці, передаються в горизонтальний регістр (кожен елемент регістра має зарядовий зв'язок з відповідним стовпцем секції пам'яті, і за один раз передається одна стрічка), а потім виводяться у вихідний пристрій регістра за час прямого ходу по стрічці, формуючи відеосигнал.

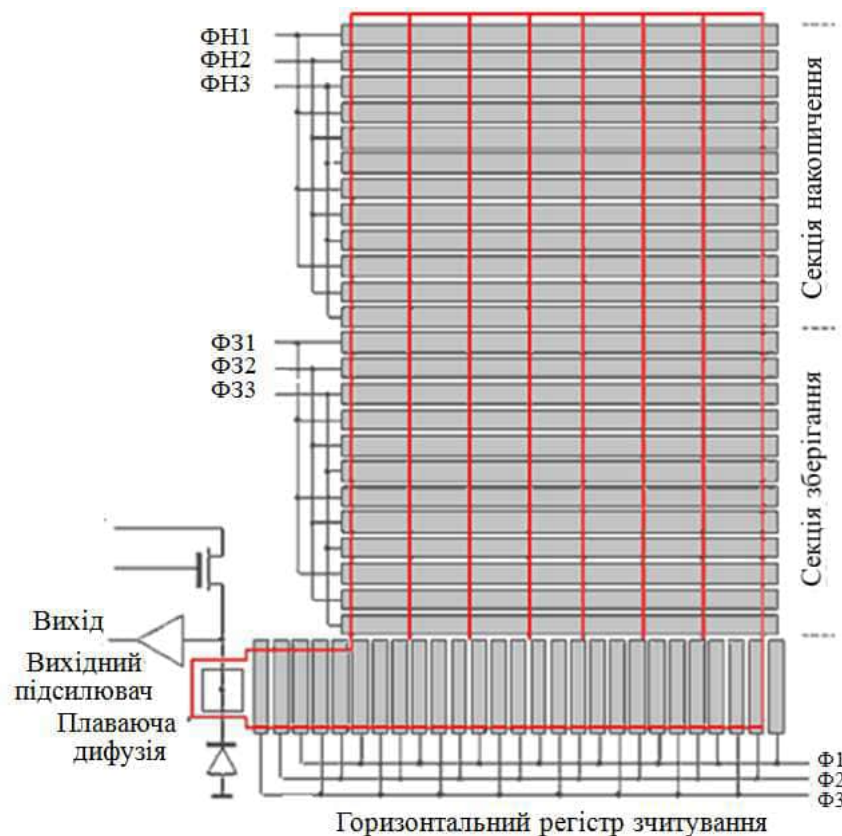


Рис. 4.10. Структура ПЗЗ із кадровим перенесенням [42]

Наголосимо на одній важливій обставині. Перші матриці виглядали саме так, як зображено на рисунку, з електродами, сформованими з металу (молібдену). Зрозуміло, що для забезпечення зарядового зв'язку і можливості повного перенесення заряду від затвора до затвора проміжок між ними не міг бути великим, що спричиняло вкрай низьку чутливість: дійсно, майже вся площа елемента виявлялася непрозорою для світла. Крім того, за ширини проміжку 2 мкм і сумарної його довжини для всієї матриці (кілька метрів) доволі ймовірно замикання металевих фаз однієї на іншу, що спровокує втрату працездатності матриці.

Радикальним виходом стало запропоноване 1974 р. К. Секеном і М. Томпсеттом з *Bell Labs* використання електродів з полікристалічного кремнію, прозорого майже у всьому видимому діапазоні [24]. У таких приладах для формування трифазної системи електродів використовують три послідовно нанесених на підкладку рівня полікремнію (з газової фази), кожен для своєї фази, які після формування електродного рисунка окисляються. Щоб під час окислення полікремнію не змінювалася товщина підзатворного діелектрика, у сучасних приладах його роблять двошаровим – оксид + нітрид кремнію (Si_3N_4). Перші ж прилади з полікремнієвими затворами перевершили за чутливістю вакуумні трубки і навіть фотоемульсію. Крім того, вирощений на кожному шарі полікремнію ізолюючий оксид різко знизив імовірність міжфазного замикання, а міжфазний проміжок зменшився до 0,2 мкм – товщини міжфазного оксиду.

Незважаючи на безперечну простоту, у матриць з розглянутою організацією (їх називають *ПЗЗ із кадровим перенесенням*) є один істотний недолік – власне, саме *кадрове перенесення* (КП). Тактова частота, яку подають на секції під час КП, сягає, зазвичай, близько сотень кГц (зрідка 1–2 МГц), що зв'язано з великою ємністю фаз секцій (до 10 000 пФ), і тим, що самі електроди мають розподілені параметри (RC), і тактові імпульси за їхньої високої частоти можуть просто не дійти до середини електрода. Отож КП забирає істотний час (частки мс). Якщо врахувати, що під час КП секція накопичення залишається освітленою, то яскраві ділянки зображення встигають вплинути на чужий зарядовий пакет навіть за той короткий час, коли він проходить через них. Так

на сигналі з'являється *розмивання* – вертикальний слід від яскравих ділянок зображення розміром у весь кадр. Для боротьби з ним застосовують різні підходи. Наприклад, у малокадрових системах (прикладні системи з низькою кадровою частотою; яскравий приклад, знову ж, – астрономія, де час накопичення інколи сягає кількох годин) використовують механічний затвор, або ж, якщо це можливо, просто від'єднують джерело світла. У цифрових камерах для компенсації розмивання використовують доволі прості алгоритми обробки зображення (просто запам'ятовується окремо картинка розмивання – її можна, наприклад, одержати за нульового часу накопичення, а потім відняти від «сумарного» зображення).

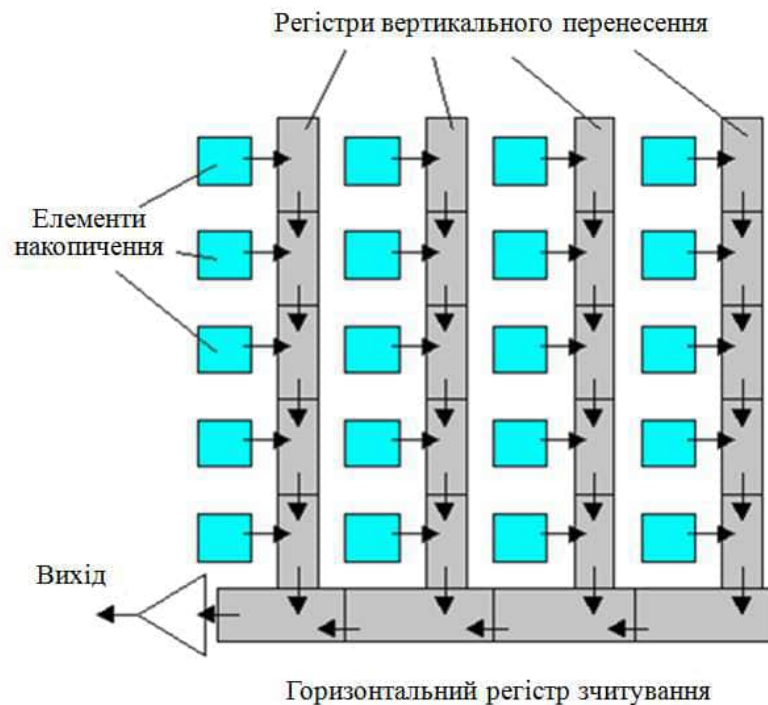


Рис. 4.11. Структура ПЗЗ із міжстрічковим перенесенням [42]

Однак радикально проблему розмивання вирішують у приладах з *міжстрічковим перенесенням* (МП), які домінують на ринку побутової відеотехніки. Їх схематично зображено на рис. 4.11. На відміну від матриць із КП, функції накопичення заряду та його перенесення тут розділені. Заряд з елементів накопичення (це, зазвичай, фотодіоди – вони теж мають ємність і здатні накопичувати заряд!) передається в закриті від світла ПЗЗ-регістри перенесення, тобто секція перенесення наче вставлена в секцію накопичення. Отож перенесення зарядового рельєфу всього кадру відбувається за один такт, і

розмивання, пов'язаного з перенесенням, не виникає. Щоб подолати ще й похибки в зображенні, які виникають через влучання в канали перенесення носіїв, генерованих у глибині підкладки (якщо тільки не застосовують фільтра ІЧ відсікання – а у відеокамерах його завжди використовують), до матриці з МП додають ще одну секцію зберігання з відповідною кількістю елементів (рис. 4.12). Розмивання у такій матриці зі *стрічково-кадровим перенесенням* (СКП) надзвичайно мале.

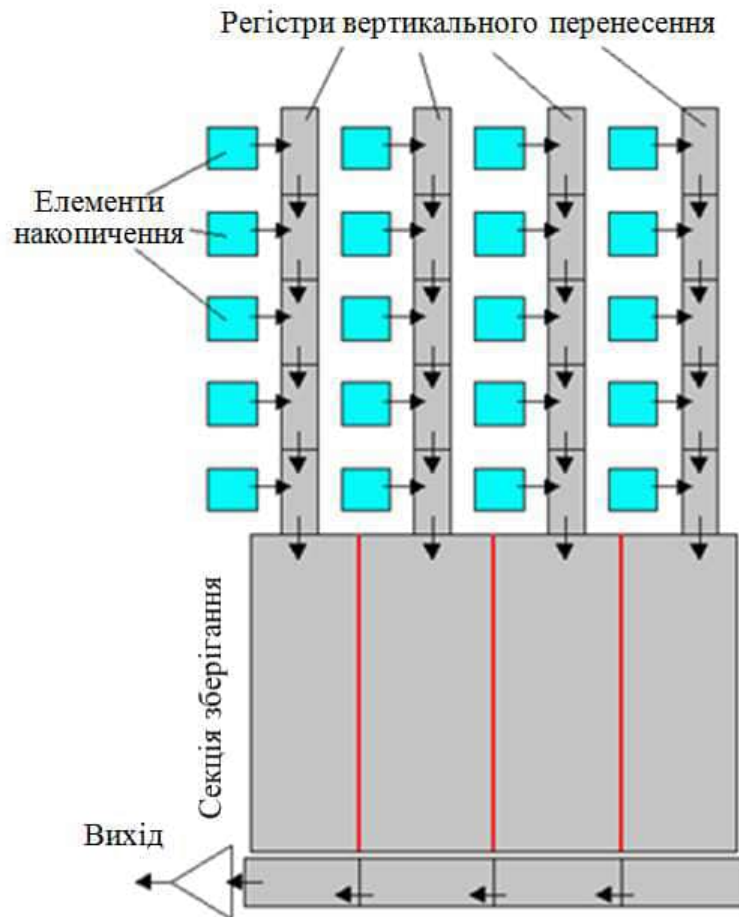


Рис. 4.12. Структура ПЗЗ зі стрічково-кадровим перенесенням [42]

Порівняно з матрицями з КП, фактор заповнення в матрицях із МП або СКП приблизно вдвічі менший, оскільки майже половина площі фоточутливої поверхні відкрита для світла. Щоб підвищити ефективність збирання фотонів, використовують мікрорастр – масив невеликих лінзочок (рис. 4.13).

Його формують дуже просто: на поверхню пластини з уже готовими структурами матриці наносять шар оптичної легкоплавкої пластмаси, з якого методом фотолітографії вирізають ізольовані квадратики, що лежать над

кожним елементом. Проміжок між окремими квадратами незначний. Потім пластина нагрівається, пластмаса підплавлюється і поверхня окремих квадратиків набуває форми, близької до сферичної, фокусуючи світло, яке потрапило на її поверхню, чітко на фоточутливий елемент матриці.

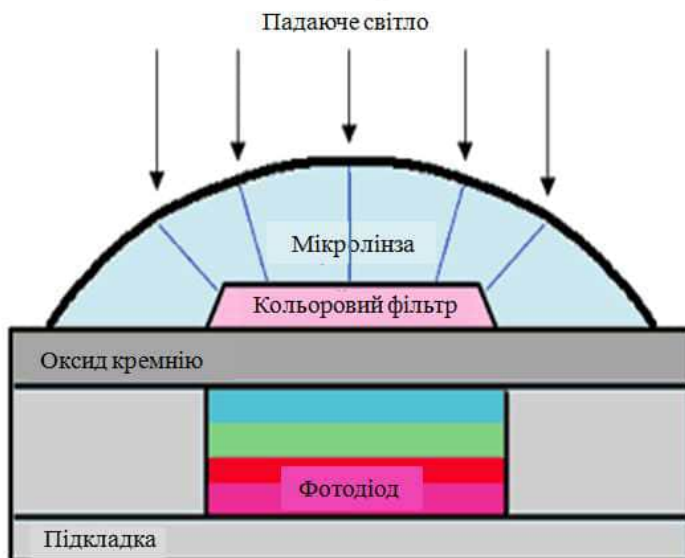


Рис. 4.13. Мікроматриця у ПЗЗ із міжстрічковим перенесенням значно підвищує ефективність збирання фотонів [44]

Далі розглянемо *основні характеристики ПЗЗ-фотоприймачів*.

Насамперед зазначимо, що ПЗЗ є типово динамічним пристроєм, отож має нижню і верхню межі тактових частот. *Нижня межа тактової частоти* відзначається тим, що між потенціальною ямою поблизу поверхні та рештою об'єму напівпровідника протікають струми, що залежать, здебільшого, від теплової генерації носіїв заряду і нічим в принципі не відрізняються від зворотних струмів електронно-діркового переходу. Ці струми насамперед впливають на рівень логічного нуля, підвищуючи заряд дірок у пустих потенціальних ямах. Залежно від температури і властивостей матеріалу помітне накопичення дірок у пустих потенціальних ямах може відбутися за час від сотих часток до одиниць секунд. Отож нижню межу робочих частот для ПЗЗ визначають у діапазоні одиниць – десятків кілогерц. *Верхню межу тактової частоти* визначають за часом перетікання заряду з однієї потенціальної ями в іншу (порядку одиниць наносекунд). За короткий час весь заряд не встигає

перейти з однієї потенціальної ями в сусідню, отож верхню межу тактових частот для ПЗЗ визначають, зазвичай, десятками мегагерц.

Окрім того, потрібно врахувати, що в діапазоні далеких від граничних робочих частот у ПЗЗ також не відбувається повної передачі інформаційного заряду з однієї потенціальної ями в іншу. Зв'язано це з явищами захоплення носіїв поверхневими енергетичними рівнями пасток захоплення. В результаті, по-перше, зменшується загальний заряд пакета дірок, який передається, тобто зменшується рівень логічного нуля. Для зменшення впливу цього ефекту необхідно забезпечити густину поверхневих станів приблизно на два порядки меншу від допустимої під час виготовлення МДН-транзисторів.

Іншим, простішим, методом боротьби з розглянутим ефектом є кодування логічного нуля не відсутністю заряду в потенціальній ямі, а деяким малим зарядом. Цей заряд, просуваючись секцією перенесення ПЗЗ спричиняє заповнення більшої частини поверхневих станів, які уже не можуть захоплювати носіїв заряду під час проходження пакета дірок. Водночас зменшується амплітуда сигналу на виході ПЗЗ.

Третім методом боротьби з явищем захоплення, запропонованим інженерами фірми *Philips* 1972 року, є використання так званого поглибленого (прихованого) каналу (рис. 4.14, а). При цьому шляхом введення відповідних домішок у поверхневий шар напівпровідника (товщиною 0,3–0,5 мкм – якщо підкладка *n*-типу, то легування здійснюють домішками *p*-типу) створюють такий розподіл електричного поля поблизу поверхні, за якого носії заряду рухаються не поблизу поверхні, а на деякій глибині (до декількох мікрометрів). Вважатимемо, що прихований канал має однорідну концентрацію домішки по усій глибині. За повного збіднення прихованого каналу у ньому залишається некомпенсований заряд легуючої домішки (вважатимемо її домішкою *p*-типу, тобто залишаються електрони домішки). Окрім того, збіднена область поширюватиметься й у підкладку, подібно як і для ПЗЗ з поверхневим каналом, причому в підкладці заряд некомпенсованої домішки – позитивний. Розподіл потенціалу за такого східчастого розподілу об'ємного заряду, як впливає з рівняння Лапласа, буде кусково-параболічним з максимумом потенціалу, який

лежить на деякій глибині від границі розділення (фактично поблизу металургійної границі p - n -переходу) прихований канал – підкладка. Це суттєво знижує втрати на захоплення носіїв. До того ж, у ПЗЗ з поглибленим каналом вдається зсунути верхню межу робочих частот, як мінімум, за 100 МГц. Однак прилади з поглибленим каналом мають значно меншу ефективність керування з боку затворів і, відповідно, менший інформаційний заряд, порівняно зі звичайними ПЗЗ.

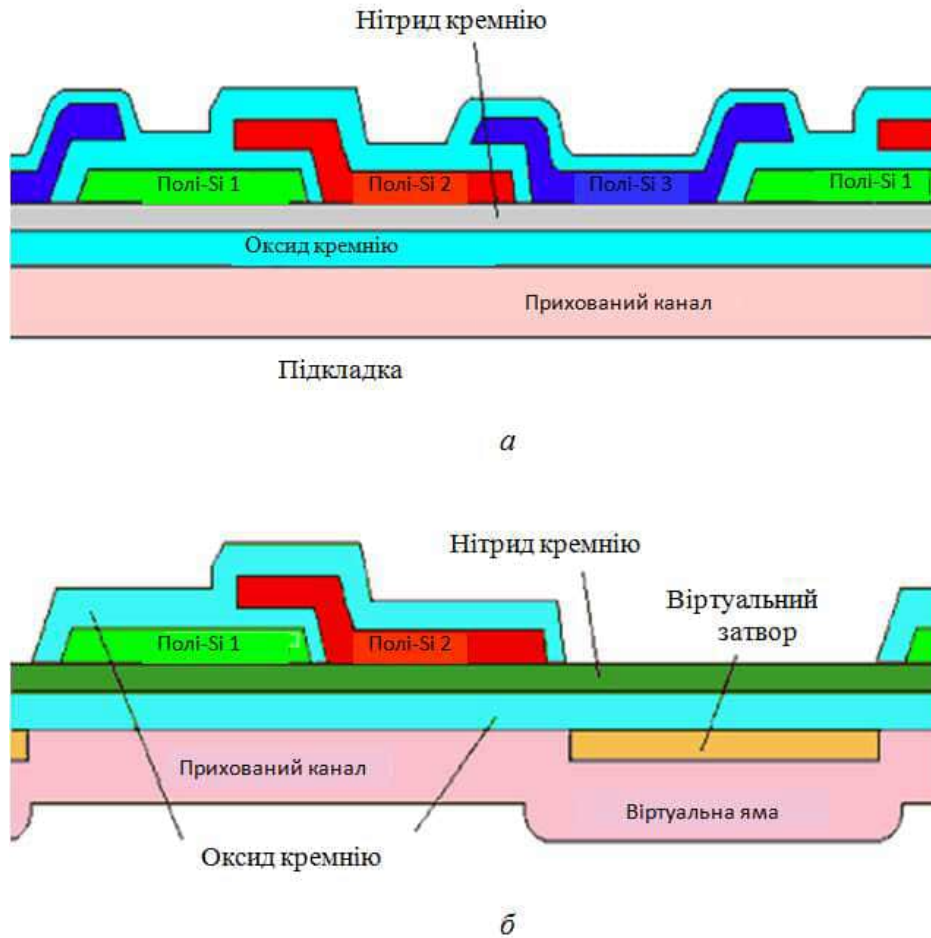


Рис. 4.14. Перетин трифазного ПЗЗ з електродами: *а* – з полікристалічного кремнію; *б* – з віртуальною фазою (у цьому випадку майже половина площі комірки вільна від полікремнію) [42]

Для кількісної оцінки розглянутого ефекту захоплення носіїв у ПЗЗ використовують параметр *ефективності передачі заряду* $\eta = \frac{(Q_{1''} - Q_{0''})_{i+1}}{(Q_{1''} - Q_{0''})_i}$, що показує частку заряду, яка переноситься з однієї потенціальної ями i в іншу $i+1$. Значення ефективності передавання η зазвичай близьке до 1, отож зручніше

користуватися *коефіцієнтом втрат* (неефективністю передавання) $K_v = 1 - \eta$. Для хороших ПЗЗ коефіцієнт втрат становить менше 10^{-6} .

Далі зупинимося на *спектральних характеристиках* – залежності вихідного сигналу від довжини хвилі, або, що еквівалентно, квантовому виході – кількості фотоелектронів на один фотон падаючого випромінювання.

Спектральна характеристика (СХ) ПЗЗ визначається, причому мультиплікативно, двома чинниками – проходженням світла через електродну структуру і фотогенерацією, зумовленою поглинанням світла безпосередньо в напівпровіднику (внутрішній квантовий вихід). Почнемо з останнього.

Поглинання світла у напівпровіднику описують *коефіцієнтом поглинання* – величиною, оберненою до довжини, на якій інтенсивність випромінювання падає в e разів. Фотогенерацію спричиняють тільки фотони з енергією, яка перевищує ширину забороненої зони – близько 1,2 еВ (що відповідає довжині хвилі, трохи більшій за 1,05 мкм – це ближній ІЧ діапазон). Фотони з більшою довжиною хвилі просто не поглинаються і, відповідно, не дають внеску у вихідний сигнал, а довжина хвилі $\sim 1,05$ мкм є червоною границею фотоефекту в кремнії. За зменшення довжини хвилі коефіцієнт поглинання поступово зростає: при $\lambda = 1$ мкм світло загасає в e разів на 100 мкм, при $\lambda = 0,7$ мкм (червоний колір) – на 5 мкм, а при $\lambda = 0,5$ мкм (зелено-голубий) – на 1 мкм. Що ж з цього випливає? Згадаємо, що глибина збідненого шару (глибина, на яку поширюється електричне поле затвора всередину напівпровідника) – близько 5 мкм. Зрозуміло, що для світла, яке цілковито поглинається усередині цього шару (за довжини хвилі до 0,6 мкм), внутрішній квантовий вихід буде майже стовідсотковим, оскільки миттєво відбувається розділення електронно-діркових пар електричним полем. Для довших хвиль значна частка фотонів поглинається в нейтральній підкладці, звідкіля носії можуть потрапити в потенціальні ями тільки завдяки тепловій дифузії – на що шансів настільки менше, наскільки глибше народився кожен конкретний електрон. Необхідно врахувати, що підкладка за своїми властивостями неоднорідна. Зокрема, практично всі західні прилади виготовляють на епітаксійних підкладках з товщиною епітаксійного шару 10–12 мкм, а російські

ПЗЗ – на підкладках із внутрішнім гетеруванням (це спеціальний процес, за якого дефекти кристалічних ґраток заганняють всередину підкладки, отож поверхневий шар товщиною близько 20 мкм стає вільним від дефектів). В обох цих випадках час життя вільних носіїв поза поверхневим шаром надзвичайно малий, і вони не встигають потрапити в потенціальні ями. Це ще більше знижує внутрішній квантовий вихід ПЗЗ для довгохвильової ділянки спектра.

Для дуже коротких довжин хвиль (менше 270 нм) енергія фотонів достатня для генерації двох електронно-діркових пар, отож для них внутрішній квантовий вихід, на перший погляд, може перевищувати 100 %. На жаль, немає у світі досконалості, і границя розділення оксид-кремній – яскравий тому приклад. На коротких довжинах хвиль коефіцієнт поглинання настільки великий, а довжина поглинання настільки мала, що стає суттєвим внесок поверхневої рекомбінації: щойно народжені пари встигають рекомбінувати, хоча не встигають розділитися. Отож в області коротких довжин хвиль внутрішній квантовий вихід теж падає, хоча й не до нуля.

Тепер розглянемо пропускання світла електродною структурою. Як бачимо з рис. 4.14, де схематично зображено перетин ПЗЗ, світло, потрапляючи в напівпровідник, проходить через кілька шарів з різними оптичними характеристиками, отож неминучою є його інтерференція, оскільки товщина цих шарів порівнянна з довжиною хвилі. І дійсно, СХ ПЗЗ має тонку структуру. Далі, полікристалічний кремній, з якого виготовлені електроди, зовсім непрозорий в області довжин хвиль до 430-450 нм (синій і фіолетовий кольори). У результаті СХ звичайного трифазного ПЗЗ із полікремнієвими затворами виглядає так, як зображено на рис. 4.15 червоною лінією.

Використання фотодіодів у матрицях МП і СКП значно покращує СХ ПЗЗ, передусім у короткохвильовій частині спектра, оскільки усуваються проблеми з електродами. Саме ця обставина дає змогу таким приладам успішно працювати в побутових камерах кольорового телебачення. У камерах прикладного та наукового напрямів, де домінують усе-таки прилади з КП, застосовують зовсім інші підходи.

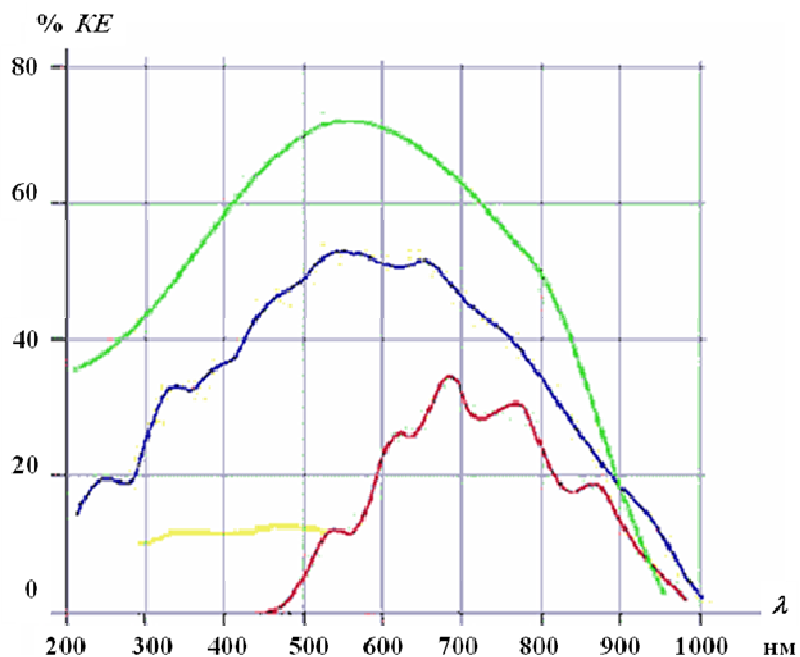


Рис. 4.15. Спектральні характеристики абсолютного квантового виходу: звичайного ПЗЗ (червоний), ПЗЗ із люмінофорним покриттям (жовтий), з освітленням зі зворотного боку підкладки (зелений) і з віртуальною фазою (синій) [42]

Найпростіший – нанесення люмінофора, спеціальної речовини, прозорої для довгих хвиль, яка перетворює короткохвильове світло у кванти з більшою довжиною хвилі. Цей прийом дає змогу розширити СХ ПЗЗ у синю та УФ області спектра (на рис. 4.15 подано жовтим кольором), не змінюючи, утім, середньо- і довгохвильової частини СХ. Однак під час застосувань, насамперед в астрономії, потрібне глибоке охолодження приладів, яке люмінофорне покриття не витримує.

Другий спосіб, доволі трудомісткий і вартісний, дає змогу досягнути фантастичних результатів. Полягає він у тому, що кристал ПЗЗ, уже після виготовлення, зменшується до товщини 10 мкм і менше (і це за розміру кристала в кілька сантиметрів!), а світло падає на спеціальним чином оброблений зворотний бік підкладки (рис. 4.16). За настільки тонкої підкладки носії встигають досягти потенціальних ям (нагадаємо, що вони мають глибину до 5 мкм), а цілковита відсутність електродів гарантує, що практично усе світло, за винятком втрат на відбивання, проникає у кремній. Квантова ефективність таких матриць (зелена крива на рис. 4.15) досягає іноді 90 %, а спектральний діапазон становить від 180 до 950 нм. Саме такі матриці,

незважаючи на значну вартість, застосовують здебільшого у серйозних астрономічних проектах, таких як космічний телескоп «Хаббл» або Південна Європейська Обсерваторія в Чилі з 8-ма телескопами.

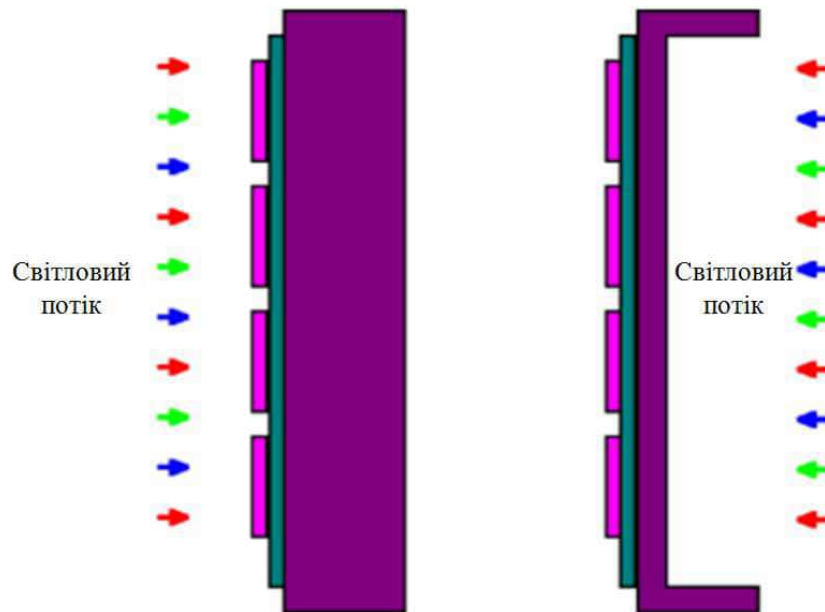


Рис. 4.16. Метод зворотного засвічення ПЗЗ з метою покращення спектральних характеристик [45]

Третій спосіб покращення спектральних характеристик ПЗЗ – *віртуальна фаза*. Спосіб запропонований 1980 року Ярославом Хінечеком, який у той час працював у фірмі *Texas Instruments*, для американського проекту *Galileo* із запуску космічного апарата до Юпітера. Викладемо суть цього способу: один з електродів звичайного ПЗЗ замінюють на тонкий шар *n*-типу (віртуальний затвор) безпосередньо на поверхні кремнію, замкнутий на стоп-канали (Хінечек модифікував двофазний ПЗЗ, хоча сьогодні використовують ПЗЗ із віртуальною фазою, отримані зі звичайних трифазних – див. рис. 4.14, б). Доза каналу під віртуальним затвором більша, порівняно з тактовими затворами. Нагадаємо інформацію про ПЗЗ із прихованим каналом стосовно фіксації поверхневого потенціалу та залежності глибини потенціальної ями від дози легування каналу. Структура з віртуальним затвором, замкненим на підкладку, з точки зору каналу перенесення, не відрізняється від стану фіксації у звичайному ПЗЗ із прихованим каналом. Якщо ж обрати дозу легування каналу в області віртуальної ями належним чином, то потенціал каналу у ньому

буде середнім між ямою та бар'єром під тактовими електродами, отож умови для тактованого перенесення заряду зберігаються.

Переваги такої структури безперечні. Порівняно зі звичайними ПЗЗ, у ній майже половина площі комірки є вільною від полікремнію, звідси висока чутливість у синій та УФ областях спектра – теоретично навіть і до м'якого рентгену (крива синього кольору на рис. 4.15). Загалом досягають її за освітлення з фронтального боку підкладки, що позитивно позначається на їхній вартості.

Поговорімо про такий параметр ПЗЗ як *антиблумінг*, або стійкість до локальних переосвітлень. Що ж відбуватиметься у комірці ПЗЗ, якщо заряд у ній постійно зростатиме? Зі зростанням сигнального заряду в потенціальній ямі потенціал каналу в ній зменшується: коли він досягне значення потенціалу в каналі під сусіднім електродом, заряд просто почне переміщатися через цю незамкнену ділянку каналу в сусідній елемент – причому в обидва боки. На зображенні це проявлятиметься як вертикальне розмивання яскравих деталей зображення. Власне це явище називають оптичним переосвітленням (англ. *blooming*), і якщо в системах реєстрації слабких сигналів з ним ще можна погоджуватися (оскільки невисока імовірність зіштовхнутися з ним, а час накопичення можна змінити), то в камерах для телебачення воно зовсім неприпустиме.

Усунути переосвітлення можна тільки завдяки розробкам спеціальних конструкцій комірки. Перший спосіб (*горизонтальний антиблумінг*, так званий боковий дренаж – *Lateral Overflow Drain, LOD*) полягає в тому, що уздовж кожного стовпця фоточутливих комірок прокладається вузька витокова область, що знаходиться під великим позитивним потенціалом і відділена від накопичувального сигнального заряду потенціальної ями деяким бар'єром, потенціал каналу в якому (іноді керований окремим затвором) вищий, ніж у замкненому каналі, що відокремлює комірки одну від іншої (рис. 4.17). У цьому випадку надлишковий заряд переміщатиметься у стік, і перекручування сигналу в сусідніх елементах не виникатиме. Використання спеціального затвора керування антиблумінгом даватиме змогу примусово очистити заряд з

накопичувальної комірки навіть без її переповнення, що називають *електронним регулюванням експозиції*.

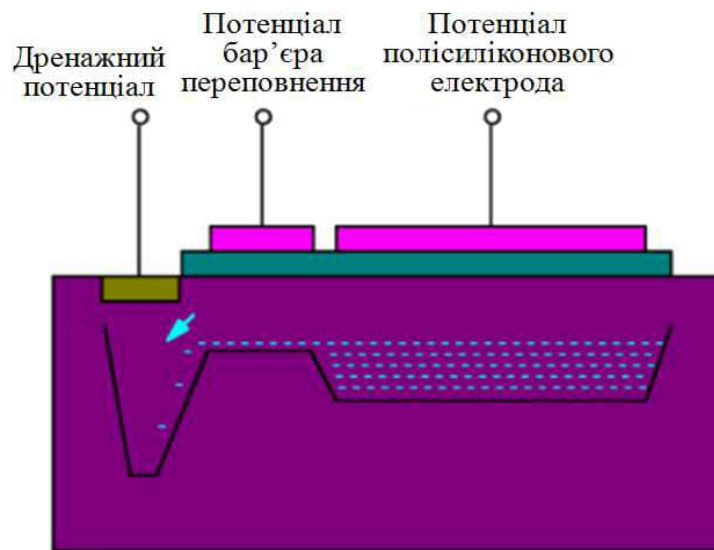


Рис. 4.17. Боковий електронний дренаж [45]

Унаслідок горизонтального антиблумінгу виникає деяке зниження коефіцієнта заповнення (область стоку, зрозуміло, не може вплинути на сигнал), а також збільшення розмірів комірки, що для приладів з малим розміром комірки неприйнятне. У матрицях для телебачення, де розмір комірки, зазвичай, не перевищує 10 мкм, для боротьби з блумінгом використовують інший, доволі витончений спосіб – *вертикальний антиблумінг* (так званий вертикальний дренаж – *Vertical Overflow Drain, VOD*). У цьому випадку стокова область розташована не поруч, а під накопичувальною коміркою, отже, збільшення площі комірки не потрібне (рис. 4.18). Комірка тут не має структури p^+-n , як у звичайному прихованому каналі, а p^+-n-p^- , причому середній n -шар слугує «підкладкою», а власне p^- -підкладка – стоком антиблумінгу. За відсутності заряду вертикальний розподіл потенціалу в такій структурі у випадку східчастої апроксимації розподілу домішок за глибиною буде параболічно-параболічно-кусково-параболічним з одним максимумом і одним мінімумом потенціалу, а завдяки правильному вибору параметрів легування шарів (за ретельного їхнього дотримання в процесі виготовлення!) надлишковий заряд із комірки зміщатиметься не вбік, а вниз. Як наслідок, окрім складної технології, структура відрізнятиметься сильним спадом ІЧ

чутливості приладу (нагадаємо, що велика частина ІЧ фотонів поглинається на значній глибині від поверхні) та деяким спадом у червоній області, хоча й прийнятним. Втрата ІЧ чутливості для приладів кольорового телебачення, насправді, не надто важлива.

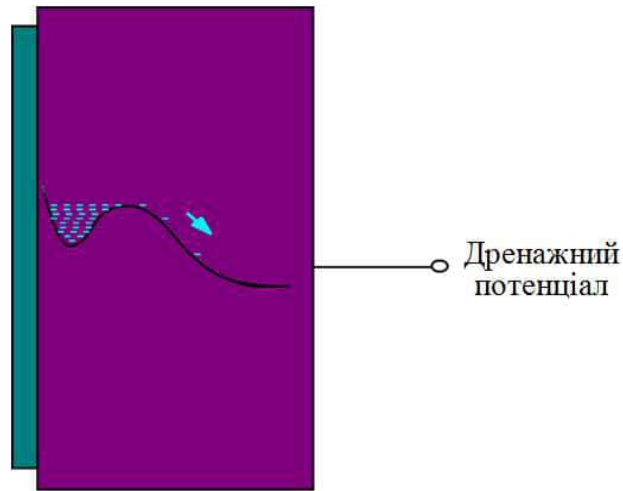


Рис. 4.18. Вертикальний електронний дренаж [45]

ПЗЗ сьогодні не досягли досконалості, хоча за минулі роки в технології їхнього виготовлення досягли приголомшливого прогресу. Діапазон приладів, які виробляють, охоплює як мініатюрні матриці з кроком елементів приблизно 3×5 мкм (одна з останніх розробок *Sony*), так і гігантські кристали форматом $5\,000 \times 5\,000$ елементів і розміром кристала майже 8×8 см (фірма *DALSA*, Канада). Передбачають появу однокристалічних приладів форматом $8\,000 \times 8\,000$ елементів і більше, проте сьогодні прилади надвеликого формату збирають з двох або чотирьох окремих кристалів, які монтують на загальній основі.

Найширше застосовують ПЗЗ-фотоприймачі у різноманітних сканерах (ручних, листових, планшетних), цифрових фотоапаратах та інших пристроях оцифровування зображень (слайдах-сканерах, телефаксах тощо) та у телевізійній техніці. Знайшли широке застосування і лінійки ПЗЗ – як для зчитування одновимірних зображень (наприклад, штрих-кодів), так і в системах, де використовують механічне розгортання за однією координатою. Можливе застосування – системи спостереження за земною поверхнею з космічних апаратів або літаків, де використовують рух самого апарата відносно

Землі. Зазвичай, накопичувальними елементами у ПЗЗ-лінійках є фотодіоди; по обидва боки від лінійки накопичувальних елементів розташовують регістри зчитування (відповідно для парних і непарних елементів – білінійна організація). Номенклатура лінійок, які сьогодні продукують, доволі широка, а кількість фоточутливих елементів коливається від 1 024 до 16 384 і з кожним роком збільшується.

4.5. КМОН-фотоприймачі

Здебільшого у сучасних мікросхемах (цифрових та аналогових), у тім числі фотоприймальних, використовують так званий *польовий (метал–оксид–напівпровідник (МОН) чи метал–діелектрик–напівпровідник (МДН)) транзистор*, який дещо відрізняється від винайденого раніше біполярного транзистора. Якщо два-три десятки років тому мікроелектроніка рівною мірою використовувала і польові, і біполярні транзистори (останні переважали у швидкодіючій та аналоговій підсилювальній схемах, тоді як перші – у деяких цифрових і енергоекономічних), то швидкий прогрес у науці й технології дав змогу польовим транзисторам витіснити біполярні майже звідусіль. Отож не шукатимемо відмінностей між біполярним транзистором та польовим, а розглянемо останній як основу сучасної та майбутньої технології виробництва мікросхем.

Базова структура МОН-транзистора, запропонована ще 1960 року, залишається практично незмінною і сьогодні. На гладкій поверхні підкладки з напівпровідника кремнію (Si) формується тонкий шар оксиду кремнію (SiO₂), на який осаджують метал (або інший матеріал, який добре проводить струм). І вона не надто відрізняється від використовуваної у сучасних мікросхемах. Спочатку в тонкому поверхневому шарі підкладки з монокристала кремнію формують дві області, які не перекриваються, з підвищеною електропровідністю (малим опором електричному струмові) – так звані *витік і стік*. Проміжок між ними називають *каналом*, і це – найважливіша частина транзистора, оскільки саме нею протікає робочий струм транзистора. Зверху на

канал наносять найтонший шар ($\sim 0,1$ мкм) оксиду кремнію (або іншого діелектрика), при цьому області витоку і стоку залишаються відкритими. Нарешті, на оксид напилують добре провідний матеріал (умовно назвемо його металом), що називають *затвором* (а оксид під ним – відповідно, *підзатворним діелектриком*). Транзистор готовий, і залишається тільки підвести (напилити) провідники (мідь, алюміній або золото) до областей стоку, витоку і затвора, з'єднати цими провідниками (доріжками або міжз'єднаннями) потрібні транзистори, розташовані на поверхні того ж кристала, і покрити всю структуру товстим шаром діелектрика для захисту від зовнішніх впливів (рис. 4.19, а).

Типову структуру польового транзистора з ізолюваним затвором наведено на рис. 4.19, б. У процесі роботи одну з *n*-областей з'єднують з негативним полюсом джерела напруги. Саме її називають «*витоком*». Другу *n*-область з'єднують з позитивним полюсом і називають «*стоком*».

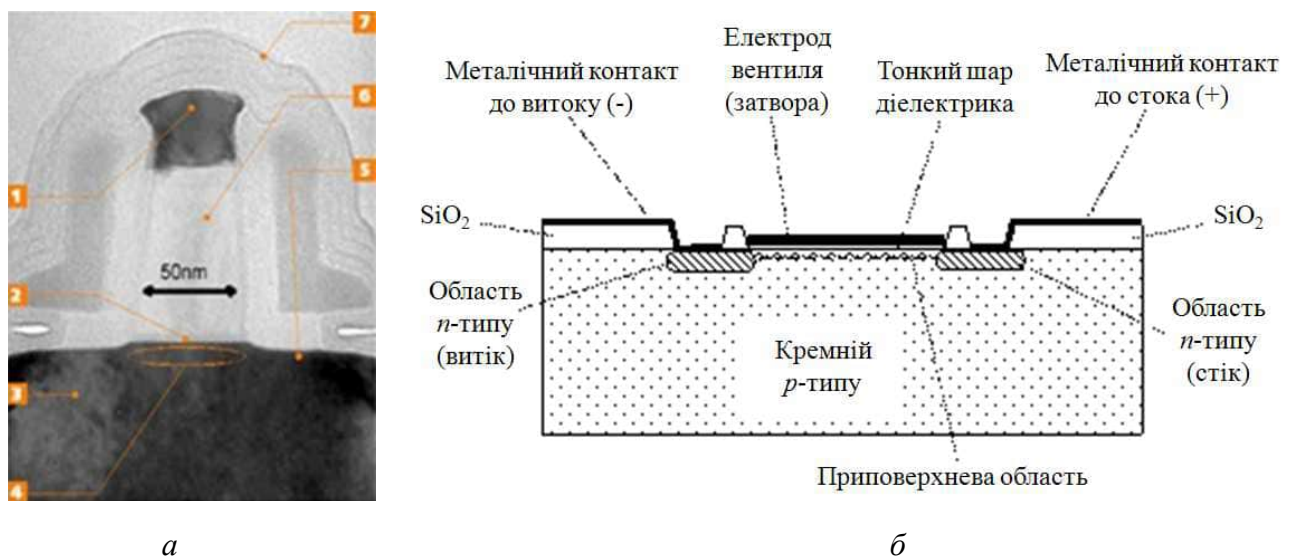


Рис. 4.19. Сучасний МОН-транзистор, виготовлений за технологією 90 нм: а – перетин (1 – електрод затвора; 2 – тонкий шар діелектрика; 3 – витокова область; 4 – область приповерхневого каналу; 5 – стокова область; 6 – полікремнієвий затвор; 7 – пасивувальний шар); б – спрощена схема [1]

За відсутності в тонкому шарі діелектрика електричного поля, струм між стоком і витоком практично рівний нулю завдяки наявності *p-n*-переходу, зміщеного у зворотному напрямі. Електрод затвора, тонкий шар діелектрика і кремній *p*-типу у вертикальному розрізі утворюють структуру *метал – діелектрик – напівпровідник*.

Якщо на електроді затвора з'являються позитивні електричні заряди, то в тонкому шарі діелектрика та у приповерхневій області кремнію виникає електричне поле. Вільні електрони провідності кремнію під дією цього поля притягуються до діелектрика, змінюючи об'ємний електричний заряд приповерхневої області. Якщо напруга на МДН структурі досягає певного порогового рівня, то відбувається інверсія електропровідності кремнію в приповерхневій області, внаслідок чого тут формується тонкий канал n -типу провідності. Його називають «індукованим» каналом. Через цей канал від витоку до стоку може протікати електричний струм: МДН транзистор «відкривається». За подальшого зростання напруги на МДН структурі канал розширюється, його опір зменшується, а електричний струм між виток і стоком зростає. Металічний електрод цієї структури саме тому називають «вентилем» або «затвором», що з його допомогою, використовуючи зовсім незначну потужність, можна керувати значно потужнішим електричним струмом від витоку до стоку.

МДН транзистори вищеописаної структури називають n -канальними. На поверхні напівпровідника n -типу можна створити аналогічну структуру, сформувавши приповерхневі області p -типу. Утворений польовий транзистор буде p -канальним.

Одна з найрозповсюдженіших сьогодні технологій виготовлення мікросхем дає змогу водночас формувати на поверхні кремнію як n -канальні, так і p -канальні транзистори. Таку технологію називають КМОН (КМДН) технологією (англ. *CMOS – complementary metal-oxide-semiconductor*), де літера «К» є скороченням від слова «комплементарний» (взаємодоповнюючий). Мікросхеми, утворені з комплементарних n -канальних і p -канальних транзисторів, виявились надзвичайно економними. З їхньою допомогою вдалось сумістити мале споживання потужності з високою швидкодією та з надмалими розмірами елементів. А це дало змогу створити *надвеликі інтегральні схеми* (НВІС) з рівнем інтегрування порядку мільйона елементів на одному кристалі.

З описаної вище фізики роботи польового транзистора бачимо, що його можна використовувати як елемент, чутливий до змін електричного заряду чи потенціалу на вентильному електроді (затворі). Останні можуть бути обумовлені впливом різних зовнішніх чинників, котрі необхідно контролювати. Це можуть бути, наприклад, хімічні зміни у речовині, нанесеній на вентильний електрод, чи зміни електрохімічного потенціалу.

Якщо на поверхні кремнію поряд чи над МДН транзистором сформувати фотодіод, то утворюється транзисторна структура, чутлива до зовнішнього світла (*пасивна комірка фотодіодного типу* – запропонована 1967 р.). Найчастіше її використовують за схемою, що на рис. 4.20.

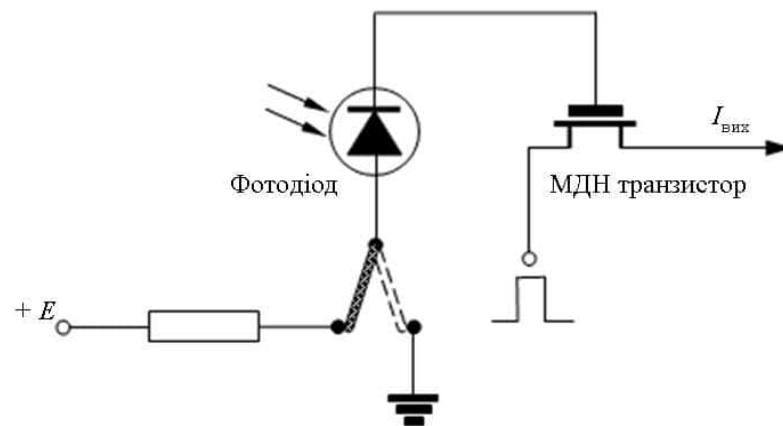


Рис. 4.20. Схема функціонування фоточутливого елемента з фотодіода і МДН транзистора [1]

Перед початком роботи анод фотодіода під'єднують до джерела напруги $+E$. Конденсатор, утворений МДН структурою, тобто затвором, тонким шаром діелектрика та основою з кремнію, заряджається до цієї напруги. Коли анод фотодіода перемикають на «землю», фотодіод запирається, електричний струм через нього не тече, отож електричний заряд, накопичений на затворі, за відсутності світла може зберігатися тривалий час. Якщо фотодіод засвітити, то в ньому з'явиться фотострум, і частина електричного заряду стікатиме з вентильного електрода на «землю». Чим більша світлова «експозиція», тобто добуток світлового потоку на час освітлення, тим більша частина початкового електричного заряду стікає і тим меншим стає потенціал вентильного електрода.

З таких фоточутливих елементів на поверхні кремнію можна сформувати цілу матрицю. Для почергового зчитування з фоточутливих елементів інформації про отриману ними світлову експозицію необхідно у кожен з них вбудувати транзисторний ключ. Тоді можна організувати процес почергового зчитування інформації за часом, відкриваючи ключ лише у потрібний момент, коли черга підійшла до відповідного чутливого елементу. КМДН технологія дає змогу сформувати потрібні ключі також у вигляді МДН транзисторів. Отож кожен елемент найпростішої світлочутливої КМДН матриці для сприйняття чорно-білих зображень складається з одного фотодіода і двох МДН транзисторів (рис. 4.21). МДН транзистор, до затвора якого приєднаний фотодіод, називатимемо «чутливим».

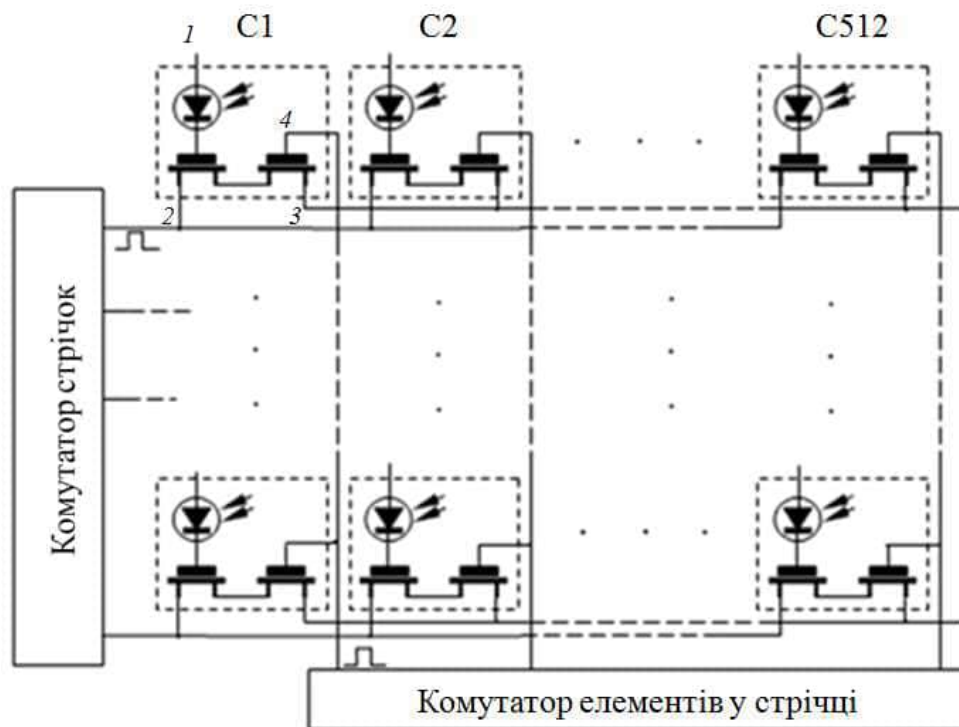


Рис. 4.21. Схема організації зчитування інформації з найпростішої чорно-білої світлочутливої МДН матриці [1]

Окремі комірки *світлочутливої матриці* на рис. 4.21 позначено штриховими прямокутними рамками. У лівій верхній комірці виводи пронумеровано. Виводи 1 усіх елементів з'єднуються з комутатором режиму, який для спрощення на рис. 4.21 не показано. Виводи 2 усіх елементів у стрічці матриці з'єднують з горизонтальною шиною, під'єднаною до відповідного

виходу комутатора рядків. Виводи 3 усіх елементів з'єднані зі спільним «відеовиходом» матриці. Його на рис. 4.2 також не показано. Виводи 4 усіх елементів, розташованих в одному і тому ж стовпці матриці, з'єднано із відповідною вертикальною шиною, підключеною до відповідного виходу комутатора елементів у стрічці.

Опишемо роботу схеми. На самому початку комутатор режиму роботи подає на аноди усіх фотодіодів напругу $+E$. Це – режим підготовки до експозиції, під час якого на затворах МДН транзисторів накопичується позитивний електричний заряд. У режимі експозиції цей комутатор перемикає аноди фотодіодів на «землю». На матрицю з допомогою високоякісного об'єктива проєктують зображення, яке потрібно сприйняти і перетворити в інформаційний відеосигнал. Під дією світла у фотодіодах протікає струм, і частина електричного заряду стікає на «землю». Із закінченням часу експозиції комутатор від'єднує аноди фотодіодів від «землі», і струм через ізольовані фотодіоди припиняється, навіть якщо на них продовжує діяти світло.

У режимі зчитування відеосигналу комутатор стрічок подає негативний імпульс напруги на витоки чутливих МДН транзисторів першої стрічки матриці, а комутатор елементів у стрічці подає негативний імпульс напруги спочатку на свій перший вихід. Внаслідок цього ключові МДН транзистори 1-го стовпця матриці (C1) привідкриваються. На відеовихід матриці у цьому випадку може витікати струм зчитування лише з 1-го елементу 1-ої стрічки. У наступному такті комутатор елементів у стрічці подає негативний імпульс напруги на свій 2-й вихід, внаслідок чого ключові МДН транзистори 1-го стовпця матриці закриваються, а в 2-му стовпці (C2) – відкриваються. На відеовихід матриці тепер витікає струм зчитування лише з 2-го елементу 1-ої стрічки. У наступних тактах аналогічно «знімаються» струми зчитування послідовно з 3-го, 4-го і т. д. елементів 1-ої стрічки. Після того, як «знято» струм зчитування з останнього елементу 1-ої стрічки, комутатор стрічок подає негативний імпульс напруги на витоки чутливих МДН транзисторів 2-ої стрічки матриці, а комутатор елементів у стрічці подає негативний імпульс напруги знову на 1-й свій вихід. На відеовихід матриці витікає струм

зчитування з 1-го елемента 2-ої стрічки. У наступних тактах комутатор елементів у стрічці подає негативний імпульс напруги по чергово на усі свої виходи, внаслідок чого зчитується інформація з усієї 2-ої стрічки матриці. Отож стрічка за стрічкою зчитується інформація про все зображення.

На цьому прикладі можна побачити, як саме спостережуваний стан контрольованого об'єкта перетворюється у складний інформаційний сигнал. Нічого таємничого в цьому немає. Реальний об'єкт спочатку з допомогою фотооб'єктива проектується у зображення на матриці чутливих елементів. А ланцюжок певним чином організованих електричних процесів зумовлює вироблення відповідно організованої послідовності електричних сигналів, яка однозначно описує це зображення і дає змогу відтворити його на екрані дисплея.

Щоб матриця сприймала кольорові зображення, структура кожного її елемента («пікселя») повинна бути значно складнішою. Як відомо, людина сприймає світ різнокольоровим тому, що має в сітківці ока 3 різновиди світлових рецепторів – «колбочок» – з різною спектральною чутливістю. Одні з них найчутливіші до червоного, другі – до жовто-зеленого, треті – до синього світла. І будь-який з мільйонів розрізнимих людиною кольорових відтінків складається з комбінації сприйняття цих трьох кольорів. Розробники кольорових світлочутливих матриць використали цей «винахід» живої природи.

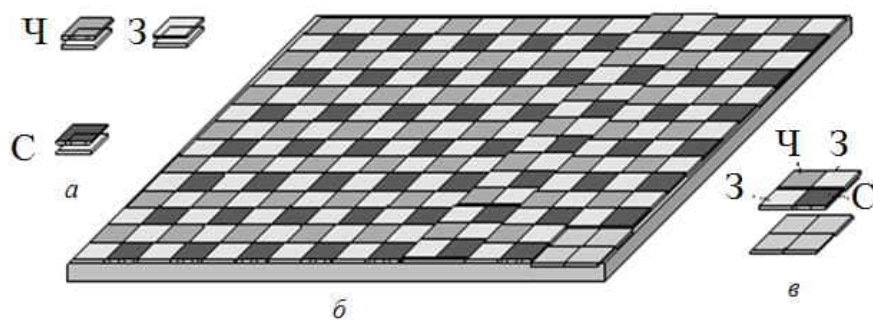


Рис. 4.22. Пояснення конструкції кольорової світлочутливої матриці [1]

На рис. 4.22, а зображено три «пакетика», які складаються з фотодіода й відповідного кольорового світлофільтра. Завдяки світлофільтрам, один з фотодіодів стає чутливим тільки до червоного, другий – до жовто-зеленого, третій – до синього світла. З таких «пакетиків» складається матриця, зображена

на рис. 4.22, б. Кожен піксель такої матриці складається з 4-х світлочутливих елементів трьох типів, як проілюстровано на рис. 4.22, в. Один з них чутливий до червоного світла, два – до жовто-зеленого, ще один – до синього.

Типову електричну схему одного пікселя матриці подано на рис. 4.23. Аноди усіх 4-х фотодіодів з'єднані з виводом 2. Катоди двох «зелених» фотодіодів з'єднані із затвором чутливого транзистора T_1 , катод «червоного» фотодіода – із затвором чутливого транзистора T_2 , катод «синього» фотодіода – із затвором чутливого транзистора T_3 . МДН транзистори T_4 , T_5 , T_6 , затвори котрих з'єднані з виводами 3, 4 і 5, є ключами, які сприяють почерговому зчитуванню інформації з комірок різного кольору. Вони керуються сигналами від комутатора кольору. Фотоструми з їхніх стоків стікаються до витoku МДН транзистора T_7 . Він керований від комутатора стовпців і є ключовим транзистором, який дає змогу організувати зчитування інформації з цього пікселя лише тоді, коли до нього доходить черга. Отже, типовий піксель кольорової світлочутливої КМДН матриці складається з 4-х фотодіодів, 4-х кольорових світлофільтрів і 7-ми транзисторів.

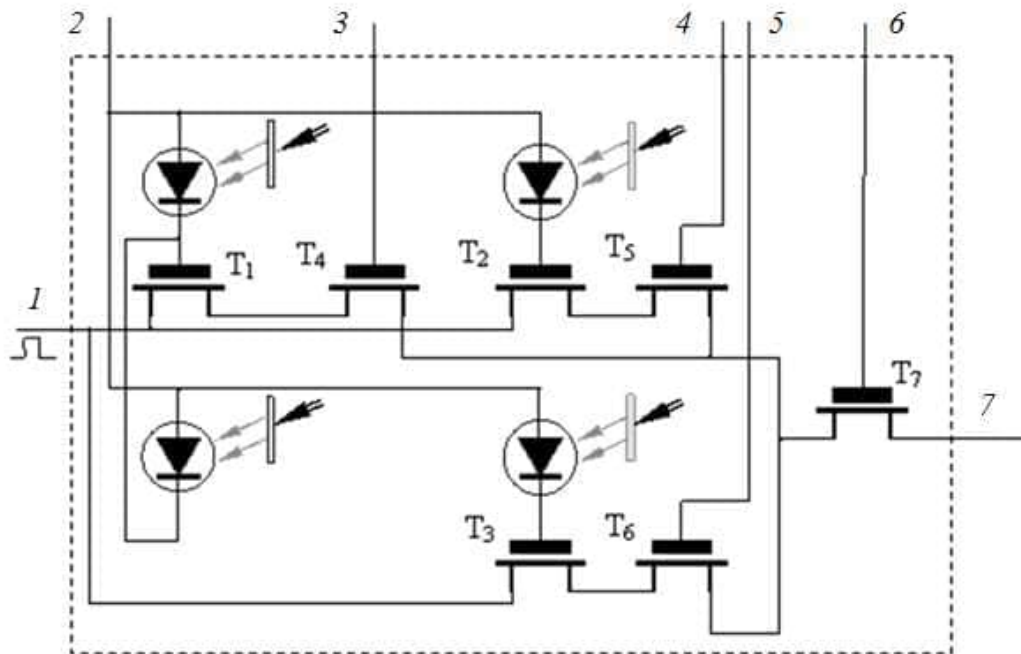


Рис. 4.23. Електрична схема одного пікселя кольорової світлочутливої матриці [1]

Фотодіоди та МДН транзистори разом із системою з'єднувальних провідників, комутаторами і підсилювачем вихідного сигналу формують на

одній пластині кремнію. Плівку з набором кольорових світлофільтрів накладають зверху [28].

На рис. 4.24 подано зовнішній вигляд однієї з сучасних мегапіксельних кольорових світлочутливих КМДН матриць типу MT9M413C36STC фірми *Micron Technology Inc.* Вона складається з 1280×1024 кольорових пікселів розміром 12×12 мкм кожен. Робочий розмір кадру $15,36 \times 12,29$ мм. Матриця може працювати на тактовій частоті 66 МГц від джерела напруги +3,3 В за температури навколишнього середовища від -5°C до $+60^\circ\text{C}$. Для підвищення швидкодії 1280 стрічок розбиті на 10 секцій, інформацію з яких зчитують паралельно через 10 портів. Тактовий генератор і схеми керування зчитуванням інформації інтегровані на тому ж кристалі, що й матриця. За частоти зчитування 60 кадрів/с схема споживає потужність до 150 мВт. Допустима також швидкість зчитування до 500 кадрів/с; споживана потужність зростає у цьому випадку до 500 мВт [51].

Це, як і розумні швидкодіючі мікрокомп'ютери, є справжнім витвором сучасних високих технологій.

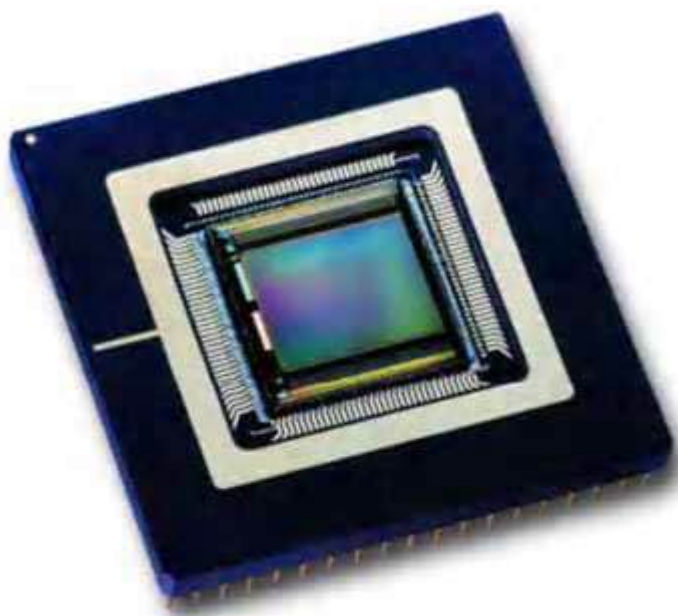


Рис. 4.24. Вигляд кольорового матричного фотосенсора КМОН типу MT9M413C36STC [1]

Фірма *IBM* повідомила про співробітництво з фірмою *Kodak* для сумісної розробки і випуску вже 3- і 5-мегапіксельних світлочутливих

кольорових КМОН матриць на основі технологічного КМОН процесу з розділенням 0,18 мкм і з формуванням на поверхні кремнію мідних провідників. Складний багатошаровий пакет мідних провідників отримують приблизно на третину тоншим, ніж за використання традиційних алюмінієвих провідників. Нова технологія дає змогу формувати світлочутливі матриці з високою точністю передавання кольору, з незначними шумами, здатні працювати і в умовах недостатньої освітленості.

