

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Сумський державний університет

Л.В.Однорець

ОСНОВИ ОПТОЕЛЕКТРОНИКИ

Конспект лекцій

*для студентів спеціальності 6.090802 -
Електронні прилади і пристрої*



Суми - 2010

Л.В.Однорець Основи оптоелектроніки. Конспект лекцій.
- Суми: Вид-во СумДУ, 2010.- 44 с.

Конспект лекцій призначений для студентів спеціальності
«Електронні прилади і пристрої» факультету електроніки та
інформаційних технологій

© Л.В.Однорець
© Суми, 2010

ЗМІСТ

Розділ 1. Загальна характеристика галузі.....	4
1.1 Класифікація ОЕП та фізичні процеси в них.....	6
1.2 Фоторезистори.....	8
1.3 Фотодіоди.....	9
1.4 Фототранзистори.....	11
1.5 Фототиристори.....	12
1.6 Світловипромінювальні діоди.....	14
1.7 Оптипари.....	19
Розділ 2. Інтегральна оптика.....	22
2.1 Оптиелектронні інтегральні мікросхеми	22
2.2 Модель діелектричного хвилеводу	24
2.3 Оптичні відгалужувачі	27
2.4 Фотоприймальні пристрої ОЕ ІМС.....	30
2.4.1 Тонкоплівкові модулятори.....	30
2.4.2 Акустооптичні керуючі пристрої.....	32
2.4.3 Оптиелектронні запам'ятовуючі пристрої	35
2.4.4 Електрооптичні дефлектори.....	39
2.4.5 Акустичні дефлектори.....	40
2.5 Застосування структур метал – діелектрик – напівпровідник (МДН) в інтегральній оптиці.....	42
Література.....	44

Розділ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЛУЗІ

Оптоелектроніка - це галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення приладів та пристроїв, заснованих на перетворенні електричних сигналів в оптичні та навпаки.

В оптоелектроніці використовується діапазон довжин хвиль 0,2 мкм - 0,2 мм. Оптоелектронний прилад – це сукупність джерела і приймача випромінювання. Як джерело випромінювання застосовують світлодіоди на основі *GaAs*, як фотоприймачі - фотодіоди та фототранзистори на основі *Si*.

Відміною та особливістю оптоелектронних приладів (ОЕП) від інших є те, що елементи в них оптично пов'язані, але електрично ізольовані один від одного. Завдяки цьому легко забезпечується узгодженість високо- та низьковольтних і високочастотних ланцюгів.

Оптоелектроніка розвивається за двома незалежними напрямками: оптичним та електронно-оптичним. Оптичний напрям базується на ефектах взаємодії твердого тіла з електромагнітним випромінюванням (голографія, фотохімія, електрооптика). Електронно-оптичний використовує принцип фотоелектричного перетворення при внутрішньому фотоефекті з одного боку, та фотолюмінесценції - з іншого (заміна гальванічного та магнітного зв'язку на оптичний, волоконні лінії зв'язку).

На оптоелектронному принципі можуть бути створені безвакуумні аналогі електронних пристроїв і систем:

- дискретні та аналогові перетворювачі електричних сигналів (підсилювачі, генератори, ключові елементи, елементи пам'яті, логічні схеми, лінії затримки та ін.);
- перетворювачі оптичних сигналів (підсилювачі світла та зображення, плоскі екрани, які передають та відтворюють зображення);
- пристрої відтворення інформації (індикаторні екрани, цифрові табло, картинна логіка та ін.).

Основними факторами, що обумовлюють розвиток оптоелектроніки, є розроблення надчистих матеріалів, досконалої

технології нових сучасних приладів та пристроїв, підготовка висококваліфікованих кадрів.

Для виготовлення елементів оптичних мікросхем широко застосовуються напівпровідникові матеріали, резистивні та провідні метали і сплави, діелектричні з'єднання, плівкові матеріали, фоторезисти, дифузанти. На даний час номенклатура матеріалів, які використовуються в оптоелектроніці досить широка. До них належать речовини високої чистоти, чисті метали та сплави із спеціальними електрофізичними властивостями, дифузанти, різноманітні напівпровідникові з'єднання у вигляді порошків і монокристалів, монокристалічні пластини з кремнію, арсеніду і фосфіду галію, фосфіду індію, сапфір, гранат, різні допоміжні матеріали - технологічні гази, фоторезисти, абразивні порошки та ін. Найважливішими матеріалами оптоелектроніки є такі речовини, як: $GaAs$, BaF_2 , $CdTe$ (для виготовлення підкладок); структури $GaAlAs/GaAs/GaAlAs$ (електрооптичні модулятори); SiO_2 (матеріал для ізоляції), Si , $CdHgTe$, $PbSnSe$ (фотодіоди, фототранзистори, фототиристори) та ін.

ОЕП мають наступні переваги: можливість просторової модуляції світлових пучків та їх значного перетинання при відсутності гальванічних зв'язків між каналами; велике функціональне навантаження світлових пучків завдяки можливості зміни багатьох їх параметрів (амплітуди, напрямку, частоти, фази, поляризації).

1.1 Класифікація ОЕП та фізичні процеси в них

Оптоелектронні прилади - це прилади, принцип дії яких побудований на використанні електромагнітного випромінювання оптичного діапазону. До основних груп оптоелектронних приладів відносять наступні:

- джерела випромінювання (світловипромінюючі діоди і лазери);
- приймачі випромінювання (фоторезистори і фотоприймачі з р-п-переходом);
- прилади для керування випромінюванням (модулятори, дефлектори).;

- прилади для відображення інформації (індикатори);
- прилади для електричної ізоляції - оптрони;
- оптичні канали зв'язку та оптичні запам'ятовуючі пристрої;
- волоконно-оптичні лінії зв'язку;
- оптоелектронні інтегральні схеми.

Перераховані вище групи приладів здійснюють генерацію, перетворення, передачу і збереження інформації. Носіями інформації в оптоелектроніці є нейтральні в електричному розумінні частинки - фотони, які нечуттєві до впливу електричних і електромагнітних полів, не взаємодіють між собою і створюють односпрямовану передачу сигналу, що забезпечує високу перешкодозахищеність і гальванічну розв'язку вхідних і вихідних ланцюгів. Оптоелектронні прилади приймають, перетворюють і генерують випромінювання у видимій, інфрачервоній і ультрафіолетовій областях спектру.

Принцип дії оптоелектронних приладів заснований на використанні зовнішнього або внутрішнього фотоефекта. *Зовнішнім фотоефектом* називається вихід вільних електронів з поверхневого шару фотокатода в зовнішнє середовище під дією світла. *Внутрішнім фотоефектом* називається вільне переміщення всередині речовини електронів, звільнених від зв'язків в атомах під дією світла, і змінюючих його електропровідність або визиваючих появу ЕДС на границі двох речовин (р-п-переході).

ОЕП знайшли широке застосування в автоматичних контрольних і вимірювальних системах, обчислювальній техніці, фототелеграфії, звуковідтворюючій апаратурі, кінематографії, спектрофотометрії, для перетворення світлової енергії в електричну, в автоматичній для розв'язки електричних ланцюгів.

Оптрон - напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, пов'язані між собою оптичним зв'язком. У джерелі випромінювання електричні сигнали перетворюються в світлові, які діють на фотоприймач та створюють у ньому знову ж електричні сигнали. Якщо оптрон має тільки один випромінювач та один приймач випромінювання, то його називають *оптопарою* або елементарним оптроном.

Мікросхема, яка складається із однієї або декількох оптопар з додатковими пристроями для узгодження та підсилення сигналу, називається *оптоелектронною інтегральною мікросхемою*. На вході та виході оптрону завжди є електричні сигнали, а зв'язок входу і виходу відбувається завдяки світловому сигналу.

1.2 Фоторезистори

Фоторезистори - це напівпровідникові резистори, які змінюють свій опір під впливом світлового потоку (рис.1.1). У залежності від спектральної чутливості фоторезистори поділяють на дві групи: для видимої частини спектру та для інфрачервоної частини спектру. Для їх виготовлення використовують з'єднання *Cd* та *Pb*.

Позначення фоторезисторів: 1 елемент - літери, які означають тип приладу (ФС - фотоопір), 2 елемент - літера, яка означає матеріал світлочутливого елементу (А - сернистий свінець, К - сернистий кадмій, Д - селеністий кадмій), 3 елемент - цифра, яка означає тип конструктивного виконання. Літера Б перед цифрою - герметичний варіант виконання, П - плівковий матеріал, М - монокристалічний матеріал фоточутливого елементу. Літера Т - тропічний варіант, призначений для експлуатації в умовах підвищених температур та вологості.

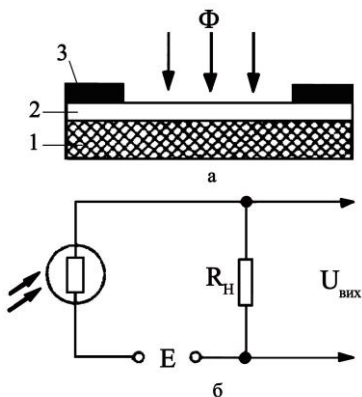


Рисунок 1.1 - Принцип будови та схема ввімкнення фоторезистора

Фоторезистори мають високу стабільність параметрів. Зміна фотоструму є достатньо точною характеристикою його стану. При подовжній експлуатації спостерігається стабілізація фотоструму, при цьому його величина може змінюватись на 20 - 30%. Фоторезистори є чутливими до швидкої зміни температур. Зберігати фоторезистори слід при температурі 5 - 35 °C та вологості не більше за 80%.

До основних параметрів фоторезисторів відносять:

1. Темновий струм (I_m) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі через 30 с після зняття освітленості 200 лк.
2. Світловий струм (I_c) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі та освітленості 200 лк від джерела світла з кольоровою температурою 2850 К.
3. Температурний коефіцієнт фотоструму ($TK I_\phi$) - зміна фотоструму при зміні температури фоторезистора на 1 °C.
4. Робоча напруга (U_ϕ) - напруга, яку можна прикласти до фоторезистора при тривалій експлуатації без зміни його параметрів більше за встановлені.
5. Темновий опір (R_m)- опір фоторезистора при температурі 20°C через 30 с після зняття освітленості 200 лк.
6. Питома чутливість (K_0) - відношення фотоструму до добутку величин світлового потоку, який падає на нього та прикладеної напруги: $K_0 = I_\phi / (\Phi U_\phi)$, де Φ - світловий потік, лм.
7. Постійна часу (τ) - час, продовж якого фотострум змінюється в e разів при його освітленні.
8. Потужність розсіювання ($P_{роз.}$) - максимально допустима потужність, яку фоторезистор може розсіювати при безперервному електричному навантажуванні та температурі навколишнього середовища, не змінюючи параметрів більше норми, яка встановлена технічними умовами.
9. Опір ізоляції (R_i).
10. Довгохвильова межа (λ).

