

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лекційних занять з дисципліни
«Оптоелектронні прилади»
для студентів спеціальності
153 «Мікро– та наносистемна техніка»
Частина 1

Затверджено
на засіданні кафедри фізичного
матеріалознавства для електроніки
та геліоенергетики,
протокол №8 від 06.01.2021 р.

Харків НТУ«ХПІ» 2021

Методичні вказівки до лекційних занять з дисципліни «Оптоелектронні прилади» для студентів спеціальності 153 «Мікро– та наносистемна техніка». Частина 1 / Уклад.: К.О. Мінакова, Р.В. Зайцев, Ю.І. Веретеннікова, Г.С. Хрипунов. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 71 с.

Укладачі: К.О. Мінакова,
Р.В. Зайцев,
Ю.І. Веретеннікова,
Г.С. Хрипунов

Рецензент доц. Дроздов А.М.

Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики

Вступ

Оптоелектроніка - це дисципліна, що вивчає фізичні принципи управління оптичними та електронними процесами в різних матеріальних середовищах з метою передачі, прийому, обробки, зберігання і відображення інформації.

Для оптоелектроніки характерний синтез ідей багатьох природничо-наукових дисциплін (фізики твердого тіла, напівпровідникової і квантової електроніки, оптики та ін.). Проте вона являє собою цілісну науку, що має власний напрям досліджень і використовує для вирішення зазначених завдань ряд фундаментальних фізичних явищ. Основний напрямок сучасної оптоелектроніки - управління інформаційними процесами в мікро- та наноструктурах, тобто прагнення до інтеграції джерел, приймачів і елементів управління випромінюванням в єдиному кристалі або гібридній структурі.

Основним принципом оптоелектроніки є використання в якості матеріального носія інформації поряд з електроном електрично нейтрального фотона. Однак на відміну від звичайної електроніки і оптики в оптоелектроніці можлива зміна носія інформації в процесі обробки сигналу.

Як матеріальні об'єкти інформаційних процесів в оптоелектроніці виступають електрони, вільні або такі, що входять до складу атомів, молекул або твердих тіл, а також фотони, які взаємодіють з відповідним середовищем. Взаємодія між фотонами, атомами і електронами відбувається шляхом поглинання одних і випускання інших фотонів. Електрон-фотонне перетворення засноване на випромінюванні квантів світла атомними системами при переході їх із збуджених станів в стани з більш низькою енергією. В основі фотонелектронного перетворення лежить явище фотоелефекту, при якому електрон переходить із зв'язаного стану у вільний (в вакуум при зовнішньому і в зону провідності при внутрішньому фотоелефекті).

Розгляд цих процесів вимагає залучення методів квантової механіки і квантової електродинаміки, так як і стан світлового поля і стан середовища квантуються. Однак у багатьох випадках використовується так зване напівкласичне наближення, при якому середовище розглядається як квантова система, в той час як електромагнітне випромінювання представляється класично, тобто в рамках хвильової теорії. Класичний опис світлового поля повністю адекватний в тому випадку, коли в процесі перетворення не відбувається зміни матеріального носія інформації. До таких процесів відносяться операції над світловими пучками, коли вхідний і вихідний сигнали - оптичні.

Рух електрона визначається векторами напруженостей, діючих на нього зовнішніх електричного і магнітного полів. Фотон, не володіючи електричним зарядом, рухається в вільному просторі з постійною

швидкістю незалежно від наявності таких полів. Електрон може перебувати як у вільному, так і в зв'язаному стані (входячи до складу електронної оболонки атома). Стан, аналогічний зв'язаному стану електрона, у фотона не проявляється ні в яких відомих фізичних явищах.

Використання оптичного випромінювання має перевагу перед електронними методами, оскільки дозволяє істотно розширити можливості систем обробки і передачі інформації.

Висока частота оптичних коливань ($\sim 3 \times 10^{14}$ Гц при довжині світлової хвилі 1 мкм) забезпечує можливість одночасної передачі інформації по значно більшій кількості каналів, ніж в діапазоні радіохвиль (в 10^3 - 10^4 разів). Мала довжина хвилі дозволяє досягати більш високої щільності запису інформації тому, що мінімальна площа елементарної комірки в оптичних системах пам'яті має величину близько 2λ .

Фізичним обмеженням, властивим електронним методам, є одномірність електричних сигналів. Якісно нові можливості дає використання двовимірних некогерентних і тривимірних когерентних оптичних сигналів. Зокрема, може бути здійснена подвійна (часова і просторова) модуляція потоку, причому елементарна площадка, яка виділяється для незалежної модуляції, приблизно, дорівнює 2λ . Це забезпечує високу інформаційну ємність оптичних сигналів і можливість паралельної обробки великих масивів інформації без поелементного розкладання в часі.

З цієї точки зору цікаве порівняння можливостей оптоелектронних і біологічних систем. Людина містить близько 10^{12} нервових з'єднань, а ємність пам'яті людського мозку близька до 10^{13} біт. Передача інформації по нервових волокнах відбувається за рахунок біохімічних реакцій, тому її швидкість не перевищує 10^2 м/с. В електронних схемах сигнал поширюється зі швидкістю близько 10^8 м/с. У той же час людина здатна конкурувати з потужними комп'ютерами, наприклад при грі в шахи. Справа в тому, що порівняно повільне поширення сигналу по нервовому волокну компенсується одночасної роботою близько 10^4 - 10^5 волокон. Таким чином, оптоелектронна система, що забезпечує паралельну роботу багатьох каналів і розповсюдження сигналів зі швидкістю світла, потенційно може проводити обробку інформації з швидкістю, яка недоступна ні паралельним біологічним, ні послідовним електронним системам.

Використання фотонів, що не мають електричного заряду, забезпечує гальванічну розв'язку і високу захищеність оптичних каналів передачі та обробки інформації.

Також слід зазначити, можливість безпосереднього оперування із зоровими образами, яка надається оптоелектронікою. Використання матричних фотодетекторів дозволяє вводити інформацію у вигляді оптичного зображення для подальшої обробки електронними методами. Оптично керовані транспаранти і голографічні системи дозволяють

робити операції безпосередньо над оптичними картинами. Вивід інформації також може бути здійснений у вигляді зображення на екрані дисплея або на іншому носії.

До теперішнього часу оптоелектроніка є сталою назвою для позначення дисципліни, яку ми розглядаємо. Термін когерентна оптоелектроніка використовується в тому випадку, коли носієм інформації в оптоелектронній системі є когерентне лазерне випромінювання. Термін некогерентної оптоелектроніки відповідає ситуації, коли когерентність світлових хвиль в оптоелектронних перетвореннях не використовується. Слід зазначити, що грань між цими двома поняттями в певній мірі умовна і не завжди може бути проведена. Іноді як синонім терміну оптоелектроніка використовується термін фотоніка, щоб за аналогією з електронікою підкреслити той факт, що фотон, як матеріальний носій інформації, може виконувати ті ж функції, що і електрон. У літературі можна зустріти такі назви, як оптична електроніка, і дещо рідше - оптроніка. Перше з них досить близько до назви досліджуваного курсу, друге швидше можна віднести до одного з його розділів, що розглядає оптрони (оптопари) - певний клас функціональних елементів оптоелектроніки.

Відповідно до рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК), оптоелектронні прилади визначено як прилад, чутливий до електромагнітного випромінювання у видимій, інфрачервоній або ультрафіолетовій областях; або прилад, що випромінює і перетворює некогерентне або когерентне випромінювання в цих же спектральних областях; або прилад, який використовує таке електромагнітне випромінювання для своєї роботи.

Для вивчення дисципліни необхідні знання з таких дисциплін: «Вища математика», «Фізика», «Теорія електричних кіл», «Обчислювальна техніка», «Основи програмування та мікроелектронна техніка». Знання з дисципліни є вхідними до дисциплін «Автоматизоване проектування електронних пристроїв», «Фізика напівпровідникових приладів», «Електроніка дефектів в напівпровідниках», «Фізичні методи дослідження напівпровідникових матеріалів» тощо.

Лекція 1. Загальні визначення та історія оптоелектроніки

Оптоелектроніка представляє галузь фізики і техніки, яка використовує ефекти взаємного перетворення електромагнітного випромінювання оптичного діапазону в електричний струм і назад. Вона досліджує і застосовує процеси взаємодії оптичного випромінювання з речовиною для передачі, прийому, переробки, зберігання і відображення інформації.

Термін оптоелектроніка увійшов до вживання в 1960-х рр., коли з'явилися прилади оптрони, в яких для забезпечення гальванічної розв'язки між електронними ланцюгами використовується пара джерело світла – фотоприймач.

Сучасна оптоелектроніка визначає нові можливості як електроніки, так і оптики, але не передивляється їх фундаментальні положення. Оптоелектроніка синтезує досягнення різних галузей науки і техніки: квантової електроніки, нелінійної оптики, фізики і техніки напівпровідників, голографії, волоконної оптики, світлотехніки. Принципові переваги оптоелектроніки обумовлені специфічними особливостями електромагнітних хвиль оптичного діапазону і особливими властивостями фотона як носія інформації.

1.1 Загальні визначення

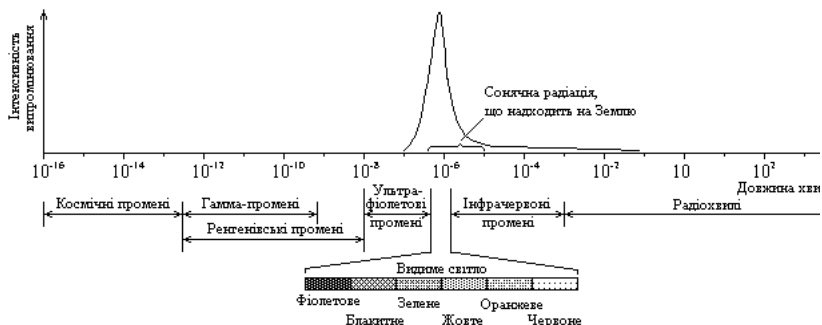
Оптика (від грецького *optikē* - наука про зорові сприйняття). Це розділ фізики, де досліджуються процеси випромінювання світла, його поширення в різних середовищах і взаємодія світла з речовиною.

Оптоелектроніка - область науки і техніки, яка досліджує і застосовує процеси взаємодії оптичного випромінювання з речовиною для передачі, прийому, переробки, зберігання і відображення інформації.

Квантова електроніка - область електроніки, яка досліджує і застосовує явища генерації, посилення електромагнітних коливань на основі ефекту вимушеного випромінювання і явища нелінійної взаємодії потужного випромінювання з речовиною.

Світлові хвилі - електромагнітні хвилі оптичного діапазону з довжиною хвиль λ від 1 мм до 1 нм. Вони включають (рис. 1.1):

- інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,78...1000$ мкм;
- видиме світло з $\lambda = 0,38 ... 0,78$ мкм;
- ультрафіолетове випромінювання з $\lambda = 0,0001...0,38$ мкм.



Частота ν , Гц Енергія кванта $\hbar\omega$, eV Довжина хвилі λ , м

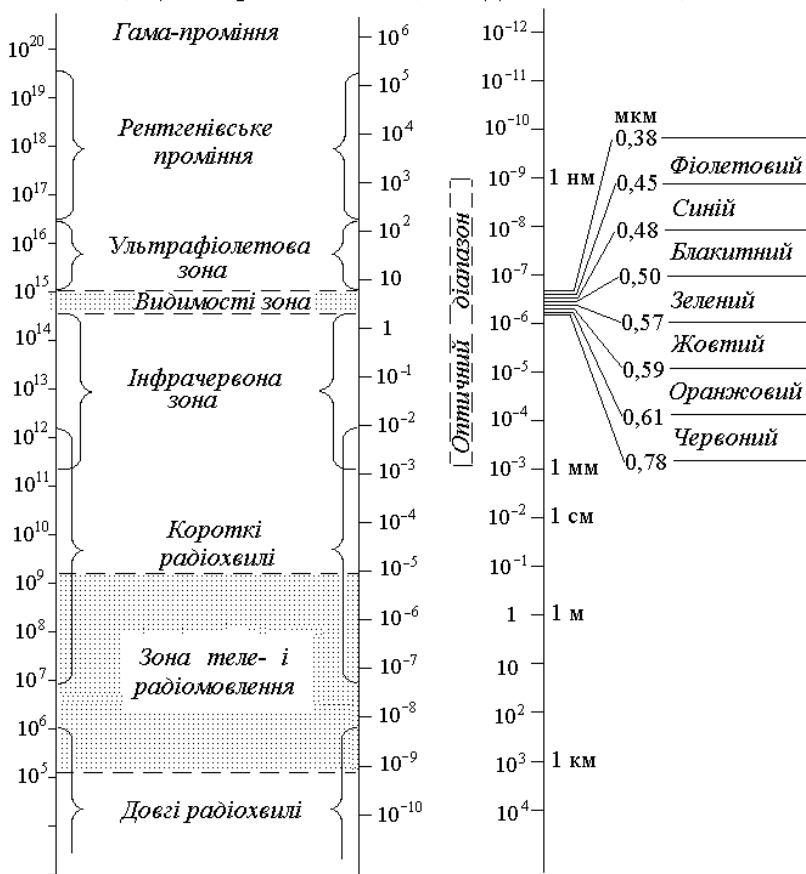


Рисунок 1.1 – Шкала електромагнітних хвиль.

Оптичне випромінювання - електромагнітне випромінювання оптичного діапазону. Випромінювання і поглинання відбувається окремими порціями, квантами - фотонами. При випускненні фотона енергія атома зменшується, а при поглинанні фотона - збільшується.

Електрон при випромінюванні фотона переходить донизу на більш низький рівень, а при поглинанні фотона електрон переходить вгору на більш високий рівень (рис. 1.2).

Квантові переходи валентних (пов'язаних) електронів з одного рівня на інший супроводжуються випромінюванням або поглинанням електромагнітної енергії, частота якої задовольняє співвідношенню

$$\nu_{mn}h = E_m - E_n, \quad (1.1)$$

де h - стала Планка, ν_{mn} - частота випромінювання (поглинання) при квантовому переході електрона з рівня E_m на рівень E_n , ($E_m > E_n$).

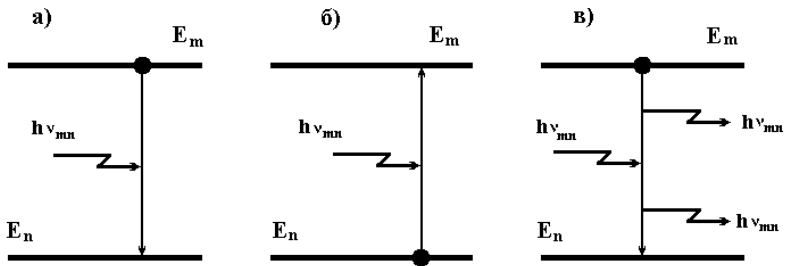


Рисунок 1.2 – Квантові переходи:

- а) - спонтанний перехід, б) - вимушений перехід з поглинанням,
в) - вимушений перехід з випромінюванням.

Переходи при взаємодії з фотонами можуть бути спонтанними (мимовільними) і вимушеними (індукованими).

Випромінювання фотона при спонтанному переході не залежить від зовнішніх факторів. Тут напрямком випромінювання і поляризація фотонів можуть бути будь-якими.

Вимушені квантові переходи відбуваються під впливом зовнішнього випромінювання частоти ν . Вони генерують фотони. Фотон - копія має напрямком випромінювання і поляризацію такі ж, як і у фотона стимулюючого посилення електромагнітного випромінювання. При цьому частота испущеного електрона збігається з частотою вимушеного випромінювання.

Квантовий генератор - джерело когерентного випромінювання, який базується на використанні явища вимушеного випромінювання.

Лазер - оптичний квантовий генератор (підсилювач) своє назву отримав від англійського laser (початкових букв фрази Light Amplification

by Stimulated Emission of Radiation-посилення світла за допомогою індукованого випромінювання).

Мазер - квантовий генератор (підсилювач) електромагнітного випромінювання радіодіапазону.

Когерентність - явище корельованого (узгодженого) протікання в часі і в просторі коливальних або хвильових процесів. Когерентне випромінювання має впорядковані амплітуду, частоту, фазу, поляризацію і напрям поширення.

Інтегральна оптика - це розділ оптоелектроніки, в якому вивчаються оптичні явища в тонких шарах напівпровідників і діелектриків, а також розробляються інтегрально оптичні елементи.

1.2 Історія оптоелектроніки

Первісна людина для передачі інформації використовував вночі багаття і запалені смолоскипи, а вдень сигнальні дими. Ці способи передачі інформації застосовувалися у ассірійців, в стародавньому Китаї, в Африці і в інших районах Землі.

За переказами, в 1084 р. до нової ери, ватажок ахейського війська, Аргос Агамемнон передав повідомлення своїй дружині Клитемнестрой про завоювання Трої і про швидке своє повернення. Для передачі повідомлення використовувалася «оптична лінія зв'язку» за допомогою дев'яти естафет з вогнів на пагорбах. Лінія зв'язку була завдовжки 800 км. Тільки в 90-х роках ХХ століття вона була перевершена, для чого людству знадобилося майже 3000 років.

Ця подія запам'яталася у народів і тому, що в день повернення з-під Трої Аргос був убитий своєю дружиною та її коханцем. Кінець цієї історії не так похмурий. Син Аргоса виріс і помстився вбивцям за смерть батька.

Виділяють два історичних етапи в освоєнні оптичних явищ. Перший етап в освоєнні оптичних явищ відповідає розвитку класичної оптики. Платон вважав, що світлові промені випускаються очима. Евклід, Птоломей і ін. Мислителями давнини на цій основі була створена теорія відображення світлового променя від плоских і сферичних дзеркал. Цим було покладено початок геометричній оптики.

Епікур і Лукрецій протиставили іншу теорію про «зліпках» з предметів, які нібито летять у всіх напрямках і потрапляють в очі.

Декарт і І. Ньютон вважали, що світло становить сукупність дрібних часток (корпускул), які рухаються по світловому променю.