Розробники американської компанії *Foveon* запропонували іншу цікаву технологію виготовлення кольорових світлочутливих КМОН матриць [31; 52]. Вона базується на тому, що кремній поглинає видиме світло тим сильніше, чим коротша довжина його хвилі. Отож синє світло з найкоротшими довжинами хвиль поглинається уже тонким шаром поблизу поверхні кремнію, жовто-зелене проникає дещо глибше, і ще глибше проникає червоне світло. Розробники компанії *Foveon*, використовуючи епітаксійне нарощування шарів кремнію, розмістили кремнієві фотодіоди на трьох рівнях. Найнижчий з них знаходиться на глибині проникнення червоного світла, середній – на глибині проникнення жовто-зеленого, верхній – на глибині проникнення синього світла (рис. 4.25). Розділення світла за кольором відбувається природним шляхом. Завдяки цьому зникає необхідність у застосуванні складного кольорового світлофільтра з мільйонів елементів, виготовлення котрого вимагає до 24-х окремих технологічних операцій. Це значно здешевило виробництво кольорових світлочутливих матриць. Помітно зменшилась також і площа, яку займає кожен піксель на кристалі, завдяки чому підвищилась роздільна здатність матриці.

У співпраці з компанією *National Semiconductor* фірма *Foveon* на основі 0,18-мікронної КМДН технології організувала масове виробництво $X3$ матриць (так називають матриці описаного вище типу) у двох варіантах. Одна – це 1,3-мегапіксельна $X3$ матриця, яка має таку ж роздільну здатність, як нинішні 2-мегапіксельні звичайні матриці, а друга – 3,5-мегапіксельна $X3$ матриця для особливо високоякісної, а, отже, дороговартісної відеотехніки.

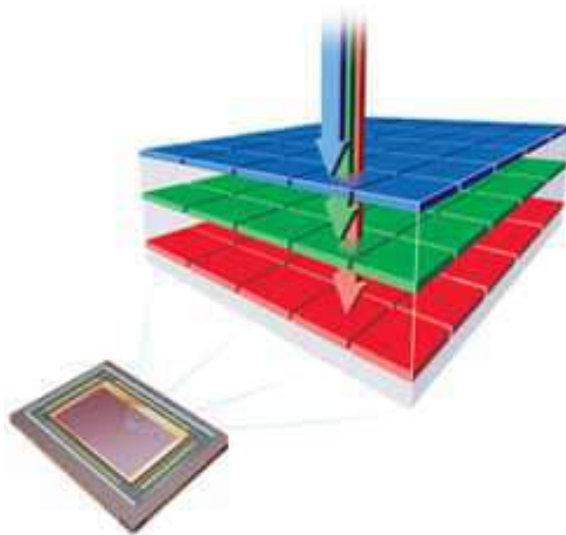


Рис. 4.25. Розділення білого світла на кольори відповідно до технології X3 фірми Foveon [52]

Перші серійні випуски КМОН-сенсорів показали дуже хороші результати. Їхня вартість була суттєво нижчою, ніж у ПЗЗ, а можливості – значно більшими. Адже камери на ПЗЗ містили чимало додаткових мікросхем керування, перетворення рівнів сигналів, живлення, *аналого-цифрових перетворювачів* (АЦП). До того ж, електроніка для камери з ПЗЗ розміщала на платі, часто і не однієї, а в КМОН усе це уміщалося на єдиному кристалі усередині мікросхеми. Сьогодні розроблено навіть одночипову фотокамеру для мобільного телефону, де на мікросхемі встановлений також об'єктив.

Менша вартість і можливість інтеграції на одному чіпі всієї необхідної електроніки – досі головні переваги КМОН. Однак за технічними параметрами вони поступаються камерам на ПЗЗ. Головна причина полягала в тому, що транзистори, перетворювач і шини зменшили корисну площу збору фотонів у пікселі. Параметр *Fill Factory (FF)* характеризує відношення корисної (світлочутливої) площі до загальної площі пікселя. У перших КМОН цей параметр не перевищував 10–15 %, а сьогодні сягає 30 % і більше.

Перші КМОН-сенсори мали значно більший шум. У ПЗЗ перетворення заряду в напругу здійснює один транзистор, а в КМОН їх, як мінімум, стільки, скільки і пікселів. Однак і за сучасного рівня технології нереально зробити цілком однаковими кілька мільйонів транзисторів, а розкид їхніх параметрів

спричиняє підвищення відмінностей рівнів вихідних сигналів з різних пікселів. Цей вид шуму називають *Fixed Pattern Noise (FPN)*; зазвичай, він доволі помітний, хоча з'явилися розробки, які дають змогу істотно його зменшити. Зокрема, завдяки попередньому високошвидкісному опитуванню комірок матриці та усуванню фонових збурень із загального сигналу, перша масова дзеркальна фотокамера з КМОН-сенсором *Canon EOS-D30* (2000 рік) мала шуми практично на рівні з кращими ПЗЗ, на той момент — камерою *Nikon D1*.

Розміщення АЦП на тому ж кристалі, що й сенсора, дає багато переваг. Однак вимоги до нього доволі високі: він повинен встигати перетворити сигнал за час зчитування пікселя. З'явилася ідея використовувати декілька АЦП, кожен з яких працює на свій стовпець. Цю технологію іноді називають *активним стовпцем ACS (Active Column Sensor)*. При цьому вимоги до швидкості роботи кожного АЦП знижуються, проте загальна швидкість зчитування зростає, оскільки перетворення з груп пікселів відбувається паралельно.

Подальший розвиток КМОН-сенсорів припускає загалом встановлення АЦП у кожному пікселі. Таку концепцію називають *цифровим пікселем DPS (Digital Pixel Sensor)*. Ця технологія, розроблена компанією *Stanford Programmable Digital Group (PDG)*, вже одержала дуже хороші результати. Пробний зразок КМОН з *DPS*, виготовлений кілька років назад (матриця 1110×288 елементів з пікселем розміром $9,4 \text{ мкм}$), мав швидкість зчитування 10 тис. кадрів у секунду або 1 Гпкс./с. Отож у швидкісній кінозйомці майбутнє буде за КМОН-сенсорами.

Зупинімося далі на архітектурі КМОН-сенсорів. Сенсори зображень, побудовані на базі структур КМОН, виконують більше функцій на мікросхемі, ніж ПЗЗ-матриці. Крім генерування електронів провідності під дією падаючого світла і їхнього перенесення, КМОН-сенсори можуть також здійснювати обробку зображень, виділення контурів, здатні знижувати рівень шуму і здійснювати перетворення *аналог—код*. Однак найпривабливіша їхня особливість – можливість програмування різних функцій. Це дає змогу робити КМОН-пристрої дуже гнучкими. Така інтеграція функцій на одному чіпі є

найбільшою перевагою КМОН над ПЗЗ. Настільки високий ступінь інтеграції не вимагає установки в цифрових фотокамерах додаткових чіпів, наприклад процесора цифрової обробки сигналів і АЦП. Окрім того, оскільки КМОН-пристрої споживають менше енергії, ніж ПЗЗ, вони не так нагріваються, а, отже, мають нижчий рівень теплових шумів.

Переворот у технології КМОН-сенсорів відбувся, як уже зазначено, на початку 90-х років XX ст., коли в лабораторії реактивного руху (*Jet Propulsion Laboratory JPL*) NASA (США) успішно реалізували сенсори на активних пікселях *Active Pixel Sensors (APS)*. Теоретичні дослідження виконали ще кілька десятиліть років тому, проте практичне використання активного сенсора відтермінували до 1993 р. *APS* додає до кожного пікселя транзисторний підсилювач для зчитування, що дає змогу перетворювати заряд у напругу безпосередньо в пікселі. Це забезпечило також довільний доступ до фотодетекторів. За допомогою механізму довільного доступу можна виконувати зчитування обраних груп пікселів. Цю операцію назвали *кадровим зчитуванням (windowing readout)*. Кадрування дає змогу зменшити розмір захопленого зображення і потенційно збільшити швидкість зчитування, порівняно з ПЗЗ-сенсорами, оскільки в останніх необхідно поступово зчитувати всю інформацію. Окрім того, додатково до підсилювача усередині пікселя підсилювальні схеми можна розміщувати в будь-якому місці по колу (за проходженням сигналу). Це дає змогу створювати підсилювальні каскади і підвищувати чутливість в умовах гіршого освітлення. Можливе встановлення окремих підсилювачів для кожного кольору, що покращує, зокрема, балансування білого. Однак усі додаткові кола традиційно спричиняють у КМОН-сенсорів виникнення таких труднощів, як високий рівень шуму, струм витоку і залишковий заряд. Ці недоліки частково компенсують за допомогою додаткових схем, усуваючи темновий струм і зменшуючи внесені ним перешкоди. Не дивно, що за таких можливостей існує безліч модифікацій КМОН-сенсорів.

Типову архітектуру давача КМОН наведено на рис. 4.26. Сенсор зображення складається з матриці пікселів, яка, зазвичай, розділена на стрічки,

котрі вибираються логікою вибору стрічки. Це може бути зсувний регістр або декодер. Пікселі зчитуються по вертикальних шинах стовпця, що приєднують обрану стрічку пікселів до блока процесорів аналогових сигналів. Ці процесори виконують функції накопичення зарядів, підсилення, вибірки та збереження, подвійної корельованої вибірки і придушення *радіаційних шумів* (РШ).

Кожен стовпець пікселів має власний АЦП. Цифровий вихід АЦП (або аналоговий вихід *процесорів аналогового сигналу* (ПАС)) обирає для зчитування стовпця логічна схема вибору.

Реалізувати «камеру на чіпі» з повним цифровим інтерфейсом допоможе АЦП. Існує багато варіантів таких АЦП. Їхнє завдання – підтримувати швидкість відеоданих, що становить від 0,92 мегавибірки/с для сенсорів розмірністю 320×288, які працюють з кадровою частотою 10 кадр./с для відеоконференцій, до 55,3 мегавибірки/с для сенсорів розмірністю 1 280×720, котрі працюють з кадровою частотою 60 кадр./с [12]. АЦП повинен мати менше 8-ми розрядів з низькою інтегральною нелінійністю та диференціальною нелінійністю, щоб не ввести у зображення перекручування або артефакти. АЦП може розсіяти тільки мінімальну потужність (до 100 мВт), щоб усунути появу «гарячих» крапок через генерування додаткового темного струму. АЦП не може займати занадто багато місця на чіпі, оскільки втратиться економічний ефект інтегрування. АЦП не повинен вносити шум в аналоговий сигнал зображення через ємності підкладки або інші механізми перехресних зв'язків, що погіршило б якість зображення.

АЦП може бути реалізований у вигляді одного послідовного АЦП або декількох АЦП (наприклад, по одному на кожен колір), котрі працюють з відеочастотою (10 мегавибірки/с). АЦП, вбудований у піксель, може працювати з кадровою частотою (наприклад, 30 вибірки/с). Зокрема намагались створити рівнобіжні стовпцеві АЦП, де кожен (або майже кожен) стовпець у матриці пікселів матиме власний АЦП так, щоб кожен АЦП працював зі швидкістю стрічки (наприклад, 15 000 вибірки/с).

Виконаємо порівняльний аналіз ПЗЗ- і КМОН-фотосенсорів. Здебільшого у цифрових камерах використовують саме сенсори КМОН або

ПЗЗ. Найважливішою відмінністю між цими приладами є спосіб перенесення електронів із сенсора. Окрім цього, КМОН може здійснювати більшу кількість функцій просто на чіпі.

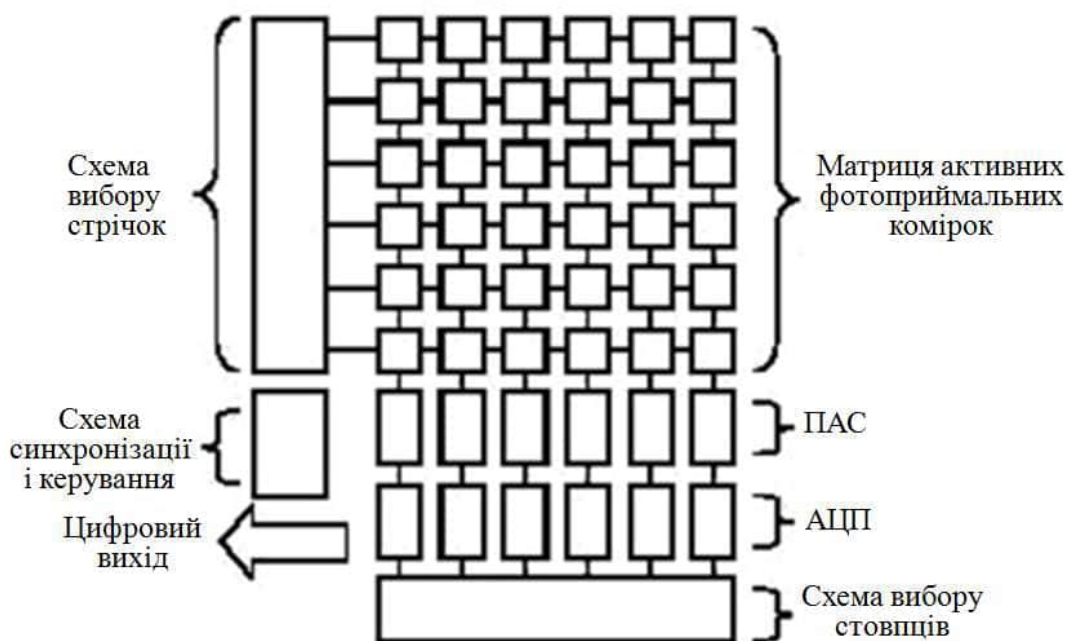


Рис. 4.26. Функціональна схема фотоприймальної матриці КМОН [43].

Зазначимо, що ПЗЗ є чутливішим до радіоактивного випромінювання за КМОН. Зрозуміло, що чим вище дослідник знаходиться від поверхні Землі, тим більшим є випромінювання. Саме тому КМОН сенсори у цьому сенсі мають перевагу над ПЗЗ.

На відміну від ПЗЗ, область застосування пристроїв КМОН значно ширша. Їх використовують як у процесорах персональних комп'ютерів, так і у значній кількості побутової електроніки. Оскільки, здебільшого, пристрої КМОН виготовляють великими партіями і за стандартним технологічним процесом, їх виробництво є значно дешевшим.

Окрім дешевизни виробництва, пристрої КМОН володіють деякими іншими перевагами. Оскільки архітектура КМОН дає змогу здійснювати обробку зображень і аналого-цифрові перетворення безпосередньо на чіпі, цифрові камери та інші пристрої, які використовують технологію КМОН замість ПЗЗ, виявляються значно дешевшими [12].

Отже, відзначимо такі істотні відмінності між ПЗЗ- і КМОН-сенсорами:

- ПЗЗ-сенсори створюють високоякісні низькошумові зображення. КМОН-сенсори традиційно є сприйнятливішими до шуму;
- оскільки в кожному пікселі КМОН-сенсора є декілька транзисторів, чутливість КМОН-чіпа гірша. Частина фотонів, які опромінюють чіп, потрапляє на транзистори, а не на фотодіод;
- КМОН-сенсори традиційно споживають невелику потужність. ПЗЗ використовують технологію, за якої споживають в 100 разів більше потужності, ніж рівноцінні КМОН;
- КМОН-чіпи можна виготовляти майже на будь-якому стандартному кремнієвому конвеєрі, отож вони дешевші, порівняно з ПЗЗ;
- ПЗЗ-сенсори виготовляли у великих кількостях протягом значно більшого періоду часу, отож вони досконаліші. Крім того, вони мають пікселі вищої якості.

Отож ПЗЗ використовують у камерах, призначених для відтворення високоякісних зображень; вони мають велику кількість пікселів і дуже високу чутливість до світла. У КМОН-сенсорів гірша якість, нижча роздільна здатність і низька чутливість. Проте вони дешевші і споживають менші потужності. Крім того, у КМОН-сенсорах, порівняно з традиційними ПЗЗ зображення не має розтікання (блумінгу), є прямий цифровий вихід (включає АЦП та інші схеми), невеликий розмір; відзначаються простотою при узгодженні з іншими приладами.

Отже, КМОН-сенсори мають параметри, конкурентоздатні з ПЗЗ за шумом зчитування, динамічним діапазоном і чутливістю; володіють збільшеними функціональними можливостями, відзначаються істотно зниженою споживаною потужністю системи (10-50 мВт) і низькою вартістю системи.

Лабораторна робота 4.1

Керування роботою приладів із зарядовим зв'язком

Мета роботи: вивчити принципи роботи приладів із зарядовим зв'язком.

Прилади і матеріали: експериментальний макет на основі ПЗЗ-лінійки К1200ЦЛ1 разом із джерелом живлення, світловий випромінювач із джерелом живлення, двоканальний осцилограф.

Під час виконання лабораторної роботи використовуємо діючий макет лінійної фоточутливої схеми, зібраної відповідно до поданого нижче опису. Макет працює від напруг живлення +5 В і +15 В. Для контролю та вимірювання параметрів керуючих сигналів, а також відеосигналу використовуємо двоканальний осцилограф із зовнішньою синхронізацією від імпульсів дозволяючого затвора. Передбачено перемикання частоти задавального генератора.

Усі сигнали керування ПЗЗ для зручності виведені на окрему панель. Змінні резистори, якими підбиратимемо оптимальні режими роботи схеми, також доступні для регулювання.

Фоточутлива схема К1200ЦЛ1 складається з 1 024-х комірок у вигляді МДН-конденсаторів зі спільним фотозатвором. Транспортний регістр трифазний з поверхневим каналом *p*-типу, який відокремлений від фотокомірок дозволяючим затвором. З 1 024-х комірок фоточутливими є 1 015, перші 9 закриті алюмінієм для відліку рівня чорного (темного сигналу). Фоточутливі комірки прикриті полікремнієвим затвором товщиною 0,5–0,8 мкм. Чутливість К1200ЦЛ1, як і усіх ПЗЗ з МДН-накопичувачами, різко зменшується у синій ділянці спектра (див. рис. 4.15).

Блок-схему приладу наведено на рис. 1. Протягом періоду накопичення на *фотозатвор* (ФЗ) подається високий потенціал, а на *дозволяючий затвор* (ДЗ) – низький. За певний час до закінчення періоду накопичення на ДЗ подають високий рівень потенціалу. Під час перенесення зарядів регістр

закривається, на другій і (або) третій фазі підтримується високий рівень потенціалу. Тактова діаграма містить також імпульсні послідовності, які надходять на фазові електроди (Φ_1 , Φ_2 , Φ_3), затвор *транзистора скидання* зарядів (ТС) і *вхідний діод* (ВД).

Як уже зазначено вище, антиблумінг слугує для захисту ПЗЗ від переповнення сигналом. Регулюючи зміщення на затворі антиблумінгу, можна встановити висоту бар'єра, який визначає максимальний рівень заповнення потенціальних ям МДН-накопичувачів.

Вихідний пристрій виготовлений у вигляді плаваючої дифузійної області, яка приймає зарядові пакети і з допомогою транзистора скидання передає їх на вихід. Під час зчитування зарядовий пакет ΔQ перетворюється у приріст напруги ΔU на ємності зчитуючого електрода C і $\Delta U = \Delta Q/C$ ($C < 1$ пФ). За розміру елементу 18×24 мкм глибина ями забезпечує накопичення близько 10^6 електронів. Середньоквадратичне значення шуму менше від 10^2 електронів. Це забезпечує динамічний діапазон на рівні 10^3 .

За електричного введення сигналу через вхідний діод К1200ЦЛ1 працює як лінія затримки з регульованим часом затримки 9–20 мс. Транспортний регістр містить 1 032 елементи, з яких один є буферним, 1 015 елементів слугують для прийому фотогенерованих носіїв, 9 – для прийому темнового сигналу, а перші 7 – для підрахунку рівня фону. Металокерамічний корпус має оптичне вікно з лейкосапфіру. Між вікном і кристалом міститься пластмасова бленда, яка захищає від світла периферійні області.

Мікросхема К1200ЦЛ1 є лише фотоприймачем, а для створення відповідного лінійного сенсора слід забезпечити її керування та формування відеосигналу. Зазвичай, для цього необхідні задавальний генератор, формувач фаз для транспортного регістра, формувач допоміжних сигналів (імпульсів керування фотозатвором, затвором антиблумінгу тощо), перетворювач рівнів керуючих сигналів і відеопідсилювач.

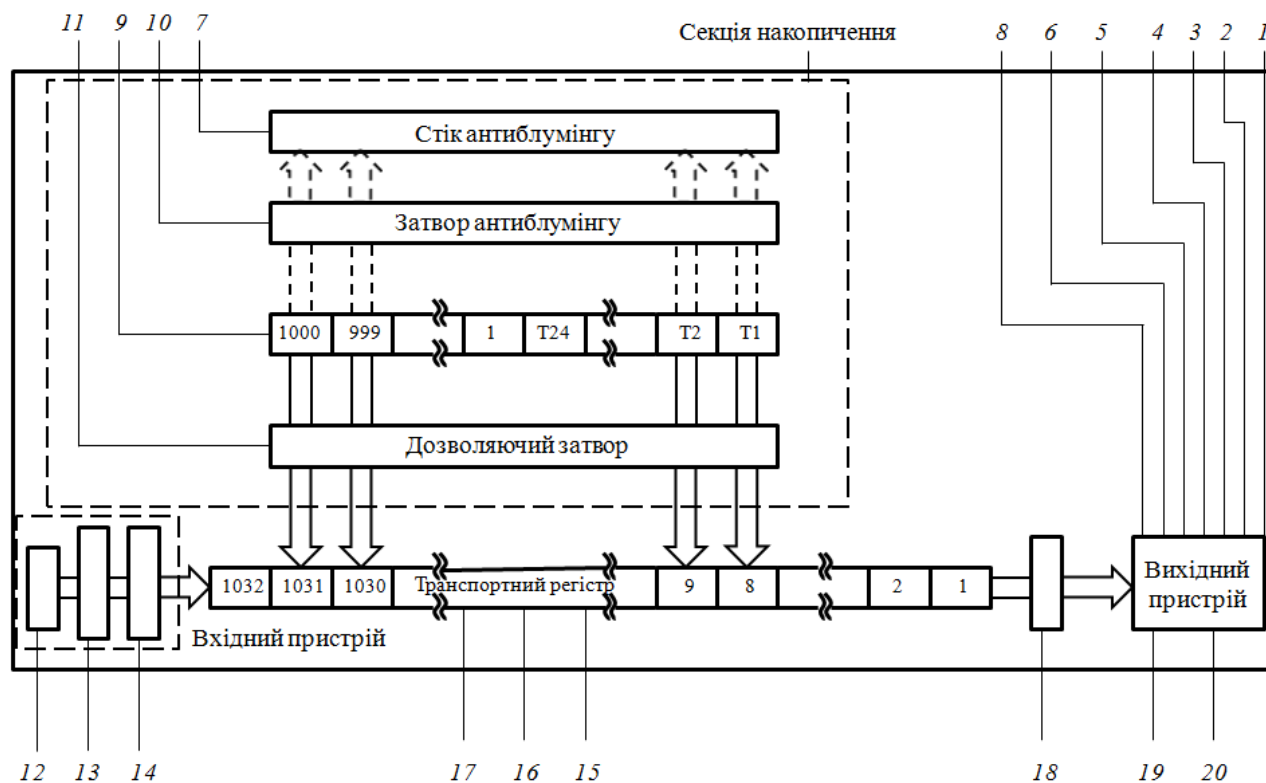


Рис. 1. Блок-схема лінійного ПЗЗ K1200ЦЛ1: 1 – живлення компенсаційного транзистора; 2 – компенсаційний вихід; 3 – живлення першого підсилювального транзистора; 4 – основний вихід; 5 – живлення основного підсилювального транзистора; 6 – затвор транзистора навантаження; 7 – живлення антиблумінгу; 8 – витік транзистора навантаження; 9 – фотозатвор; 10 – затвор антиблумінгу; 11 – дозволяючий затвор; 12 – вхідний діод; 13 – перший вхідний затвор; 14 – другий вхідний затвор; 15 – третя фаза регістра; 16 – друга фаза регістра; 17 – перша фаза регістра; 18 – вихідний затвор; 19 – живлення транзистора скидання; 20 – затвор транзистора скидання

Тактові діаграми, які вироблятимуть ці структурні елементи, наведено на рис. 2, а принципову схему побудовано на принципах транзисторно-транзисторної логіки. Частоту задавального генератора ділять на число $10\text{-}K$, де K – двійково-десятковий код, який подають на цифрові входи мікросхеми. Отже, частоту сигналу на вході формувача фаз транспортного регістра можна дискретно змінювати в деяких межах. Відповідно, змінюватиметься час зчитування $T_{\text{зч}}$ (період фазових імпульсів) і час накопичення $T_{\text{н}}$.

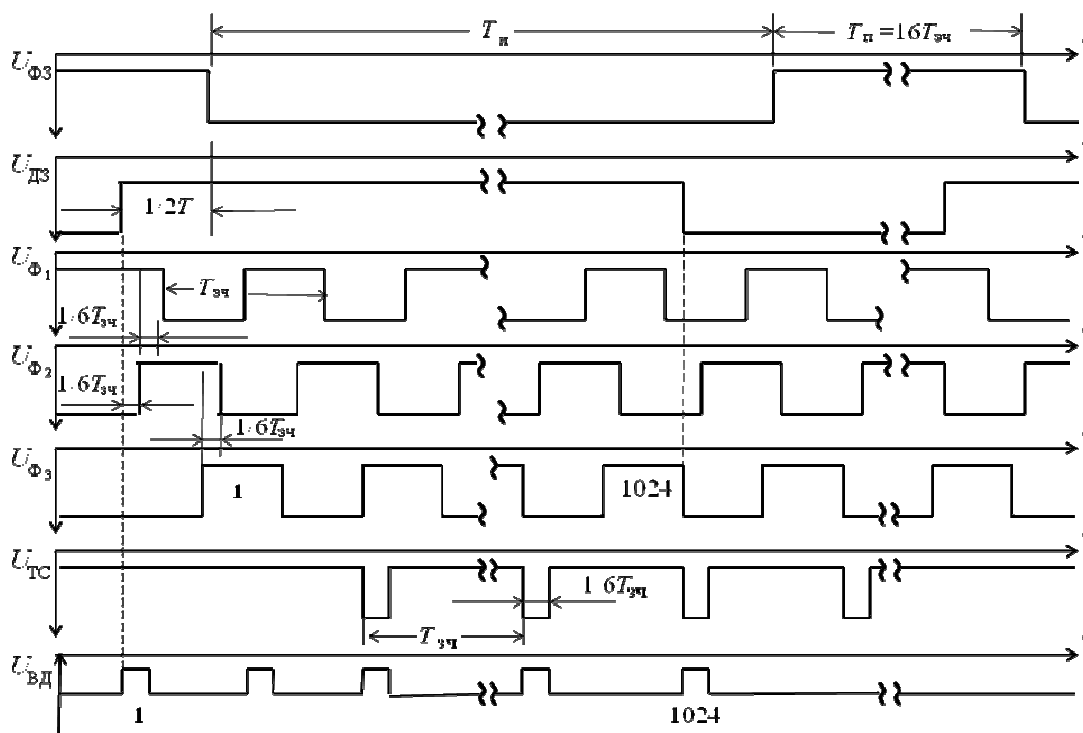


Рис. 2. Тактові діаграми лінійної фоточутливої схеми К1200ЦЛ1: T_n – час накопичення; $T_{зч}$ – час зчитування; T_n – час перенесення зарядів до транспортного регістра

Величина T_n для ПЗЗ є аналогічною до часу експозиції у фотографії. Отже, змінами часу накопичення можна налаштовувати пристрій із зарядовим зв'язком на різні рівні освітленості. На жаль, процеси термогенерації носіїв, які відбуваються в МДН-конденсаторах, не дають змоги використовувати доволі великий час T_n . Лише охолодження ПЗЗ радикально покращує їхні характеристики, зниження температури на кожні 10°C зменшує теплові шуми приблизно вдвічі. Проте сучасні ПЗЗ, які працюють у складі спектрофотометричної апаратури, допускають час накопичення до 60 с, що дає змогу реєструвати надслабкі світлові потоки.

Хід роботи

1. Ознайомитися з будовою лінійної фоточутливої схеми К1200ЦЛ1 та зі схемами керування нею. Вивчити розміщення блоків керування електронною частиною.

2. Ознайомитись з особливостями роботи осцилографа за реєстрації двох сигналів і в режимі зовнішньої синхронізації.
3. Після співбесіди з викладачем увімкнути живлення ПЗЗ.
4. Переконатися у наявності відеосигналу на одному з каналів осцилографа. Другий канал використовувати надалі для вимірювання сигналів керування ПЗЗ.
5. Вивчити вплив елементів керування «Поріг», «Затвор антиблумінгу», «Затвор транзистора скидання».
6. Встановити оптимальні значення цих напруг, виходячи з критерію максимального відношення сигнал/шум.
7. Перевірити осцилограми керуючих імпульсів, які наведені на часових діаграмах (рис. 2), виміряти їхні часові та амплітудні параметри.
8. Змінюючи частоту задавального генератора, встановити якісну залежність від неї параметрів відеосигналу.
9. Використати лінійну фоточутливу схему для реєстрації світлових сигналів, зокрема, спектра випромінювання напівпровідникових світлодіодів.
10. Ознайомитись із будовою сканера та схемою введення лінійного зображення у комп'ютер.
11. У звіті подати результати вивчення цього ПЗЗ.

Тестові завдання та контрольні питання до розділу 4

1. Перший прообраз ПЗЗ (регістр зсуву на 8 елементів з молібденовими затворами) майбутні Нобелівські лауреати У. Бойл і Дж. Сміт створили ...

- 1950 р.;
- + 1970 р.;
- 1990 р.;
- 2000 р.;
- 1980 р.

2. Якої полярності потенціал необхідно прикладати до електродів у ПЗЗ за використання напівпровідника *n*-типу провідності як підкладки:

- позитивний;
- + негативний;
- взагалі не потрібно прикладати?

3. Якої полярності потенціал необхідно прикладати до електродів у ПЗЗ за використання напівпровідника *p*-типу провідності як підкладки:

- + позитивний;
- негативний;
- взагалі не потрібно прикладати.

4. Оберіть серед наведених визначення «зарядового пакета» в ПЗЗ:

- сумарний заряд неосновних носіїв заряду в потенціальній ямі у напівпровіднику під електродом;
- + сумарний заряд неосновних носіїв заряду, згенерованих світлом, у потенціальній ямі в напівпровіднику під електродом;
- сумарний заряд основних носіїв заряду в потенціальній ямі у напівпровіднику під електродом.

5. Яка складова частина ПЗЗ як фотоприймача є чутливою до світлового потоку і під час експозиції відкрита для світла:

- + фотозатвор;
- дозволяючий затвор;
- транспортний реєстр;
- затвор антиблумінгу?

6. Яка складова частина ПЗЗ як фотоприймача забезпечує його стійкість до локальних переосвітлень:

- фотозатвор;
- дозволяючий затвор;
- транспортний реєстр;
- + затвор антиблумінгу?

7. Яка складова частина ПЗЗ як фотоприймача забезпечує розкладання зображення на елементарні фрагменти та наступне електронне дискретне зчитування:

- фотозатвор;
- дозволяючий затвор;
- + транспортний реєстр;
- затвор антиблумінгу?

8. Верхня межа тактової частоти ПЗЗ становить ...

- десятки герц;
- десятки кілогерц;
- + десятки мегагерц;
- десятки гігагерц.

9. Нижня межа тактової частоти ПЗЗ становить ...

- десятки герц;
- + десятки кілогерц;

- десятки мегагерц;
- десятки гігагерц.

10. Який технологічний метод дає найбільше покращення спектральних характеристик:

- використання люмінофорів;
- + метод зворотної засвітки ПЗЗ;
- створення віртуальної фази?

11. Прилади із зарядовим зв'язком. Трифазні та двофазні схеми керування ПЗЗ.

12. Лінійні і матричні прилади із зарядовим зв'язком. Особливості конструкції. Світлові та спектральні характеристики. Роздільна здатність ПЗЗ.

13. Конструкція та робота відиконів як координатних аналогових приймачів випромінювання.

14. Конструкція та робота сканісторів як координатних аналогових приймачів випромінювання.

15. Які польові транзистори називаються «комплементарними»:

- два *n*-канальні МДН транзистори;
- + *n*-канальний і *p*-канальний МДН транзистори;
- два *p*-канальні МДН транзистори;
- два біполярні фототранзистори?

16. Кількість польових транзисторів у пасивній світлоприймальній комірці чорно-білої матриці КМОН-фотоприймачів становить ...

- один;
- + два;

- три;
- понад три.

17. Кількість польових транзисторів в активному пікселі фотодіодного типу чорно-білої матриці КМОН-фотоприймачів становить ...

- один;
- два;
- + три;
- понад три.

18. Кількість польових транзисторів у пасивній світлоприймальній коміріці кольорової матриці КМОН-фотоприймачів становить ...

- один;
- три;
- п'ять;
- + сім.

19. Висока швидкість зчитування сигналу, низька вартість технологічного виготовлення, малі габарити й економна витрата енергії – це переваги ...

- + КМОН-сенсорів;
- ПЗЗ-матриць;
- світлодіодних матриць.

20. Висока роздільна здатність і малі значення шумового та темного струмів – це переваги ...

- КМОН-сенсорів;
- + ПЗЗ-матриць;
- світлодіодних матриць.

21. Нарисуйте структуру p -канального МДН транзистора і поясніть фізику його роботи. У який спосіб МДН транзистор можна застосувати як чутливий елемент у сенсорах?

22. Що таке «КМДН (КМОН) технологія»? Які переваги вона дає за побудови інтегральних схем? Що таке «піксель»? З яких елементів складається один піксель у «чорно-білій» світлочутливій КМДН матриці?

23. Як у світлочутливій КМДН матриці вдається зчитувати кольорові зображення? З яких елементів складається один піксель у «кольоровій» світлочутливій КМДН матриці? Поясніть, як працює «кольорова» світлочутлива КМДН матриця компанії *Foveon* без кольорових світлофільтрів. Які це дає переваги?

24. Архітектура КМОН-сенсорів.

25. Порівняйте фотоприймачі типу ПЗЗ та КМОН.

Розділ 5. ОПТОПАРИ, ЇХНІ ПЕРЕВАГИ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ ЗВ'ЯЗКУ

Оптопара є оптоелектронним приладом, що складається з випромінювального і фотоприймального елементів, між якими існує оптичний зв'язок, тобто зв'язок входу з виходом здійснюється за допомогою світлових сигналів. В електронному колі такий прилад виконує функцію елемента зв'язку, в якому водночас здійснена електрична (гальванічна) розв'язка входу і виходу. Ідея створення і застосування оптопар виникла 1955 р., коли у праці “*Opto-electronic devices network*” Е. Льобнер (E. Loebner) запропонував цілу серію приладів з оптичними та електричними зв'язками між елементами, що дало змогу здійснювати підсилення і спектральне перетворення світлових сигналів, створюючи прилади з двома стійкими станами – бістабільні оптопари, оптоелектронні пристрої накопичення і зберігання інформації, логічні схеми, регістри зсуву. Там уперше запропоновано термін *оптрон*, утворений як скорочення від англійського «*optical-electronic device*». Поняття «оптрон» трактують у літературі трохи ширше, ніж «оптопара» (слово *оптопара* саме по собі несе вже деяке обмеження – пари, тобто всього два елементи, хоча, зазвичай, є ще оптичне імерсійне середовище, та й в одному корпусі найчастіше розміщується не одна пара елементів). Історично термін *оптрон* одержав споконвічне право на існування, проте незабаром з'ясували, що ще на початку 60-х років одну з американських фірм зареєстрували під назвою «*Optron*», отожд міжнародні організації не рекомендують застосовувати те ж слово для назви приладу, щоб не переносити ім'я цієї фірми на вироби інших виробників. Окрім того, Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК) запропонувала навіть термін *transoptor*, однак він не прижився. Так чи інакше, проте сьогодні у нас офіційно (у довідниках, технічній документації) застосовують термін *оптопара*, поширюючи його і на прилади з більше, ніж двома елементами. Оскільки в більшості оптопар джерелом світла слугує випромінювальний діод, прийнято класифікувати оптопари за типом фотоприймачів – резисторні, діодні і т. п.

5.1. Оптипарі з прямим оптичним зв'язком

5.1.1. Резисторні оптипарі. У резисторних оптипарах джерелом є випромінювальний діод або мініатюрна лампа розжарювання (рис. 5.1), а приймачем слугує фоторезистор, найчастіше на базі селеніду кадмію.

Властивості фоторезисторів не залежать від полярності напруги живлення, тому вихід резисторної оптипарі можна під'єднувати до кола змінного струму, що іноді має суттєве значення для схем керування устаткуванням у цехових умовах. Залежність вихідного опору оптипарі (передавальна характеристика за опором) від вхідного струму (що протікає через джерело світла), наприклад, для оптипарі ОЕП-2 або ЗОР125А (на рис. 5.1, в наведено залежність для одного з чотирьох опорів цієї оптипарі) ілюструє, як різко – на кілька порядків – падає опір фоторезистора під дією випромінювання (наголосимо, що масштаб за шкалою опорів для цих залежностей логарифмічний, а для ЗОР125А і по осі абсцис відкладений логарифм вхідного струму). Водночас, коефіцієнт передавання за струмом ($I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$) в оптипар на фоторезисторах невеликий – порядку 0,3 (рис. 5.1, а).

Окрім функцій гальванічної розв'язки оптипарі можуть виконувати функції розгалуження сигналу на декілька незалежних один від одного каналів. Це ілюструє схема оптипарі ЗОР125А (рис. 5.1, в) – один випромінювач передає світловий сигнал одночасно на чотири фоторезистори, кожен з яких можна під'єднати до свого інформаційного каналу. З іншого боку, ця оптипара дає змогу збільшити коефіцієнт передачі за струмом – якщо паралельно з'єднати усі чотири фотоопори для одного інформаційного каналу.

Усі розглянуті приклади стосувалися оптипар із внутрішньою передачею сигналу від випромінювача до приймача через імерсійне середовище, в яке вони занурені в корпусі оптипарі. У цьому випадку відстань між випромінювальним і приймальним елементами мінімальна (частки міліметра), що дає змогу мінімізувати втрати й отримати максимально можливий коефіцієнт передавання (варто нагадати закономірність, відому з курсу фізики,

що освітленість падає пропорційно до квадрата відстані від джерела до приймача).

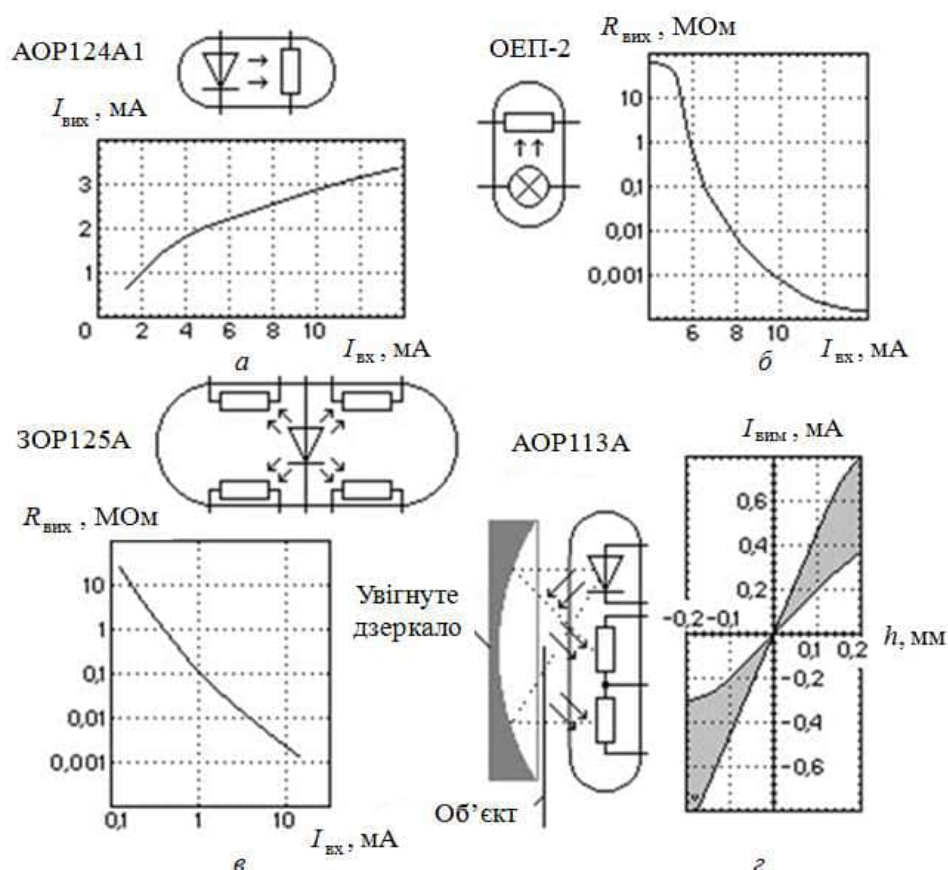


Рис. 5.1. Резисторні оптопары та їхні передавальні характеристики [8]: *а* – схема оптопары AOP124A1 та її струмова передавальна характеристика; *б* – схема оптопары ОЕП-2 та її передавальна характеристика за опором; *в* – схема оптопары ЗОР125А та її передавальна характеристика за опором; *г* – схема оптопары AOP113A та залежність струму на виході від переміщення

Однак оптопара може бути не тільки передавачем сигналу, а й слугувати його першоджерелом, виконуючи функцію давача інформації. Прикладом слугує оптопара з відкритим оптичним каналом (рис. 5.1, *г*). У цьому випадку світло від джерела через робоче вікно у корпусі приладу виходить у зовнішнє середовище, де, відбиваючись від спеціально встановленого відбивача (увігнутого дзеркала), повертається в корпус оптопары і падає на два фоторезистори, що мають спільну точку з'єднання і можуть електрично скласти одну половину вимірювального моста (інша половина складається з двох постійних опорів). Конструктивно фотоопори розташовані в лінію, тому, якщо між оптопарою і дзеркалом помістити будь-який плоский об'єкт

(наприклад, край аркуша паперу), вдається відстежити його переміщення уздовж цієї лінії. Наведена на рис. 5.1, *г* передавальна характеристика оптопарі АОР113А ілюструє лінійну реакцію струму у вимірювальній діагоналі моста ($I_{\text{вим}}$) на переміщення в діапазоні $\pm 0,2$ мм (виділена на графіку зона характеризує розкид параметрів).

Такі допустимі межі на положення краю аркуша паперу можуть контролювати подібні оптопарі на листовій і рулонній друкарських машинах.

5.1.2. Діодні оптопарі. У діодних оптопарах фотоприймачем слугує фотодіод на основі кремнію, а джерелом є інфрачервоний діод, який випромінює на довжині хвилі близько 1 мкм. Оскільки фотодіоди можуть працювати у фотодіодному та у фотогальванічному режимах, то вихідне коло, за необхідності, може працювати і автономно – без джерела живлення (наприклад, подавати сигнал безпосередньо на вимірювальну голівку, скажімо, стрілковий мікроамперметр або мілівольтметр). Прикладом роботи діодної оптопарі в тому та іншому режимі слугують передавальні характеристики $I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$ для приладу АОД107, наведені на рис. 5.2, *а*. Представлені графіки ілюструють, що у фотодіодному режимі залежність близька до лінійної, з коефіцієнтом передавання за струмом, близьким до 5 %. Водночас у фотогальванічному режимі нелінійність залежності стає усе істотнішою поступово зі збільшенням опору навантаження вихідного кола (з перетворенням фотоприймача з джерела струму в джерело напруги), що одночасно впливає на зменшення коефіцієнта передавання за струмом (поступово зі зниженням вихідного струму).

Діодна оптопара АОД134АС є набором з двох оптопар в одному корпусі (рис. 5.2, *б*), що створює певні зручності за реалізації на них гальванічних розв'язок в електротехнічній апаратурі. Коефіцієнт передавання за струмом порядку 1 % типовий для діодних оптопар (на графіку відображено зону розкиду й усереднену криву).

Істотного зростання коефіцієнта передавання за струмом досягають в діод-транзисторних оптопарах – 45 % для КОЛ201А (рис. 5.2, *в*), в яких

приймач – фотодіод – виконаний інтегрально на одній пластині з $n-p-n$ -транзистором. Вони неначе перекидають місток до іншого типу оптопар – транзисторних.

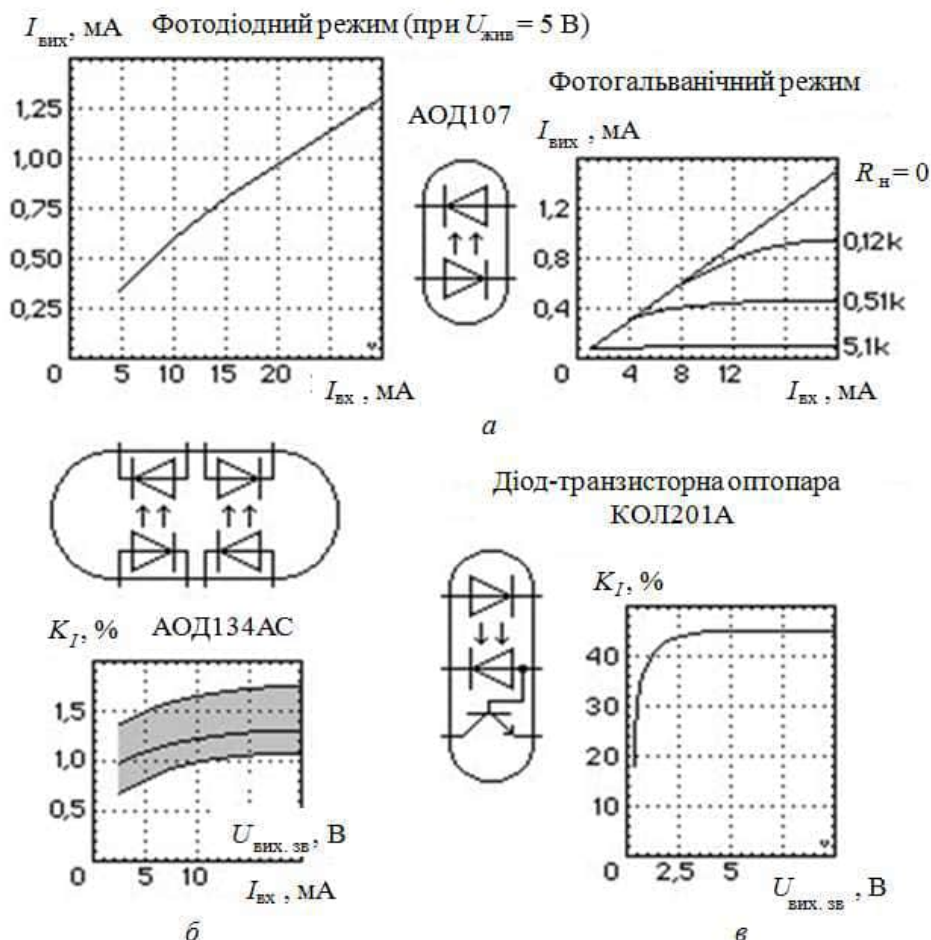


Рис. 5.2. Діодні і діод-транзисторна оптопари та їхні передавальні характеристики [8]: а – схема діодної оптопари АОД107 та її струмові передавальні характеристики у фотодіодному та фотогальванічному режимах роботи фотодіода; б – схема діодної оптопари АОД134АС та залежність її коефіцієнта передавання за струмом від вхідного струму; в – схема діод-транзисторної оптопари КОЛ201А та залежність її коефіцієнта передавання за струмом від зворотної напруги на фотодіоді

5.1.3. Транзисторні оптопари. Типове джерело в транзисторних оптопарах – інфрачервоний діод, а фотоприймачем слугує, зазвичай, кремнієвий ($n-p-n$) одинарний або складений транзистор. Характерні приклади схем транзисторних оптопар і графічних залежностей, що зв'язують вихід із входом, наведено на рис. 5.3. Зазначимо, що в довідковій літературі не завжди можна знайти потрібні залежності (зокрема, передавальні характеристики),

тому на рис. 5.1–5.3 наведено графіки, що так чи інакше дають інформацію про перетворення вхідного сигналу у вихідний, котрі доволі повно відображають оптоелектронну елементну базу.

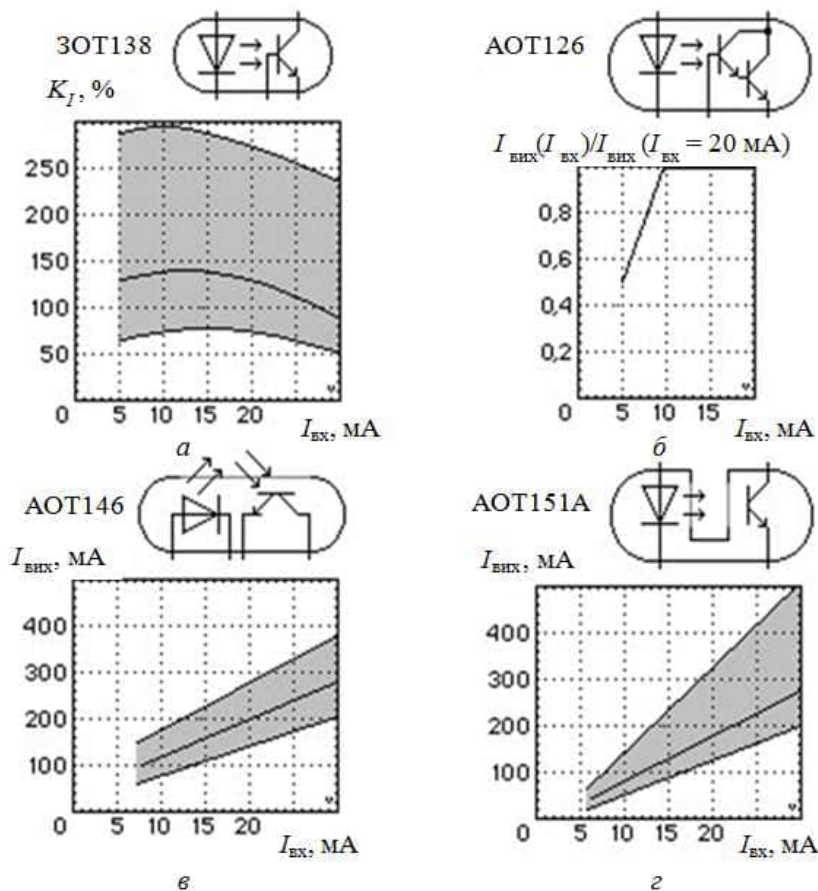


Рис. 5.3. Транзисторні оптопары та їхні передавальні характеристики [8]: а – схема оптопары 3OT138 та залежність її коефіцієнта передавання за струмом від вхідного струму; б – схема оптопары AOT126 та її струмова передавальна характеристика; в – схема оптопары AOT146 та її струмова передавальна характеристика; г – схема оптопары AOT151A та її струмова передавальна характеристика

Коефіцієнт передавання за струмом у транзисторній оптопарі 3OT138 (рис. 5.3, а) значно перевищує (50–250 %) можливості діодних оптопар (на графіку відображено зону розкиду й усереднену криву). Це дає змогу підсилити слабкий струмовий сигнал у самій мікросхемі оптопары, не ризикуючи «забити» його шумами і перешкодами під час передавання сигнальним кабелем. Ще більшого підсилення домагаються за використання складених фототранзисторів, наприклад, в оптопарі AOT126 (рис. 5.3, б). Підвищення ж коефіцієнта передавання за рахунок підсилення на транзисторі знижує

швидкодію, оскільки новий елемент вносить свою інерційність за рахунок міжелектродних ємностей (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Порівняння параметрів для оптопар різних типів [18]

Тип фотоприймача оптопари	Коефіцієнт передавання, %	Гранична частота, МГц
Фотодіод	0,1	10
Фототранзистор	30	0,3
Складений фототранзистор	300	0,03

З наведених даних випливає: швидкодія падає на стільки ж порядків, на скільки підвищується коефіцієнт передавання. Діодним оптопарам віддають перевагу в комп'ютерних каналах зв'язку, де швидкодія – один з визначальних параметрів, а сам сигнальний імпульс доволі чистий і впевнено сприймається. Транзисторні оптопари застосовніші до аналогових сигналів, наприклад, оптопари з відкритим оптичним каналом АОТ146 – відбивального типу або АОТ151А – щілинного типу (див. рис. 5.3, в, з).

Сенсори на базі оптопар відбивального типу, володіючи джерелом інфрачервоного випромінювання, добре працюють в умовах підвищеної запиленості (наприклад, паперового пилу в друкарських машинах). Оптопари щілинного типу часто використовують як кінцеві вимикачі (наприклад, у принтерах, сканерах), коли, скажімо, каретка доходить до крайнього положення і необхідно зупинити рух або здійснити реверс. При цьому заслінка або «прапорець», зв'язані з кареткою, входять у щілину оптопари і перекривають світловий потік, повідомляючи у такий спосіб про досягнення крайнього положення.

5.1.4. Тиристорні оптопари. На відміну від транзисторних, *тиристорні оптопари* дають змогу підсилювати інформаційний сигнал не тільки за струмом, а й за потужністю, оскільки придатні для роботи за напруг на вході і виході, які відрізняються на порядки, наприклад, у випадку, проілюстрованому на рис. 5.4: на вході сигнал рівня 5 В (комп'ютерний) перетворюється на виході у 220 В змінного струму. Таку тиристорну оптопару, своєю чергою, можна

використовувати для керування тиристорами на десятки кіловольт або сотні ампер (наприклад, в енергетичних мережах).

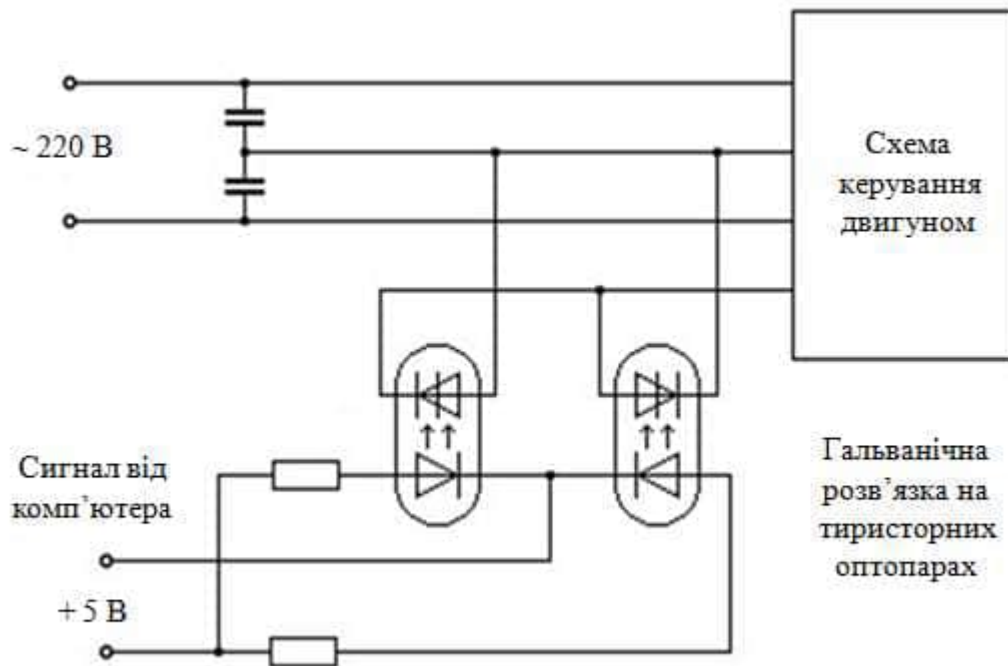


Рис. 5.4. Тиристорні оптопари у схемі керування двигуном [8]

Уявити параметри тиристорних оптопар малої та середньої потужності можна на прикладі характеристик оптопар АОУ115Д (граничні електричні параметри при $T_{\text{сер}} = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$), поданих у табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Граничні електричні параметри оптопар АОУ115Д

Назва параметра	Значення
Вхідний постійний струм, мА	30
Вхідний імпульсний струм (за тривалості імпульсу 1 мс і шпаруватості 10), мА	60
Вхідна зворотна напруга, В	2
Вихідний постійний струм, мА	100
Вихідна постійна пряма напруга на фототиристорі в закритому стані, В	400
Напруга на ізоляції, В	1500
Діапазон робочих температур навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$	-45...+55

З наведених даних бачимо, що коефіцієнт передавання за потужністю становить $(400\text{ В} \times 0,1\text{ А} / 2\text{ В} \times 0,03\text{ А}) \times 100\text{ \%} = 66\,667\text{ \%}$, що істотно вище

можливостей інших видів оптопар. Окрім того, увімкнутий стан фототиристора зберігається і за припинення випромінювання вхідного діода. Отже, керуючий сигнал можна подати тільки на момент вмикання фототиристора, що економічно, додатково підвищує коефіцієнт передавання за потужністю, а також доцільно за багатоканального керування.

5.2. Характеристики та параметри оптопар

Якість оптопари істотно залежить від ефективності передавання енергії від випромінювача до приймача, тобто від властивостей *оптичного каналу*. Для зменшення втрат на відбивання необхідно створити імерсійну систему, в якій показники заломлення n оптичного середовища і матеріалів випромінювача та фотоприймача були б однакові. Така мета принципово досяжна, оскільки в основних використовуваних напівпровідникових матеріалах значення n близькі одне до одного.

В оптопарах використовують такі конструктивні види оптичних каналів:

- зв'язок через повітря, який характеризується простотою і високою електричною ізоляцією;
- зв'язок через повітря з використанням оптичного фокусування з допомогою лінз, що забезпечує краще передавання випромінювання, порівняно з прямим зв'язком через повітря;
- зв'язок з використанням імерсійного, частіше твердого, середовища (полімерні органічні сполуки типу епоксидної смоли або спеціального оргскла), що забезпечує найкращі параметри оптичного каналу;
- зв'язок з використанням відрізка світловода (зазвичай жорсткого моноволокна на основі халькогенідних, селенідних або германатних стекол), зручний за створення ізоляторів з допустимою напругою понад 20–50 кВ.

Отже, під час вибору типу оптичного каналу необхідно, залежно від застосування оптопари, задовольнити такі вимоги:

- 1) забезпечити заданий рівень електричної ізоляції між входом і виходом оптопари (між випромінювачем і фотоприймачем);

- 2) узгодити матеріал оптичного каналу з випромінювачем і фотоприймачем спектрально, тобто забезпечити високу прозорість для випромінювання у робочому діапазоні довжин хвиль;
- 3) знизити до мінімуму втрати на відбивання на границях *випромінювач–оптичний канал і оптичний канал–фотоприймач*.

Під час вибору оптичного каналу вимоги до ізоляції виявляються вирішальними, якщо відстань між випромінювачем і фотоприймачем мала. Якщо ж відстань достатньо велика (наприклад, за використання світловодів), то ізолюючі властивості стають менш важливими. Зате більше значення набуває спектр пропускання оптичного каналу, який є складовою частиною спектральної характеристики системи *випромінювач – оптичний канал – фотоприймач*.

Мірою узгодження спектральних характеристик елементів оптопари слугує *коефіцієнт спектрального узгодження* k_λ . Його визначають інтегруванням добутку спектрів усіх елементів, які входять у систему:

$$k_\lambda = \frac{\int \frac{\Phi_e(\lambda)}{\Phi_{e0}} S_\phi(\lambda) k_{ок}(\lambda) d\lambda}{\int \frac{\Phi_e(\lambda)}{\Phi_{e0}} d\lambda}, \quad (5.1)$$

де $\frac{\Phi_e(\lambda)}{\Phi_{e0}}$ – нормована спектральна характеристика випромінювача у відносних одиницях (Φ_{e0} – потік випромінювання в максимумі спектральної характеристики випромінювача, тобто при $\lambda = \lambda_{\max}$); $S_\phi(\lambda)$ – спектральна характеристика фотоприймача (у відносних одиницях); $k_{ок}(\lambda)$ – спектральна характеристика оптичного каналу у відносних одиницях ($k_{ок}$ – коефіцієнт пропускання оптичного каналу).

Межі інтегрування визначаються короткохвильовою (λ_1) і довгохвильовою (λ_2) межами спектра випромінювача.

Передавальні параметри характеризують ефективність передавання електричного сигналу із входу оптопари на вихід. Ефективність передавання енергії сигналу описують коефіцієнти передавання (зазвичай за струмом), а швидкість передавання сигналу – часовими параметрами.

Головним параметром, який характеризує передавання сигналу із входу оптопари на її вихід, для усіх типів оптопар (окрім тиристорних) є *коефіцієнт передавання за струмом* k_I , тобто відношення струму на виході оптопари $I_{\text{вих}}$ до вхідного струму $I_{\text{вх}}$, який його спричинив:

$$k_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}}. \quad (5.2)$$

Залежність $I_{\text{вих}} = f(I_{\text{вх}})$, яку називають *передавальною характеристикою*, в загальному випадку нелінійна для оптопар. При цьому розрізняють *статичний* коефіцієнт передавання k_I , який визначають за формулою (5.2), і *диференціальний* коефіцієнт передавання:

$$k_{\text{Д}} = \lim_{\Delta I_{\text{вх}} \rightarrow 0} \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{dI_{\text{вих}}}{dI_{\text{вх}}}. \quad (5.3)$$

Нелінійність передавальної характеристики зв'язана з нелінійністю випромінювальної характеристики випромінювача оптопари, а також із залежністю $k_{\text{Д}}$ фотоприймача від вихідного струму.

Тиристорна оптопара працює тільки в ключовому режимі, і параметр k_I для неї не має змісту. Передавальна характеристика тут визначається вхідним струмом тиристорної оптопари, за якого фототиристор вмикається. У паспорті на тиристорну оптопару задано значення струму вмикання – мінімальне значення вхідного струму, за якого гарантують надійне відкриття фототиристора. Окрім того, задають максимально допустимий вхідний струм завади $I_{\text{зав.мах}}$ – максимальне значення вхідного струму тиристорної оптопари, за якого фототиристор не вмикається. Параметр $I_{\text{зав.мах}}$ характеризує завадостійкість тиристорної оптопари.

Швидкодію оптопар характеризують такі параметри перехідної характеристики вихідного струму $I_{\text{вих}}(t)$, які отримують під час подання на вхід прямокутного імпульсу з амплітудою $I_{\text{вх}}$:

- час наростання вихідного струму $t_{\text{нар}}$ – час наростання вихідного струму від рівня $0,1I_{\text{вих.мах}}$ до рівня $0,9I_{\text{вих.мах}}$;
- час затримки під час вмикання $t_{\text{зт}}$ – час від моменту подання імпульсу вхідного струму t_0 до моменту наростання вихідного струму до рівня $0,1I_{\text{вих.мах}}$.

Сума часів затримки і наростання під час вмикання становить *час вмикання* $t_{\text{вм}}$ оптопар: $t_{\text{вм}} = t_{\text{зт}} + t_{\text{нар}}$. Аналогічно визначають *час спадання* $t_{\text{сп}}$, *час затримки під час вимикання* і *час вимикання*. Швидкодія оптопар характеризується *часом перемикання* $t_{\text{пер}} = t_{\text{вм}} + t_{\text{вим}}$. Наведемо його величину для деяких типів оптопар: фоторезисторні – 3 мс; діодні (GaAs-*p-i-n*-фотодіоди) – 10 нс; транзисторні (GaAs-планарні *p-n-p*-фототранзистори) – 2 мкс; тиристорні (GaAs-планарні фототиристори) – 15 мкс.

Швидкодію деяких класів оптопар задають граничною частотою чи максимальною швидкістю передавання інформації. Обидва ці параметри зв'язані зі значенням часу перемикання.

