Лекція 4. ФОТОЕЛЕКТРОННІ ТА ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

4.1. Загальні відомості

4.2. Фотодіоди

4.3. Фототранзистори

4.4. Фототиристори

4.5. Оптоелектронні прилади

4.6. Оптичні лінії зв'язку

4.1. Загальні відомості

Фотоелектронним приладом називають перетворювач енергії оптичного випромінювання в електричну.

До оптичного належать ультрафіолетове, видиме та ультрачервоне випромінювання з довжиною хвилі від десятків нанометрів до десятих частинок міліметра. Як відомо, видиме випромінювання лежить в діапазоні з довжиною хвилі 0,38÷0,76 мкм.

Робота фотоелектронних приладів ґрунтується на фотоелектричних явищах (фотоефекті). Раніше вже розглядалися деякі типи фотоелектронних приладів, тому в даному розділі розглянемо тільки особливості їх роботи.

4.2. Фотодіоди

Як уже було зазначено раніше (п. 1.5) фотодіоди можуть працювати в одному з двох режимів:

1) без зовнішнього джерела електричної енергії (режим фотогенератора);

2) зі зовнішнім джерелом електроенергії (режим фотоперетворювача).

У першому режимі використовується фотогальванічний ефект – різновид внутрішнього фотоефекту, який пов'язаний з утворенням різниці потенціалів (фото-е.р.с.).

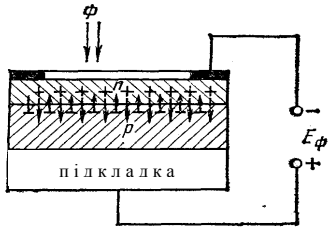


Рис. 4.1 – Будова фотодіода

Будова фотодіодів така, що світловий потік при освітленні пристрою направлений перпендикулярно площині *p*-*n*-переходу (див рис. 4.1).

За відсутності освітлення та зовнішнього джерела електричної енергії в області *p*-*n*-переходу виникає, як і в будь–якому НП діоді, потенціальний бар'єр, зумовлений нерухомими носіями заряду – додатними іонами в *n* – області та від'ємними іонами в *p* – області.

Під час падіння світлового потоку на фотодіод, фотони проходять у товщину напівпровідника і передають частині валентних електронів енергію, достатню для переходу їх у зону провідності. Внаслідок цього в обох областях збільшується кількість пар вільних носіїв заряду (основних та неосновних), тобто дірок та електронів. Під дією контактної різниці потенціалів (потенціального бар'єру) *p*-*n*-переходу неосновні носії заряду *n*-області – дірки – переходять в *p*-область, а неосновні носії заряду *p*-області – електрони – в *n*-область. Це призводить до утворення на затискачах фотодіода за розімкнутого зовнішнього кола різниці потенціалів, яка називається фото-е.р.с. Гранично можливе значення фото-е.р.с. дорівнює контактній різниці потенціалів, яка складає десяті

частки вольт. Так, наприклад, у селенових та кремнієвих фотодіодів фото-е.р.с. досягає (0,5÷0,6) В, у фотодіодів із арсеніду галію – 0,87 В.

Якщо замкнути затискачі освітленого фотодіода через резистор, то в електричному колі з'явиться струм, значення якого залежить від фото-е.р.с. та опору резистора. Максимальний струм буде при опорі резистора рівному нулю, тобто під час короткого замикання фото-діода. При опорі резистора, що не дорівнює нулю, струм у зовнішньому колі фотодіода суттєво зменшується.

Напруга неробочого ходу фотодіода, тобто фото-е.р.с. пов'язана зі світловим потоком логарифмічною залежністю. За великих світлових потоків настає насиченість і подальший ріст фото-е.р.с. припиняється. Фотодіоди, які працюють в режимі фотогенератора, часто використовують як джерела струму, що перетворюють енергію сонячного випромінювання на електричну. Вони називаються сонячними елементами і входять до складу сонячних батарей.

Якщо до неосвітленого фотодіода підключити джерело, значення і полярність напруги якого можна змінювати, то зняті при цьому ВАХ будуть мати такий же вигляд, як і в звичайного напівпровідникового діода, рис. 4.2.