Тепер уже можна було пояснити прямолінійність поширення світла в однорідному середовищі, відбиття світла від поверхні дзеркала, заломлення світлового променя на межі поділу двох середовищ і викривлення променя при його поширенні в неоднорідних середовищах.

XVIII ст. дослідження електричних розрядів в повітрі проводилися М.В. Ломоносовим, Г.В. Ріхманом (Росія) і Б.Ф. Франкліном (США).

Х. Гюйгенс ввів поняття «світлова хвиля» і «хвильова поверхня», на підставі яких світло - це хвилі, що поширюються в просторі. І. Ньютон не підтримував хвильову теорію світла через відсутність в просторі речової середовища - «ефіру».

Томасом Юнгом і Огюстеном Френелем хвильова теорія Х.Гюйгенса була розвинена при дослідженні явищ інтерференції і дифракції світла.

У 1865 р Дж. К. Максвелл відкрив теорію електромагнітних хвиль на базі системи рівнянь електродинаміки. Цим він показав єдність природи радіохвиль та оптичного випромінювання.

У 1874 р. К. Ф. Браун відкрив ефект, що випрямляє контакту метал-напівпровідник.

У 1884 р. Т. А. Едісон відкрив термоелектричний емісію.

У 1886 р. Г. Герц відкрив фотоелектричний ефект.

У 1888 р. А. Г. Столетов відкрив закони фотоэффекту, а В.А. Вуликанин виготовив селенові напівпровідникові елементи.

У 1891 р. О.В. Річардсон досліджував термоелектричний емісію, так як Т. А. Едісон ще не знав електрон, який тільки в 1897 р. відкрив Д.Д. Томсон.

Досліди Г. Герца і А.С. Попова підтвердили, що світлова хвиля є електромагнітним збуренням особливого роду. В 1895 р. А.С. Попов винайшов радіоприймач.

У 1897 р. К. Ф. Браун (Німеччина) винайшов електронно-променеву трубку з холодним катодом.

Другий етап освоєння оптичних явищ пов'язаний з вивченням оптичних спектрів поглинання і випускання. Хвильова теорія не могла пояснити нові факти. Тоді для подолання виниклих протиріч М. Планк в 1900 р. ввів поняття квант дії h як мінімальне дію з розмірністю «дії» [Дж с] для пояснення спектру випромінювання абсолютно чорного тіла.

У 1905 р. А. Ейнштейн пояснив відкритого раніше фотоэффекту за допомогою квантової теорії і припустив, що планковские кванти енергії $E = h\nu$ існують у вигляді частинок (в новій формі корпускул - фотонів), які він назвав світловими квантами.

У 1907 р Лі-Де-Форест створив ламповий тріод (де електроди: анод, катод і сітка), а Б.Л. Розінг запропонував електронно-променеву трубку для прийому телезображення.

У 1913 р Нільс Бор показав просту зв'язок частоти випромінювання ν з різницею енергій між рівнями електронів n і m в запропонованій ним моделі атома:

$$\nu_{nm} = \left| \frac{E_n - E_m}{h} \right| \quad (1.2)$$

У 1917 р почалося промислове використання фоторезисторів.

Квантово-хвильової теорії оптичного випромінювання до кінця 1920 -х рр. була остаточно сформована. Велику роль тут зіграла робота А. Ейнштейна в 1917 р. по термодинамічній рівновазі системи молекул,

де А. Ейнштейн дав поняття індукованого випромінювання, тобто генерації світла і його посилення в активному середовищі. Тільки в 1940 р. В. А. Фабрикант вказав на можливість використання індукованого випромінювання для спостереження негативного поглинання (посилення).

У 1923 р. О. В. Лосєв, досліджуючи кристали карбїду кремнію (детекторів), відкрив явище інжекційної електролюмінесценції - світіння в кристалічній ґратці напівпровідника.

У 1925 р. А. А. Чернишов запропонував прилад видикон, який здатний перетворювати зображення в електричні сигнали.

У 1933 р. П. В. Шамаков і П. В. Тимофєєв (СРСР) запропонували суперіконоскоп.

У 1933 р. В. К. Зворикін (США) винайшов іконоскоп - передавальну телевізійну трубку.

Протягом 30-х років ХХ століття і пізніше під керівництвом акадека А. Ф. Іоффе досліджувалися фізичні процеси в напівпровідникових приладах. Б. І. Давидов запропонував теорію випрямлення змінного струму в контактї «метал-напівпровідник» (Ленінградський фізико-технічний інститут.). Надалі в Німеччині В. Шотки досліджував перехід «метал-напівпровідник», який отримав назву «перехід Шотки».

Я. І. Френкель розробив квантову теорію напівпровідникових приладів, ввів поняття про вільні місця в кристалічній ґратці напівпровідників (які були названі «дірками») і теорію генерації пар електричних носіїв «електрон - дірка».

У 1940 р. створено прилади чутливі в ІК-діапазоні, а на початку 50-х рр. з'явилися сучасні фотоприлади з р-п-переходом: фотодіоди, фототранзистори і сонячні перетворювачі.

У 1948 р. Дж. Браттейн, В. Бардін, В. Шоклі (США) винайшли біполярний транзистор.

В СРСР їх виробництво почалося з 1949 р.

В середині 1950-х рр. створені перші гнучкі двошарові скляні світлопроводи і зароджується волоконна оптика, а в 1966 р. висловлена ідея волоконно-оптичного зв'язку.

У 1952 р. з'явилися польові транзистори з керуючим р-п-переходом.

У 1954 р. це рік народження квантової електроніки, коли вперше експериментально процес вимушеного випромінювання реалізований майже одночасно А. М. Прохоровим і Н. Г. Басовим (в СРСР розроблений конкретний проект) і Ч. Таунсом (в США створений діючий мазер на пучку молекул аміаку). Мазер - молекулярний генератор працював на квантових принципах посилення електромагнітних коливань з по-міццю індукованого випромінювання радіохвиль з довжиною хвилі $\lambda = 1,24$ см. За ці роботи А. М. Прохорову і Н. Г. Басову була присуджена Ленінська премія, а потім спільно з Ч. Таунсом - Нобелівська премія.

У 1955 р. виявлена інжекційна люмінесценція в арсенїді галію, запропонована пара, яка взаємопов'язана передавач (випромінювач),

приймач випромінювання і схемотехніка оптопар. Промисловий випуск оптопар для електричної розв'язки освоєний з 1965 р.

Використання індукованого випромінювання в оптичному діапазоні дозволило в 1960 р створити Т. Мейманом (США) перший твердотільний лазер на основі рубіна з довжиною хвилі $\lambda = 694$ нм. Лазери - це основа оптоелектроніки, тому 1960 р можна назвати роком народження оптоелектроніки. Однак головні напрямки розвитку оптоелектроніки визначилися до 1970 р.

В кінці 1960 р. створено газовий лазер на суміші гелію і неону ($\lambda = 633$ нм) і з'явилися нові польові транзистори «метал - оксид - напівпровідник» - МОН.

У 1961 р. з'явилися перші промислові зразки МОН-транзисторів.

У 1962 р. Н. Г. Басов передбачив можливість створення напівпровідного лазера.

У 1962-1964 рр. з'явилися світлодіоди інфрачервоного (ІК) діапазону, потім «червоні» і «зелені», а в 1967 р - перші цифрові світлодіодні індикатори на основі арсенід- фосфід-галію.

У 1963 р. в США Холл виготовив перший лазер ($\lambda = 900$ нм) на основі арсеніду галію.

У 1966 р. створено перший рідинний лазер на органічному барвнику. Два дослідники в Харлоу (Harlow) розробили скляне волокно з ослабленням (attenuation) близько 1000 дБ / км.

З 1967 р. ведуться дослідження в області пристроїв оптичної пам'яті, а випуск перших оптичних дискових накопичувачів розпочато з 1984 р.

У 1969 р. запатентовані прилади із зарядним зв'язком - основа формувателів сигналів зображення.

За період з 1963 по 1970 рр. академіком Ж. І. Алфєровим винайдені та експериментально виготовлені низькопорогові напівпровідникові гетеролазери, в тому числі що працюють в безперервному режимі при кімнатній температурі ($T \approx 300$ К).

У 1969 - 1970 рр. визначені концепції інтегральної оптики - основи оптичної обчислювальної техніки майбутнього.

У 1970 р. отримані перші високочисті оптичні волокна з низькими втратами (<1 дБ / км). Це забезпечило можливість їх застосовувати в якості оптичних хвилеводів. Сьогодні розробляються волокна з втратами до 0,005 дБ / км.

2002 р. Академік Ж. І. Алфєров отримав Нобелівську премію з фізики за теорію гетеропереходів. На основі гетеропереходів створені напівпровідникові приймачі випромінювання і випромінювачі світла - основні компоненти волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), а також гетеробіполярні транзистори апаратури зв'язку.

У 2006 р. в Росії винайдено нову речовину - гетероелектрик, що дозволило підвищити ККД у сонячних батарей та створити "зіркові батареї" з ефективністю роботи при видимому світлі близько 54 відсотків,

а в інфрачервоному спектрі - 31 відсоток, при фотострумі в 4 рази вище і масою на ватт енергії в 1000 менше, ніж у фотоелементів, існуючих сонячних батарей. Розрахунки показують, що вартість "зоряної батареї" буде набагато нижче, ніж у всіх існуючих сучасних пристроїв. Створено і оптичне скло з гетероелектрика з рекордним показником заломлення світла (що перевищує сучасні показники в десятки разів).

1.3 Класифікація ОЕП та фізичні процеси в них

Оптоелектронні прилади (ОЕП) - 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 автоматичі 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.

Лекція 2. Оптоелектронні прилади

Оптоелектронний прилад (ОЕП) - це прилад, що випромінює або перетворює електромагнітне випромінювання. Він може бути чутливим до електромагнітного випромінювання в інфрачервоній, видимій і (або) ультрафіолетовій областях спектра. У оптопарах і в деяких елементах інтегральної оптики зазначені явища можуть використовуватися для внутрішніх взаємодій їх елементів.

Всі відомі оптоелектронні прилади в даний період можна умовно класифікувати на наступні групи:

- лазери - квантові підсилювачі і генератори на напівпровідникові (газові, твердотільні на діелектриках і рідинні);
- напівпровідникові випромінювачі;
- приймачі випромінювання;
- оптрони;
- оптопари
- елементи інтегральної оптики.

Напівпровідникові випромінювачі - це оптоелектронні напівпровідникові прилади, що перетворюють електричну енергію в енергію електромагнітних хвиль в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій області спектра.

Багато з випромінювачів у видимій області спектра і інфрачервоні випромінюючі світлодіоди (ІК-світлодіоди) можуть випромінювати тільки некогерентні електромагнітні хвилі.

До випромінювачів видимій області спектра відносять світловипромінюючі діоди (СВД) і електролюмінесцентні осередки - прилади відображення інформації (порошкові і плівкові випромінювачі).

СВД малої випромінюваної потужності забезпечують генерацію світлових імпульсів малої тривалості, а великої потужності - можуть бути джерелом потужного світла і навіть елементами вуличного світлофора або використовуватися замість галогенних ламп автомобіля.

Випромінювачі у видимій області спектра виготовляють у вигляді простого індикатора (світлодіодного) або у вигляді знакового індикатора, шкали або екрану.

Інфрачервоний випромінює світлодіод - це напівпровідниковий випромінювач, який представляє собою діод, який здатний випромінювати енергію в інфрачервоній області спектра.

ІК-світлодіоди призначені для пристроїв зв'язку, використовуються в оптронах як датчики, а також у багатьох приладах і пристроях.

2.1 Когерентні випромінювачі інфрачервоних хвиль – НПП лазери

Когерентні випромінювачі інфрачервоних хвиль - це напівпровідникові лазери з багатьма класифікаційними групами.

Перша група - з різними видами порушення: електронном поздовжнім і поперечним накачуванням; оптичним накачуванням фотонами з енергією $h\nu \geq E_g$ або інжекцією неосновних носіїв зарядів (ННЗ) через р-n-перехід при пропусканні через нього струму в прямому напрямку.

Друга група - за відповідним електричним переходом:

- "простого" р-n-переходу з гомогенного матеріалу - гомоперехода за рахунок розподілу домішок в двох металургійні з'єднаних кристалах;

- гетероперехода - електричного переходу на атомному рівні двох різних за хімічним складом напівпровідників в одному кристалі при синтезі одного шару над іншим. Розрізняють типи гетероструктур з напівпровідників з різними по ширині забороненими зонами.

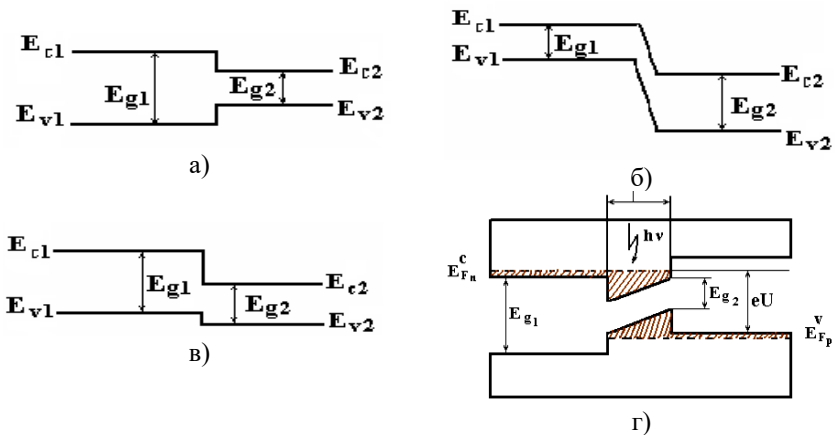


Рисунок 2.1 – Типи гетероструктур.

На рис. 2.1 наведені типи гетероструктур з умовними позначеннями:

а) гетероструктура першого типу, коли вся заборонена зона більш вузькозонного напівпровідника E_{g2} знаходиться всередині забороненої зони E_{g1} більш широкозонного напівпровідника;

б) у гетероструктурі другого типу нижня границя зони провідності E_{c2} другого напівпровідника розташовується нижче ніж верхня границя валентної зони E_{v1} першого напівпровідника;

в) в гетероструктурі третього типу нижня границя зони провідності другого напівпровідника E_{c2} розташовується в забороненій зоні першого напівпровідника E_{g1} , а верхня границя валентної зони першого напівпровідника E_{v1} в забороненій зоні другого E_{g2} ;

г) подвійного гетеропереходу (ГП).

Третя група - по виду випромінювальної рекомбінації електрона (з прямими вертикальними переходами з валентної зони в зону провідності, як у всіх лазерах, і з переходами між підзонами розмірного квантування електронів в квантовій ямі або електронними рівнями квантової точки, як в каскадних лазерах.

Четверта група - по виду конструкції активної області:

- смужкові гетеролазери, у яких активна область у вигляді вузької смужки, а випромінювання з торця р-п-переходу;

- поверхнево-випромінюючі інжекційні мікролазери, активні області яких містять вертикально-пов'язані квантові точки.

П'ята група - а типом резонатора - коливальні системи, які забезпечують позитивний зворотний зв'язок:

- плоский резонатор, який називають резонатором Фабрі - Перо;

- резонатор з сферичними дзеркалами;

- складові і дисперсійні резонатори з додатковими елементами, складові і дисперсійні резонатори з додатковими елементами, які відбирають поздовжні моди;

- кільцеві з дзеркалами, забезпечують поширення електромагнітних хвиль по замкнутому контуру;

- з розподіленою зворотним зв'язком (РЗС), де роль дзеркал виконує переодична ґратка, наприклад, лазера з подвійною гетероструктурою, що виконується на одній з меж гетероперехода;

- розподілені бреггівськими відбивачі (дзеркала резонатора) у вигляді діелектричних шарів, що чередуються, товщиною d_1 і d_2 з різними показниками заломлення n_1 і n_2 , при виконанні умови

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4. \quad (2.1)$$

Шоста група - за величиною потужності лазери поділяють на потужні і на малопотужні.

Потужні генерують в одномодовому (одночастотному) безперервному режимі понад 100 мВт, а при безперервному - многомодовому режимі більше 0,5 ... 1 Вт.

Деякі лазери генерують потужність в одномодовому безперервному режимі до 0,5 Вт, а в многомодовому безперервному режимі близько 5 ... 10 Вт.

Сьогодні є можливості отримати великі потужності оптичного випромінювання:

- при підсумовуванні світлових потоків декількох окремих лазерів методами волоконної оптики;

- при створенні методами інтегральної технології на одному кристалі однотипних смужкових структур із загальними епітаксійними шарами і загальною базою - лазерних лінійок;

- при підсумовуванні на кристали випромінювань від окремих лазерних елементів методами інтегральної оптики - спеціальними хвилеводними структурами на цьому ж кристалі.

Лазерна лінійка дозволяє отримати в безперервному режимі потужність до 50 Вт.

Подальший крок підвищення випромінюваної потужності - створення лазерних решіток з лінійок.

2.2 Приймач випромінювання

Приймач випромінювання - це оптоелектронний напівпровідниковий або вакуумний прилад, який чутливий до електромагнітного випромінювання інфрачервоної, видимій та/або ультрафіолетової частини спектру. Деякі з них можуть і безпосередньо перетворювати енергію електромагнітного випромінювання в електричну.

Фотоелектронні прилади - електровакуумні прилади, що перетворюють електромагнітні сигнали оптичного діапазону в електричні напруги і струми. Тут розрізняють вакуумні фотоелементи і фотоелектронні помножувачі.

Напівпровідникові приймачі випромінювання поділяються на фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристри, прилади із зарядним зв'язком (ПЗЗ), приймачі проникаючої радіації і корпускулярно-перетворювальні прилади фото-елементи - сонячні батареї (та зоряні).

2.3 Оптопара

Оптопара - це прилад некогерентної оптоелектроніки, який об'єднує випромінювач і фотоприймач, між якими є оптична зв'язок і забезпечується електрична ізоляція.

Оптронні поділяють на прості оптопари і на спеціальні види оптопар.

Прості оптопари будують на дискретних елементах. Це резисторні, діодні, диференціальні діодні, тиристорні, фотоварікапні, діод-транзисторні, на лавинних фотодіодах, на будь-якому фототранзисторі та/або складеному фототранзисторі, на одноперехідних фототранзисторах. Можливі логічні комірки типу **i**, **або** та інші комірки.