Далі проаналізуємо детальніше *розрахунок коефіцієнтів передавання* у вже розглянутих оптопар з прямим оптичним зв'язком. Елементарні оптопари, які визначають структуру оптоелектронної схеми (наприклад, транзистори, що є складовими електричної схеми), відрізняються параметрами і характеристиками. Для визначення виду перетворення вхідного сигналу розглянемо принципову схему оптопар як функціонального елемента (рис. 5.5).

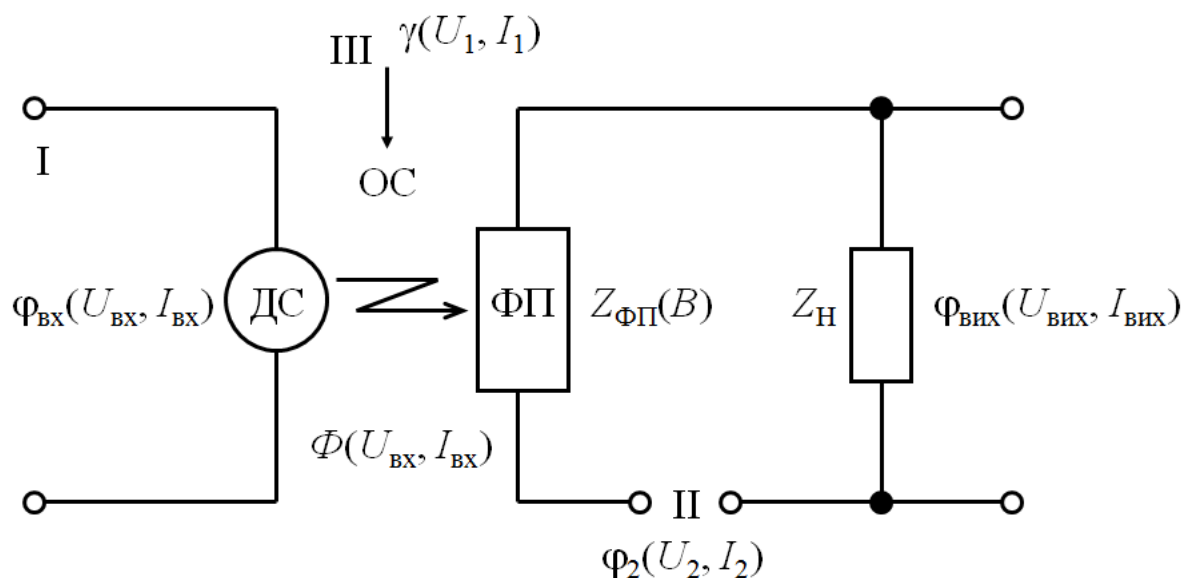


Рис. 5.5. Принципова схема оптопар з внутрішнім прямим оптичним зв'язком [18]

На принциповій схемі вхідний і вихідний електричні сигнали, а також світловий сигнал представлено, відповідно, функціями $\Phi_{\text{вх}}(U_{\text{вх}}, I_{\text{вх}})$, $\Phi_{\text{вих}}(U_{\text{вих}}, I_{\text{вих}})$ і $\Phi(U_{\text{вх}}, I_{\text{вх}})$.

Електричний сигнал зміщення за другим (II) незалежним входом представлений функцією $\varphi_2(U_2, I_2)$, де U_2, I_2 – напруга і струм зміщення, які також визначають у загальному випадку опір фотоприймача $Z_{\text{ФП}} = \xi(\Phi, U_2, I_2)$. Функція $\gamma(U_1, I_1)$ є фактором керування оптичним середовищем за третім (III) незалежним входом оптопарі, з допомогою якої можна керувати параметрами світлового пучка: фазою і довжиною хвилі, напрямом та ін. Це обумовлює функцію передавання оптичного середовища $\Phi(\gamma)$.

Коефіцієнт передавання оптопарі описують рівнянням

$$K_{\text{ОП}} = \psi[K_{\text{ДС}}(U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВХ}}); K_{\text{ОС}}(U_1, I_1); K_{\text{ФП}}(U_2, I_2); \varphi_{\text{ВХ}}(U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВХ}}); \varphi_2(U_2, I_2)], \quad (5.4)$$

де $K_{\text{ДС}}, K_{\text{ОС}}, K_{\text{ФП}}$ – відповідно, коефіцієнти передавання джерела світла, оптичного середовища і фотоприймача.

Якщо $K_{\text{ДС}}, K_{\text{ОС}}, K_{\text{ФП}} = \text{const}$, а джерело світла і фотоприймач є лінійними елементами схеми, то коефіцієнти передавання матимуть вигляд

$$K_{\text{ОПУ}} = \frac{U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = F_U U_{\text{ВХ}} U_2; K_{\text{ОПИ}} = \frac{I_{\text{ВІХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = G_I I_{\text{ВХ}} I_2, \quad (5.5)$$

де F_U, G_I – вагові коефіцієнти.

Якщо $U_{\text{ВХ}} = U_2 = U_0$ і $I_{\text{ВХ}} = I_2 = I_0$, то вираз (5.5) набуде вигляду

$$K_{\text{ОПУ}} = C_{0U} U_0^2; K_{\text{ОПИ}} = C_{0I} I_0^2, \quad (5.6)$$

тобто можна здійснити в оптопарі математичне моделювання операції квадратичного перетворення. Оптопара може виконувати також операцію алгебраїчного сумування:

$$K_{\text{ОПУ}} = C_1 \sum_i \pm U_i, \quad (5.7)$$

де $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$; $U_2 = \sum_i \pm U_i$ чи $U_2 = \text{const}$; $U_{\text{ВХ}} = \sum_i \pm U_i$,

і операцію ділення

$$K_{\text{ОПУ}} = C_2 \left(\frac{U_2}{U_1} \right), \quad (5.8)$$

де $U_{\text{ВХ}} = \frac{1}{U_1}$.

За відповідних функцій $\varphi_{\text{ВХ}}(U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВХ}})$, $\varphi_2(U_2, I_2)$, $\gamma(U_1, I_1)$ схема оптопарі може виконувати операції диференціювання та інтегрування. Отже, оптопарі з

прямим оптичним зв'язком можна використовувати як лінійні і диференціальні підсилювачі, модулятори, змішувачі, генератори релаксаційних коливань тощо.

Отже, *оптопарі з внутрішнім прямим оптичним зв'язком* мають такі особливості: відсутність гальванічного зв'язку між входом і виходом і, як наслідок, високий завадозахист (оскільки оптичні канали зв'язку нечутливі до впливу електромагнітних полів); можливість керування за кожним із трьох незалежних входів; велику гнучкість і можливість фотоелектричного перетворення, що створює умови для отримання оптоелектронних схем найрізноманітнішого призначення.

5.3. Оптопарі з електрооптичним та зовнішнім оптичним зв'язком

Внутрішній оптичний зв'язок в оптопарі може бути не тільки прямим, а й зворотним позитивним чи негативним (рис. 5.6; 5.7). За наявності того чи іншого зворотного зв'язку в оптопарі між елементами оптронної пари необхідний також електричний зв'язок, отож такі оптопарі називають ще *оптопарами з електрооптичним зв'язком*. У цьому випадку оптопара може слугувати *активним приладом*, придатним для підсилення і генерування електричних і оптичних сигналів. Насамперед це стосується оптопарі з позитивним зворотним зв'язком, яка володіє ділянкою із негативним диференціальним опором на вольт-амперній характеристиці.

В *оптопарі з позитивним зворотним оптичним зв'язком* (рис. 5.6, а) зміна яскравості свічення випромінювача світла може відбуватися як унаслідок зміни опору приймача випромінювання під дією вхідного оптичного сигналу за незмінної вхідної напруги на оптопарі, так і внаслідок зміни вхідної напруги за незмінної освітленості приймача випромінювання вхідним оптичним сигналом. Отже, ця оптопара має два входи: оптичний $\Phi_{\text{вх}}$ і електричний $U_{\text{вх}}$. Конструктивно така оптопара передбачає, що, як мінімум, частина світлового потоку від випромінювача світла потраплятиме на приймач випромінювання, спричиняючи зменшення його опору. Зі зменшенням опору приймача випромінювання зростає яскравість свічення випромінювача світла, що

зумовляє подальше зменшення опору приймача випромінювання і т. д. Цей процес за певних умов ($\Phi_{\text{вх}} > \Phi_{\text{вх.пор}}$ чи $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх.пор}}$) може спричинити різке стрибкоподібне зростання струму, який проходить через оптопару, і її вихідне випромінювання (див. рис. 5.6, б).

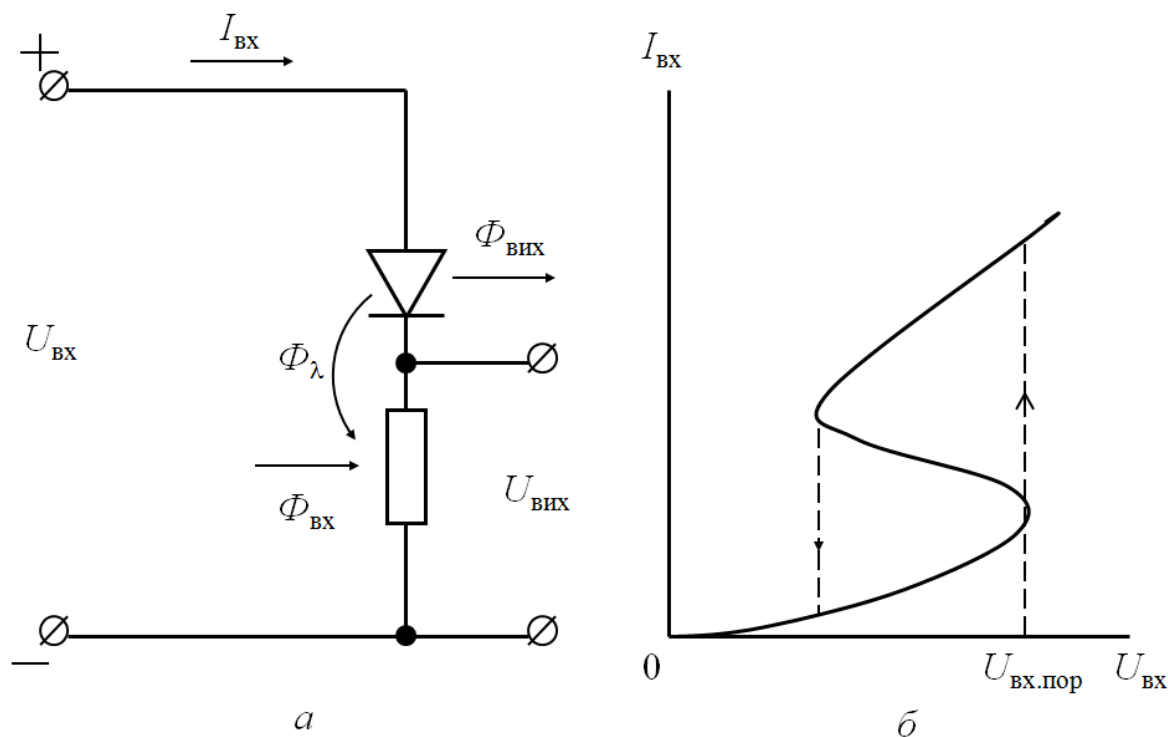


Рис. 5.6. Оптопара з позитивним зворотним зв'язком між її елементами: а – принципова схема; б – вольт-амперна характеристика [18]

Окрім двох входів (оптичного та електричного), оптопара має два аналогічних виходи, що дає змогу урізноманітнити її області застосування. Вона може виконувати функції своєрідного ключа чи тригера.

Приклад схеми *оптопар* з *від'ємним зворотним оптичним зв'язком* наведено на рис. 5.7, а. У такій оптопарі випромінювач світла і приймач випромінювання увімкнуті паралельно. Тому збільшення вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ на оптопарі і відповідне збільшення струму через випромінювач світла спричиняє зменшення опору приймача випромінювання, що зумовляє ще більше зростання вхідного струму через оптопару (рис. 5.7, б). Оптопара з від'ємним зворотним оптичним зв'язком володіє нелінійним опором, характеристики якого можуть змінюватися у широких межах, оскільки оптопара має електричний та оптичний входи і такі ж виходи.

Розглянемо *оптопарі із зовнішнім оптичним зв'язком*, які здійснюють перетворення: оптичний сигнал – електричний сигнал – оптичний сигнал. Вони мають лише електричний зв'язок між своїми елементами (рис. 5.8). Вхідним керуючим сигналом оптопарі є світловий потік $\Phi_{\text{вх}}$, який подають від зовнішнього випромінювача на приймач випромінювання оптопарі, опір якого змінюється зі зміною освітленості. При цьому відбувається перерозподіл напруги на елементах оптопарі і зміна струму у послідовному колі, що спричиняє зміну яскравості свічення випромінювача світла.

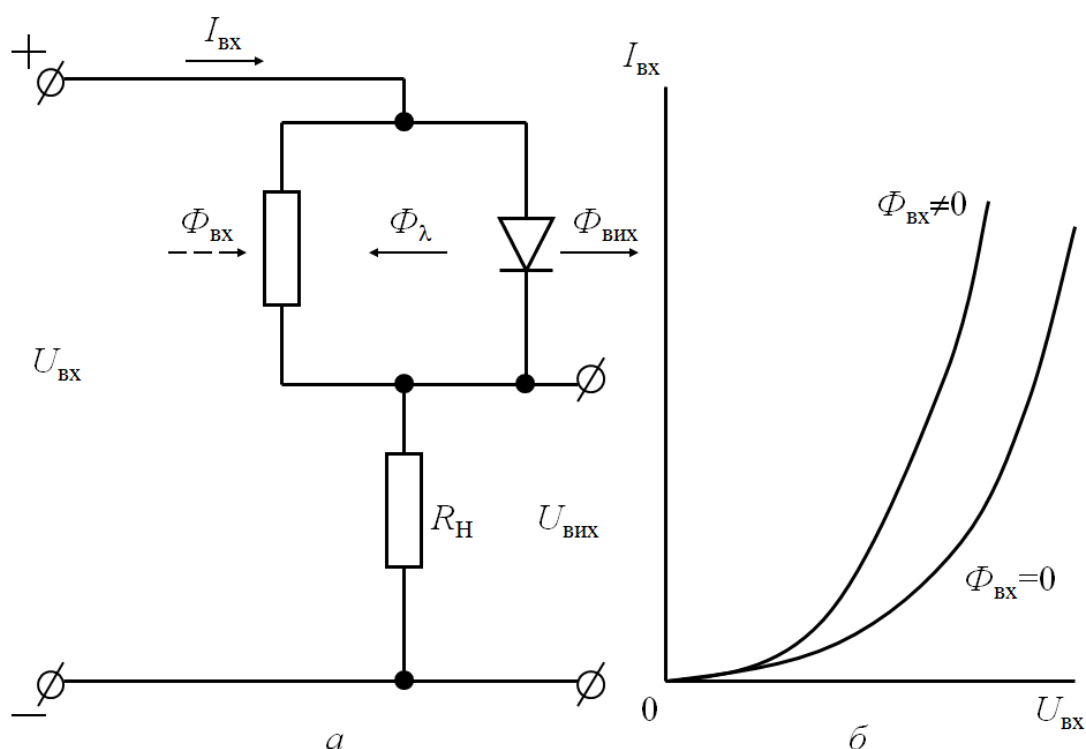


Рис. 5.7. Оптопара з від'ємним оптичним зворотним зв'язком між її елементами:
а – принципова схема; б – вольт-амперна характеристика [18]

Таку оптопару можна використати для підсилення світла без зміни його спектрального складу за відповідних спектральних характеристик приймача вхідного випромінювання та випромінювача оптопарі. Окрім того, підбираючи відповідним чином спектральні характеристики приймача випромінювання та випромінювача світла, у такій оптопарі з електричним зв'язком можна здійснити перетворення видимого випромінювання однієї довжини хвилі у видиме випромінювання іншої довжини хвилі, невидиме інфрачервоне – у видиме, рентгенівське – у видиме і т. д.

Оптопари широко використовують під час побудови оптоелектронних логічних елементів, які реалізують операції І, АБО, АБО-НІ, оптоелектронних операційних підсилювачів з гальванічно розв'язаними вузлами, перетворювачів частоти, релаксаційних генераторів, реле часу і т. п.

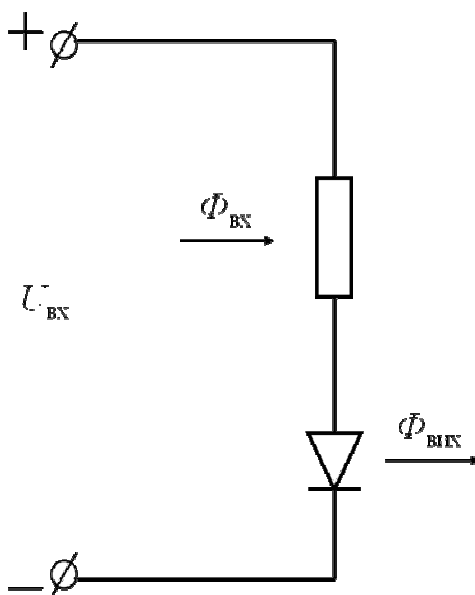


Рис. 5.8. Схема оптопар з електричним зв'язком між її елементами [18]

5.4. Інтегральне виконання оптопар

Під час виготовлення *оптопар* у складі *інтегральних мікробірок* широко використовують методи планарної технології. Будову і конструкцію оптопар, виконаної у вигляді єдиної багатошарової плівкової структури, подано на рис. 5.9.

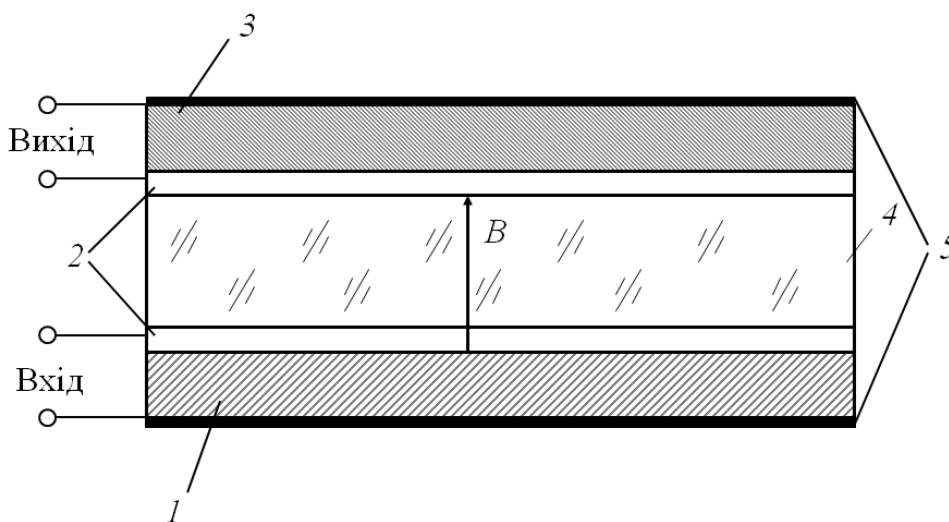


Рис. 5.9. Конструкція оптопар в інтегральному виконанні [18]

Електролюмінофор 1 (найчастіше ZnS), який виконує функцію джерела світла, і фоторезистор 3 (фотоприймач, наприклад, на основі CdS:Cu) отримані послідовним напиленням у вакуумі на обидва боки скляної пластини 4, покритої провідними шарами 2. Скляна пластина виконує роль підкладки і слугує водночас світловодом. Ззовні пристрій покритий непрозорими електродами 5. У деяких конструкціях електролюмінесцентний і фотопровідний шари наносять по чергово з одного боку скляної пластини, що технологічно простіше, однак у цьому випадку ємнісний зв'язок між джерелом світла і фотоприймачем зростає.

Проте, незважаючи на перелічені вище переваги, сучасні оптопари володіють і певними *недоліками*, такими як:

- низький ККД (порядку одиниць процентів), обумовлений необхідністю подвійного перетворення енергії (*електрика – випромінювання – електрика*), і значна споживана потужність;
- сильна температурна залежність параметрів (відносна зміна коефіцієнта передавання за струмом, наприклад, для діодних оптопар, становить $\left(\frac{dk_I}{dT}\right)/k_I \approx -0,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$);
- високий рівень власних шумів;
- конструктивно-технологічна недосконалість, зв'язана, здебільшого, з використанням гібридної технології.

На відміну від ключових оптопар елементарні аналогові оптоелектронні кола, в яких задіяні оптопари із прямим оптичним зв'язком, характеризуються певною складністю. До їхньої структури, крім джерел світла і фотоприймачів, входять й інші активні та пасивні елементи, що несуть функціональне навантаження. При цьому на перший план висуваються схемотехнічні задачі, включаючи топологію оптоелектронних схем, здійснення багатоканальних зв'язків, які перетинаються, тощо. В оптоелектроніці ці задачі досі не мають загального розв'язку.

Дуже перспективним виявляється застосування аналогових оптоелектронних елементів разом з інтегральними лінійними схемами. У цьому

випадку найбільше функціональне навантаження припадає на оптоелектронну частину схеми, в той час як інтегральний блок виконує, здебільшого, функції лінійної підсилювальної ланки. У такому режимі величина коефіцієнта передавання аналогової оптопари більше не обмежує її використання, що дає змогу істотно розширити смугу пропускання і динамічний діапазон.

Застосування аналогових і роз'єднувальних оптопар у лінійних інтегральних схемах дає змогу спростити їхню структуру і підвищити прецизійність.

Перелічені недоліки оптопар з удосконаленням матеріалів, технології, схемотехніки поступово усуваються. Широке застосування оптопар визначається, насамперед, унікальністю переваг цих приладів.

5.5. Перспективні напрями розвитку і застосування оптопар

Перспективні напрями розвитку і застосування оптронної техніки практично визначилися. Оптопари й оптронні мікросхеми ефективно застосовують для передавання інформації між пристроями, що не мають замкнутих електричних зв'язків. Традиційно сильними залишаються позиції оптоелектронних приладів у техніці отриманні та відображенні інформації. Окреме місце в цьому напрямі займають оптронні сенсори, призначені для контролю процесів і об'єктів, достатньо різних за природою і призначенням. Помітно прогресує функціональна оптронна мікросхемотехніка, орієнтована на виконання різноманітних операцій, зв'язаних з перетворенням, накопиченням і збереженням інформації. Ефективною та корисною виявляється заміна громіздких, недовговічних і нетехнологічних (з позицій мікроелектроніки) електромеханічних виробів (трансформаторів, потенціометрів, реле) оптоелектронними приладами і пристроями. Доволі специфічним, однак у багатьох випадках виправданим і корисним, є використання оптронних елементів з енергоекономічною метою.

Під час передавання інформації оптопари використовують як елементи зв'язку. Вони, зазвичай, не несуть самостійного функціонального

навантаження. Їхнє застосування дає змогу здійснити доволі ефективну гальванічну розв'язку пристроїв керування і навантаження, які діють у різних електричних умовах і режимах. З введенням оптопар різко підвищується завадостійкість каналів зв'язку; практично усуваються «паразитні» взаємодії у колах «землі» і «живлення». Цікавим є раціональне та надійне узгодження цифрових інтегральних пристроїв з різномірною елементною базою (наприклад, *транзисторно-транзисторна логіка* (ТТЛ) з інтегральним пристроєм на МДН-транзисторах побудована на транзисторній оптопарі і т. п.). Активно використовують оптичні зв'язки у телефонних пристроях і системах. За допомогою оптопар технічно нескладними засобами вдається під'єднати до телефонних ліній мікроелектронні пристрої, призначені для виклику, індикації, контролю та інших цілей. Введення оптичних зв'язків в електронну вимірювальну апаратуру, крім корисної в багатьох відносинах гальванічної розв'язки досліджуваного об'єкта і вимірювального приладу, дає змогу також різко зменшити вплив завад, що діють у колах заземлення і живлення. Значний інтерес представляють можливості й методи використання оптоелектронних приладів і пристроїв у біомедичній апаратурі. Оптопари дають змогу надійно ізолювати хворого від дії високих напруг, що виникають, наприклад, в електрокардіографічних приладах. Безконтактне керування потужними високовольтними колами по оптичних каналах доволі зручне і безпечне у технічно складних режимах, характерних для багатьох пристроїв і комплексів промислової електроніки. У цій області сильні позиції тиристорних оптопар.

Оптопари та оптронні мікросхеми займають міцні позиції в безконтактній дистанційній техніці оперативного отримання і точного відображення інформації щодо характеристик і властивостей доволі різних (за природою і призначенням) процесів і об'єктів. Унікальними можливостями щодо цього володіють оптопари з відкритими оптичними каналами. Серед них оптоелектронні перемикачі, які реагують на перетин оптичного каналу непрозорими об'єктами, і відбивальні оптопари, у яких вплив світловипромінювачів на фотоприймачі цілковито зв'язаний з відбиванням випромінюваного потоку від зовнішніх об'єктів. Коло застосувань оптопар з

відкритими оптичними каналами широке і різноманітне. Уже в 60-ті роки ХХ ст. оптопарі подібного типу ефективно використовували для реєстрації предметів і об'єктів. Під час такої реєстрації, характерної, передусім, для пристроїв автоматичного контролю і підрахунку об'єктів, а також для виявлення та індикації різноманітних дефектів, важливо чітко визначити місцезнаходження об'єкта або відобразити факт його існування. Функції реєстрування оптопарі виконують надійно й оперативно.

Потужність випромінювання, генерованого світлодіодом, і рівень фотоструму, що виникає в лінійних колах з фотоприймачами, прямо пропорційні до струму електричної провідності випромінювача. Отож, по оптичних (безконтактних, дистанційних) каналах можна отримати цілком достовірну інформацію щодо процесів в електричних колах, гальванічно зв'язаних з випромінювачем. Найефективнішим виявляється використання світловипромінювачів оптопар як сенсорів електричних змін у потужнострумових, високовольтних колах. Достовірна інформація щодо подібних змін важлива для оперативного захисту джерел і споживачів енергії від електричних перевантажень. Оптопарі успішно діють у високовольтних стабілізаторах напруг, де вони створюють оптичні канали негативних зворотних зв'язків. Розглянутий стабілізатор належить до пристрою послідовного типу, причому регулюючим елементом є біполярний транзистор, а кремнієвий стабілітрон діє як джерело опорної (еталонної) напруги. Елементом, який порівнює, слугує світлодіод. Якщо вихідна напруга у схемі зростає, то збільшується і струм провідності світлодіода. Фототранзистор оптопарі, впливаючи на транзистор, гасить можливу нестабільність вихідної напруги.

У комплексі технічних рішень, орієнтованих на підвищення ефективності та якості пристроїв автоматики, радіотехніки, електрозв'язку, промислової і побутової електроніки, доцільним і корисним заходом є заміна електромеханічних виробів (трансформаторів, реле, потенціометрів, реостатів, кнопкових і клавішних перемикачів) компактнішими та довговічнішими швидкодіючими аналогами. Провідна роль у цьому напрямі сьогодні належить

оптоелектронним приладам і пристроям. Справа в тому, що доволі важливі технічні переваги трансформаторів і електромагнітних реле (гальванічна розв'язка кіл керування і навантаження, надійне функціонування в потужних, високовольтних, потужнострумових системах) властиві й оптопарам. Водночас оптоелектронні вироби суттєво перевершують електромагнітні аналоги за надійністю, довговічністю, перехідними і частотними характеристиками. Керування компактними та швидкодіючими оптоелектронними трансформаторами, перемикачами, реле успішно здійснюють за допомогою інтегральних мікросхем цифрової техніки без спеціальних засобів електричного узгодження.

Лабораторна робота 5.1

Вивчення роботи різних видів оптопар

Мета роботи: вивчити принципи роботи оптопар із внутрішнім прямим оптичним та зовнішнім оптичним зв'язком, ознайомитись з їхніми характеристиками.

Прилади і матеріали: набір оптопар, експериментальний макет для вимірювання електрофізичних та світлових характеристик дискретних елементів оптоелектроніки.

Хід роботи

1. Вивчити принципи роботи оптопар.
2. Отримати від викладача різного типу оптопари із внутрішнім прямим оптичним зв'язком та на експериментальному макеті зняти їхні вольт-амперні характеристики.
3. За отриманими вольт-амперними характеристиками для кожної оптопари визначити її тип.
4. Змінюючи величину світлового потоку в інфрачервоній області спектра на фоторезисторі в оптопарі із зовнішнім оптичним зв'язком (див. схему на рис. 5.8), виміряти величини світлового потоку зі світлодіода у видимій області спектра та обрахувати ефективність перетворення інфрачервоного випромінювання у видиме.
5. У звіті подати результати вивчення оптопар та зробити відповідні висновки.

Тестові завдання та контрольні питання до розділу 5

1. У якому році Льюбнер вперше сформулював ідею створення та застосування оптопар:

- 1950;
- + 1955;
- 1960;
- 1965;
- 1970?

2. Коефіцієнт передавання за струмом у резисторних оптопарах становить:

- 3 %;
- + 30 %;
- 300 %;
- 500 %;
- 100 %.

3. Коефіцієнт передавання за струмом у діодних оптопарах становить:

- + 3 %;
- 30 %;
- 300 %;
- 500 %;
- 100 %.

4. Коефіцієнт передавання за струмом у транзисторних оптопарах становить:

- 5 %;
- 30 %;
- + 150 %;
- 500 %;

- 700 %.

5. Коефіцієнт спектрального узгодження оптопар – це міра узгодження спектральних характеристик ...

- випромінювача та приймача;
- + випромінювача, оптичного каналу та приймача;
- випромінювача та оптичного каналу;
- оптичного каналу та приймача.

6. Час перемикання резисторних оптопар становить:

- + 5мс;
- 5 мкс;
- 5 нс;
- 5 пс.

7. Час перемикання діодних оптопар становить:

- 5мс;
- 5 мкс;
- + 5 нс;
- 5 пс.

8. Час перемикання транзисторних та тиристорних оптопар становить:

- 5мс;
- + 5 мкс;
- 5 нс;
- 5 пс.

9. Оберіть із наведеного переліку тип оптопар, в яких неможлива реалізація зворотного внутрішнього оптичного зв'язку:

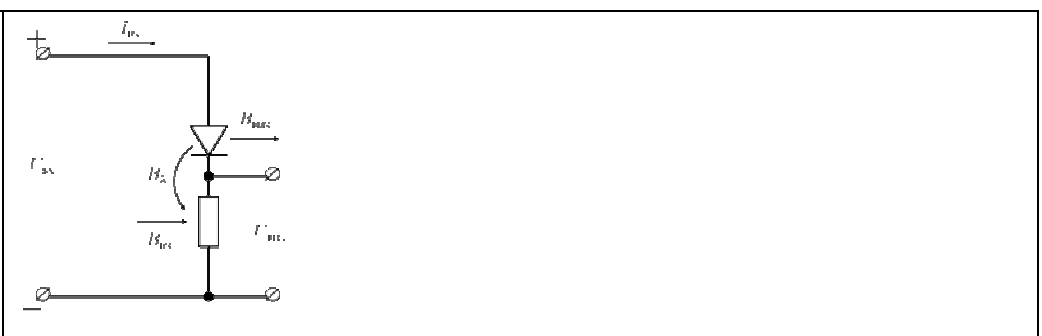
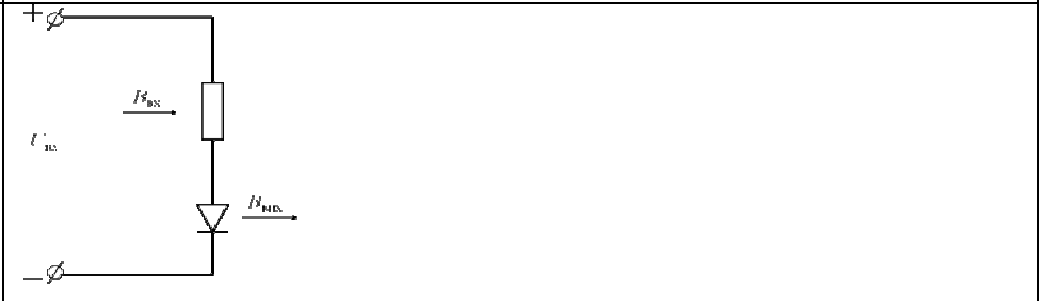
- + оптопари з прямим оптичним зв'язком;
- оптопари з електрооптичним зв'язком;

- оптопары з електричним зв'язком.

10. Оберіть із наведеного переліку тип оптопар, в яких можлива реалізація зворотного внутрішнього оптичного зв'язку:

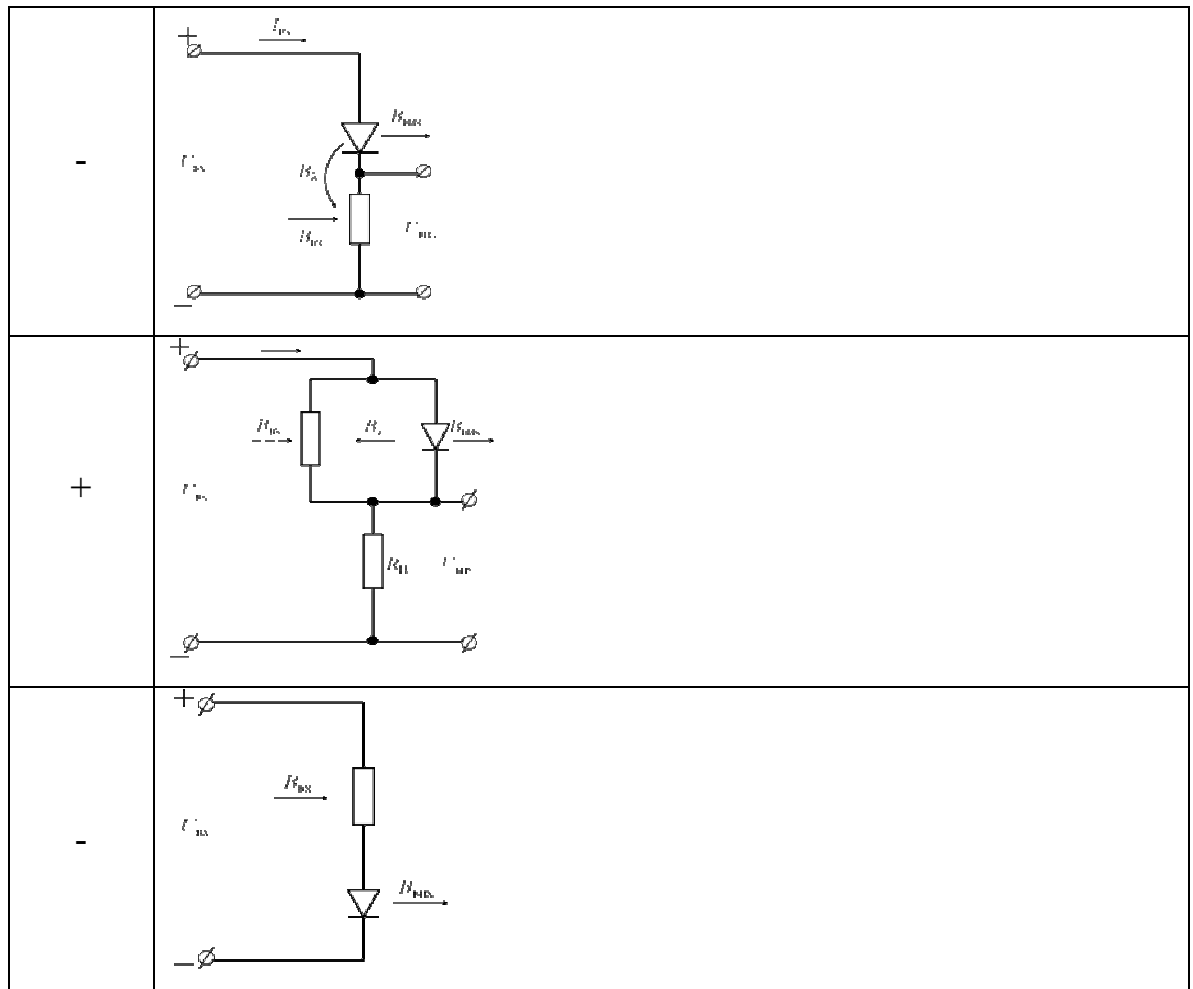
- оптопары з прямим оптичним зв'язком;
- + оптопары з електрооптичним зв'язком;
- оптопары з електричним зв'язком.

11. Оберіть серед наведених схему оптопары із позитивним зворотним оптичним зв'язком:

+	
-	
-	

12. Оптопары, їхні переваги як елементів зв'язку. Функція передавання оптопары. Спектральне узгодження.

13. Оберіть серед наведених схему оптопарі із негативним зворотним оптичним зв'язком:



14. Спеціальні типи оптопар, їхня конструкція. Оптопарі з відкритим оптичним та з керованим оптичним каналами. Активні оптопарі.

15. Принципова схема оптопарі. Можливість реалізації оптопарою математичних операцій.

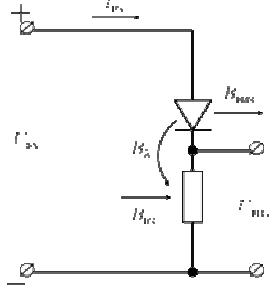
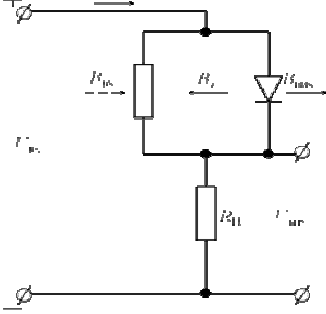
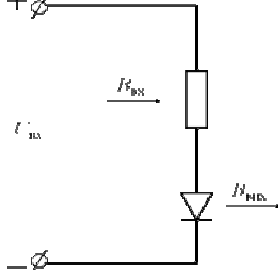
16. Резисторні оптопарі.

17. Діодні оптопарі.

18. Транзисторні та тиристорні оптопарі.

19. Інтегральне виконання оптопар.

20. Оберіть серед наведених схему оптопари із зовнішнім оптичним зв'язком:

-	
-	
+	

6. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ РІЗНИМИ ТИПАМИ ІНДИКАТОРНИХ ПРИСТРОЇВ

6.1. Фізичні принципи в індикаторній техніці

6.1.1. Системи відображення інформації. Індикатори. Для забезпечення зв'язку між людиною—оператором і радіоелектронним апаратом використовують пристрої візуального відображення інформації, які перетворюють різні дані про стан параметрів контрольованого радіоапарата у видиме зображення (зорову інформацію). Пристрої візуального відображення інформації можуть вирішувати як найпростіші задачі контролю стану радіоапарата (наприклад, «Увімкнуто», «Вимкнуто», «Стоп» та ін.), так і складніші, коли на ці пристрої накладаються функції відображення графічної, текстової, цифрової, умовно-знакової інформації.

Для відтворення цифрових, літерних і знакових сигналів застосовують *індикаторні прилади*, які перетворюють електричні сигнали у візуальну інформацію і які слугують основою для побудови пристроїв візуального відображення інформації.

Серед систем відображення зорової інформації вирізняють пристрої колективного, групового й індивідуального користування. Типовими прикладами цих пристроїв є світлові табло великого стадіону, екран телевізора, циферблат електронних наручних годинників. Крім багатьох інших моментів, ці пристрої розрізняють насамперед за розмірами використаних у них індикаторних приладів.

Оптоелектронні індикатори знайшли широке застосування вже з початку 70-х років практично у всіх галузях людської діяльності, включаючи побут (годинник, калькулятори і т. п.). З впровадженням у практику цифрових пристроїв стрілочні прилади і газорозрядні лампи були усунуті на периферію індикаторної техніки, де не зникли, а зайняли свої ніші завдяки простоті і невибагливості. Їхнє місце (і не тільки їхнє, а своє власне, як цифрових і

графічних) зайняли світлодіодні, а згодом – і рідкокристалічні індикатори. Знайшли своє місце в цій області також плазмові та люмінесцентні індикаторні панелі та дисплеї.

За виглядом відображуваної інформації індикатори поділяють на одиночні, цифрові, літерно-цифрові, стрілкові (шкальні), мнемонічні і графічні. Як *одиночні* сьогодні, зазвичай, використовують світлодіоди різних кольорів свічення, оскільки вони енергоощадні, довговічні і не вимагають особливої конструктивної прив'язки – припаяні до будь-якої електронної плати двома ніжками, вони вже готові до роботи. Жоден електронний прилад практично не обходиться без таких індикаторів, якщо він видає хоча б інформацію про вмикання свого живлення. Вище ми вже детально розглядали випромінюючі діоди, отож немає необхідності їхнього окремого розгляду як індикаторів.

Великим розмаїттям вирізняються *цифрові, літерно-цифрові і шкальні* індикатори. Їхнє призначення зрозуміло з назв. Розрізняють їх за конструктивним виконанням, розмірами, принципом дії (газорозрядні, люмінесцентні, світлодіодні, рідкокристалічні). Найпоширеніші сьогодні світлодіодні та рідкокристалічні як найенергоощадніші. Люмінесцентні мають яскравіше свічення; їх застосовують, наприклад, у цехових умовах, де спостереження за панеллю керування можуть вести зі значної відстані (у кілька метрів), якщо оператор відходить від пульта до будь-якої зони обслуговування машини, скажімо, друкарської або оздоблювальної.

Найтиповішими у цьому класі є однорозрядні (за необхідності з них набирають індикатори будь-якої розрядності) семисегментні *цифрові* індикатори, в основі яких, наприклад, світлодіодна лінійка, проте з характерним розташуванням випромінювачів – світлодіоди виконані у вигляді подовжених цеглинок, розташованих у прямокутному віконці у формі вісімки – по два вертикально ліворуч і праворуч, та горизонтально – всередині, зверху і знизу фігури, що дає змогу синтезувати будь-яку цифру від 0 до 9.

Приблизно так виглядають *шкальні* індикатори, тільки елементи розміщують в одну лінію, що, як метричну лінійку, можна розташовувати, за необхідності, горизонтально або вертикально. З таких шкал зручно збирати

індикаторну панель для спостереження за значеннями безлічі однотипних параметрів, наприклад, значеннями зонального подання фарби в друкарських машинах (фарбоподавальний вузол кожної кольорової секції друкарської машини може мати по 20-40 зон локального регулювання подання фарби).

Літерно-цифрові індикатори частіше виготовляють на основі матриць (наприклад, світлодіодних), а не сегментних лінійок, оскільки зображення літер різноманітніше, ніж у цифр. Окремі індикатори (зазвичай, 5×7 елементів), зібрані в лінію або табло, дають змогу створювати вже рядки або сторінки текстів таблиць. Такими індикаторами оснащують пульти керування деяких поліграфічних машин (наприклад, машин фірми *Herauf*).

Мнемонічні індикатори виконують як у формі окремих символів (трикутник, квадрат, коло, прямокутник), так і у вигляді табло з набором символів, знаків і схем, що відображають в умовній і зрозумілій для оператора формі окремі технічні вузли або склад машини загалом. Одиночні індикатори виконують частіше на світлодіодній основі, а табло – на люмінесцентній або плазмовій. У таких індикаторах один із двох електродів виконують у формі зображуваного символу, а другий, прозорий, перекриває габаритну площу фігури або всього табло. Прикладом мнемонічних світлодіодних індикаторів можуть слугувати індикатори стану різних систем автомобіля на панелі керування водія, а плазмових індикаторів – табло на пультах керування СРС друкарських машин німецької фірми *Heidelberg*.

Графічні індикатори, зазвичай, використовують у складніших засобах відображення інформації, представляючи літери, цифри, символи, графіки й інші зображення без втрати інформації в місцях дотику. Призначені для роботи у складі цифрових систем, вони мають звичайну кількість елементів, погоджене з бінарною системою числення (8×8 , 16×16 і т. д.); їх створюють на базі світлодіодних, рідкокристалічних або газорозрядних матриць.

Прикладом використання графічних індикаторів може слугувати панель керування системи централізованого контролю офсетного друкарського процесу (розробка ВНДІ поліграфії), у якій застосовані чотири газорозрядні панелі типу ІМГ (*індикатор матричний газорозрядний*) для відображення

даних щодо характеристик відбитків і параметрів процесу на машинах типу ПОК84. За необхідності відображення великих масивів інформації як індикатори застосовують екрани та дисплеї різних конструкцій і принципів дії.

Чотири покоління індикаторних приладів можна виокремити на основі ретроспективного і перспективного аналізу їхнього розвитку.

Перше покоління характеризується невеликою кількістю використовуваних фізичних принципів, низькими значеннями к. к. д. і яскравості, малими інформаційними можливостями ($N_{\text{ел}} \approx 1 - 10$), великими габаритами, одноколірністю, високою керуючою напругою, малою довговічністю ($< 10^3$ год), високою вартістю, обмеженим застосуванням. Типовими представниками цього покоління є газорозрядні пакетні індикатори (типу «Ніксі»), перші зразки електронно-променевих індикаторів.

До типових представників *другого покоління* індикаторних приладів варто зачислити напівпровідникові і рідкокристалічні індикатори, багаторозрядні люмінесцентні і плазмові монодисплеї. Ці прилади характеризуються високою яскравістю свічення і контрастністю, економічністю, прийнятною довговічністю (10^4 год), невисокою вартістю. Ці властивості, а також підвищена інформаційна ємність ($N_{\text{ел}} \approx 10 - 10^3$), сумісність з інтегральними схемами керування забезпечують широке і різноманітне застосування індикаторів другого покоління. Як тенденцію, що виявляється в окремих представниках цього покоління, ці прилади характеризує багатоколірність. Перехід від першого покоління до другого уможливили завдяки залученню нових фізичних ефектів і широкому та послідовному впровадженню площинних конструкцій і групових методів обробки.

Третє покоління базується здебільшого на тих же фізичних принципах, що й друге, однак удосконалення нових матеріалів і технології дало змогу досягти ще більшої енергоощадності та інформаційної потужності ($N_{\text{ел}} \approx 10^4 - 10^5$); довговічність перевищила $10^4 - 10^5$ год; багатоколірність стала обов'язковою властивістю табло й екранів. Об'єднання з пристроєм керування позбавило споживача труднощів використання. Певним прототипом

виробу третього покоління могла б слугувати триколірна плазмова панель, істотно удосконалена завдяки енергоощадності, мініатюризації схем керування, підвищенню довговічності і надійності та зниженню вартості.

Четверте покоління індикаторних приладів сміливо увійшло в наше життя на початку ХХІ століття. Це цілком тверdotільні квазімонолітні всеколірні універсальні екрани з вбудованим керуванням, площинної конструкції з робочою площею від 1 до 10^4 см². Термін їхньої служби перевищує $(5-7) \times 10^4$ год. Електронне обрамлення екранів використовує нові методи звертання за інформацією. Не виключено також, що у цих приладах частково проявляються риси пристроїв відображення наступних поколінь, зокрема здатність відтворення об'ємних голографічних образів. Створення пристроїв четвертого покоління зажадало не тільки докорінної зміни технології (сполучення групової обробки з безперервними процесами), а й відкриття нових фізичних ефектів і синтезу нових матеріалів.

6.1.2. Фізіологічні основи індикаторної техніки. *Людський зір* як головний «споживач» інформації, що продукують індикаторні прилади, відрізняється винятковою своєрідністю. Видима область становить дуже малу частину оптичного діапазону довжин хвиль; чутливість ока максимальна в центрі цієї області і різко спадає до її країв. Ця властивість зору відображається у *функції видимості* (рис. 6.1), яка є усередненою спектральною характеристикою ока як фотоприймача. Функція видимості $V(\lambda)$ – це відносна спектральна крива ефективності монохроматичного випромінювання. Вона показує, як око сприймає випромінювання різного спектрального складу. $V(\lambda)$ – величина, обернено пропорційна до монохроматичних потужностей, які дають однакове зорове відчуття, причому вплив потоку випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 555$ нм умовно приймають за одиницю. Тобто, у максимумі спектральної чутливості ($\lambda_{\max} = 555$ нм) 1 Вт випромінювання викликає зорове відчуття, еквівалентне до відчуття від світлового потоку 680 лм. За інших довжин хвиль величина світлового еквівалента випромінювання менша; для широкосмугового білого світла величина f_λ близька до 360 лм/Вт.

Визначити довільну світлову величину Q (потік, сила світла, яскравість і т. д.), за спектральною густиною аналогічної їй енергетичної величини $Q_{e\lambda}(\lambda)$ можна за загальною формулою:

$$Q = 680 \int_{0,38}^{0,77} V(\lambda) Q_{e\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (6.1)$$

де $V(\lambda)$ – функція видимості ока, 680 – експериментально встановлений коефіцієнт (потік випромінювання потужністю 1 Вт з довжиною хвилі $\lambda = 555$ нм відповідає 680 лм світлового потоку). Наприклад: сила світла

$$I = 680 \int_{0,38}^{0,77} V(\lambda) I_{e\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (6.2)$$

яскравість

$$L = 680 \int_{0,38}^{0,77} V(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (6.3)$$

Крива рис. 6.1 доволі умовна: у сутінках спектр деформується так, що $\lambda_{\max}$ зсувається вліво на 50–60 нм; дитяче око сприймає світло, починаючи з $\lambda \approx 315$ нм; збільшення яскравості джерела розширює границі видимості, наприклад, концентроване ІЧ випромінювання GaAs-лазера ($\lambda \approx 860$ нм) сприймається як червоне. Незважаючи на все це і численні індивідуальні особливості людей, крива рис. 6.1 гостована і слугує основою інженерної фотометрії; саме вона слугує орієнтиром при конструюванні випромінювачів і фотоприймачів.

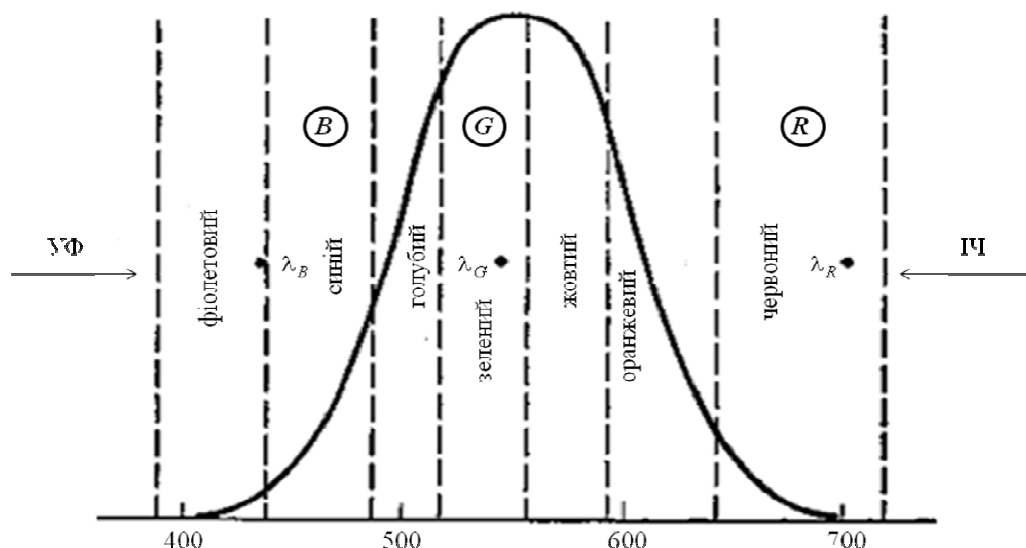


Рис. 6.1. Функція видимості людського ока (показані умовні границі різних кольорів)

Здатність ока пристосовуватися до сприйняття різних за яскравістю об'єктів характеризується логарифмічним законом Вебера—Фехнера (за іменами німецьких учених: анатома і фізіолога Ернста Генріха Вебера (*Weber*) і фізика, психолога і філософа Густава Теодора Фехнера (*Fechner*), що зв'язує фізичну яскравість джерела L з його яскравістю, яка фізіологічно відчувається, $L_{\text{фзл}} = a \ln I + b$, де a і b - константи. Цей закон базується на спостереженні німецького фізіолога Е. Вебера, який установив 1830–34 рр., що сприймається не абсолютний, а відносний приріст сили подразника (світла, звуку, вантажу, що давить на шкіру і т. п.):

$$\frac{\Delta I}{I} = \text{const.}$$

Наприклад, за вихідної маси вантажу 75 г, яка давить на шкіру, людина відчуває її збільшення на 2,7 г, за вихідної маси 150 г — приріст у 5,4 г. Німецький фізик Г. Фехнер 1858 року математично обробив результати досліджень і вивів загальну формулу: $S = a \ln I + b$ (де S — інтенсивність відчуття; I — сила подразника; a , b — постійні). Закон Вебера-Фехнера виконується тільки за середніх інтенсивностей подразника, сильно спотворюючись за граничних або дуже великих його інтенсивностей.

Тому динамічний діапазон яскравостей, які сприймає око, винятково широкий і простягається від 10^{-7} кд/м² (у темряві) до 10^5 кд/м² (за яскравого зовнішнього освітлення); у цьому випадку в інтервалі 10^{-7} –1 кд/м² працює «сутінковий» механізм зору і колірного сприйняття немає.

Різні за яскравістю джерела викликають неоднакові зорові відчуття; практично людина розрізняє не більше 8–10 градацій яскравості (півтонів), тому, якщо інформація передається зміною яскравості індикатора, то не можна використовувати понад 4–5 градацій, а для надійного передавання — понад 2 (чорне–біле).

Крім яскравості джерела, людина оцінює і його просторові характеристики: *роздільна здатність ока* (кутова) становить приблизно 1' (тобто розділення на відстані 10 м двох штрихів, розділених прямокутником у

3 мм). Для швидкого і безпомилкового сприйняття простого об'єкта (цифри, літери тощо) потрібно, щоб кутові розміри цього об'єкта сягали 1', що для оптимальної висоти знаку H дає

$$H \approx (0,5 \dots 1) \cdot 10^{-2} R_{i-o}, \quad (6.4)$$

де R_{i-o} – відстань від ока до індикатора.

Звідси, наприклад, для індикатора, вбудованого в окуляр далекоміра ($R_{i-o} \approx 5\text{--}10$ см) допустиме $H \sim 0,5$ мм, для індикатора наручних годинників – 3 мм, а для крупноформатних дисплеїв – 10–20 мм. За малої яскравості (освітленості) індикатора величину R необхідно обирати трохи більшою, ніж дає (6.4).

Повний кут зору близький до 120° (по горизонталі) і 90° (по вертикалі); огляд для зони максимального розділення характеризується кутами 20° і 15° . Відповідно до цього обирають подовжений у горизонтальному напрямі формат екрана (у телебаченні і кіно відношення його сторін становить 4:3).

Крім яскравості і розмірів індикатора, що беруть участь у його сприйнятті, важливу роль відіграє *контрастність* відтворюваного знаку. Кількісно яскравісний контраст визначають як $K = (L - L_{\text{фон}})/L$, де L , $L_{\text{фон}}$ — яскравості джерела і фону. Фактично для якісного сприйняття важлива не стільки величина K , скільки її перевищення над граничною для даних умов контрастністю $K_{\text{пор}}$. Для гарної видимості необхідно, щоб кількість граничних контрастів ($K/K_{\text{пор}}$) сягала 15–30. Залежність порогу зорового сприйняття від кутових розмірів, яскравості і контрастності об'єктів, що спостерігають, представлено на рис. 6.2. Заштрихована поверхня відповідає порогові зорового сприйняття: крапки, що лежать нижче від неї, відповідають умовам, які не викликають зорових відчуттів.

Оцінка часових характеристик світлового сигналу пов'язана з *інерційністю* зору. З'ясовано, що за частоти світлових потоків понад 15–50 Гц очі перестають відчувати мерехтіння за *законом Тальбота*: удавана яскравість мерехтливого джерела дорівнює середній за період спостереження яскравості. Закон Тальбота є основою для організації мультиплексних схем керування індикаторами.

Розглянуті особливості зору під час оцінювання яскравісних, просторових, часових характеристик світлових сигналів фактично і визначають основні вимоги до індикаторів. До цього ще додають особливості сприйняття кольору.

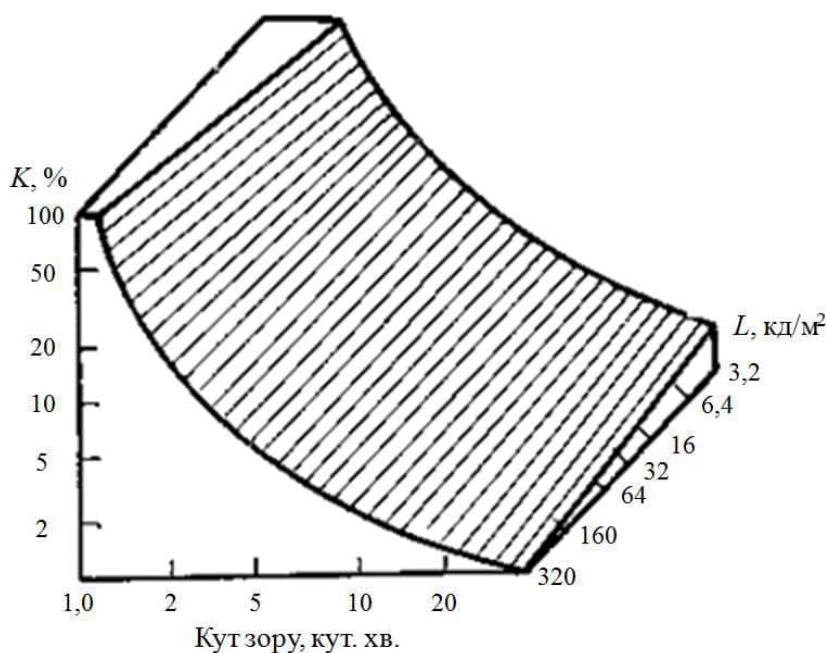


Рис. 6.2. Співвідношення між кутовими розмірами об'єктів, які спостерігають, яскравістю і контрастністю для порогу зорового сприйняття за тривалості впливу 0,3 с [18]

Сприйняття кольору є найбільшим привілеєм людини серед усіх представників тваринного світу. Лише колірне розфарбовування робить навколишній світ настільки неповторним і прекрасним, яким ми його сприймаємо. Не існує такого зовнішнього подразника, який би наближався до кольору за числом різних градацій: колірні каталоги містять до 10^7 різних відтінків! Для індикаторної техніки, спрямованої на найповніше використання можливостей зору і до його максимального задоволення, проблему колірності вважають найважливішою.

Сучасне вчення про колір базується на тому експериментально встановленому факті, що «елементарні фотоприймачі» очної сітківки – колбочки – містять рецептори трьох видів, кожен з яких має підвищену чутливість у червоній, зеленій і синій областях спектра. Відповідно до цього говорять про три основні кольори – *R* (англ.), *G* (англ.), *B* (англ.), об'єднання

яких дає змогу синтезувати загалом колірну гаму. Математично це означає, що колірне відчуття можна розглядати як вектор у тривимірному просторі, осями якого є R -, G -, B -вектори; прийнято $\lambda_r = 700$ нм, $\lambda_g = 546$ нм, $\lambda_b = 436$ нм (див. рис. 6.1).

Спрощена колірна характеристика об'єкта можлива й у двовимірній формі, що відображено крапкою на колірному графіку *Міжнародної комісії з освітлення* (МКО) (рис. 6.3). Значення колірних індексів джерела (координат x і y) дає змогу знайти дві його найважливіші характеристики: колірну тональність, обумовлену домінуючою довжиною хвиль випромінювання (λ_f для джерела F на рис. 6.3); колірну насиченість, обумовлену чистотою світла (виражене у відсотках відношення відрізків $W-F$ і $W-\lambda_f$ на рис. 6.3).

Опорна точка колірного графіка – точка $W(x = y = 1/3)$ – відповідає білому світлу, для якого характерні відсутність будь-якої тональності і нульова чистота кольору. Практично оптимальне біле світло виходить із суміші трьох наведених вище базових кольорів. Випромінювачі, розташовані на огинаючій кривій колірного графіка або поблизу неї (така більшість світловипромінюючих діодів), мають чистоту світла, близьку до 100 % (зазначимо, що для ламп розжарювання вона не перевищує 10–20 %).

Численні психофізичні експерименти засвідчують, що за найкращої кольоророздільної здатності око вирізняє шість головних кольорів: білий, чорний, червоний, жовтий, зелений, синій. Отож багатобарвні індикатори, що виконують функцію відображення інформації за допомогою використання різних кольорів, не повинні використовувати понад шість кольорів свічення, а ще краще – не більше 3–5. За сильного зовнішнього освітлення білим світлом зручні червоний, жовтий, синій, пурпуровий кольори; за слабого освітлення до них можна додати білий і зелений. Для індикаторів з елементами малого розміру оптимальні білий або жовтий кольори. Найконтрастніші області спектра для червоного, жовтого, зеленого кольорів лежать, відповідно, у діапазоні 610–630 нм, 588–598 нм і менше 548 нм.

Для систем відображення потрібні як насичені контрастні кольори, так і малонасичені півтонові. Як впливає з колірного графіка (див. рис. 6.3), для

синтезу останніх необхідні джерела синього випромінювання: змішування чистих кольорів з області червоний – зелений дає тільки насичені кольори.

Якщо, зрештою, наголосити, що значний відсоток людей володіє різними вродженими аномаліями колірного зору, то стають зрозумілими труднощі створення високонадійних багатокольорових індикаторів.

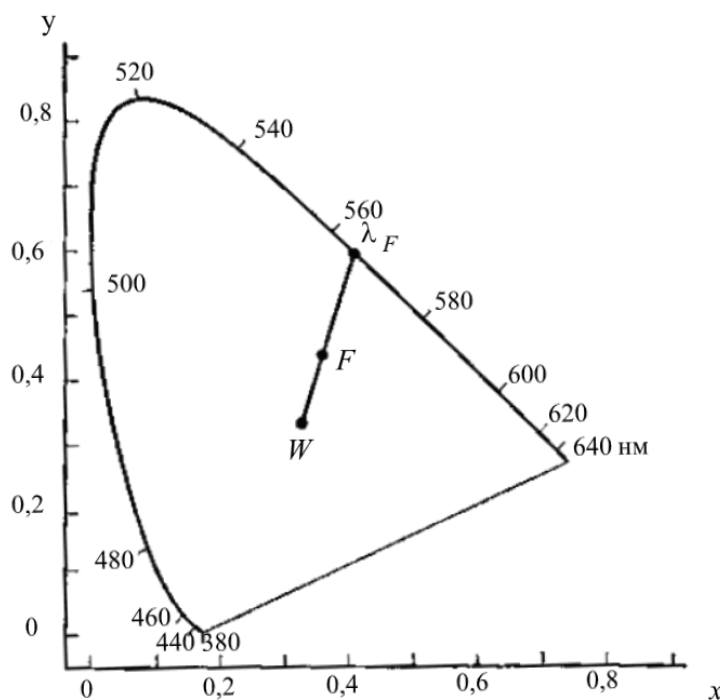


Рис. 6.3. Колірний графік МКО [18]

Зазначимо, що вчення про людський зір значно складніше за будь-яку іншу область знань і сказане тут є лише першим наближенням до дійсності. Психофізичний простір колірного сприйняття не є лінійним, отож технічно використовувані принципи пропорційності та адитивності колірних сигналів не відображають реальність. Кольоророзділення (і його висока чутливість) – не внутрішня властивість окремих колбочок, а результат спільної дії багатьох елементів сітківки, підсумок просторового і тимчасового інтегрування та усереднення.

Можна вважати строго встановленим, що для створення системи кольоровідтворення вимагається змішання не трьох базових кольорів, а принаймні десяти–дванадцяти. Усе це пояснює численні розбіжності між рекомендаціями і висновками МКО (які й самі постійно змінюються) та колірними сприйняттями різних спостерігачів.