Основними характеристиками фоторезисторів є такі:

1. Вольт-амперна ($I = f(U)$) - залежність світлового, темного або фотоструму (при $\Phi = const$) від прикладеної напруги (рис. 1.2).
2. Світлова або люкс-амперна ($I = f(E)$) - залежність фото-струму від світлового потоку, який падає або освітленості (при $U = const$).
3. Спектральна ($I = f(\lambda)$) - залежність фотоструму від довжини хвилі світлового потоку (при $U = const$).
4. Частотна ($I_{\Phi} = f(F_{\Phi})$) - залежність фотоструму від частоти модуляції світлового потоку (при $U = const$).

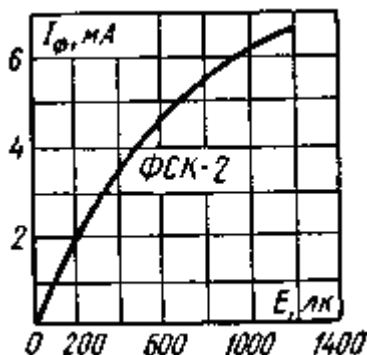


Рисунок 1.2 – Вольт – амперна характеристика фоторезистора ФСК-2

Висока інтегральна чутливість дозволяє використовувати резистори іноді без підсилювачів, а малі габарити є причинами їхнього широкого застосування. Основні недоліки фоторезисторів - їх інерційність і сильний вплив температури, що приводить до великого розкиду характеристик.

1.3 Фотодіоди

Фотодіоди - це напівпровідникові діоди, в яких використовується внутрішній фотоэффект. Світловий потік керує зворотним струмом фотодіодів. Під дією світла на електронно-

дірковий перехід відбувається генерація пар носіїв заряду, провідність діода зростає та збільшується зворотний струм. Такий режим роботи називається фотодіодним режимом (фотоперетворювальний) (Рис. 1.3). Другий тип режиму - вентильний (фотогенераторний). На відміну від вентильного для фотодіодного режиму необхідним є зовнішнє джерело живлення.

Основні параметри фотодіодів: інтегральна чутливість (~ 10 мА/лм): робоча напруга (10 - 30 В); темновий струм ($\sim 2 - 20$ мкА).

Основні характеристики фотодіодів: вольт-амперна ($I = f(U)$) - залежність світлового, темнового або фотоструму (при $\Phi = const$) від прикладеної напруги (рис. 1.4 а); енергетична ($I_\Phi = f(\Phi)$) - залежність фотоструму від світлового потоку (при $U = const$) - лінійна, мало залежить від напруги (рис.1.4б).

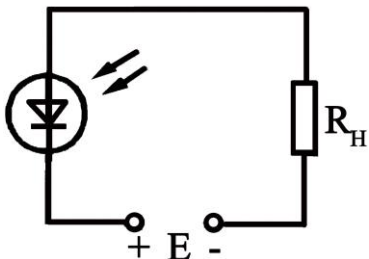


Рисунок 1.3 - Схема ввімкнення фотодіода для роботи у фотодіодному режимі

У лавинних фотодіодах відбувається лавинне розмноження носіїв в n-p-переході і за рахунок цього в десятки разів зростає чутливість. Фотодіоди з бар'єром Шотткі мають високу швидкодію. Фотодіоди з гетеропереходами працюють як генератори ЕРС. Германієві фотодіоди використовують як індикатори інфрачервоного випромінювання; кремнієві - для перетворення світлової енергії у електричну (сонячні батареї для автономного живлення різноманітної апаратури у космосі); селенові - для виготовлення фотоекспонетрів та світло-технічних вимірювань, оскільки їх спектральна характеристика є близькою до спектральної характеристики ока людини.

1.4 Фототранзистори

Фототранзистори - це напівпровідникові прилади з двома р-п-переходами, призначеними для перетворення світлового потоку в електричний струм.

Від звичайного біполярного транзистора фототранзистор конструктивно відрізняється тим, що в його корпусі передбачене прозоре вікно, через яке світло може попадати на область бази. Напруга живлення подається на емітер і колектор, його колекторний перехід виявляється закритим, а емітерний - відкритим. База залишається вільною (рис. 1.5).

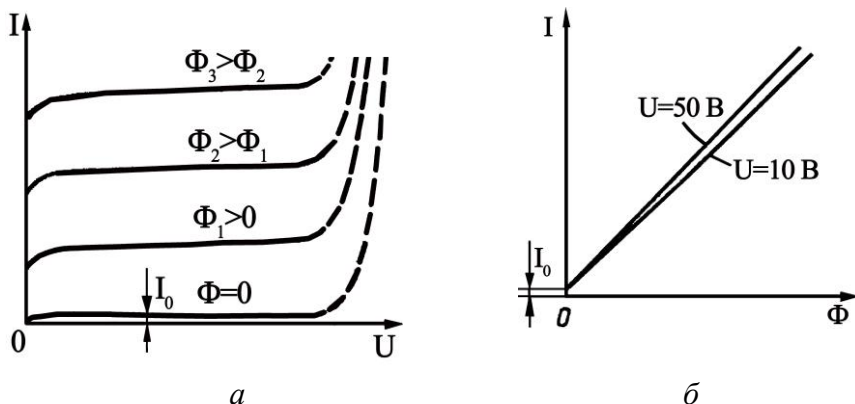


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна (а) та енергетична (б) характеристики фотодіода

При освітленні фототранзистора в його базі генеруються електрони і дірки. У колекторному переході відбувається розподіл електронно-діркових переходів, що досягли, внаслідок дифузії, межі переходу. Дірки перекидаються полем переходу в колектор, збільшуючи його власний струм, а електрони залишаються в базі, знижуючи її потенціал. Зниження потенціалу бази приводить до утворення додаткової прямої напруги на емітерному переході і підсилення інжекції дірок із емітера в базу. Інжектвані в базу

дірки, досягаючи колекторного переходу, викликають додаткове збільшення струму колектора. Навіть невелика зміна прямої напруги емітера викликає велику зміну струму колектора, тобто фототранзистор працює як підсилювач.

Струм колектора освітленого фототранзистора виявляється досить великим; відношення світлового струму до темнового сягає декількох сотень. Застосовують два варіанти ввімкнення фототранзисторів: діодне - з використанням тільки двох виводів (емітера і колектора) і транзисторне - з використанням трьох виводів, коли на вхід подають не тільки світловий, а й електричний сигнал.

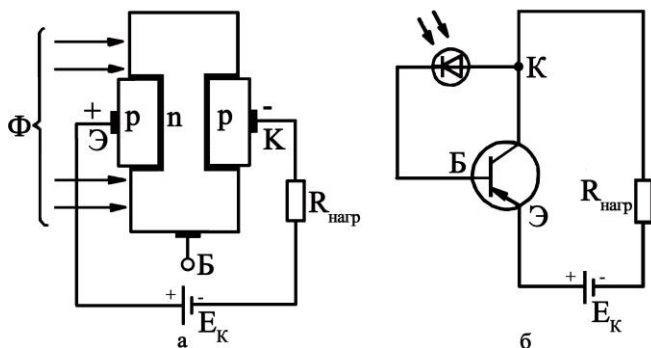


Рисунок 1.5 - Структурна схема біполярного фототранзистора з вільною базою (а) і схема ввімкнення фототранзистора (б)

В оптоелектроніці, автоматичі та телемеханіці фототранзистори використовують для тих же цілей, що і фотодіоди, але вони уступають їм за порогом чутливості і температурним діапазоном. Чутливість фототранзисторів зростає з інтенсивністю їх освітлення.

1.5 Фототиристри

Фототиристор - це напівпровідниковий прилад з чотиришаровою р-п-р-п-структурою, який сполучає у собі властивості тиристора та фотоприймача і перетворює світлову енергію в електричну.

При відсутності світлового сигналу і керуючого струму фототиристор закритий і через нього проходить тільки темновий струм. Відкривається фототиристор світловим потоком, що надходить на бази p_2 і n_1 через «вікно» в його корпусі (рис. 1.6), і створює електронно-діркові пари. Це приводить до виникнення первинних фотострумів і утворення загального фотоструму.

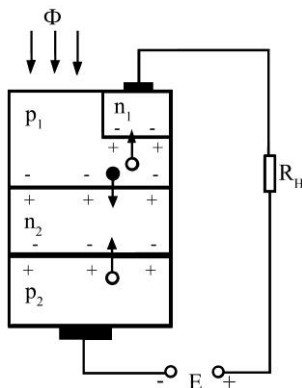


Рисунок 1.6 - Структура фото тиристора

З цього випливає, що при надходженні світло-вого потоку на бази p_2 і n_1 зростає емітерний струм і коефіцієнт передачі струму α від емітера до колектора є функцією освітленості, яка змінює струм р-n-переходів. Опір фототиристорів змінюється в межах від 0,1 Ом (у відкритому стані) до 10^8 Ом (у закритому); час переключення складає величину 10^{-5} - 10^{-6} с. Зі світлової характеристики $I_{np.} = f(\Phi)$ при $U_{np.} = const$ (рис.1.7 а) видно, що після ввімкнення фототиристора струм через нього зростає до $I_{np.} = E_{np.}/R_{нагр.}$ і більше не змінюється, тобто має два стабільних стани та може бути використаний як елемент пам'яті. Із вольт-амперної характеристики $I_{np.} = f(U_{np.})$ при $\Phi = const$ ($\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_0$) (рис.1.7 б) видно, що зі збільшенням світлового потоку напруга і час ввімкнення зменшуються (рис. 1.7 в).