Транзисторні та тиристорні оптопари використовуються в приладах безконтактного управління і комутації високовольних потужнострумових ланцюгів.

Диференціальні оптопари складаються з одного випромінювача, який впливає на два і більше фотоприймача.

Спеціальні види оптопар виготовляють з додатковими пристроями, наприклад, з гнучкими світловодами, з відкритим оптичним каналом або з керованим оптичним каналом.

На базі оптопар з відкритим оптичним каналом і з керованим оптичним каналом будують оптоелектронні датчики, які складаються з фотоприймачів і світлодіодів.

2.4 Оптоелектронні датчики

Оптоелектронні датчики перетворюють зовнішні впливи в електричні або оптичні сигнали, які використовуються для контролю.

Датчики поділяють на чотири групи:

- з відкритим каналом, в якому розміщують елемент контролю;
- з входним чутливим до зовнішніх впливів оптичним волокном;
- з входним планарним світловодом, який виготовляється методами інтегральної оптики;
- з волоконно-оптичними зв'язками, коли датчик вбудовується в місце розриву оптичного волокна.

Йде широка інтеграція волоконно-оптичних датчиків на спільній з ВОЛЗ конструктивно-технологічній основі. Це дозволяє розвивати напрямок інформатики, так звану оптоелектронну телематику, де безпосередньо з середовища витягується інформація, що поєднується з її обробкою.

Елементами інтегральної оптики є створені в єдиному технологічному циклі плівкові оптичні, оптоелектронні елементи і оптичні інтегральні схеми.

У пасивних компонентах ВОЛЗ, таких як оптичних мікроволноводах, спрямовані відгалужувачі, планарних дзеркалах, що фокусують лінзах, фільтрах і ін. В якості хвилеводу застосовується планарний світловод. Планарний світловод - це діелектрична або напівпровідникова плівка, нанесена на поверхню підкладки або занурена в неї.

До активних елементів інтегральної оптики відносять випромінювачі, фотоприймачі, підсилювачі, модулятори, перетворювачі, детектори, перемикачі та оптичні схеми інших пристроїв.

Активні елементи інтегральної оптики мають обсяги активного середовища на два-три порядки менше, ніж у дискретних елементів. Тому споживана потужність активних елементів (приблизно пропорційна об'єму активного середовища) мала, і вони мають високу експлуатаційну надійність.

2.5 Квантові переходи електронів

Оптичне випромінювання володіє і хвильовими, і корпускулярними властивостями. Тому оптичне випромінювання зручно розглядати як фотонний колектив, який складається з числа N_k фотонів в k -х станах.

Квант має енергію $E = h\nu$ і імпульс hk , де $k = \frac{2\pi}{\lambda}n$, а n - одиничний вектор у напрямку поширення хвилі.

У квантовій теорії електромагнітного випромінювання світла обмін енергією і імпульсом між фотоном та в нашому випадку електроном відбувається шляхом народження одних і зникнення інших квантів світла. На це вказують закони збереження енергії і імпульсу:

$$\begin{aligned} h\nu + E &= h\nu' + E', \\ hk + p &= hk' + p', \end{aligned} \quad (2.2)$$

де E та p - енергія і імпульс електрона до взаємодії з квантом світла, а E' та p' - після взаємодії; енергія $h\nu$ та імпульс hk фотона до взаємодії, а $h\nu'$ та hk' - після взаємодії.

На першому етапі люмінесценції можливі різні переходи електронів: зона-зона, зона-домішковий рівень і переходи між рівнями домішки. При міжзонних переходах можливі два основні випадки, відповідні прямим і непрямим переходам.

Наявність прямих і непрямих переходів пояснюється залежністю енергії електрона від його імпульсу.

Нагадаємо з курсу загальної фізики, що імпульс електрона p дорівнює добутку його маси m на швидкість руху $p = mv$.

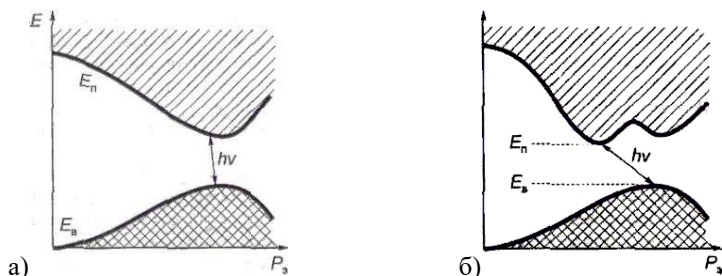


Рисунок 2.2 – Залежність енергії електрона від імпульсу для прямих (а) і непрямих (б) переходів електронів.

Прямий перехід - це перехід електрона без зміни його імпульсу. Непрямий перехід супроводжується зміною імпульсу електрона, яке компенсується імпульсом випромінюваного або поглинається фотона.

Можуть відбуватися також переходи електронів з валентної зони в зону провідності зі зміною імпульсу електрона ($P_{e1} \neq P_{e2}$) - непрямі переходи. При цьому в процесі поглинання енергії, крім фотона і електрона, повинна брати участь ще третя частинка, яка забере частину імпульсу на себе.

Основні матеріали напівпровідникових випромінювачів (GaAs і потрібні з'єднання на його основі - GaAlAs і GaAsP) відносяться до прямозонних напівпровідників, тобто до таких, в яких дозволені прямі оптичні переходи зона-зона.

Виконання закону збереження імпульсу (воно також обов'язково для будь-якого електронного переходу, як і дотримання закону збереження енергії) при прямих переходах не вимагає участі в рекомбінації третьої (крім електрона і дірки) частинки. Внаслідок цього ймовірність прямих оптичних переходів висока і прямозонні напівпровідники є ефективними люмінесцентними матеріалами.

У непрямозонних напівпровідниках (наприклад, в фосфід галію GaP) мінімум зони провідності зміщений по осі імпульсу. Випромінювальна рекомбінація електрона з діркою йде лише на деякому комплексі, якому передається надлишковий імпульс і, відповідно, частина енергії. Довжина хвилі випромінювання при непрямих переходах виходить більше. Проте випромінювальна рекомбінація може ефективно йти через відповідні домішкові центри в два етапи: спочатку відбувається локалізація носія одного знака на домішковому центрі, а потім рекомбінація цього носія з вільним носієм іншого знака. В якості таких центрів випромінювальної рекомбінації в фосфіді галію, наприклад, виступають комплекси донор - акцептор ($Zn^{+} - O^{-}$) або нейтральні пастки (атом N замість атома P в ґратці GaP).

Слід зазначити, що самопоглинання випромінювання йде в прямозонні напівпровідниках значно сильніше, ніж в непрямозонних.

Перевага в сучасних випромінювачах віддано напівпровідникам з прямими переходами. Вибір ширини забороненої зони, визначається робочою довжиною хвилі випромінювача в оптичному діапазоні хвиль.

Для роботи в діапазоні видимого випромінювання (0,38 ... 0,78 мкм) необхідні напівпровідники з шириною забороненої зони 1,5 ... 3,0 еВ. Ця вимога відразу виключає використання германію, кремнію та інших напівпровідників, технологія яких добре розроблена, і обумовлює перехід до матеріалів типу $A^{III}B^V$, їх твердих розчинів та ін.

У напівпровідниках генерація оптичного випромінювання забезпечується зазвичай за допомогою електролюмінесценції. При електролюмінесценції енергія збудження споживається з електричного поля.

Розрізняють два види електролюмінесценції:

- *інжекційну*, яка виникає в р-п-переході, що знаходиться під прямою напругою;
- *предпробойну*, яка розвивається в сильних полях, близьких до тих, при яких з'являється електричний пробій р-п-переходу. Тут: I_{th} - порогове значення струму інжекції (від англійського *threshold* - поріг, рівень).

У гомолазері порогове значення густини струму високе (більше 50 кА/см²).

При температурі 20 °С і постійному струмі виділяється багато тепла, генерації в лазері не виникало і він не працював в безперервному режимі. Тут інжектвані носії мали малу область, обмежену довжиною хвилі.

У США в 1970 році в "Белл лабораторіях" доктора Іхоязі і М. Б. Панішев виготовили лазери на подвійній гетероструктурі $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ і GaAs . Гранична густина струму тут до $1,6 \text{ кА/см}^2$. В основі процесу перетворення електромагнітних хвиль покладено принцип випромінювання світла при переході електрона з зони провідності в валентну зону. Для цього необхідно забезпечити інжекцію носіїв зарядів, цей процес називається накачуванням.

За допомогою інжекції забезпечується створення нерівноважних носіїв зарядів, що забезпечує генерацію носіїв зарядів в р-п переході. Подаючи пряму напругу на лазер, забезпечуємо струм. Якщо змінити струм інжекції, то на виході змінюється світлова енергія, це оптична модуляція (тут пряма, безпосередня).

Якщо інжекційний ток перевищує I_{th} , то йде різке лінійне збільшення оптичного виходу лазера. Тут режим повільного зростання вимушеного випромінювання замінюється режимом генерації. Зауважимо, що до режиму генерації час таке ж, що й у лампи розжарювання. В області I_{th} - процес упорядкування фази.

2.6 Спонтанне і вимушене випромінювання

У лазерах за допомогою вимушеної рекомбінації електронів і дірок відбувається вимушене випускання фотонів збуреним атомом. При вимушеному опроміненні, рекомбінація пропорційна інтенсивності випромінювання, а фаза дорівнює фазі падаючого світла. Це процес посилення світла. Тут управління випромінюванням відбувається за допомогою електромагнітних хвиль. Причому і посилення і генерація проходять як єдиний, загальний процес.

В рівноважних умовах на більш високих енергетичних рівнях, при будь-якій температурі, число рівнів менше, ніж на низьких. Посилення тут немає, так як поглинання переважає над вимушеною рекомбінацією. У стані з інверсною заселеністю, коли число електронів на одному з рівнів з більшою енергією більше числа електронів, ніж на рівні з меншою енергією.

По –перше, поглинання світла мало в цьому шарі, так як близько верхня границя валентної зони та майже немає електронів перехоплюючих кванти.

По-друге, в напівпровіднику з інверсною заселеністю може бути вимушена рекомбінація. Її створюють:

1. За допомогою інжекції носіїв зарядів при прямому включенні переходу. Застосовують в інжекційних лазерах.

2. За допомогою електронного збудження, при бомбардуванні пучком електронів.

3. За допомогою оптичного накачування від когерентного та світла.

4. За допомогою ефектів сильного електричного поля (при лавинному розмноженні носіїв зарядів або тунелюванні електронів при їх переході з енергетичних рівнів поблизу верхньої границі валентної зони на енергетичні рівні поблизу нижньої границі зони провідності).

Інверсну заселеність отримують, коли одна з областей р-п переходу вироджена (перенаселена). Чим більше прямий струм, що складається з електронів і дірок, тим більше інверсна заселеність. Раніше прямий струм дорівнював I_{th} - це мінімальний струм, коли переважає вимушена рекомбінація над поглинанням.

При прямому струмі, який перевищує I_{th} , створюється підсилююче середовище для світла (принцип роботи інжекційного лазера з резонатором Фабрі-Перо).

Джерелами випромінювання для передавачів з прямою модуляцією є:

1. СВД, які застосовуються в мережах зв'язку з малою швидкістю передачі інформації, до 1 Гбіт/с (для замкнених систем спостереження, в локальних обчислювальних мережах, в вимірювальних системах і т.і., коли застосовують багатомодові оптичні волокна).

2. У мережах зв'язку зі швидкістю передачі інформації до 2,5 Гбіт/с використовуються лазери з резонатором Фабрі-Перо.

3. Лазери з розподіленим зворотним зв'язком (РЗЗ-лазери).

4. Лазери з розподіленими бреггівськими відбивачами (РБВ) (в мережах зв'язку зі швидкістю передачі інформації більше 2,5 Гбіт/с).

5. Лазери з вертикальним резонатором та вертикальним випромінювачем (будуть використовуватися в майбутньому, в мережах зв'язку зі швидкістю передачі інформації до 10 Гбіт/с).

Однак в дослідницьких центрах досягнуті великі швидкості (понад 1 Тбіт/с), а комерційні системи зараз мають швидкість передачі інформації 40 Гбіт/с. Тут йде одночасна робота багатьох потоків інформації з меншою швидкістю, використовується тимчасовий поділ (OTDM-технологія) - тимчасове мультиплексування оптичними методами. Тут перспективними лазерами будуть лазери з пасивною синхронізацією мод. Це твердотільні лазери.

Розглянемо принцип роботи першого лазера на основі р-п переходу Фабрі-Перо (лазер ФП).

Інверсна заселеність тут виходить, коли одна з областей вироджена, тоді чим більше прямий струм, що складається з електронів і дірок тим більше інверсна заселеність.

Якщо торці р-п переходу протилежні, строго паралельні і відполіровані, то кванти світла кілька разів проходять в площині переходу з посиленням світла.

Якщо грані не металізувати, то відбиття світла доходить до 35%. Багаторазово відбиваючись від торців, кванти світла виходять з напівпровідника, при цьому вони рухаються уздовж активної зони. Дві інші грані скошені під деяким кутом, що забезпечує відсутність генерації світла між ними. При багаторазовому відбитті йде процес посилення світла. У випромінювання при цьому велика енергія.

Лекція 3. Фоторезистори

Фоторезистори як елементи ланцюга перетворення інформації застосовуються в різних системах, призначених для контролю і виміру геометричних розмірів і швидкостей руху об'єктів, температури, управління різними механізмами, для визначення якісного складу твердих, рідких і газоподібних середовищ, включення і виключення різних пристроїв та інших. При цьому в багатьох випадках фоторезисторний спосіб отримання і обробки інформації дає явну перевагу в порівнянні з іншими способами. Експлуатація фоторезисторних пристроїв показує їх високу надійність і широкі можливості.

Успіхи в розвитку фоторезисторної автоматики стали можливими завдяки значному вдосконаленню конструкції і розширенню номенклатури серійно випускаються фоторезисторів. Вони мають високу чутливість, досить малою інерційністю, мають незначні габарити, довговічні в роботі, забезпечують безконтактні вимірювання і контроль. При їх застосуванні досягається однобічність зв'язку між джерелом сигналу інформації - випромінювачем і споживачем - фоторезистором.

В останні роки фоторезистори широко застосовуються в багатьох галузях науки і техніки. Це пояснюється їх високою чутливістю, простотою конструкції, малими габаритами і значною допустимою потужністю розсіювання. Значний інтерес представляє використання фоторезисторів в оптоелектроніці.

У сучасній електронній техніці широко використовуються напівпровідникові прилади, засновані на принципах фотоелектричного і електрооптичних перетворення сигналів.

Перший з цих принципів обумовлений зміною електрофізичних властивостей речовини в результаті поглинання в ньому світлової енергії (квантів світла).

Другий принцип пов'язаний з генерацією випромінювання в речовині, обумовленої доданням до нього напругою і що протікає через світловипромінювальних елемент струмом.

Зазначені принципи складають наукову основу оптоелектроніки - нового науково-технічного напрямку, в якому для передачі, обробки та зберігання інформації використовуються як електричні, так і оптичні засоби і методи.

3.1 Принцип дії фоторезисторів

Все різноманіття оптичних та фотоелектричних явищ в напівпровідниках можна звести до наступних основних:

- поглинання світла і фотопровідність;
- фотоэффект в р-п переході;
- електролюмінесценція;

- стимульоване когерентне випромінювання.

Явищем фотопровідності називається збільшення електропровідності напівпровідника під впливом електромагнітного випромінювання. Причина фотопровідності - збільшення концентрації носіїв заряду - електронів в зоні провідності і дірок у валентній зоні. Внаслідок цього провідність напівпровідника зростає на величину

$$\Delta\sigma = e (\mu_n \Delta n_i + \mu_p \Delta p_i), \quad (3.1)$$

де e – заряд електрона; μ_n - рухливість електронів; μ_p - рухливість дірок; Δn_i - концентрація генерованих електронів; Δp_i - концентрація генерованих дірок.

Оскільки основним наслідком поглинання енергії світла в напівпровіднику є переведення електронів з валентної зони в зону провідності, то енергія кванта світла фотона повинна задовольняти умові

$$h\nu_{кр} \geq \Delta W, \quad (3.2)$$

де h – стала Планка; ΔW – ширина забороненої зони напівпровідника; $\nu_{кр}$ - критична частота електромагнітного випромінювання (червона межа фотопровідності).

Випромінювання з частотою $\nu < \nu_{кр}$ не може викликати фотопровідність, так як енергія кванта такого випромінювання $h\nu < \Delta W$ недостатня для перекиду електрона з валентної зони в зону провідності. Якщо ж $h\nu > \Delta W$, то надлишкова щодо ширини забороненої зони частина енергії квантів передається електронам у вигляді кінетичної енергії.

Критичній частоті $\nu_{кр}$ відповідає гранична довжина хвилі:

$$\lambda_{гр} = c/\nu_{кр}, \quad (3.3)$$

де c - швидкість світла ($3 \cdot 10^8$ м/с).

При довжинах хвиль, більш граничної, фотопровідність різко падає. Так, для германію гранична довжина хвилі складає приблизно 1,8 мкм. Однак спад фотопровідності спостерігається і в області малих довжин хвиль. Це пояснюється швидким збільшенням поглинання енергії з частотою і зменшенням глибини проникнення падаючої на напівпровідник електромагнітної енергії. Поглинання відбувається в тонкому поверхневому шарі, де і утворюється основна кількість носіїв заряду. Поява великої кількості надлишкових носіїв тільки у поверхні слабо впливає на провідність всього обсягу напівпровідника, так як швидкість поверхневої рекомбінації більше об'ємної і проникаючі вглиб неосновні носії заряду збільшують швидкість рекомбінації в об'ємі напівпровідника.

Фотопровідність напівпровідників може виявлятися в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах електромагнітного спектра в залежності від ширини забороненої зони, яка, в свою чергу, залежить від типу напівпровідника, температури, концентрації домішок і напруженості електричного поля.