6.1.3. Фізичні принципи роботи індикаторів. Фізичні ефекти, які придатні для використання в індикаторній техніці, винятково різноманітні. Перелічимо основні з них, дотримуючись хронологічного принципу [1]:

1. Свічення вольфрамової нитки, поміщеної у вакуум і розжареної пропусканням через неї електричного струму (індикатори розжарення).
2. Свічення, що супроводжує електричний розряд у газах (газорозрядні індикатори).
3. Передпробивна електролюмінесценція порошкових люмінофорів у змінному електричному полі (електролюмінесцентні індикатори).
4. Інжекційна люмінесценція монокристалічних напівпровідників з *p-n*-переходами (напівпровідникові індикатори).
5. Випромінювання фотолюмінофорів, нанесених на напівпровідникові випромінювачі; можливі два варіанти: антистоксовий люмінофор на ІЧ випромінювачі і «звичайний» фотолюмінофор на випромінювачі синьо-фіолетового діапазону (гіпотетична модель).
6. Електролюмінесценція тонких полікристалічних напівпровідникових плівок у постійному та змінному електричних полях (тонкоплівкові електролюмінесцентні індикатори).
7. Низьковольтна катодолюмінесценція (вакуумні люмінесцентні індикатори).
8. Електрооптичні ефекти в рідких кристалах (рідкокристалічні індикатори).
9. Зміна забарвлення речовини за пропускання через неї електричного струму (електрохромні індикатори).
10. Електрооптичні явища в сегнетоелектриках, які володіють ефектом подвійного променезаломлення (сегнетоелектричні індикатори).
11. Гальванічне осадження і розчинення тонкоплівкових металічних рисунків (електролітичні індикатори).
12. Переміщення заряджених колоїдних частинок під дією постійного електричного поля (електрофоретичні індикатори).
13. Різноманітні зворотні електро- і фотохімічні процеси (електрохімічні

індикатори).

14. Зміна оптичних властивостей речовини за переходу з рідкої фази в пароподібну під час нагрівання електричним струмом (парорідинні індикатори).

Порівняння цих ефектів дає змогу зробити низку узагальнень:

- усі види індикаторів можна поділити на індикатори з активним і пасивним растрами; до першої групи належать прилади на основі світлогенераційних ефектів (1–7), а прилади другої групи вимагають зовнішньої підсвітки (8–14);

- у світлогенераційних індикаторах виокремлюють прилади з прямим (2, 3, 4, 6) і двоступеневим (1, 5, 7) перетворенням електричної енергії у світлову;

- індикатори з пасивним растром можуть базуватися на зміні коефіцієнтів відбивання (8, 11, 12, 13, 14), пропускання (8, 12, 13), поглинання (9, 13) світла і на обертанні площини поляризації (8, 10);

- керування індикаторами можна здійснювати електричним струмом (1, 4, 5, 6, 14), напругою (2, 3, 6, 7, 8, 10, 12), зарядом (9, 11);

- як активні середовища в індикаторах використовують метали (1, 11), монокристали (4, 5), тверді полікристалічні речовини (6, 9, 10), порошки (3, 7), рідини (8, 12), гази (2, 14).

Сьогодні найширше використовують напівпровідникові, газорозрядні і рідкокристалічні індикатори.

Застосування індикаторів характеризується, насамперед, тим, що саме цими приладами електроніка широко входить у побут людини. Можна згадати такі вироби, як електронні цифрові годинники, калькулятори, автомобільні індикаторні панелі, шкали радіоприймачів, покажчики програм телевізорів, індикатори кухонного устаткування, телевізори, монітори, домашні кінотеатри і т. д.

У промисловості ці прилади є обов'язковим елементом периферійних пристроїв ЕОМ, автоматизованих систем керування, контрольно-вимірювальної апаратури, сервісних пристроїв транспортних систем і систем зв'язку. У військовій техніці системи відображення інформації необхідні на командних

пунктах, у різних навігаційних пристроях, системах наведення, у приладових наборах літаків, танків, підводних човнів тощо.

Усе це визначає масове виробництво індикаторних приладів: річний випуск приладів перевищує 1 млрд; обсяг виробництва майже такий, як у діодів усіх типів; доволі високі темпи зростання – подвоєння обсягу за 5–6 років.

Індикаторні засоби відіграють вирішальну роль в еволюції від телефону до терміналу і до відеотелефону; поступово знаходять своє вирішення проблеми твердотільного телебачення, електронної книги і газети. Не виключено, що вдосконалення напівпровідникових світловипромінюючих діодів сприятиме, зрештою: відтворенню тих мільйонів відтінків, що налічують найповніші колірні каталоги; вирішенню усіх сьогоднішніх проблем колориметрії; народженню нових видів образотворчого мистецтва. Усе це активно впливатиме на формування естетичного світу людини.

6.2. Екрани та дисплеї

6.2.1. Екрани на електронно-променевих трубах. Комп'ютерні перетворення оцифрованого зображення відбуваються за постійного контролю результатів обробки інформації на екрані монітора.

Фахівці проводять за дисплеями основний робочий час, і параметри цих пристроїв відбивають не тільки на якості роботи, а й відображаються на здоров'ї оператора. З іншого боку, монітори можуть експлуатувати в різних виробничих умовах – від стерильних провітрюваних приміщень, захищених навіть від перепадів природного світла, до середовища друкарських цехів (за динамічного моніторингу якості продукції в процесі друкування). Для кожного конкретного випадку сьогодні можна підібрати монітор з оптимальними параметрами: розміром екрана, розділенням, кроком пікселів, конструктивним виконанням, що відповідає наборам калібрувань і т. п.

Хронологічно спочатку використовували монітори з кінескопами (на *електронно-променевих трубах* – CRT). Уперше розробку «катодної телескопії» з використанням електронно-променевої трубки для одержання

зображень упродовж 1907–1911 рр. здійснив викладач Петербурзького технологічного інституту Борис Львович Розинг. Пристрій кольорового кінескопа схематично наведено на рис. 6.4.

Електронні прожектори, розташовані усередині скляної колби кінескопа (по одному на кожен колір *RGB*), генерують потоки електронів, модульовані за потужністю керуючими відеосигналами. Для того, щоб електронні промені досягли поверхні екрана кінескопа і змусили світитися нанесені на неї люмінофорні крапки, що утворюють *RGB*-тріади, потрібна висока напруга, порядку 16–25 кВ. Кожна тріада на екрані утворює образотворчий елемент – *піксель*. Завдяки точному фокусуванню електронних пучків, прецизійному виготовленню тіньової маски (кількість отворів у ній відповідає кількості пікселів на екрані) і точному зведенню трьох променів у фокус за проходження отвору в масці вдавалося розташовувати крапки на екрані з кроком 250–300 мкм. Очевидно, що чим менший крок, тим вища роздільна здатність екрана.

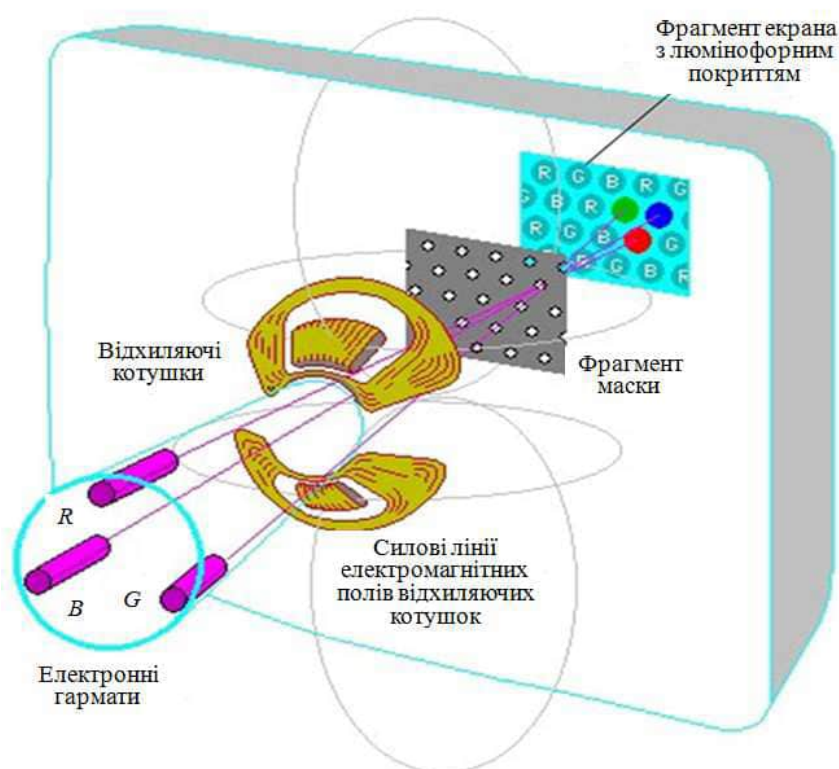


Рис. 6.4. Схема пристрою кінескопа [8]

Нагадаємо, що роздільна здатність людського ока (здатність розпізнавати два близько розташованих елементи окремо), як уже зазначено

вище, у середньому дорівнює одній кутовій хвилині ($1/60$ кутового градуса). З урахуванням цього факту, для різних умов спостереження за зображенням необхідно домагатися різного екранного розділення. Найкращими умовами спостереження для людини вважають кути огляду 20° по горизонталі і 15° по вертикалі. У телевізійних екранів, скажімо, співвідношення сторін дорівнює 4:3 (тобто 20:15), а кількість елементів розкладання на телеекрані приблизно становить 640×480 (для стандартів різних країн існують невеликі розбіжності). Таке екранне розділення виправдане для телебачення, оскільки телевізор зазвичай дивляться з відстані 1,5–2 м.

Операторові монітора теж бажано знаходитися від екрана на безпечній відстані. Електромагнітні поля, рентгенівське випромінювання, статична електрика, мерехтіння кадрів і відблиски на екрані від зовнішніх джерел – весь цей набір неприємних, а часом і шкідливих для здоров'я (зокрема, для зору) чинників підсилює ефект негативного впливу на людину за наближенням її до екрана ближче, ніж на 50 см. Однак зазначимо: якщо текст на дисплеї ще можна читати на відстані до 1 м, то під час роботи з зображенням доводиться мимоволі наближатися до екрана на відстань близько 50 см. На такій віддалі людське око вже здатне розрізнити деталі з кроком у 150 мкм (тоді як на цій відстані телевізійне розділення екрана з діагоналлю 52 см дає дискретизацію з кроком приблизно 650 мкм). Це спричиняє зниження чіткості, зникнення ефекту безперервності зображення, що негативно відбивається на сприйнятті його людиною. Зазвичай на малих екранах (з діагоналлю 25–30 см або 10–11 дюймів) зображення чіткіше, однак операторові у цьому випадку доводиться впритул наближатися до екрана, щоб розрізнити дрібні деталі та нюанси кольору.

Зменшення розмірів точок на екрані до 250–280 мкм дає змогу підвищити екранне розділення (порівняно з телевізійним) вдвічі–втричі. Сьогодні існує широкий вибір моніторів з розмірами екрана за діагоналлю від 14-ти, 15-ти, 17-ти, 19-ти дюймів до 21-го і більше (36, 38, 43, 48, 53 см і більше, відповідно), зі стандартним екранним розділенням 640×480 , 800×600 , 1024×768 , 1280×1024 , 1600×1200 і більше елементів.

Висока роздільна здатність спричиняє багаторазове збільшення необхідних обсягів пам'яті і швидкості передавання даних (як говорять фахівці в області обробки зображень – у комп'ютера не буває занадто багато пам'яті і він ніколи не працює занадто швидко). Водночас чим досконаліша техніка, тим вартісніша. Зазначимо, що операції простого рівня – малоформатні кольорові (півтонові монохромні) зображення – можна виводити для обробки на монітори з розміром по діагоналі 14–17 дюймів і розділенням $640 \times 480 \dots 1024 \times 768$. Операції середнього рівня вимагають 19- або 21-дюймових екранів з розділенням $1024 \times 768 \dots 1280 \times 1024$. І тільки для продукції високого класу варто обирати найкращу техніку. Проте не варто заощаджувати на охороні здоров'я.

Електронно-променеві дисплеї доцільно оснащувати якісними захисними фільтрами від електромагнітних випромінювань і статичної електрики; вони також поляризаційно поглинають відблиски від зовнішніх джерел світла. Бажано, щоб екран мав якомога більшу частоту кадрового розгортання (рекомендована частота понад 80 Гц для зниження втомлюваності).

Окрім небезпеки для здоров'я, монітори на кінескопах за усіх своїх переваг (у сенсі якості зображення) мають й інші недоліки (громіздкість, високовольтне живлення), що накладають обмеження на їхнє використання у визначених умовах, наприклад, якщо потрібна портативність і транспортабельність або робота в цехах, де виникають вимоги до ударостійкості, вологонепроникності, пожежо- і вибухонебезпечності.

Завдяки наведеним вище чинникам електронно-променеві дисплеї сьогодні доволі швидкими темпами витісняють із повсякденного вжитку інші типи дисплеїв, про які йтиме мова дещо нижче.

6.2.2. Напівпровідникові індикатори. *Напівпровідникові індикатори* (НПІ) вирізняються насамперед тим, що можуть перекрити весь видимий діапазон спектра (рис. 6.5). Яскраве і чисте свічення, зручність керування, енергоощадність, технологічність, довговічність відкривають перед цими приладами необмежені перспективи.

Історично освоєння колірної гами розпочали від червоного, через жовтогарячий та жовтий до зеленого і далі до синього кольору, що пов'язано зі значними успіхами в області технології синтезу GaAs і Ga. Найпринциповіші труднощі виникли під час одержання синього світла, однак зазначимо, що за подолання цих труднощів такий матеріал, як GaN, може виявитися одним із найдешевших, оскільки його вирощують у вигляді тонких плівок на сапфірових підкладках. Розв'язання проблеми ефективного синього випромінювача відкриває шлях для створення єдиної технології індикаторів усіх кольорів, яка базуватиметься на перетворенні цього випромінювання в більш довгохвильове з використанням найпридатніших фотолюмінофорів.

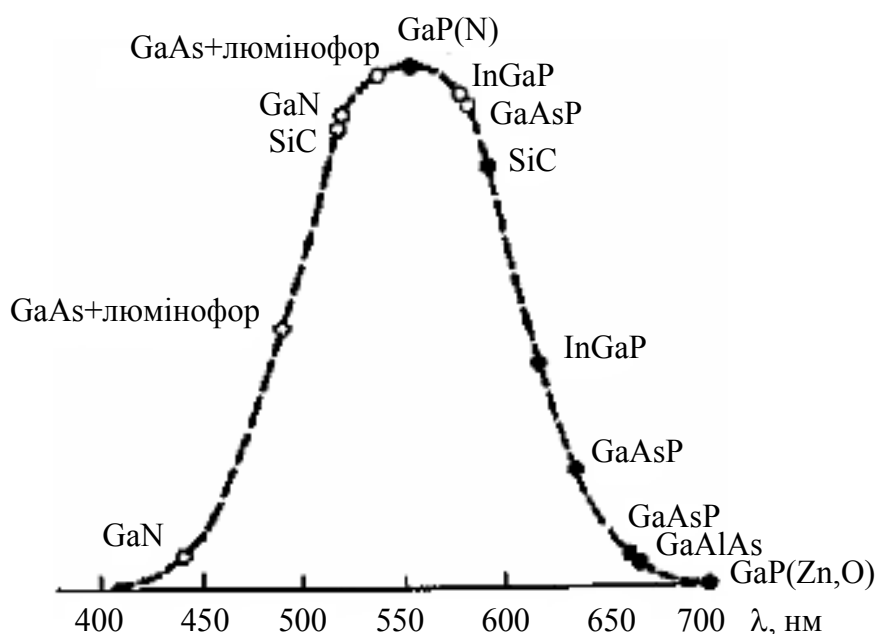


Рис. 6.5. Спектральні можливості напівпровідникових індикаторів для промислових (●) і лабораторних (○) зразків [17]

У напівпровідникових індикаторах використовують дві головні конфігурації висвітлюючих елементів:

- семисегментна (рис. 6.6, а), яка дає змогу відтворювати усі десять цифр і кілька літер (цифровий індикатор);
- матрична (рис. 6.6, б) з кількістю точок до 36 ($7 \times 5 + 1$), яка відтворює всі цифри, літери і знаки стандартного коду для обміну інформацією (універсальний літерно-цифровий індикатор).

Для малих за розміром індикаторів використовують монолітну

конструкцію, для великих (з метою економії дорогих матеріалів) – гібридну, яка складається з окремих кристалів. Висока яскравість свічення світлодіода дає змогу використовувати різні способи збільшення розміру зображення. Крім найпростішого лінзового збільшення, доволі широко використовують «псевдосвітловодні» конструкції (рис. 6.7). Тут кристал міститься у підставці конічного прорізу, який розширюється, у пластмасовій пластині. Іноді внутрішні стінки такого світловоду металізують, а зверху розміщують пластмасову лінзорастрову пластину, яка вирівнює яскравість свічення по площі перерізу. Така конструкція дає змогу одержувати площадки, що світяться, які на порядок перевищують площу самого кристала. Головна маса напівпровідникових індикаторів має малі розміри знаків ($H = 3\text{--}7,5\text{ мм}$), використання оптичного збільшення дає змогу досягти $H = 12,5\text{--}17,5\text{ мм}$, у складальних конструкціях реалізують $H = 25\text{--}50\text{ мм}$, що дає змогу зчитувати інформацію з відстані 10–15 м.

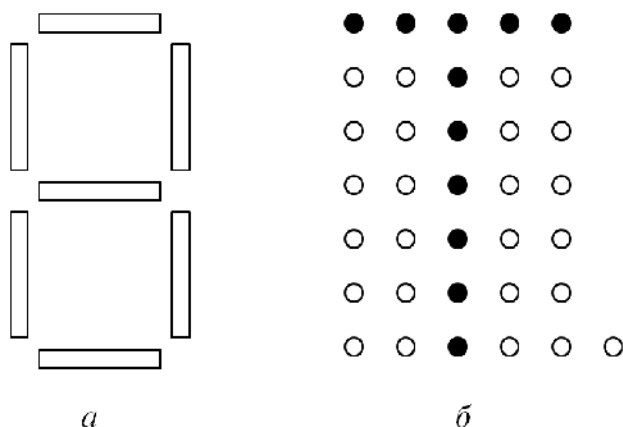


Рис. 6.6. Семисегментний цифровий (а) та матричний універсальний (б) знакові індикатори [17]

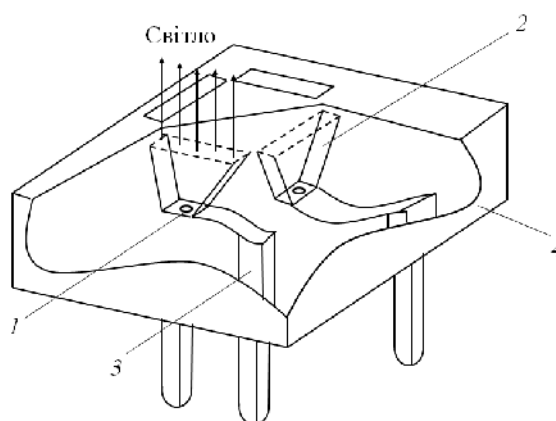


Рис. 6.7. Індикатор зі збільшенням зображення: 1 – випромінюючий кристал; 2 – конічний псевдосвітловід із металізованими стінками; 3 – металічна основа-рамка; 4 – пластмасовий корпус [17]

Для зручності застосування виготовляють багаторозрядні індикатори (три, чотири, шість, дев'ять і т. д. знаків в одному корпусі), іноді в тому ж корпусі розміщують і монолітну схему керування (дешифратор-формував).

Важливою та водночас складною є задача одержання приладів із

перелаштовуванням кольору свічення. Найпростіше рішення – розміщення декількох різних кристалів в одному корпусі – для індикаторів не підходить. Можна використовувати GaP-світлодіоди, леговані водночас азотом, киснем і цинком, в яких за збільшення інжекційного струму послідовно спостерігається червоне, жовте, зелене свічення. Однак колірна насиченість таких приладів невисока. Перспективнішими є структури з двома p - n -переходами і зі спільною базовою областю.

Ускладнення світловипромінюючого елемента дає змогу розширити його функціональні можливості й у схемотехнічному плані. Зокрема, у Ga-структурі типу $p^+ - n - i - n^+$ фоточутлива i -область утворює внутрішній позитивний зворотний зв'язок, отож такий світлодіод має диністорну вольт-амперну характеристику, тобто володіє «пам'яттю».

Прогрес фізики і технології світловипромінюючих діодів сприяє створенню монолітних багатоеlementних матриць: цілком досяжним є отримання $10^3 - 10^4$ світних крапок (тобто 30–300 знаків) на одному кристалі площею $1,5 - 15 \text{ см}^2$. Такі матриці є елементарною коміркою складного напівпровідникового екрана, для технічної реалізації якого необхідне розв'язання проблем багаторівневої комутації, відводу тепла, схем керування. За використання елементів, що володіють пам'яттю і перебудовою кольору, можуть бути створені доволі економічні, малогабаритні, багатоколірні екрани індивідуального використання з об'ємом одночасно відображуваної інформації, яка еквівалентна 0,3–0,5 сторінки машинописного тексту.

6.2.3. Рідкокристалічні індикатори. Австрійський ботанік Фрідріх Рейнітцер (*Friedrich Reinitzer*), досліджуючи штучно синтезовану ним сполуку бензойнокислого холестерину, 1888 р. вперше виявив рідкокристалічний стан речовини; упродовж 1962-1966 рр. Джеймс Фергесон (*James Fergason*) і Річард Вільямс (*Richard Williams*) у фірмі RCA досліджували поляризаційні та температурні ефекти в рідких кристалах і представили перший працездатний рідкокристалічний дисплей. Перший дисплей на рідких кристалах (*EL 8025*) розроблений 1973 р. для переносної ЕОМ, хоча сам ефект відкрили раніше і

використовували для літерно-цифрової індикації в годинниках, калькуляторах та вимірювальних приладах. Потім з'явилися матричні дисплеї, які теоретично могли відтворювати чорно-біле відеозображення, а 1987 р. фірма *Sharp* представила перший кишеньковий телевізор з кольоровим дисплеєм розміром три дюйми за діагоналлю.

Рідкокристалічні індикатори (РКІ) належать до «молодих» і бурхливо прогресуючих оптоелектронних приладів. Рідкокристалічний стан речовини характеризується одночасним об'єднанням властивостей рідини (плинність, в'язкість, здатність утворювати краплі) і кристала (оптична анізотропія). Такий стан може виявлятися в деякому температурному інтервалі між точкою кристалізації T_k і точкою перетворення речовини в однорідну прозору рідину T_p .

Молекули *рідкого кристала* (РК) є стержнеподібними органічними сполуками (рис. 6.8) і знаходяться в різних орієнтаціях у цих фазах (рис. 6.9).

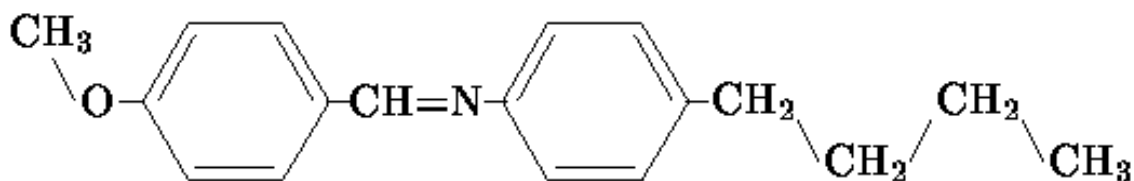


Рис. 6.8. Структурна формула рідкого кристала MBVA [8]

В ізотропічній фазі, яка є рідкою фазою, за підвищення температури центр мас молекул та їхня орієнтація є цілком випадковими.

Якщо температура знижується, то в РК відбуваються переходи через різні фази, одну з яких – так звану *нематичну фазу* – використовують у дисплеях (*twisted nematic liquid crystal displays* – дисплеї на закручених нематичних рідких кристалах). У цій фазі центри мас молекул розташовані усе ще хаотично, хоча усі вони орієнтовані в одному напрямі. Для індикаторних приладів використовують саме нематичні РК, які характеризуються певними особливостями:

- молекули цих речовин мають сильно витягнуту (ниткоподібну) конфігурацію;
- у рівноважному стані виявляється тенденція до орієнтації великих осей

молекул уздовж певного переважаючого напрямку;

– міжмолекулярні взаємодії дуже слабкі, отож структура (характер орієнтації молекул) може легко змінюватися під дією зовнішніх впливів;

– вони відзначаються оптичною та електричною анізотропією: значення показників заломлення та діелектричної постійної за напрямом уздовж великих осей молекул ($n_{\parallel}$ і $\epsilon_{\parallel}$) та перпендикулярні до них ($n_{\perp}$ і $\epsilon_{\perp}$) різні (РК – кристали з подвійним променезаломленням);

– залежно від знака величини $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ розрізняють позитивну й негативну діелектричну анізотропію – за накладання електричного поля молекули РК першого типу орієнтуються уздовж поля, другого типу – уперек;

– наявність анізотропії та можливість перебудови структури виявляються в двох різновидах електрооптичних ефектів: зміні характеру поляризації відбитого світла і зміні коефіцієнта відбивання (пропускання) світла.

Якщо температура знижується далі, то молекули одержують періодичну упорядкованість у шарах (*сметична фаза*). У такий спосіб зі зниженням температури в РК збільшується упорядкованість і, зрештою, досягається твердий стан речовини.

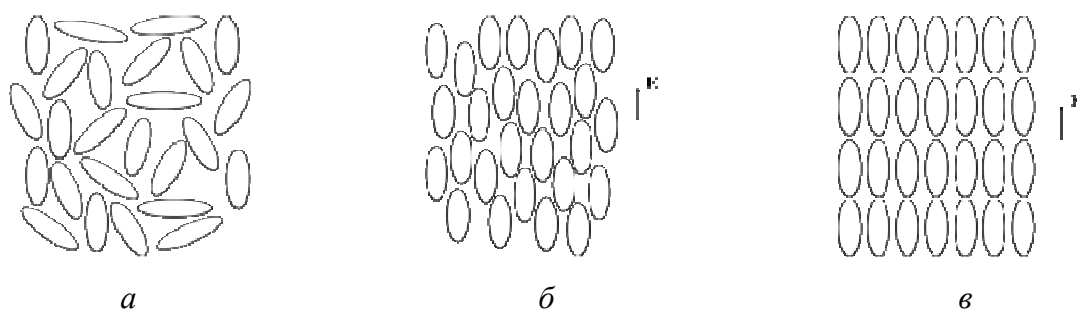


Рис. 6.9. Фази рідкого кристала [3]: *a* – ізотропічна; *б* – нематична; *в* – сметична.

Як рідкі кристали можуть розглядати дуже багато органічних сполук (тисячі), найкращі для технічних застосувань результати дають їхні суміші. «Класичними» нематичними сумішами є МББА (н- (п-метоксибензиліден) – п- (н-бутиланілін)) і ЕББА (н- (п-етоксибензиліден) – п- (н-бутиланілін)), які забезпечують одержання $\Delta T_{\text{рк}} = T_{\text{р}} - T_{\text{к}} = 15\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Серед усіх структурних

різновидів рідких кристалів нематичні відрізняються найменшою в'язкістю, що забезпечує їхню найвищу швидкодію, обумовлену часом переорієнтації молекул $\sim 10^{-1}$ с (і до 10^{-2} – 10^{-3} с у спеціальних робочих режимах). Питомий опір нематичних РК дуже великий ($\sim 10^{17}$ Ом·см). Для його деякого зменшення, що є часом необхідно, у рідину вводять органічні домішки, під час дисоціації яких виникають вільні іони.

Історично першим електрооптичним ефектом, використаним в індикаторній техніці, став *ефект динамічного розсіювання*. Якщо до шару злегка провідного нематичного РК із негативною діелектричною анізотропією прикласти електричне поле, то молекули орієнтуються впоперек поля, а виникаючий потік іонів прагне порушити цю орієнтацію.

За деякого значення струму провідності виникає стан турбулентності, який руйнує раніше впорядковану структуру РК. Безперервні хаотичні зміни показника заломлення ділянок рідини спричиняють розсіювання світла (звідси і назва ефекту), що ззовні проявляється як помутніння РК. Вольт-контрастну характеристику РКІ подано на рис. 6.10.

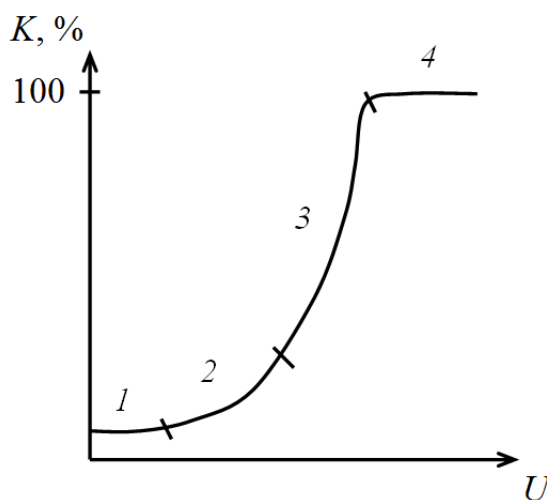


Рис. 6.10. Вольт-контрастна характеристика РКІ: 1 – нормальна ділянка; 2 – ділянка ламінарного руху; 3 – ділянка турбулентного руху; 4 – ділянка насиченості турбулентності [3]

Кращі характеристики індикаторів дає використання *твіст-ефекту*. Розтлумачимо його. Внаслідок оптичної й електричної анізотропії РК-молекул коефіцієнт заломлення залежить від напрямку поляризації світла щодо осі

молекули. Цю властивість використовують для повороту поляризації за проходження світла через закручену РК-структуру.

Відомо, що світло не проходить через два схрещені поляризатори (рис. 6.11). Молекули в нематичній фазі примусово закручуються за рахунок їхнього розміщення між двома скляними пластинами, кожна з яких має лінійчасте гравіювання, перпендикулярне до іншого. На поверхні скла молекули вимушено розміщаються уздовж гравіювання, а внаслідок того, що гравіювання взаємно перпендикулярні, між пластинами формуються перекручені ланцюжки РК-молекул (рис. 6.12). Технологічно такої скрученої структури досягають також, наприклад, шляхом однонапрявленого натирання внутрішніх поверхонь скляних пластин у взаємно перпендикулярних напрямках, що й зумовлює відповідну орієнтацію молекул.

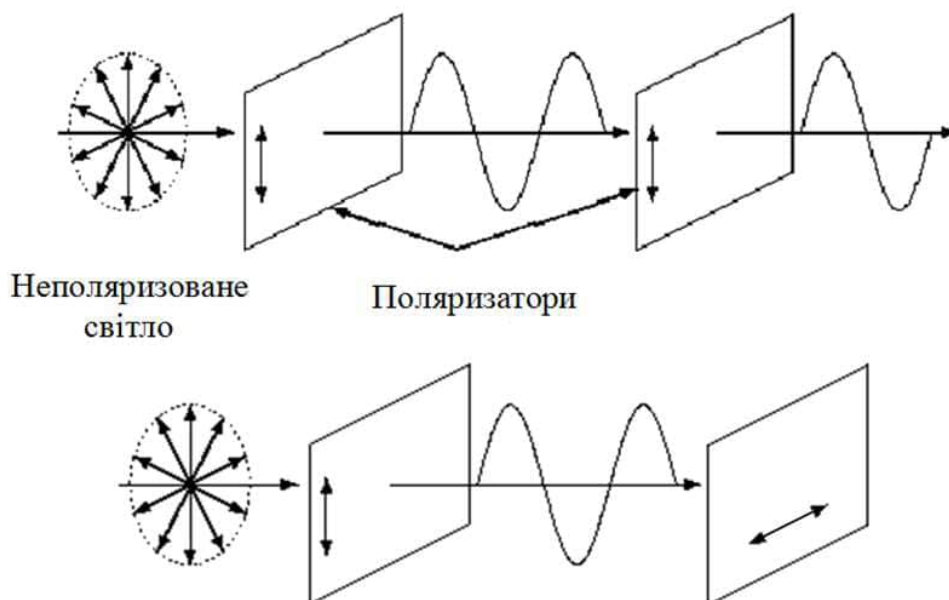


Рис. 6.11. Проходження неполяризованого світла через поляризатори [9]

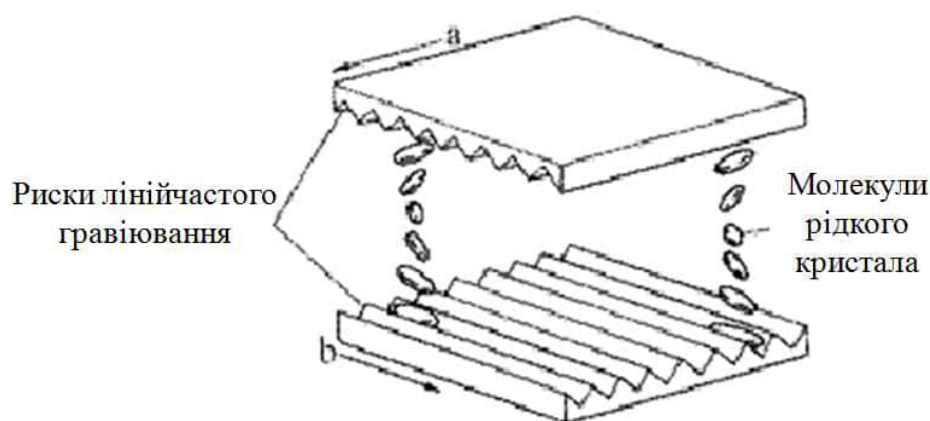


Рис. 6.12. Закручений нематичний рідкий кристал [9]

Відстань між пластинами становить порядку 10 мкм. Залежно від відстані між пластинами і типу РК закрученість становить зазвичай 90° або 270° (*twisted nematics* і *super-twisted nematics*, TN і STN).

За прикладання електричного поля молекули, унаслідок їхньої анізотропії, орієнтуються уздовж цього поля. У цьому випадку ланцюжки розкручуються і зникає можливість повороту площини поляризації (рис. 6.13). Поляроїдні пластини, поміщені на вході і виході комірки, перетворюють модуляцію поляризації світла в амплітудну.

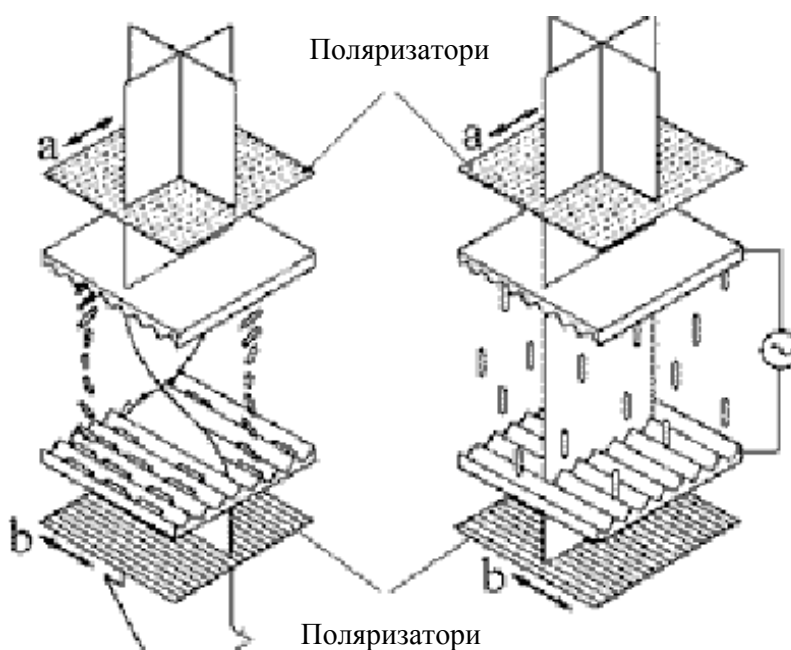


Рис. 6.13. Електронно-оптичне перемикання рідким кристалом [9]

РК-дисплеї мають два таких перехрещених поляризатори з перекрученим рідким кристалом між ними (рис. 6.14). Завдяки обертанню площини поляризації РК-ланцюжками світло проходить і дисплей стає яскравим. За прикладання електричного поля до взаємно перпендикулярних прозорих електродів, нанесених на внутрішні сторони пластин, ефект повороту площини поляризації зникає і відповідний піксель стає темним. Твіст-ефект, на відміну від ефекту динамічного розсіювання, є чисто польовим: для його реалізації пропускати струм через структуру не потрібно. Це істотно знижує енергоспоживання.

Конструкція рідкокристалічного індикатора (рис. 6.14) доволі проста, тут зручно реалізуються сучасні плоскі панельні конструкції.

Для одержання низьких керуючих напруг (одиниці вольт) проміжок між пластинами повинен бути невеликим ($\sim 10^{-3}$ см), а використовувана речовина повинна мати різко наростаючу вольт-контрастну характеристику (рис. 6.10). Для отримання зображення між прозорими електродами з оксиду олова чи оксиду індію прикладається напруга (одиниці – десятки вольт), фігурний вигляд по площі якої залежить від сигналу, що надійшов. У цьому випадку прозорість рідини між електродами зменшується й у прохідному світлі від джерела світла, яке знаходиться нижче нижнього поляроїда, формується певний знак. Струми фігурних електродів настільки малі (5–100 нА), що споживана потужність на індикацію знака не перевищує 50 мкВт. В індикаторах, які працюють у відбитому світлі, нижній електрод роблять дзеркальним, добре відбиваючим світло. Характерно, що вартість РКІ (на відміну від напівпровідникових) майже не залежить від їхньої площі: виготовляють прилади з висотою цифр 3–500 мм. Використовують конструкції, що працюють як у відбитому світлі (більшість типів), так і в прохідному. Усі РКІ живляться змінною напругою (з постійною складовою не більше десятків мілівольт); за спроб використувати постійну керуючу напругу виявляються суттєвими електролітичні ефекти і термін служби приладу стає неприпустимо малим.

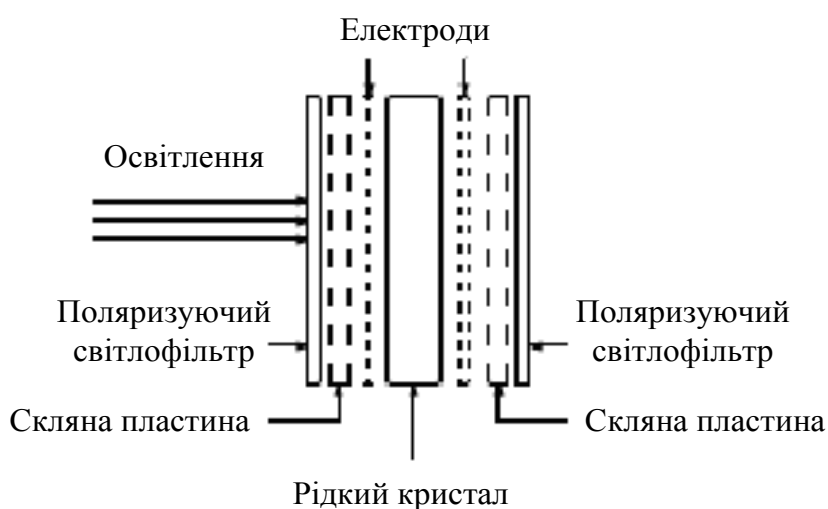


Рис. 6.14. Схема рідкокристалічного індикатора [9]

За вимикання напруги кристал за час порядку від одиниць десятків до сотень мілісекунд повертається у вихідний стан.

У простих індикаторах (з пасивною матрицею) комірки растра, які складають зображення, заживляються послідовно: на провідники, що перетинаються над потрібною крапкою, подають напругу, у результаті чого крапка підсвічується. Керуючий сигнал підводять до шини рядка й елемента в рядку, отож її швидкодія надто мала для відтворення відео. Завдяки великому часові релаксації та доволі високій частоті сканування ($\gg 1$ мс на рядок) зображення не мерехтить. Природно, що такі індикатори повільні. Кольорові РК-індикатори використовують три комірки растра для формування пікселя. Яскравість свічення для кожного з компонентів визначає відтінок забарвлення.

Рідкі кристали – доволі зручна база для створення інформаційних табло підвищеної інформаційної ємності й екранів малокадрового телебачення. Причини цього: мала споживана потужність, висока контрастність, низька напруга живлення, технологічність. Найбільші складнощі виникають у схемах керування: низька швидкодія РКІ утруднює використання мультиплексних режимів, спричиняючи до створення РК матриць з великою кількістю зовнішніх виводів. Подолання цієї проблеми полягало у розробці конструкції екрана, в якій замість однієї зі скляних обкладок звичайного РКІ використовується кремнієва пластина, що містить схему керування і має на своїй поверхні матрицю елементарних електродів. Кожен з цих електродів є оптичним відбивачем. Таке технологічне з'єднання растра і схеми керування різко скорочує кількість зовнішніх виводів та підвищує швидкодію. Такий пасивний рідкокристалічний екран в англійській літературі позначають *LCD – Liquid Crystal Display*.

Для вирішення проблеми швидкодії розроблені РК-дисплеї з активною матрицею, в яких кожен піксель забезпечується незалежно керованим тонкоплівковим транзистором (*thin-film transistor, TFT*).

Активним матричним індикатором називають прилад, у котрому кожна індикаторна комірка збуджується незалежно від інших комірок через активний елемент у точці перетину *XY*-матриці адресації, тобто у ньому немає тих обмежень, котрі були раніше, що дає змогу покращити характеристики індикатора. Для практичної реалізації активного матричного індикатора з

великим екраном застосовують інтегрування РК-комірки зі схемою керування. У такому індикаторі використовують матрицю транзисторів, стоки котрих з'єднані з електродами РК-комірки, яка представляє собою елемент відображення (рис. 6.15). Напруга на електродах комірки задається за допомогою МОН-транзисторів, розміщених у вигляді матриці на кремнієвій підкладці. Затвори і витки МОН-транзисторів приєднуються відповідно до X - та Y -шин збудження матриці адресування. За збудження будь-якої затворної шини відкриваються МОН-транзистори цього стовпця і через шини, до котрих приєднані стоки транзисторів, здійснюється інжектування заряду в накопичувальну ємність від джерела постійної напруги. Оптичні властивості рідкокристалічної комірки відповідають напрузі, яка підтримується на накопичувальній ємності. Оскільки інтенсивність світла можна лінійно змінювати залежно від потенціалу шин, до котрих під'єднані стоки транзисторів, то виявляється можливою індикація тонових зображень.

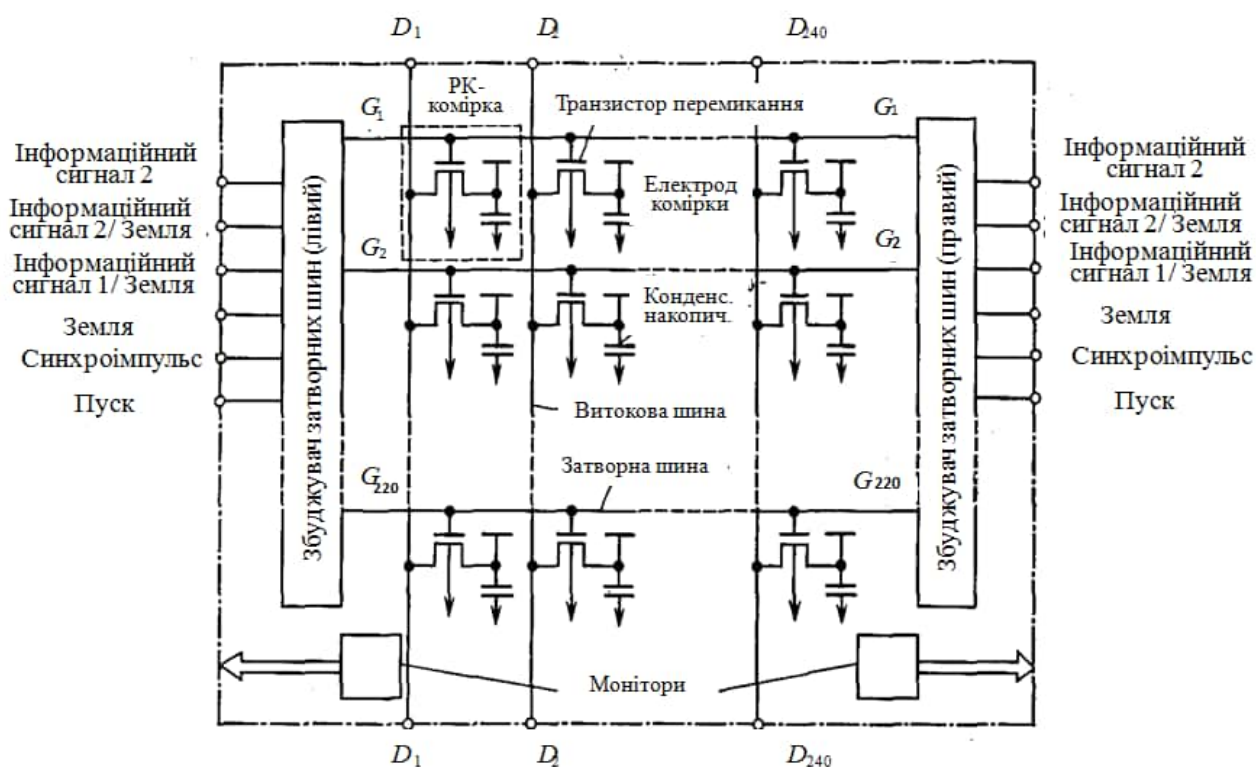


Рис. 6.15. Схема керування активного матричного РК-індикатора (G і D – затвор і виток тонкоплівкового транзистора) [10]

На рис. 6.16 подано приклад активного матричного РК-індикатора на аморфних кремнієвих тонкоплівкових транзисторах. Індикаторна панель

представляє собою конструкцію, у котрій тонкоплівкові транзистори утворюють на скляній підкладці комутаційну матрицю адресації. РК-комірка побудована на ефекті «*гість – господар*». Опишемо цей ефект. До складу РК-речовини (господар) вводять молекули барвника (гість). Барвник вибірково поглинає світло залежно від орієнтації його молекул відносно падаючого світлового потоку. Його молекули також мають витягнуту форму. Молекули РК орієнтують і переорієнтують молекули барвника в електричному полі за подання напруги на електроди. Як наслідок, змінюється ступінь поглинання, що добре виявляється в поляризованому світлі. У цьому випадку необхідний тільки один поляроїд. Тривалість перехідних процесів встановлення стабільного забарвлення 30–500 мс, керуюча напруга – 2–10 В. Залежно від використовуваного барвника комірки можуть мати різне забарвлення в увімкненому та у вимкненому станах.

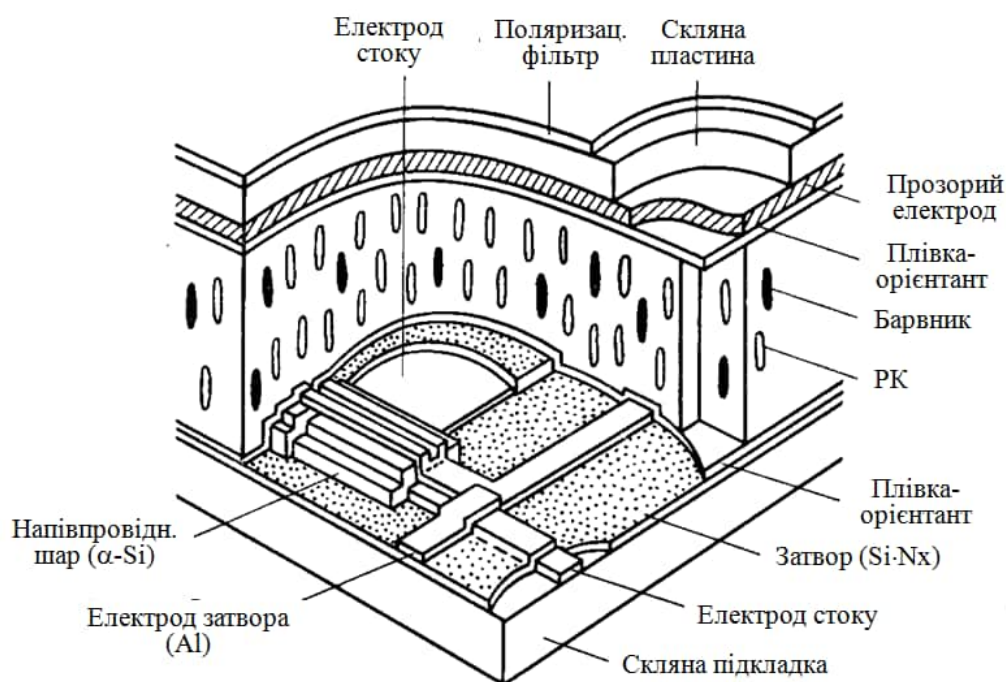


Рис. 6.16. Рідкокристалічна індикаторна панель з матрицею тонкоплівкових транзисторів [10]

Оскільки за використання кремнієвої пластини існує обмеження на діаметр пластини, то максимальний розмір зображення може становити приблизно 10 дюймів (25,4 см). За використання аморфного кремнію таких

обмежень не існує і можна виготовити індикаторну панель з площею зображення понад $130 \times 130 \text{ см}^2$.

У результаті дії ефекту подвійного променезаломлення, керованого електричним полем, інтенсивність світла, що пройшло через аналізатор, можна подати виразом:

$$I = I_p \sin^2 2\theta \sin^2 \pi d \frac{\delta n}{\lambda},$$

де θ – кут між напрямом поляризації падаючого світла і напрямом проекції осі орієнтації молекул РК на поверхню скла.

За $\theta = \pi/4$ інтенсивність світла, яке пройшло через аналізатор, буде максимальною. Оскільки кут повороту напрямку поляризації залежить від довжини хвилі λ , максимальне пропускання відповідатиме певній довжині хвилі світлового випромінювання, для котрої цей кут становитиме 90° , що може бути використано для кольорового відтворення.

У РК-індикаторі, який використовує ефект «гість – господар», кольорове відтворення можна здійснити, використовуючи дихроїзм барвника, який є «гостем». Барвник у цьому випадку визначає тільки колір відтворення.

Кольорове відтворення довільного зображення будь-якого кольору можна отримати на основі комбінації трьох базових кольорів, керуючи кольором у кожній РК-комірці. З цією метою застосовують кольорові світлофільтри. У цій системі РК використовують тільки для керування світлом, яке проходить через нього, а колір світлового випромінювання визначається кольоровими фільтрами.

На рис. 6.17 показано можливість відтворення на індикаторі кольорового телевізійного зображення на основі «твіст-ефекту» в нематичному РК.

Такі дисплеї значної швидкодії мають велику вартість, отож для кольорового дисплея роздільною здатністю 800×600 необхідно 1 440 000 бездефектних транзисторів. Однак сучасні досягнення в технології дають змогу зробити це без проблем. У спеціальній літературі стосовно таких приладів часом вживають термін «рідкий кристал з активною матрицею». Підсвічування забезпечує шар білого люмінофора постійного свічення, розташований за

екраном (у сучасних *LED*-телевізорах підсвічування забезпечує матриця тонкоплівкових світлодіодів). Отож, отримуємо компактну, міцну площинну конструкцію, добре сумісну з технологічно родинними мікросхемами комп'ютерів.



Рис. 6.17. Кольорове відтворення зображення на РК індикаторі [10]

Роздільна здатність РК-екранів сьогодні цілковито відповідає сучасним телевізійним стандартам. До вже перелічених переваг рідкокристалічних дисплеїв (компактність, монолітність, низьковольтне живлення, сумісність схем із сучасною електронікою) можна додати відсутність сильних електромагнітних полів і шкідливих випромінювань, що допускає (якщо це необхідно) безпечну роботу оператора з екраном на близькій відстані, розміщення таких моніторів у виробничих цехах і навіть безпосередньо на працюючому устаткуванні. Відомі також недоліки. Є обмеження і за терміном служби як самого РК-шару, так і люмінофорного підсвічування (вихідні параметри зберігаються тільки в перші два-три роки роботи). Поступаються вони і за яскравістю свічення, що істотно, оскільки колірний зір людини за низьких яскравостей помітно слабшає.

Удосконалення РКІ відбувається в напрямі одержання кольорових зображень (для цього залучають інші, відмінні від описаних, електрооптичні ефекти), підвищення швидкодії, довговічності (значення, близькі до 10^5 год, є цілком реальними), створення елементів з вбудованою пам'яттю.

Здебільшого сучасні РК-панелі належать до шостого покоління. Найбільші виробники вже розпочали виробництво панелей сьомого покоління (*Samsung, AU Optronics*) і навіть 7.5 (*LG, Philips LCD, Sharp, HannStar, CPT, Quanta Display*). Для сьомого покоління підкладка має стандартний розмір

1 870×2 200 мм і з неї можна нарізати дванадцять 32-дюймових, вісім 40-дюймових або шість 46-дюймових дисплеїв. Для покоління 7.5 розмір більший, однак залежить від виробника. Сьогодні найбільший розмір анонсувала (виробництво почали 2006 року) *Sharp* – 2 200×2 600 мм. З такої підкладки вже можна зробити п'ятнадцять 32-дюймових, вісім 42-дюймових або шість 50-дюймових панелей.

Окрім того, існують інші проблеми: збільшення якості та зменшення вартості РК-панелей. Одне з найважливіших питань – це живлення. Живлення кінескопних телевізорів слабо залежить від розміру трубки, однак для РК простежується чітка залежність – збільшення істотне. Отже, різниця в енергоспоживанні між кінескопними і РК-телевізорами скорочується зі збільшенням розмірів екрана.

6.2.4. Газорозрядні та плазмові індикатори. Газорозрядні індикатори (ГРІ) є яскравим прикладом того, як вплив конструкторсько-технологічних ідей мікроелектроніки заново перетворює «стару» традиційну область техніки.

Основою будь-якого приладу цього класу є елементарний газорозрядний проміжок (рис. 6.18). Запалювання і підтримка розряду вимагає високої напруги ($U_{\text{зап}} \approx 80\text{--}400\text{ В}$, $U_{\text{гор}} \approx 50\text{--}300\text{ В}$), струм близький до 1 мА. Заповнення робочого об'єму неоном дає жовтогаряче свічення, а гелієм і аргоном – жовте і фіолетове. Можливе і непряме перетворення енергії: розряд у ксеноні (УФ випромінювання) разом з фотолюмінофорами бажаного кольору свічення. Інерційність газового розряду визначається здебільшого часом його гасіння ($10^{-7}\text{--}10^{-8}\text{ с}$) і зникнення плазми ($10^{-6}\text{--}10^{-4}\text{ с}$).

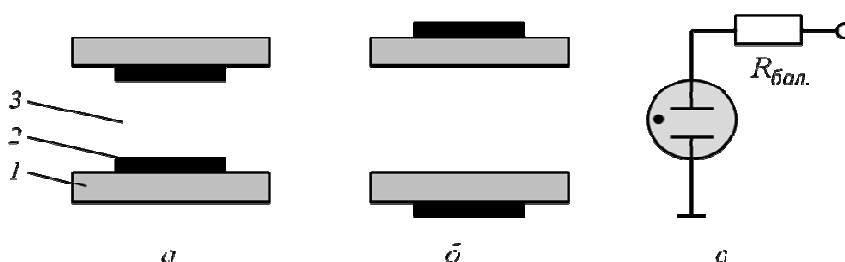


Рис. 6.18. Газорозрядний проміжок з внутрішніми (а) і зовнішніми (б) електродами та його умовне позначення (в); 1 – діелектрик; 2 – метал; 3 – газове середовище [17]

Використовують два головні режими роботи. У режимі постійного струму обов'язковий є баластовий резистор, який є необхідним елементом гасіння розряду. Взаємодія газу з електродами (рис. 6.18, *а*) супроводжується катодним розпиленням, доволі інтенсивним при мінусових температур. Значно перспективнішим є високочастотний розряд, для якого характерне самообмеження і відсутність безпосереднього контакту газу з електродами (рис. 6.18, *б*).

Серед газорозрядних індикаторів вирізняють: знакові, шкальні й універсальні (плазмові панелі). Громіздку пакетну конструкцію газорозрядної лампи з десятима ізольованими катодами, яка висвітлювала окремі цифри, замінив багаторозрядний монодисплей панельного типу. Його характерні риси: площинність, мала товщина (кілька міліметрів), простота конструкції (всього чотири деталі) і технології. Дві плоских електродних решітки з ковару, одержувані штампуванням або травленням, закріплюються на окремих скляних пластинах, після чого частини зібраного пакета з'єднуються в гарячому стані. Потім пакет вакуумують, заповнюють газовою сумішшю і герметизують. Крім катодних лінійних елементів, що формують зображення, електродні решітки містять і зовнішні виводи.

Існує багато різновидів сегментних ГРІ, проте усі вони однотипні з описаним приладом. Типові значення висоти знаків сягають 5–16 мм, кількість розрядів 3–9. Для живлення необхідна напруга постійного струму 170–200 В.

Дисплеї з плазмовою панеллю – *PDP (Plasma Display Panels)* використовують явище свічення при розряді в газі. Як показано на рис. 6.19, перші плазмові панелі склалися з паралельних покриваючих прозорих пластин, простір між якими заповнено газом (на основі неону) під атмосферним тиском. Між покриваючими пластинами розташована скляна пластина з отворами (маска), що розділяє газ на растр із маленьких комірок. На покриваючих пластинах з їхніх внутрішніх сторін нанесені групи прозорих смужок паралельних провідників, які знаходяться навпроти отворів у масці. Провідники на одній пластині перпендикулярні до провідників на іншій

пластині. У такий спосіб кожна комірка представляє собою щось подібне до маленької неоновної лампочки (насправді – тиратрону).



Рис. 6.19. Схема плазмової панелі [9]

Якщо для незасвіченої комірки між провідниками наростає напруга, то при досягненні напруги запалювання U_z (рис. 6.20, 6.21) комірка запалюється. Газ у комірці іонізується. В результаті виникає плазмовий стовпчик, струм через комірку помітно зростає, а напруга спадає до напруги горіння U_r , суттєво меншої, ніж напруга запалювання. Зі зменшенням прикладеної напруги до напруги загасання U_{zag} розряд у комірці припиняється і вона гасне за час порядку 20 мкс, за який усі іони потрапляють на негативний електрод.

Залежно від прикладеної напруги комірки панелі можуть перебувати у *трьох* станах:

1. *Відображення вмісту панелі.* Підтримуюча напруга U_n між провідниками покриваючих пластин дорівнює середній напрузі горіння U_r (див. рис. 6.20). У цьому випадку засвічені комірки продовжують горіти й утворюють світні крапки на зображенні, а не засвічені не спалахують.

2. *Вмикання крапки.* До підтримуючої напруги між провідниками, що перетинаються над необхідною коміркою, додається такий імпульс підпалу, що

досягається напруга запалювання U_3 і комірка запалюється (якщо вона ще не світилась).

3. *Стирання крапки.* До підтримуючої напруги між провідниками, які перетинаються над необхідною коміркою, додається такий імпульс гасіння, що досягається напруга загасання $U_{\text{заг}}$ і комірка вимикається (якщо вона світилась).

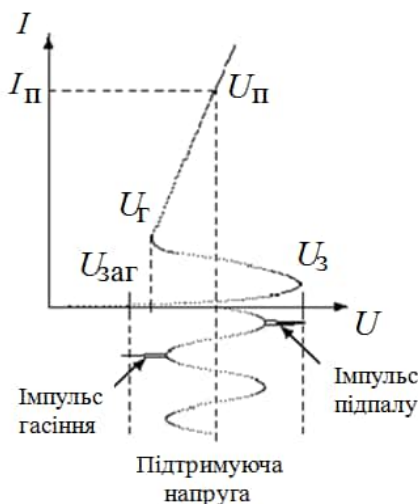


Рис. 6.20. Вольт-амперна характеристика розряду в газі [9]

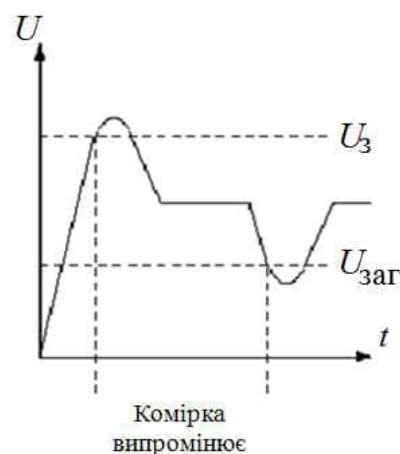


Рис. 6.21. Часова діаграма роботи плазмової комірки [9]

Новіші плазмові панелі не містять маски і растрових анодів. Вони також складаються з двох паралельних скляних пластин, на внутрішніх поверхнях яких нанесені взаємно перпендикулярні групи провідників, що формують растрові комірки панелі. Провідники покриті діелектричною плівкою; між ними прикладена високочастотна напруга, недостатня для запалювання, проте достатня для горіння (підтримуюча напруга). За високочастотного живлення газ поводить себе так, начебто він розділений на окремі комірки. Частота напруги живлення така, що хоча розряд за малих напруг і припиняється, однак іони не встигають рекомбінувати, отож зі зростанням напруги розряд відновляється і створюється враження безперервного свічення крапки.

Для вмикання незасвіченої комірки до підтримуючої напруги додається імпульс підпалу, достатній для запалювання.

Для вимикання засвіченої комірки до підтримуючої напруги додається такий імпульс, за якого до досягнення чергового максимуму напруга буде такою, що іони встигнуть зрекомбінувати і комірка не спалахне.

Відомі й інші конструкції плазмових панелей, наприклад, для виведення кольорових півтонових зображень. У таких панелях окремий піксель є тріадою газорозрядних тиратронів, які мають загальний електрод для підтримання розряду в суміші інертних газів типу He і Xe (рис. 6.22). Виникаюче при цьому *ультрафіолетове* (УФ) випромінювання збуджує люмінофори, якими покриті торці тиратронів. Ці люмінофори мають відповідні фотолюмінесцентні характеристики і випромінюють червоний, зелений і синій кольори. Ефект зміни яскравості моделюється за рахунок спалахування/гасіння розряду з необхідною (не занадто великою) частотою.

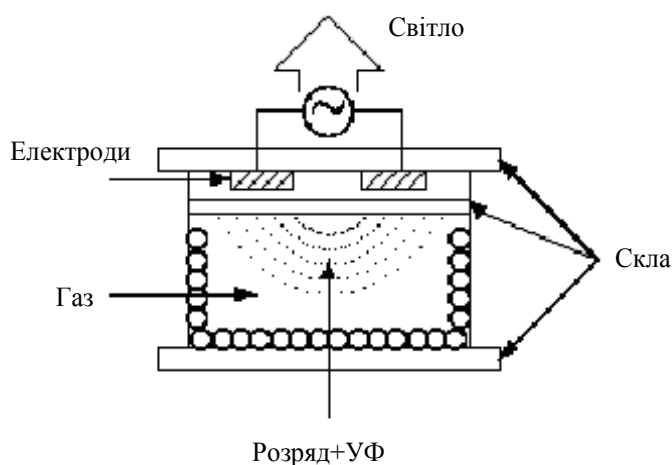


Рис. 6.22. Комірка кольорового дисплею з плазмовою панеллю [9]

Дисплеї на плазмовій панелі деякою мірою є ідеальними пристроями. Вони володіють усіма найважливішими якостями, аж до кольорних можливостей, зокрема:

- великим кутом огляду, оскільки світло випромінюється у всіх напрямках;
- запам'ятовуванням, вибірконим стиранням і побудовою нового зображення;
- крапковою адресацією, котра дає змогу використовувати як векторні, так і растрові принципи побудови зображення;
- площинною панеллю, що спричинює наявність значно менших розмірів, ніж дисплей на електронно-променевій трубці;
- цілковитою відсутністю мерехтіння картини, незалежно від її складності і структури;

– можливістю проектування крізь цей дисплей інформації від зовнішніх джерел зображень (наприклад, слайдів або фільмів), що забезпечуватиме просте змішування з картинками, сформованими комп'ютером.