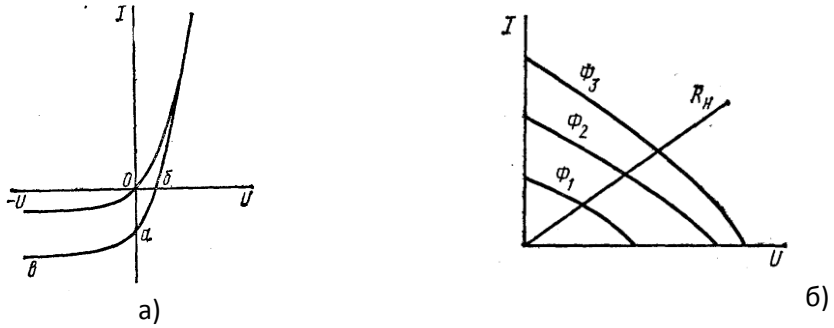


Рис. 4.2 – ВАХ фотодіода (а), ВАХ фотодіода в режимі фотогенератора (б)

Режим фотоперетворювача відповідає поданій напрузі на фотодіод у запірному напрямку (відрізок *ав* на рис. 4.2, а).

Під час освітлення фотодіода суттєво змінюється лише зворотна вітка ВАХ, прямі ж вітки практично співпадають за порівняно невеликих напруг. ВАХ фотодіода за різних значень світлового потоку наведені на рис. 4.2, б.

За наявності резистора в зовнішньому колі фотодіода струм та напруга можуть бути визначені графічно за точками перетину вольт–амперних характеристик фотодіода та резистора.

ВАХ фотодіода в режимі фотоперетворювача за різних значень світлового потоку зображені на рис. 4.3. Вони аналогічні колекторним характеристикам транзистора, що включений за схемою зі СБ, тільки параметром є не струм емітера, а світловий потік фотодіода.

За наявності навантажувального резистора $R_н$, який включений послідовно з джерелом е.р.с. (рис. 4.4) значення струму *I* та напруги $U_{вих}$ можна визначити, побудувавши лінію навантаження, яка відпо-відає опору резистора $R_н$ (див. рис. 4.4).

У режимі фотоперетворювача струм практично рівний струму короткого замикання, тому чутливість фотодіода до струму в обох режимах прийнято вважати однаковою. Чутливість фотодіодів: селенових – 0,3÷0,75 мА/мм, кремнієвих – 3 мА/мм, германієвих – до 20 мА/мм.

Темновий струм фотодіодів, вимірюють за мінімального значення світлового потоку. Для германієвих фотодіодів він дорівнює (10÷30) мкА, для кремнієвих – (1÷3)мкА.

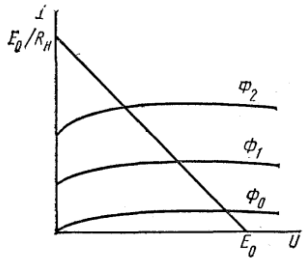


Рис. 4.3 – ВАХ фотодіода в режимі фотоперетворювача

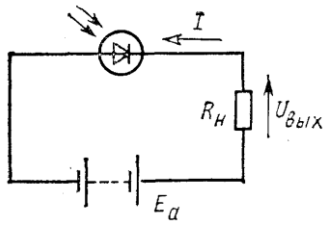


Рис. 4.4 – Схема підключення фотодіода в режимі фото-перетворювача

Енергетичні характеристики фотодіода в режимі фотоперет-ворювача лінійні, а в режимі фотогенератора суттєво залежать від опору резистора, включеного в зовнішнє коло.

Спектральні характеристики фотодіодів залежать від матеріалів, які використовуються для їх виготовлення.

Частотні характеристики залежать від матеріалів фотодіода.

Суттєвим недоліком фотодіода є залежність значень його пара-метрів від температури. Зокрема, темновий струм зростає майже удвічі за підвищення температури на 10^0С, що обмежує в деяких випадках використання фотодіодів.