Розглянутий механізм поглинання світла, що приводить до появи вільних носіїв заряду в напівпровіднику, називають фотоактивним. Оскільки при цьому змінюється провідність, а отже, внутрішній опір напівпровідника, вказане явище було названо фоторезистивним ефектом. Основне застосування фоторезистивного ефекту знаходить у світлочутливих напівпровідникових приладах - фоторезисторах, які широко використовуються в сучасній оптоелектроніці і фотоелектронної автоматичній.

Фоторезистор представляє собою недротаний дискретний напівпровідниковий резистор, омичний опір визначається ступенем освітленості. Під впливом світлового потоку електричний опір шару змінюється в кілька разів (у деяких типів фотоопорів воно зменшується на два-три порядки). Залежно від застосовуваного шару напівпровідникового матеріалу фотоопори підрозділяються на сірчистої-свинцеві, сірчистої-кадмієві, сірчистої-вісмутіві і полікристалічні селено - кадмієві. Фотоопори мають високу чутливість, стабільність, економічні і надійні в експлуатації. В цілому ряді випадків вони з успіхом замінюють вакуумні та газонаповнені фотоелементи.

Багато фоторезисторів, представлених в довіднику, мають старе позначення, що складається з двох літер: ФС, подальшої літери, яка вказує на матеріал fotocутливого елемента (К-CdS, Д-CdSe, А-PbS); цифри - вказівка на конструктивне оформлення фоторезистора, іноді перед цифрою стоїть буква Г або П характеризують конструктивне виконання, і що означають, що конструкція герметизована для умов тропічного клімату і підвищеної вологості. (Г - герметизовані, П - плівкові).

Нове позначення фоторезисторів складається з букв ФР і номера розробки. Наприклад, ФР-193 Д означає: фоторезистор з номером розробки 193, групи Д. Назва типу фоторезисторів складається з букв і цифр, причому в старих позначеннях букви А, К, Д позначали тип використаного світлочутливого матеріалу, в новому ж позначенні ці букви замінені цифрами.

У табл.1 приведені найменування найбільш поширених позначень фоторезисторів.

Фоторезистори випускаються в пластмасовому або металевому корпусі, а також в безкорпусному варіанті. Більшість приладів є неохолоджуваними, тобто призначені для роботи при температурі навколишнього середовища. Але випускається цілий ряд приладів охолоджуваних, робота яких можлива тільки після заливки в спеціальну

посудину холодоагенту, призначеного для охолодження фоточутливого елемента.

Таблиця 3.1. Типові позначення фоторезисторів

Види фоторезисторів	Позначення
Сірчисто-свинцеві	ФСА-0, ФСА-1, ФСА-6, ФСА-Г1, ФСА-Г2
Сірчисто-кадмієві	ФСК-0,1,2,4,5,6,7,ФСК-Г1,ФСК-Г2,ФСР;-Г7, ФСК-П1 СФ2-1, 2, 4, 9, 12
Селенисто-кадмієві	ФСД-0, ФСД-1, ФСД-Г1 СФ3-1, 8

Напівпровідникові фоторезистори працюють в ланцюгах як постійного, так і змінного струму. Технічними умовами допускається так само використання фоторезисторів в імпульсних режимах, при середній потужності розсіювання, що не перевищує максимально допустимого значення. Фоторезистори можуть працювати при великій інтенсивності світла, за умови неперевикнення граничного значення фотоструму і потужності розсіювання.

3.2 Будова фоторезисторів

Для виготовлення серійних фоторезисторів використовуються різні типи матеріалів: сірчистий кадмій (CdS), селенистий кадмій (CdSe), сірчистий свинець (PbS) і селенід свинцю (PbSe). Фоторезистори чутливі до інфрачервоного випромінювання довгохвильового діапазону виготовляють на основі поєднання кадмій-ртуть-телур і антимоніда індію (InSb).

Світлочутливий елемент в деяких типах фоторезисторів виконаний у вигляді круглої або прямокутної таблетки, спресованої з порошкоподібного сульфїду або селенїду кадмію, в інших він представляє собою тонкий шар напівпровідника, нанесеного на скляне підкладинку. В тому і іншому випадку з напівпровідниковим матеріалом з'єднані два металевих виведення. Залежно від призначення фоторезистори мають абсолютно різне конструктивне оформлення. Іноді це просто пластина напівпровідника на скляний підкладинці з токонесучими виходами, в інших випадках фоторезистор має пластмасовий корпус з жорсткими стрижнями. Серед таких фоторезисторів слід особливо відзначити ФСК - 6, пристосований для роботи від відбитого світла, для чого його корпус має в центрі отвір для проходження світла до поверхні, що відбиває його. Випускаються фоторезистори в металевому корпусі з цоколем, що нагадує ламповий, або в корпусі, як у герметичних конденсаторів або транзисторів. Плівкові фоторезистори випускаються в

пластмасових і металевих корпусах з вологозахисним покриттям світлочутливого елемента прозорими епоксидними смолами.

Конструкція монокристалічного і плівкового фоторезисторів показана на рис. 3.1.

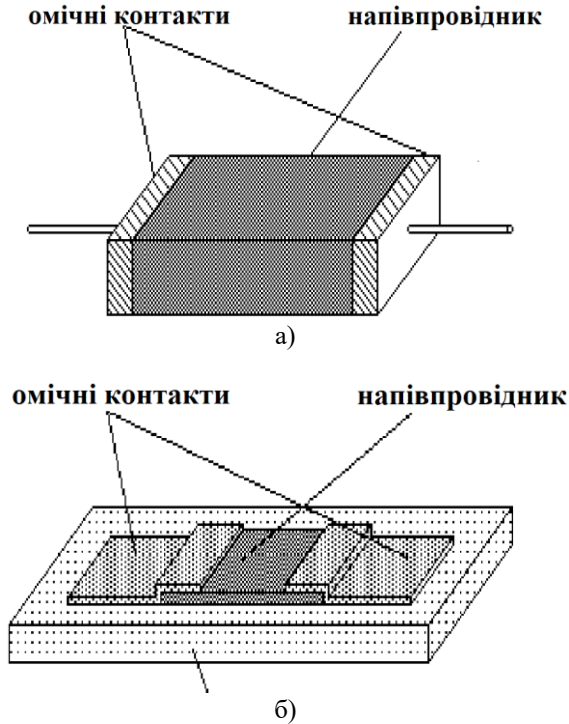


Рисунок 3.1 – Фоторезистори: монокристалічний (а) і плівковий (б).

Основним елементом фоторезистора є в першому випадку монокристал, а в другому - тонка плівка напівпровідникового матеріалу.

Якщо фоторезистор включений послідовно з джерелом напруги (рис. 3.2) і не освітлений, то в його ланцюзі буде протікати темновий струм

$$I_T = E / (R_T + R_H), \quad (3.4)$$

де E – е.р.с. джерела струму; R_T – величина електричного опору фоторезистора в темряві, яка називається темновим опором; R_H – опір навантаження.

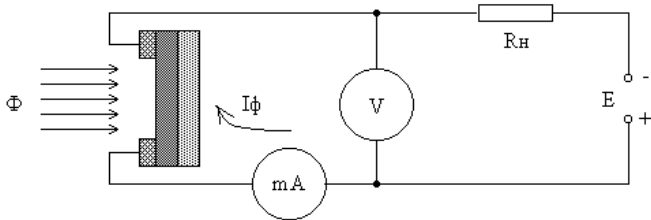


Рисунок 3.2 – Схема включення для вимірювання параметрів і характеристик фоторезисторів.

При висвітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на переніс електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно - діркових пар зростає, опір фоторезистора падає і через нього тече світловий струм

$$I_c = E / (R_c + R_n). \quad (3.5)$$

Різниця між світловим і темновим струмом дає значення струму I_ϕ , що отримав назву первинного фотоструму провідності

$$I_\phi = I_c - I_T. \quad (3.6)$$

3.3 Характеристики фоторезисторів

До основних характеристик фоторезисторів відносяться: вольт-амперна, світлова (люксамперная), спектральна та частотна.

Вольт-амперна характеристика характеризує залежність фотоструму (при постійному світловому потоці Φ) або темнового струму від прикладеної напруги. (Рис. 3.3).

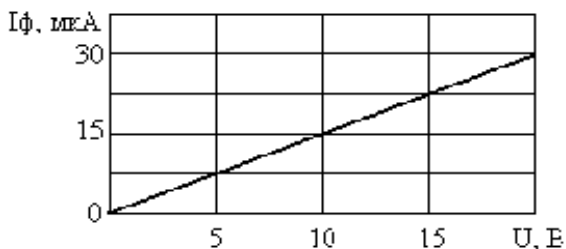


Рисунок 3.3 – Вольт-амперна характеристика фоторезистора.

Закон Ома порушується в більшості випадків тільки при високих напругах на фоторезисторах. Ця характеристика лінійна в досить широких

межах. Для деяких типів фоторезисторів при напруженні менше робочого спостерігається нелінійність.

Світлова характеристика характеризує залежність фотоструму від падаючого світлового потоку постійного спектрального складу. Напівпровідникові фоторезистори мають нелінійну люксамперную характеристику (рис. 3.4).

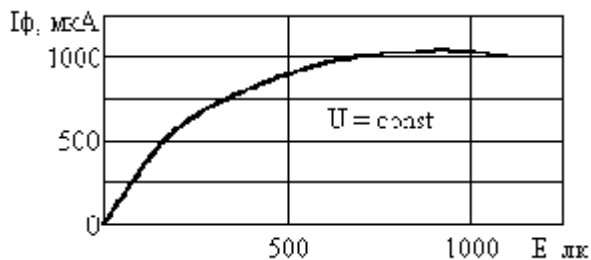


Рисунок 3.4 – Світлова характеристика фоторезистора.

Найбільша чутливість виходить при малих освітленості. Це дозволяє використовувати фоторезистори для вимірювання дуже малих інтенсивностей випромінювання. При збільшенні освітленості світловий струм зростає приблизно пропорційно кореню квадратному з освітленості. Нахил люксамперной характеристики залежить від прикладеної до фоторезистору напруги.

Спектральна характеристика характеризує чутливість фоторезистора при дії на нього потоку випромінювання постійної потужності певної довжини хвилі. Спектральна характеристика визначається матеріалом, використовуваним для виготовлення світлочутливого елементу. Як видно з цих характеристик, фоторезистори з сірчисто-кадмієвими світлочутливими елементами мають максимальну чутливість у видимій частині спектру, фоторезистори, виконані на основі селенистого кадмію, найбільш чутливі до червоної і інфрачервоної частин спектру, а сірчисто-свинцеві фоторезистори мають максимум чутливості в інфрачервоній області спектра (рис. 3.5).

Частотна характеристика характеризує чутливість фоторезистора при дії на нього світлового потоку, що змінюється з певною частотою. Наявність інерційності у фоторезисторів призводить до того, що величина їх фотоструму залежить від частоти модуляції падаючого на них світлового потоку - зі збільшенням частоти світлового потоку фотострум зменшується (рис. 3.6). Інерційність обмежує можливості застосування фоторезисторів при роботі зі змінними світловими потоками високої частоти.

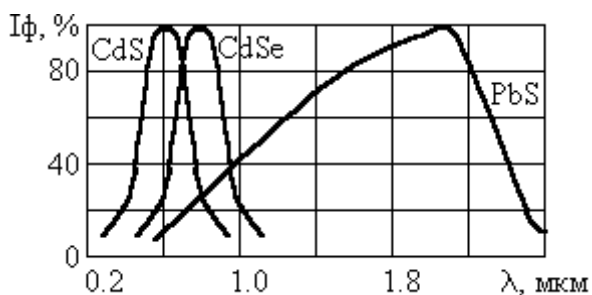


Рисунок 3.5 – Спектральна характеристика фоторезистора.

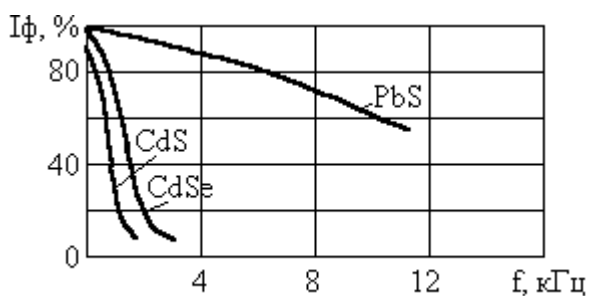


Рисунок 3.6 – Частотна характеристика фоторезистора.

Як видно з характеристики, величина сигналу, що знімається з фоторезистора, зменшується зі збільшенням частоти модуляції світлового потоку. Чутливість фоторезисторів змінюється (зменшується) в перші 50 годин роботи, залишаючись надалі практично незмінною протягом усього терміну служби, що вимірюється кількома тисячами годин. Інтервал робочих температур для сірчистої-кадмієви фоторезисторів становить від -60 до $+85$ $^{\circ}\text{C}$ для селенисто-кадмієвих - від -60 до $+40$ $^{\circ}\text{C}$ і для сірчисто-свинцевих - від -60 до $+70$ $^{\circ}\text{C}$.

Лекція 4. Фотодіоди

Будь-яке оптоелектронний пристрій містить фотоприймальний блок. І в більшості сучасних оптоелектронних пристроїв фотодіод представляє основу фотоприймача.

Фотодіоди характеризуються найкращим поєднанням фотоелектричних параметрів, основних з точки зору використання в оптоелектроніці: високі значення чутливості і швидкодії, малі значення паразитівних параметрів (наприклад, струм витоку). Простота їх дозволяє досягнути фізичного і конструкційного оптимуму і забезпечити найповніше використання падаючого світла.

У зіставленні з іншими, більш складними фотоприймачами, вони мають найбільшу стабільність температурних характеристик і володіють кращими експлуатаційними властивостями.

Основний недолік, на який зазвичай звертають увагу, - відсутність посилення. Але він досить умовний. Майже в кожному оптоелектронному пристрої фотоприймач працює на ту чи іншу налагоджену електронну схему. І введення підсилюваного каскаду в неї значно простіше і доцільніше, ніж надання фотоприймача невластивих йому функцій посилення.

4.1 Фізичні основи внутрішнього фотоефекту

Падаючий на речовину потік світла може відчувати відбиття, поглинання або проходити наскрізь.

Якщо поглинене світло призводить до такого збільшення енергії електронів, що вони залишають об'єм, який займає речовина, говорять про зовнішній фотоефект. Якщо при висвітленні змінюється енергетичний стан носіїв заряду всередині твердого тіла, то ми маємо справу з внутрішнім фотоефектом. При цьому додаткова провідність, обумовлена носіями заряду, створеними випромінюванням, називається фотопровідність.

При внутрішньому фотоефекті первинним актом є поглинання фотона. Тому процес утворення вільних носіїв заряду під впливом випромінювання буде проходити по-різному в залежності від особливостей процесу поглинання світла. До того ж поглинений світло не завжди викликає фотоефект.

Існує декілька видів поглинання світла.

Власне поглинання - цей вид поглинання має місце в тому випадку, коли оптичне збудження електронів відбувається з валентної зони в зону провідності. Для напівпровідника з прямими долинами при вертикальних переходах енергія фотона $h\nu$ повинна бути не менше ширини забороненої зони, тобто

$$h\nu \geq E_g. \quad (4.1)$$

Для сильно легovanого напівпровідника n-типу, коли рівень Фермі розташований вище краю зони провідності на величину ξ_n , нижня межа фотопровідності буде відповідати

$$h\nu = E_g + \xi_n. \quad (4.2)$$

У сильно легovanому напівпровіднику p-типу рівень Фермі лежить на величину ξ_p нижче краю валентної зони, тому

$$h\nu = E_g + \xi_p. \quad (4.3)$$

При великих енергіях фотонів поглинання в фундаментальній області веде до збільшення фотопровідності за рахунок зростання коефіцієнта поглинання α . У разі власного поглинання α досягає найбільшої величини - (10^6 см^{-1}). Разом з тим таке поглинання збільшує концентрацію носіїв заряду поблизу поверхні напівпровідника або діелектрика, які мають меншу тривалість життя, ніж носії заряду в об'ємі.

Домішкове поглинання - це таке поглинання при наявності в забороненій зоні напівпровідника локальних рівнів домішки може викликати переходи електронів між рівнями домішки і зонами. Фотопровідність, обумовлена такими переходами, називається домішковий фотопровідність. Для реалізації таких переходів потрібна менша енергія кванта, ніж для реалізації переходів з валентної зони в зону провідності. Тому домішкові поглинання має місце при великих довжинах хвиль падаючого світла.

Екситонне поглинання - поглинання світла при якому має місце створення пов'язаної пари електрон-дірка, яка є електрично нейтральним утворенням. Тому поглинання світла, пов'язане з утворенням екситонів, спочатку не веде до виникнення вільних носіїв заряду. Однак в реальних кристалічних структурах екситон мають значно більшу ймовірність дисіювати безвипромінювально (з утворенням електронів і дірок), ніж рекомбінувати з випусканням кванта світла. Таким чином, утворення екситонів в кінцевому підсумку веде до виникнення вільних носіїв заряду, а отже, і фотоструму. Екситонне поглинання, що характеризується вузькими смугами поглинання, визначає і вузькі смуги фотоструму. При цьому спектр фотоструму в області екситонного поглинання буде залежати від стану поверхні. Стан поверхні напівпровідника можна легко змінити шляхом впливу на неї (механічне, хімічне і т.д.). Таким чином можна змінити характер спостережуваного спектру фотоструму, обумовленого екситонним поглинанням.

Поглинання вільними носіями заряду: супроводжується збільшенням їх енергії. При цьому, на відміну від розглянутих вище трьох видів поглинання, число вільних носіїв не змінюється. Але разом з тим змінюється рухливість.

Поглинання кристалічною ґраткою, в результаті такого поглинання збільшується амплітуда коливань вузлів ґратки. В цьому випадку не змінюється ні концентрація носіїв заряду, ні їх рухливість. Тому поглинання світла кристалічною ґратами не є фотоактивним.