Перевагами фототиристорів є: висока навантажувальна здатністю при малій потужності керуючого сигналу; можли-вість одержувати необхідний вихідний сигнал без додатко-вих каскадів

підсилення; наявність пам'яті, тобто підтримка відкритого стану після зняття керуючого сигналу; велика чутливість; висока швидкодія.

Вищевказані властивості фототиристорів дозволяють спростити схеми, вимкнувши з них підсилювачі і релейні елементи, що є дуже важливим у промисловій електроніці, наприклад у високовольтних перетворювачах. Найчастіше фототиристори використовують для комутації світловим сигналом потужних електричних сигналів.

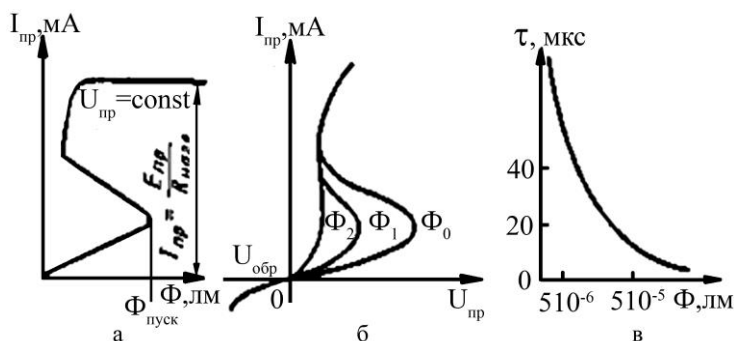


Рисунок 1.7 - Характеристики фототиристора: а - світлова, б -ВАХ, в - залежність часу від світлового потоку

1.6 Світловипромінювальні діоди

Світловипромінювальний діод (світлодіод) - це напівпровідниковий пристрій, який випромінює некогерентне світло при пропусканні через нього електричного струму (ефект, відомий як електролюмінесценція).

Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника. Світлодіоди – малоінерційні напівпровідникові джерела випромінювання, які працюють при прямій напрузі.

Матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони більше 1,7 еВ. Германій і кремній непригодні для цього,

оскільки ширина забороненої зони у них набагато менша. Для сучасних світлодіодів застосовують головним чином фосфід галія GaP та карбід кремнію SiC, а також тверді розчини - GaAlAs, GaAsP. Внесення в напівпровідник фосфору дозволяє одержувати світіння різних кольорів.

Крім світлодіодів, які дають видиме світіння, випускаються світлодіоди інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) із арсеніду галія GaAs. Їх застосовують у фотореле, різноманітних сенсорах, вони входять до складу оптронів. Існують світлодіоди змінного кольору з двома світло-випромінювальними переходами, один із яких має максимум спектральної характеристики в червоній частині спектра, а друга - в зеленій. Колір світіння такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи.

Основними параметрами світлодіодів є: яскравість - відношення сили світла до площини поверхні, яка світиться ($10 - 1000$ Кд на см^2); постійна пряма напруга ($2 - 3$ В); колір світіння та довжина хвилі, які відповідають максимальному світловому потоку; максимальний постійний прямий струм ($1 - 10$ мА); діапазон температур навколишнього середовища, при яких світлодіод може нормально працювати ($-60 - +70^\circ\text{C}$); швидкодія (10^{-8} с). Основні характеристики світлодіодів наступні: яскрава залежність яскравості від прямого струму; світлова, спектральна, вольт-амперна характеристики; діаграма напрямленості випромінювання - визначається конструкцією світлодіода, наявністю лінзи і її розташуванням. Випромінювання може бути напрямленим та розсіяним (дифузним).

Сучасні світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі від інфрачервоної до близького ультрафіолету, та навіть існують методи поширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів. На відміну від ламп розжарювання, які випромінюють світловий потік широкого спектру рівномірно на всіх напрямках класичні світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі і в певному напрямі. Світлодіод був розвинений до лазерних діодів, які працюють на тому ж принципі, але дозволяють направлене випромінювання когерентного світла.

Патент на перший світлодіод - прилад, що дає випромінювання на напівпровідниковому переході при пропусканні електричного струму, був отриманий працівниками компанії «Texas Instruments» Бобом Б'ярдом і Гарі Пітманом в 1961. Згодом світлодіоди на основі GaAs і GaP почали випускати промислово для використання як індикаторів. Перший світлодіод, який працює у видимому діапазоні був розроблений групою Ніка Холоняка в компанії «General Electric» в 1962. Еволюція світлодіодів у 1960-1970-х поступово привела до створення приладів, які мали колір від червоного до зеленого. Найбільш популярними матеріалами були GaP (червоний - зелений) та GaAsP (жовтий – високо-ефективний червоний). При цьому з'явилися багато нових сфер використання світлодіодів у калькуляторах, цифрових годинниках і тестових приладах. На початку 1980-х з появою нового матеріалу, GaAlAs (галій-алюмінієвий арсенід) почалася революція у виробництві світлодіодів. GaAlAs дозволив підвищити ефективність 10 разів, що привело до нових використань у зовнішніх знаках та надписах, зчитуванні штрих-коду, передачі даних через оптичне волокно і медичному обладнанні. Але GaAlAs працював тільки у червоній ділянці спектру (660 нм) та мав короткий час життя (більш 50% падіння ефективності після 100 000 годин роботи). Але частина цих проблем була вирішена за рахунок появи лазерних діодів у 1980-х роках. Через декілька років був розроблений новий люмінесцентний матеріал InGaAlP, який дозволив плавне підстроювання кольорів за рахунок зміни ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу. Наступним кроком у розвитку була розробка компанією «Toshiba» метода нанесення MOCVD (метал-оксидне хімічне парове нанесення, Metal Oxide Chemical Vapor Deposition), який дозволив створити більш складний пристрій з ефективністю до 90%. У той же час корпорації «Nichia» запропонувала перші блакитні світлодіоди на основі GaN (нітрид галію), InGaN (індій-галій-нітрид) та SiC (карбід кремнію). Одним з кроків також стало створення Лабораторією фундаментальних досліджень компанії NTT світлодіода, випромінюючого хвилі в ультрафіолетовій частині спектру $\lambda = 210$ нм. Випромінювання з такою короткою довжиною хвилі знайшло широке застосування в

медицині і техніці. Сучасні напрямки розвитку включають розробку органічних світлодіодів, які повинні дозволити виробництво дешевих та екологічно безпечних пристроїв, використання квантових точок, які дозволяють отримувати біле світло, та просування далі у короткохвильову область.

Як і в звичайному напівпровідниковому діоді, в світло-діоді є р-п-перехід. При пропусканні електричного струму в прямому напрямі, носії заряду - електрони і дірки рекомбінують з випромінюванням фотонів. Далеко не всі напівпровідникові матеріали ефективно випускають світло при рекомбінації. Випромінювачами світла є, як правило, прямозонні напівпровідники типу $A^{III}B^V$ (наприклад, GaAs або InP) і $A^{II}B^{VI}$ (наприклад, ZnSe або CdTe). Варіюючи склад напівпровідників, можна створювати світлодіоди різних довжин хвиль від ультрафіолета (GaN) до середнього інфрачервоного діапазону (PbS). Діоди на основі непрямозонних напівпровідників (наприклад, з Si або Ge, а також сплавів SiGe, SiC) світло практично не випромінюють. Не дивлячись на це, у зв'язку з розвиненістю кремнієвої технології, роботи із створення світлодіодів на основі кремнію активно ведуться. Останнім часом великі надії пов'язують з технологією квантових точок і фотонних кристалів.

Кожний колір має кількісно вимірювані фізичні характеристики, наприклад, спектральний склад, яскравість, насиченість, ясність. Стосовно яскравості, слід зазначити, що однаково насичені відтінки, які відносяться до одного й того ж кольору спектру, можуть відрізнятися один від одного ступінню яскравості. Наприклад, при зменшенні яскравості синій колір поступово наближається до чорного. Будь-який колір при максимальному зниженні яскравості стає чорним. Яскравість, як і інші кольорові характеристики реального забарвленого об'єкту, значно залежать від суб'єктивних причин, обумовлених психологією сприйняття. Так, наприклад синій колір при сусідстві з жовтим здається більш яскравим. Зупинимось на понятті насиченості кольору. Два відтінки одного тону можуть розрізнятися ступенем насиченості. Наприклад, при зменшенні насиченості синій колір наближується до сірого.

Таблиця 1.1 – Залежність кольору світіння світлодіодів від частоти

Колір	Діапазон довжин хвиль, нм	Діапазон частот, ТГц	Діапазон енергії фотонів, еВ
Червоний	625 - 740	480 - 405	1,68 – 1,98
Помаранчевий	590 - 625	510 - 480	1,98 – 2,10
Жовтний	565 - 590	530 - 510	2,10 - 2,19
Зелений	500 - 565	600 - 530	2,19 - 2,48
Блакитний	485 - 500	620 - 600	2,48 - 2,56
Синій	440 - 485	680 - 620	2,56 - 2,82
Фіолетовий	380 - 440	790 - 680	2,82 - 3,26

Ступінь близькості кольору до білого називають *ясністю*. Будь-який відтінок при максимальному збільшенню ясності стає білим. Конкретний хроматичний колір може бути віднесеним до певного спектрального кольору. Відтінки, схожі з одним і тим самим кольором спектру (але розрізняються, наприклад, насиченістю і яскравістю), належать до одного і того ж тону. При зміні тону, наприклад, синього кольору в червоному напрямку спектру він змінюється блакитним, в зворотньому – фіолетовим.

Світловипромінюючі діоди є основою більш складних приладів:

- лінійна світлодіодна шкала - інтегральна мікросхема, яка складається із світлодіодних структур (сегментів), кількість яких від 5 до 100, та розміщені послідовно. Такі шкали замінюють щитові вимірювальні прилади та використовуються для відображення інформації, яка постійно змінюється;
- цифро-літерний світлодіодний індикатор - інтегральна мікросхема із декількох діодних структур, які так, щоб при відповідній комбінації сегментів, які світяться, одержувалось зображення літери або цифри;
- багатоелементний блок – електронна система одержання складних зображень (до її складу входить понад 10000 світлодіодів).

1.7 Оптопары

Оптрон - напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, пов'язані між собою оптичним зв'язком. Якщо оптрон має тільки один випромінювач та один приймач випромінювання, то його називають *оптопарою* або елементарним оптроном (рис.1.8).