На жаль, співвідношення ціна/можливості гірше, ніж у дисплеїв на електронно-променевих трубках. Це насамперед стосується розділення, оскільки розрядні комірки неможливо виготовити надто малими, що, зазвичай, відповідає кроку пікселя порядку 1 мм. Граничне значення кроку – до 25 комірок на сантиметр. На відміну від них, ЕПТ, рідкокристалічні дисплеї і дисплеї з емісією полем можуть мати крок пікселя усього 0,2 мм. Інші недоліки: відносно великий час вмикання/вимикання – порядку 20 мкс/крапку, відносно висока напруга живлення – десятки вольт і низька ефективність (наприклад, 40-дюймовий *PDP* зазвичай споживає приблизно 300 Вт, у той час як пікова яскравість – тільки 1/3 відповідної від ЕПТ, що споживає близько 150 Вт).

Сьогодні дисплеї на плазмовій панелі здебільшого використовують або в особливих умовах застосування (високі вібрації, низькі температури), або як екрани колективного перегляду. Лідерами в серійному виробництві *PDP* є фірми *Fujitsu* і *Hitachi*.

Універсальний індикалер або *плазмова панель*, є двокоординатною матрицею, яка містить не менше $10^4 - 10^5$ елементарних газорозрядних комірок. Розробляють панелі на постійному та змінному струмах, тобто з внутрішніми і зовнішніми електродами (рис. 6.23). Високочастотний екран живиться двома напругами збудження від генераторів Γ_1 і Γ_2 (рис. 6.23, в): синусоїдальним опорним з частотою в декілька кілогерц, що підтримує розряд, і тим, що записує (або стирає) у вигляді коротких прямокутних імпульсів, що «засвічують» ту або іншу комірку.

У конструкціях, що на рис. 6.23, центральна мозаїчна пластина слугує для ізолювання розрядних проміжків одного від іншого: нею визначається роздільна здатність екрана, близька до 10–20 лін/см. Обмеження області розряду можна домогтися і без перегородок підвищенням тиску газової суміші, що спричиняє стягування плазмового шнура, який виникає в місці перетину

збуджених X - та Y -електродів. Йдучи цим шляхом, можна істотно підвищити роздільну здатність, передусім у панелях змінного струму. Висока напруга живлення і значна кількість елементів вимагають доволі складних схем керування. Проте на основі як біполярних, так і МОН-транзисторів, а також спеціальних інтегральних схем вдається виготовити доволі компактні площинні пристрої, що розташовують на задньому боці панелі. Схеми керування не тільки відтворюють на екрані необхідні зображення, а й дають змогу змінювати інтенсивність свічення, забезпечуючи передавання до декількох десятків півтонів (градацій яскравості).

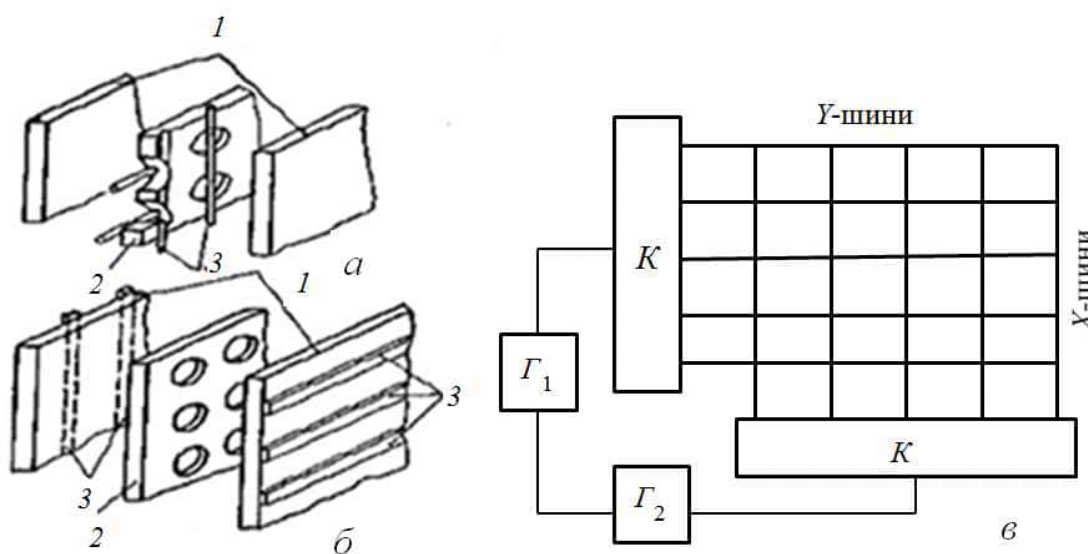


Рис. 6.23. Конструкції плазмових панелей постійного (а) і змінного (б) струму та схема пристрою керування (в): 1 – скляні пластини; 2 – центральна мозаїчна пластина; 3 – електроди; К – комутатори; Γ_1 – генератор підтримуваної напруги; Γ_2 – генератор «пишучих» (стираючих) імпульсів [10]

З метою зменшення кількості виводів від панелі та спрощення схеми керування використовують принцип самосканування, для реалізації якого в центральній пластині роблять спеціальні отвори, що певним чином з'єднують сусідні комірки між собою. Унаслідок цього запалений стан, створений в одній комірці, послідовно переміщається всіма елементами рядків і стовпців екрана.

Для одержання кольорового зображення виготовляється прозора панель (рис. 6.24), кожен шар якої генерує свічення визначеного кольору, а необхідне

забарвлення забезпечує відповідне керування цими шарами. Можливе й інше вирішення задачі: у панелі з ксеноновим наповненням (УФ випромінювання) створюють складне люмінофорне покриття (подібне до тріад ТВ екрана), а газовий розряд «вмикає» потрібний колір.

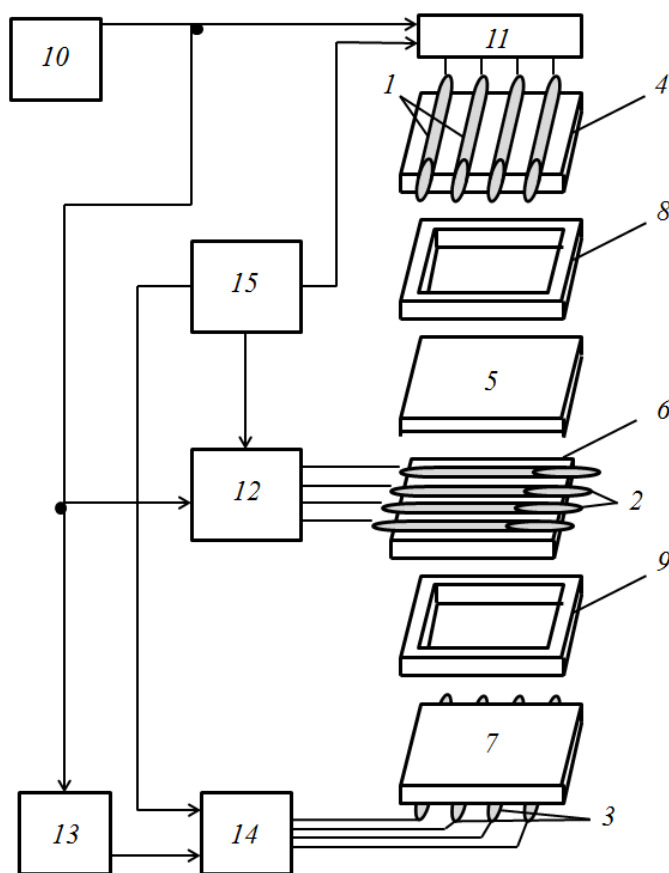


Рис. 6.24. Конструкція двоколірної панелі на змінному струмі: 1–3 – електроди панелі; 4–7 – ізоляторні плати; 8, 9 – газові камери; 10 – генератор; 11, 12, 14 – пристрій керування електродами; 13 – пристрій зсуву фаз на 180° ; 15 – пристрій керування і вибору [10]

Зменшити напругу і потужність керуючих сигналів можна лише введенням в електричну схему додаткових електродів. За збереження напруги анод–катод на рівні 200–400 В для вмикання розряду в триелектродній схемі необхідно лише 20–40 В, а в чотириелектродній (тиратронній) – 2–6 В. Потужність, яку споживає керуюче коло, може бути знижена до 10^{-4} – 10^{-5} Вт, і пристрій виявляється цілком сумісним зі стандартними біполярними та МОН-інтегральними схемами. Проте для практичної реалізації зазначених переваг необхідне створення індикаторів тиратронного типу в панельній конструкції методами плівкової технології. Найважливіше завдання

удосконалення плазмових панелей усіх видів полягає в підвищенні їхньої довговічності до $10^4 - 10^5$ год на основі оптимізації конструкції, ретельного підбору матеріалів і відлагодження масового виробництва.

Великих успіхів останнім часом досягли розробники плазмових телевізійних екранів. Свої телевізійні плазмові дисплеї пропонують фірми *Nishiden*, *Thomson*, *Fujitsu*, *NEC*. Володіючи перевагами плоских екранів і вільних від недоліків електронно-променевих моніторів, плазмові дисплеї мають і деякі переваги, порівняно з *LCD*. На відміну від *LCD*, вони мають самосвічення і, отже, достатню яскравість і хороший кут огляду. Яскравість, зазвичай, змінюється у межах 300–600 кд/м². Очевидно, недоліком (його не афішують) плазмових екранів є доволі великий крок між елементами (пікселями). Наприклад, у дисплея ND20PD/S фірми *Nishiden* розмір триколірного елемента становить 0,635×0,635 мм за розміру екрана 465×365 мм.

Розробники не уточнюють, чи великий крок плазмових екранів є технологічно обов'язковим, чи це властиво тільки для великих екранів (що виправдано для телебачення), а за менших розмірів дисплея крок, відповідно, буде меншим.

У цьому плані цікава інформація фірми *SHARP*, котра повідомляє про появу дисплея, заснованого на технології *PALC* (*plasma-addressed liquid crystal* – рідкокристалічний із плазмовим керуванням). Суть технології полягає в тому, що замість *TFT*-схем керування елементи рідкокристалічної матриці вмикаються або вимикаються за допомогою плазмових електронних ключів. Завдяки простішій (порівняно з *TFT*) структурі ключа помітно знижується вартість дисплея, а його «плазмовість» збільшує кут огляду. Повідомляється, що за технологією *PALC* можна створювати дисплеї з діагоналлю від 20 до 50 дюймів (0,5–1,3 м). Однак досягнуті сьогодні параметри багатьох виробників не задовільняють, і вони використовують для підвищення яскравості та контрастності різні запатентовані технології.

6.2.5. Дисплеї з електролюмінесцентним індикатором. Зазначимо, що 1937 р. відкрили ефект електролюмінесценції, котрий полягає у випромінюванні світла ZnS, легованим марганцем, під впливом електричного поля високої напруженості ($\sim 10^6$ В/см). 1981 р. розпочали практичне використання електролюмінесцентних індикаторів. Вони забезпечують дуже високі контрастність і яскравість за малих інерційності і товщини та високої міцності. Термін їхньої служби – понад 120 000 годин (близько 20 років), діапазон робочих температур від -5°C до $+65^\circ\text{C}$; кут огляду до 160° . За яскравістю свічення і за довговічністю екрани, виконані за електролюмінесцентною технологією (*Eletroluminescent technology* – *EL*), значно випереджають *LCD* [22]. Пояснюється це тим, що комірки *EL*-дисплеїв самі є джерелом світла. Інші конструктивні переваги *EL*-дисплея схожі з *LCD*. Оскільки перші зразки *EL*-повноколірних дисплеїв тільки з'явилися, їхні можливості у формуванні кольорових зображень частково визначені, проте розробники оптимістично налаштовані щодо перспектив цього напрямку.

В індикаторах, виготовлених на основі електролюмінесцентних конденсаторів, використовують явище електролюмінесценції у плоскому конденсаторі (рис. 6.25). Панель електролюмінесцентного індикатора складається зі скляної пластини, прозорих провідників з окису олова, шарів ізолятора і люмінофора, які чергуються, та темних провідників, перпендикулярних до прозорих (рис. 6.25).

Люмінофор світиться під впливом змінної напруги 170–220 В з частотою 400 чи 1200 Гц (залежно від потрібного кольору свічення), що прикладається до електродів рядків і стовпців. Ця змінна напруга збуджує вільні електрони в кристалічній структурі люмінофора. Збуджені вільні електрони зіштовхуються з атомами домішки і переводять їхні електрони на вищі енергетичні рівні. Повертаючись у свій звичайний стан, вони випромінюють фотони у видимому спектрі. Габаритні розміри області скляної пластини електролюмінесцентних індикаторів, яка світиться, становлять від 11×15 до 116×176 мм.

Люмінофор, який використовують в електролюмінесцентних індикаторах, потребує доволі високої прикладеної напруги, що вимагає застосування дорожчих мікросхем керування, ніж для рідкокристалічних індикаторів.

В індикаторах на основі електролюмінесцентних конденсаторів може бути понад сім сегментів. Продукуються літерно-цифрові електролюмінесцентні індикатори, в яких знаки і цифри складаються у вигляді різних комбінацій сегментів (зазвичай, цифр 7, 8 і 9). Індикатор з 19-ма сегментами висвітлює усі цифри і літери кириличного та латинського алфавітів. Застосовують електролюмінесцентні екрани з великою робочою площею і високою чіткістю зображення.

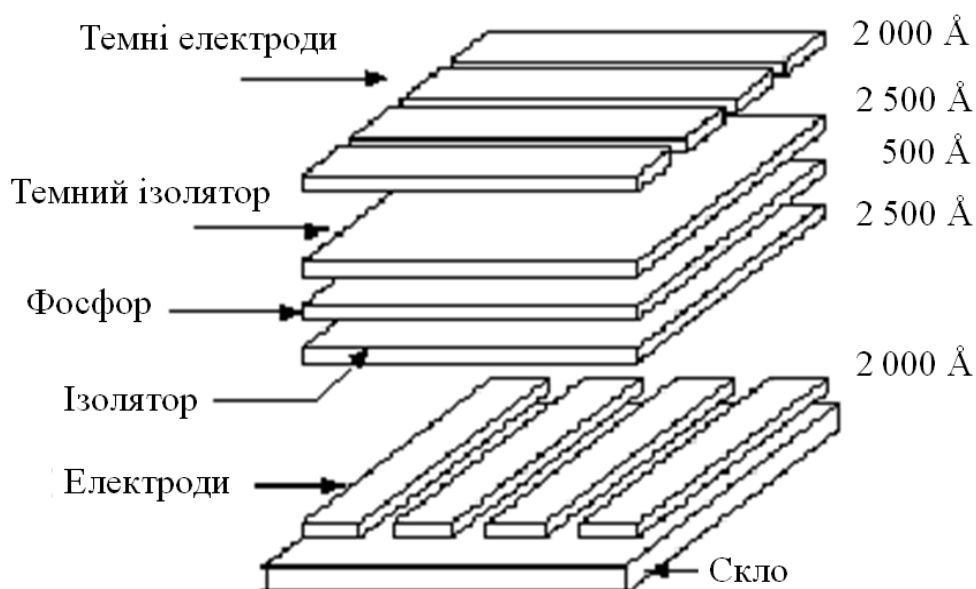


Рис. 6.25. Схема електролюмінесцентного індикатора [9]

Різновидом електролюмінесцентних індикаторів є вже згадувані мнемонічні індикатори із суцільним полем, що світиться, або з мнемонічним знаком (стрілка, коло, сектор) чи словом (наприклад, «СТОП», «Вкл», «Викл» і т. п.), відповідно до закладеного у нього трафарету. Такі індикатори з видимим зображенням мають внутрішній трафарет, який видно і за вимкненого індикатора. Якщо прикласти напругу, то висвітлюється або знак трафарету, або поле навколо нього. Мнемонічні індикатори продукують одноколірними і багатоколірними (червоний, зелений, голубий, жовтий). На деяких з них можна

отримати на одному полі два чи три кольори по чергово. З цією метою прозорий електропровідний шар виконують у вигляді гребінця (растра) шляхом по чергового нанесення смужок люмінофорів різних кольорів (наприклад, жовтого і голубого). Це дає змогу за відповідної комутації виводів змінювати колір свічення знаку трафарету чи поля навколо нього. Одночасне висвічування двох растрів утворює третій колір. Такі індикатори розширюють можливості відображення інформації. Наприклад, можна домовитися, що форма знаку визначає систему чи канал отримання інформації, а колір – стан цієї системи.

6.2.6. Дисплеї з емісією полем. Дисплеї з емісією полем – *field emission displays (FED)* – плоскі дисплеї, які за принципом роботи подібні до звичайних ЕПТ. Однак, на відміну від звичайної ЕПТ, у якій є одна чи три електронні гармати, у цих дисплеях кожен піксель має власне, незалежно адресоване джерело електронів [22]. Електрони генеруються з холодних катодів, які мають форму дуже гострих мікроголок: їх на кожен піксель може бути до декількох тисяч (рис. 6.26). Прикладання електричного поля між прозорим анодом екрана і катодом спричиняє доволі високі напруженості електричного поля через загостреність мікроголок. Мікроголочки виготовляють з тугоплавкого матеріалу типу молібдену для того, щоб за дуже великої густини струму, характерної для центрів емісії, не виникало розбризкування металу та затуплення голок. Електрони потім прискорюються та фокусуються на люмінофор і світло випромінюється в такий же спосіб, як у ЕПТ.

Дисплеї з емісією полем є доволі перспективними завдяки невеликим габаритам, широкому куту огляду (майже 180°), малому енергоспоживанню (декілька ватт для дисплея розміром із записну книжку), гарному відтворенню кольорів (люмінофор ЕПТ), високій швидкості роботи (у принципі тієї ж, що і ЕПТ).

Застосування люмінофорів ЕПТ вимагає використання високої прискорюючої напруги, що змушує електрони розходитися від прямої лінії. У цьому випадку пікселі стають не достатньо точно визначеними, тобто зображення розмивається. Для компенсації дефокусування потрібні додаткові

електроди, які ускладнюють конструкцію. Окрім цього, оскільки цей дисплей є вакуумним пристроєм, то наявність залишкових газів у з'єднанні з високою напругою спричиняє руйнівне іонне бомбардування мікроголок катодів. Отож сьогодні розробники дискутують з приводу доцільності використання люмінофорів ЕПТ.

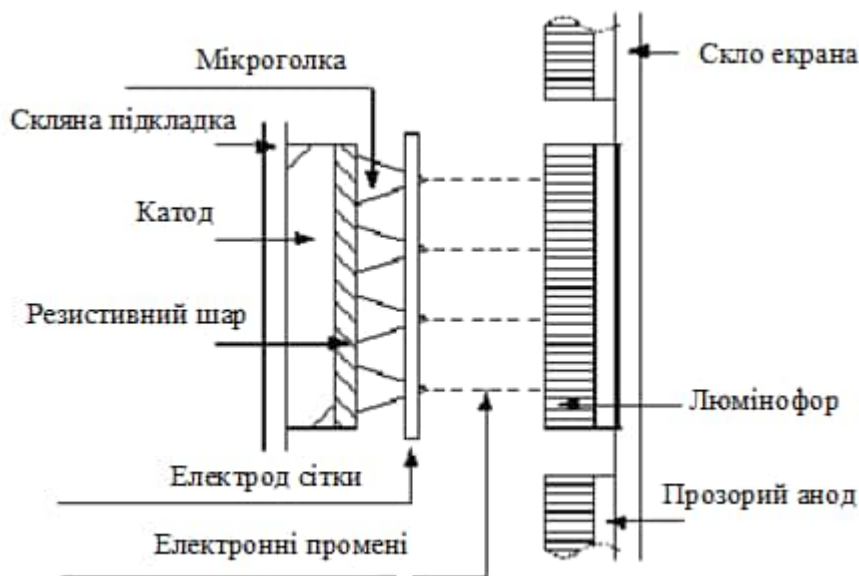


Рис. 6.26. Схема індикатора з емісією полем [9]

Дисплеї цього типу (здебільшого п'ятидюймові одноколірні дисплеї для приладів) сьогодні серійно в промислових масштабах робить *PixTech* (консорціум компаній у Європі, США і Японії).

Компанія *Candescent Xose* (Каліфорнія, США) оголосила про плани випуску таких дисплеїв розміром із записну книжку.

Однак успіхи в широкосерійному виробництві РК індикаторів з активною матрицею, очевидно, не даватимуть змогу дисплеям з емісією полем захопити широкий ринок.

6.2.7. Екрани на основі органічних світлодіодів. Однією з найперспективніших технологій відображення інформації є технологія органічних світлодіодів – *OLED (Organic light Emitting Diodes)*, запатентована наприкінці 80-х років минулого століття компанією *Eastman Kodak*. Підвищений інтерес до *OLED* пояснюють такими їхніми перевагами, як висока

яскравість і контрастність, а також відсутність необхідного підсвічування та, відповідно, низьке енергоспоживання.

Органічний світлодіод представляє собою багатошарову структуру, яка складається з декількох органічних шарів (діркової інжекції, перенесення дірок, світловипромінюючого і перенесення електронів) товщиною 100–150 нм, розміщених між прозорим анодом, нанесеним на скляну чи пластмасову підкладку, та осадженим поверх органічних плівок металічним катодом (рис. 6.27) [22].

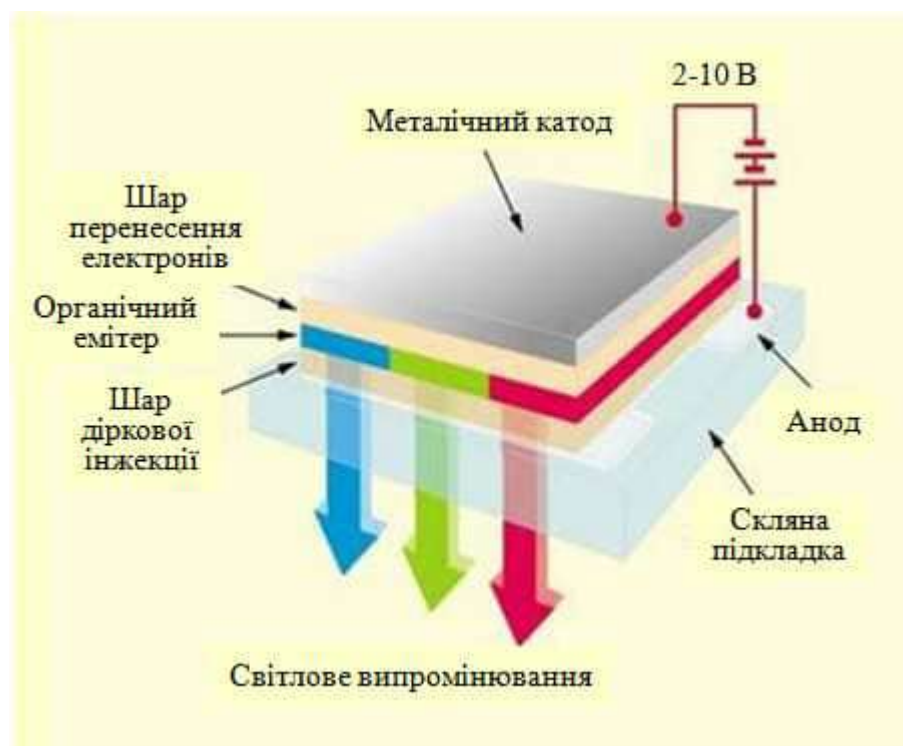


Рис. 6.27. Структурна схема *OLED*-панелі [41]

Кожний піксель формується з трьох органічних світлодіодів з синім, зеленим і червоним кольорами випромінювання.

Пасивно-матричні OLED – Passive Matrix OLED (PMOLED) прості за своїм виконанням і представляють собою матрицю елементів зображення, яка утворюється анодними і катодними лініями, що перетинаються. Під час подавання за допомогою зовнішнього контролера на певні стовпчики і рядки вхідної напруги і сигналу передавання відеоданих висвітлюються відповідні елементи зображення. Чим більший струм, який протікає, тим яскравіший піксель.

Панелі такого типу прості у виготовленні, проте вимагають застосування доволі дорогавартісних зовнішніх схем керування. До того ж, вони споживають велику потужність. На їхній базі доцільно виготовляти дисплеї з діагоналлю не більше 2–3-х дюймів і кількістю рядків до 100. Такі дешеві дисплеї з малим інформаційним наповненням знаходять доволі широке застосування у стільникових телефонах, MP3-плеєрах і портативних електронних іграх.

Активно-матричні OLED – Active Matrix OLED (AMOLED) продукують на скляних підкладках, поверх яких нанесені тонкоплівкові транзистори, що забезпечують індивідуальну адресацію кожного пікселя дисплею, отож дають змогу знизити споживану потужність. Для формування *TFT*-матриці найперспективнішим є метод низькотемпературної обробки полікристалічного кремнію – *LTPS (Low-Temperature Polycrystalline Silicon)*. Підкладки з полікристалічного кремнію забезпечують високе розділення (до 200 пікселів на дюйм та вище) і мале енергоспоживання [22]. Кількість пікселів, розділення та розмір активно-матричних *OLED* практично нічим не обмежені. Панелі цього типу перспективні для реалізації світлових індикаторів з високим розділенням та великим інформаційним наповненням, у тім числі засобів відображення відеоінформації та графічних пристроїв.

Головні робочі характеристики дисплея, до яких належать довжина хвилі випромінювання (колір), термін служби та ефективність, залежать, передусім, від органічного матеріалу багат шарової структури. Сьогодні органічні світлодіоди, здебільшого, продукують або на базі низькомолекулярних матеріалів, або на основі спеціального класу полімерів, які здатні випромінювати світло під час збудження.

У полімерних органічних світлодіодах, зазвичай, використовують полімери двох родин – полі-(*n*-феніленвінілен) (*PPV*) і полі-флуорен (*PF*). Полімери наносять на підкладку методом струменевого друку. На їхній основі можуть бути виготовлені повноцінні дисплеї з діагоналлю до 40 дюймів.

До переваг органічних світлодіодів на основі низькомолекулярних матеріалів (Alq_3 , Vebq_3 , ZnPBO_2 , координаційних сполук з комплексами іридію, координаційних сполук таких рідкісноземельних елементів, як Tb^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} ,

тобто лантанідів [35]) належить їхня сумісність з більшістю операцій виробництва напівпровідникових приладів. Вони суттєво переважають полімерні світлодіоди за терміном служби та ефективністю, проте метод їхнього виготовлення неприйнятний для створення дисплеїв великих розмірів. Отож сьогодні низькомолекулярні органічні дисплеї вважають найсерйознішим конкурентом РК-дисплеїв в області дисплеїв малих розмірів.

Останнім часом увагу розробників привертають органічні світлодіоди на основі розчинного в полімері фосфоресціюючого низькомолекулярного матеріалу. Фосфоресціюючі *OLED* за ефективністю у чотири рази переважають звичайні органічні світлодіоди. До переваг фосфоресціюючих *OLED* належать можливість формування на їхній основі екранів великих розмірів (завдяки малій споживаній потужності і великій світловіддачі), а також сумісність технології з процесами формування активних матричних структур з *TFT* на базі аморфного чи полікристалічного кремнію.

Розроблені також прозорі органічні світлодіоди, які формують з прозорими електродами на тонких прозорих скляних чи пластмасових підкладках. Такі світлодіоди випромінюють світло верхньою, нижньою чи обома поверхнями. Оскільки в неробочому режимі такі панелі прозорі на 70 %, їх можна монтувати на скельцях окулярів, лобовому склі автомобіля чи на вікнах.

Сьогодні використовуються три схеми для реалізації кольорових *OLED* (рис. 6.28) [47].

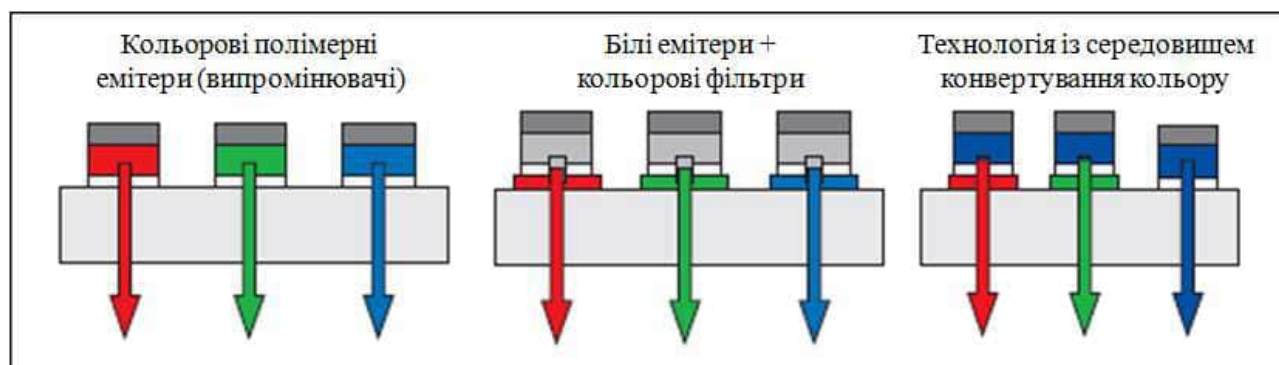


Рис. 6.28. Три варіанти формування структур кольорових *OLED* [47]

Найперший і логічний варіант – з роздільними емітерами. Цей варіант найефективніший, з огляду на використання енергії. Однак його реалізують з певними технологічними труднощами. Другий варіант, простіший в частині створення білих емітерів, однакових для усіх трьох компонентів світла, проте він значно програє за ефективністю використання енергії першому варіантові. У третьому варіанті – *Color Changing Media (CCM)* застосовують голубі емітери і люмінесцентні матеріали для перетворення короткохвильового голубого випромінювання у довгохвильове – червоне та зелене.

Перелічимо переваги *OLED* [22]:

- надзвичайно малі товщина (0,2 мм) і маса, гнучкість конструкції, яку можна реалізувати на пластмасовій тонкоплівковій підкладці у вигляді «електронного паперу», що робить такі засоби відображення перспективними для застосування в різноманітних портативних пристроях;
- вищі, порівняно з РК-дисплеями, значення яскравості (понад 100 000 кд/м²) і контрастності (1 000 000:1); високе розділення; широкий кут огляду (до 180°);
- відсутність підсвічування та хороша видимість навіть за яскравого освітлення;
- висока частота перемикання зображень (втричі вища, ніж вимагається для відтворення телевізійного зображення) – час перемикання становить мікросекунди;
- мала споживана потужність, що, попри збільшення терміну служби батарей портативних пристроїв, забезпечує високу ефективність діодів і дає змогу мінімізувати тепло, яке виділяється, і завади, які вносяться.

Однак *OLED* відзначаються також низкою недоліків [40]:

- Час життя органіки, що випромінює світло, прямо залежить від довжини хвилі. Червоні і зелені *OLED* можуть працювати десятки тисяч годин. Рекорд для синього *OLED* – 17,5 годин. Він не «ламається» раптово, а поступово деградує, причому робить це швидше за інших. Отож, уже через 5 000 годин служби ми втрачаємо якість кольоропередачі. У дисплеї починає превалювати один з кольорів.

- Власне органіка. Матеріали, які використовують для створення *OLED*, активно контактують з водою: розбухають, окислюються і т. д. Необхідна надзвичайно надійна герметизація. Природно, що удари і падіння таким екранам протипоказані.

- Кожен діод представляє собою джерело світла. Залежно від картинки, окремі елементи матриці випромінюють з різною інтенсивністю. Їхнє зношення у цьому випадку є нерівномірним. Отож можливі випадки, коли в *OLED* вигорятимуть окремі пікселі.

- Ціна. Виробництво *OLED*, передусім великих діагоналей, вкрай дороговартісне. Якщо на мобільному ринку з цим ще можна змиритися, та й обсяги продажів сприяли зниженню вартості до прийняттого рівня, то діагоналі понад 10 дюймов – ще проблема. Показовий у цьому сенсі приклад першого *OLED*-телевізора *Sony XEL-1*: 11-дюймовий телевізор припинили продавати в Японії. Він залишається тільки на ринках Європи і США, куди його вивели нещодавно. За рік *Sony* вдалось продати трохи більше, як 2 000 телевізорів вартістю 2,5 тис. дол. США.

OLED володіє безумовними перевагами, порівняно з РК- та плазмовими дисплеями, електронним папером. Він дає змогу робити прозорі табло, гнучкі екрани та інші фантастичні речі. Однак *OLED* і досі занадто дороговартісні.

6.3. Сучасні різновиди екранів

6.3.1. Екрани *E-Ink*. Представляючи 2004 року електронну книгу *LIBRIe* на екрані *E-Ink*, японська компанія *Sony* здійснила своєрідну революцію. Після десятиліть існування інформаційних дисплеїв, спочатку на електронно-променевих трубках, а останніми роками на рідкокристалічних панелях, ми вперше отримали у своє користування екрани, зручність читання з котрих практично не відрізняється від звичайного паперу.

Компанія *Sony* настільки вірила у перспективу технології, що тривалий час забороняла продавати екрани *E-Ink* іншим розробникам, надаючи суттєву фору своїм електронним книгам і не боячись конкуренції. Тільки через чотири

роки дисплеї *E-Ink* потрапили до рук дійсно великого виробника — *Amazon* (книги *Kindle*); до цього моменту їх обмежено поставляли китайським компаніям *Jinke Electronics* (моделі під марками *Hanlin*, *Lbook*) і *Netronix* (моделі під марками *Pocketbook*, *Orsio*, *Explay*).

Сьогодні моделей електронних книг на екранах *E-Ink* настільки багато, що простежити за усіма неможливо. Технологія «електронних чорнил» компанії *E-Ink* за роки свого комерційного розвитку заслужено стала лідируючою у ніші електронних книг, однак, оскільки процес триває, з'явилися альтернативи – електронні книги на основі технологій, відмінних від *E-Ink*. Ознайомимося з головними напрямками, здатними конкурувати з цією розробкою.

Екран *E-Ink* представляє собою масив мікрокапсул з прозорою рідиною, в котрій вільно плаває двоколірна по-різному заряджена суміш – негативно заряджені чорні і позитивно заряджені білі частинки фарби [38] (рис. 6.29).

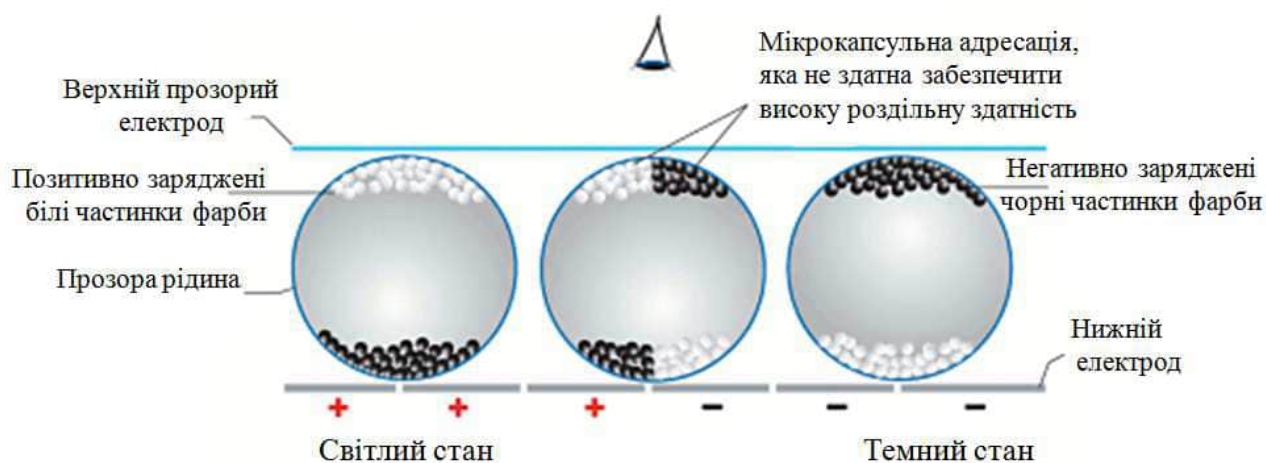


Рис. 6.29. Реалізація технології «електронних чорнил» компанії *E-Ink* [38]

Керуючи зарядами на підкладці, як одні, так і другі частинки можна змусити впливати до фронтальної поверхні екрана чи, навпаки, тонути в його глибині. Як наслідок, текст на такому екрані виглядає як надрукований звичайною типографською фарбою (адже, фактично, саме фарбу ми й бачимо), а білий пігмент відбиває світло подібно до аркуша паперу, не створюючи бліків, незмінних супутників усіх звичайних екранів, які потрапили під джерело зовнішнього освітлення. Насамкінець, якщо знімається напруга з комірки, частинки фарби залишаються там, де і були, оскільки для утримання картини не

потрібно витрачати енергію (цю властивість екрана називають *бістабільністю*) [22].

Усі наведені нижче технології також мають ці дві властивості: по-перше, інформацію на них легко читати за яскравого сонячного світла, по-друге, для утримання картинки вони або взагалі не вимагають енергії, або її кількість мінімальна.

6.3.2. Екрани на холестеричних рідких кристалах. Електронну книгу на екрані *Cholesteric Liquid Crystal Display (ChLCD)* продукує японська компанія *Fujitsu* (рис. 6.30). Попри те, що сьогодні це єдина на ринку електронна книга на холестеричних рідких кристалах (не знята з виробництва, а такі були), вона – єдина серійно продукована кольорова книга.



Рис. 6.30. Вигляд кольорової електронної книги на екрані *ChLCD* [38]

Обмежені продажі і дорожнеча – ознака недостатньої зрілості технології (як з точки зору випуску прийнятних за споживчою якістю екранів, так і в плані собівартості). Найбільші труднощі виникли з отриманням білого кольору і, як наслідок, низькою відбивальною здатністю (білизною екрана). Забігаючи наперед, зазначимо: теоретична максимально можлива рефлексивність *ChLCD* – 50 %. У реальних продуктах це значення знижується до 35 % та

нижче, водночас відбивальна здатність екранів *E-Ink* останнього покоління впевнено перевищує 40 %.

Однак технологія продовжує розвиватися. Цільовою нішою *ChLCD*-панелей вважають електронні цінники, рекламні та інформаційні табло, панелі цифрових гаджетів, включаючи флешки, навігатори та інші пристрої.

До появи електронних книг на екранах *E-Ink* серед споживачів пристроїв для електронного читання холестеричні рідкі кристали користувались помітним попитом. Приклад такого екрана у складі моделі *Hanlin L12* можна побачити на рисунку 6.31.



Рис. 6.31. Електронна книга моделі *Hanlin L12* [38]

До речі, перший підхід до книги, яку згодом назвали *Lbook*, також здійснений з використанням *ChLCD*-панелі (модель *IVY Reader*). Загалом, починаючи з 2004 року і до сьогодні, у ніші електронних книг з монохромними екранами технологія *E-Ink* не залишила шансу *ChLCD*. На слові «монохромний» наголосимо. На відміну від *E-Ink*, з його 16-ма градаціями сірого в сучасному виконанні керувати *Ch*-коміркою для отримання аналогічної кількості градацій дуже і дуже важко. Тому *ChLCD* впевнено закріпились у ніші екранів, кожна точка котрих має два стани: *увімкнено* чи *вимкнено*; *білий* чи *чорний*.

Суттєва перевага панелей на монохромних холестеричних рідких кристалах полягає в низькій собівартості екранів – приблизно вдвічі дешевше, ніж в екранів *E-Ink*. Своєю чергою, дешевизну пояснюють використанням пасивних підкладок для керування пікселями: якщо в активно-матричних підкладках для керування кожним пікселем екрана *E-Ink* необхідна своя транзисторна група, то для керування пікселями *ChLCD* достатньо простої решітки зі струмопровідних електродів (стовпець/колонка).

На жаль, малу собівартість виробництва *ChLCD* нівелювали такі недоліки, як повільне, порівняно з *E-Ink*, перемикання екрана (передусім стосовно екранів, у котрих усе ж реалізовано відображення градацій сірого), гірший кут огляду і висока чутливість до коливань робочих температур. Проте сучасні монохромні холестеричні панелі за такими параметрами, як білизна і контрастність екрана, демонструють прекрасні результати – часто не гірші, ніж у *E-Ink*. Також відійшло в минуле кольорове (зелене) забарвлення підкладки. Білизна фону сучасних *ChLCD*, як бачимо на прикладі електронного цінника *Citizen* (рис. 6.32), особливих нарікань не викликає.



Рис. 6.32. Електронний цінник *Citizen* з використанням *ChLCD*-панелі [38]

І все ж, повторимося, у ніші електронних книг монохромні *ChLCD* уже програли. Доки вони позбавляться усіх недоліків, електрофоретичні екрани ще більше втратять у ціні і покращать свої споживчі характеристики. Зазначимо, що холестерики ризикують програти і кольоровим електронним книгам. Хоча кольоровий *E-Ink* поступається за якістю відображення кольору кольоровим

ChLCD (та ж *Fujitsu FLEPia*), проте швидкість перемикання холестеричних екранів нижче усілякої критики: картинка у 64 кольори формується протягом 1,8 секунди в один прохід (вдвічі довше за перемикання екрана *E-Ink*); картинка з 4 096 кольорів формується в два проходи протягом 5 секунд; насамкінець, на «повноколірність» з 260 000 кольорів вимагається три проходи і 8 секунд.

До того ж, з надмірно тривалим поновленням екрана говорити про суттєву економію від бістабільності не доводиться – за той час, доки екран перемикатиметься, він встигне спожити достатньо енергії. Навіть для 64-колірного режиму термін життя акумулятора електронної книги *Fujitsu FLEPia* не перевищує 40 годин за швидкості перекидання сторінок один раз у хвилину (всього 2 400 сторінок). Дво- і трипрохідні режими витрачають заряд батарей ще швидше. А от книжок з екраном *E-Ink* вистачає на кількість перекидань у три–чотири рази більше – до 10 000 сторінок.

Однак не все втрачено. Вище уже наведено області застосування *ChLCD* – це зовнішня реклама і дрібна електроніка. Про перспективність напряду можна робити висновки хоча б за тим, що тему холестеричних екранів як дисплеїв з пам'яттю розробляє найбільше компаній, включаючи *Fujitsu*, *Fuji Xerox*, *Hitachi*, *Kent Display*, *Kodak*, *Varitronix*, *ZBD Display*, *LC-TEC Displays* і *Citizen Watch*.

Пояснимо принцип роботи кольорового екрана *ChLCD*. Розглянемо екран електронної книги *Fujitsu FLEPia*, розроблений американською компанією *Kent Display*.

Структура шару екрана *ChLCD Kent Display* подібна до структури екрана *E-Ink*. Обидва є масивами деяким чином упорядкованих в одній площині мікрокапсул.

На рис. 6.33, б у вигляді «ікри мінтая» зображено щойно «витиснуті» через мембрану-сито мікрокрапельки розчину холестеричних рідких кристалів у 18 мкм. Надалі вони проходять стадію полімеризації, у процесі котрої розміщуються всередині герметичних полімерних мікрокапсул. Своєю чергою, шар міцно зв'язаних між собою мікрокапсул покривається ламінатом з полімерної плівки (рис. 6.33, а).

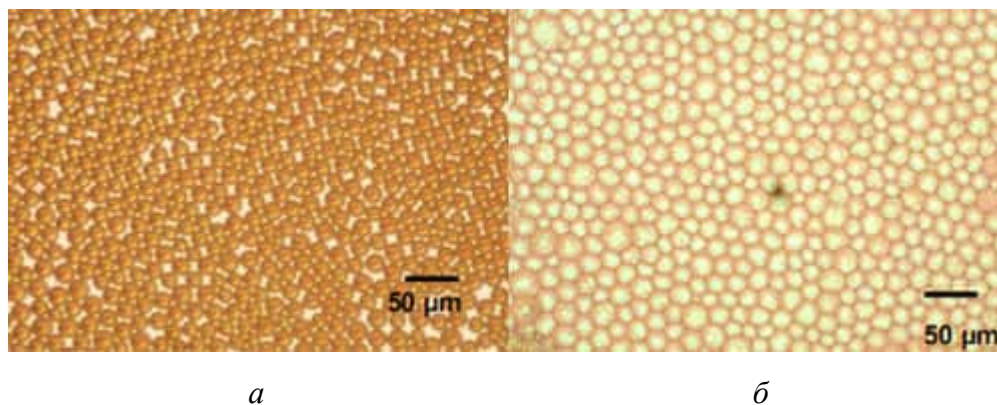


Рис. 6.33. Структура шару екрана *ChLCD Kent Display* [38]: *а* – мікрокапсули після полімеризації та покриття ламінатом з полімерної плівки; *б* – вигляд мікрокрапельок розчину холестеричного рідкого кристала, які отримані крізь мембрану-сито.

Міцність отриманого монохромного екрана-плівки настільки велика, що без проблем витримує серйозний тиск і зусилля на вигин. Оскільки підкладка *ChLCD* пасивна, достатньо нанести на плівку сітку з прозорого полімерного провідника і все – дисплей готовий до використання! Такому екрану можна надати будь-яку форму: нанести на скло чи на пластикову підкладку або ж на футболку. Побічним напрямом (чи, можливо, в подальшому – головним) для *ChLCD* обіцяє стати обладнання електропобутових товарів електронним аналогом шкіри хамелеона. Найтоншим шаром *ChLCD* можна покрити пристрій будь-якої форми, що сприятиме, наприклад, появі телефонів, які оперативно змінюватимуть колір корпусу, наприклад, відповідно до кольору лаку на нігтях, як зображено на рис. 6.34.



Рис. 6.34. Зміна кольору корпусу мобільного телефона, який покритий шаром *ChLCD* [38]

Зазначимо, що керуючу сітку з полімерного провідника наносять за кімнатної температури методом струменевого друку, що значно спрощує і здешевлює процес виробництва екранів *ChLCD* [38]. Одношаровий монохромний *ChLC*-екран схематично зображено на рис. 6.35.

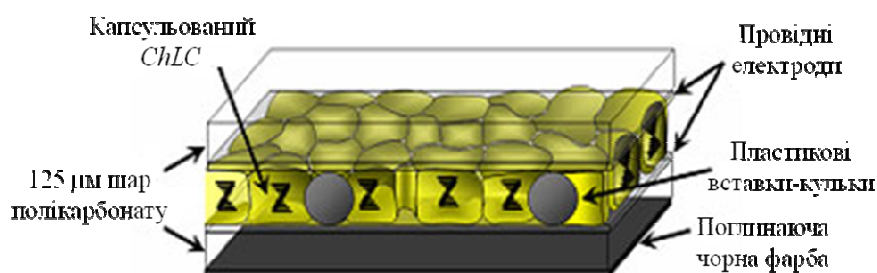


Рис. 6.35. Схематичне зображення одношарового монохромного *ChLCD* [38]

Ламінат з мікрокапсулами, додатково підсилений пластиковими вставками-шариками, після нанесення з обох боків плівки сітки з прозорих пластикових електродів, з кожного боку ще й зміцнюють прозорими полікарбонатними накладками (субстратом), рівними за товщиною з «інформаційним» шаром. Іншим обов'язковим атрибутом нижнього боку кожного *ChLC*-екрана є поглинаючий світло чорний шар. Зображені на рис. 6.35 у вигляді символу пісочного годинника рідкі холестеричні кристали демонструють стан розчину в одному з стійких положень – *конфокальному* (*focal-conic*), що практично повністю пропускає падаюче світло (до 95 %), після чого його цілковито поглинає чорна підкладка. Такі точки виглядають на екрані як чорні.

У другій стійкій фазі – *планарній* – холестеричні рідкі кристали відбивають падаюче світло з максимальним коефіцієнтом 50 %. В ідеалі, у планарній фазі пікселів ми повинні бачити на екрані білі точки. На практиці *ChLC*-екрани лише позбулися зелених тонів і намагаються позбутися сірих. Зате властивість холестеричних кристалів вибірково відбивати світло певної довжини хвилі знадобилось для створення кольорових *ChLC*-екранів. З цією метою конструюється своєрідний бутерброд з трьох шарів монохромних *ChLC*-плівок, де кожен шар заповнює розчин холестеричних кристалів, що відбивають світло своєї довжини хвилі (рис. 6.36) [38]. Нижній шар у

планарному стані кристалів відбиває червоний колір, середній шар – зелений, а верхній – синій, реалізуючи, відповідно, адитивну модель кольорового синтезу, коли усі три кольори в сумі дають білий (рис. 6.36, б).

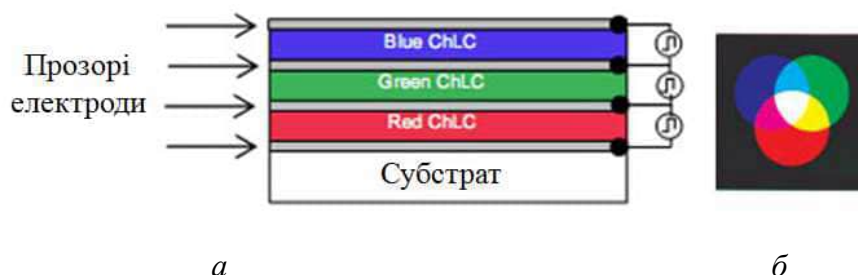


Рис. 6.36. Схематичне зображення кольорового *ChLC*-екрана [38]: а – формування тришарової конструкції екрана з монохромних *ChLC*-плівок; б – адитивне додавання трьох базових кольорів

На відміну від традиційної дисплейної адитивної моделі, коли кожен піксель складається з трьох субпікселів (червоного, синього і зеленого), тришаровий *ChLC*-піксель не витрачає відведений йому простір екрана на субпікселі. Падаюче світло перетворюється у кольорову плямку завжди строго однієї і тієї ж площі. Це дає підставу вважати кольорові *ChLC*-екрани одними з найяскравіших серед екранів з пам'яттю. Проблема полягає в тому, що суттєву частину падаючого світла поглинають проміжні шари і система електродів. На виході, як уже зазначено вище, виявляється трохи більше 35 % падаючого світла.

Крім виграшу в яскравості, тришарова реалізація кольорового екрана дає змогу зберегти задовільну роздільну здатність. Плівки *E-Ink*, наприклад, для реалізації кожного кольорового пікселя вимушені спиратися відразу на чотири субпікселя – червоний, синій, зелений і білий, що різко знижує роздільну здатність кольорового *E-Ink*.

Зате втрати світла у накладному світлофільтрі за умови перевідбивання падаючого світла від білої суміші в мікрокапсулах екрана *E-Ink* мінімальні і додатково компенсуються відсутнім в адитивній схемі білим субпікселем. Хоча і кольорові *E-Ink*, і кольорові *ChLCD* не здатні подолати кольорове охоплення 10 % NTSC, зупинившись десь на рівні 5–7 %.

Залишається додати, що структура холестеричних рідких кристалів є пошаровою, де кожен шар складається з орієнтованих в одному напрямі «ниток» молекул. Властивість холестериків відштовхуватися вершинами спричиняє зсув кожного нижнього шару по горизонталі за чи проти годинникової стрілки (див. рис. 6.37).

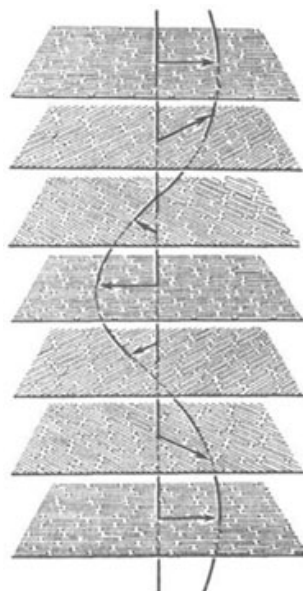


Рис. 6.37. Пошарова структура холестеричного рідкого кристала

Отже, вертикаль розтину холестериків нагадує пакет «дисків» із зсунутими по спіралі вершинами молекул. Такий стан – стійкий планарний – максимально відбиває світло у видимому діапазоні. Приклавши на короткий час до розчину напругу, спіраль можна розпрямити, і нитки холестериків сформують стійку вертикально орієнтовану конфокальну структуру, котра не перешкоджає проходженню світла до нижніх рівнів.

6.3.3. Рідкокристалічні дисплеї на основі нематиків з пам'яттю.

Серед рідких кристалів ефект пам'яті виявлено також у нематичного матеріалу. Нематики давно і широко застосовують під час створення звичайних РК-моніторів.

Примусити спіралеподібні нитки «*Super Twisted Nematic*» приймати два стійких стани змогла французька компанія *Nemoptic* (технологія *BiNem*, *Bistable Nematic*). Як і звичайні *STN*-екрани, які застосовують у недорогих телефонах та в інформаційних табло вимірювальної і побутової техніки, матриці *BiNem*

пасивні. Головна відмінність *STN BiNem* від звичайних *STN LCD* – у дуже тонкому проміжку між двома прозорими стінками підкладок – порядку 1–2 мкм, тоді як традиційний *STN* дисплей має проміжок між підкладками 20–25 мкм. Найбільша проблема під час виготовлення *BiNem*-панелей полягає у необхідній надзвичайній точності виготовлення екранів. Проміжок настільки малий, що виникає ризик короткого замикання верхнього і нижнього струмопровідних шарів, та й заповнити настільки тісний простір рідкокристалічним матеріалом проблематично.

Перелічимо переваги цієї технології. По-перше, *STN BiNem* панелі можна продукувати на звичайному обладнанні, на котрому уже десятиліттями виробляють звичні *STN*-панелі. Зазначимо, що оптичні властивості *Bistable Nematic* помітно вищої якості від *STN*-екранів – як за відбивальною здатністю, так і за кутами огляду та контрастністю. Проте найголовніше, що *BiNem*-панелі можуть місяцями зберігати картинку без необхідності підведення живлення, тоді як звичайні *STN* вимагають постійного живлення для регенерації зображення.

На жаль, чудові якості французької технології не знайшли відгуку серед виробників електронних книг. *Nemoptic* 2007 року знайшла партнера — японську компанію *Seiko Instruments*, а 2008 року уклала з нею крос-ліцензійну угоду. Згідно з угодою, *Seiko* зобов'язалась на своїх заводах налагодити випуск широкого спектра патентованих екранів *STN BiNem*, однак з того часу вони жодного разу не були затребувані як дисплеї для електронних книг. Очевидно, «дякувати» за це потрібно екранам *E-Ink*, які переважають за оптичними властивостями екрани *Nemoptic*.

За винятком двох прототипів екранів для електронних книг, про котрі йтиме мова нижче, технологія *BiNem* гарантовано знайде застосування в екранах з пам'яттю для електронних цінників, телефонів, дрібної електроніки та інформаційно-рекламних табло. В останньому випадку необхідно враховувати таку особливість технології *Nemoptic*, як можливість працювати із підсвіченням ззаду, що, в принципі, можна реалізувати в конкуруючих бістабільних технологіях. Від підсвічення ззаду виграють, насамперед,

кольорові *BiNem*-екрани: хоча кількість кольорів не перевищить 32 К, вони будуть достатньо яскравими. Енергоспоживання *BiNem*-екранів із підсвіченням, зрозуміло, буде порівняно велике саме через підсвічення.

Відсутність замовлень на «книжкові» екрани наштотувала *Nemoptic* на створення тільки двох реальних прототипів *BiNem*-екранів: чорно-білого формату А4 (рис. 6.38) і кольорового з діагоналлю 5,1 дюйма. Чорно-білий екран BD 500 дійсно вражає розмірами [38].

Дисплей зі сторонами 210×297 мм має розділення 1 650×2 340 пікселів з кроком 200 точок на дюйм. На цьому переваги закінчуються. Відбивальна здатність екрана рівна 30 % – як у першого покоління екранів *E-Ink*. До того ж, час перемикання екранів *BiNem* значною мірою залежить від температури оточуючого середовища: якщо при 25 °С час перемикання екрана приблизно рівний 1 с, то вже при 10 °С він наближається до 2 с, а керуючу напругу необхідно підвищувати з 15 В до 25 В.

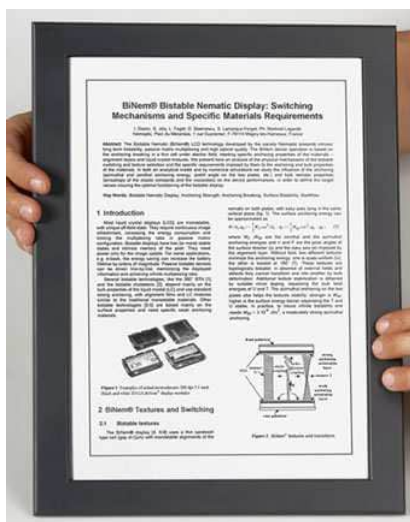


Рис. 6.38. Чорно-білий *BiNem*-екран [38]

За замовчуванням бістабільність рідкокристалічних розчинів передбачає тільки два стани – світло пропускається і не пропускається, отож проблемно підвищити на них кількість градацій. Зате з градаціями сірого на екранах *Nemoptic* значно простіше, ніж із відображенням півтонів на екранах з холестеричними рідкими кристалами. Модулюючи імпульс записування, *Nemoptic* досягає того, що кожен піксель *BiNem* може набувати один із 32-х

відтінків. У поєднанні з накладними кольоровими фільтрами кількість кольорів, яка відображається у такий спосіб, перевищує 32 тисячі.

Зазначимо, що ефект сірого на екранах *BiNem* доволі своєрідний. Компанія називає його «ефектом шторки». Кожен крок градації буквально виглядає так, наче яскравий піксель «вікна» поступово від одного краю до іншого затягують чорною шторкою. Від цього екрани *BiNem* невисокого розділення володіють яскраво вираженою смугастістю.

Оскільки ми підійшли до *BiNem*-кольору, розглянемо, що є прототипом кольорового 5,1-дюймового екрана *Nemoptic BD 1000* (див. рис. 6.39) [48].

Як і в усіх кольорових «папероподібних» екранів, окрім *ChLCD*, розділення кольорового екрана *Nemoptic* залишає бажати кращого – 100 точок на дюйм. Проте це краще, ніж у багатьох прототипів кольорових *E-Ink*, у котрих розділення потрапляє в діапазон 50–70 точок на дюйм, тоді як серійні чорно-білі *E-Ink* мають розділення від 160 до 200 точок на дюйм.



Рис. 6.39. Кольоровий 5,1-дюймовий екран *Nemoptic BD 1000* [48]

З яскравістю справи складаються не найкращим чином. На жаль, компанія не уточнює відбивальної здатності, наголошуючи лише на покращенні цього показника на 20 %, порівняно з кольоровими *BiNem* попереднього покоління. Досягти кращої білизни кольорового екрана компанії *Nemoptic* допоміг, як і в кольорових *E-Ink*, нехитрий спосіб введення в адитивну схему *RGB* четвертого – білого – пікселя. Враховуючи, що чорно-білий екран *BiNem* без накладних кольорових фільтрів відбиває 30 % падаючого світла, малоймовірно, що такий же екран з кольоровим фільтром, світло через котрий

проходить двічі, може похвалитися тією ж білизною. Ймовірно, відбивальна здатність кольорових *BiNem* ледь перевищує 20 %.

Уся вище зазначена інформація щодо нематиків з пам'яттю зумовила закономірний результат. Якби ця технологія з'явилась хоча б років за п'ять–десять до виходу *E-Ink*, вона б мала непоганий шанс на успіх. Проте в галузях, відмінних від випуску дисплеїв для електронних книг, технологія *BiNem*, ймовірно, користуватиметься популярністю.

Насамкінець пояснимо принцип роботи технології на бістабільних нематичних рідких кристалах. Як уже зазначено, особливістю технології *BiNem* є надзвичайно малий проміжок між підкладками (і струмопровідними контактами). Проміжок не перевищує 2 мкм і рівний довжині одного періоду спіралі рідких кристалів. З внутрішнього боку в підкладках протравлені чи процарапані мікрощітками канавки – так зване орієнтуюче покриття, причому канавки у верхніх підкладках повернуті на 90° відносно нижніх.

Кінці спіралей рідких кристалів зручно лягають у верхню (*master*) і нижню (*slave*) канавки. При цьому зчеплення у верхній частині таке, що спіраль кріпиться намертво, тоді як у нижній канавці за певних умов кінець спіралі може просковзнути до наступного положення чи попереднього. Отже, спіраль РК може набувати двох стійких станів — нескрученого (*U – untwisted*) і на 180° скрученого (*T – twisted*) [48], що й відображено на рис. 6.40.

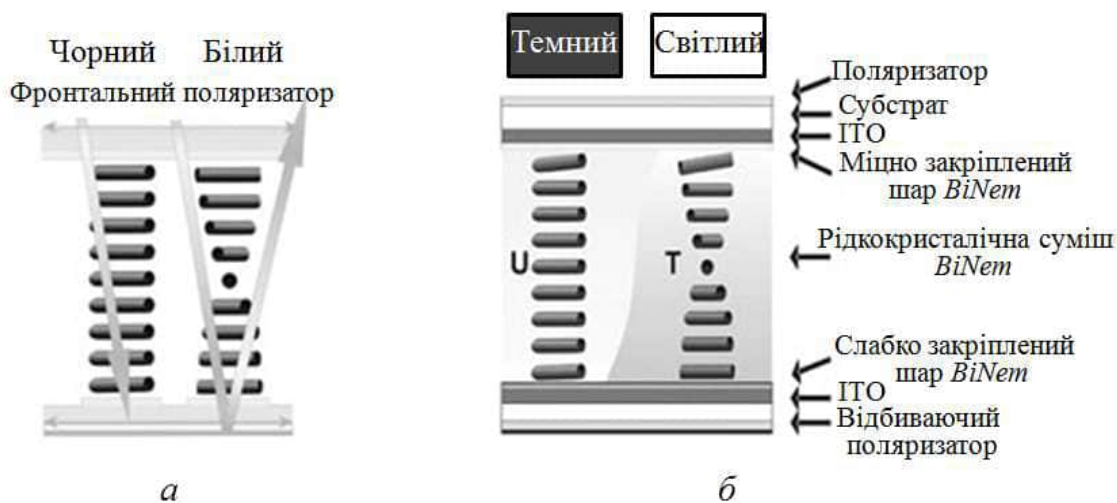


Рис. 6.40. Принцип роботи технології на бістабільних нематичних рідких кристалах:

а – формування рідкокристалічної спіралі у нескрученому та скрученому станах; б – структура темної та світлої *BiNem*-комірки [48]

В одному випадку комірка пропускає світло, і воно відбивається до спостерігача (біла крапка), в іншому – поглинається матеріалом (чорна крапка). Який зі станів відбиватиме чи поглинати світло, залежить від типу й орієнтації поляризаторів з фронтального і відбивального боків.

У початковому стані кінці молекули РК-спіралі лежать кожна у своїй канавці і розвернуті на 90° один щодо іншого. Передній фронт імпульсу впорядковує домени РК-молекул уздовж ліній силового поля; якщо напруга перевищує силу розривання зв'язку (сходінка на імпульсі), скручена на 90° спіраль викидає нижній кінець з канавки і розпрямляється (див. рис. 6.41). Після знімання поля спіраль виявляється в стійкому нескрученому стані [48].

Якщо керуючий імпульс має іншу форму, нижній кінець спіралі молекули під його дією та дією внутрішніх сил повертається ще на 90° , а після знімання поля кінці спіралі виявляються розвернутими на 180° – РК-матеріал набуває іншого стійкого стану. Регулюючи висоту сходинок, досягають проміжних поворотів спіралі, чим підвищують кількість градацій сірого.