Поглинання світла вільними носіями заряду і кристалічною ґраткою не можуть безпосередньо викликати зміну концентрації носіїв заряду. Однак зростання концентрації носіїв заряду в цих випадках може відбуватися в результаті вторинних ефектів, коли поглинання світла значно збільшує кінетичну енергію вільних носіїв заряду або збільшує концентрацію фононів, які потім віддають свою енергію на збудження носіїв заряду.

4.2 Принцип дії фотодіода

Напівпровідниковий фотодіод - це напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від освітленості.

Зазвичай в якості фотодіода використовують напівпровідникові діоди з р-п переходом, який зміщений у зворотному напрямку зовнішнім джерелом живлення.

При поглинанні квантів світла в р-п переході або в прилеглих до нього областях утворюються нові носії заряду. Неосновні носії заряду, що виникли в областях, прилеглих до р-п переходу на відстані, що не перевищує дифузійної довжини, дифундують в р-п перехід і проходять через нього під дією електричного поля. Тобто зворотний струм при освітленні зростає. Поглинання квантів безпосередньо в р-п переході призводить до аналогічних результатів. Величина, на яку зростає зворотний струм, називається фотострумом.

Властивості фотодіода можна охарактеризувати наступними характеристиками:

а) вольт-амперна характеристика фотодіода являє собою залежність світлового струму при незмінному світловому потоці і темного струму $I_{\text{темн}}$ від напруги;

б) світлова характеристика фотодіода, тобто залежність фотоструму від освітленості, відповідає прямій пропорційності фотоструму від освітленості, це обумовлено тим, що товщина бази фотодіода значно менше дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, тобто практично всі неосновні носії заряду, що виникли в базі, беруть участь в утворенні фотоструму;

г) спектральна характеристика фотодіода - це залежність фотоструму від довжини хвилі падаючого світла на фотодіод, вона визначається з боку

великих довжин хвиль шириною забороненої зони, при малих довжинах хвиль великим показником поглинання і збільшення впливу поверхневої рекомбінації носіїв заряду із зменшенням довжини хвилі квантів світла, тобто короткохвильова межа чутливості залежить від товщини бази і від швидкості поверхневої рекомбінації та положення максимуму в спектральній характеристиці фотодіода сильно залежить від ступеня зростання коефіцієнта поглинання;

д) постійна часу - це час, протягом якого фотострум фотодіода змінюється після освітлення або після затемнення фотодіода в e раз (63%) по відношенню до сталого значення;

е) темновий опір - опір фотодіода під час відсутності освітлення;

ж) інтегральна чутливість

$$K = I_{\Phi} / \Phi, \quad (4.4)$$

де I_{Φ} – фототок, Φ – освітленість;

з) інерційність.

Існує три фізичних чинника, що впливають на інерційність:

1) час дифузії або дрейфу нерівноважних носіїв через базу τ ;

2) час прольоту через р-п перехід τ_i ;

3) час перезарядки бар'єрної ємності р-п переходу, що характеризується постійною часу $RC_{\text{бар}}$.

Час дифузії носіїв заряду через базу можна визначити (аналогічно часу прольоту носіїв заряду через базу транзистора) для бездрейфового

$$t_{\text{прол}} = \frac{\omega^2}{2D_p}, \quad (4.5)$$

та дрейфового

$$t_{\text{прол}} = \frac{\omega^2}{D_p \ln \frac{N(0)}{N(\omega)}} \left(1 - \frac{1}{\ln \frac{N(D)}{N(\omega)}} \left(1 - \frac{N(\omega)}{N(0)} \right) \right), \quad (4.6)$$

$\tau_g \approx 50$ нс.

Час прольоту через р-п перехід:

$$\tau_i = \frac{\delta}{V_{\text{max}}}, \quad (4.7)$$

де δ - товщина р-п переходу, v_{\max} - максимальна швидкість дрейфу носіїв заряду (v_{\max} для кремнію і германію дорівнює $5 \cdot 10^6$ см/с).

Товщина р-п переходу, що залежить від зворотного напруги і концентрації домішок в базі, зазвичай менше 5 мкм, а значить $\tau_1 = 0,1$ нс. $RC_{\text{бар}}$ визначається бар'єрної ємністю р-п переходу, що залежить від напруги і опору бази фотодіода при малому опорі навантаження у зовнішній ланцюга. Величина $RC_{\text{бар}}$ по порядку близько декількох наносекунд.

Лекція 5. Оптиелектронні пари (оптопари)

При класифікації виробів оптронної техніки враховується два моменти: тип фотоприймального пристрою та конструктивні особливості приладу в цілому.

Вибір першого класифікаційної ознаки обумовлений тим, що практично у всіх оптронів на вході поміщений світлодіод і функціональні можливості приладу визначаються вихідними характеристиками фотоприймального пристрою.

В якості другого ознаки прийнято конструктивне виконання, яке визначає специфіку застосування оптрона.

Використовуючи цей змішаний конструктивно-схемотехнічний принцип класифікації, логічно виділити три основні групи виробів оптронної техніки: оптопари (елементарні оптрони), оптиелектронні (оптронні) інтегральні мікросхеми і спеціальні види оптронів. До кожної з цих груп відноситься велике число видів приладів.

Для найбільш поширених оптопар використовуються такі скорочення:

Д - діодний, Т - транзисторна, R - резисторная, У - тиристорна, Т² - з складовим фототранзистором, ДТ - діод-транзисторна, 2Д (2Т) - діодна (транзисторна) диференціальна.

Система параметрів виробів оптронної техніки базується на системі параметрів оптопар, яка формується з чотирьох груп параметрів і режимів.

Перша група характеризує вхідний ланцюг оптопари (вхідні параметри), друга - її вихідний ланцюг (вихідні параметри), третя - об'єднує параметри, що характеризують ступінь впливу випромінювача на фотоприймач і пов'язані з цим особливості проходження сигналу через оптопару як елемент зв'язку (параметри передавальної характеристики), нарешті, четверта група об'єднує параметри гальванічної розв'язки, значення яких показують, наскільки наближається оптопара до ідеального елемента розв'язки. З чотирьох перерахованих груп визначальними, специфічно "оптронними" є параметри передавальної характеристики і параметри гальванічної розв'язки.

Найважливішим параметром діодної і транзисторної оптопари є коефіцієнт передачі струму. Визначення імпульсних параметрів оптронів ясно з рис. 5.1.

Параметрами гальванічної розв'язки оптопар є: максимально допустима пікова напруга між входом і виходом $U_{\text{розв п max}}$; максимально допустима напруга між входом і виходом $U_{\text{розв max}}$; опір гальванічної розв'язки $R_{\text{розв}}$; прохідна ємність $C_{\text{розв}}$; максимально допустима швидкість зміни напруги між входом і виходом $(dU_{\text{розв}}/dt)_{\text{max}}$. Найважливішим є параметр $U_{\text{розв п max}}$. Саме він визначає електричну міцність оптопари і її можливості як елемента гальванічної розв'язки.

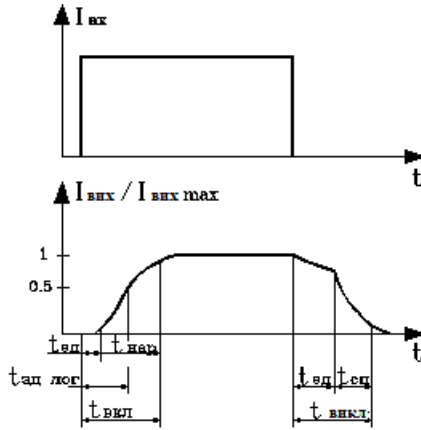


Рисунок 5.1 – Визначення імпульсних параметрів оптопар.

Розглянуті параметри оптопар повністю або з деякими змінами використовуються і для опису оптоелектронних інтегральних мікросхем.

5.1 Види оптронів

Діодні оптопари (рис. 5.2 а) у великій мірі, ніж будь-які: інші прилади, характеризують рівень оптронної техніки. За величиною K_d можна судити про досягнуті ККД перетворення енергії в оптроні; значення часових параметрів дозволяють визначити граничні швидкості поширення інформації. Підключення до діодної оптопарі тих чи інших підсилювальних елементів, дуже корисне і зручне, не може проте дати виграшу ні з енергетики, ні за граничними частотами.

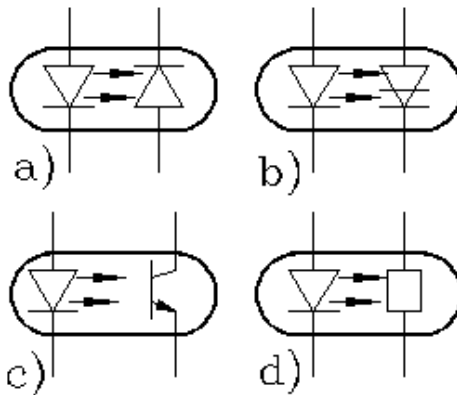


Рисунок 5.2 – Умовні позначення оптопар.

Тиристорні оптопарі (рис. 5.2 b) найбільш перспективні для комутації сільноточних високовольтних ланцюгів: по поєднанню потужності, яка комутується в навантаженні, і швидкодії вони явно краще T^2 -оптопар. Оптопарі типу АОУ103 призначені для використання в якості безконтактних ключових елементів в різних радіоелектронних схемах: в ланцюгах управління, підсилювачах потужності, формувачах імпульсів та інших.

Транзисторні оптопарі (рис. 5.2 c) низкою своїх властивостей вигідно відрізняються від інших видів оптронів. Це перш за все схемотехнічна гнучкість, що виявляється в тому, що колекторним струмом можна управляти як по ланцюгу світлодіода (оптично), так і по базовому ланцюгу (електрично), а також в тому, що вихідний ланцюг може працювати і в лінійному, і в ключовому режимі. Механізм внутрішнього посилення забезпечує отримання великих значень коефіцієнта передачі струму K_i , так що наступні підсилювальні каскади не завжди необхідні. Важливо, що при цьому інерційність оптопарі не дуже велика і для багатьох випадків цілком допустима. Вихідні струми фототранзисторів значно вище, ніж, наприклад, у фотодіодів, що робить їх придатними для комутації широкого кола електричних ланцюгів. Нарешті, слід зазначити, що все це досягається при відносній технологічній простоті транзисторних оптопарі.

Резисторні оптопарі (рис. 5.2 d) принципово відрізняються від усіх інших видів оптопар фізичними і конструктивно-технологічними особливостями, а також складом і значеннями параметрів. В основі принципу дії фоторезистора лежить ефект фотопровідності, тобто зміни опору напівпровідника при освітленні.

5.2 Оптоелектронні мікросхеми та інші прилади оптронного типу

Оптоелектронні мікросхеми являють собою один з найбільш широко застосовуваних, що розвиваються, перспективних класів виробів оптронної техніки. Це обумовлено повною електричною і конструктивною сумісністю оптоелектронних мікросхем з традиційними мікросхемами, а також їх більш широкими в порівнянні з елементарними оптронами функціональними можливостями. Як і серед звичайних мікросхем, найбільш широкого поширення набули перемикальні оптоелектронні мікросхеми.

Спеціальні види оптронів різко відрізняються від традиційних оптопар і оптоелектронних мікросхем. До них відносяться перш за все оптрони з відкритим оптичним каналом. У конструкції цих приладів між випромінювачем і фотоприймачем є повітряний зазор, так що, розміщуючи в нього ті чи інші механічні перешкоди, можна управляти світловим потоком і тим самим вихідним сигналом оптрона. Таким чином, оптрони з відкритим оптичним каналом виступають в якості

оптоелектронних датчиків, що фіксують наявність (або відсутність) предметів, стан їх поверхні, швидкість переміщення або повороту та інші.

5.3 Сфери застосування оптронів і оптронних мікросхем

Перспективні напрямки розвитку і застосування оптронної техніки в значній мірі визначилися. Оптрони і оптронні мікросхеми ефективно застосовуються для передачі інформації між пристроями, що не мають замкнених електричних зв'язків. Традиційно сильними залишаються позиції оптоелектронних приладів в техніці отримання і відображення інформації.

Самостійне значення в цьому напрямку мають оптронні датчики, призначені для контролю процесів і об'єктів, вельми різних за своєю природою і призначенням. Помітно прогресує функціональна оптрона мікросхемотехніка, орієнтована на виконання різноманітних операцій, пов'язаних з перетворенням, накопиченням і зберіганням інформації.

Ефективною і корисною виявляється заміна громіздких, нетривких і нетехнологічних (з позицій мікроелектроніки) електромеханічних виробів (трансформаторів, потенціометрів, реле) оптоелектронними приладами та пристроями.

Досить специфічним, але в багатьох випадках виправданим і корисним є використання оптронні елементів в енергетичних цілях.

5.4 Отримання і відображення інформації

Оптрони і оптронні мікросхеми займають міцні позиції в безконтактній дистанційній техніці оперативного отримання і точного відображення інформації про характеристики та властивості вельми різних (за природою і призначенням) процесів і об'єктів. Унікальними можливостями в цьому плані мають оптрони з відкритими оптичними каналами. Серед них оптоелектронні переривники, що реагують на перетин оптичного каналу непрозорими об'єктами (рис 5.3), і відбивні оптрони, у яких вплив світловипромінювачів на фотоприймачі повністю пов'язано з відображенням випромінюваного потоку від зовнішніх об'єктів.

Зона застосувань оптронів з відкритими оптичними каналами велика і різноманітна. Уже в 60-ті роки оптрони подібного типу ефективно використовувалися для реєстрації предметів і об'єктів. При такій реєстрації, характерною в першу чергу для пристроїв автоматичного контролю та рахуванні об'єктів, а також для виявлення та індикації різного роду дефектів і відмов, важливо чітко визначити місцезнаходження об'єкта або відобразити факт його існування. Функції реєстрації оптрони виконують надійно і оперативно.

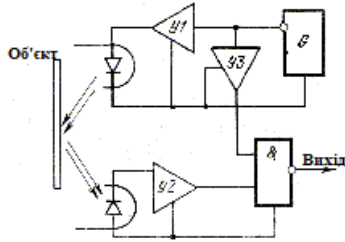


Рисунок 5.3 – Оптиелектронний датчик.

В енергетичному режимі оптрони використовуються в якості вторинних джерел ЕРС і струму. ККД оптронні перетворювачів енергії невеликий. Однак можливість введення додаткового джерела напруги або струму в будь-яку ланцюг пристрою без гальванічного зв'язку з первинним джерелом харчування дає розробнику нову ступінь свободи, особливо корисну при вирішенні нестандартних технічних завдань.

Лекція 6. Оптичні системи передачі

Оптичні системи передачі з моменту зародження стали перспективними. Головними їх елементами є світлопроводи.

Світловоди поділяють на два класи: лінзові і волоконні.

Перші використовують при передачі інформації за допомогою оптичних сигналів у відкритому оптичному зв'язку (в атмосфері, точніше в межах прямої видимості у відкритому просторі), а другі - по волоконним світловодам.

Раніше відкритий оптичний зв'язок вважався безперспективним. Сьогодні вже створені потужні швидкодіючі мініатюрні світлодіоди і лазери, високочутливі фотоприймачі, узгоджені з параметрами середовища. Тому відбулася переоцінка відкритого оптичного зв'язку.

Перевагами відкритого оптичного зв'язку є:

- скритність передачі інформації через вузького світлового променя і малого фону розсіяного випромінювання при відображенні його від предметів;
- зв'язок в космосі, де велика дальність прямої видимості;
- підводний зв'язок при синьо-зеленому випромінюванні;
- зв'язок Земля-комос-занурений підводний човен;
- не потрібна перенасиченість об'єкта комунікаціями; наприклад, в містах та на великих підприємствах при організації комп'ютерних мереж, телевізійних і телефонних каналів;
- при довжині зв'язку до 1,5 км ні сніг, ні дощ перешкод не створюють, перешкоду створює тільки сильний туман;
- виграш в габаритно-масових показниках в порівнянні з міліметровим радіо-зв'язком (менші розміри приймальної і передавальної апертур ("антен")).

6.1 Переваги волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) перед іншими системами передачі інформації

Оптичне волокно в даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації, а також найбільш перспективним середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані. Підставою для такого висновку є ряд особливостей, властивих оптичним волокнам.

Фізичні особливості:

1. Скловолокно має значну широкосмуговість, яка обумовлена надзвичайно високою несучою частотою 10^{14} Гц. Це означає, що по оптичних лініях зв'язку можна передавати інформацію зі швидкістю близько 10^{12} біт/с. Іншими словами по одному скловолокну можна передати одночасно 10 мільйонів телефонних розмов і мільйон відеосигналів. В оптичному волокні можуть поширюватися світлові

сигнали двох різних ортогональних поляризацій, що дозволяє подвоїти пропускну здатність оптичного каналу зв'язку. На сьогоднішній день межа по щільності переданої інформації з оптичного волокна не досягнута.

2. Скловолокно володіє дуже малим загасанням (в порівнянні з іншими середовищами). Кращі зразки волокна мають згасання 0,22 дБ/км на довжині хвилі 1,55 мкм, що дозволяє будувати лінії зв'язку довжиною до 100 км без регенерації сигналів. Для порівняння, краще волокно Sumitomo на довжині хвилі 1,55 мкм має загасання 0,154 дБ/км. В оптичних лабораторіях США розробляються ще більш "прозорі", так звані фторцірконатні волокна з теоретичною межею порядку 0,02 дБ/км на довжині хвилі 2,5 мкм. Лабораторні дослідження показали, що на основі таких волокон можуть бути створені лінії зв'язку з регенераційними ділянками через 4600 км при швидкості передачі 1 Гбіт/с.

Технічні особливості:

1. Волокно виготовляється з кварцу, основу якого складає двоокис кремнію, широко розповсюдженого, а тому недорогого матеріалу, на відміну від міді.

2. Оптичні волокна мають діаметр близько 100 мкм, тобто дуже компактні і легкі, що робить їх перспективними для використання в кабельній техніці.

3. Скловолокна не є металом, тому при будівництві систем зв'язку автоматично досягається гальванічна розв'язка сегментів. Застосовуючи особливо міцний пластик, на кабельних заводах виготовляють самонесучі підвісні кабелі, які не містять металу і тим самим безпечні в електричному відношенні. Такі кабелі можна монтувати, наприклад, на опорах контактної мережі, заощаджуючи значні кошти на прокладку кабелю і організацію переходів через річки та інші перешкоди.