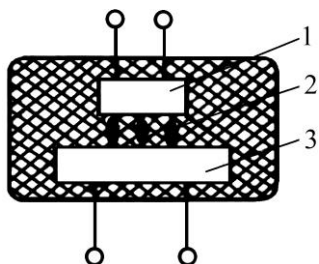


Рисунок 1.8 -Принцип будови оптопари:

- 1 - випромінювач,
- 2 - оптичний прозорий клей,
- 3 - фотоприймач

Основними перевагами оптронів є наступні: відсутність електричного зв'язку між входом та виходом та зворотного зв'язку між фотоприймачем та випромінювачем; опір ізоляції між входом та виходом може досягати 10^{14} Ом, ємність не перевищує 2 пФ; широка смуга частот коливань, які пропускаються, можливість передавання сигналів з частотою від 0 до 10^{14} Гц; можливість керування вихідними сигналами шляхом дії на оптичну частину; висока перешкодозахищеність оптичного каналу, тобто його несприйнятливості до дії зовнішніх електромагнітних полів; можливість сумісництва оптронів з іншими напівпровідниковими та мікроелектронними приладами.

До недоліків оптронів можна віднести такі: відносно велика потужність (двократне перетворення енергії), малий ККД цих перетворень; невисока температурна стабільність і радіаційна стійкість; малий ресурс роботи; високий рівень власних шумів; необхідність застосування гібридної технології замість більш зручної планарної (джерело та випромінювач виготовляються із різних матеріалів).

Оптопары класифікують на чотири групи: резисторні (фоторезистор - світлодіод); тиристорні (фототиристор -

світлодіод); транзисторні (фототранзистор - світлодіод); діодні (фотодіод - світлодіод) (рис. 1.9).

Основними параметрами і характеристиками оптопар різних типів є наступні: максимальний струм ($I_{\text{max.}}$, I_{max}) та напруга ($U_{\text{max.}}$, U_{max}) на вході і виході; вихідний опір при нормальній роботі ($R_{\text{вих.}}$); темновий вихідний опір R_T (темновий струм при відсутності вхідного струму);

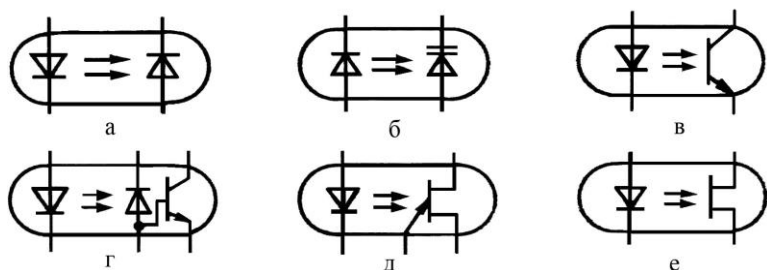


Рисунок 1.9 - Класифікація оптопар: а - діодна, б - діодна з фотодіодом, в - транзисторна, г - транзисторна зі складним транзистором, д - транзисторна з фотодіодом, е - транзисторна з одноперехідним транзистором, ж - транзисторна з польовим фототранзистором, з - тиристорна

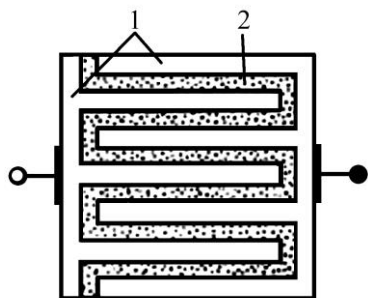


Рисунок 1.10 - Конструкція фоторезистора в резисторній оптопарі:

1 – металеві електроди;
2 – фоточутливий шар

опір ізоляції; максимальна напруга ізоляції між входом та виходом; час вимкнення та ввімкнення (~ 15 с); фотоЕРС (до $0,8$ В); коефіцієнт передачі струму - відношення вихідного струму до вхідного ($k=0,1 - 1\%$); вхідна вольт-амперна і передаточна характеристики (залежність вихідного опору від вхідного струму).

Джерелом випромінювання в резисторній оптопарі виступає світлодіод, надмінятна лампа накаливання або електролюмінесцентний конденсатор. Приймачем – фоторезистор (рис.1.10) із селеніду кадмію ($CdSe$) для видимого випромінювання, із селеніду або сульфїду свинця ($PbSe$, PbS) - для інфрачервоного. Резисторна оптопара (рис.1.11) може працювати як при постійному, так і при змінному струмі при добрій узгодженості джерела випромінювання і фоторезистора за спектральними характеристиками.

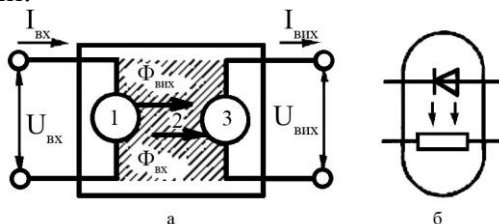


Рисунок 1.11 - Структура (а) і умовне графічне позначення (б) резисторної оптопари

Резисторні оптопари застосовують для автоматичного регулювання підсилення, керування безконтактними подільниками напруги, модуляції сигналів, формування різноманітних сигналів. Промисловість також випускає резисторні оптопари, які призначені для комутації сигналу розміщують декілька фоторезисторів. Приймачем випромінювання тиристорної оптопари є кремнієвий фототиристор. Діодні і транзисторні оптопари застосовують в комутаторних схемах, пристроях зв'язку датчиків з вимірювальними блоками та реле. Основні сфери використання тиристорних оптопар: схеми для формування потужних імпульсів, керування потужними тиристорами, керування та комутації різноманітних пристроїв з потужними навантаженнями; діодних оптопар - імпульсні трансформатори, які не мають обмоток, передача сигналів між блоками складаної радіоелектронної апаратури, керування роботою різноманітних мікросхем на МДН-транзисторах, у яких вхідний струм дуже малий. Приймачем випромінювання транзисторної оптопари є кремнієвий біполярний фототранзистор n - p - n - типу.

Розділ 2. ІНТЕГРАЛЬНА ОПТИКА

2.1 Оптоелектронні інтегральні мікросхеми

«Інтегральна оптика» - це сучасна назва нового напрямку електронної оптики, який започаткував у 1969р. Міллер С.Е. Інтегральна оптика розглядає явища, пов'язані з розповсюдженням світла в тонких плівках і є логічним продовженням НВЧ-техніки, переносючи її принципи в оптичний діапазон електромагнітних хвиль від 0,1 до 10 мкм. У зв'язку з цим елементи інтегральної оптики по аналогії почали називати оптоелектронними інтегральними мікросхемами.

Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що задача каналізації світлової хвилі може бути розв'язана на базі плоских діелектричних хвилеводів, які являють собою тонкоплівковий аналог волоконно-оптичних світловодів. Розвиток інтегральної оптики обумовлений необхідністю усунути невідповідність між генерованими оптичними пучками з високим ступенем просторової і часової когерентності. Їх малою дифракційною розходимістю, високою концентрацією потужності і великогабаритними оптичними елементами для обробки світлових потоків. Перехід від «відкритої» оптики до діелектричних хвилеводів відкриває перспективи усунення цієї невідповідності.

Певним стимулом для розвитку техніки плівкових діелектричних світловодів є розширення можливості функціональної інтеграції, коли кремнієві ВІС доповнюються елементами оптичного зв'язання. Це дозволяє створювати схеми з перестроюваною логікою, структури постійних запам'ятовуючих пристроїв (ЗП) з оптичним перепрограмуванням та інших елементів однорідних середовищ електронно-обчислювальних машин. Крім того, перехід від дискретних об'ємних оптичних елементів до їх двовірних поверхневих аналогів відкриває перед оптоелектронікою і оптикою можливості повного використання тих переваг, які має планарна технологія.

Таким чином, інтегральна оптика являє собою розділ оптоелектроніки, що визначається комплексом фізичних,

технологічних, схемотехнічних концепцій, методів і засобів, які дозволяють здійснювати направлене поширення і перетворення електромагнітних хвиль оптичного діапазону в оптичних інтегральних схемах, які базуються на комбінації плоских діелектричних хвилеводів і інших тонко плівкових оптичних і оптоелектронних елементів.

Оптоелектронна інтегральна мікросхема (ОЕ ІМС) – це мікросхема, яка має оптичний зв'язок між окремими вузлами і компонентами, та. складається із оптопар і пристроїв для обробки сигналів, що одержують від фотоприймача. Особливістю ОЕІМС є однонапрямлена передача сигналу та відсутність зворотного зв'язку.

ОЕІМС розміщується на невеликій кристалічній пластинці - «чіпі», на який наносять плівку. Одні плівки служать пасивними переносниками енергії, інші активними – здатними самостійно генерувати світло, модулювати і детектувати його. Функції пасивного елемента виконує хвилевід, який перетворює об'ємну просторову хвилю в поверхневу і передає її подібно тому, як електричні дроти переносять струм. Хвилевід складається із підкладки, плівки і покриття, роль якого за часту відіграє повітря. Така конструкція проявляє хвилеводні властивості, коли показник заломлення плівки n_n переважає показник заломлення підкладки n_1 і покриття n_2 .

Розглянемо розповсюдження світла в хвилеводі. Промінь світла попадає в плівку, багаторазово відображається від її меж і розповсюджується по зигзагоподібному шляху, що нагадує поведінку світла в оптичному волокні. Оптичний хвилевід має властивості, що споріднюють його з хвилеводом НВЧ діапазону, але товщина його при цьому в 10^4 разів менше, і є хвилеводом відкритого типу. Це означає, що світло розповсюджується не тільки в середині плівки, але й в областях, які прилягають до неї – в підкладці і покритті. Тому матеріали всіх трьох шарів повинні мати гарні оптичні характеристики, бути механічно міцними і стійкими до впливу зовнішніх факторів. Основним матеріалом для підкладок в інтегральній оптиці є GaAs. Що до плівок хвилеводів, то добре себе зарекомендували органічні матеріали і фоторезисти.

Важливим кроком в розвитку інтегральної оптики стало створення мініатюрних джерел і приймачів світла, модуляторів, перемикачів. Вони служать активною частиною OEIMC, здатних генерувати світло і керувати його параметрами. Всі ці елементи, незважаючи на різні функції, розміщуються на загальній підкладці із GaAs –єдиному матеріалі, в якому реалізуються всі необхідні функції.