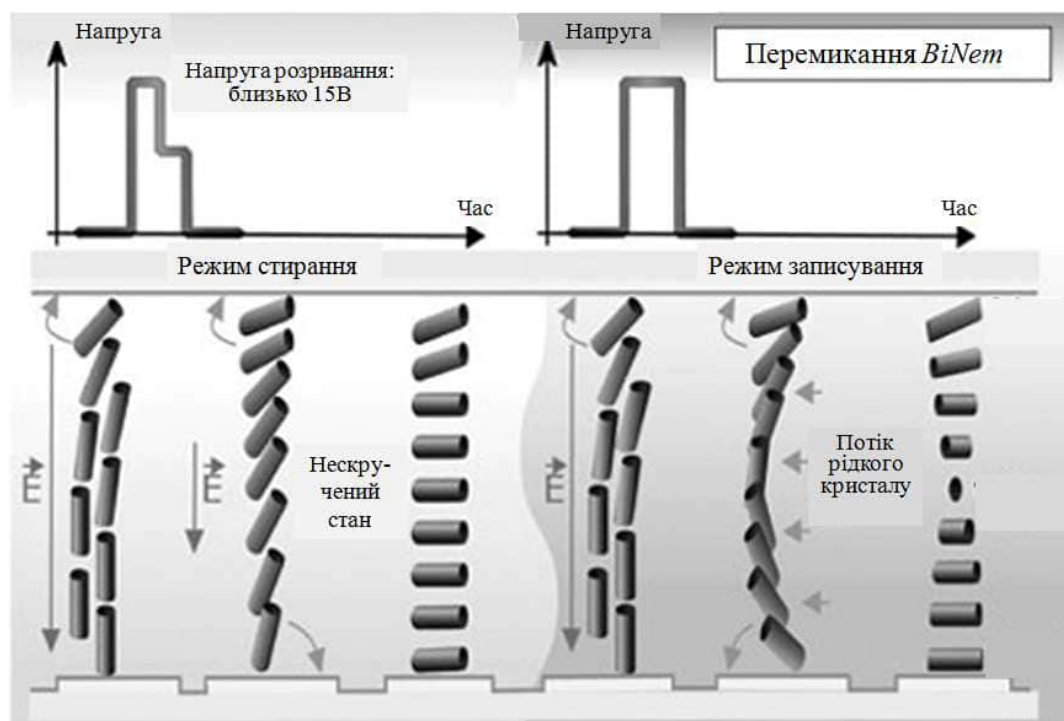


Рис. 6.41. До пояснення режимів стирання і записування крапки *BiNem*-комірки [48]

6.3.4. Екрани *Pixel Qi*. Загалом, екрани компанії *Pixel Qi* (рис. 6.42) не належать до екранів з пам'яттю. Не враховуючи деякої доробки, про котру йтиме мова нижче, – це звичайні недорогі *TN*-матриці. В описах розробки чи пристроїв на основі екранів *Pixel Qi* часто трапляються слова «*e-paper*», «*гібридні екрани*» та «*електронні книги*». Навіть на сайті компанії безпосередньо написано «*E-Paper with Color and Video*». Насправді ж уся премудрість екранів *Pixel Qi* полягає в комбінації рефлексивного РК-екрана та екрана з підсвіченням. За хорошого зовнішнього освітлення подібний підхід дає змогу відмовитися від підсвічення ззаду, зекономивши на заряджанні батарей ноутбука, проте жодним чином не від принципу роботи *TN*-матриці, яка вимагає регулярної регенерації будь-якої картини [38].



Рис. 6.42. Екран компанії *Pixel Qi* [38]

На практиці все виглядає як друкований текст, нанесений на дзеркало (адже відбите світло підкоряється законам дзеркального відбивання, а не розсіюється). Опишемо технологію *Pixel Qi*, її роботу і переваги.

На офіційному сайті компанії *Pixel Qi* шукана інформація щодо однойменної технології відсутня. Проте відомо, що засновник компанії Мері Лу Джепсен (*Mary Lou Jepsen*) до роботи в *Pixel Qi* була технічним директором некомерційного проекту «Ноутбук – кожній дитині» – *One Laptop per Child (OLPC)*. У шкільному ноутбуці *XO-1* вперше реалізували комбінований чи гібридний екран, здатний працювати у двох режимах – монохромному високого розділення без підсвічення і кольоровому низького розділення з підсвіченням.

Очевидно, базові принципи нових екранів $3Q_i$ ті ж, що і в екранах $XO-I$. На рис. 6.43 представлено схему одного пікселя такого екрана [38].

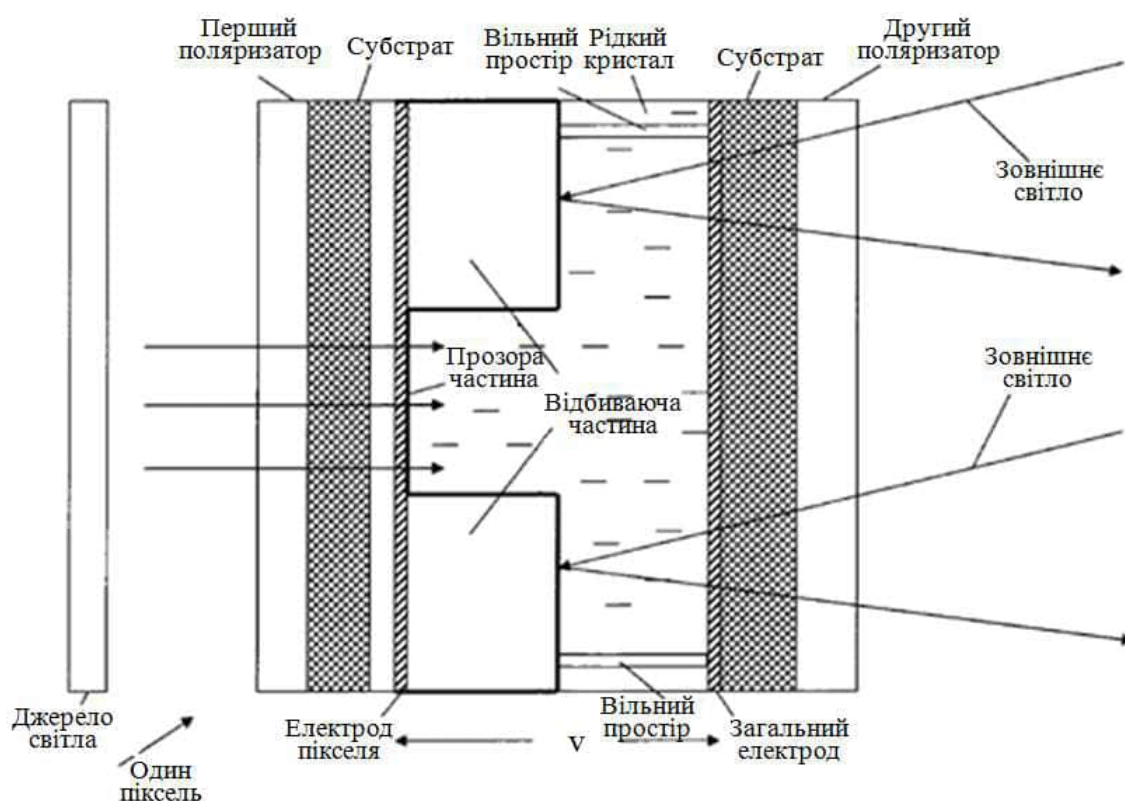


Рис. 6.43. Схематична структура одного пікселя екрана $XO-I$ [38]

За винятком двох конструктивних особливостей, кожен піксель гібридного екрана є звичайним набором пари поляризаторів, пари скляних підкладок і пари груп керуючих електродів. Всередині об'єм заповнено розчином звичайного TN РК-матеріалу. Перша особливість пікселя полягає в тому, що тільки середня його частина пропускає світло від джерела підсвічення ззаду. Непрозорі краї пікселя покриті дзеркальним матеріалом: коли піксель відкритий, він не тільки пропускає світло підсвічення, а й відбиває світло, що падає від зовнішнього джерела.

Друга особливість пікселя гібридного екрана впливає з першої – кольоровий фільтр перенесено з фронтального боку екрана на бік нижнього субстрату. Отож колір можливий тільки за працюючого підсвічення ззаду, а в яскравому зовнішньому освітленні екран виглядатиме монохромним (чорно-білим) і підсвічення рекомендується відімкнути.

На практиці гібридний екран виглядає чорно-білим тільки за яскравого прямого сонячного світла – такий рівень освітлення неприйнятний для очей. У тіні чи в приміщенні «кольорове» підсвічення боротиметься із зовнішнім приглушеним освітленням, що проявиться у вигляді кольорових розводів навколо чорних літер або, у випадку повного відімкнення підсвічення, у невисокій яскравості екрана. У темноті, природно, зображення може бути тільки кольоровим – відімкнувши підсвічення в суцільній пітьмі, ми взагалі нічого не побачимо.

Однак є у технології гібридних екранів одна неприємна особливість. Полягає вона в тому, що розділення в монохромному і кольоровому режимах відрізняються приблизно на третину. У чорно-білому режимі крок пікселя рівний 200 точок на дюйм, у кольоровому – не більше 150 точок на дюйм. Це відбувається тому, що кожен піксель гібридного екрана відіграє роль субпікселя і частина його площі загромождена «дзеркалами» для роботи пікселя в монохромному режимі. Отже, якщо у звичайному *TN LCD* кожен піксель складається зі щільної групи вертикальних субпікселів (рис. 6.44, б), *R*, *G* і *B* пікселі в гібридному екрані рознесені один від одного достатньо далеко (рис. 6.44, а) [38].

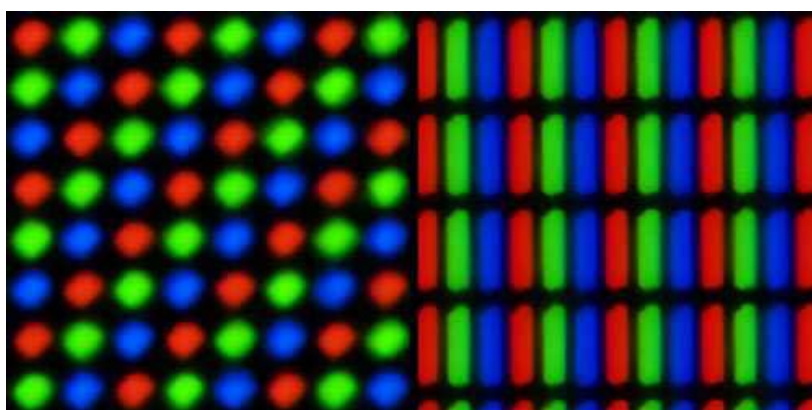


Рис. 6.44. Вигляд кольорових пікселів у двох типах рідкокристалічних екранів: а – *Pixel Qi*; б – *TN LCD* [38]

Як бачимо, «кольоровий піксель» на гібридному екрані є доволі витягнутим по горизонталі прямокутником з трьох *RGB*-квадратів – це, а також діагональна орієнтація базових кольорів спричиняють помітну «сітчастість» екрана, проблеми використання технологій субпіксельного згладжування,

подібних до *ClearType*, тощо. З «чорно-білим пікселем» (на рис. 6.44, а він виглядає чорним квадратом) усе в порядку: крок «дзеркала» рівномірний, розділення високе.

6.3.5. IMOD-екрани. Тепер оцінімо по-справжньому революційну розробку – створену в компанії *Iridigm Display* технологію виробництва *IMOD*-екранів (*IMOD* розшифровують як «інтерферометрична модуляція» – *Interferometric Modulation*). Компанію *Iridigm Display* 2004 року у повну власність придбала компанія *Qualcomm*. У подальшому технологію назвали *mirasol*.

Компанія *Qualcomm* не має сьогодні комерційних електронних книг з *IMOD*-екранами, проте на виставках останніх років прототипи *mirasol* – часті гості (рис. 6.45). Сьогодні спеціалісти вважають, що дисплеї *mirasol* стануть тими наступниками, котрі підхоплять естафету в *E-Ink* на ринку екранів для електронних книг. А до такої технології варто придивитися уважніше [50].

Уперше пристрій на екрані *mirasol* представили у травні 2008 року (MP3-плеєр *Freestyle*). Цільовою нішею *IMOD*-екранів компанія *Qualcomm* завжди бачила дисплеї для мобільних телефонів: упродовж 2006–2007 років здійснено фінальну доробку технології.

На відміну від бістабільних екранів *E-Ink*, нездатних поновлюватися зі швидкістю відео і фактично таких, що не володіють придатною для широкого використання кольоровою версією, бістабільні *IMOD*-екрани були кольоровими, добре читались за будь-якого зовнішнього освітлення і легко перемикались зі швидкістю, яка в 1000 разів перевищує швидкість роботи РК-панелей. До того ж, для продукування *IMOD* знадобились існуючі лінії та матеріали з виробництва плоскопанельних моніторів, а, отже, початок їхнього серійного виробництва вартував копійки (порівняно, звичайно).



Рис. 6.45. IMOD-екран компанії *Qualcomm* [50]

За легендою, відкриття технології *IMOD* завдячує крилам метелика. Лусочки крилець цих найлегших створінь створюють надзвичайно яскраві візерунки. Йдеться про оптичне, а не пігментне забарвлення. Деякі види метеликів мають, на перший погляд, непримітні крила. Коли ж на них потрапляє промінь світла, вони переливаються яскравими барвами. Проходячи через прозорі лусочки на крилах, промені світла відбиваються як від зовнішньої, так і від внутрішньої поверхонь лусочок. Обидва відбивання накладаються і підсилюються (або послаблюються). В результаті ефекту інтерференції ми бачимо кольори там, де їх немає, оскільки, залежно від товщини лусочок і коефіцієнта заломлення, відбувається відбивання світла з певною довжиною хвилі. Десятки тисяч лусочок представляють собою миттєво спалахуючий «екран» зі своїм унікальним візерунком.

Заявлені оптичні характеристики екранів *mirasol* виглядають доволі привабливо. Неперевершена досі відбивальна здатність на рівні 50 % (в *E-Ink*, нагадаємо, 40 %), контрастність – 8:1, тоді як заявлена на сайті *E-Ink* контрастність екранів останнього покоління рівна 7:1 (у пристроях трапляється 9:1 і 10:1). Для порівняння, папір газети «*Wall Street Journal*» – має відбивальну здатність 60 % за контрастності 4:1. Швидкості перемикавання не варто й порівнювати: 0,7 секунди в *E-Ink* з 16-ма градаціями сірого і 10 мкс в екранів

mirasol – на п'ять порядків швидше. Зрештою, екрани *mirasol* кольорові. Решта переваг належить обом технологіям – це і кути огляду (180° в обох площинах), і ефект пам'яті. Окрім того, компанія *Qualcomm* стверджує, що за інших рівних характеристик її екрани у декілька разів енергоефективніші, ніж екрани *E-Ink*.

Усе перелічене вище не викликає сумнівів. Однак, як завжди, існують нюанси, про котрі намагаються не згадувати. Наприклад, кольори на *IMOD*-екранах мають яскраво виражений металевий відтінок, а кольорова гама зміщена в зону пастельних тонів (рис. 6.46).



Рис. 6.46. Відтворення кольорів на екрані *mirasol* [50]

Оскільки технологія виробництва *IMOD*-екранів удосконалюється, з часом усі її недоліки зникнуть. Однак потрібно бути готовим до того, що на практиці перші книги з чудовими кольоровими екранами виявляться дещо не такими, якими ми їх собі уявляли, спираючись тільки на повідомлення рекламного характеру.

Завершуючи огляд екранів *Qualcomm mirasol*, прояснимо нюанси їхньої роботи. Кожна комірка *IMOD*-екрана – це окремо виготовлена мікроелектромеханічна система (*MEMS*) із проміжком строго визначеної висоти. Її верхня частина – це прозора плівка, а нижня – рухома металева дзеркальна мембрана. Для кожного базового «кольору» проміжок відповідає своїй довжині хвилі: 780 нм – для червоного, 550 нм – для зеленого і 380 нм – для синього. Оскільки площа комірки дуже мала, для досягнення вищої яскравості відбитого світла кожен «кольоровий» субпіксель є набором з декількох однотипних комірок. Наприклад, з 14-ти для кожного субпікселя, як показано на схемі структури одного пікселя (рис. 6.47, б) [38].

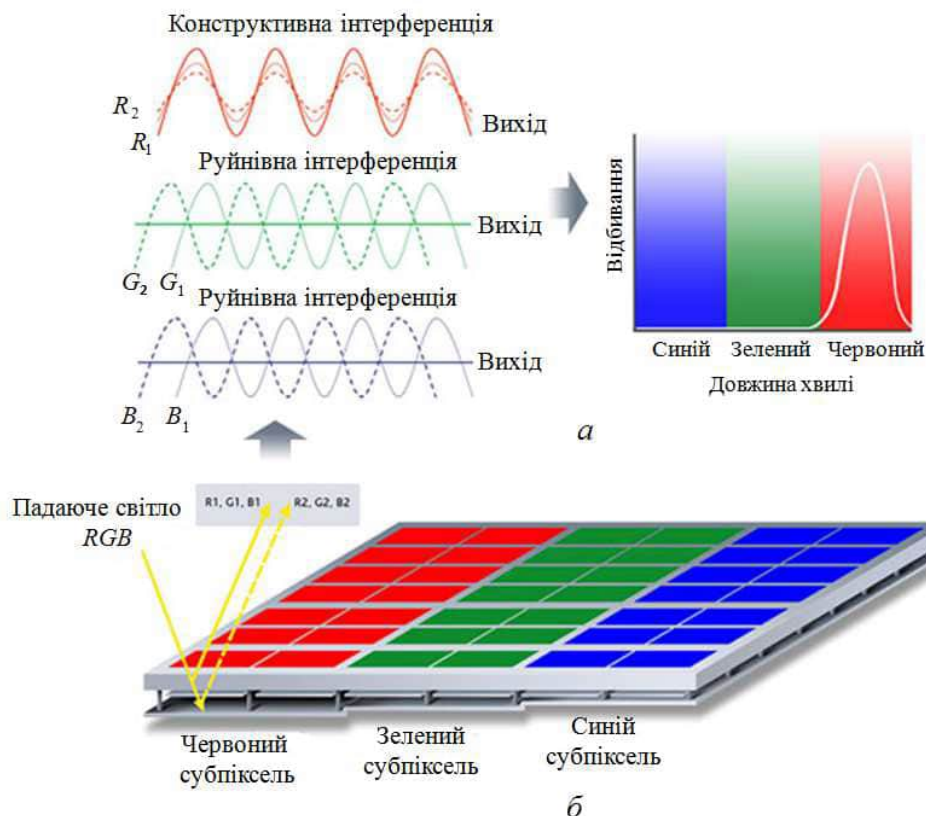


Рис. 6.47. Структура одного пікселя екрана *Qualcomm mirasol* [38]: а – використання явища інтерференції для кольоровідтворення у технології *mirasol*; б – конструктивні особливості одного кольорового пікселя

Як зазначимо нижче, «стільникові» структура субпікселя також даватиме змогу збільшити кількість градацій кольору, адже кожна комірка за своєю природою не може мати проміжних станів, а тільки два – увімкнено і вимкнено. Звернемо увагу, що слово «колір» для характеристики кожного з субпікселів – R , G і B – написано у лапках. Пояснимо це.

Для формування кольору дисплея *mirasol* не потрібні накладні кольорові фільтри. Глибину кожної комірки обрано такою, щоб відбите від дзеркальної мембрани на її дні світло підсилювало строго одну складову (певної довжини хвилі) у потоці світла, відбитого від верхнього прозорого боку комірки. Спостерігається ефект «конструктивної» інтерференції. «Червоні» комірки підсилюють у відбитому від екрана світлі червону складову, тоді як синє і зелене випромінювання приглушуються – відповідні хвилі, відбиті від дна і стелі комірки, виявляються у протифазі і гасять одна одну (див. рис. 6.47, а). Аналогічно «зелені» і «сині» комірки підсилюють свій колір і гасять решту.

Отже, дисплеї *mirasol* не страждають від втрат світла в кольорових світлофільтрах – їх просто немає. Теоретично *IMOD*-екрани здатні демонструвати відбивальну здатність понад 60 % з рівнем контрастності 15:1.

Тепер пояснимо ефект пам'яті. Як уже зазначено вище, елементарна комірка екрана *mirasol* складається з верхньої прозорої плівки та рухомої металевої дзеркальної мембрани. За замовчуванням мембрана опущена. У такому положенні вона знаходиться в стані «увімкнуто» – заданий розмірами комірки колір відбивається у повному об'ємі, живлення не вимагається. Подавши на комірку короткий імпульс, ми змушуємо мембрану притягнутися до верхньої плівки. Проміжок скорочується настільки, що інтерференція підсилює лише ультрафіолетове випромінювання, а видимий діапазон гаситься – ми бачимо чорну цятку. Після знімання з комірки напруги електростатичні сили, які вступили в дію, продовжують втримувати мембрану в новому положенні – «вимкнуто». Для повернення дзеркала у вихідний стан необхідно подати імпульс з негативним фронтом, тоді мембрана відлипне й опуститься на дно комірки, знову показуючи кольорову цятку.

Принцип запам'ятовування картинки в екранах *mirasol*, відповідно, не вимагає активно-матричної підкладки і, як наслідок, екрани дешевші у виробництві та помітно надійніші за своїх конкурентів на активних підкладках. Для керування пікселями *IMOD*-екранів достатньо структури рядок/стовпець, що є значно простіше, ніж у екранах *E-Ink* з тисячами транзисторів на підкладці. Виникає питання щодо механічної міцності мембрани. Адже в процесі роботи дзеркало деформується, і не один раз – у випадку анімації деформації перевищують частоту 50 разів у секунду. За даними *Qualcomm*, кожна мембрана без проблем допускає 12 млрд деформацій.

Головний мінус *IMOD*-екрана полягає у труднощах із виведенням півтонів і градацій сірого. Адже, як уже зазначено, елементарна комірка *IMOD*-екрана не може мати проміжних станів. Щоб відобразити півтони, використовують просторове чи часове псевдозмішування (розмивання) кольорів, або ж комбінацію обох підходів. Найпростішим є просторовий метод псевдозмішування (рис. 6.48) [38].

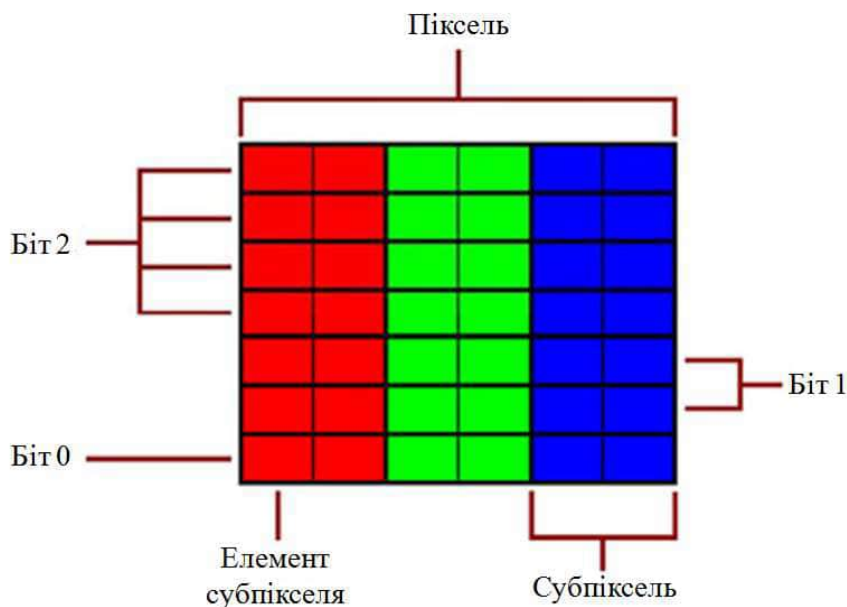


Рис. 6.48. До пояснення просторового методу псевдозмішування [38]

Для організації просторового псевдозмішування кольорів достатньо ввести для керування пікселем додаткові рядки (три, як на рис. 6.48). Тепер кожен рядок керування пікселем відповідає за свою зону субпікселя. Площі зон різні, отож у підсумковій картинці кожна з них має унікальну вагову участь. Комбінація трьох зон дає 8 градацій, що, з урахуванням трьох базових кольорів, приводить зрештою до 512-ти відтінків.

Часове псевдозмішування кольорів діє і інший спосіб. Кожен піксель керується одним рядком; відповідно, субпіксель може «запалюватися» тільки загалом. Дозуючи за рівні проміжки часу кількість «спалахів» субпікселя, можна визначати його сумарне вагове значення в результуючій картинці. Оскільки частота перемикань перевищує 50 разів у секунду, очі побачать не мерехтіння, а колір певного тону. Розбиваючи стандартний керуючий сигнал рядка на вісім часових проміжків – подаючи команду «просвітлофорити» кожним субпікселем від 1-го до 8-ми разів – отримуємо на виході 64 К для кожного кольору чи 256 К результуючої картинки.

Насправді компанія *Qualcomm* комбінує обидва методи розмивання кольорів, оскільки кожен з них володіє певними перевагами і недоліками. Наприклад, перевага просторового методу полягає в максимальній економії електроенергії, тоді як часове розділення вимагає у рази підвищувати частоту

перемикання екрана (близько 50 разів у секунду для кожного розряду). Повноколірність для екрана *mirasol*, відповідно, зовсім не синонім енергозбереження, передусім у режимі показу анімації. Зате в режимі часового розділення площа субпікселя використовується цілковито, що спрощує адресацію пікселя, до якого не потрібно підводити декілька рядків (економія під час виробництва).

Спираючись на зазначене вище, до недоліків екранів *mirasol*, окрім пастельних кольорів і металевого відблиску фарб, можна додати або підвищення витрат електроенергії, або ускладнення процесу виробництва екрана за зростання кількості градацій кольору. Щоправда, екрани *mirasol* можна використовувати в різних режимах, залежно від того, що необхідно відобразити: відімкнення часового псевдозмішування кольорів даватиме змогу читати книги, не зважаючи на заряд акумулятора, а його увімкнення – подивитись на тому ж пристрої повноколірну ілюстрацію чи відеоролик.

6.3.6. P-Ink-екрани. Фотонні кристали, як і технологія *mirasol* – це похідні від «патентів природи». Природним фотонним кристалом є, наприклад, опал. У відбитому світлі цей напівдорогоцінний камінь здатний переливатися різноманітними яскравими барвами. Саме ця його властивість привернула увагу розробників з університету міста Торонто, які надалі організували канадську компанію *Opalux*.

Структура фотонних кристалів фактично є частковим випадком періодичної структури – дифракційної ґратки. За певних умов у середовищі поширення світла (всередині кристала) чергуються зони, які відбивають світло певної довжини хвилі (стоп-зони), і зони, які пропускають світло решти довжин хвиль. Іншими словами, фотонний кристал можна розглядати як оптичний фільтр. Штучно змінюючи період структури, можна змусити фотонний кристал відбивати світло строго заданого кольору.

Зазначимо, що штучні кристали опалу – далеко не рідкість. Метою розробок на основі штучних опалів є створення матеріалів і технологій для оптоелектроніки – низькопорогових лазерів, хвилеводів, оптичних перемикачів

тощо. Канадська компанія *Opalux* знайшла штучним кристалам інше застосування – як керованого середовища для створення малоспоживаючих кольорових рефлексивних екранів.

У термінах компанії *Opalux* технологію називають «фотонне чорнило» *Photonic Ink (P-Ink)*. Шар такого «чорнила» представляє собою високовпорядковану структуру активного полімеру, «ґратка» котрого може розтягуватися чи стискатися під впливом електричного струму. Зазвичай штучний опал отримують шляхом самовпорядкування щільноупакованих частинок (шарів) субмікронного рівня [38].

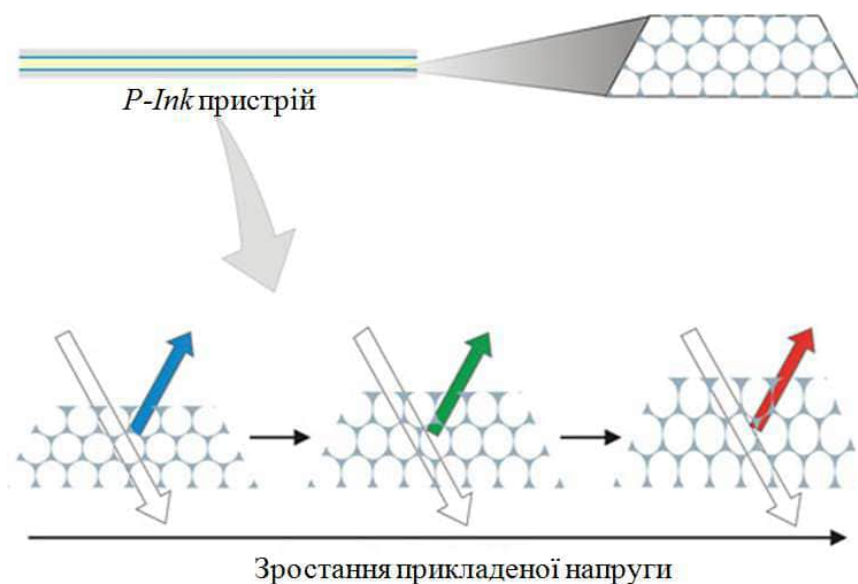


Рис. 6.49. До пояснення механізму кольоровідтворення екранами на *P-Ink* [38]

Прикладаючи до такого середовища напругу, ми змушуємо полімер розтягуватися (рис. 6.49). «Шари» деформуються, і ця просторова зміна спричиняє поступову зміну довжини хвилі відбитого світла від синього до червоного. Зрештою, виникає ситуація, коли структура перестає відбивати світло видимого спектра – ми бачимо чорний екран.

Незважаючи на свою уявну простоту, технологія компанії *Opalux* і досі перебуває на етапі дослідної розробки. За останні роки компанії вдалося досягти помітного прогресу в справі створення екранів на *P-Ink*. Зазначимо, що полімерними кристалами керує надзвичайно слабкий сигнал – порядку 1,5 В за сили струму в декілька мікроампер, а це дає підставу стверджувати про надекономні екрани. Окрім того, компанія обіцяє настільки удосконалити

технологію, що екрани *P-Ink* зможуть втримувати заданий колір без подання живлення – набудуть ефекту пам'яті.

Простота конструкції екранів *P-Ink* – запорука дешевизни й абсолютної гнучкості. Плівки з опалоподібних полімерних структур, наприклад, можуть стати другою «шкірою» для електронних пристроїв, які змінюють колір за заданим сценарієм чи під впливом зовнішніх температур. У дисплеях технологія *Opalux* забезпечить високу яскравість і ефективність, адже кожен піксель *P-Ink* здатний змінювати колір рівномірно на усій своїй площі без будь-яких накладних кольорових фільтрів. Єдиний серйозний недолік технології *Opalux*, не враховуючи її доопрацювання, полягає у дуже повільній реакції екрана.

6.3.7. Електрохромні екрани. *Електрохромні екрани* – ровесники екранів на рідких кристалах, однак зважаючи на низку не вирішених до кінця проблем у 70-х роках минулого століття, вони вкотре програли останнім. РК-екрани володіли істотно кращою швидкістю та прекрасно підійшли до існуючої на той момент електронної бази. Переваги електрохромних дисплеїв – робота у широкому діапазоні температур, простота виготовлення, здатність читання у відбитому світлі, бістабільність – залишились на багато років незатребуваними.

Лише останніми роками електрохромність набрала популярності. Частково за це потрібно завдячувати іншій утилітарній унікальності електрохромних матеріалів – керованій здатності відбивати не тільки видиме світло, а й інфрачервоні промені. Подібні характеристики дають змогу створювати автоматично затемнювані чи керовані «розумні вікна», дзеркала заднього огляду, ілюмінатори та багато інших систем для термо- і світлового регулювання. Електрохромні «шторки», наприклад, встановлені на ілюмінатори на новому лайнері *Boeing 787 Dreamliner*.

Програма «розумних вікон» уже понад 30 років є національною програмою США у рамках розробки енергозберігаючих технологій. Важливість

цього проекту засвідчує бюджетне фінансування та участь знаменитої Ліверморської національної лабораторії в Берклі.

Зазначимо, що 1966 року вперше запатентували технологію електрохромних дисплеїв, зокрема, патентну заявку подав американський розробник С. К. Деб (*S.K. Deb*). Однак рідкі кристали, як і дисплеї, на десятиліття поховали ідею електрохромної індикації.

Сьогодні провідними розробниками технологій, матеріалів і виробництва електрохромних дисплеїв можна вважати такі компанії, як шведські *Acreo*, *Aveso* і *PaperDisplay*, американо-ірландську *Ntera*, німецьку *Siemens* (див. рис. 6.50).



Рис. 6.50. Електрохромний гнучкий екран компанії *Siemens*

Електрохромні дисплеї гнучкі, тонкі, відмінно читаються в яскравому сонячному світлі, не бояться різких перепадів температур і тисків, споживають мінімальну кількість електроенергії. Як основу дисплеїв можна використовувати практично будь-який матеріал – папір, тканину, пластик, скло тощо. Для продукування електрохромних дисплеїв порівняно легко прилаштувати звичайне типографське обладнання і друкувати екрани струменевим друком сторінками чи рулонами з максимальною теоретичною швидкістю 100 метрів за хвилину [38].



Рис. 6.51. Виготовлення електрохромних екранів струменевим друком рулонами [38]

Додаткова цінність адаптації до типографських процесів полягає в тому, що сьогодні можна надрукувати все, включаючи керуючу електроніку, *RFID*-антени і навіть елементи живлення. Отож електрохромні дисплеї знайшли застосування в кредитних картках, подарункових сертифікатах, картках доступу, у «розумній упаковці» лікувальних препаратів, у красивій недорогій подарунковій упаковці з простенькою анімацією, в електронних іграх та інтерактивних книгах (рис. 6.52).

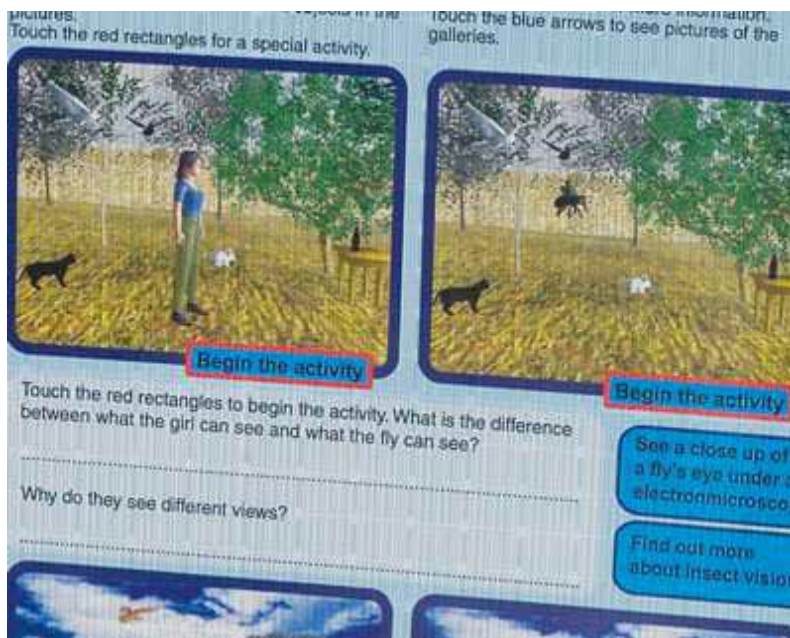


Рис. 6.52. Реалізація інтерактивної книги на електрохромному дисплеї [38]

У найближчі роки електрохромні дисплеї широко використовуватимуть у зовнішній рекламі як інформаційні табло чи як елемент споруд (розумні вікна,

затемнювані міжкімнатні перегородки). Як екрани в електронних книгах такі дисплеї у найближчій перспективі навряд чи розглядатимуть, оскільки головна проблема електрохромних дисплеїв полягає в дуже повільному перемиканні екрана (до 10 с), а використовувані матеріали виявились порівняно недовговічними. На основі розробок С. К. Деба, українські вчені (Д. В. Сидоров, Є. П. Дуборіз, О. А. Пуд, П. С. Смертенко, 2003) розробили свою унікальну технологію отримання «вічних» електрохромних плівок. Зрештою, у відображенні картини головну роль відіграють хімічні процеси, отож отримати графічне багатоколірне зображення також виявилось проблемою. Власне тому усі сучасні комерційні електрохромні дисплеї – сегментні або матричні.

Пояснимо принцип роботи електрохромних дисплеїв. Загалом вони спираються на окислювально-відновні реакції і складаються з пари керуючих електродів: світломодулюючого електрода і протиелектрода. Електроди можна розташовувати як у вигляді бутерброда, так і горизонтально, що проілюстровано на прикладі структури пікселя згідно з технологією компанії Acreo (рис. 6.53) [38].

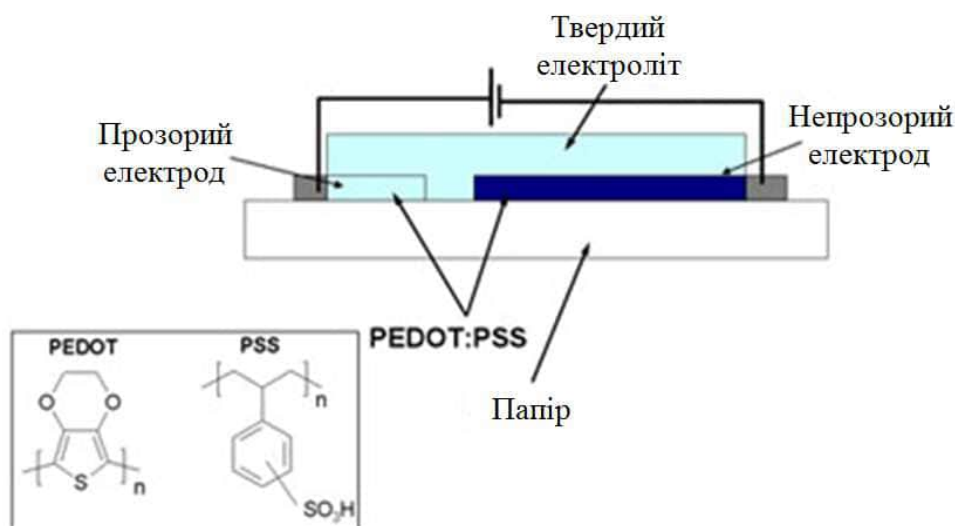


Рис. 6.53. Структура пікселя електрохромного дисплея згідно з технологією компанії Acreo [38]

Прозорий електрод на схемі – світломодулюючий з покриттям електрохромною плівкою; непрозорий – протиелектрод, звичайний провідник.

Зазначимо, що до обох електродів підводять дуже низьку напругу – порядку 1 В із силою струму трохи більше 100 μA . Обов'язковою умовою для електрохромних дисплеїв є наявність електроліту між електродами: рідкого, полімерного чи твердого. Під час подавання живлення електроліт постачає світломодулюючий шар протонами, а підкладку – електронами, або ж, навпаки, виводить їх з шару за зміни полярності живлення. У процесі насичення частинками світломодулюючий шар приймає тим темніше забарвлення, чим довший процес чи його інтенсивність (прикладена напруга). За зміни полярності керуючого живлення електрони і протони виводяться зі світломодулюючого шару, і він знову стає прозорим.

Знімаючи живлення з електродів, ми залишаємо світломодулюючий шар із забарвленням такої інтенсивності, що спостерігали на момент знімання напруги – у цьому проявляється ефект пам'яті. Зазначимо, що сучасні електрохромні дисплеї мають синє забарвлення: як світломодулюючий матеріал у них використовують плівки тріоксиду вольфраму (WO_3) чи комбінацію віологену у з'єднанні з діоксидом титану (TiO_2). Обидва матеріали дають контрастне темно-синє зображення на світло-сірому фоні.

6.3.8. Електрофоретичні дисплеї із зворотною емульсією. Дисплеї *E-Ink* представляють собою мікрокапсули з двоколірною різнозарядженою мікросумішшю в оливоподібній прозорій рідині. Однак у природі існують рідкі розчини, які уже містять полярні чи неполярні мікрокраплі (наприклад, молоко). Мова йде про емульсії. За певних умов у рідину можна ввести забарвлені і незмішувані з нею крапельки іншої рідини, котрими можна керувати, – своєрідний «мокрый» аналог дисплеїв *E-Ink*.

Технологію реверсивно емульсійного електрофоретичного дисплея – *reverse emulsion electrophoretic display (REED)* запропонувала американська компанія *Zikon*. Дисплеї на основі зворотних емульсійних середовищ компанія *Zikon* розпочала розробляти 1998 року, практично паралельно із розробками *E-Ink*. Однак сьогодні технологія знаходиться приблизно на тому ж рівні, що й 17 років тому. Сьогодні важко відповісти, чи зіграв у справі забуття *REED* успіх

E-Ink, чи технологія *Zikon* у чомусь виявилась малопридатною до масового виробництва.

На початку розробки дисплеї *Zikon* позиціонували як потенційну заміну РК-моніторів для роботи поза приміщеннями – це і мобільні телефони, і ноутбуки, і зовнішня реклама. Технологія передбачала створення добре читабельних у відбитому світлі екранів, що споживають мінімум електроенергії і володіють ефектом пам'яті. Першим застосуванням *REED* компанія бачила одноколірні (монохромні) рекламні та інформаційні табло. Надалі обіцяли графічні повноколірні дисплеї (тришарові, адитивна модель). Насправді, як ми уже зазначали, далі справа не пішла.

На рис. 6.54 показано прототип «пікселя» і водночас дисплея *REED* [38].

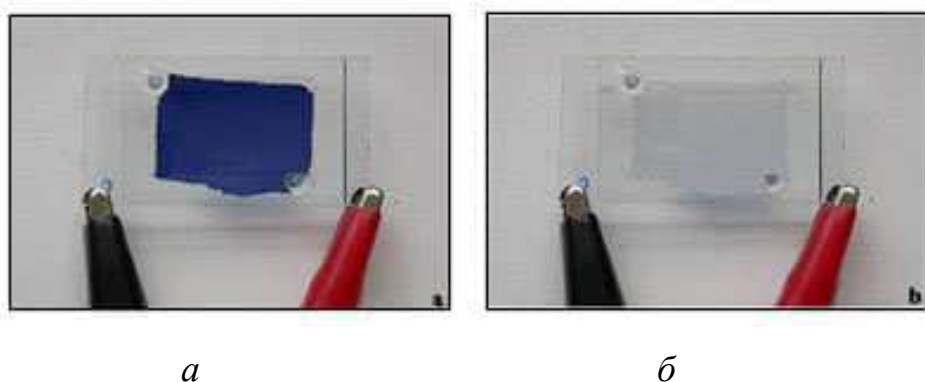


Рис. 6.54. Прототип «пікселя» дисплея *REED* [38]: *a* – при поданні напруги на прозорі струмопровідні електроди; *б* – без подання напруги на них

Синє електронне чорнило (*Blue Electronic Ink*), розроблені *Zikon*, – це краплі полярної рідини (води), рівномірно розподілені в неполярній рідині (оливі) [38]. Отриману емульсію заливають у герметичний простір між двома прозорими підкладками, на внутрішньому боці котрих нанесені прозорі струмопровідні електроди. Краплі води містять синій барвник. У такому стані крапельки розсіяні, і рідина здається прозорою. Якщо через електроди пропустити електричний струм, водяні кульки із фарбою самовпорядковуються в рідині і стануть помітними як синє забарвлення пікселя (див. рис. 6.54, *a*). Зі зніманням напруги краплі із забарвленням знову рівномірно розподіляться у рідині – і піксель стане прозорим (див. рис. 6.54, *б*).

Інша конструкція пікселя *Zikon* передбачає дещо іншу структуру електродів. Один з них виготовляють за розмірами пікселя, тоді як протилежний – у вигляді тонких струмопровідних смужок. За однієї полярності живлення заряджені частинки рідини з фарбою збираються поблизу «широкого» електрода – піксель синіє, зі зміною полярності живлення частинки з фарбою групуються поблизу вузьких електродів на протилежному боці пікселя, і він стає прозорим. Альтернативою керування пікселя з емульсією є механічний вплив на середовище. У такому випадку високочастотні коливання рівномірно розподіляють кульки з фарбою всередині системи – рідина прозора, а низькочастотні коливання допомагають «фарбі» самозбиратися в однорідно забарвлене середовище.

Зі слів розробників, технологія виробництва електрофоретичних дисплеїв зі зворотною емульсією доволі проста, а матеріали дешеві. Однак технологія *REED* і досі не знайшла відгуку в серцях виробників дисплеїв.

6.3.9. Технологія *Liquavista*. Незважаючи на труднощі з «рідинними» екранами *Zikon*, рідини зовсім не втратили свій потенціал як керовані середовища для створення цікавих екранів. Яскравий приклад тому – технологія компанії *Liquavista* – виокремленою 2006 року у самостійну компанію підрозділу знаменитої *Philips Research Labs*. Окрім того, компанія *Liquavista* вважає свою розробку як «*PK 2.0*» – майбутньою заміною усім існуючим сьогодні різновидам рідкокристалічних екранів.

Розробку технології *Electrowetting* (*EW* – електрозмочування), покладену в основу технології *Liquavista*, здійснює упродовж двох десятиліть декілька компаній. Однак тільки за останні десять–дванадцять років вдалось досягти помітного прогресу в матеріалах і процесах, насамперед, вдалось створити електрозмочувані дисплеї, які швидко перемикаються. Їхній відлік пішов з публікації *Philips* у журналі «*Nature*» у вересні 2003 року. Важливо, що головною метою *EW*-дисплеїв стали електронні книги, а екрани для мобільних телефонів відійшли на задній план. На практиці це означає, що компанія

Liquavista зробити усе можливе, щоб уже в найближчі роки представити першу комерційну електронну книгу з *EWD*-екраном.

Загалом принцип електрозмочування проілюстровано на рис. 6.55 [49].

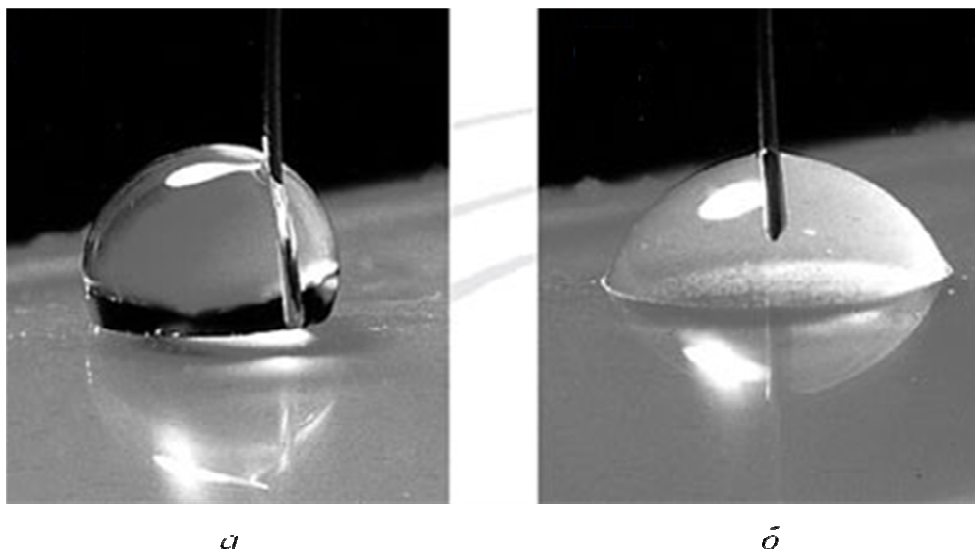


Рис. 6.55. До пояснення явища електрозмочування [49]: *а* – вигляд краплі рідини без подання напруги; *б* – вигляд краплі рідини із поданням напруги

Завдяки силам поверхневого натягу, на водовідштовхуючій поверхні крапля рідини набуває форми, близької до напівсферичної (див. рис. 6.55, *а*). Якщо до електрода всередині краплі і до електрода під водовідштовхуючим ізолятором прикласти різницю потенціалів, змочуваність поверхні різко підсилиться і крапля «розійдеться» по поверхні (див. рис. 6.55, *б*). Після знімання напруги крапля знову набуде форми сфери (див. рис. 6.55, *а*). І так до нескінченності. Насправді коефіцієнт змочування не змінюється. Прикладене електричне поле змушує краплю виправити дисбаланс, який виник у новому енергетичному стані: розтектися під впливом електростатики і водночас підкоритися законам хімії граничних середовищ. Після знімання поля водовідштовхуюча поверхня поверне краплю у початковий округлий стан.

Розроблені на основі технології електрозмочування рефлексивні дисплеї *Liquavista* побудовані дещо складніше [49]. Оптичний елемент *EW*-дисплея складається з прозорого електрода, гідрофобного ізолятора, шару забарвленої оливи і заповнений водою. У складі дисплея оптичний елемент закритий з

фронтального боку склом, з нижнього боку – полімерною підкладкою (рис. 6.56).

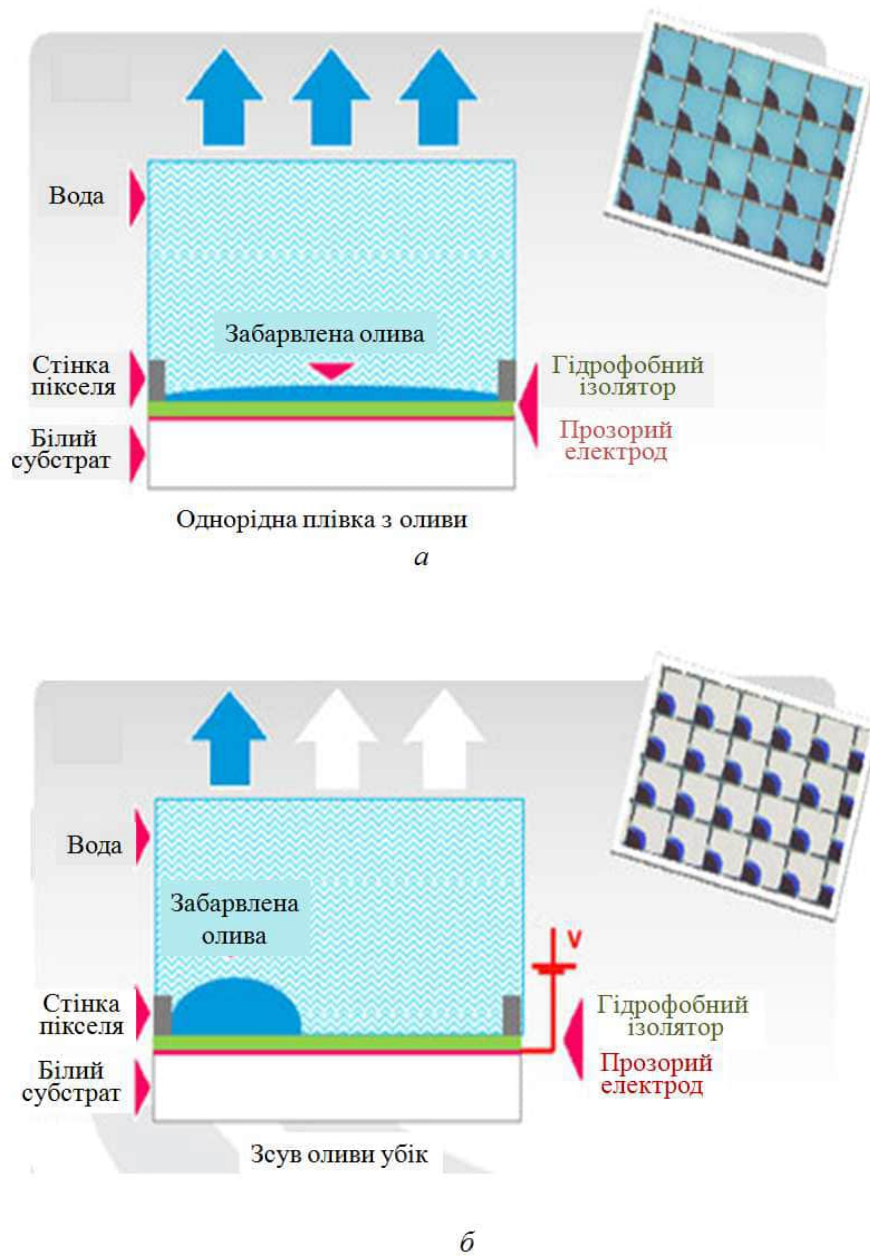


Рис. 6.56. Будова і режими роботи комірки *EW*-дисплея [49]: а – стан «вимкнуто» (без подання електричного поля); б – стан «увімкнуто» (за подання електричного поля)

У такому стані баланс системи полягає в тому, що вода відштовхується від гідрофобної поверхні ізолятора, отож олива рівномірно розтікається кольоровою плівкою по усій поверхні пікселя від однієї стінки до іншої (рис. 6.56, а). Приблизні розміри пікселя: ширина – 200 мкм, висота – 25 мкм, як у звичайних РК-екранів. Сили поверхневого натягу в комірці пікселя такі, що в 1 000 разів перевищують силу гравітації – це дає змогу плівці з оливи

залишатися стабільною за будь-якої орієнтації екрана. А доволі великий проміжок – 25 мкм – робить комірку несприйнятною до прогинів, що водночас вирішує проблему продукування гнучких *EW*-дисплеїв (рис. 6.56).

Коли до гідрофобного ізолятора прикладається різниця потенціалів, сили електростатики змушують воду долати сили поверхневого натягу забарвленої оливи (змочувати ізолятор): вода зсуває оливу вбік, відкриваючи для погляду рефлексивну підкладку під плівкою з оливи (рис. 6.56, б).

Як далеко зсунеться олива, залежить від балансу між силами електростатики і силами поверхневого натягу. Для очей колір пікселя змінюватиметься від насиченого кольорового у стані «вимкнуто» до прозорого (білого) у стані «увімкнено», і навпаки, коли напруга зменшується. Забігаючи наперед, зазначимо: рівень сірого задається величиною керуючої напруги і залежить від неї майже лінійно – незвичайна простота реалізації півтонів.

Для уніфікації комірок у лівому нижньому куті кожного пікселя передбачена спеціальна мертва зона для керованого «переміщення» до неї забарвленої оливи – другий електрод (рис. 6.56, б). З такої конструктивної особливості пікселя випливає, що ефективна площа відбивання зменшується до 80 %, а рефлексивність – до 70 %. Щоправда, рівномірність чергування мертвих зон і малі розміри пікселя роблять цю особливість *EW*-екранів непомітною для очей.

Як випливає зі схеми, *EW*-піксель може бути повністю прозорим, що дає змогу зробити екран на основі електрозмочування як із задньою підсвіткою, так і рефлексивним чи трансрефлексивним, тобто заповнити всю сферу застосування сучасних рідкокристалічних екранів. Однак, на відміну від рідких кристалів, *EW* не потрібні поляризаційні плівки і плівки для коректування кутів огляду. Як наслідок, *EW*-екрани, порівняно з традиційними РК-екранами, мають підвищену на 50–60 % яскравість.

Матеріал для *EW*-екрана дуже простий: два шматочки скла чи пластику і вода з оливою всередині. Додатковим інгредієнтом є легкорозчинна в оливі фарба. Вибір барвника визначає колір екрана в стані «вимкнено», коли плівка з оливи розтікається поверхнею пікселя (див. рис. 6.57). Сучасні знання про

барвники дають змогу необмежено урізноманітнювати свій вибір, не втрачаючи стійкість до вигорання і роботу в широкому діапазоні температур.



Рис. 6.57. Спектр можливих кольорів *EW*-екранів у стані «вимкнуто» [49]

Оскільки *EW*-екран за своїм змістом – це кольорова комірка, яка перемикається, можливі декілька типів екранів з ефектом електрозмочування. У найпростішому випадку – це недорогий одношаровий екран, подібно до РК-екранів, зі звичайними кольоровими *RGB*-фільтрами (рис. 6.58).

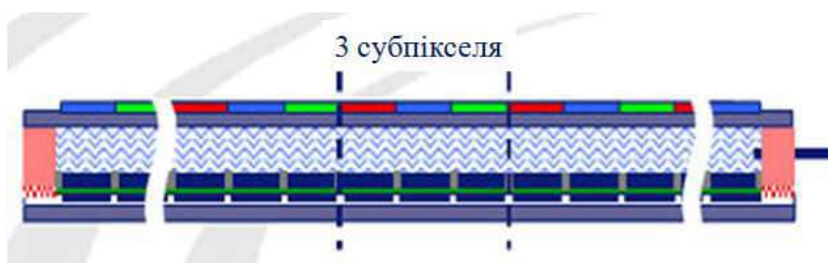


Рис. 6.58. Структура *EW*-екрана з кольоровими *RGB*-фільтрами [49]

Кожен субпіксель тріади керується своїм пікселем з оливою чорного кольору. В увімкненому стані олива відкриває дзеркальну підкладку чи дає вихід для світла від джерела підсвічення ззаду. Екрани на базі *IMOD* (*mirasol*) значно складніші за тієї ж продуктивності і відбивальної здатності. З екранами на холестеричних рідких кристалах і порівнювати неварто – у *EWD* і яскравість вища, і реагування надзвичайне. Плівка з оливи зсувається за 3 мс, а відновлюється після знімання напруги за 9 мс – достатнє реагування і для повноцінного відео, і навіть для гри. Окрім того, *EWD* економні за

енергоспоживанням навіть порівняно з екранами з пам'яттю, хоча технологія електрозмочування не містить бістабільності.

Не можна не зазначити – дешевизна *EWD* дещо перебільшена. Хоча керований шар доволі простий, для керування кожним пікселем *EW*-екрана необхідна своя транзисторна група, або ж активно-матрична підкладка. Отож вартість дисплея на ефекті електрозмочування приблизно рівна вартості звичайного трансрефлективного РК-екрана. Перевагою буде підвищена «білизна» *EWD*, незначне енергоспоживання і здатність показувати прийнятні кольори на вулиці та у приміщенні.

Інша архітектура *EW*-дисплея передбачає розміщення трьох роздільно керованих монохромних шарів одного над іншим, як у випадку кольорових *ChLCD* (електронна книга *Fujitsu FLEPia*). Тільки тришарові *EW*-дисплеї, на відміну від задіяної в кольорових *ChLCD* адитивної схеми синтезу кольору, спираються на прийняту в типографському процесі субтрактивну модель. Замість *RGB*-фільтрів використовують жовто-пурпурово-голубий (*CMY*) (рис. 6.59) [49].

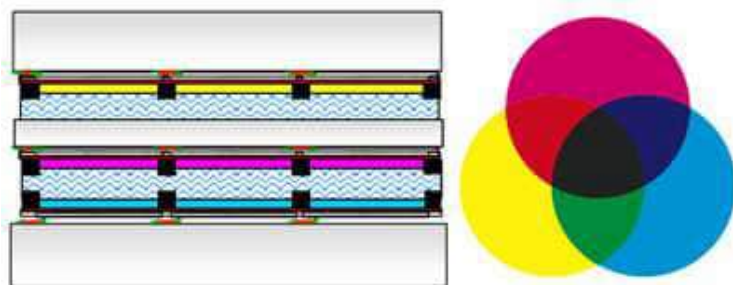


Рис. 6.59. Тришарові *EW*-дисплеї на базі субтрактивної моделі синтезу кольорів [49]

Для продукування тришарових *EWD* використовують такий самий процес, що й для виробництва одношарових *EW*-екранів, щоправда, ускладнений необхідністю суміщати три монохромних шари – кожен зі своєю активно-матричною підкладкою. Складність конструкції тришарового *EWD* полягає у тому, що сьогодні в компанії *Liquavista* немає робочих прототипів подібного екрана.

Порівняно з одношаровою структурою, тришарові *EWD* переважають за двома пунктами. По-перше, площа пікселя використана повністю, а не поділена

між тріадами. По-друге, тришаровому екрану не потрібні накладні кольорові фільтри. Усе це підвищує загальну яскравість екрана і спрощує процес його виробництва. Зважаючи на підсвічення ззаду, електронною книгою з *EWD*-екраном можна користуватися там, де не впораються книги з *E-Ink* – у цілковитій темряві. Щодо цього *EWD* передбачає повну анімацію і отримання зручного кольору.

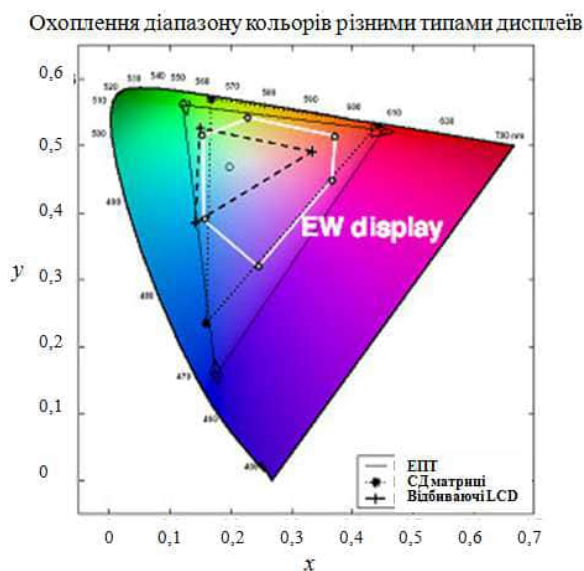


Рис.6.60. Діапазон охоплення кольорів *EW*-екраном, зображений на діаграмі МКО, у порівнянні з іншими типами індикаторних пристроїв [49]

Кольорове охоплення *EW*-екрану значно ширше за кольорову гаму рефлективного РК – хоча і *EWD* не може показати чистих кольорів (див. рис. 6.60). На практиці екрани *EWD*, як і екрани *mirasol*, демонструють переважно пастельні тони.

Нижче наведено складену компанією *Liquavista* таблицю порівняльних характеристик екранів (табл. 6.1), які працюють у відбитому світлі (конкуруючих технологій) [49]. Нижній рядок як опорна прив'язка демонструє характеристики паперу.

Як бачимо, компанія високо оцінює оптичні властивості своєї розробки. Максимальна серед конкурентів відбивальна здатність у монохромному режимі сягає 60 %. Практично повне відбивання кольору у випадку тришарових екранів і найкращий рівень контрасту. Зважаючи на максимальне енергозбереження технології, *EWD*-екрани можна назвати ідеальними.

Таблиця 6.1. Порівняльна характеристика екранів, які працюють у відбитому світлі
[49]

Технологія	Відби- вальна здат- ність	Перетво- рення кольорів	Конт- раст	Кут огляду	Шкала сірого	Понов- лення зобра- ження
Відбиваючі РК	50	33	15	Обмеже- ний	Аналогова	Відео
<i>ChLCD</i>	30	50	10	Обмеже- ний	Аналогова	> 1с
Електрофо- ретичні	45	33	12	Необме- жений	Обмежена	~ 1с
<i>MEMS</i> (<i>mirasol</i>)	50	33	12	Обмеже- ний	Широтно- імпульсна модуляція	Відео
Одношарові <i>EWD</i>	60	33	12	Необме- жений	Аналогова	Відео
Трьохшарові <i>EWD</i>	60	100	18	Необме- жений	Аналогова	Відео
Папір	70	100	15	Необме- жений	Площинна	—

На діаграмі рис. 6.61 показана величина споживання потужності на квадратний дюйм поверхні дисплеїв (у міліватах) [49]. У режимі відтворення відео екрани *Liquavista* виявляються більш як вдвічі економнішими, ніж екрани *mirasol (IMOD)*. Своєю чергою, екрани *mirasol* заявлені як значно ефективніші, ніж екрани *E-Ink*. Наприклад, у режимі відео (1800 поновлень у хвилину) екран *mirasol* споживає 0,45 Вт. Теоретичне споживання екрана *E-Ink* у цій ситуації становило б 15,75 Вт (дані *Qualcomm*).

Отже, за споживанням електроенергії екрани *EWD* виявляться економнішими, порівняно з екранами *E-Ink*. На жаль, даних про роботу *EW*-екранів у статичі немає. На практиці ефекту бістабільності не існує, є лише значно знижена частота регенерації – до одного разу в декілька секунд, так

звана квазістабільність. Окрім того, *EWD* можуть керуватися методом широтно-імпульсної модуляції, що також зекономить електроенергію.