У порівнянні з фоторезисторами фотодіоди мають більшу швидкодію, але меншу чутливість.

4.3. Фототранзистори

Фототранзистором називається напівпровідниковий фотоелект-ричний прилад з двома *p-n*-переходами, і лише з двома виводами: колекторним та емітерним. Будова і схема включення фототран-зистора зображені на рис. 4.5, а, б.

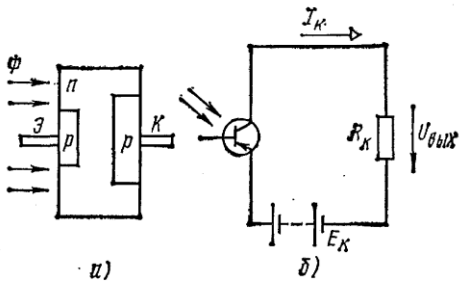


Рис. 4.5 – Будова (а) і схема ввімкнення (б) фото–транзистора

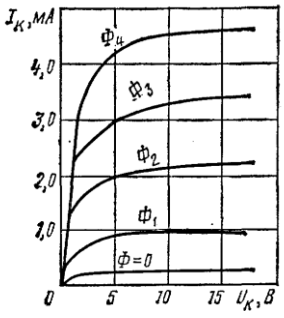


Рис. 4.6 – ВАХ фото–транзистора

Світловий потік *Ф* падає на базову область, тому емітер роблять тонким і невеликих розмірів. Під дією фотонів у базі утворюються нові пари носіїв зарядів – електрони та дірки. У фототранзисторі *p-*

n-p типу неосновні носії заряду в базі (дірки) рухаються через колекторний перехід, поле якого є для них прискорюючим, на колектор, створюючи фотострум $I_Ф$.

Електрони, які залишилися в базі, діють на емітерний перехід, зменшуючи висоту потенційного бар'єру, що сприяє переходу дірок із емітера в базу. Ці дірки рухаються через базу на колектор, виклика-ючи збільшення фотоструму фототранзистора. На рис. 4.6 зображені ВАХ фототранзистора. Вони подібні до вихідних характеристик звичайного транзистора, включеного за схемою зі СЕ.

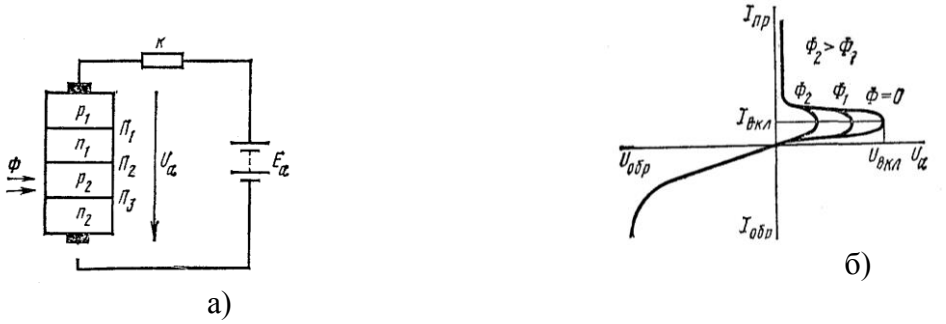
Темновий струм у фоторезистора більший, ніж у фотодіода.

Енергетичні характеристики фотоструму фототранзистора лінійні.

Спектральні характеристики фототранзисторів і фотодіодів, які виготовлені з однакових матеріалів, не відрізняються одна від одної.

4.4. Фототиристори

Подібно до звичайних тиристорів фототиристори виготовляють, як правило, з кремнію у вигляді чотирьох шарової структури *p-n-p-n* (рис. 4.7, а). За відсутності освітлення робота фототиристора не відрізняється від роботи звичайного тиристора. ВАХ фототиристора за світлового потоку $Ф$=0 (рис. 4.7, б) відповідає характеристиці тиристора під час керуючого струму I_y=0.