4. Системи зв'язку на основі оптичних волокон стійкі до електромагнітних полів, а інформація, що передається по світловодах, захищена від несанкціонованого доступу.

5. Важливою властивістю оптичного волокна є довговічність. Час життя волокна перевищує 25 років, що дозволяє прокласти оптико-волоконний кабель один раз і, в міру необхідності, нарощувати пропускну здатність каналу шляхом заміни передавачів і приймачів на більш швидкодіючі.

Ефективність застосування тих чи інших ліній зв'язку багато в чому залежить від необхідної кількості каналів. Відомо, що зі збільшенням числа каналів вартість 1 кан.-км лінії зв'язку знижується. Доцільність застосування різних направляючих систем передачі в залежності від необхідного числа каналів наведена на рис. 6.1.

Як видно з рисунка, найдешевшим є зв'язок по світловоду (ОК) і волноводу (В), потім йде коаксіальний кабель (КК), і нарешті, найдорожчою є зв'язок по повітряним лініям (ПЛ). Оптичні кабелі

доцільно застосовувати при потребі в 1000 і більше каналів. Розглянемо порівняльну вартість 1 кан.-км для цифрових систем передачі.

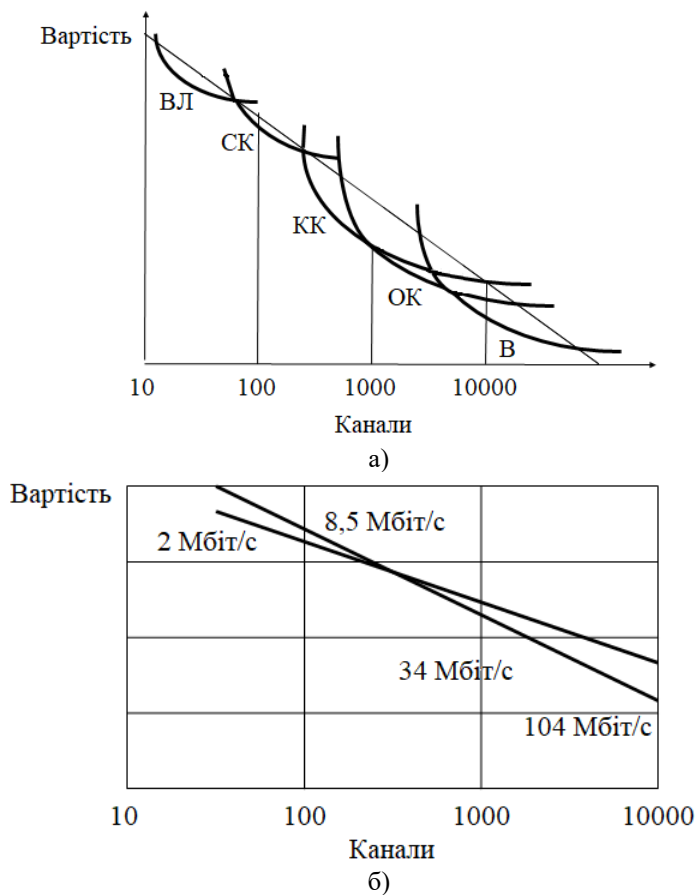


Рисунок 6.1 – Канали: а)- електричний кабель; 2 - оптичний кабель.

З рисунка видно, що в порівнянні з електричним кабелем вартість зв'язку по оптичних кабелях падає з ростом числа каналів в більш різкій залежності. Оптичні системи в порівнянні з електричними дорожче при невеликому числі каналів і дешевше при великому числі каналів. В даний час економічно доцільними є ВОЛЗ зі швидкістю 34 Мбіт/с і вище.

Однак, у волоконній технології є і свої недоліки:

1. При створенні лінії зв'язку потрібні високонадійні активні елементи, які перетворюють електричні сигнали в оптичні і навпаки, виробництво яких коштує дуже дорого.

2. Інший недолік полягає в тому, що для монтажу оптичних волокон потрібно прецизійне, а тому дороге технологічне обладнання.

3. Як наслідок, при аварії (обриві) оптичного кабелю витрати на відновлення вище, ніж при роботі з традиційними кабелями з мідними жилами.

Проте переваги від застосування волоконно-оптичних ліній зв'язку настільки значні, що не дивлячись на перераховані недоліки оптичного волокна, дані лінії зв'язку все ширше використовуються для передачі інформації.

6.2 Структурна схема волоконно-оптичного зв'язку.

Структурна схема передачі інформації по оптичних кабелях приведена на рис. 6.2.

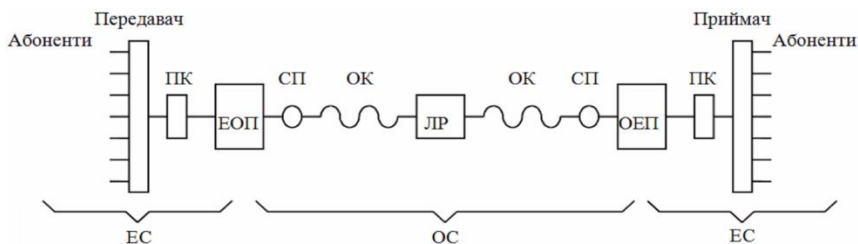


Рисунок 6.2 – Структурна схема волоконно-оптичної системи передачі.

Інформація, передана абонентами через передавач, надходить на електрооптичний перетворювач (ЕОП), роль якого виконує лазер (Л) або світлодіод (СД). Тут електричний сигнал перетворюється в оптичний і направляється в ОК. На прийомі оптичний сигнал надходить в оптико-електричний перетворювач (ОЕП), в якості якого використовується фотодіод (ФД), що перетворює оптичний сигнал в електричний. Таким чином, на передавальній стороні від передавача до ЕОП, а також на приймальній стороні від ЕОП до приймача діє електричний сигнал, а від ЕОП до ОЕП по оптичному кабелю проходить оптичний сигнал.

Електричний сигнал, що створюється частотним або тимчасовим методом, модулює оптичну несучу, і в модульованому вигляді світловий сигнал передається по оптичному кабелю. В основному використовується спосіб модуляції інтенсивності оптичної несучої, при якому від амплітуди електричного сигналу залежить потужність випромінювання, що передається в ОК.

Оптичні системи передачі, як правило є цифровими (імпульсними). Це пояснюється тим, що передача аналогових сигналів вимагає високого

ступеня лінійності проміжних підсилювачів, яку важко забезпечити в оптичних системах.

Через певні відстані (5, ..., 100 км), зумовлені енергетичним потенціалом апаратури і величиною втрат в ОК, уздовж оптичної лінії розташовуються лінійні регенератори (ЛР), в яких сигнал відновлюється і посилюється до необхідного значення. Крім того, для перетворення коду і узгодження елементів схеми є кодуують пристрої - перетворювачі коду (ПК) і погоджують пристрої (СУ). Перетворювач коду формує потрібну послідовність імпульсів і здійснює узгодження рівнів по потужності між електричними і оптичними елементами схеми (від апаратури ІКМ надходить високий рівень, а для термоелектричних перетворювачів необхідний досить низький рівень). Що передають і приймають погоджуючі пристрої формують і погоджують діаграми спрямованості (діаграма спрямованості - це тілесний кут, в якому діє максимальна інтенсивність випромінювання) і апертурний кут між приймально-передавальним пристроєм і кабелем. Застосовуються також пристрої введення і виведення випромінювання, зростки, для зрощування оптичних волокон і кабелів, спрямовані відгалужувачі, фільтри та інші елементи оптичного тракту.

6.3 Принцип дії світловодів. Типи світловодів.

Волоконний світловод є тонкою двошаровою скляною ниткою (сердечника і оболонки), кожен елемент якої має різним показником заломлення. Показник заломлення (n) прозорої речовини являє собою відношення швидкості світла у вакуумі (c) до швидкості світла в даній речовині (v), тобто $n = c/v$. Крім того, показник заломлення залежить від параметрів середовища і розраховується за формулою:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (6.1)$$

де ϵ та μ - відносні відповідно діелектрична і магнітна проникності.

З огляду на, що відносна магнітна проникність прозорої речовини звичайно постійна і дорівнює одиниці, показник заломлення визначиться: для сердечника $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$, для оболонки $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$. Показник заломлення оболонки постійний, а сердечника в загальному випадку є функцією поперечної координати. Цю функцію називають профілем показника заломлення.

Для передачі електромагнітної енергії по світловоду використовується відоме явище повного внутрішнього відбиття на границі розділу двох діелектричних середовищ, тому необхідно, щоб $n_1 > n_2$.

Розглянемо випадок, коли промінь світла, що поширюється в середовищі з показником заломлення n_1 , зустрічає границю розділу з середовищем, що має менший показник заломлення n_2 (рис. 6.3).

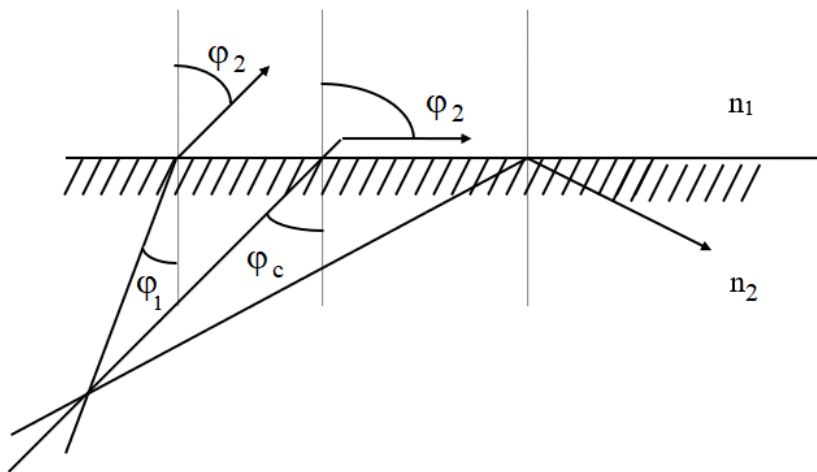


Рисунок 6.3 – Хід променя світла на границі заломлення.

Відповідно до закону Снелліуса $\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}$, угол φ_2 в середовищі з меншим показником заломлення більше, ніж кут падіння φ_1 . При зростанні φ_1 зростає та φ_2 , і оскільки φ_2 більше φ_1 , φ_2 стане рівним 90° раніше, ніж φ_1 . Кут падіння, для якого переломлений промінь ковзає по поверхні розділу (тобто, для якого $\varphi_2 = 90^\circ$), називається **кутом φ_c повного внутрішнього відбиття**. Кут повного внутрішнього відбиття розраховується за формулою (див. Закон Снелліуса, вважаючи, що $\varphi_2 = 90^\circ$):

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6.2)$$

Якщо кут падіння більше φ_c (промінь 3), то промінь не заходить у другу середу, а повністю відбивається всередину першого середовища. Саме цей принцип повного внутрішнього відбиття дозволяє оптичних волокнах проводити світло.

Залежно від величини кута ϕ , який утворює з віссю промені, що виходять з точкового джерела в центрі торця світловода (рис. 6.4), виникають хвилі випромінювання 1, хвилі оболонки 2 і сердечника 3. В осерді і оболонці існує два типи променів: меридіональні, які перетинаються в деякій точці з віссю світловода, і косі, які з віссю світловода не перетинаються. Тут показані тільки меридіональні промені. Якщо кут падіння електромагнітної хвилі на границі сердечник-оболонка більше кута повного внутрішнього відбиття, то промінь повністю відбивається на границі і залишається всередині сердечника (промінь 3).

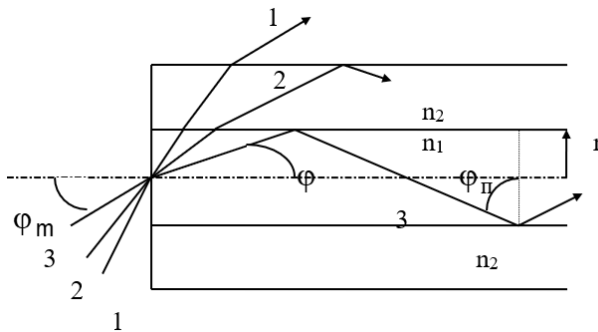


Рисунок 6.4 – Хід променів відточкового джерела в світловоді.

Таке пояснення направленості світла засноване на законах геометричної оптики і не враховує властивостей світла як електромагнітної хвилі. Облік хвильових властивостей дозволив встановити, що з усієї сукупності світлових променів в межах кута повного внутрішнього відбиття для даного світловода тільки обмежене число променів з дискретними кутами може утворювати направляються хвилі, які називають також хвилеводними модами. Ці промені характеризуються тим, що після двох послідовних перевідбиттів від границі сердечник-оболонка хвилі повинні бути в фазі. Якщо ця умова не виконується, то хвилі інтерферуючих так, що гасять один одного і зникають. Кожна волноводная мода має характерну для неї структурою електромагнітного поля, фазового та групової швидкостями.

Хвилі випромінювання розподіляються безперервно по всій належній їм області кутів і утворюють безперервний спектр. Хвилі оболонки і хвилі випромінювання - паразитні хвилі, які відбирають енергію джерела збудження і зменшують корисну енергію, передану по сердечнику. Ці хвилі важко повністю виключити при порушенні світловода. Крім того, вони також виникають на геометричних нерегулярно світловода і неоднородностях матеріалу.

Залежно від числа що поширюються на робочій частоті хвиль (мод) світлопроводи поділяють на одно- і багатомодові. Число мод залежить від співвідношення діаметра сердечника світловода і довжини хвилі і розраховується за формулою

$$N = \left(\frac{2\pi n_1 a}{\lambda} \right)^2 \Delta, \quad (6.3)$$

де a - радіус сердечника волокна, λ - довжина хвилі світла, Δ - відносна різниця показників заломлення.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (6.4)$$

Так як n_1 та n_2 мають дуже близькі значення, номінальна величина Δ для більшості оптичних волокон знаходиться в межах $\Delta = 0,28 - 2,1\%$.

Перевагою одномодових світловодів є мала дисперсія (спотворення сигналів), велика інформаційно-пропускна здатність і велика дальність передачі. Одномодові системи є найбільш перспективним напрямком розвитку техніки передачі інформації.

У багатомодових световодах імпульс на прийомі уширяється і спотворюється. Дисперсія в багатомодових световодах істотно обмежує смугу переданих частот і дальність передачі.

Для характеристик світловода важливе значення має профіль показника заломлення в поперечному перерізі. Якщо сердечник світловода має постійне по радіусу значення показника заломлення, то такі світлопроводи називаються світловодами із ступінчастим профілем показника заломлення (спостерігається сходинка n на границі сердечник-оболонка).

Для боротьби з розширенням імпульсів в оптичних волокнах із ступінчастим профілем показника заломлення розроблений інший тип багатомодового волокна, який знайшов набагато більш широке застосування в телекомунікації - оптичні волокна з градієнтним профілем показника заломлення. У таких скловолоконна показник заломлення від центру сердечника до краю змінюється плавно. Хід променів в градієнтному світловоді показаний на рис. 6.5.

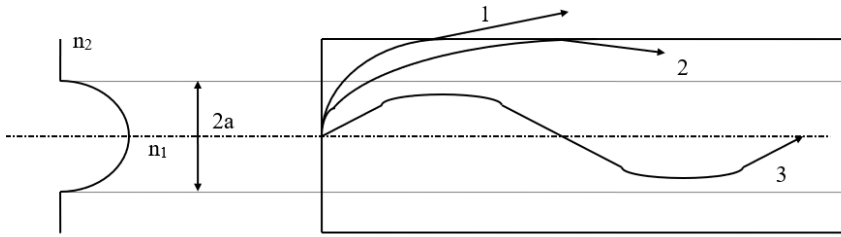


Рисунок 6.5 – Хід променів в градієнтному світловоді.

Промені тепер згинаються в напрямку градієнта показника заломлення (замість спотворення чи повного відбиття, як у випадку волокна із ступінчастим профілем).

У показнику заломлення для градієнтних світловодів описується функцією

$$n = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6.5)$$

де r - текущий радіус; n_1 - найбільше значення показника заломлення сердечника; g - коефіцієнт, що визначає вид профілю показника заломлення.

При $g = \infty$ формула описує ступінчастий профіль показника заломлення. При $g = 2$ світловоди називають параболічними, так як профіль показника заломлення описується параболою. На практиці волокна з градієнтним профілем показника заломлення мають g близько 1.92 і майже параболічний профіль.

Одномодові волокна можна розділити на дві категорії: звичайні або волокна з несмещеною дисперсією, які випускаються для апаратури, що працює на довжині хвилі 1,3 мкм, і волокна зі зміщеною дисперсією, які випускаються для роботи на довжині хвилі 1,55 мкм. Поняття зміщеною або несмещеною дисперсії пов'язані з довжиною хвилі, на якій волокно має найбільшу смугу пропускання.

На відміну від багатомодових волокон, одномодові волокна випускають з різним профілем показника заломлення оболонки. При цьому розрізняють волокна з рівною оболонкою, показник заломлення якої відповідає показнику заломлення скловолкна із ступінчастим профілем і вирівняний з показником заломлення чистого кварцу, і втиснутою оболонкою, в якій матеріал оболонки складається з двох зон. Показник заломлення (n_3) внутрішньої, сусідньої з сердечником зони має

значення менше або утиснений щодо показника заломлення зовнішньої зони, що дорівнює показнику заломлення чистого кварцу (n_2).

6.4 Планарний світловод

Планарний світловод є основою майже всіх пристроїв інтегральної оптики: модуляторів, перемикачів, дефлекторів світла, мікролазерів, з'єднувачів, фільтрів, спрямованих відгалужувачів та інші.

Він складається з планарної плівки або смужки з малим оптичним поглинанням і показником заломлення (n_1) вище, ніж у підкладки (n_2) і навколишнього середовища (n_0) (рис. 6.6).