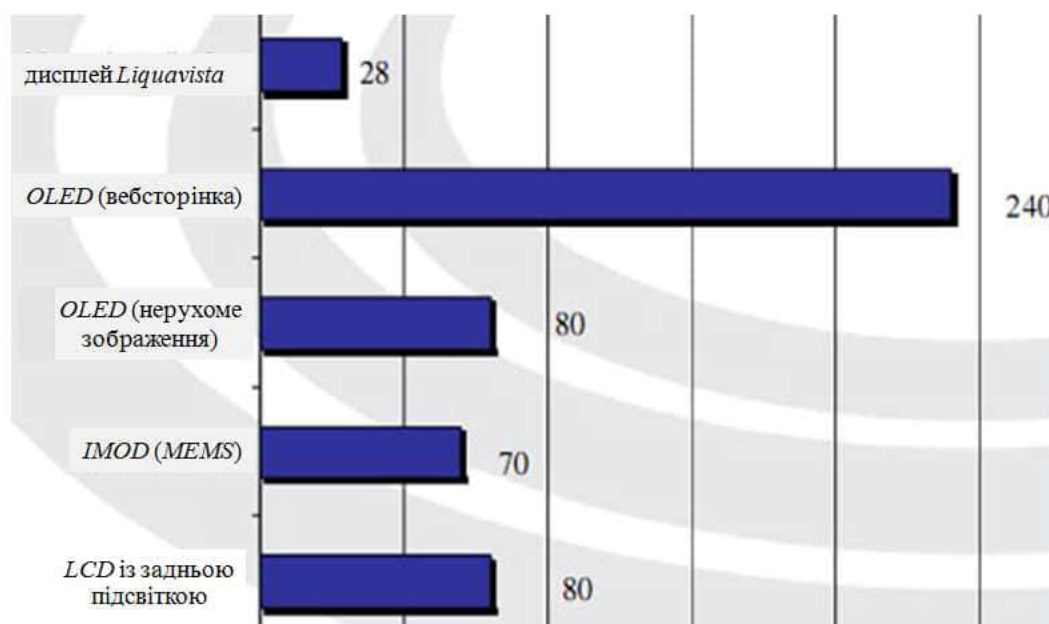


Рис. 6.61. Діаграма порівняння різних типів дисплеїв за споживанням потужності на квадратний дюйм поверхні

Отже, за споживанням електроенергії екрани *EWD* виявляться економнішими порівняно з екранами *E-Ink*. На жаль, даних про роботу *EW*-екранів у статичі немає. На практиці ефекту бістабільності не існує, є лише значно знижена частота регенерації – до одного разу в декілька секунд, так звана квазістабільність. Окрім того, *EWD* можуть керуватися методом широтно-імпульсної модуляції, що також зекономить електроенергію.

Продемонстрований технологією *EWD* потенціал вражає. Вона уже знайшла відгук серед виробників: компанія *Texas Instruments*, наприклад, спочатку розробляла контролери для електронних книг з *EWD*. Однак зазначимо, що сучасні прототипи екранів *Liquavista* демонструють доволі низьку якість зображення, а щоб довести їх до рівня хоча б *E-Ink*, мине багато часу. Що стосується відображення кольору, значно досконалішими сьогодні виглядають екрани *mirasol*.

6.3.10. Електрорідинні екрани *Gamma Dynamics*. Використовувати як елементи зображення справжні пігментні барвники вирішила і компанія *Gamma Dynamics*. Це підприємство доволі молоде – організовано 1 січня 2009 року. Від

такого не варто очікувати прориву уже завтра, однак потенціал у розробці, безумовно, відчувається. І немалий. Замість того, щоб використовувати накладні кольорові фільтри чи дзеркальну підкладку, у компанії вирішили заливати у пікселі кольорові барвники – ті, що застосовують під час типографського друку. У принципі, технологія *Gamma Dynamics* використовує подібні механізми, що і технологія компанії *Liquavista*, за єдиним винятком: єдина в пікселі крапля фарби не відсувається на дальній край пікселя, а втягується всередину невеликого мікрорезервуара (рис. 6.62).

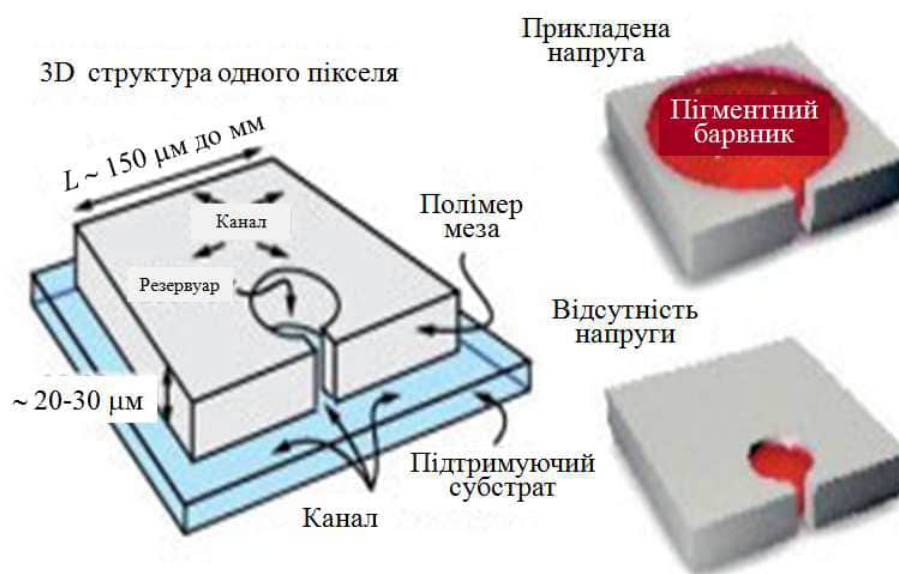


Рис. 6.62. Структура і принцип роботи пікселя за технологією *Gamma Dynamics* [38]

Коли напруга відсутня, полярна рідина з розчиненим у ній пігментним барвником знаходиться в резервуарі. Розміри горловини резервуара сягають 5–10 % від площі пікселя, що незначно зменшує видиму область, тоді як EW-піксель через мертву зону втрачає 20 % площі. Прикладена напруга виштовхує фарбу і рівномірно розподіляє у комірці пікселя, що розробник представляє як краплю фарби на аркуші паперу. За відсутності напруги сили поверхневого натягу знову повертають фарбу в резервуар.

Зазначимо нехарактерне для традиційних екранів розташування і форму пікселів – шестикутник (рис. 6.63). Розробник стверджує, що така будова найближча до типографського друку, а отже, електрорідинні екрани будуть найбільш «папероподібними» серед конкуруючих технологій.

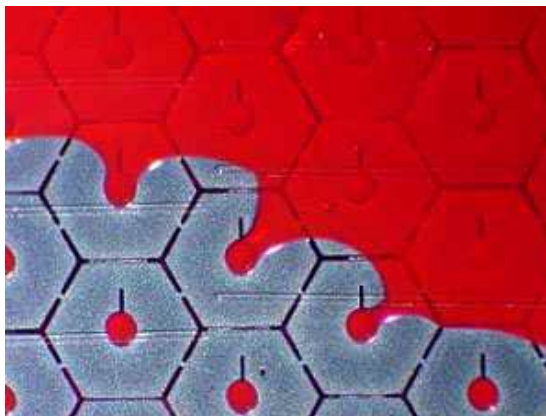


Рис. 6.63. Конфігурація пікселів електрорідинних екранів *Gamma Dynamics* [38]

Сьогодні у *Gamma Dynamics* немає стовідсотково робочих прототипів електрорідинних екранів. Розробки тривають водночас у двох напрямках: по-перше, щодо підвищення білизни екрана понад 50 %; по-друге, щодо розробки структури пікселя, яка передбачає ефект пам'яті. Очікувана білизна комерційних прототипів (до котрих ще доволі далеко) – 60–70 %. Розділення може змінюватися в межах 75–300 точок на дюйм. Рівень контрасту – 10:1. Необмежені кути огляду. Представлення рівнів градацій сірого – 8–16-бітне. Швидкість перемикання – не більше 30 мс. Керування – активно-матричне.

Усі заявлені характеристики дають змогу очікувати в майбутньому від електрорідинних екранів яскравих кольорів у відбитому світлі, відтворення повношвидкісного відео і незначного живлення. Це ще одна технологія, здатна скласти конкуренцію екранам *mirasol*.

6.3.11. Технологія Bridgestone QR-LPD. Технологія *QR-LPD* японської компанії *Bridgestone* – *Quick Response Liquid Powder Display* – з рідинами не має нічого спільного. Йдеться про таку властивість порошку, як плинність: ідеально круглі наногранули мають настільки низьке зчеплення одна із одною, що вони ведуть себе подібно до рідини – легко змішуються і перетікають з одного положення в інше [22]. Висока плинність двоколірного різнозарядженого порошку дала змогу відмовитися від рідинного наповнювача мікрокапсул (рис. 6.64) [38]. Зрештою технологія *Bridgestone QR-LPD* працює подібно, як і технологія *E-Ink*.

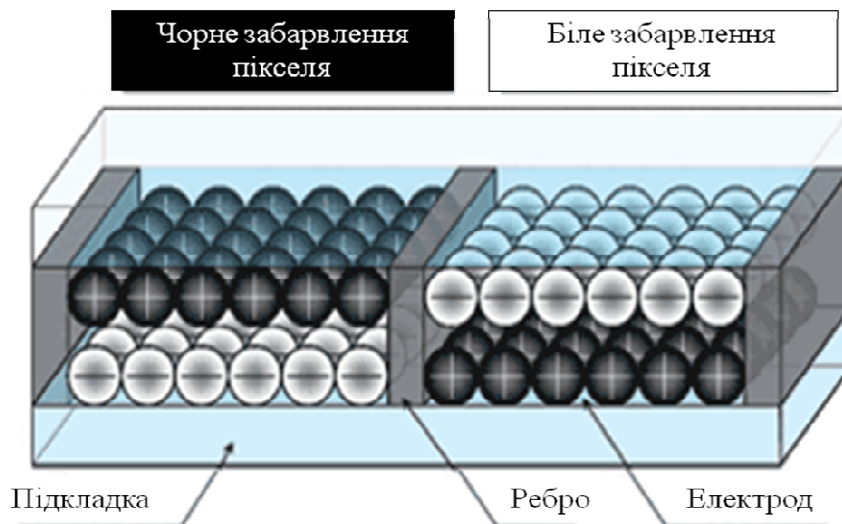


Рис. 6.64. До пояснення технології *QR-LPD* [38]

У кожній комірці екрана *QR-LPD* міститься позитивно заряджений чорний порошок і від'ємно заряджений білий. Зверху піксель закритий прозорим екраном, знизу – непрозорою підкладкою. Позитивний потенціал на боці екрана притягує до нього білий порошок, а чорний відштовхує – піксель стає білим (рис. 6.64). Зміна полярності спричиняє зворотний результат – від притягнутого до екрана чорного порошку піксель чорніє. Підвищене зчеплення у місці контакту порошку з верхньою і нижньою площинами дає змогу втримувати порошок на місці навіть без подання живлення (проявляється ефект пам'яті).

Відсутність рідини як інертного наповнювача дає таку перевагу технології *Bridgestone*, як вища швидкість перемикавання екрана з одного стану в інший, що в перспективі обіцяє рівне, без стрибків, відтворення відео. Швидкість перемикавання *E-Ink*, нагадаємо, 0,74 с для 16 градацій сірого і 0,26 с – в однобітному режимі. Теоретична швидкість перемикавання *QR-LPD* на чотири порядки менша – 0,2 мс. Однак у прототипах екранів *QR-LPD* швидкість перемикавання все ще залишає бажати кращого. Екрани зразка 2008 року поновлювались 8 с, зразки 2009 року пришвидшились до 0,8 с. Сьогодні з'явилися екрани *QR-LPD* зі швидкістю поновлення 0,2 с.

Активну розробку технології *QR-LPD* розпочали 2006 року. Крім компанії *Bridgestone*, у проекті брала участь компанія *Hitachi*. Крім екранів для

електронних книг, бістабільна енергозберігаюча технологія *QR-LPD* націлена на ринок зовнішньої реклами, інформаційних табло й електронних цінників. Зазначимо, що постачання наборів для розробки цінників уже розпочате, в той час як книги з екранами *Bridgestone* обіцяє випустити поки лише єдиний виробник – тайваньська компанія *Delta Electronics*.



Рис. 6.65. Електронні книги з екранами *QR-LPD* компанії *Delta Electronics* [38]

Екранами *QR-LPD* тайваньська компанія зацікавилась 2008 року, і перші пристрої з'явилися 2011 року. Це була 8,2-дюймова книга з монохромним екраном і 13,1-дюймова – з кольоровим. *Bridgestone* запевняє, що технологічний процес виробництва екранів *QR-LPD* значно дешевший, ніж випуск РК (для керування пікселями *QR-LPD* активно-матричної підкладки не потрібно), і може відбуватися у неперервному циклі (рис. 6.66).

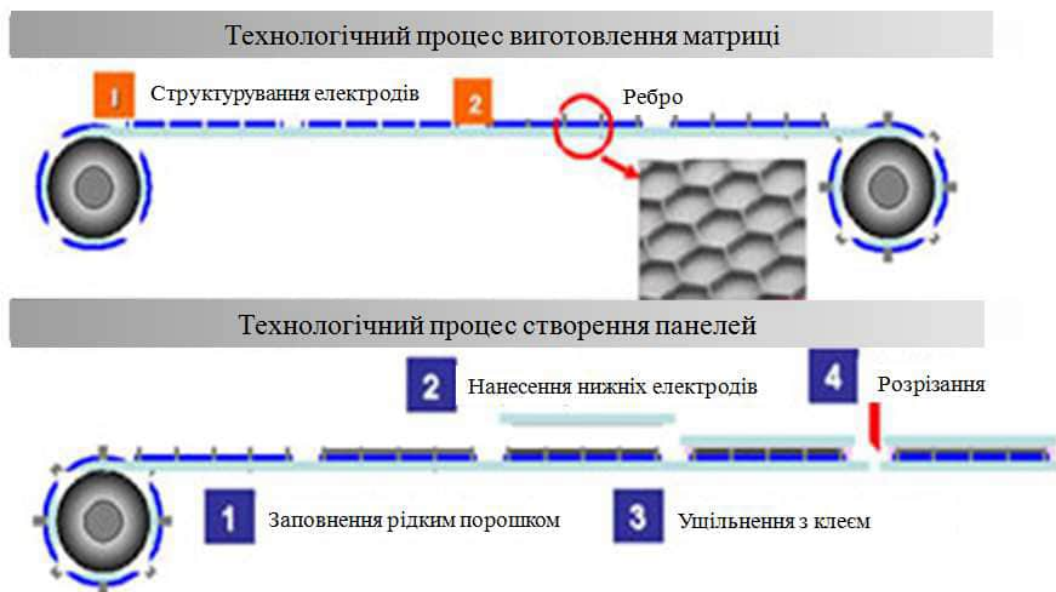


Рис. 6.66. Технологічний процес виготовлення екранів *QR-LPD* [38]

На практиці, очевидно, собівартість екранів на «рідкому порошку» все ще дуже висока, інакше вони уже давно склали б конкуренцію екранам *E-Ink*.

6.3.12. Екрани *SiPix*. Надалі розглянемо найімовірнішого конкурента екранів *E-Ink* у найближчій перспективі – технологію американської компанії *SiPix Imaging*. Як і *E-Ink*, технологія *SiPix* базується на мікрокапсулах із зарядженою сумішшю. Обидві розробки стартували наприкінці 90-х років з різницею у два роки: *E-Ink* – 1997 року, *SiPix* – 1999 року. На фініші, тим не менше, екрани *SiPix* відстали від свого конкурента на термін порядку шести років: екрани на *E-Ink* надійшли у продаж 2004 року, а масове відвантаження екранів на *SiPix* розпочали 2010 року. Розглянемо технологію *SiPix* на практиці.

Розпочнемо з того, що екрани *SiPix* можуть виробляти доволі простим способом у повністю автоматичному неперервному циклі (рис. 6.67).

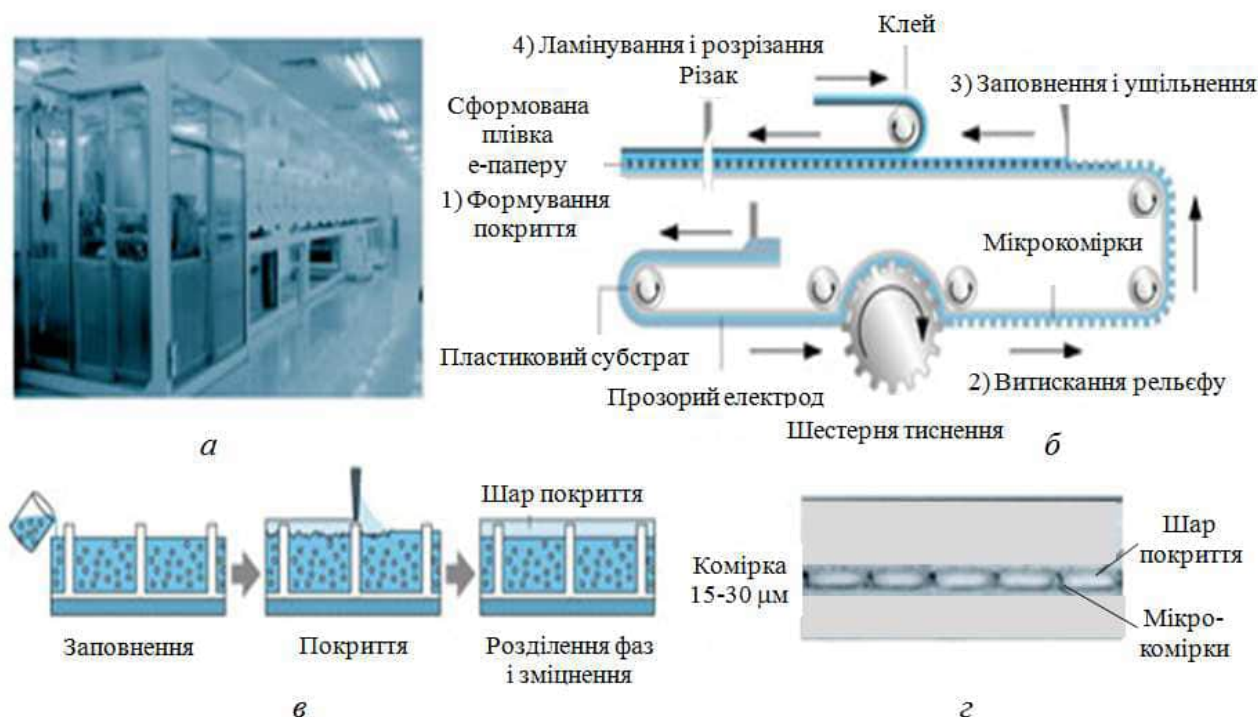


Рис. 6.67. Технологія виготовлення екранів *SiPix*: *а* – виробнича лінія; *б* – чотири основні етапи автоматичного неперервного циклу; *в* – процес покриття шаром герметика; *г* – розрізання плівки на мікрокомірки [38]

Як бачимо зі схеми на рис. 6.67, *б*, на пластиковий субстрат з прозорим електродом наноситься теж пластиковий матеріал (1), у котрому далі методом тиснення рівномірно протискують однакові комірки – майбутні пікселі (2). У

кожну з комірок заливають потрібний склад (3), після чого комірки по усій ширині рухомої стрічки заливають шаром герметика (рис. 6.67, в) і ламінують. Процес дуже простий, однак кожен крок і використовувані матеріали запатентовані компанією *SiPix*. Наголосимо, цього разу простота не уявна: екрани *SiPix* приблизно на 20 % дешевші, ніж екрани *E-Ink* рівної діагоналі.

Просте не тільки виробництво – конструкція пікселя також є простішою версією пікселя *E-Ink*. Якщо *E-Ink* спирається на двоколірну суміш (чорну і білу), то кожен піксель *SiPix* містить тільки одну білу суміш у рідині чорного кольору.

Як і в *E-Ink*, різниця потенціалів змушує білу суміш піднятися до поверхні екрана – піксель стає білим. Змінюючи полярність прикладеної напруги, ми змушуємо білу суміш опуститися на дно, і піксель почорніє від чорнила, яке підступило до екрана. Керування пікселем можливе як з допомогою пасивної підкладки, так і активно-матричної (рис. 6.68).

Через особливу конструкцію та інший склад інгредієнтів оптичні характеристики екранів *SiPix* дещо поступаються оптичним характеристикам екранів *E-Ink*. Компанія *SiPix* не публікує дані про свої монохромні дисплеї. На етапі дослідного виробництва білизна екранів *SiPix* приблизно на 10 % гірша, ніж білизна екранів *E-Ink*, і дещо повільніше працювало перемикання екрана.

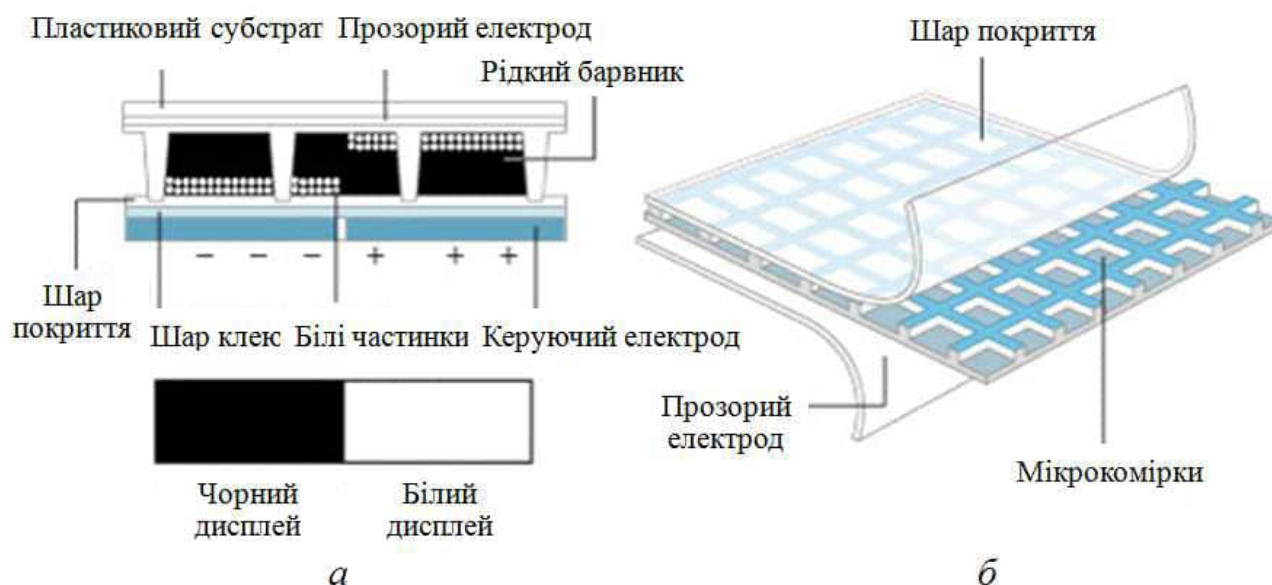


Рис. 6.68. Екрани *SiPix*: а – принцип відображення інформації; б – структура [38]

Поступаючись своєму прямому конкурентові в режимах чорно-білого зображення (поки що), у режимі демонстрації кольору екрани *SiPix* обіцяють показати кращі результати за кольорові *E-Ink*, причому як за кольоровим охопленням, так і за відбивальною здатністю. Причина полягає у дворежимному методі керування кольоровими субпікселями *SiPix*. Кольорові екрани *E-Ink* використовують накладні кольорові фільтри чотирьох кольорів – червоний, зелений, синій і білий (для підвищення білизни). Кольорові екрани *SiPix* не використовують кольорові фільтри – замість цього в кожен субпіксель залито чорнило свого кольору: червоне, синє і зелене (рис. 6.69).

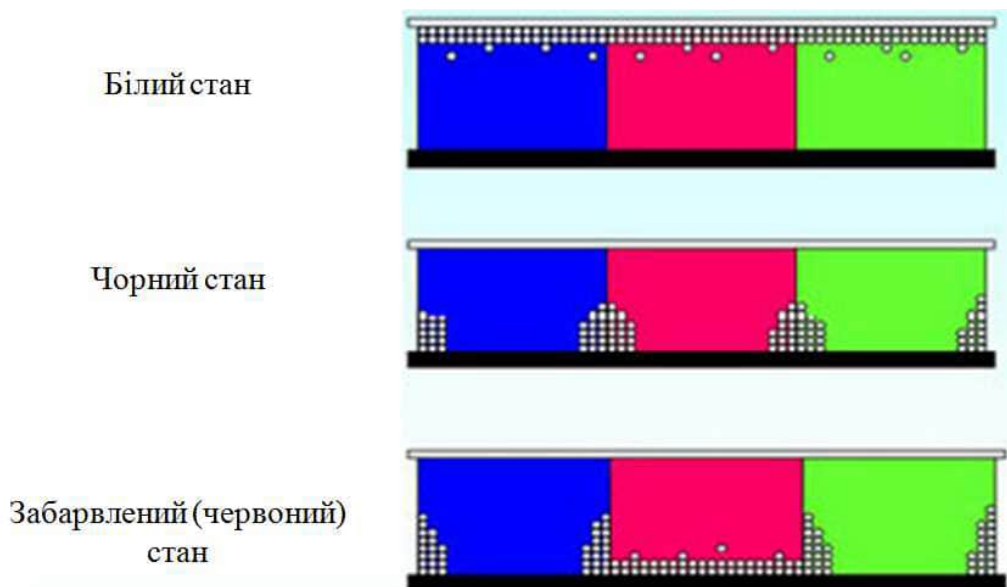


Рис. 6.69. Реалізація відтворення кольорів екранами *SiPix* [38]

Електроди у нижній підкладці кольорового екрана *SiPix* мають таку форму, що біла суміш може приймати в об'ємі субпікселя три положення: прилипаючи до екрана (білий); обліплюючи бокові стінки комірки (чорний); рівномірно розташовуючись уздовж дна. В останньому випадку біла суміш слугує рефлексивною підкладкою, підсвічуючи відбитим світлом колір рідини у субпікселі.

Відсутність накладних фільтрів дає підставу компанії говорити про відбивальну здатність кольорових екранів *SiPix* на рівні 40 %, тоді як у кольорових *E-Ink* цей показник ледь перевищує 30 %. Що стосується кольорового охоплення, то кольорові екрани *SiPix* можуть демонструвати до

14 % NTSC, де у кольорових *E-Ink* аналогічний показник не дотягує до 7 %.

Як висновок, наведемо зведену таблицю з представлених технологій – потенційних конкурентів *E-Ink* (табл. 6.2). Єдине, на чому хотілося б наголосити – на технології *SiPix* і *mirasol*. Перша, найімовірніше, складе серйозну конкуренцію чорно-білим «електрочорнильним» екранам *E-Ink*, а друга обіцяє реальний прорив в електронних книгах у бік кольору і відео. Технологію *Liquavista*, незважаючи на її зовнішню привабливість і широку рекламу, навряд чи доведуть до прийнятного рівня у найближчі роки. Проте у майбутньому вона дійсно може скласти серйозну конкуренцію *IMOD*-екранам *mirasol*.

Таблиця 6.2. Порівняльний аналіз технологій створення «папероподібних» екранів

Технологія	Опис	За	Проти	Розробник
1	2	3	4	5
Електрофоретичні дисплеї	Вплив електричного поля на пігментну суміш у мікрокапсулах	Найближча за сприйняттям до друкованого тексту	Недешеві, повільні, чорно-білі (поки що)	<i>E-Ink, SiPix, Bridgestone</i>
Холестеричні рідкі кристали	У планарному стані світло відбивається, у конфокальному поглинається	Дешеві, кольорові, пасивна матриця	Дуже повільні, складна реалізація кольору	<i>Fuji Xerox, ZBD Display, Hitachi, Varitronix, Kent Display, Kodak, Fujitsu,</i>
Нематичні бістабільні рідкі кристали	Два стани РК-спіралі: розвернутий і з поворотом – відбиває чи поглинає світло	Дешеві, кольорові, пасивна матриця, підсвітка	Повільні, залежать від температур, підсвічення	<i>Nemoptic</i>
Інтерферометрична модуляція	Використання MEMS-комірок для підсилення одного кольору і гасіння двох інших	Швидка анімація, колір, робота при дуже яскравому світлі	Проблеми з кольором, єдиний виробник	<i>Qualcomm</i>

Закінчення табл. 6.2.

1	2	3	4	5
Фотонні кристали	Керована зміна структури фотонного кристала змінює колір відбитого світла	Яскраві, кольорові	Дуже повільні, невідпрацьована технологія	<i>Opalux</i>
Електрохромні дисплеї	Хімічне забарвлення кристала на основі окислювально-відновних реакцій	Яскраві, кольорові, білі, гнучкі, дешеві	Сегментні, повільні	<i>Acreo, Aveso, Ntera, Siemens</i>
Електрофоретичні дисплеї зі зворотною емульсією	Вплив електричного поля на кольорові рідкі краплі у складі емульсії	Споживають менше енергії, ніж <i>E-Ink</i> ; швидкі	Невідпрацьована технологія, складна реалізація повнокольорності	<i>Zikon</i>
Електрозмочувані дисплеї	Електрично керований поверхневий натяг кольорової плівки з оливи	Найяскравіші, швидкі, прості у виготовленні	Немає ефекту пам'яті, невідпрацьована технологія	<i>Liquavista</i>
Електрорідинні дисплеї	Подібно до електрозмочування, однак фарба ховається в прихованих резервуарах	Яскраві, швидкі, з пам'яттю, прості у виготовленні	Невідпрацьована технологія	<i>Gamma Dynamics</i>

Лабораторна робота 6.1

Дослідження характеристик людського зору

Мета роботи: вивчити фізіологічні особливості людського зору; отримати залежність кутової роздільної здатності людського ока від яскравості спостережуваного зображення.

Прилади і матеріали: ЕОМ з рідкокристалічним монітором, люксметр, штангенциркуль, вимірвальна стрічка на 5 м.

Хід роботи

1. Ознайомитись із фізіологічними особливостями людського зору.
2. На дисплеї нарисувати в одному із прикладних графічних редакторів на білому фоні дві вертикальні риси із відстанню між ними $d = 1$ мм. Відстань між рисками проконтролювати з допомогою штангенциркуля.
3. Встановити на екрані дисплея з допомогою перемикача яскравості максимальну яскравість L , кількісне значення якої виписати із технічної документації на дисплей.
4. Поставивши впритул до екрана дисплея чутливий елемент люксметра, зафіксувати величину освітленості за максимальної яскравості екрана.
5. Відійти від екрана на таку відстань, на якій обидві риси уже неможливо бачити роздільно, і виміряти цю відстань D з допомогою вимірвальної стрічки.
6. Визначити кутову роздільну здатність ока за формулою $\text{tg} \gamma \approx \gamma = d/D$. Оскільки γ , визначену у такий спосіб, отримуємо в радіанах, здійснити відповідний перехід до кутової градусної міри.
7. Зменшуючи щоразу яскравість екрана на 5 % до 50 % від максимальної, виконати пп. 5 і 6. Дискретне зменшення яскравості екрана на 5 % контролювати з допомогою люксметра відповідно до п. 4, вважаючи, що таке зменшення яскравості рівносильне до 5 %-го зменшення освітленості на шкалі люксметра.

8. Повторити пп. 3–7 ще двічі: визначити середні значення кутової роздільної здатності людського ока γ_c та обчислити відповідні похибки.
9. Побудувати залежність $\gamma_c(L)$, зробити відповідні висновки та оформити звіт.

Тестові завдання та контрольні питання до розділу 6

1. Оберіть серед перелічених індикаторних пристроїв цифровий індикатор:

- лінійка світлових елементів;
- + семисегментний однорозрядний світловий регістр;
- матриця світлових елементів розміром $7 \times 5 + 1$;
- матриця світлових елементів розміром 16×16 ;
- світловий елемент у вигляді геометричної фігури чи картинки.

2. Оберіть серед перелічених індикаторних пристроїв мнемонічний індикатор:

- лінійка світлових елементів;
- семисегментний однорозрядний світловий регістр;
- матриця світлових елементів розміром $7 \times 5 + 1$;
- матриця світлових елементів розміром 16×16 ;
- + світловий елемент у вигляді геометричної фігури чи картинки.

3. Оберіть серед перелічених індикаторних пристроїв шкальний індикатор:

- + лінійка світлових елементів;
- семисегментний однорозрядний світловий регістр;
- матриця світлових елементів розміром $7 \times 5 + 1$;
- матриця світлових елементів розміром 16×16 ;
- світловий елемент у вигляді геометричної фігури чи картинки.

4. Оберіть серед перелічених індикаторних пристроїв літерно-цифровий індикатор:

- лінійка світлових елементів;
- семисегментний однорозрядний світловий регістр;
- + матриця світлових елементів розміром $7 \times 5 + 1$;

- матриця світлових елементів розміром 16×16 ;
- світловий елемент у вигляді геометричної фігури чи картинки.

5. Оберіть серед перелічених індикаторних пристроїв графічний індикатор:

- лінійка світлових елементів;
- семисегментний однорозрядний світловий регістр;
- матриця світлових елементів розміром $7 \times 5 + 1$;
- + матриця світлових елементів розміром 16×16 ;
- світловий елемент у вигляді геометричної фігури чи картинки.

6. Оберіть серед наведеного переліку індикаторних пристроїв активні індикатори:

- рідкокристалічні;
- + плазмові (газорозрядні);
- + індикатори розжарення;
- електрооптичні;
- + напівпровідникові.

7. Оберіть серед наведеного переліку індикаторних пристроїв пасивні індикатори:

- + рідкокристалічні;
- плазмові (газорозрядні);
- індикатори розжарення;
- + електрооптичні;
- напівпровідникові.

8. Вкажіть величину кутового поля зору здорового людського ока:

- 120° по вертикалі і 90° по горизонталі;
- + 120° по горизонталі і 90° по вертикалі;
- 120° і по вертикалі, і по горизонталі;

- 90° і по вертикалі, і по горизонталі.

9. Зі збільшенням яскравості світлового випромінювання діапазон спектральної чутливості людського ока ...

- + розширюється;
- звужується;
- не змінюється.

10. «Сутінковому» механізмові людського зору відповідає діапазон яскравостей світлового пучка, рівний ...

- 10^{-10} – 10^{-9} кд/м²;
- + 10^{-7} –1 кд/м²;
- 1 – 10^5 кд/м²;
- 10^6 – 10^{10} кд/м².

11. «Денному» механізмові людського зору відповідає діапазон яскравостей світлового пучка, рівний ...

- 10^{-10} – 10^{-9} кд/м²;
- 10^{-7} –1 кд/м²;
- + 1 – 10^5 кд/м²;
- 10^6 – 10^{10} кд/м².

12. Вкажіть діапазон яскравостей, які відчуває здорове людське око:

- 10^{-10} –1 кд/м²;
- + 10^{-7} – 10^5 кд/м²;
- 10^{-2} – 10^7 кд/м²;
- 10^2 – 10^{10} кд/м²;
- 1 – 10^5 кд/м².

13. Як себе поводить максимум функції видимості при переході від «денного» до «сутінкового» механізму людського зору:

- + зсувається на 50–60 нм у бік менших довжин хвиль;
- залишається на тому ж місці;
- зсувається на 50–60 нм у бік більших довжин хвиль?

14. За якої довжини хвилі функція видимості володіє максимумом при денному механізмі зору:

- 500 нм;
- 520 нм;
- + 555 нм;
- 570 нм;
- 600 нм?

15. Максимальне значення функції видимості рівне ...

- 500 лм/Вт;
- 580 лм/Вт;
- 600 лм/Вт;
- + 680 лм/Вт;
- 700 лм/Вт.

16. Кутова роздільна здатність людського ока рівна ...

- 1 кутовий градус;
- + 1 кутова хвилина;
- 1 кутова секунда.

17. На якій відстані здорове людське око чітко розділятиме символи розміром 5 мм:

- 1 м;
- 4 м;
- 10 м;
- + 14 м;
- 20 м?

18. Контраст в індикаторній техніці визначають за формулою ...

$$+ K = \frac{L - L_{\phi}}{L};$$

$$- K = \frac{L}{L_{\phi}};$$

$$- K = \frac{L - L_{\phi}}{L_{\phi}}.$$

19. Системи відображення інформації. Індикатори. Покоління індикаторних приладів.

20. Особливості роботи, області застосувань та конструкція напівпровідникових індикаторів.

21. Фізіологічні основи індикаторної техніки. Функція видимості ока. Закон Вебера-Фехнера. Роздільна здатність. Діаграма МКО.

22. Які сполуки є головними матеріалами для виготовлення фотоприймачів у «синій» ділянці спектра:

- GaAs;
- GaAsP;
- SiC;
- GaP;
- + GaN?

23. Якого типу рідкокристалічні суміші є головними під час виготовлення рідкокристалічних індикаторів:

- + нематичні;
- смектичні;
- холестеричні?

24. Який фізичний ефект є головним під час виготовлення рідкокристалічних екранів:

- ефект динамічного розсіювання;
- + Твіст-ефект;
- газовий розряд?

25. Який фізичний ефект характеризує принцип роботи плазмових екранів:

- ефект динамічного розсіювання;
- Твіст-ефект;
- + газовий розряд?

26. Якого року австрійський ботанік Фрідріх Райнітцер вперше виявив рідкокристалічний стан речовини:

- 1856;
- + 1888;
- 1905;
- 1912?

27. Координаційні сполуки яких лантанідів можна використати як матеріали для люмінесціюючих шарів в органічних світлодіодах:

- La^{3+} , Gd^{3+} , Lu^{3+} ;
- Pr^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} ;
- + Tb^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} ?

28. Люмінесціюючими елементами органічних світлодіодів на основі координаційних сполук лантанідів є ...

- органічні ліганди;
- + іони рідкоземельних елементів.

29. Яке джерело світлового випромінювання використовують у рідкокристалічних LED дисплеях:

- лампа розжарення;
- газорозрядна люмінесцентна лампа;
- + матриця світлодіодів;
- напівпровідниковий лазер?

30. Оптичний елемент екрана, виготовленого за технологією *E-Ink*, структурно містить ...

- окремо виготовлену мікроелектромеханічну систему із щілиною певної висоти, верхня частина якої — прозора плівка, а нижня — рухома металева дзеркальна мембрана;

+ мікрокапсулу з прозорою рідиною, в якій вільно плавають негативно заряджені чорні і позитивно заряджені білі частинки фарби, між двома площинними електродами;

- високовпорядкований активний полімер, «ґратка» якого може розтягуватися чи стискатися під дією прикладеної електричної напруги;

- заповнену водою комірку, яка складається з прозорого електрода, гідрофобного ізолятора, шару забарвленої оливи.

31. Оптичний елемент екрана, виготовленого за технологією *Mirasol*, структурно містить ...

+ окремо виготовлену мікроелектромеханічну систему із щілиною певної висоти, верхня частина якої — прозора плівка, а нижня — рухома металева дзеркальна мембрана;

- мікрокапсулу з прозорою рідиною, в якій вільно плавають негативно заряджені чорні і позитивно заряджені білі частинки фарби, між двома площинними електродами;

- високовпорядкований активний полімер, «ґратка» якого може розтягуватися чи стискатися під дією прикладеної електричної напруги;

- заповнену водою комірку, яка складається з прозорого електрода, гідрофобного ізолятора, шару забарвленої оливи.

32. Оптичний елемент екрана, виготовленого за технологією *P-Ink*, структурно містить ...

- окремо виготовлену мікроелектромеханічну систему із щільною певної висоти, верхня частина якої — прозора плівка, а нижня — рухома металева дзеркальна мембрана;

- мікрокапсулу з прозорою рідиною, в якій вільно плавають негативно заряджені чорні і позитивно заряджені білі частинки фарби, між двома площинними електродами;

- + високовпорядкований активний полімер, «ґратка» якого може розтягуватися чи стискатися під дією прикладеної електричної напруги;

- заповнену водою комірку, яка складається з прозорого електрода, гідрофобного ізолятора, шару забарвленої оливи.

33. Оптичний елемент екрана, виготовленого за технологією *Liquavista*, структурно містить ...

- окремо виготовлену мікроелектромеханічну систему із щільною певної висоти, верхня частина якої — прозора плівка, а нижня — рухома металева дзеркальна мембрана;

- мікрокапсулу з прозорою рідиною, в якій вільно плавають негативно заряджені чорні і позитивно заряджені білі частинки фарби, між двома площинними електродами;

- високовпорядкований активний полімер, «ґратка» якого може розтягуватися чи стискатися під дією прикладеної електричної напруги;

- + заповнену водою комірку, яка складається з прозорого електрода, гідрофобного ізолятора, шару забарвленої оливи.

34. Які з перелічених «папероподібних» екранів споживають найменше електричної потужності на квадратний дюйм поверхні:

- *Mirasol*;
- *E-Ink*;
- + *Liquavista*?

35. Які з перелічених «папероподібних» екранів володіють найповільнішим поновленням кадрів:

- *Mirasol*;
- *Liquavista*;
- + *електрохромні*?

36. Які з перелічених «папероподібних» екранів володіють найвищою яскравістю та рівнем контрастності:

- *Mirasol*;
- *E-Ink*;
- + *Liquavista*?

37. Плазмові індикатори, їхні переваги та недоліки.

38. Рідкокристалічні індикатори. Електрооптичні ефекти в рідких кристалах. Будова рідкокристалічних комірок.

39. Дисплеї на основі рідких кристалів. Пасивні і активні матриці. Кольорові зображення на рідкокристалічних дисплеях.

40. Електролюмінесцентні дисплеї: конструкція, робота, переваги та недоліки.

41. Опишіть використання технології «електронного чорнила» для створення екранів *E-Ink*.

42. Технологія створення та структура екранів *ChLCD* на основі холестеричних рідких кристалів.

43. Технологія створення та структура *STN*-екранів на основі нематичних рідких кристалів.

44. Переваги та недоліки гнучких рідкокристалічних дисплеїв на основі полімерної матриці.

45. Екрани на основі «інтерферометричної модуляції», виготовлені за технологією *Mirasol*.

46. Використання технології «фотонного чорнила» для створення екранів *P-Ink*.

47. Структура та робота електрохромних дисплеїв.

48. Архітектура дисплеїв за технологією *Liquavista*, які працюють на ефекті «електрозмочування».

49. Зробіть порівняльний аналіз «папероподібних» екранів, виготовлених за технологіями *E-Ink*, *SiPix*, *P-Ink*, *Mirasol*, *Liquavista*, електрохромних та рідкокристалічних.

7. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

7.1. Технологічні операції при виготовленні електронних пристроїв

Як відомо, оптоелектроніка, як розділ електроніки, базується на технологічній базі мікроелектроніки. Тобто при виготовленні оптоелектронних пристроїв використовуються засоби та методи, які успішно застосовуються у класичній електроніці. І хоч оптоелектронні пристрої за своїми конструктивними та функціональними ознаками помітно відрізняються від «звичайних» електронних, усі технологічні процеси їх виготовлення базуються на чергуванні тих же типових операцій. Зазвичай, ця послідовність виглядає наступним чином:

- очищення та підготовка вихідних речовин;
- вирощування монокристалів;
- орієнтування та розрізання монокристалів на пластини;
- механічна та хімічна обробка пластин;
- літографія у поєднанні з епітаксією, напиленням, дифузією, іонною імплантацією;
- нанесення захисних покриттів, збирання, контрольні випробування.

Чітко визначене поєднання вищезгаданих операцій складає технологію. Для різних типів пристроїв використовуються різноманітні технології, серед яких слід виділити епітаксіально-планарну технологію (ЕПТ) та технологію метал-діелектрик-напівпровідник (МДН). Модифікаціями останньої є технологія метал-оксид-напівпровідник (МОН) та технологія комплементарних структур метал-оксид-напівпровідник (КМОН).

7.1.1. Очищення та підготовка вихідних речовин

Ступінь чистоти матеріалів у приладах оптоелектроніки має значно більше значення, ніж у приладах «класичної» електроніки, оскільки незначні кількості домішок (10^{-3} - 10^{-5} %) здатні суттєво змінити спектральні властивості

основної речовини (колір, інтенсивність випромінювання), при цьому зміни електричних параметрів, як правило, будуть практично непомітними [41].

Очищення матеріалів здійснюється різноманітними хімічним та фізико-хімічними методами, проте, зазвичай, добрі результати отримуються лише при застосуванні комбінації різних методів, послідовність реалізації яких строго визначена. Отримання матеріалів і їх очищення здійснюються в умовах, що максимально виключають забруднення матеріалу домішками з навколишнього середовища або в результаті контакту з матеріалом технологічної апаратури.

До хімічних методів, які використовуються найчастіше при глибокому очищенні практично всіх матеріалів, відносяться окислювально-відновні реакції, осадження, хімічні транспортні реакції, які базуються на відмінності в константі рівноваги або константі швидкості реакції основної речовини та домішки з іншим компонентом.

До фізико-хімічних методів глибокого очищення матеріалів відносяться дистиляція, проста перегонка, ректифікація, сублімація, кристалізація, магнітна сепарація, екстракція та інше. Для глибокого очищення матеріалів застосовують також адсорбційні, іоннообмінні, електрохімічні, дифузні і термодифузні процеси розділення речовин. Усі ці методи базуються на відмінності складів, властивостей або концентрацій основної речовини і домішок.

Ступінь чистоти отриманого матеріалу у міжнародних позначеннях характеризується відносною кількістю домішок в основній речовині (як за кількістю, так і за масою), для чого застосовують наступні позначення:

% - кількість атомів домішки на 100 атомів основної речовини;

‰ – кількість атомів домішки на 1000 атомів основної речовини;

ppm – кількість атомів домішки на 10^6 атомів основної речовини;

ppb – кількість атомів домішки на 10^9 атомів основної речовини;

ppt – кількість атомів домішки на 10^{12} атомів основної речовини.

У радянські часи була розроблена (а зараз використовується в деяких пострадянських країнах) класифікація чистоти речовини, яка вказувала вміст

основної речовини, а не домішок [42]. Відповідно, чистота речовин ґрадувалась за наступною шкалою:

ч (чистий) – вміст основної речовини не нижче 98 %;

чда (чистий для аналізу) – вміст основної речовини не нижче 99 %;

хч (хімічно чистий) – вміст основної речовини не нижче 99,9 %;

осч (особливо чистий) – вміст основної речовини не нижче 99,99 %, у цілому маркування записується, наприклад, як *осч11-5*, де 11 – кількість неорганічних домішок, вміст яких контролюється, 5 – від’ємний показник степеня десятки сумарного вмісту цих домішок, у відсотках (тобто у даному випадку контролюється 11 неорганічних домішок і їх сумарний вміст становить не більше 10^{-5} %);

вэч (вещество эталонной чистоты – *рос.*) – вміст основної речовини максимально можливий та гранично мала кількість домішок. Маркування подібне до типу *осч*, однак кількість контрольованих домішок є більшою, а вміст – значно меншим, наприклад *вэч21-7*.

Очищення речовин для досягнення необхідного ступеня чистоти, як уже згадувалося, здійснюється різноманітними фізико-хімічними методами, серед яких можна виділити осадження, ректифікацію, дистиляцію, екстракцію, сорбцію, іонний обмін, зонну плавку. На останньому методі слід зупинитись більш детально, оскільки він широко застосовується для очищення речовин перед отриманням монокристалів [43].

Метод зонної плавки, як метод очистки речовини від домішок, ґрунтується на різній розчинності домішки у твердій та рідкій фазі основної речовини. При реалізації цього методу очищення вузька розплавлена область, яка формується тонким нагрівачем, рухається вздовж твердої заготовки. Якщо домішка краще розчиняється у рідині, то вона поступово накопичується у розплавленій області і після закінчення процесу концентрується на тому кінці заготовки, на якому завершився процес. Якщо навпаки, домішка краще розчиняється у твердій фазі, то найчистішим виявляється той кінець заготовки, на якому завершився процес. Для підвищення ефективності процесу очищення його проводять послідовно декількома зонами плавлення (рис.7.1)

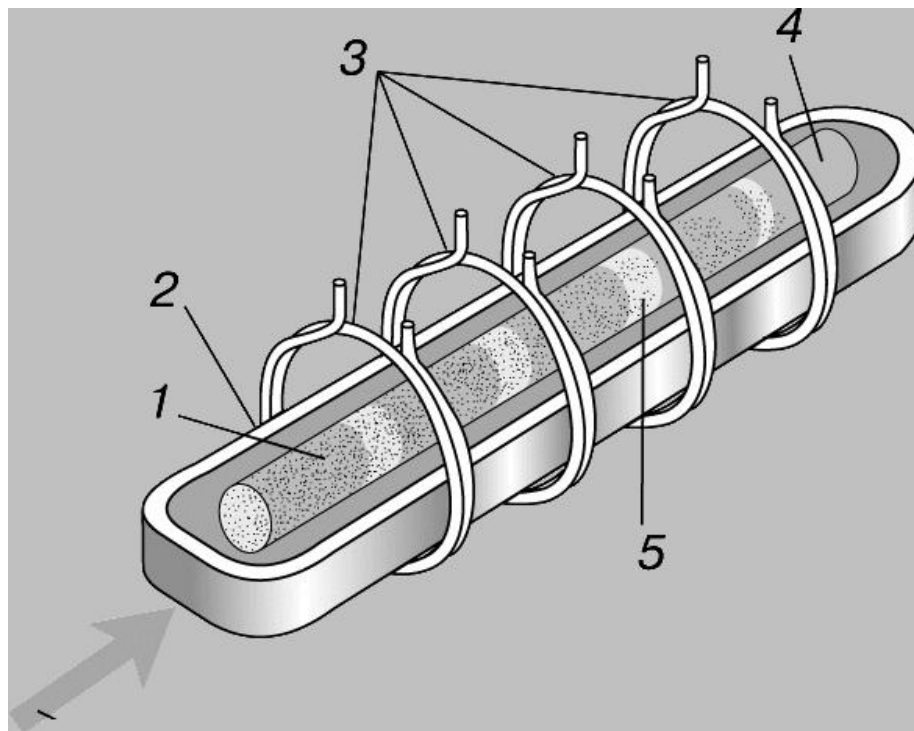


Рис.7.1. Схема методу зонної плавки: 1 – очищувана заготовка (кінець з високою концентрацією домішки), 2 – тугоплавкий тигель, 3 – нагрівачі, 4 – очищувана заготовка (кінець з низькою концентрацією домішки), 5 – розплавлена область.

7.1.2. Вирощування монокристалів

Серед розмаїття методів отримання монокристалів, слід виділити декілька, які є найбільш поширеними при вирощуванні монокристалічних заготовок для оптоелектронних пристроїв. Це метод Чохральського, за допомогою якого здійснюється промислове вирощування переважної більшості напівпровідників та складних окислів; метод Бріджмена, який дозволяє вирощувати монокристали без затравки; метод зонної плавки, який є необхідним у випадку вирощування монокристалів складних напівпровідників.

Метод Чохральського полягає у вирощуванні монокристалів з тигля витягуванням із розплаву при повільному обертанні, і отримав свою назву завдяки автору, польському вченому Яну Чохральському. Метод набув неабиякого поширення завдяки простоті реалізації, задовільній якості при відносно великих розмірах вирощуваних монокристалів. Переважна більшість

кремнію вирощується цим методом, при цьому діаметр монокристалу досягає 400 мм [44].

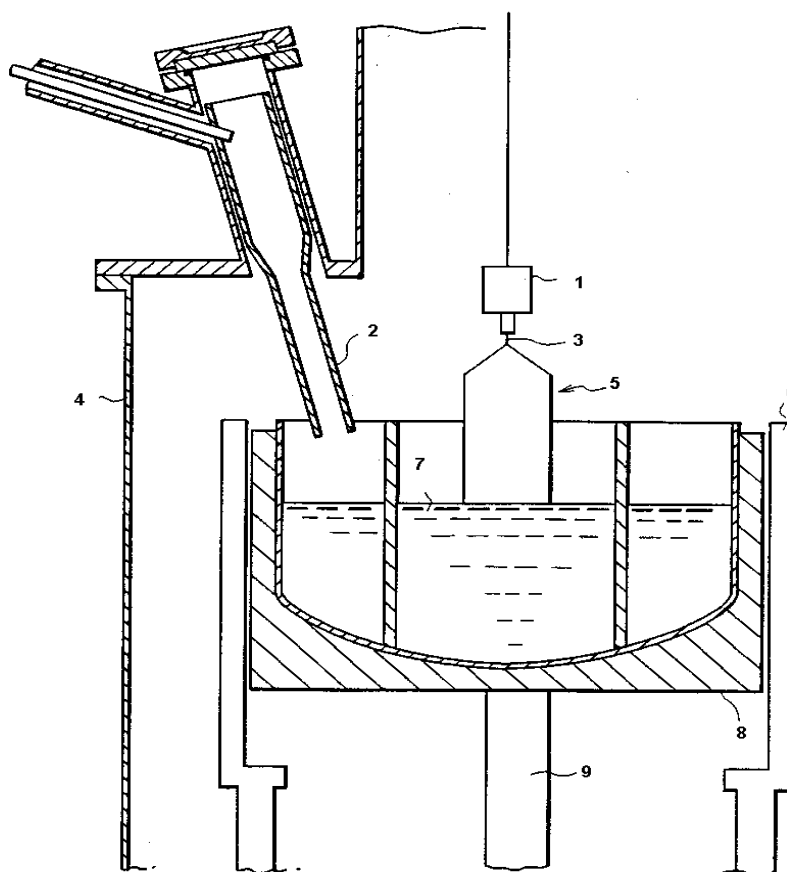


Рис.7.2. Вирощування монокристалів методом Чохральського: 1 – підвіс монокристалу, 2 – канал подання газів та довантаження матеріалу, 3 – затравка монокристалу, 4 – корпус автоклава, 5 – вирощуваний монокристал, 6 – нагрівальний елемент, 7 – розплав, 8 – тигель, 9 – шток.

Схематично установка для вирощування монокристалів методом Чохральського зображена на рис. 7.2. У розплавлену речовину (7), що знаходиться в області температури плавлення у тугоплавкому тиглі, занурюється певним чином орієнтована затравка (3) із шматочка монокристалу з того ж матеріалу, що і розплав, яка трохи оплавляється і потім повільно та рівномірно витягається з розплаву. На затравці, оплавленій і змоченій розплавом, при витягуванні поступово наростає кристалічна фаза (5). Під час росту кристала виділяється тепло кристалізації, тому зона кристалізації охолоджується струменем інертного газу. Завдяки силам поверхневого натягу, що діють між розплавом і затравкою, за нею піднімається стовпчик розплаву,

висота якого залежить від ступеня перегрівання розплаву, умов охолодження на фронті кристалізації та інших причин і визначає собою діаметр вирощуваного монокристалу. Для забезпечення рівномірнішого розподілу температури і домішок по об'єму розплаву затравочний кристал і тигель з розплавом обертають, причому, зазвичай, у протилежних напрямках.

Вирощування кристала, що йде з вільної поверхні розплаву, не обмежується стінками контейнера (тигля), тому кристали, отримані методом Чохральського, менш напружені, ніж кристали, отримані іншими тигельними методами. Форма кристала близька до циліндричної, але при цьому виявляються викривлення, які визначаються тепловими умовами вирощування, швидкістю витягування, кристалічною структурою і кристалографічною орієнтацією вирощуваного зливка.

Метод Бріджмена (рис. 7.3) базується на використанні вертикальної печі, яка на певній висоті розділена на дві частини, в одній з яких (нижній) підтримується температура дещо нижче точки плавлення кристалу, а друга (верхня) знаходиться вище точки плавлення. Поступово, обертаючись, ампула опускається, і, в певний момент перетинає умовну лінію розділення печі. У цей момент у капілярному кінчику ампули утворюється монокристал, причому розмір капіляра підбирається так, щоб цей кристал був лише один (у протилежному випадку утворюватиметься полікристалічна структура). У подальшому при опусканні ампули здійснюється поступове формування монокристалічного зразка по всій висоті розплаву.

У більшості випадків, при відповідній діаграмі стану системи «основна речовина – домішка», домішка накопичується у верхній частині зразка, що суттєво змінює властивості кристалу у цій його частині. Помітним недоліком методу є поява помітних напружень у кристалі під час вирощування за рахунок наявності контакту із стінками ампули, а це, у свою чергу, суттєво обмежує розміри вирощуваних кристалів.

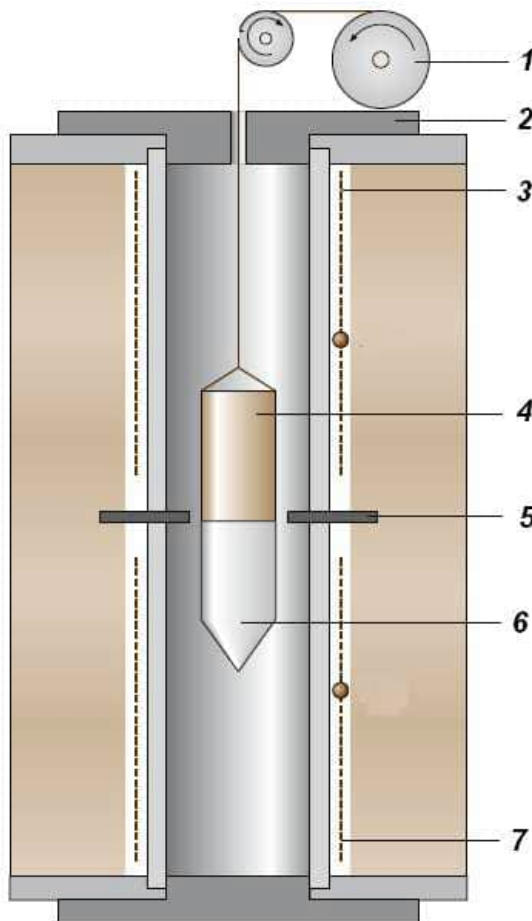


Рис. 7.3. Схема вирощування монокристалів методом Бріджмена: 1 – механізм подання ампули, 2 – нагрівник, 3, 7 – нагрівники, 4 – розплав, 5 – рівень, що відповідає температурі плавлення (діафрагма), 6 – монокристал. [45]

Модифікацією цього методу вирощування монокристалів є *метод Бріджмена-Стокбаргера*, суттєвою відмінністю якого є наявність у печі фіксованої діафрагми (4), що розділяє її на дві частини, у яких підтримуються відповідно температури вище та нижче точки плавлення речовини.

Метод зонної плавки полягає у перекристалізації твердої речовини з полікристалічного стану у монокристалічний у тонкому шарі розплаву, який з'єднує ці дві частини. Залежно від напрямку руху розплавленої зони розрізняють метод горизонтальної напрямленої кристалізації (рис. 7.4,а) та вертикальної напрямленої кристалізації (рис. 7.4,б).

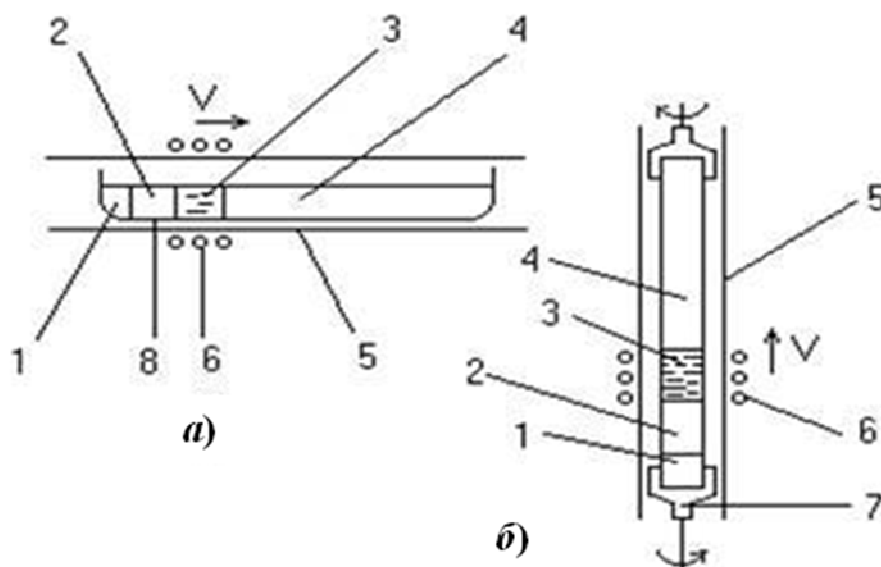


Рис. 7.4. Схема вирощування монокристалів методом горизонтальної (а) та вертикальної (б) зонної плавки: 1 – затравка монокристалу, 2 – монокристал, 3 – зона розплаву, 4 – полікристал, 5 – контейнер, 6 – нагрівач, 7 – тримач монокристала, 8 – тугоплавкий тигель.

Якщо перший метод реалізується у тугоплавкому тиглі, то другий, переважно, не потребує його і тому отримав назву *методу безтигельної зонної плавки* (БЗП). При реалізації методу БЗП полікристалічну заготовку розміщують над монокристалічною затравкою в центрі дистанційного (індуктивного, електронно-променевого чи лазерного) нагрівача. Розплавлена речовина, стікаючи з полікристалічної заготовки, потрапляє на затравку і, охолоджуючись, «добудовує» монокристал. У подальшому при поступовому переміщенні нагрівача догори здійснюється вирощування монокристалу з орієнтацією, яка була задана початковою затравкою. Перевагою методу БЗП є відсутність забруднень монокристалу від стінок тигля та напружень за рахунок різниці в їх коефіцієнтах термічного розширення. Діаметр вирощуваних монокристалів на сьогодні досягає 150 мм. Метод горизонтальної напрямленої кристалізації, дозволяючи вирощувати кристали значно меншого діаметру, володіє перевагою відносної простоти технологічної реалізації.

7.1.3. Орієнтування та розрізання монокристалів на пластини

Рентгенівське орієнтування монокристалів ґрунтується на дифракції X -променів на кристалічній гратці монокристалів. Відбивання і розсіювання випромінювання відбувається від атомних площин, що характеризується індексами (hkl) та описується рівнням Вульфа-Брега:

$$(7.1)$$

У методі спостереження дифракційної картини монокристалів, який отримав назву *метода Лауе*, використовується гальмівне X -випромінювання. З огляду на велику ширину спектру цього випромінювання, для сімейства кристалографічних площин (hkl) даного кристалу завжди знайдуться такі довжини хвиль, для яких виконуватиметься співвідношення (7.1). Відповідно, при цьому виникнуть дифракційні максимуми (рис. 7.5), конфігурація яких є типовою для кристалу з даною симетрією. Орієнтування відбувається повертанням монокристалу до співпадіння спостережуваної картини з еталонною.

Метод обертання монокристалу базується на використанні монохроматичного X -випромінювання і полягає у пошуку такого положення монокристалу для якого інтенсивність дифракційного максимуму для даної міжплощинної відстані $d_{(hkl)}$ буде максимальною (рис. 7.6). Тобто при падінні монохроматичного рентгенівського випромінювання на систему атомних площин, розділених міжплощинними відстанями $d_{(hkl)}$, дифракційний максимум буде спостерігатись не при довільному куті, а тільки при тому β , що задовольняє умову:

$$(7.2)$$

Цей метод реалізується на рентгенівських дифрактометрах і є найбільш поширеним у промисловому виробництві монокристалів. Його перевагою є можливість застосування до будь-яких монокристалів, незалежно від енергомісткості та громіздкості обладнання, яка пов'язана з необхідністю захисту людини від впливу X -променів [46].