а) б)

Рис. 4.7 – Схема включення фототранзистора а) та його ВАХ б)

Якщо напруга, що підведена до фототиристора, не перевищує напруги $U_{вкл}$, при якій відбувається різке збільшення струму тиристора за рахунок лавинного збільшення носіїв заряду, то струм фототирис-тора, зумовлений рухом неосновних носіїв заряду через *p-n*-перехід $П2$, має невелике значення і являє собою темновий струм.

4.5. Оптоелектронні прилади

Оптоелектронними називаються прилади, які перетворюють електричні сигнали на оптичні (променеву енергію), та передають цю енергію індикатором або фотоелектричним перетворювачам.

Найрозповсюдженішим типом оптоелектронних приладів є оптрон. Оптрон – це НП прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, який має між собою певний оптичний та електричний зв'язок.

Джерело випромінювання перетворює електричні сигнали у світлові, які діють на фотоприймач і створюють знову в йому електричні сигнали.

Якщо оптрон має тільки один випромінювач, то його називають оптопарою або елементарним оптроном.

Коло джерела випромінювання називається керуючим, а коло фотоприймача – керованим.

В електронних пристроях оптрони виконують звичайну функцію елемента зв'язку. При цьому досягається гальванічна розв'язка вхідних та вихідних кіл електронного пристрою.

За конструктивним виконанням оптрони можуть бути з відкритим та закритим оптичним каналом.

На рис. 4.8 наведено будову оптрона із закритим оптичним каналом.

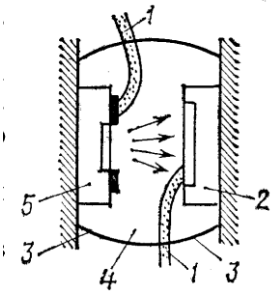


Рис. 4.8 – Будова оптрона: 1- вивід, 2 - фотоприймач, 3 - корпус, 4 - оптичне середовище, 5 - джерело випромінювання

Розглянемо деякі типи оптопар. Залежно від типу фотоприймача, який використовують, розрізняють фоторезисторні, фотодіодні, фототранзисторні та фототиристорні оптрони (рис. 4.9).

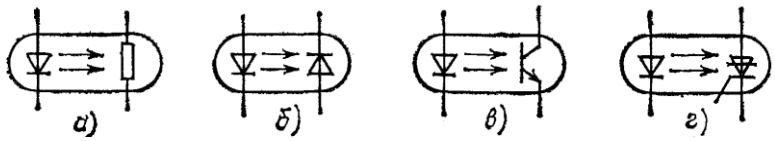


Рис. 4.9 - Умовні графічні позначення фоторезисторного (а), фотодіодного (б), фототранзисторного (в) і фототиристорного (г) оптронів.

Резисторні оптопари (рис. 4.9, а) найчастіше мають в якості випромінювача світлодіод, що дає видиме або інфрачервоне випромінювання. Приймачем випромінювання є фоторезистор із селеніду або сульфіду кадмію для видимого випромінювання, а для інфрачервоного – селеніду або сульфіду свинцю. Фоторезистор може працювати як при постійній, так і при змінній напрузі. В якості параметрів резисторних оптопар вказують: максимальні струми і напруги на вході та виході; вихідний опір за нормального режиму і так званого темнового вихідного опіру; опір ізоляції і максимальну напругу ізоляції між входом і виходом; прохідну ємність; час включення і виключення.

Резисторні оптопари використовуються для автоматичного регулювання підсилення, управління безконтактними дільниками напруги, модуляції сигналів і т.п.

Діодні оптопари (рис. 4.9, б) мають кремнієвий фотодіод і інфрачервоний арсенідо-галієвий світлодіод. Основними параметрами діодних оптопар є: вхідні та вихідні напруги та струми для неперервного та імпульсного режимів; коефіцієнт передачі струму; час реакції вихідного сигналу і т.п. Діодні оптопари використовують для передачі даних і керування мікросхемами. Різновидом діодних оптопар є оптопари в яких фотоприймачем служить варікап.