Основні сфери використання OEIMC: перемикачі логічних та аналогових сигналів; реле; схеми літерної та цифрової індикації.

2.2 Модель діелектричного хвилеводу

Наукову основу інтегральної оптики становить вивчення процесів поширення електромагнітних хвиль в плоскому діелектричному хвилеводі. Останній являє собою розміщену на підкладці тонку і вузьку діелектричну смужку, яка має більший показник заломлення, ніж оточуюче середовище. Поле хвилі, яка поширюється вздовж такого хвилеводу, швидко спадає.

Модель такого хвилеводу в досить загальному вигляді може бути зображена трьохшаровою структурою (рис. 2.1), що містить підкладку, світловід і покриття.

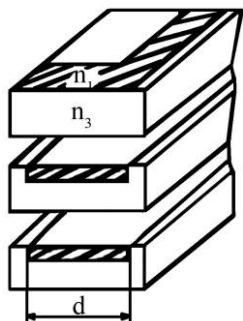


Рисунок 2.1 – Структура діелектричного хвилеводу

Розв’язання рівняння Максвелла для напряму поширення вздовж осі z в двохвимірному випадку показує, що гармонічна хвиля існує в оптично найщільнішому середньому шарі і експоненціально

затухає в шарах 1 і 3. Ці хвилі називають каналізованими, або хвилеводними модами. У режимі збудження хвилеводних мод в загальному випадку в хвилеводі може існувати скінчене число хвилеводних ТЕ-мод (з складовими полів E_y , H_x , H_z) і ТМ-мод (з складовими H_y , E_x , E_z). Число власних мод тим більше, чим більше відношення W/λ і залежить від співвідношення показників заломлення n_1 , n_2 , n_3 . При деякому значенні $W=W_{кр}$ мода TE_0 стає хвилеводною, подальше збільшення W дозволяє існування моди TE_1 , потім моди TE_2 і т.д. Аналогічна картина спостерігається із ТМ- модами. При зменшенні товщини хвилеводу нижче критичної хвилеводні моди перетворюються в моди підкладки, направлена каналізація світла припиняється. При великій різниці n_2 і n_1 та близьких значеннях n_2 і n_1 [$(n_2-n_3)/n_2=\Delta n/n_2 \ll 1$] критична товщина світловоду дорівнює:

$$W_{кк} = \frac{\lambda}{4} \sqrt{2n_2 \Delta n}$$

Наприклад, при $\lambda \approx 0,3$ мкм і $\Delta n/n_2 \approx 10^{-3}$ $W_{кр}$ становить 1,2 мкм.

Крім розв'язання рівняння Максвела, для дослідження характеристик мод хвилеводів придатна концепція зигзагоподібного поширення світла, згідно якої кожна мода представляє собою промінь, що падає на границю хвилевід підкладка і хвилевід – покриття під певним кутом θ і поширюється всередині середнього шару внаслідок повного внутрішнього відбивання. Незважаючи на зигзагоподібний шлях такого променя, світло, по суті, поширюється лише в напрямі z , утворюючи в напрямі x стоячу хвилю. Константа поширення:

$$\beta = k n_2 \sin \theta_1,$$

де $\frac{\omega}{|k|} = c$, ω - кутова частота світлових коливань. Граничне значення θ , при якому мода залишається хвилеводною, визначається співвідношенням:

$$\theta < \arcsin(n_3/n_2); \theta < \arcsin(n_1/n_2).$$

Для того, щоб плоскі хвилі після багаторазового відбивання інтерферували між собою в фазі, повинна виконуватися умова:

$$2kn_2\cos\theta_m W - 2\Phi_{23} - 2\Phi_{21} = 2m\pi,$$

де Φ_{23} і Φ_{21} – фазові зсуви при повному внутрішньому відбиванні на нижній і верхній границях світловоду; m – ціле число. Розв’язок цього трансцендентного рівняння дає набір дозволених значень θ_m і відповідно β_m і фактично визначає власні моди хвилеводу.

При поширенні вздовж хвилеводу декількох мод між ними виникає зв’язок, викликаний дефектами (флуктуації показника заломлення, шорсткуватість граней і т.д.). Цей зв’язок приводить до обміну потужності між модами. Чим суттєвіші дефекти, тим сильніша взаємодія мод і менша відстань, на якій відбувається перекачування потужності між двома модами. Для зменшення спотворень необхідно, щоб шорсткуватість поверхні не перевищувала $0,03\lambda$.

Таким чином, для створення OEIMC необхідно вміти виготовляти плоскі діелектричні хвилеводи з товщиною, близькою до $W_{кр}$ (для одержання одномодового режиму) і з малими шорсткуватостями границь ΔW . Прийнятні значення цих величин становить $W=0,5-5,0$ мкм; $\Delta W \approx 0,1 \div 1,0$ мкм, а затухання сигналу не повинно перевищувати 1 дБ/см.

Поперечні перерізи можливих конструкцій смужкових хвилеводів визначаються головним чином технологією, що використовується для їх виготовлення. Інколи використовують покриття для захисту несучої смужки від зовнішніх пошкоджень. Діапазон величин, які визначають параметри, складає: $W=0,3 \div 10$ мкм, $d=3 \div 100$ мкм; $\Delta n/n \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ (тут $\Delta n/n = (n_3 - n_2)/n_2$). Крім того, ефект каналізації світла спостерігається в тонких моно- і полікристалічних плівках $ZnSe$, ZnO , CdS , $GaAlAs$, Si і в деяких органічних речовинах.

Втрати в оптичних хвилеводах пов’язані в основному з трьома механізмами: розсіюванням, абсорбцією і випромінюванням. Втрати, зумовлені розсіюванням, домінуючі в скляних і діелектричних хвилеводах, а поглинання – в напівпровідниках і

інших кристалічних матеріалах. Втрати через випромінювання вносять суттєвий вклад в хвильоводах, зігнутих по кривій. Абсорбційні втрати в тонких аморфних плівках і кристалічних сегнетоматеріалах, напри-клад, $LiTaO_3$ або $LiNbO_3$, малі в порівнянні з втратами розсіювання. Однак в напівпровідниках спостерігаються суттєві втрати, зумовлені як між зонним поглинанням або поглинанням на краю смуги, так і поглинання на вільних носіях. Так, зменшення сумарної концентрації донорних і акцепторних домішок в $GaAs$ -хвильоводі від 10^{16} до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ привело до зменшення втрат від 4,3 до 1,3 дБ.см при $\lambda=1,15 \text{ мкм}$. При наближенні до довгохвильової границі спектру втрати в напівпровідникових хвильоводах різко зростають.

Волоконні світловоди в основному формують з плавленого кварцу, багатокомпонентного скла і полімерів.

Оптичні хвильоводи з малими втратами можна створювати іонною імплантацією бору в плавлений кварц без відпалення. Характер спектральних втрат в цих оптичних хвильоводах, з одного боку, залежить від концентрації домішок і вмісту гідроксильної групи в вихідному матеріалі, а з другого боку, визначається дозою і енергією імплантованих іонів. Умови іонної імплантації (енергія іонів, доза опромінення і т.д.) істотно впливають на втрати в оптичних хвильоводах. Зокрема, встановлено, що втрати в хвильоводах зменшуються при збільшенні маси іона. В той же час мінімальна доза, необхідна для виготовлення хвильоводу, зростає при зменшенні маси іона. Таким чином, основний вклад в збільшення показника заломлення вносить ядерне гальмування.

2.3 Оптичні відгалужувачі

Оптичні відгалужувачі формуються методом іонної імплантації. Для цього на підкладці з плавленого кварцу діаметром 35 мм за допомогою фотолітографії створюється рисунок структури відгалужувача з розмірами $6 \times 6 \text{ мм}$. Ширина основного хвильовода рівна 170 мкм, кожного відгалужуючого каналу- 13 мкм, радіус кривизни-1,5 мкм. Іонна імплантація бору і літію проводиться через

маску фоторезисту, а енергію в діапазоні 200-300 KeV при постійній дозі опромінення 10^{13} см⁻². При цьому забезпечувалось збільшення показника заломлення і формування хвильоводів в області кварцу, не захищеній шаром фоторезисту. Глибина проникнення іонів літію на 40 % більша, ніж іонів бору, проте останні викликають значнішу зміну коефіцієнта заломлення.

Хвильоводна техніка придатна для виготовлення основних видів пасивних оптичних елементів. Ефект призми (відхилення і поворот світлового променя) виникає, якщо на якійсь ділянці хвильоводу нанесено додатковий шар тієї ж речовини в формі трикутника. Це пояснюється тим, що швидкість світла залежить від товщини світловоду.

Ефект лінзи виникає при зміні показника заломлення вздовж перерізу хвильоводу. Можливі чисто геометричні вирішення цієї задачі, коли на частині світловоду створюється розширення напівкруглої форми.

Напрямок поширення світла змінюється на протилежний (ефект дзеркала) при створенні на одній з граней світловоду дифракційні ґратки. Встановлено, що світловий потік змінює свій напрямок на протилежний, якщо ґратка містить декілька сот штрихів на один міліметр. Відстань між штрихами повинна відповідати умові Бреґга:

$$L_B = m\lambda_R/2,$$

де m - порядок дифракції; λ_R - довжина хвилі світла в матеріалі світловоду. Так, для реалізації дифракції першого порядку в GaAs-хвильоводі необхідно забезпечити $L_B=0,125$ мкм, що практично важко здійснити. Тому, як правило орієнтуються на дифракцію вищих порядків ($m=2, 3\dots$).

Технологія діелектричних хвильоводів придатна для виготовлення більшості елементів НВЧ техніки направлених відгалужувачів, частотно селективних фільтрів, перемикачів, фазоповертачів і т.д.

Направлене відгалуження може бути реалізовано декількома способами. Найпростіший з них приймає за основу зв'язок

хвилеводів, розміщених близько один від одного. Встановлено, що при однаковій константі поширення обох хвилеводів можливе перекачування потужності з одного хвилеводу в інший на певній довжині цих хвилеводів. Якщо ж ці константи не однакові, то відбувається часткове перекачування. Для встановлення зв'язку між хвилеводами можна прикласти зворотню напругу до бар'єру Шотткі зі сторони одного з хвилеводів. Таким способом можна перекачати до 95 % потужності з одного хвилеводу в інший.