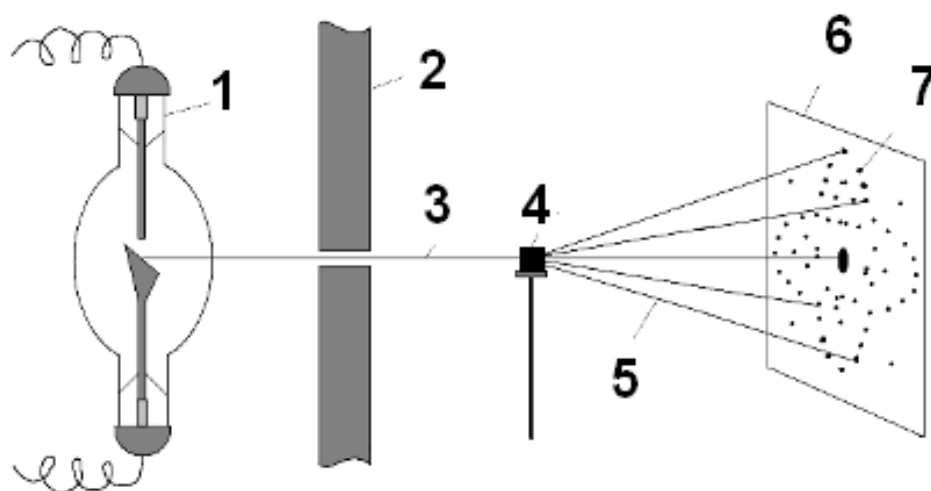


Рис. 7.5. Схема реалізації методу Лауе: 1 – джерело X -променів, 2 – діафрагма, 3 – падаючий X -промінь, 4 – монокристал, 5 – розсіяні X -промені, 6 – екран, 7 – дифракційна картина (Лауєграма).

Оптичне орієнтування монокристалів здійснюється двома принципово різними методами. Перший з них ґрунтується на визначенні положення індикатриси оптично двовісних кристалів шляхом спостереження коноскопичної картини у поляризованому світлі.

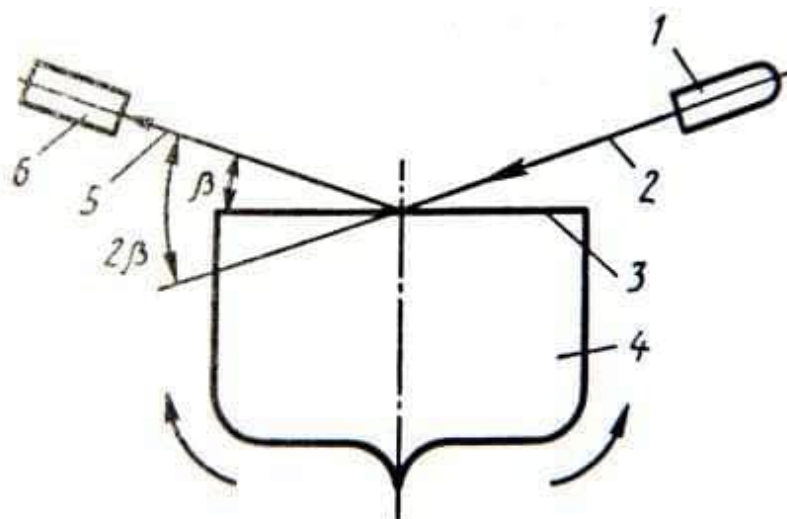


Рис. 7.6. Схема рентгенодифракційного методу орієнтування монокристалів (метод обертання). 1 – джерело X -променів, 2 – падаючий X -промінь, 3 – поверхня монокристалу 4 – монокристал, 5 – відбитий X -промінь, 6 – детектор.

Другий метод – на спостереженні фігур, що утворюються на поверхні монокристалу при дії на нього селективного травника (рис. 7.7). Вигляд фігур травлення, що є заглибленнями в кристалі, є різним для різних кристалографічних напрямків у кристалі. [47]

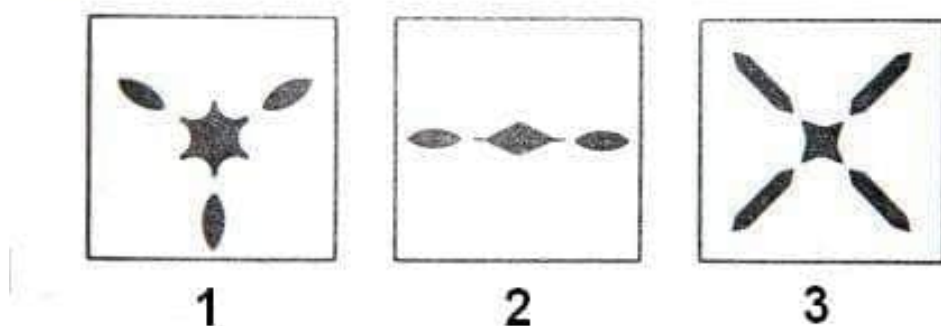


Рис.7.7. Фігури травлення різних кристалографічних площин кремнію: 1 – (111), 2 – (110), 3 – (100).

Відбитий від шліфованого зразка слабзорозбіжний пучок світла, утворює на екрані світлову фігуру, за положенням якої можна оцінити величину відхилення кристалографічної площини від площини торця монокристала. Відхилення реальної поверхні торця монокристалу від кристалографічної площини приводить до зміщення відбитого променя на екрані на деяку відстань, що характеризує шуканий кут відхилення поверхні шліфа від кристалографічної площини.

Після завершення орієнтування монокристалічної заготовки у вибраній кристалографічній орієнтації відбувається її розрізання на тонкі (200-600мкм) плоскопаралельні пластини. Сьогодні переважно використовуються наступні способи розрізання монокристалічних заготовок на пластини: розрізання диском із зовнішньою ріжучою кромкою, диском з внутрішньою ріжучою кромкою та полотнами (струнами) з поданням абразивної суміші.

Розрізання дисками із зовнішньою ріжучою кромкою є найпростішим способом розділення монокристалічної заготовки на пластини (рис. 7.8). Алмазні зерна розміром 20-50 мкм нанесені на зовнішній край металевого диска товщиною 0,3-0,7 мм, який обертається з частотою понад 10 000 об./хв., що дозволяє отримати ширину прорізу не менше 0,5 мм. Суттєвим обмеженням

методу є те, що при великих діаметрах ріжучого диска (понад 300 товщин) спостерігається його деформація і, відповідно, зниження точності різання. При розрізанні виділяється велика кількість теплової енергії, що потребує її відводу шляхом подання в зону розрізання абразивної суспензії на основі карбіду бору (B_4C), карбіду кремнію (SiC) або корунду (Al_2O_3).

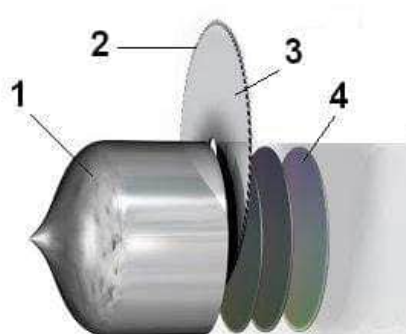


Рис. 7.8. Схема розрізання монокрystalічної заготовки на пластини диском із зовнішньою ріжучою кромкою. 1 – монокрystalічна заготовка, 2 – алмазне напилення, 3 – ріжучий диск, 4 – монокрystalічні пластини.

Розрізання дисками із внутрішньою ріжучою кромкою здійснюється за допомогою пил, виготовлених з металевої фольги товщиною 0,1-0,15 мм у вигляді диска з внутрішнім отвором, на який нанесено абразив (рис. 7.9). Диск закріплюється до обертаючого шпінделя своєю зовнішньою кромкою. Товщина прорізу у цьому випадку становить 0,2-0,3 мм, що зменшує витрати монокрystalічного матеріалу приблизно на 60% у порівнянні з попереднім методом.

Розрізання полотнами (струнами) є найстарішим та найшвидшим способом розрізання монокрystalів за рахунок паралельного руху багатьох полотен чи струн (рис. 7.10). Товщина полотен (діаметр струн) становить 0,1-0,2 мм, що дозволяє отримати товщину прорізу 0,5 мм. Недоліком методу є неможливість розрізання на велику глибину через відведення полотен (дротин) від початкового напрямку і порушення геометрії пластин.

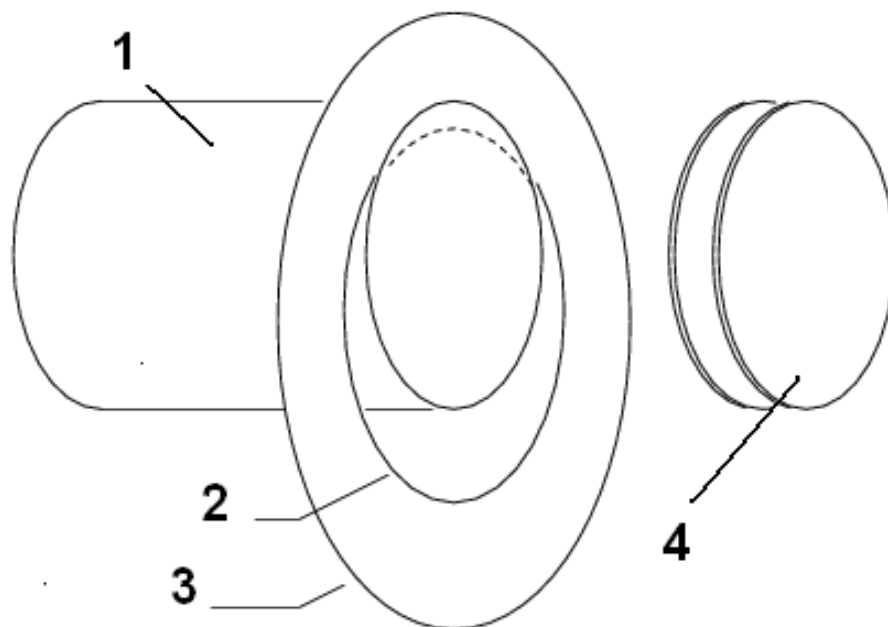


Рис. 7.9. Схема розрізання монокристалічної заготовки на пластини диском із внутрішньою ріжучою кромкою. 1 – монокристалічна заготовка, 2 – алмазне напилення, 3 – ріжучий диск, 4 – монокристалічні пластини.

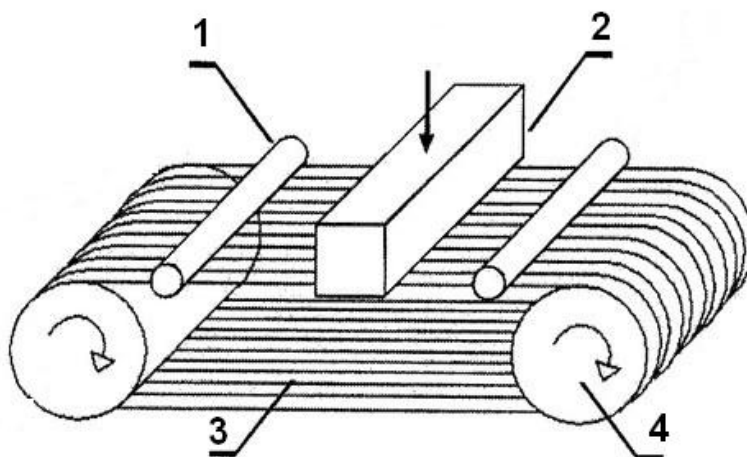


Рис. 7.10. Схема розрізання мнокристалічної заготовки на пластини диском із внутрішньою ріжучою кромкою. 1 – стабілізуючий ролик, 2 – монокристалічна заготовка, 3 – ріжучі струни, 4 – привідний ролик.

Після завершення розрізання монокристалу отримуються плоскопаралельні пластини товщиною 200-600 мкм, які у поперечному розрізі мають вигляд, який схематично поданий на рис. 7.11. Верхній шар (1) – це *нерівності*, утворені під час розрізання монокристалу. Під ним знаходиться *порушений шар* (2), у якому наявні тріщини та інші дефекти, утворені під час розрізання та ще глибше – шар бездефектного монокристалу (3). Після

розрізання розмір нерівностей сягає 50 мкм, товщина порушеного шару 100 мкм.

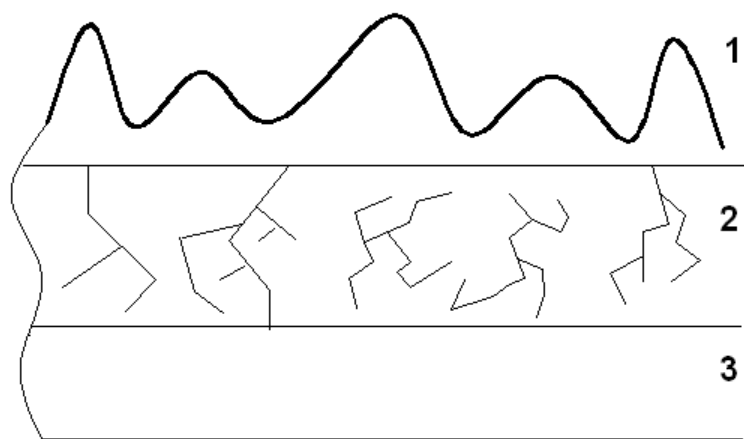


Рис. 7.11. Поперечний розріз монокристалічної пластини. 1 – шар нерівностей, 2 – порушений шар, 3 – бездефектний монокристал.

7.1.4. Механічна та хімічна обробка поверхні

Після розрізання монокристалу на пластини отримуються заготовки, які ще непридатні для формування оптоелектронних пристроїв, тому завданням наступних етапів їх обробки є досягнення величини нерівностей менше 0,03 мкм та повне усунення порушеного шару.

Наступним етапом у технологічній ланці обробки монокристалічних пластин є *шліфування*, яке здійснюється у декілька етапів. Перший – шліфування вільним абразивом з використанням шліфувальних кругів з чавуна, скла, бронзи, де як абразив використовуються суспензії або пасти на основі порошків B_4C , Al_2O_3 , SiC , синтетичного алмазу із розміром зерна від 30 до 3 мкм. Руйнування нерівностей відбувається під час перекочування абразивних частинок між поверхнею пластини та шліфувального круга. При шліфуванні зв'язаним абразивом матеріал з поверхні пластин видаляється за рахунок його зрізання гострими гранями абразиву, закріпленого у шліфувальному крузі (рис. 7.12.). У результаті такого багатоетапного шліфування розмір нерівностей зменшується до 1 мкм, а товщина порушеного шару – до 10 мкм.

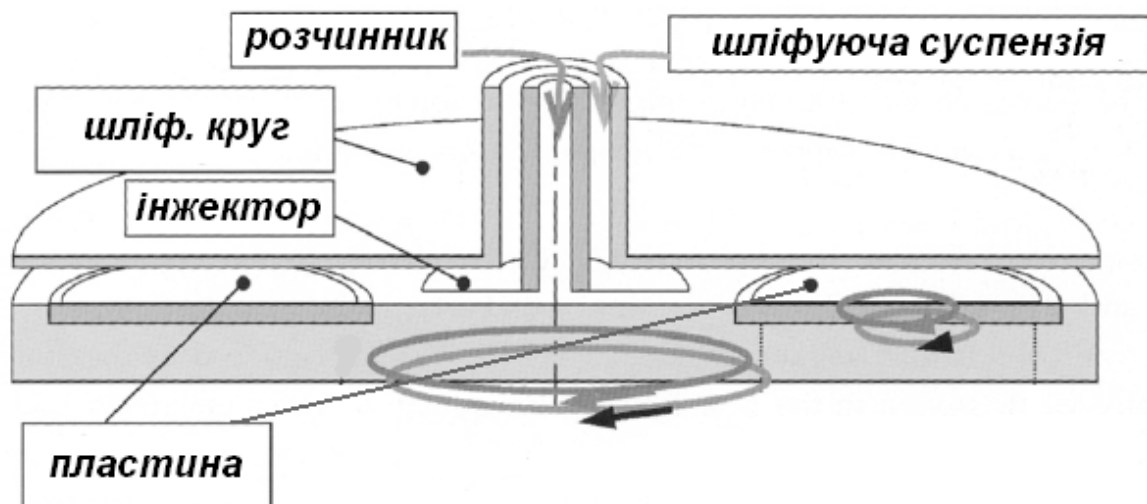


Рис.7.12. Схема роботи шліфувального та полірувального столів.

Полірування пластин здійснюється шляхом мікрорізання, пластичних деформацій та згладжування мікронерівностей. Розрізняють попереднє та фінішне (тонке) полірування. При попередньому поліруванні використовують алмазні пасти та суспензії на основі абразивних порошків із розміром зерна від 3 до 1 мкм, а фінішне полірування здійснюють субмікронними порошками та пастами – м'якими поліруючими сумішами на основі окисів алюмінію, хрому, цирконію, кремнію та ін. При цьому як полірувальні круги використовують площини, обтягнуті замшею, фетром чи сукном. При фінішному поліруванні у суспензію додають луги КОН та NaOH, які розчиняють поверхню монокристалу і сприяють більш інтенсивному видаленню матеріалу пластини. У результаті полірування розмір нерівностей зменшується до 0,1 мкм, а товщина порушеного шару сягає 1 мкм.

Після завершення процесу полірування пластини відмивають від залишків абразивних матеріалів та забруднень органічного походження в органічних розчинниках, деіонізованій воді і висушують струменями гарячого повітря з метою уникнення корозії полірованої поверхні.

Таким чином, у результаті застосування вище описаних процесів механічної обробки отримується поверхня монокристалу, яка наближена за своїми параметрами (величина нерівностей, глибина порушеного шару) до необхідних, проте подальше застосування таких методів не покращує ці

показники. Наступний етап зменшення величини нерівностей та глибини порушеного шару відбувається під час застосування процесів хімічного, йонного та газового травлення поверхні [48].

Хімічне травлення базується на розчиненні поверхні відповідними реагентами (лугами, кислотами, солями) та складається з декількох етапів: дифузії реагентів до поверхні та їх адсорбції; поверхневих хімічних реакцій; десорбції продуктів реакції та дифузії їх від поверхні. В загальному швидкість травлення визначається швидкістю найповільнішого етапу. Травлення, в якому найповільнішими етапами є дифузійні, називають *поліруючим*, оскільки під час нього згладжуються нерівності та вирівнюється мікрорельєф поверхні. Швидкість такого травлення суттєво залежить від в'язкості травника та його перемішування і майже не залежить від температури. На противагу поліруючому, травлення при якому найповільнішими є поверхневі реакції, називається *селективним*. Під час такого травлення нерівності та дефекти збільшуються у своїх розмірах настільки, що дозволяють спостерігати їх в оптичному мікроскопі. Більшість селективних травників є також анізотропними, тобто володіють різною швидкістю травлення у різних кристалографічних напрямках. Поліруюче травлення застосовується для завершального доведення параметрів величини нерівностей та глибини порушеного шару до необхідного рівня у заданому технологічному процесі. Селективне травлення використовується для оцінки якості партій пластин (оцінки виду та кількості дефектів, їх орієнтації).

Газове травлення, як правило, суміщається з наступними технологічними етапами – напиленням, епітаксією, окисленням – та забезпечує видалення з поверхні практично всіх забруднень разом з верхнім шаром монокристалу, що також покращує його якість. Як травники використовуються галогени (F_2 , Cl_2 , Br_2), галогеноводні (HF , HCl , HBr , HI) та сполуки сірки (H_2S , SF_6), які у невеликій кількості (1-5 %) додають до газу-носія (H_2 , He , Ar), а процес травлення відбувається при температурах 800-1200 °C.

Йонне травлення – це видалення шарів матеріалу разом із забрудненнями шляхом бомбардування його поверхні потоком

високоенергетичних йонів. Залежно від методу генерування йонів та конструкції установок розрізняють йонно-плазмове та йонно-променеве травлення. У першому випадку тримач з кристалами, на які подано негативний потенціал, поміщений у газовий розряд. Позитивно заряджені йони бомбардують монокристалічну поверхню і очищають її. У другому випадку монокристали розміщують поза зоною плазми і бомбардують йонами, що створюються окремим (керованим) джерелом йонів. Потік йонів фокусується та керується електричними та магнітними полями. Як травники використовуються тетрафторид вуглецю CF_4 , який потоком електронів розкладається на йони фтору F^- та радикали CF_3^+ , CF^{3+} , що здатні очищувати широку гамму матеріалів.

7.1.5. Літографічні процеси

Будь який електронний прилад є просторово неоднорідною структурою, одні частини якої володіють іншими, стосовно сусідніх областей, фізичними властивостями, що дозволяє йому виконувати свої функції. Найпростішим прикладом такої неоднорідної структури є *p-n*-перехід, який є поєднанням двох областей з одного матеріалу (гомоперехід), які леговані різними домішками або областей з різних матеріалів (гетероперехід), що леговані різними домішками. Для забезпечення набуття відповідними областями необхідних властивостей під час неперервного технологічного процесу, слід на певних етапах цього процесу окремі ділянки відкривати (або навпаки – закривати) для того чи іншого впливу. Процес формування на поверхні електронних приладів рельєфу, що в майбутньому відповідатиме різним частинам приладу, називається *літографією*. Цей процес базується на використанні високомолекулярних органічних сполук, що здатні змінювати свої властивості під впливом різноманітних видів опромінення. Такі сполуки називають резистами і в залежності від виду випромінювання (світло, *X*-промені, потік електронів) розрізняють фоторезисти, рентгенорезисти та електронорезисти. Відповідно процеси отримали назву фотолітографії, рентгенолітографії та електронолітографії.

На початку процесу літографії на поверхню матеріалу наносять тонкий шар (0,1-10 мкм) резисту, сушать його, а потім піддають впливу опромінення у тих місцях, де необхідно змінити його стійкість до дії проявника. Якщо резист у місцях опромінення видаляється під дією проявника (як правило, суміш кислот HF , HNO_3 , HCl), то його називають *позитивним*, а якщо у місцях опромінення залишається, то *негативним*. Після травлення, що супроводжується видаленням резисту з відповідних ділянок, здійснюється його хімічне зміцнення (задублення) у тих місцях, де він залишився. На цьому етапі на поверхні заготовки виявляються частини поверхні, які відкриті для здійснення наступних технологічних операцій (епітаксії, напилення, дифузії домішок, йонної імплантації). Після їх завершення здійснюється видалення залишків резисту, очищення поверхні і процес літографії повторюється знову з новим рисунком рельєфу для зміни властивостей приладу на нових ділянках. Цей процес повторюється циклічно до моменту нанесення останнього шару, як правило захисного, на сформований прилад.

Епітаксія – процес орієнтованого нарощення монокристалічних шарів з відтворенням кристалічної структури підкладки (рис. 7.13). Якщо нарощувані шари не відрізняються (чи незначно відрізняються) за хімічним складом від речовини підкладки, то такий процес називається *гомоепітаксією*. Процес орієнтованого нарощування монокристалічних шарів, що суттєво відрізняються за хімічним складом від речовини підкладки і не вступають з нею у хімічні реакції, називається *гетероепітаксією*. Орієнтоване нарощування епітаксійних шарів, що супроводжується їх хімічною взаємодією з матеріалом підкладки, називають *хеміепітаксією*, при цьому новоутворений шар відрізняється за хімічним складом як від речовини підкладки, так і від осаджуваної речовини, але володіє такою ж структурою, як і матеріал підкладки.

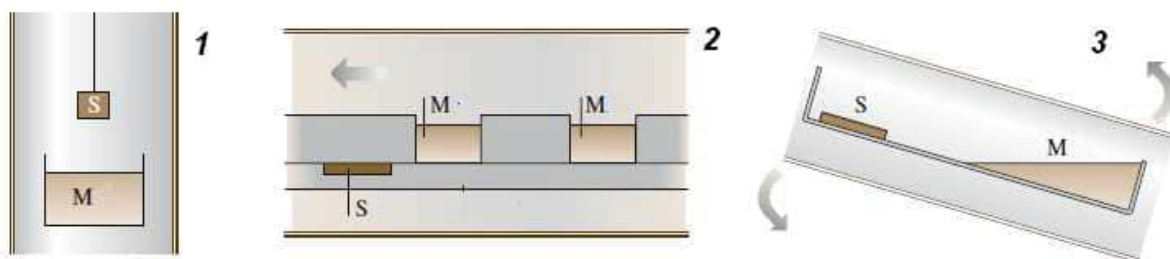


Рис. 7.13. Методи реалізації рідиннофазної епітаксії: 1 – занурення, 2 – пересування, 3 – перекидання [49].

Нанесення тонких плівок – це процес утворення шарів матеріалу, як правило немонокристалічних, шляхом осадження попередньо розпиленої у вакуумі речовини. Методи нанесення тонких плівок розрізняють за способом розпилення вихідної речовини. Найбільш поширеним серед них є процес термічного розпилення з резистивним, високочастотним, лазерним або електронним нагріванням [50]. Проте обмеженням цього способу є потенційний термічний розклад розпилюваної речовини. Для уникнення термічного впливу при розпиленні використовують катодне (електронним пучком), йонно-плазмові та магнетронні розпилення (рис. 7.14).

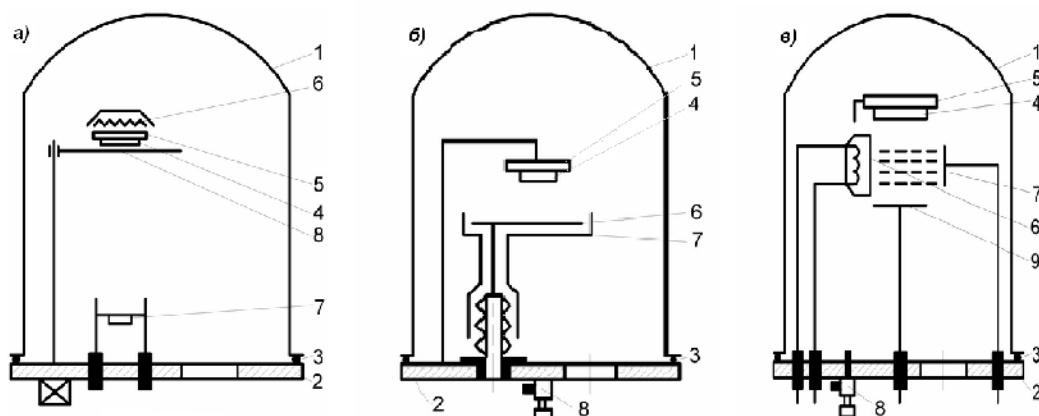


Рис. 7.14. Методи напылення тонких плівок: термічне (а), катодне (б), йонно-плазмові (в). 1 – скляний ковпак, 2 – опорна плита, 3 – прокладка, 4 – підкладка, 5 – тримач, 6а – нагрівач мішені, 7а – нагрівач джерела, 8а – заслінка, 6б – катод, 7б – екран, 8б – впускний штуцер, 6в, 7в – електроди формування плазми, 8в - впускний штуцер, 9в – керуючий електрод.

Після завершення повного циклу операцій створення структури оптоелектронних пристроїв на спільній підкладці здійснюється її розрізання на окремі пристрої. Наступним етапом є окислення поверхні та нанесення захисних покриттів, що дозволять використовувати його у властивих для нього умовах експлуатації.

7.1.6. Збирання та контроль параметрів

На завершальному етапі створення приладу сформована та функціонально готова структура розміщується у захисному корпусі. Корпуси для мікроелектронних приладів повинні задовольняти низку вимог, які забезпечують їх надійну експлуатацію. Корпус повинен мати достатню механічну міцність, щоб витримувати навантаження, які виникають під час складання та у процесі експлуатації. Потрібно, щоб він мав якомога менші розміри та форму, яка б дозволяла виконувати компактне збирання. Конструкція корпусу повинна дозволяти легко та надійно виконувати електричні з'єднання між кристалом або платою мікросхеми та зовнішніми виводами. Паразитні індуктивності та ємності, незважаючи на високу густину провідників у корпусі, повинні бути мінімальними, електропровідні елементи у корпусі надійно ізолюваними один від одного. Тепловий опір між мікросхемою та навколишнім середовищем повинен мати мінімально можливе значення. Корпус інтегральної мікросхеми має бути герметичним. Внутрішнє середовище у корпусі не повинне позначитися на її робочих характеристиках та надійності. Корпус повинен захищати пристрій чи мікросхему від зовнішнього впливу і мати вікна для вводу чи виводу зовнішнього випромінювання [51]. Найбільш поширеними є плоский метало-скляний або керамічний модифікований варіант транзисторного корпусу типу ТО та пластмасовий корпус (рис. 7.15, 7.16). Для гібридних мікросхем застосовують частіше метало-скляний квадратний або прямокутний та пенальний корпуси.

Виготовлені прилади у цілому характеризуються таким показником, як якість. Він представляє собою сукупність властивостей виготовленої продукції, які визначають її придатність задовольняти певні потреби відповідно до призначення. Властивості продукції поділяються на прості й складні. Існує низка методів оцінки якості виробу єдиним комплексним показником, наприклад, коефіцієнтом якості (максимальний коефіцієнт умовно приймається рівним одиниці) [52].

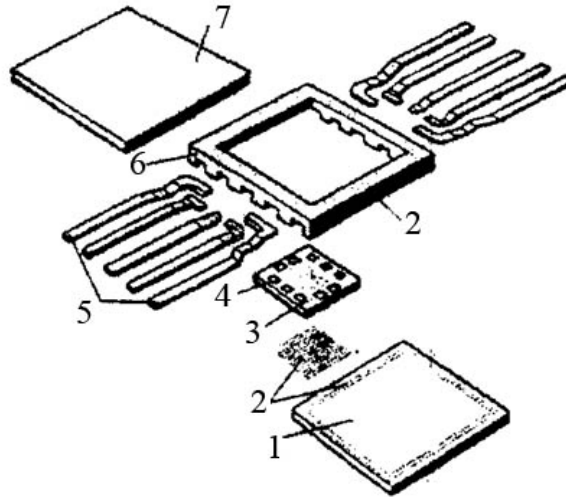


Рис. 7.15. Деталі плоского керамічного корпусу: 1 – керамічна основа; 2 – скляна підкладка; 3 – кристал мікросхеми; 4 – контактні площадки; 5 – металеві виводи; 6 – рамка; 7 – керамічна кришка.

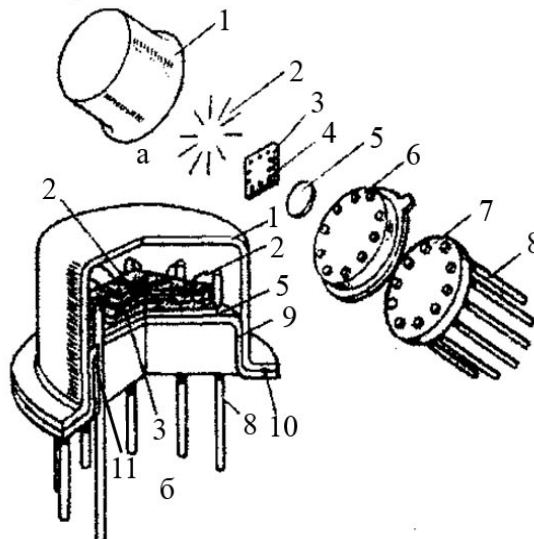


Рис. 7.16. Деталі корпусу типу ТО: 1 – балон; 2 – з'єднувальні провідники із золотого дроту; 3 – кристал мікросхеми; 4 – контактні площадки; 5 – припій; 6 – ковпачок; 7 – скло; 8 – виводи; 9 – місце з'єднання скла з металевим ковпачком; 10 – з'єднувальні фланці; 11 – місце з'єднання виводів зі склом.

Кількісна оцінка якості виробу визначається комплексним показником

Q :

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n m_i q_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

де m_i – ваговий коефіцієнт кожної групи, q_i – групові показники якості, n – кількість груп. Групи показників визначаються за призначенням, надійністю,

рівнем стандартизації й уніфікації, технологічністю, браком, споживчими властивостями, особливостями транспортування, кліматичними умовами й т.д.). Зокрема, показниками за призначенням є споживана потужність, номінальний струм, а показниками за технологічністю є відсоток виходу придатних до експлуатації виробів у заданій партії. В цілому контроль процесу виробництва електронних виробів ґрунтується на вибірковому методі, при якому про характеристики генеральної сукупності роблять висновки за відібраною, так званою вибірковою, сукупністю. Вибірку проводять повторним або безповторним, дискретним (груповим) або періодичним, випадковим або розшарованим методами і на основі отриманих результатів дають кінцеву оцінку виробу.

7.2. Лабораторна робота 7.1

Вирощування монокристалів

Мета: ознайомитися з основними принципами та умовами вирощування монокристалів, вивчити сучасні методи та ознайомитися з технікою вирощування монокристалів. Отримати з водного розчину монокристали KN_2PO_4 .

Прилади і матеріали: установка вирощування монокристалів з водного розчину, хімічні реактиви.

Щоб виростити монокристал із речовини, яка перебуває в будь-якому агрегатному стані, необхідно створити певні умови:

- перевести систему у метастабільний стан;
- використати зародок (кристал - затравка);
- забезпечити спрямоване тепловідведення із системи, що кристалізується.

Метастабільний стан – це відносно стійкий стан пересичених розчинів, переохолоджених розплавів і т. п., що перестає бути стійким, коли в систему вводиться затравка – кристалик не менше певного критичного розміру. Поряд із внесенням затравки у деяких методах вирощування кристалів застосовується спосіб створення зародка у капілярному кінці ампули. Проте у будь-якому випадку ріст кристалу починається із затравки. На затравці відбувається кристалізація речовини, за умови забезпечення постійного відведення тепла. Загальною й основною вимогою, яка повинна виконуватися при використанні будь-якого методу вирощування монокристалів, є створення умов для росту лише одного зародка.

Вирощування монокристалів з газової фази застосовується, головним чином, для одержання епітаксійних плівок і ниткоподібних кристалів. Методи сублімації, тобто кристалізація речовини із власної пари, зручні для тих речовин, які легко сублімуються, не переходячи в рідку фазу (нафталін, фосфор, карбід кремнію). Ріст монокристалів відбувається в закритій посудині (запаяній скляній або кварцевій трубці), в якій є дві температурні області: в

одній температура вище температури сублімації, в інший – значно нижче; у першій вихідна речовина випаровується, у другий – росте на стінках посудини або на затравці. При кристалізації з газової фази часто використовуються хімічні транспортні реакції, які дозволяють здійснювати кристалізацію при температурах, значно менших, ніж температура сублімації.

Ріст кристалів із розчинів базується на дифузії атомів (йонів) розчиненої речовини з перенасиченого розчину до вирощуваного кристалу. Перенасичення утворюється різноманітними способами: за рахунок збільшення концентрації розчиненої речовини при випарюванні розчинника, зниження температури розчину і росту концентрації розчину за рахунок зменшення розчинності речовини при зниженні температури, утворення температурного перепаду тощо.

Вирощування монокристалів з розплавів здійснюється тільки тоді, коли поблизу поверхні кристалу підтримується постійний градієнт температури, що передбачає наявність у кристалізаційній установці нагрівача і холодильника. Інакше кажучи, після виникнення зародка швидкість росту кристала визначається лише швидкістю відведення теплоти кристалізації від поверхні розділу між твердою фазою і розплавом. Це відведення реалізується шляхом зміни температури розплаву при нерухомій затравці або переміщенням кристалу в полі температурного градієнта.

Серед матеріалів, які використовуються в оптоелектроніці, є низка водорозчинних сполук, зокрема електрооптичні монокристали KH_2PO_4 (KDP), $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP), сегнетоелектрики та сегнетоеластики A_2BX_4 ($\text{A} = \text{NH}_4$, $\text{N}(\text{CH}_3)_4$ та інші алкіл-амонієві групи; $\text{B} = \text{Mn}$, Zn , Co та інші перехідні метали; $\text{X} = \text{Cl}$, Br , I). Ці монокристали вирощуються різними методами з водного або спиртового розчинів.

Для будь-якого методу вирощування монокристалів з водного розчину першим етапом є приготування насиченого розчину вихідної речовини.

У загальному випадку з підвищенням температури розчинність збільшується, а зі зниженням температури – зменшується. За відсутності центрів кристалізації при охолодженні розчин стає перенасиченим. З появою

центрів кристалізації надлишок речовини виділяється з розчину і в розчині залишається та кількість речовини, яка відповідає коефіцієнту розчинності при заданій температурі. Надлишок речовини з розчину виділяється у вигляді кристалів; кількість кристалів тим більша, чим більше центрів кристалізації в розчині. Центрами кристалізації можуть слугувати як забруднення на стінках посудини з розчином, порошинки, так і дрібні кристалики, попередньо внесені в ролі затравки.

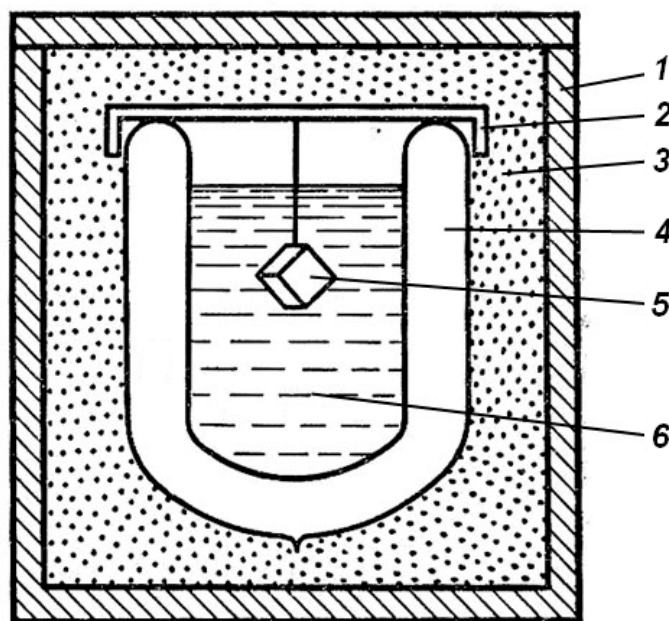


Рис. 7.17. Схема вирощування кристалів із розчину методом охолодження: 1 – контейнер, 2 – кришка, 3 – наповнювач, 4 – посудина Д'юара, 5 – кристал; 6 – розчин.

Якщо для вирощування підготовлений великий затравочний кристал 5, то його вносять у трохи підігрітий розчин 6 (рис. 7.17). Якщо розчин при кімнатній температурі був насиченим, то при температурі на декілька градусів вище кімнатної він стане ненасиченим. При внесенні кристалу-затравки в такий розчин кристал почне розчинятись в ньому і при цьому втратить верхні дефектні та забруднені шари. Це приведе до підвищення якості майбутнього кристалу. Коли температура знизиться до кімнатної, розчин знову стане насиченим і розчинення затравки припиниться. Якщо посудину з розчином термостабілізувати, то через деякий час розчин стане перенасиченим і

розпочнеться ріст кристалу, який триватиме від деількох діб до декількох тижнів.

Хід роботи

1. Ретельно вимийте посуд, що використовуватиметься для приготування розчину.
2. Налийте в склянку теплої (40-50°C) дистильованої води. Насипте вихідні солі у стехіометричних пропорціях у воду та повністю розчиніть їх. Профільтруйте одержаний розчин в іншу склянку.
3. Опустіть попередньо підготовлену затравку в розчин. Момент опускання затравки слід вибирати так, щоб розчин був близький до насичення. Якщо розчин буде ненасиченим, то затравка почне розчинятись і може зникнути. З огляду на це заздалегідь готують декілька затравок.
4. Помістіть склянку з розчином та затравкою у термостат.
5. Через певний час (визначається особливостями вирощування заданого кристалу) витягніть кристал з розчину, ретельно обсушіть його паперовою серветкою і, не торкаючись руками, покладіть у підготовлену коробку.
6. У звіті опишіть усі процеси та зробіть відповідні висновки.

7.3. Лабораторна робота 7.2

Вакуумні методи нанесення тонких плівок

Мета: ознайомитися з вакуумними методами осадження тонких плівок.

Одержати тонкі плівки металів методами термічного та електронно-променевого розпилення у вакуумі.

Прилади і матеріали: установка вакуумна ВУП-5М, наважки чистих металів.

Одержання тонких шарів твердої фази певної речовини на поверхні підкладки під час фізичної конденсації здійснюється за допомогою пучків матеріальних частинок у вакуумі. Основні процеси, які відбуваються, це створення молекулярного потоку джерела та конденсація його на поверхні. За способом переходу речовини в газоподібний стан процес, що відбувається під час нанесення речовини, поділяється на термовакuumне, катодне та магнетронне розпилення.

Термічне випаровування з подальшою конденсацією з молекулярних пучків у вакуумі дає змогу одержувати плівки різних речовин. Ступінь забруднення контролюється тиском у камері залишкових газів. Термічним випаровуванням доцільно одержувати лише плівки порівняно простих за хімічним складом речовин. Високий ступінь термічної дисоціації або різні значення парціальних тисків окремих компонентів складних сполук значно ускладнюють відтворення в плівках хімічного складу таких сполук. Катодним та іонно-плазмовим розпиленням осаджують плівки тугоплавких і складних за хімічним складом матеріалів, однорідних на великій площі. Однак під час катодного розпилення відбувається реакція осаджуваної речовини із залишковими газами у камері, що значно погіршує відтворюваність основних властивостей плівок. Важливою перевагою методу магнетронного розпилення є відсутність бомбардування підкладки високоенергетичними вторинними електронами через їх захоплення магнітною пасткою. Це дозволяє уникнути перегрівання поверхні підкладки і дає можливість осаджувати плівки на матеріали з низькою термостійкістю. Цей факт має велике значення для

сучасних технологій, зважаючи на широке використання полімерів і композитних матеріалів.

Напилення тонкоплівкових покриттів здійснюється за допомогою вакуумного універсального поста (ВУП-5) (рис. 7.18). Функціонально він поєднує у собі вакуумну та електричну частини.



Рис. 7.18. Загальний вигляд ВУП-5.

Вакуумна система складається з послідовно з'єднаних роторного (форвакуумного), паромасляного (високого вакууму) насосів, водяної та азотної пасток, які дозволяють досягнути тиску залишкових газів 10^{-4} Па.

Електрична частина складається з високовольтного і низьковольтного джерел живлення, за допомогою яких нагріваються та випаровуються речовини і здійснюється іонізація робочого газу. Високовольтне джерело необхідне також для випаровування матеріалів і очищення підкладок шляхом електронного бомбардування.

Робоча камера виконана у вигляді циліндричного ковпака з нержавіючої сталі з оглядовими вікнами, краном для напускання повітря і термпарним та іонізаційним манометрами для вимірювання тиску (рис. 7.19). Цей ковпак встановлюється на базовій плиті. Усередині робочої камери 5 розташовані нагрівачі для знегажування, випарник для нагрівання 7 напилюваних речовин 6, трафарет (маска), що забезпечує задану конфігурацію тонкоплівкового шару, і

підкладка 1 з нагрівачем 2, на якій конденсується випаровувана речовина. Між випарювальником і маскою розміщена заслінка 4, яка дозволяє припиняти процес напилення як тільки товщина напилюваної плівки досягне необхідного значення.

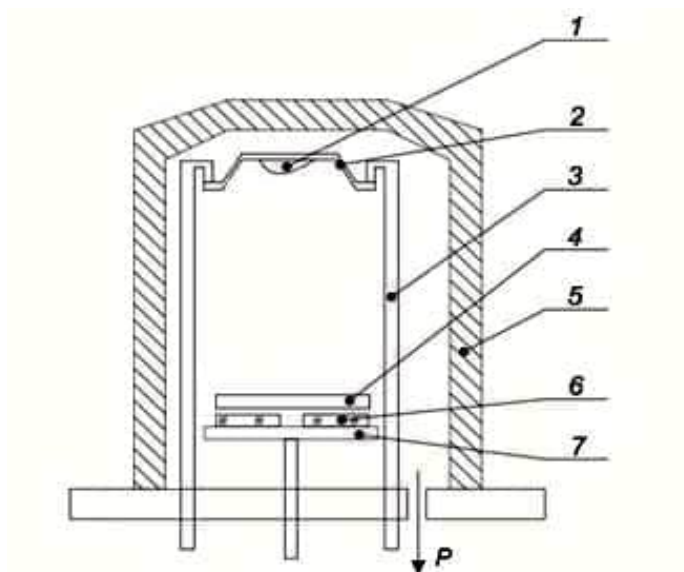


Рис. 7.19. Робоча камера ВУП-5.

Під час бомбардування електронним пучком поверхні матеріалу, що випаровується, значна частина кінетичної енергії електронів перетворюється на тепло, і поверхня нагрівається до такої температури, що стає джерелом пари. У потоці пари розміщують підкладку, на якій конденсується частина пари, тобто відбувається напилювання. Електронно-променеве нагрівання унаслідок високої щільності пучка забезпечує високу швидкість випаровування без наявності краплинних фракцій і дозволяє проводити нагрівання всієї поверхні випаровуваної речовини за рахунок сканування електронного пучка, що збільшує однорідність потоку пари. При електронно-променевому випаровуванні використовуються випарювальники потужністю від 2 до 15 кВт. Прискорююча напруга, що підводиться до електронного прожектора випарювальника, зазвичай не перевищує 10 кВ. Електронно-променеве випаровування металів з водоохолоджувальних тиглів дозволяє отримувати покриття високої чистоти, оскільки майже повністю виключаються реакції випаровуваного матеріалу з матеріалом тигля, а сам матеріал тигля і продукти

реакції практично не випаровуються. Для отримання покриттів високої чистоти використовується також безтигельне електронно-променеве випаровування.

Під час нанесення діелектричних матеріалів виникає проблема, пов'язана із низькою їх провідністю. Поверхневий заряд на них викликає мікропробої та руйнування суцільності. Потенціал на поверхні таких плівок може зростати до значень, близьких до прискорювальної напруги. З метою нейтралізації або знімання заряду в установках передбачається розігрівання підкладок, застосовуються пристрої для видалення заряду.

Хід роботи

1. Визначити масу випаровуваного металу і помістити його у тигель.
2. Встановити підкладки у тримачі та закрити ковпак камери.
3. Провести відкачування вакуумної камери.
4. Увімкнути кварцеву лампу і провести нагрівання підкладок.
5. Провести очищення підкладок в плазмі тліючого розряду.
6. Встановити заслінку для пари в положення, в якому пари випаровуваної речовини не потрапляють на підкладку.
7. Подати високу напругу на катод газорозрядної пушки.
8. Регулятором встановити робочий струм розряду гармати і протягом однієї хвилини проводити випаровування на заслінку.
9. Відкрити заслінку і впродовж п'яти хвилин проводити випаровування на підкладку.
10. Закрити заслінку і відімкнути високу напругу.
11. Напустити повітря, розкрити камеру і витягнути підкладки.
12. Визначити опір підкладки резистивним методом та товщину оптичним методом.

7.4. Тестові завдання та контрольні питання

№ 7.1

Матеріали з яким ступенем впорядкування кристалічної структури використовують для виготовлення напівпровідникових лазерів?

- аморфні;
- полікристалічні;
- дрібнокристалічні;
- + монокристалічні.

№ 7.2

Який метод вирощування кристалів дозволяє отримати монокристал без використання монокристалічної затравки?

- метод Чохральського;
- метод безтигельної зонної плавки;
- + метод Стокбаргера-Бріджмена;
- метод кристалізації з газової фази.

№ 7.3

Який метод розрізання монокристалів дозволяє отримати найменшу товщину розпилювання?

- різання стрічковими пилами;
- різання струнами;
- різання диском із зовнішньою ріжучою кромкою;
- + різання диском із внутрішньою ріжучою кромкою.

№ 7.4

Епітаксія – це процес ...

- створення аморфних шарів на аморфних підкладках;
- створення монокристалічних шарів на аморфних підкладках;
- створення аморфних шарів на монокристалічних підкладках;

+ створення монокристалічних шарів на монокристалічних підкладках.

№ 7.5

Який метод орієнтування монокристалів не передбачає використання X -випромінювання?

- метод Лауе;
- + метод фігур травлення;
- метод рентгенодифракційного орієнтування;
- + метод коноскопичних картин.

№ 7.6

Який із методів очищення поверхні здійснюється у вакуумі?

- хімічне травлення;
- газове травлення;
- + йонне травлення;
- промивання.

№ 7.7

Яке із позначень вказує на кількість атомів домішки на 10^9 атомів основної речовини?

- ‰ ;
- *ppm* ;
- + *ppb* ;
- *ppt* .

№ 7.8

Резист, який у місцях опромінення видаляється під дією проявника, називається ...

- негативним;
- + позитивним;
- нейтральним;

- пасивним.

9. Який максимальний діаметр монокристалів кремнію вдається виготовляти у промислових установках методом Чохральського:

- 100 мм;
- 200 мм;
- 300 мм;
- + 400 мм?

10. Опишіть методи фізичної та хімічної обробки поверхні кристала.

11. Зробіть порівняльний аналіз методів вирощування монокристалів із власних розплавів.

12. Особливості вирощування монокристалів із власних розчинів.

13. Що таке літографія, з якою метою її використовують? Перелічіть її види.

14. Опишіть методи нанесення тонких плівок. Які особливості кожного з них?

Література

1. *Войтович І. Д.* Інтелектуальні сенсори / І. Д. Войтович, В. М. Корсунський. – К. : Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова, 2007. – 513 с.
2. *Готра З. Ю.* Технологія електронної техніки / З. Ю. Готра. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2010. – Т. 2. – 884 с.
3. *Гриценко М. І.* Фізика рідких кристалів / М. І. Гриценко. – К. : Академія, 2012. – 272 с.
4. *Гусєв І. В.* Фізичні методи дослідження матеріалів. Дифракційні методи дослідження структури матеріалів : навчальний посібник / І. В. Гусєв, М. Б. Груданов. – К. : ІЗМН, 1996. – 108 с.
5. *Опанасюк Н. М.* Технологічні основи електроніки (практикуми) : навчальний посібник / Н. М. Опанасюк, Л. В. Одноворець, А. О. Степаненко, С. І. Проценко. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 105 с.
6. *Тонкошкур О. С.* Контроль якості та надійності мікроелектронних виробів. Практикум : навчальний посібник / О. С. Тонкошкур, В. У. Ігнаткін. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2014. – 128 с.
7. *Аксененко М. Д.* Приемники оптического излучения : справочник / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.
8. *Вартанян С. П.* Оптоэлектронные приборы и устройства в полиграфии : учебное пособие / С. П. Вартанян – М. : МГУП, 2000. – 187 с.
9. *Вельтмандер П. В.* Машинная графика. Книга 1. Вводный курс / П. В. Вельтмандер. – Новосибирск : НГТУ, 1997. – 102 с.
10. *Вигдорович Е. Н.* Физические основы, конструкция и технология оптоэлектронных устройств: учебное пособие / Е. Н. Вигдорович. – М. : МГУПИ, 2011. – 205 с.
11. *Девярых Г. Г.* Введение в теорию глубокой очистки веществ / Г. Г. Девярых, Ю. Е. Еллиев. – М. : Химия, 1981 – 278 с.
12. *Ермаков О. Н.* Прикладная оптоэлектроника / О. Н. Ермаков. – М. : Техносфера, 2004. – 416 с.
13. *Карих Е. Д.* Оптоэлектроника / Е. Д. Карих. – Мн. : БГУ, 2000. – 263 с.

14. *Коган Л. М.* Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
15. *Козырь И. Я.* Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники : в 10 книгах. - Книга 1. Общая технология / И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов, Ю. С. Чернозубов, А. С. Пономарев. – М. : Высшая школа, 1989. – 223 с.
16. *Никифорова-Денисова С. Н.* Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники : в 10 книгах. - Книга 4. Механическая и химическая обработка / С. Н. Никифорова-Денисова. – М. : Высшая школа, 1989. – 95 с.
17. *Носов Ю. Р.* Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – М. : Радио и связь, 1989. – 360 с.
18. *Пасынков В. В.* Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин, А. Д. Шинков. – М. : Высшая школа, 1981. – 431 с.
19. *Пономаренко В. И.* Информатика. Технические средства : учебное пособие / В. И. Пономаренко, Е. Е. Лапшева. – Саратов : Научная книга, 2009. – 212 с.
20. *Порфирьев Л. Ф.* Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах / Л. Ф. Порфирьев. – Л. : Машиностроение, 1989. – 387 с.
21. *Пресс Ф. П.* Фоточувствительные приборы с зарядовой связью / Ф. П. Пресс. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
22. *Светцов В. И.* Оптическая и квантовая электроника : учебное пособие / В. И. Светцов. – Иваново : Иван. гос. хим.-техн. ун-т, 2010. – 200 с.
23. *Свечников С. В.* Элементы оптоэлектроники / С. В. Свечников. – М. : Советское радио, 1971. – 272 с.
24. *Секен К.* Приборы с переносом заряда / К. Секен, М. Томпсетт. – М. : Мир, 1978. – 534 с.
25. *Уханов Ю. И.* Оптические свойства полупроводников / Ю. И. Уханов. – М. : Наука, 1977. – 336 с.

26. *Фрайштат Д. М.* Реактивы и препараты. Хранение и перевозка / Д. М. Фрайштат. – М. : Химия, 1977. – 424 с.
27. *Якушенков Ю. Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Машиностроение, 1989. – 360 с.
28. *Berger J. L.* A Line Transfer Color Image Sensor with 576×462 Pixels / J. L. Berger, J. Brissot, Y. Cazaux, P. Descure // Int. Solid-State Circuits Conf., Feb. 1984. – P. 28–29.
29. *Brice J. C.* Crystal Growth Processes / J. C. Brice. – London : Blackie, 1986. – 462 p.
30. *Capper P.* Narrow-Gap II–VI Compounds for Optoelectronic and Electromagnetic Applications / P. Capper, T. Tung, L. Colombo. – London : Chapman & Hall, 1997. – 567 p.
31. *Merrill R. B.* Vertical color filter detector group and array / Pat. 6632701 USA. – Publ. Oct. 2003.
32. *Rogatto W. D.* The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Vol.3 Electro-Optical Components / W. D. Rogatto, *Editor*, J. S. Accetta, D. L. Shumaker, *Executive Editors*. – SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington USA, 1993. – 666 p.
33. *Rosencher E.* Optoelectronics / E. Rosencher, B. Vinter. – Cambridge : Cambridge University Press, 2004. – 725 p.
34. *Rosencher E.* Optoelectronique / E. Rosencher, B. Vinter. – Paris : Masson, 1998. – 725 p.
35. *Sa G.F. de* Spectroscopic properties and design of highly luminescent lanthanide coordination complexes / G. F. de Sa, O. L. Malta, C. de Mello Donega, A. M. Simas, R. L. Longo, P. A. Santa-Cruz, E. F. da Silva Jr. // Coord. Chem. Rev. – 2000. – Vol. 196. – P. 165–195.
36. *Takada K.* Semiconductor Silicon / K. Takada, H. Yamagishi, H. Minami, M. Imai. – Pennington : The Electrochemical Society, 1998. – 376 p.
37. *Waynant R. W.* Electro-optics handbook. 2nd ed. / R. W. Waynant, *Editor*, M. N. Ediger, *Editor*. – New York : McGraw-Hill, 2000. – 1000 p.

38. Битва за чернила. – 2012. – [рос. мовою]. – Режим доступа : <http://www.fcenter.ru/online.shtml?articles/hardware/multimedia/28319>.
39. Денисов Б. Н. Измерение параметров полупроводниковых материалов : лабораторный практикум / Б. Н. Денисов, Е. М. Бибанина. – 2012. – [рос. мовою] – Режим доступа : www.bib.convdocs.org.
40. Жуков А. OLED – вечные дисплеи будущего. – 2010. – [рос. мовою]. – Режим доступа : www.xdrv.ru/articles/technologies/73/full.
41. Колесников С. Настоящее OLED-дисплеев. – 2008. – [рос. мовою]. – Режим доступа : www.old.ci.ru/inform_04_05/p_08.htm.
42. Лазовский Л. ПЗС: прецизионный взгляд на мир. – 2001. – [рос. мовою]. – Режим доступа : <http://scanservice.euro.ru/scanner/pzs.htm>.
43. Малинин В. В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. – 2006. – [рос. мовою]. – Режим доступа : <http://nashaucheba.ru/v31279/?cc=1>.
44. Матрица – «сердце» цифрового фотоаппарата. – 2014. – [рос. мовою]. – Режим доступа : <http://www.f-stop.com.ua/article/55.html>.
45. Милчев М. Тенденции в цифровой фотографии. Часть 3 (ПЗС-матрицы). – 2004. – [рос. мовою]. – Режим доступа : <http://www.3dnews.ru/digital/photo-matrix>.
46. Оптоэлектроника и ее основные эффекты. – 2004. – [рос. мовою]. – Режим доступа : www.foptic.narod.ru/Opto.htm.
47. Самарин О. OLED-дисплеи: от мифов к реальности. Технологии и схемотехника OLED-дисплеев, микросхемы драйверов для OLED-дисплеев. – 2008. – [рос. мовою]. – Режим доступа : www.kit-e.ru/articles/disp/2007_2_113.php.
48. Angelé J. From Lab to Fab: A Look at BiNem E-Paper Manufacturing. – 2012. – [англ. мовою]. – Режим доступа: <http://www.sidmembers.org/online/issues/2008/01/art5/art5.htm>.
49. Feenstra J. Electrowetting Displays / J. Feenstra , R. Hayes. – 2012. – [англ. мовою]. – Режим доступа : <http://www.liquavista.com>.

50. *Kozłowski M.* Qualcomm Mirasol Screen Technology – What went Wrong? – 2012. – [англ. мовою]. – Режим доступу : <http://www.goodreader.com/blog/e-paper>.
51. 1.3-megapixel CMOS active-pixel digital image sensor. – 2012. – [англ. мовою]. – Режим доступу : <http://www.micron.com>.
52. X3 technology. – 2008. – [англ. мовою]. – Режим доступу : <http://www.foveon.com>.

Предметный показчик

A		M	
active Matrix OLED	298	mirasol	319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 337, 339, 340, 341, 342, 347
B		O	
bistable Nematic	311	Organic light Emitting Diodes (OLED)	297
C		P	
Cholesteric Liquid Crystal Display (CLCD)	303	Passive Matrix OLED	297
Color Changing Media (CCM)	300	P-Ink	5, 325, 326, 327, 360, 363
E		Plasma Display Panels (PDP)	285
E-Ink	5, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 309, 310, 312, 313, 314, 319, 320, 323, 331, 338, 340, 341, 343, , 348, 349, 359, 361, 363	plasma-addressed liquid crystal (PALC)	292
eletroluminescent technology	293	R	
e-paper	316, 400	reverse emulsion electrophoretic display (REED)	331
F		S	
field emission displays	295	SiPix	5, 345, 346, 347, 348, 362, 363
I		super-twisted nematics (STN)	275
interferometric modulation (IMOD)	319	T	
L		thin-film transistor (TFT)	279
Liquavista	5, 333, 334, 338, 362, 363	twisted nematics (TN)	275
light emitting diode (LED)	13, 53, 60, 61, 63, 69		
Liquid Crystal Display (LCD)	279, 303		
Low-Temperature Polycrystalline Silicon	298		

А	
амплітудно-частотна характеристика	144
ангстрем	27
антиблумінг	191, 192, 212
атом	17, 21

Б	
бар'єр Шотткі	127

В	
виявляюча здатність	4, 146, 148
відикон	163
вольт-амперна характеристика	68, 87, 236, 237

Г	
газове травлення	379
гетероперехід	55, 93, 380
гомоперехід	74, 380
графік МКО	67, 100, 108, 261

Д	
деградація	96
детектуюча здатність	148
дзвін	93
дистиляція	365
діодні збірки	68, 69
домішка	366, 369
дробовий шум	147

Е	
еквівалентна потужність шуму	148

екстракція	395 104, 365
електрозмочування	333, 334, 336, 337, 363

електролюмінесценція	21, 53, 262
електрон-вольт	19
електронне чорнило	332
Електрохромні екрани	5, 327
епітаксія	381, 394
ефект Бриллюена	20
ефект динамічного розсіювання	274, 358

ефект Керра	20
ефект Рамана	20
ефект Фарадея	14, 20

З	
закон Малюса	14
закон Тальбота	259
зарядовий пакет	172, 173, 181, 212
змаз	181, 182
зовнішній фотоефект	14
зона провідності	19, 36

І	
індикатор	5, 12, 27, 63, 251, 252, 253, 254, 261, 264, 268, 270, 272, 278, 284, 294, 295, 353, 358
індуковане випромінювання	21, 53
інжекція	53, 54, 55, 99, 104

Й	
йонне травлення	380

К		напилення	375, 376, 381, 382, 392	396
кандела	24, 64	напруга шуму		147
квантова ефективність	59, 71, 72, 107, 108, 148	нематична фаза		272
квантовий вихід	59, 60, 61, 187, 188	О		
кінескоп	265	оптоелектроніка	3, 7, 12	
когерентність	21, 74, 77	оптоелектронна інформатика	2, 10, 11	
контрастність	258, 278, 297, 306, 320	оптопара	222, 225, 228, 232, 234, 237	
кристалізація	365, 386	оптрон	222	
Л		орієнтування	364, 372, 373, 374, 395	
лазер	74, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 88, 89, 90, 104, 105, 359	освітленість	24, 25, 172, 224	
літографія	364, 396	П		
люмен	24, 25, 136	п'єзоефект	15	
люмінесценція	21, 53, 110, 262	пігментні барвники	341	
люмінофор	293, 294	плазмова панель	255, 289	
М		полірування	378	
магнітна сепарація	365	поляризація	21	
мазер	16	постійна часу	92, 117, 127, 139, 152, 154, 157, 158	
метал – діелектрик – напівпровідник	196	потік випромінювань	24	
метод Бріджмена	367, 370	потужність випромінювання	58, 72, 73, 145, 156	
метод зонної плавки	367	пряма напруга	68, 101, 107, 229	
метод обертання монокристалу	372	Р		
метод Чохральського	367, 394	растр	285	
метода Лауе	372	резист	381	
метод БЗП	371	резонанс	92	
мода	83, 84, 85, 86	резонатор	75	
Н		ректифікація	365	
наногранули	342			

рівням Вульфа-Брега	372	фотогальванічний ефект	112, 149
рідкокристалічний стан	15, 271, 358	фотодіод	119, 120, 124, 138, 227
роздільна здатність ока	258	фотоефект	14, 18, 104, 172
розпилення	382, 390	фотоприймач	27, 111, 146, 152, 158, 169, 230, 231, 234, 238
розрізання	6, 364, 372, 377, 383, 394	фотопровідність	14
С		фоторезистор	111, 223, 238
світимість	24, 25	фототиристор	139
світло	46	фототранзистор	131, 132, 138, 227
світлова характеристика	115, 142	фоточутливий прилад із зарядовим зв'язком (ФПЗЗ)	169
світловий еквівалент шуму	143	функція видности	256, 257
світловий потік	24, 44, 69, 70, 115, 131, 147, 156, 172, 228, 237	Х	
світлодіод	13, 53, 60, 61, 63, 69, 102, 104, 151, 158, 242, 271, 297	характеристика керування	142
сила випромінювання	24	хвилеводний канал	81
сила світла	24, 68, 256	хімічне травлення	379
сканістор	166	холестеричні панелі	305
смектична фаза	273	Ч	
спонтанне випромінювання	21	червона межа	51, 113
сублімація	365	чутливість	116, 134, 136, 160, 211
суперінжекція	56	Ш	
Т		шліфування	377
твіст-ефект	275, 282	Я	
темновий опір	116	яскравість	24, 25, 62, 64, 68, 235, 256, 257, 259, 269, 289, 292, 293, 297, 327, 336, 337, 338, 350
теплове випромінювання	53		
тепловий шум	147		
тигель	367, 368, 369, 371, 393		
Ф			
фігури травлення	374		

Навчальне видання

*Корчак Юрій Михайлович, Фургала Юрій Михайлович,
Рихлюк Сергій Вікторович*

ОПТОЕЛЕКТРОННА ІНФОРМАТИКА

Навчальний посібник

Редактор *І. М. Лоїк*
Технічний редактор *С. З. Сеник*
Комп'ютерний набір *Ю. Корчак, Ю. Фургала*

Підп. до друку . . . 2016. Формат 60x84/16.
Друк на різогр. Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. арк. 16,3.
Обл. вид. арк. 26,0. Тираж 300 прим. Зам. ____ .
Видавничий центр Львівського національного університету
імені Івана Франка. 79000 Львів, вул. Дорошенка, 41.