Транзисторні оптопари (рис. 4.9, в) в якості випромінювача мають арсенідо-галієвий світлодіод, а приймачем служить фототранзистор. Основні параметри вхідного кола таких оптопар аналогічні

параметрам діодних оптопар. Додатково вказуються максимальні струми, напруга та потужність, що відносяться до вихідного кола, темновий струм фототранзистора, час включення і виключення, а також параметри, що характеризують ізоляцію вхідного кола від вихідного. Транзисторні оптопари, в основному, працюють у ключовому режимі і використовуються в комутаторних схемах, в якості реле і т.п. Тиристорні оптопари мають в якості фотоприймача кремнієвий фототранзистор і використовуються в ключових режимах для формування імпульсів керування потужними тиристорами, керування і комутації різними пристроями з потужними навантаженнями.

Параметрами тиристорних оптопар є: вхідні та вихідні струми і напруги, що відповідають включенню, робочому і максимально –допустимому режиму; час включення і виключення приладу; параметри ізоляції між вхідними і вихідними колами.

Вхідні і вихідні характеристики оптронів залежать від джерел приймачів випромінювання, що в них використовуються. Важливою для оптронів є передавальна характеристика. Для фоторезисторних оптронів вона визначається відношенням темнового опору до світлового R_T / R_{cm}, для фотодіодних і фототранзисторних – коефіцієнтом передачі струму $K_i = I_{вих} / I_{вх}$, а для фототиристорних – мінімальним вхідним струмом, що забезпечує спрямлення харак-теристики $I_{спр.вх}$.

4.6. Оптичні лінії зв'язку

Поява в кінці 60-х років аналогів електричних кабелів – скляних волоконно-оптичних світловодів дала змогу реалізувати великі потен-ціальні можливості оптичного зв'язку в інформаційно густій та високошвидкісній передачі сигналів.

Оптичні лінії зв'язку, що включають волоконно-оптичні світловоди, призначені для передавання та обробки оптичних сигналів, які несуть інформацію. Повна структура оптичної лінії, зображена на рис. 4.10, складається з таких елементів: електронний кодуючий пристрій (ЕКП), передавач, волоконно-оптичний кабель, приймач, електронний декодуючий пристрій (ДКП). Передавач – це електронний пристрій збудження з вихідним джерелом світла. Приймач складається з фотоприймача та підсилювача слабких фотосигналів.

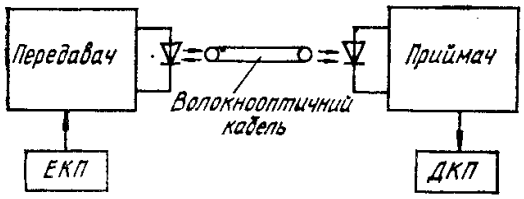


Рис. 4.10 – Структурна схема оптичної лінії зв’язку

Залежно від складності системи, її швидкодії та якості використаних елементів наведена схема на рис. 4.10, може зазнавати змін. Дуже коротка і функціонально проста лінія зв'язку складається лише із джерела світла (світлодіода), оптичного кабеля та фотоприймача (фотодіода) без електронних пристроїв збудження (з боку передавача) і підсилення (з боку приймача), тобто це оптрон з гнучким світловодом.

Як джерела світла використовуються світлодіоди, напівпровід-никові та твердотільні лазери, як приймачі — фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори.

Світловід, незалежно від його форми, складається із серцевини та віддзеркалюючої оболонки. Серцевина виготовляється з органічного або неорганічного скла.

На основі елементарних світловодів створюють світловолоконні жгути (радіус волокна 10 мкм). Жгут світловодів оточують спочатку загальною внутрішньою еластичною оболонкою, а потім зовнішньою обпліткою, яка забезпечує стійкість до зовнішніх дій і міцність волоконно-оптичного кабелю. На рис. 4.11, а наведено конструкцію скловолоконного жгута для одного каналу передачі інформації. Він набраний з одиничних елементарних скловолокон 1, скріплених фіксуючою оболонкою жгута 2. На рис. 4.11, б зображено конструкцію типового оптичного кабелю, у якого семижильний жгут 1 із зміцнюючим нейлоновим або кевларовим елементом 2, оточений внутрішньою (еластичною) 3 і зовнішньою (захисною) 4 оболонками. Шістнадцятиволоконний кабель з полімерним еластичним покриттям 1 в металічному рукаві 2, що являє собою броньове покриття, зображений на рис. 4.11, в.