Введення світлового променя в плоскі діелектричні хвилеводи вирішується декількома способами (рис.2.1). Промінь можна сфокусувати за допомогою лінзи на край плівки (рис.3,а). Тут лінза сподобляється рупору, але це не дуже зручно, тому що необхідно точно сфокусувати лінзу і лазерний пучок з найтоншим краєм плівки. Простіше виявилось вводити світло за допомогою призми з більшим показником заломлення, чим у плівки (рис.2.1,б), але тут це не зручно. Для перекачування світлової енергії необхідно, щоб між призмою і плівковим хвилеводом залишався повітряний зазор товщиною меншою половини довжини хвилі. В зазорі можуть накопичуватися частинки пилу, що приводить до росту втрати світла. Цього можна запобігти, якщо зазор заповнити зв'язуючим матеріалом, що одночасно робить конструкцію більш надійною. Як показує експеримент, при такому вводиті втрачається не більш 12 % енергії світла.

Аналогічно призмному працює інший елемент вводу – за допомогою решітки (рис.2.1,в). На плівку хвилеводу накладають тонкий шар фоторезисту. За допомогою лазера на його поверхню експонують інтерференційну картину. Після обробки фоторезист становиться дифракційною решіткою з синусоїдальним, трикутним або трапеційним профілем.

Мініатюрність решічатих елементів, відносна легкість виготовлення роблять їх досить перспективними для використання в інтегральній оптиці.

2.4 Фотоприймальні пристрої ОЕ ІМС

2.4.1 Тонкоплівкові модулятори [1, 7]

Як фотоприймачі оптичних інтегральних схем використовують гетероструктури. Хвильоводні фотоприймачі характеризуються майже 100% ефективністю, оскільки в них практично відсутні втрати на відбивання.

Для виготовлення тонкоплівкових модуляторів використовують різні фізичні ефекти: електрооптичний, магнітооптичний, ефект Келдиша-Франца. Планарні хвильоводи для цих модуляторів виготовляються на підкладках з електро-, магнітно- і акустооптичних матеріалів. Параметри цих матеріалів змінюються при відповідних

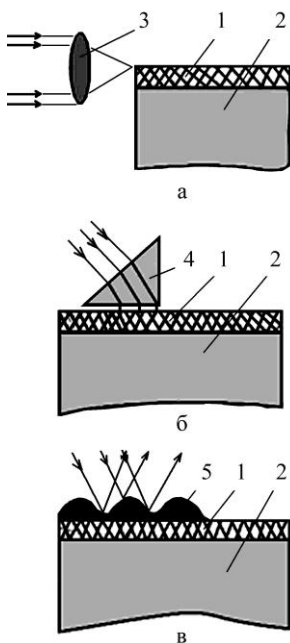


Рисунок 2.1 - Елементи введення світла в хвильовод [4]: 1 - плівка; 2 - підкладка; 3 - лінза; 4 - призма; 5 - решітка

зовнішніх впливах (електричних, магнітних, акустичних), що дозволяє управляти поширенням світла в хвилеводі.

При застосуванні електрооптичного ефекту використовують ніобат літію і танталат літію у вигляді тонких плівок. Лінійний електрооптичний ефект в напівпровідникових р-п-переходах виникає в зв'язання з тим, що прикладена зворотня напруга в області об'ємного заряду змінює концентрацію вільних носіїв, останнє приводить до модуляції діелектричної проникливості E , а отже і показника заломлення n . Для звичайних об'ємних модуляторів цей ефект важко використати, оскільки світло прийшлося би вводити у вузьку зону вздовж р-п-переходу. В тонкоплівкових структурах це вважається перевагою. При використанні таких напівпровідників, як GaAs, GaP, управляючі напруги можна зменшити до десятків і одиниць вольт.

При створенні магнітооптичних модуляторів перехід до тонкоплівкових конструкцій дозволяє частково усунути основний недолік цих приладів – низьку робочу частоту. Так, ферит-гранатові модулятори працюють на частотах до 10^4 Гц і споживана ними потужність на порядок менша від кращих зразків електрооптичних модуляторів. Магнітооптичні модулятори в тонкоплівковому виконанні характеризується низьковольтним управлінням (одиниці вольт), що робить їх сумісними з стандартними мікросхемами. Ефект Келдиша-Франца зв'язаний зі зміною коефіцієнта поглинання світла в напівпровідниках. Він полягає в зсуві краю смуги поглинання при створенні в напівпровіднику сильного електричного поля. При переході до тонкоплівкових хвилеводних конструкцій необхідні поля можуть бути одержані при досить малих напругах (1-10 В). Характерною особливістю ефекту Келдиша-Франца є його безінертність – час релаксації становить приблизно 10^{-13} с.

Найбільше поширення одержали електрооптичний і акустооптичний принципи управління. Структура простого планарного електрооптичного фазового модулятора (фазовертача) показана на рис. 2.2. Ділянка смужкового хвилеводу 2 або підкладки, яка розміщена між плівковими металевими електродами 1, виконана з електрооптичного

матеріалу, показник заломлення якого змінюється під дією електричного поля електродів.

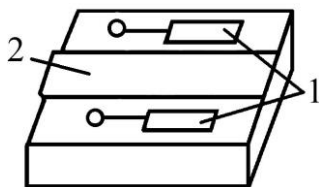


Рисунок 2.2 - Електрооптичний фазовий модулятор [5]

Це приводить до зміни ефективного показника заломлення хвилеводу, в результаті чого на виході модулятора з'являється кероване відхилення променя. За допомогою системи паралельно розміщених фазоповертачів описаного типу можна на її виході сформувати керований фазовий фронт і побудувати оптичний рефлектор, що забезпечує кероване відхилення світлового пучка.

Найпростіший амплітудний модулятор також може працювати за схемою рисунку 2.2. В цьому випадку хвилевід повинен бути розрахований так, щоб керовані зміни показника заломлення переводили його з режиму прозорості в режим непрозорості. При цьому глибина амплітудної модуляції може бути близькою до 100 % , а пристрій може виконувати функцію одноканального комутатора світла.

Для створення планарних електрооптичних модуляторів застосовують також хвилеводні ґратки, які утворюються електричними полями періодичної системи електродів. Подача на електроди керуючих напруг приводить до відповідної модуляції параметрів і променів ґраток.

2.4.2 Акустооптичні керуючі пристрої

Широкі можливості для управління світловими пучками представляє акустооптична взаємодія, зумовлена явищем фотопружності або зміною показника заломлення речовини під дією механічних напружень. Разом з тим використовується також

зміна геометричних розмірів хвелеводів і форми їх поверхні під дією звукових коливань.

Структура найпростішого планарного акустооптичного керуючого пристрою показана на рис.2.3.

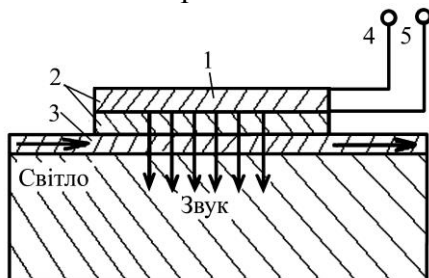


Рисунок 2.3- Акустооптичний керуючий пристрій [6]

П'єзокристал 1 з управляючими електродами 2 генерує поздовжню звукову хвилю, яка через шар 3, що відділяє хвелевід від поглинаючого металевго електрода, і вихідний шар 4 проходить в підкладку 5. Під дією звукової хвилі змінюються параметри хвелеводу (товщина і показник заломлення шарів), що приводить до фазової модуляції світлової хвилі, яка проходить по світловоду з частотою звуку. Якщо параметри хвелеводу близькі до критичних, відбувається амплітудна модуляція. В приведеній схемі можливе використання і об'ємної звукової хвилі зсуву, яка поляризована перпендикулярно до напрямку світлового променя. В цьому випадку звук створює анізотропію хвелеводу, внаслідок якої виникає взаємна трансформація ТЕ і ТМ - хвиль, яка супроводжується їх амплітудною і фазовою модуляцією.

Найбільший інтерес для побудови планарних акустооптичних керованих пристроїв представляють не об'ємні, а поверхневі звукові хвилі (хвилі Релея), які можуть поширюватися в дуже тонкому поверхневому шарі, суміщеному з оптичним хвелеводом, що дозволяє досягнути більшої ефективності акустооптичної взаємодії. Ці хвилі збуджуються на поверхні підкладки (рис.2.4.) за допомогою ґратки, утвореної зустрічними металевими електродами, яка

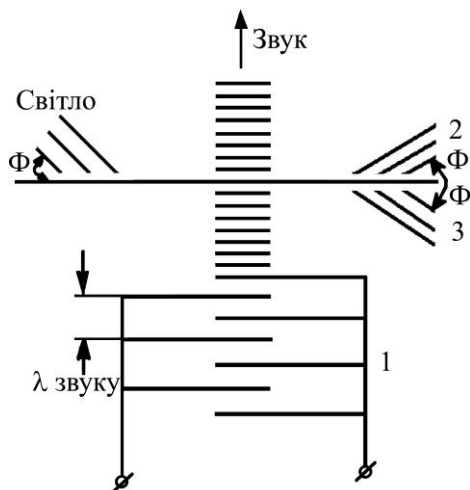


Рисунок 2.4 - Акустооптичний пристрій на поверхневих хвилях [6]

має крок, рівний половині довжини робочої хвилі Релея. На них подаються напруги, які чергуються за знаком. Хвиля Релея створює на поверхні підкладки біжучу періодичну структуру (гратку), на якій може дифрагувати світлова хвиля. Глибина модуляції і період цієї структури залежить від інтенсивності і частоти звуку, що дає можливість здійснювати різні види акустооптичної модуляції світла.

Так, світловий пучок, відбитий від звукової ґратки під брегівським кутом, модулюється за амплітудою при зміні частоти звуку або його інтенсивності. В режимі випромінювання зміна періоду звукової ґратки приводить до зміни кутів випромінювання, що використовується для створення дефлекторів світла.

Внаслідок ефекту Доплера частота світла, дифрагованого на звуковій ґратці, зміщується на значення, рівне або кратне частоті звуку. Це явище використовується для частотної модуляції світла. В якості акустооптичних матеріалів використовують кварц, ніобат літію, окис цинку, арсенід галію, полістирол.