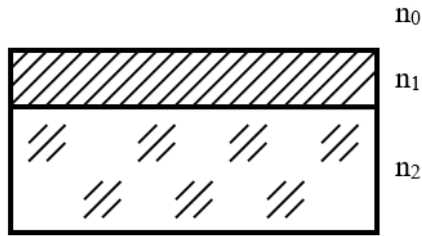
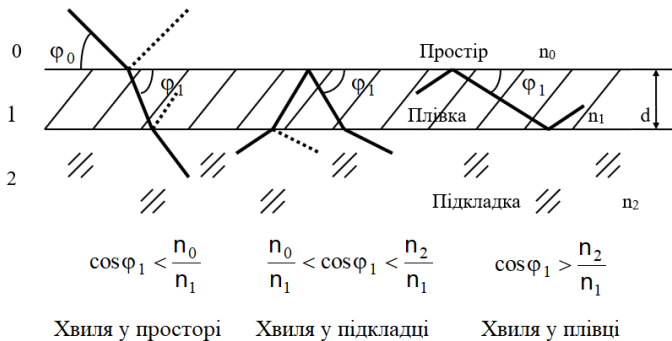


Рисунок 6.6 – Хід променів в планарному світловоді.

Тобто

$$n_1 > n_2 \geq n_0. \quad (6.6)$$

Виходячи з того, чи відчуває однорідна плоска хвиля переломлення, або повне внутрішнє віддзеркалення, що залежить від кута нахилу променя φ_1 , розрізняють три види хвиль (рис. 6.7).



Хвиля у просторі Хвиля у підкладці Хвиля у плівці

Рисунок 6.7 – Види хвиль.

Просторова хвиля може приходити з простору 0. Так як $n_1 > n_2 > n_0$, то вона не відбивається повністю ні на одній з граничних поверхонь. Такі просторові хвилі можуть також приходити з підкладки або від будь-якого джерела, що знаходиться в півці; для них характерний тільки кут падіння φ_1 , що перевищує граничний кут повного відбиття на границі півки і зовнішнього простору.

Хвилі підкладки можуть приходити з підкладки; після заломлення в півці їх кут падіння настільки малий, що на границі з вільним простором вони повністю відображаються. Однак ці хвилі можуть бути також збуджуватись джерелами в півці.

Для хвиль півки кут φ_1 настільки малий, що вони повністю відбиваються від обох границь. Тільки ці хвилі пов'язані з півкою, і їх поля зменшуються експоненціально як в підкладці, так ще сильніше в зовнішньому просторі. На відміну від них, хвилі підкладки випромінюються через підкладку, а просторові хвилі - як у зовнішньому просторі, так і в підкладку. Корисні і важливі тільки хвилі півки. Хвилі підкладки та просторові хвилі є паразитними, що створюють небажані і перешкоджаючі поля випромінювання, яких, проте, часто не можна уникнути при порушенні хвиль півки.

Таким чином, хвиля півки багаторазово відбивається від кордонів під кутом φ_1 і поширюється по звивистій траєкторії.

Просторова хвиля і хвиля підкладки можуть мати будь-який кут φ_1 у відповідному їм діапазоні кутів, що призводить до утворення безперервної множини хвиль. Хвилі півки, навпаки, можуть мати в області $\varphi_1 < \arccos \frac{n_2}{n_1}$ лише кінцеве число дискретних значень. Число хвиль, що поширюються, при цьому розраховується по формулі

$$N = \frac{2d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (6.7)$$

де d - товщина півки.

Чим менше різниця показників заломлення, тим менше число мод, що поширюються, при тій же товщині півки.

Вибір і підготовка матеріалів півки і підкладки, метод нанесення півки повинні забезпечувати отримання однорідної структури з малим поглинанням і розсіюванням. Для півок, які працюють тільки в якості пасивних волноводів і не виконують ніяких активних функцій, наприклад, посилення або модуляції, необхідно тільки мале загасання. Такі півки виготовляються з аморфних матеріалів, а саме скла або таких синтетичних матеріалів, як поліуретан, поліефірний епоксид і органічні полімери.

В якості підкладки, як правило, застосовують скло, якщо інтегральне пристрій не вимагає іншого матеріалу. Плівки з малими втратами з цих матеріалів товщиною від 1 до 10 мкм частіше завдають електронно-променевим розпиленням. Відомі методи освіти тонкого шару в матеріалі скляній пластни внаслідок хімічної реакції заміщення при температурах близько 400⁰С. Загасання плівки для хвиль в червоному і інфрачервоному діапазонах не повинно перевищувати 1 дБ/км.

Розглянутий тип планарних світловодів відноситься до несиметричної конструкції, так як $n_2 \neq n_0$. У багатьох оптичних деталях застосовують просту симетричну плівку (рис. 6.8).

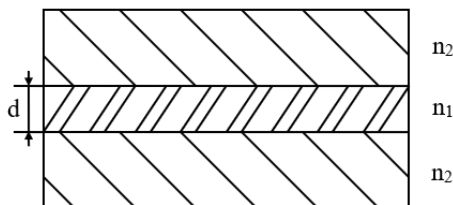


Рисунок 6.8 – Симетрична плівка в планарних світловодах.

Лекція 7. Дисплеї

Монітор (monitor - слідкувати) або дисплей (display - відображувати) - електронний пристрій для відображення інформації.

7.1 Характеристики моніторів

Загальні характеристики моніторів:

- Розмір екрану — визначається довжиною діагоналі (традиційно вимірюється в дюймах);
- Співвідношення сторін екрану — стандартний (4:3) та широкоформатний (16:19, 16:10 та інші);
- Роздільність дисплею — кількість пікселів по вертикалі та горизонталі;
- Глибина кольору — кількість біт на кодування одного пікселя (від монохромного (1 біт) до 32-бітного);
- Розмір зерна (для CRT) чи пікселя (для LCD);
- Частота оновлення зображення (вимірюється в герцах, для LCD практично однакова);
- Швидкість відклику пікселів (не для всіх типів моніторів, у LCD, як правило, суттєво нижча ніж у CRT);
- Максимальний кут огляду — максимальний кут під яким не виникає суттєвого погіршення якості зображення (актуально для LCD).

Терміни монітор та дисплей — дещо відмінні. Дисплей, як пристрій для відображення інформації, має ширше застосування, наприклад, дисплей мобільного телефону, а термін монітор пов'язується з комп'ютером або телеекраном дистанційного спостереження.

Без можливості бачити результати своєї роботи, персональний комп'ютер став би марним інструментом.

Необхідно яким-небудь чином спостерігати за сигналами комп'ютерної системи, щоб знати, чим вона займається в даний момент. Сьогодні реалізацією подібного роду функцій займається відеосистема. Стандартним пристроєм виводу інформації, якому вже десятки років, є монітор.

Монітори, побудовані на електронно-променевих трубках (ЕПТ), активно витісняються новим поколінням рідкокристалічних моніторів, зручнішим і економічнішим.

Екрани LCD (Liquid Crystal Display, рідкокристалічні монітори) зроблені з речовини (ціанофеніл), що перебуває в рідкому стані, але при цьому має деякі властивості, притаманні кристалічним тілам. Фактично це рідина з анізотропними властивостями (зокрема, оптичними), зв'язаних з упорядкованістю орієнтації її молекул.

7.2 Електронно-променева трубка

Електронно-променева трубка (ЕПТ) — електронний прилад, який має форму трубки, видовженої (часто з конічним розширенням) в напрямку осі електронного променя, що формується в ЕПТ. ЕПТ складається з електронно-оптичної системи, відхиляючої системи і флуоресцентного екрана або мішені (рис. 7.1). Електронно-променева трубка складається з катода (1), анода (2), вирівнювального циліндру (3), екрану (4), регуляторів площини (5) та висоти (6).

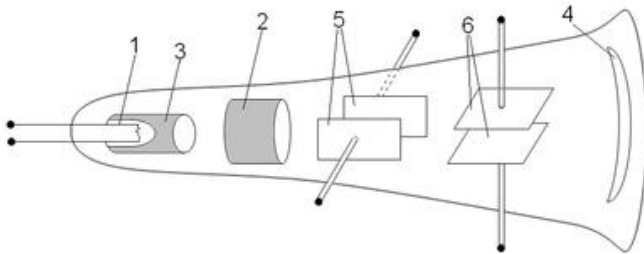


Рисунок 7.1 – Будова та дія ЕПТ з електростатичною системою відхилення променів

Під дією фото- або термоемісії з металу катода (тонка провідникова спіраль) вибиваються електрони. Оскільки між анодом та катодом підтримується напруга (різниця потенціалів) у декілька кіловольт, то ці електрони, вирівнюючись циліндром, рухаються у напрямку аноду (пустотілий циліндр). Пролітаючи крізь анод електрони потрапляють до регуляторів площини. Кожен регулятор — це дві металеві пластини, різнойменно заряджені. Якщо ліву пластину зарядити негативно, а праву позитивно, то електрони проходячи крізь них будуть відхилятися праворуч, і навпаки. Аналогічно діють і регулятори висоти. Якщо ж на ці пластини подати змінний струм, то можна буде контролювати потік електронів як у горизонтальній, так і вертикальній площинах. У кінці свого шляху потік електронів потрапляє на екран, де може викликати зображення.

7.3 Рідкокристалічний дисплей

Рідкокристалічний дисплей (англ. liquid crystal display (LCD) - це електронний пристрій візуального відображення інформації (дисплей), принцип дії якого ґрунтується на явищі електричного переходу Фредерікса в рідких кристалах. Дисплей складається з довільної кількості

кольорових або монохроматичних точок (пікселів), і джерела світла або відбивача (рефлектора).

Кожна з кольорових точок рідкокристалічного дисплея складається з кількох комірок (рис. 7.2) (як правило, з трьох), попереду яких встановлюються світлові фільтри (найчастіше — червоний, синій і зелений). Тобто колір певної точки і її яскравість визначається інтенсивностями світіння комірок, з яких вона складається.

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

Рідкокристалічні дисплеї споживають невелику кількість енергії, тому вони знайшли широке застосування, як в кишенькових пристроях (годинниках, мобільних телефонах, кишенькових комп'ютерах), так і в комп'ютерних моніторах, телевізорах тощо.

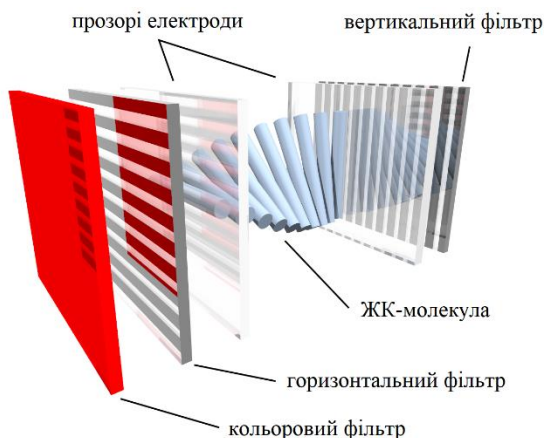


Рис. 7.2 – Субпіксель LCD дисплея

Піксель складається з: кольорового фільтра; горизонтального поляризатора; оточеного двома шарами скла рідкокристалічного шару, який здатен змінювати свою поляризацію; вертикального фільтра.

Будова. Екран LCD є масивом маленьких сегментів, названих пікселями, якими можна маніпулювати для відображення інформації. LCD має кілька шарів, де ключову роль грають дві панелі, зроблені з вільного від натрію і дуже чистого скляного матеріалу, який називають субстратом або підкладкою. Проміжок між шарами заповнений тонким шаром рідкого кристалу. На панелях є борозенки, що надають їм спеціальної орієнтації. Борозенки розташовані таким чином, що вони є паралельними між собою в межах кожної панелі, але борозенки однієї

панелі перпендикулярні до борозенок іншої. Поздовжні борозенки утворюються внаслідок нанесення на скляну поверхню тонких плівок прозорого пластику, що потім спеціальним чином обробляється. Борозенки орієнтують молекули рідкого кристалу однаково у всіх комірках. Молекули одного з типів рідких кристалів (нематиків) при відсутності напруги повертають вектори електричного (і магнітного) полів світлової хвилі на деякий кут у площині, перпендикулярній до напрямку поширення світлового променя. Нанесення борозенок на поверхню скла дозволяє забезпечити однаковий кут повороту площини поляризації для всіх комірок. Проміжок між панелями дуже тонкий.

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

Проходження світла. Рідкокристалічна панель освітлюється джерелом світла (у залежності від того, де воно розташоване, рідкокристалічні панелі працюють на відображення або на проходження світла). Площина поляризації світлового променя повертається на 90° при проходженні однієї панелі. Якщо до комірки прикласти електричне поле, молекули рідких кристалів частково вибудовуються вертикально уздовж поля, кут повороту площини поляризації світла стає відмінним від 90 градусів.

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

У присутності електричного поля поворот вектора поляризації відбувається на менший кут, тим самим другий поляризатор стає тільки частково прозорим для випромінювання. Якщо різниця потенціалів буде

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

7.4 Газорозрядний екран

Газорозрядний екран (також широко застосовується англійська калька «плазмова панель») - пристрій відображення інформації, монітор, заснований на явищі світіння люмінофора під впливом ультрафіолетових променів, що виникають при електричному розряді в іонізованому газі, інакше кажучи в плазмі (рис. 7.3).

Плазмова панель є матрицею газонаповнених осередків, укладених між двома паралельними скляними пластинами, усередині яких розташовані прозорі електроди, що утворюють відповідно шини сканування, підсвічування і адресацію. Розряд у газі протікає між розрядними електродами (сканування і підсвічування) на лицьовій стороні екрану і електродом адресації на задній стороні.

Особливості конструкції:

- суб-піксель плазмової панелі має наступні розміри 200 мкм x 200 мкм x 100 мкм;
- передній електрод виготовляється з оксиду індію та олова, оскільки він проводить струм і максимально прозорий.
- при протіканні великих струмів по досить великому плазмовому екрані через опір провідників виникає істотне падіння напруги, що приводить до спотворень сигналу, у зв'язку з чим додають проміжні провідники з хрому, незважаючи на його непрозорість;

- для створення плазми осередку зазвичай заповнюються газом - неоном або ксеноном (рідше використовується He і/або Ar, або, частіше, їх мікс-суміші).

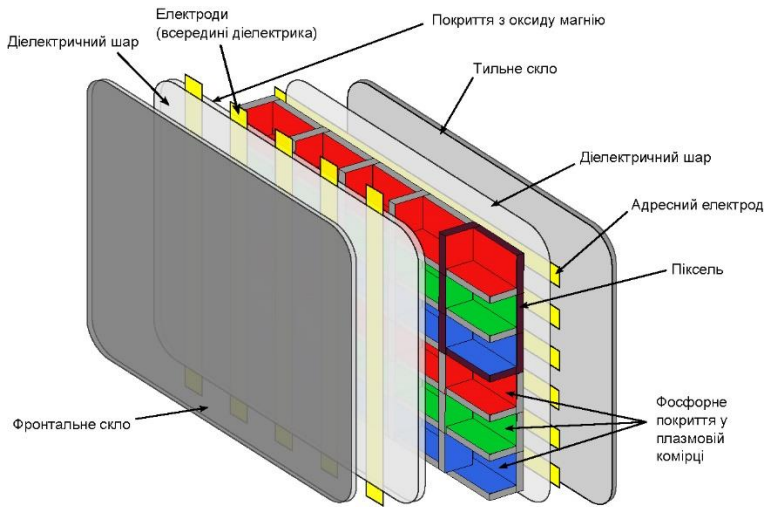


Рис. 7.3 – Конструкція газорозрядного дисплея

Принцип дії. Робота плазмової панелі складається з трьох етапів:

- ініціалізація, в ході якої відбувається упорядкування положення зарядів середовища та її підготовка до наступного етапу (адресації). При цьому на електроді адресації напруга відсутня, а на електрод сканування щодо електрода підсвічування подається імпульс ініціалізації має ступінчастий вигляд. На першій ступені цього імпульсу відбувається упорядкування розташування іонів газового середовища, на другому ступені розряд у газі, а на третій - завершення впорядкування.

- адресація, в ході якої відбувається підготовка пікселя до підсвічуванню. На шину адресації подається позитивний імпульс (+75 В), а на шину сканування негативний (-75 В). На шині підсвічування напруга встановлюється рівною +150 В.

- підсвічування, в ході якої на шину сканування подається позитивний, а на шину підсвічування негативний імпульс, що дорівнює 190 В. Сума потенціалів іонів на кожній шині і додаткових імпульсів призводить до перевищення порогового потенціалу і розряду в газовому середовищі. Після розряду відбувається повторне розподіл іонів у шин сканування і підсвічування. Зміна полярності імпульсів призводить до повторного розряду в плазмі. Таким чином, змінюючи полярність імпульсів забезпечується багаторазовий розряд осередки.

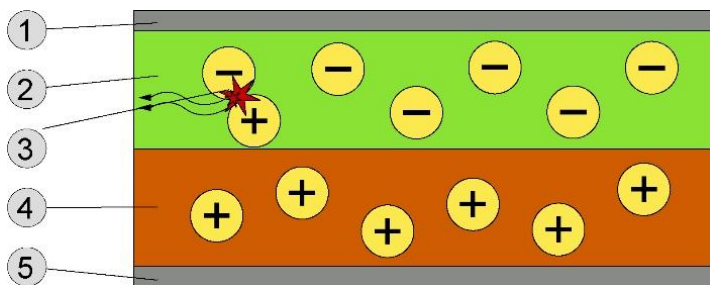
Один цикл «ініціалізація - адресація - підсвічування» утворює формування одного підполя зображення. Складаючи кілька підполів можна забезпечувати зображення заданої яскравості і контрасту. У стандартному виконанні кожен кадр плазмової панелі формується складанням восьми підполів.

Таким чином, при підведенні до електродів височастотного напруги відбувається іонізація газу або освіту плазми. У плазмі відбувається емнісний височастотний розряд, що призводить до ультрафіолетового випромінювання, яке викликає світіння люмінофора: червоне, зелене або синє. Це світіння проходячи через передню скляну пластину потрапляє в око глядача.

