

# Лекція № 3-4

## Тема: ОСНОВИ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

### ПЛАН ЛЕКЦІЇ

1. Класифікація оптоелектронних пристроїв та фізичні процеси в них.
2. Фоторезистори.
3. Фотодіоди.
4. Фототранзистори.
5. Фототиристори.
6. Світловипромінювальні діоди.
7. Оптипари.

### Рекомендована література

1. Однодворець Л.В. Основи оптоелектроніки. Конспект лекцій / Л.В. Однодворець. – Суми : Видавництво СумДУ, 2010. – 44 с.
2. Поплавко Ю.М. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності. / Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, В.І. Ільченко, Ю.І. Якименко. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – 160 с.
3. Назаров О.М. Наноструктури і нанотехнології / О.М. Назаров, М.М. Нищенко. – Київ : НАУ, 2012. – 248 с.
4. Погосов В.В. Нанофізика і нанотехнології / В.В. Погосов, Ю.А. Куницький, А.В. Бабіч, А.В. Коротун, А.П. Шпак. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2011. – 381 с.
5. Заячук Д.М. Нанотехнології і наноструктури / Д.М. Заячук. – Л. : Львівська політехніка, 2009. – 580 с.

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

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

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

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

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

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

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

технології нових сучасних приладів та пристроїв, підготовка висококваліфікованих кадрів.

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

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

## 1 Класифікація ОЕП та фізичні процеси в них

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2 Фоторезистори

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

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

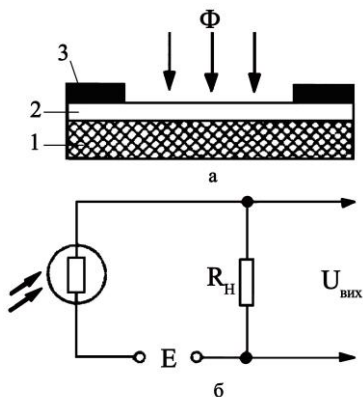


Рисунок 1.1 - Принцип будови та схема ввімкнення фоторезистора

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

До основних параметрів фоторезисторів відносять:

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

Основними характеристиками фоторезисторів є такі:

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

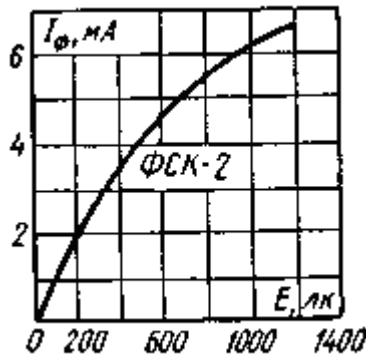


Рисунок 1.2 – Вольт – амперна характеристика фоторезистора ФСК-2

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

### 3 Фотодіоди

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

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

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

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

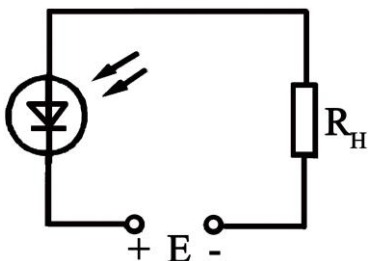


Рисунок 1.3 - Схема ввімкнення фотодіода для роботи у фотодіодному режимі

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



## 4 Фототранзистори

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

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

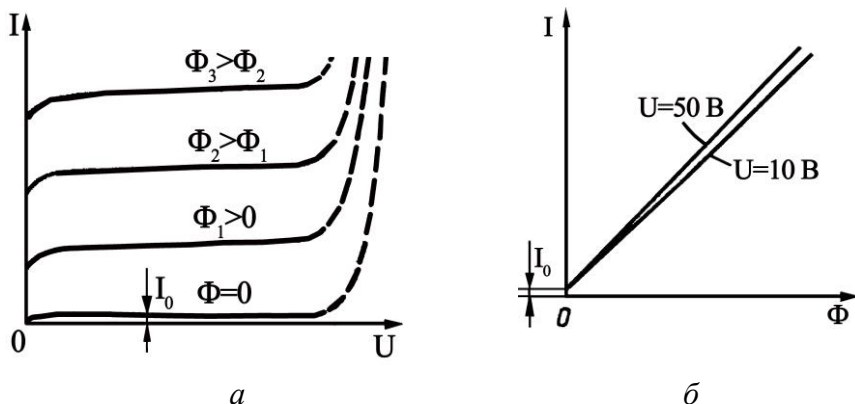


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна (а) та енергетична (б) характеристики фотодіода