2.4.3 Оптиелектронні запам'ятовуючі пристрої

Необхідність розробки оптичних запам'ятовуючих пристроїв (ЗП) зумовлена тим, що пристрої цього ж призначення, які діють за іншими фізичними принципами (магнітна і напівпровідникова пам'ять), не можуть повністю задовольнити неперервно зростаючих вимог до об'єму інформації, яка зберігається, і щільності її запису.

Пристрої оптичної пам'яті базуються на двох методах запису і вибірки інформації: послідовному (порозрядному) і паралельному (посторінковому). В пристроях першого типу використовують лише направленість світлового променя, в пристроях другого, голографічного – когерентність лазерного випромінювання і можливість його просторової модуляції.

В ЗП послідовного типу запис інформації здійснюється випалюванням лазерним променем отворів в металевій плівці, розміщеній на прозорій основі. Направлення лазерного променя здійснюється механічно (змінюючи взаємне положення променя і запам'ятовуючого середовища) або за допомогою дефлектора, який відхиляє світловий промінь за заданою програмою. При записуванні інформації випалювання отворів в металевій плівці відповідає логічній одиниці, відсутність отвору – логічному нулю. Як запам'ятовуюче середовище використовують металізовані вісмутом або радієм смужки полієфірної плівки, фотоплівки і пластинки, фоторезисти, фото полімери. Проте органічні матеріали мають схильність до старіння. Найкращу стабільність при довготривалому зберіганні інформації в оптичних ЗП забезпечують плівки хрому на склі. Такі ЗП забезпечують швидкість запису $3 \cdot 10^4$ біт/с і ємність пам'яті приблизно 10^{18} біт. Голографічний принцип запису інформації (рис.2.5) базується на фіксації фоточутливим шаром інтерференційної картини, яка створюється двома когерентними хвилями: відбитою від об'єкта запису або хвилею, що пройшла через нього, і допоміжною або опорною. Ця зафіксована на фотопластинці картина, що містить повну інформацію про відбиту від об'єкта хвилю з урахуванням не лише інтенсивності, але і фази коливань, являє собою голограму. При

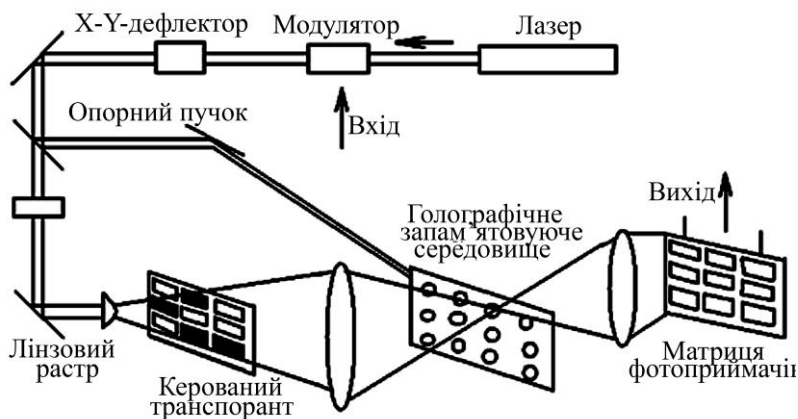


Рисунок 2.5 – Голографічний запам'ятовуючий пристрій [6]

освітленні голограми опорним променем відбувається її відновлення – відтворюється зображення об'єкта. Одна з особливостей голографії – можливість запису великого числа голограм на одній пластині при використанні різно направлених опорних пучків. Об'єктом запису є двовірна матриця двоїчних знаків.

Використання голографічного принципу в пристроях пам'яті зумовлює ряд їх особливостей.

- 1 Висока щільність запису інформації, властива всім оптичним системам і зумовлена малою довжиною хвилі світла λ .
- 2 Можливість зчитування інформації у вигляді масивів $10^4 - 10^6$ біт. Це дозволяє підвищити продуктивність системи і зменшити число інтегральних мікросхем. Швидкодія пристрою може стати на декілька порядків вища, ніж дефлектора, що здійснює сканування лазерного променя. Отже, в голографічних системах швидкодія ЗП ще більше зростає.
- 3 Висока захищеність від перешкод, інформація з кожної частини транспаранта записується у вигляді інтерференційної картини на всій поверхні фотопластинки. При цьому голограма нечутлива до мікродефектів (порошинки, проколи і т.д.), що особливо дошкульне в порозрядних системах запису. Крім того, голограма

зберігає всю інформацію навіть при відколюванні частини фотопластинки.

- 4 Можливість запису інформації безпосередньо в аналоговій формі, що відрізняє голографічні ЗП від всіх інших видів запам'ятовуючих пристроїв зі збереженням символів двоїчного коду. В багатьох випадках така фіксація повної картини об'єкту значно простіша і швидша, ніж традиційний послідовний запис по крапках в процесі розгортки зображення, і забезпечує добре сполучення голографічного ЗП з системами аналогової оптичної обробки інформації.
- 5 Можливість поєднання в одному пристрої функцій зберігання і логічної обробки, що дозволяє реалізувати асоціативну вибірку інформації.
- 6 Можливість запису інформації в об'ємі фотореєструючого матеріалу, що розширює їх номенклатуру.
- 7 Нижчі вимоги до точності механічного юстирування окремих елементів і до оптичної системи голографічних пристроїв в порівнянні з порозрядними оптичними ЗП. Це зв'язано з тим, що голограма в закодованій формі несе інформацію про положення об'єкту.

Пристрої голографічного ЗП зображено на рисунку 7. При записуванні інформації промінь лазера за допомогою напівпрозорого дзеркала ділиться на два: сигнальний, який проходить через об'єкт, і опорний. Зміна дефлектором напряму опорного променя дозволяє послідовно записувати велике число голограм на одну фотопластинку. Як об'єкт запису використовуються фототранспаранти, які при роботі з цифровою інформацією представляють собою двомірну матрицю прозорих і непрозорих ділянок, що відповідають одиницям і нулям двоїчного коду. Транспаранти можуть бути постійними і керованими.

При зчитуванні інформації дефлектор налаштовується на певне положення опорної хвилі і таким чином вибирається зображення потрібного транспаранта. При цьому сигнальний промінь перекривається затвором. Подальше вибирання потрібного числа з усього масиву здійснюється електронним шляхом при обробці сигналів фотореєструючої матриці.

Зменшення інтенсивності засвітки елементів фото приймальної матриці від інтерференційних картин інших голограм (які не приймають участі в даній операції зчитування) досягається такою зміною оптичної системи, при якій забезпечується просторовий розподіл голограм на фотопластинці. Повнішого використання фото чутливого матеріалу пластинки можна досягнути при багатоканальній схемі запису – зчитування. В цій схемі на кожному голограму одночасно записується 5 -10 рознесених у просторі транспарантів, кожний з яких має свій масив інформації і освітлюється своєю оптичною схемою. При цьому опорний промінь загальний для всіх систем. При зчитуванні відновлені зображення цих транспарантів попадають на свої просторово рознесені фото приймальні матриці. Розрахунки показують, що таким шляхом можна збільшити щільність запису інформації в 3 – 6 раз при тій же потужності лазера.

Характеристики голографічних ЗП суттєво залежать від властивостей фотореєструючих матеріалів. Стандартні фотопластинки, які використовуються в голографічних ЗП, забезпечують поєднання високої роздільної здатності ($3 \cdot 10^3$ ліній/мм) і фоточутливості (10^{-5} Дж/см²). Ефективність зчитування, що визначається як відношення енергії в відновленому зображенні до енергії променя, що відновлює для фотопластинок невелика і становить приблизно 5 %. У фотоемульсії на базі біхромату желатину вдається досягнути ефективності зчитування до 30% в тонких і до 90% в товстих плівках. У фотопластинках зі срібно – галоїдною емульсією чутливість на два – три порядки вища. Для товстих шарів характерні також усадочні і деформаційні явища, які спотворюють об'ємні голограми при високій щільності запису.

В пристроях оптичної пам'яті необхідні висока направленість і когерентність світлового променя. Цим вимогам з урахуванням вартості і габаритних розмірів найкраще задовольняє гелій – неоновий лазер. Для підвищення щільності запису слід використовувати більш короткохвильові лазери: аргонів ($\lambda=0,49$ мкм), гелій – кадмієві ($\lambda=0,32$ мкм), ксенонові ($\lambda=0,36$ мкм) і криптонові ($\lambda=0,35$ мкм).

2.4.4 Електрооптичні дефлектори [5, 9]

Дефлектори представляють собою оптоелектронні пристрої для керованої зміни просторового положення світлового променя. Вони базуються на електричному і акустооптичному ефектах. Типовий дискретний електрооптичний дефлектор (рис. 2.6) представляє собою m – каскадний пристрій, в якому кожний каскад складається з модулятора для поляризації світла двозаломлюючого кристалу. В залежності від комбінації керуючих напруг можна одержати 2^m дискретних положень вихідного променя 3.

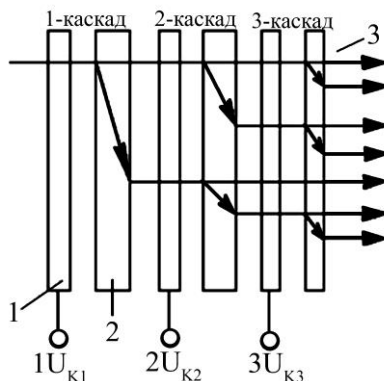


Рисунок 2.6- Електрооптичний дефлектор

Пристрій конструюється так, щоб забезпечувалось відхилення променя по двох координатах. Загальне число положень відхиленого променя, що досягається в електро-оптичному дефлекторі, визначається співвідношенням: $N_{ED} = \varphi D / \lambda$, де φ – максимальний кут відхилення променя; D – апертура дефлектора.

Важлива перевага електрооптичного дефлектора – велика швидкодія. В пристрої з $N_{ED} \approx 10^3$ час переключення може складати долі мікросекунди. При збільшенні роздільної здатності зростає інерційність системи. В дефлекторах використовуються ті ж самі матеріали, що і в модуляторах. Велике число пластин, через які проходить світловий промінь, висуває жорсткі вимоги до прозорості матеріалів і точності їх обробки і демонтажу кожного кристалу.