Канали волоконнооптичного зв'язку широко застосовуються для зв'язку всередині блоків і між ЕОМ, у монтажі літакової, суднобудівної та іншої контрольно-вимірювальної апаратури, що працює в умовах сильних електромагнітних та корпускулярних полів.

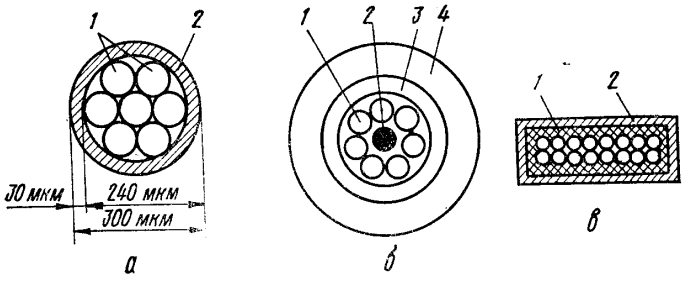
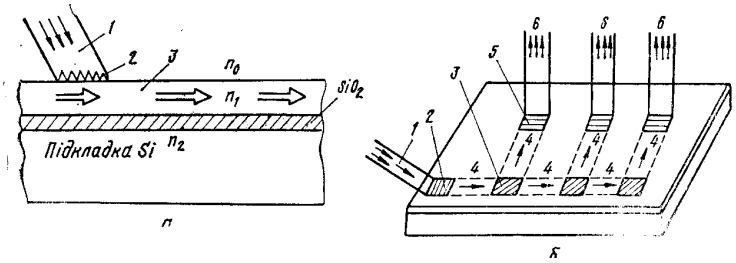


Рис. 4.11 – Структурна схема ВОК

Для з'єднання плівкових активних елементів оптоелектронних систем застосовують діелектричні плівки, які виконують функції хвилеводів оптичного діапазону. На рис. 4.12, а зображений оптичний хвилевід, що являє собою підкладку з кремнію, вкриту тонким шаром двооксиду кремнію SiO_3. Товщина діелектричної смужки становить від частин до одиниць мікрометрів, ширина — від десятків до сотень мікрометрів. Вони забезпечують потрібні показники заломлення, контрольовану товщину світловоду і його розташування. Для різних плівок значення втрат становить 0,3 ÷10 дБ/см.

Для світловодів використовують плівки з таких матеріалів: ZnO, скла типу SiO_2+PbO, $GaAs$, суміші SiO_2 та Si_3N_4 та т.п. Інтегрально–оптичне відгалуження на кремнієвій підкладці виконується за допомогою планарних та експланарних відгалужувачів. Введення світлової хвилі 7 в оптичний хвилевід і виведення світлової хвилі 6 у навколишнє середовище (рис. 4.12, б) здійснюється з допомогою експланарних відгалужувачів (дифракційних решіток) 2 та 5. Таким чином, світловий промінь переводиться з одного оптичного середовища в інше.

Поворот променя 4 в межах того самого оптичного середовища здійснюється планарними відгалужувачами 5.



а) б)

Рис. 4.12 – Оптичний хвилевід

На основі викладеного матеріалу проглядаються такі особливості волоконно-оптичних ліній зв'язку:

- малі габаритні розміри та маса, обумовлені малою густиною вихідних матеріалів і відсутністю важких металевих екрануючих оболонок. Це особливо важливо для бортової апаратури;

- абсолютна захищеність від дії зовнішніх електромагнітних полів та міжканальних наведень;

- широка смуга пропускання (до 1÷3 ГГц);

- однонапрямленість потоку інформації та гальванічна розв'язка, характерні для всіх елементів оптоелектроніки;

- відсутність випромінювання в навколишнє середовище, що забезпечує таємничість інформації, яка передається;

- потенціально низька ціна, зумовлена заміною дорогих кольорових металів (мідь, алюміній) склом, кварцем, полімерами – матеріалами з необмеженими сировинними ресурсами.