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

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

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

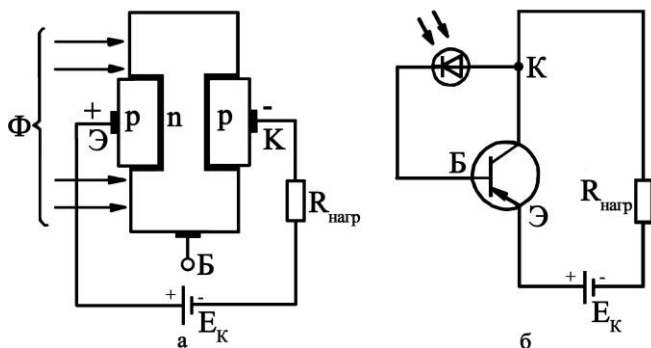


Рисунок 1.5 - Структурна схема біполярного фототранзистора з вільною базою (а) і схема ввімкнення фототранзистора (б)

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

## 5 Фототиристри

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

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

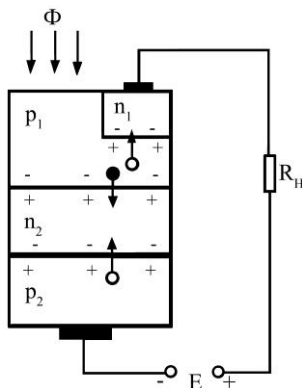


Рисунок 1.6 - Структура фото тиристора

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

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

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

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

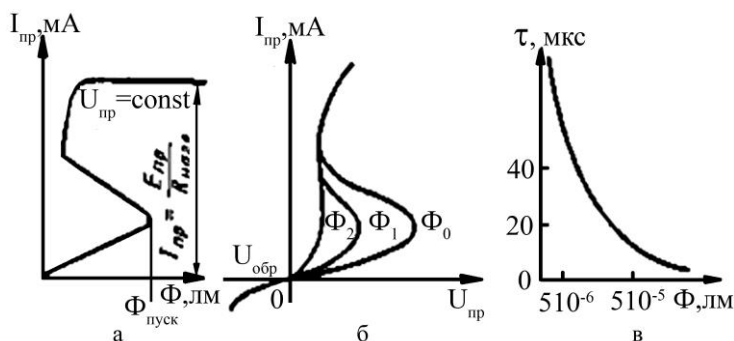


Рисунок 1.7 - Характеристики фототиристора: а - світлова, б -ВАХ, в - залежність часу від світлового потоку

## 6 Світловипромінювальні діоди

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Таблиця 1.1 – Залежність кольору світіння світлодіодів від частоти

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

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

Світловипромінюючі діоди є основою більш складних приладів:

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



## 7 Оптопары

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

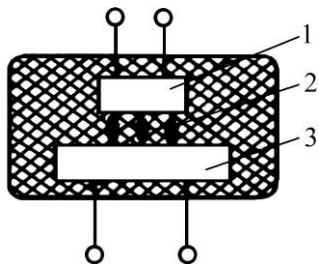


Рисунок 1.8 -Принцип будови оптопари:

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

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

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

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

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

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

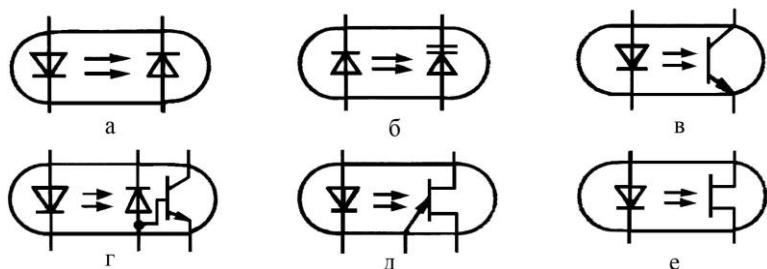


Рисунок 1.9 - Класифікація оптопар: а - діодна, б - діодна з фотоварікапом, в - транзисторна, г - транзисторна із складним транзистором, д - транзисторна з фотодіодом, е - транзисторна з одноперехідним транзистором, ж - транзисторна з польовим фототранзистором, з - тиристорна

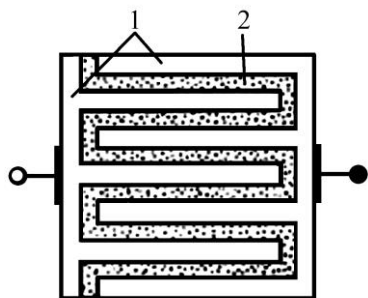


Рисунок 1.10 - Конструкція фоторезистора в резисторній оптопарі:

1 – металеві електроди;  
2 – фоточутливий шар

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

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

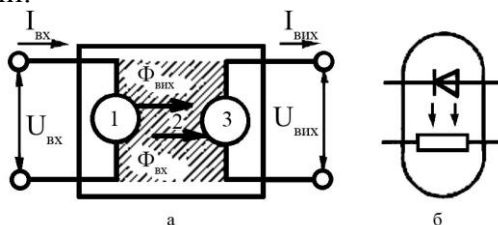


Рисунок 1.11 - Структура (а) і умовне графічне позначення (б) резисторної оптопари

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