2.4.5 Акустичні дефлектори [8, 10]

Принцип дії акустичного дефлектора (рис.2.7) базується на тому, що при проходженні звукової хвилі в фотопружньому середовищі 1 виникають зміни показника заломлення, що відповідають області стиску і розтягування. Це приводить до утворення фазової ґратки 2, період якої дорівнює довжині акустичної хвилі, а амплітуда пропорційна амплітуді акустичної хвилі і фотопружності постійного середовища.

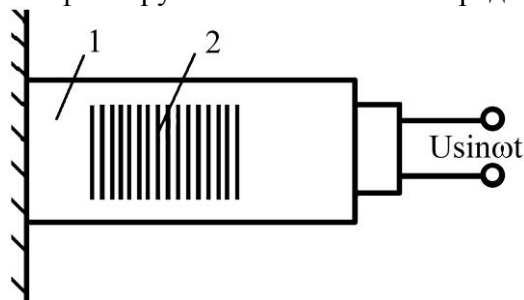


Рисунок 2.7 - Акустичний дефлектор [2]

Дифракція світла в цій ґратці використовується в дефлекторі. У ряді випадків задовільнені результати досягаються при використанні таких простих матеріалів, як вода і плавлений кварц. Простотою обробки і низькою вартістю характеризуються склоподібні речовини, з яких хороші акустооптичні властивості телуритне і халькогенідне скло. Але найперспективнішими є кристалічні матеріали: вульфеніт (PbMoO_4), пара телурит (TeO_2), ніобат літію (LiNbO_3) і деякі інші.

Зміна просторового положення дифрагованого променя світла досягається зміною частоти акустичних коливань і відповідною перестройкою дифракційної ґратки.

Таким чином, основними елементами акустооптичного дефлектора є: фотопружне середовище, п'єзоелектричний перетворювач – збуджувач, акустооптичний поглинач. Для двовірної розгортки сполучаються два акустооптичних елементи, які відхиляють промені у взаємно перпендикулярних напрямках. Акустооптичні дефлектори можуть працювати в аналоговому і

дискретному режимі, тобто з плавною і дискретною зміною частоти звукових коливань.

Керований транспарант представляє собою двох координатну матрицю елементарних комірок, оптичні властивості яких можуть змінюватися під дією електричного, магнітного або оптичного збудження. При оперуванні дискретною інформацією окремі комірки включаються або на максимальне світлопропускання (стан логічної одиниці), або затемнюються (логічні нулі).

Транспаранти, які управляються електрично, виготовляються на основі різних матеріалів, з використанням електрооптичного ефекту: кристали типу КДР, ДКДР, прозорі сегнетокераміки типу ЦТСЛ, електрохромних речовин, рідких кристалів.

При вводі інформації за допомогою електрично-керованого транспаранта вона поступає на входні шини з одного або декількох електричних каналів і запам'ятовується поелементно або по строчно. Після заповнення всього коду транспарант просвічується тактовим світловим імпульсом і зображення картини аналогово або дискретно переноситься на голограму. Використовуються транспаранти прохідного і відбиваючого полів, причому у другому випадку підвищується контрастність зображення і спрощується електрична комутація елементів. Хоча в будь-якому вигляді електрично-керований транспарант представляє собою багатоелементний пристрій з матричною організацією і одномірною структурою вводу. Тому високу швидкість вводу.

Перспективи підвищення швидкості вводу інформації пов'язуються з оптично керованим транспарантом. Його принцип дії базується на перерозподілі напруги від джерела живлення на фоторезистивному і електрооптичному шарах під дією керуючої світлової хвилі, яка створює неоднорідну по площині транспаранта модуляцію провідності фоторезистивного шару. В засвічених областях практично весь спад напруги припадає на електрооптичний шар, в незасвічених – на фоторезистивний.

Характерною особливістю транспаранта є поєднання в ньому моделюючої і підсилюючої властивостей. Цілком можливе підсилення світла в 10 раз при смузі частот 10^7 Гц.

Реверсивні оптичні запам'ятовуючі пристрої базуються на матеріалах, які придатні для багаторазового перезапису і тривалого зберігання оптичної інформації. До цих середовищ виставляється ряд вимог: висока роздільна здатність і дифракційна ефективність, низький енергетичний поріг запису, мала тривалість циклу перезапису, велика тривалість зберігання інформації, можливість зчитування інформації без руйнування і зберігання інформації при включеному живленні, можливість реалізації великої кількості 10^9 циклів перезапису. Остання вимога принципово відрізняє реверсивні середовища від матеріалів для постійного запису. Для фотохромних матеріалів з високою роздільною здатністю характерне постійне старіння інформації під дією зчитуючого променя світла, а також самовільне під дією теплоти. Термопластичні матеріали характеризуються термічним старінням; при великій кількості циклів перезапису спостерігається часткова полімеризація плівки і погіршення відношення сигнал – шум.

Перевагою магнітних плівок є висока швидкодія, яка забезпечує тривалість всього циклу запис – зчитування – стирання не більше 50 мс. Їх недолік – низька дифракційна ефективність, що пов'язана зі слабо вираженим магнітооптичним ефектом.

Сегнетокерамічні матеріали придатні для об'ємного запису голограм. Так, в кристалах ніобіта літія, легованих атомами заліза, вдається записати більше як 100 голограм при послідовному повертанні кристала на незначні кути відносно опорного променя. Проте для більшості нелегованих сегнетокерамічних матеріалів час збереження інформації відносно невеликий ($10^{-3} - 10^{-2}$ с.).

2.5 Застосування структур метал – діелектрик – напівпровідник в інтегральній оптиці [8]

Структури метал – діелектрик – напівпровідник – електрооптичний матеріал МДН – ЕОМ представляють собою новий тип оптоелектронних структур, за допомогою яких стає можливою реалізація просторово – часової модуляції світла, перетворення і обробка оптичних зображень. Дані структури –

багатофункціональні елементи, які виконують операції підсилення і перетворення оптичних інформаційних сигналів. На їх основі можна розробляти перетворювачі ІЧ – зображення в видиме, створювати корелятори оптичних зображень. Структура МДН – ЕОМ конструктивно складається з шару ЕОМ і прилягаючої частини МДН і містить шари, які за призначенням аналогічні до шарів фотопровідника і ЕОМ. Відрізняють структури МДН – ЕОМ від випромінюючих і відбивних структур (рис.2.8). Оскільки всі ЕОМ 4 високоомні, то шар напівпровідника з обох сторін ізолюваний від електродів 1. Ці структури несиметричні, тому що електрофізичні властивості діелектриків МДН і ЕОМ частин рівні.

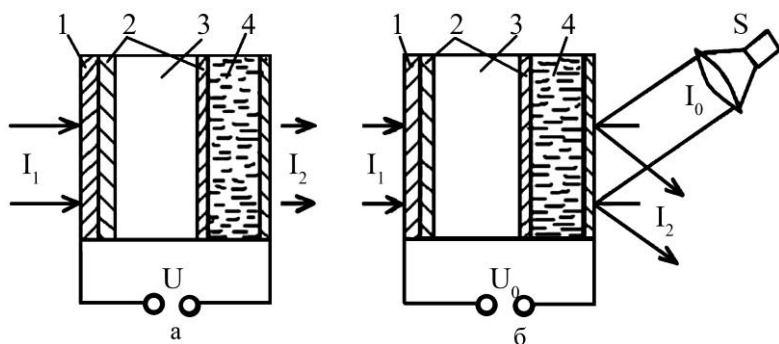


Рисунок 2.8- Структури МДН – ЕОМ [8]

Як правило, використовують МДН структури на основі Si з рівноважною концентрацією носіїв $n \approx 10^{14} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ і рухливістю $\mu = 1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Діелектриком слугує шар SiO_2 або композиція з двох шарів Si_3N_4 і SiO_2 . Товщина шару діелектрика приблизно 1 мкм. Для створення прозорих електродів застосовують Al і Cr. До електрооптичних матеріалів відносять цинкосульфідні електролюмінофори, леговані Cu або Mn; сублімат – фосфори; світловипромінюючі p – n переходи; електрооптичні сегнетокераміки. Структури МДН– ЕОМ працюють в динамічному режимі. При відсутності світлового потоку, спад зовнішньої напруги відбувається в основному на шарі напівпровідника. Під дією світла в напівпровіднику появляются носії зарядів, які під дією поля концентруються біля границь напівпровідник–діелектрик і

напівпровідник–ЕОМ. У результаті цього поле в напівпровіднику екранується, а напруга на шарі ЕОМ зростає. Коли рівень напруги на ЕОМ досягає порога переключення оптичних характеристик $U_{\text{пор}}$, відбувається модуляція вихідного світлового потоку. При відключенні напруги структура повертається у вихідне положення.

Одним із перспективних середовищ для просторової модуляції когерентного випромінювання є рідкі кристали, на основі яких розроблено оптичні керовані транспаранти - елементна базу оптичних Фур'є-процесорів і кореляторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хоружний В.А., Письмецький В.О. Функціональна мікроелектроніка, опто- та акустoeлектроніка. - Харків, 1995. - 186 с.
2. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. - Т.1. Елементна база електронних пристроїв. - Київ: Обереги, 2000. - 300 с.
3. Жеребцов И.П. Основы электроники. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. - 242 с.
4. Герчановская В.П., Ипатов Э.Ф., Малова А.П. Новые профессии света. - Киев: Техника, 1989. - 120 с.
5. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. Оптроны и их применение. - Москва: Радио и связь, 1981. - 320 с.
6. Андрущенко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи. - Москва: Радио и связь, 1984. - 260 с.
7. Прохорский А.А. Основы автоматики и телемеханики. - Москва: Высшая школа, 1988. - 290 с.
8. Александров Л.Н., Иванцев А.С. Многослойные пленочные структуры для источников света. - Новосибирск: Наука, 1981. - 130 с.
9. Харченко В.М. Основы электроники. - Москва: Высшая школа, 1982. - 352 с.
10. Блех А., Селло Х., Грегор Л.В. Тонкие пленки в интегральных схемах // Технология тонких пленок. - Т.2 /Под ред Л.Майссела, Р.Глэнга. - Москва: Сов. Радио, 1977. - С.724 - 753.