7.5 Органічні дисплеї та світлодіоди

Органічний світлодіод (англ. Organic Light Emitting Diode (OLED)) - світлодіод, в якому випромінюючий елемент складається із плівки органічної суміші. Цей елемент, зазвичай, включає в себе полімерні речовини, які дозволяють органічним складовим бути стабільними. Вони розташовуються у так званих рядках та колонках по площі підкладкі, виконані процесом «друку». У результаті отримуємо матриці з пікселів, які випромінюють світіння різних кольорів.

Такі системи можуть використовуватись у телевізійних екранах, комп'ютерних моніторах, малих портативних системах (таких як мобільні телефони, кишенькові комп'ютери), рекламній та інформаційній індустрії. OLED також можна використовувати в джерелах світла. OLED випромінюють менше світла на одиницю площі, ніж тверді неорганічні світлодіоди, що призначені для використання в якості точкових джерел світла (рис. 7.4).



1 - Катод (-); 2 - Емісійний шар; 3 - Випромінювання;
4 - Провідний шар; 5 - Анод (+)

Рис. 7.4 – Схематичне зображення двошарової OLED панелі

Суттєвою перевагою OLED-дісплеїв, у порівнянні з традиційними рідкокристалічними дисплеями, є те, що органічні світлодіоди не вимагають фонові підсвіткі. Таким чином, вони можуть відображати глибокі чорні кольори, витрачаючи набагато менше енергії, і можуть бути набагато тоншими і легшими, ніж LCD панелі. OLED дисплеї досягають набагато вищого коефіцієнту контрастності, ніж LCD монітори.

Принцип роботи. Віпромінювання світла в органічному світлодіоді відбувається в тонкому люмінесцентному шарі органічного напівпровідника, в який із двох електродів інжектуються електрони і дірки. У межах люмінесцентного шару електрони і дірки рекомбінують, утворюючи екситони, частина з яких гине, випромінюючи фотон. Для інжекції електронів використовуються метали з малою роботою виходу (Ca, Mg, Al). Для інжекції дірок - напівпрозорий електрод із ІТО. Люмінесцентний шар може складатися або з малих органічних молекул, або зі спряжених полімерів, наприклад, поліфенілінвініліну (PPV).

Для покращення характеристик діоду використовують також додаткові провідні шари для електронів і дірок.

Застосування. Органічні світлодіоди забезпечують високу яскравість, покривають увесь видимий спектр і є дуже дешевими у виробництві. Вони відкривають перспективу створення телевізорів і моніторів товщиною у декілька міліметрів. Яскравість органічних світлодіодів вже перевищила яскравість ламп розжарювання, що робить також їх перспективними для використання в якості освітлювальних приладів.

Недолік органічних світлодіодів - порівняно невеликий строк експлуатації, який можна збільшувати за рахунок надійної інкапсуляції.

Лекція 8. Оптична пам'ять

8.1 Постійна оптична пам'ять з послідовним способом запису та зчитування інформації

Створення оптичних запам'ятовуючих пристроїв (ЗП) продиктовано тим, що магнітна пам'ять, яка широко використовується в сучасних електронних системах, має ряд недоліків та труднощів в зв'язку з постійним зростанням вимог щодо щільності та швидкості запису, зменшення габаритів, ваги тощо. Всі ці питання можна кардинально розв'язати, використовуючи пристрої оптичної пам'яті.

Оптичні ЗП можуть використовувати паралельний і послідовний способи запису інформації як аналоговій, так і цифровій двійковій формі.

Спрощена структурна схема запису інформації послідовного типу за допомогою скануючого променя лазера наведена на рис. 8.1

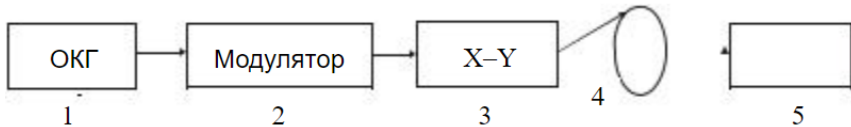


Рис. 8.1 - Структурна схема запису інформації послідовного типу

Для забезпечення високої щільності запису випромінювання лазера 1, його фокусують до 1 мкм, модульований необхідним чином за допомогою модулятора 2 промінь, через систему об'єктивів 4 подають на записуюче середовище 5. Геометричне положення променя задається двокоординатним дефлектором 3.

Дуже часто як запам'ятовуюче середовище використовують срібно-голоїдні емульсії, нанесені на прозору підкладку. Вони забезпечують нереверсивну постійну пам'ять, мають високу роздільну здатність (1000 ліній/мм) та високу енергетичну чутливість – 10^{-4} - 10^{-6} Дж/см². Після проявлення та фіксування, зображення проєктують на детектор випромінювання, наприклад, на матрицю фотоприймачів.

Пошук середовищ для оптичної пам'яті з оптимальними параметрами чутливості, роздільної здатності та інших характеристик призвів до використання окрім емульсій багатьох інших матеріалів, зокрема, фоторезисторів. Всі ці матеріали вимагають достатньо тривалої обробки з використанням рідин, час якої складає в кращому випадку – одиниці секунд. Це є їх великим недоліком.

Запис інформації за бітами можна здійснювати шляхом проплавлення за допомогою фокусованого лазерного променя, наскрізних отворів розміром біля 1 мкм у тонких (в межах 0,05 мкм) шарах Pt, Bi, Rh, As, Cr та інших речовин, нанесених на прозору,

наприклад, поліефірну основу. Перевагою такого запису (зчитування якого може виконуватись тим же лазером, але з меншою інтенсивністю променя, щоб не пошкодити запис), є більше значення відношення сигнал/шум, висока надійність та великий термін експлуатації.

Ще один спосіб запису в вигляді кодової послідовності імпульсів полягає в створенні мікрозаглиблень або плям (пітів) на полівінілхлоридних або поліметилакрилатних пластинах з тонким шаром телуру (20...40 мкм). Телур – легкоплавкий матеріал, який сильно поглинає інфрачервоне випромінювання.

Можна в металевому шарі також формувати мікроступи. У цьому випадку використовують тугоплавкі матеріали (Ti, Pt), а як діелектричний підшар – матеріал, який легко випаровується. Під дією лазерного променя металева плівка не пропалюється та не проплавляється, а в результаті випаровування підшару в цьому місці утворюється опукла поверхня металу. Плівку з записаною інформацією покривають шаром прозорого матеріалу для захисту від механічних пошкоджень. Цей шар роблять достатньо товстим, в цьому випадку подряпини та інші мікрodefekти на його поверхні будуть не в фокусі зчитуючого пристрою, і таким чином, слабо спотворюють корисний сигнал.

Запам'ятовуюче середовище може бути нанесене на диск із скла, кварцу, полімерів різного типу та інших матеріалів. Ці диски можуть обертатися, а інформація записується в спіральну доріжку. Крок доріжок становить 1,5...2 мкм, що при діаметрі 30 см дозволяє записати біля 10^{10} біт інформації. Такої ємності достатньо, щоб закодувати 30-хвилинне кольорове відео або записати декілька десятків тисяч сторінок тексту.

Труднощі використання оптичних дисків пов'язані з необхідністю точного юстування лазерної голівки та носія інформації (диску). Для цього конструюється спеціальна сервосистема, яка забезпечує точне слідування скануючого пучка по інформаційній доріжці.

Очевидно, для того, щоб при запису, мітки на диску не «розмивались» за рахунок обертання, імпульси випромінювання повинні бути короткими ($\sim 10^{-8}$ с). Фотоприймач, який використовується при зчитуванні, повинен мати швидкодію не нижче ніж 10^8 - 10^9 с.

У порівнянні з магнітною, оптична пам'ять має безперечні переваги. Оптичну пам'ять вирізняє: висока якість запису та відтворення при набагато більшому терміні експлуатації, тому що відсутній механічний контакт зчитуючого пристрою з носієм інформації; набагато більша щільність запису; тривалий термін зберігання (десять років замість одного року в магнітному запису) та набагато менша вартість.

Також можливе виготовлення копій оптичних носіїв інформації. Для тиражування запису з первинного оптичного диска (без захисного покриття) методами гальванотехніки виготовляють металевий оригінал, а вже з нього в потрібній кількості пресують пластмасові копії. На вторинні диски з боку запису наносять плівку з високою здатністю відбивання

(алюміній), а поверх нього – прозорий захисний шар. Звуковідтворювальні оптичні диски різних діаметрів (11,5-12 см) називають компакт-дисками. Потрібним чином можливе також тиражування дисків для відеовідтворення.

8.2 Оперативна оптична пам'ять

Пристрої оперативної пам'яті повинні мати властивість реверсивності, тобто після стирання бути знову готовими до запису нової інформації. Властивості записуючого середовища не повинні залежати від циклів «запис – стирання» та бути швидкодіючими, тобто якомога швидше записувати, стирати та відновлюватись після стирання інформації. У ЗП оперативної пам'яті використовують багато фізичних ефектів.

Деякі пристрої оперативної оптичної пам'яті використовують запис на фотохромних матеріалах-речовинах, поглинання зворотно змінюється під дією самого випромінювання. Важливо, що в цьому ефекті не потрібно ні проявляти, ні закріплювати зображення. Серед великої кількості фотохромних матеріалів досить широке застосування отримали полімери, силкатне скло, лужно-голоїдні кристали (KCl, NaF, CaF₂, тощо). При фотохромному процесі речовина, яка поглинає кванти світла, переходить із нормального стану в фотоіндуковане, що характеризується зміною оптичного пропускання в іншій спектральній області. Для запису та зчитування тут необхідні електромагнітні хвилі з різною довжиною. Наприклад, при запису $\lambda = 0,2-0,4$ мкм (ультрафіолетова частина спектра), а при читанні $\lambda = 0,4-0,7$ мкм (видима частина спектра). Зворотний перехід у нормальний стан відбувається або самовільно, або під дією світла, яке поглинається в фотоіндуктивному стані.

Час збереження інформації при фотохромному записі різний для різних матеріалів: від 10^{-6} с до декількох років. Роздільна здатність є досить високою ~ 3000 ліній/мм. Запис можна проводити в різних площинах фотохромного матеріалу, причому перехід від однієї площини до другої здійснюється за рахунок зміни фокусної відстані записуючого та зчитуючого пристроїв. Це призводить до великої об'ємної щільності запису.

У пристроях пам'яті, заснованих на магнітооптичних ефектах, використовуються шари феромагнітних матеріалів з великою коерцитивною силою, які здатні довго зберігати намагніченість після вимикання зовнішнього магнітного поля. У тонкому шарі такого матеріалу під дією випромінювання лазера проходить локальне нагрівання і якщо при цьому температура перевищує точку Кюрі, то вектор намагніченості змінюється стрибком. Поворот площини поляризації падаючого світла в різних місцях буде різним у попередньо освітлених та неосвітлених ділянках. Зчитування можна здійснювати і в

відбитому світлі, використовуючи магнітооптичний ефект Керра. Для стирання інформації, записаної феромагнітним способом, матеріал нагрівають світловим імпульсом у магнітному полі. Хоча зчитування інформації проходить за використанням магнітооптичних ефектів, але такий спосіб запису та зчитування називають термомагнітним.

8.3 Принцип голографічного запису інформації

Голографічна пам'ять ґрунтується на записуванні інтерференційної картини, утвореної у результаті складання світлової хвилі, відбитої від деякого об'єкта або яка пройшла через цей об'єкт (об'єктна хвиля), та когерентної хвилі, яка безпосередньо йде від джерела світла (опорної хвилі). Якщо зафіксувати картину (голограму), а потім засвітити її опорним пучком світла, розміщеним відносно неї так само, як і при запису, то в результаті взаємодії опорної хвилі з голограмою в просторі утвориться хвиля, яка відновлює зображення об'єкта, що збігається з ним за формою та просторовим положенням. Взаємодіючі хвилі (опорні та об'єктні) обов'язково мають бути когерентними.

Важливо, що голограма, на відміну від фотографії, фіксує не тільки розподіл амплітуди, але і розподіл фаз об'єктної хвилі відносно опорної. Інформація про співвідношення фаз об'єктної та опорної хвиль закладена в рисунку та частоті інтерференційних смуг. За допомогою голограми, таким чином встановлюється амплітудно-фазовий розподіл хвильового поля, тобто створюється копія об'єктної хвилі, а не тільки світлоконтрастна характеристика об'єкта, як при звичайному фотографуванні. Цим пояснюється надзвичайно висока інформаційна ємність голографічного способу запису інформації.

Оскільки при записуванні світло від кожної точки об'єкта падає на всі точки голограми, то кожна її мала ділянка здатна відновити зображення об'єкта, але чим менша ділянка, тим менший контраст у зображенні об'єкта, це значить, що втрачається відновлення дрібних деталей у структурі об'єкта. Однак, цей факт вказує на те, що при голографічному записуванні інформації якість запису залежить від різних дефектів – плям, пилу, подряпин тощо. Голограми характеризуються дифракційною ефективністю, яка визначається відношенням інтенсивності відновленого об'єктного пучка до інтенсивності читаючого опорного пучка. Голограми, в основному, записуються на фотопластинах.

Якщо об'єктом запису є оптичний транспарант, то на ділянках в $1 - 2 \text{ мм}^2$ записується не один біт інформації, а ціле зображення (сторінка інформації ємністю $10^4 - 10^5$ біт). Одна і та ж ділянка реєструючого матеріалу може вміщувати декілька накладених одна на одну голограм, які не впливають одна на одну, якщо при записуванні кожен раз змінювати кут падіння опорного пучка. Зчитування проводиться за таких самих умов.

Дифракційна межа щільності запису голографічної інформації на фотопластині вища, ніж у розглянутих вище оптичних дискових носіях. Вона передусім обмежується зернистістю фотоемulsії N_{Sp} (см⁻²) та об'ємом інформації в одному транспаранті M (см⁻²).

Список літератури

1. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. – УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2008. – 189 с.
2. Верещагин И.К. Введение в оптоэлектронику / И.К. Верещагин, Л.А. Косяченко, С.М. Кокин. – М.: Высшаяшкола, 1991. – 191 с.
3. Корнейчук В.И. Оптические системы передачи / В.И. Корнейчук, Т.В. Макаров, И.П. Панфилов. – К.: Техніка, 1994. – 388 с.
4. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1977. – 287 с.
5. Ігнатов А.Н. Оптоелектронні прилади та пристрої. – Еко-Трендс, 2006. – 272 с.
6. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
7. Фриман Р. Волоконно-оптичні системи зв'язку. – Техносфера, 2007. – 512 с.
8. Довгалоук Б.П. Оптоелектроніка. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2002. – 255 с.
9. Воробйова О.М., Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник. – ОдесаЖ ОНАЗ, 2015. – 298 с.
10. Хансперджер Р. Интегральная оптика: Теория и технология / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 384 с.
11. Андрушко А.М. Волоконно-оптические линии связи / А.М. Андрушко, И.И. Гроднев, И.П. Панфилов. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
12. Воробйова О.М., Іванченко В.Д. Основи схемотехніки: підручник. – Одеса: Фекікс, 2009. – 388 с.
13. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника: Учеб. для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 304 с.
14. Гвоздева Н.П., Кульянова В.И., Леушина Т.М. Физическая оптика. – М.: Машиностроение, 1991. – 304 с.
15. Электронные приборы / Под ред. Г.Г. Шишкина. - М.: Издательство МАИ, 1996.
16. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
17. Ресурси мережі Internet.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Лекція 1. Загальні визначення та історія оптоелектроніки.....	6
1.1 Загальні визначення.....	6
1.2 Історія оптоелектроніки.....	9
1.3 Класифікація ОЕП та фізичні процеси в них.....	13
Лекція 2. Оптоелектронні прилади.....	15
2.1 Когерентні випромінювачі інфрачервоних хвиль – НПП лазери... ..	16
2.2 Приймач випромінювання.....	18
2.3 Оптопара.....	18
2.4 Оптоелектронні датчики.....	19
2.5 Квантові переходи електронів.....	19
2.6 Спонтанне і вимушене випромінювання.....	22
Лекція 3. Фоторезистори.....	25
3.1 Принцип дії фоторезисторів.....	25
3.2 Будова фоторезисторів.....	28
3.3 Характеристики фоторезисторів.....	30
Лекція 4. Фотодіоди.....	33
4.1 Фізичні основи внутрішнього фотоefекту.....	33
4.2 Принцип дії фотодіода.....	35
Лекція 5. Оптоелектронні пари (оптопари).....	38
5.1 Види оптронів.....	39
5.2 Оптоелектронні мікросхеми та інші прилади оптронного типу.....	40
5.3 Сфери застосування оптронів і оптронних мікросхем.....	41
5.4 Отримання і відображення інформації.....	41
Лекція 6. Оптичні системи передачі.....	43
6.1 Переваги волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) перед іншими системами передачі інформації.....	43
6.2 Структурна схема волоконно-оптичного зв'язку.....	46
6.3 Принцип дії світловодів. Типи світловодів.....	47
6.4 Планарний світловод.....	52
Лекція 7. Дисплеї.....	55
7.1 Характеристики моніторів.....	55
7.2 Електронно-променева трубка.....	56
7.3 Рідкокристалічний дисплей.....	56
7.4 Газорозрядний екран.....	59
7.5 Органічні дисплеї та світлодіоди.....	61
Лекція 8. Оптична пам'ять.....	63
8.1 Постійна оптична пам'ять з послідовним способом запису та зчитування інформації.....	63
8.2 Оперативна оптична пам'ять.....	65
8.3 Принцип голографічного запису інформації.....	66
Список літератури.....	68

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лекційних занять з дисципліни
«Оптоелектронні прилади»
для студентів спеціальності
153 «Мікро– та наносистемна техніка»
Частина 1

Укладачі: МІНАКОВА Ксенія Олександрівна
ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович
ВЕРЕТЕННИКОВА Юлія Ігорівна
ХРИПУНОВ Геннадій Семенович

Відповідальний за випуск Р.В. Зайцев

План 2021 р.

Підписано до друку 27.01.21. Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.
Друк – цифровий. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 4,1.
Обл.–вид. 3,0. Тираж 50 прим.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Надруковано у типографії ТОВ «Друкарня Мадрид»
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11. Тел.: (057) 756-53-25,
www.madrid.in.ua
e-mail: info@madrid.in.ua