

## Лабораторна робота 9

### Електрофізичні характеристики напівпровідникових приймачів оптичного випромінювання

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

**Прилади і матеріали:** лабораторний стенд із змінним модулем для фотоприймачів, фоторезистори, фотодіоди.

#### Теоретичні відомості

**Фотоприймач (ФП)** – це оптоелектронний прилад для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію. Принцип дії фотоприймача ґрунтується на внутрішньому фотоелектричному ефекті в напівпровіднику. Використовується дві форми внутрішнього фотоелектричного ефекту: фотогальванічний ефект (в напівпровідниках з випрямляючим переходом чи переходами – фотодіодах, фототранзисторах, фототиристорах тощо) і ефект фотопровідності (в однорідних напівпровідниках – фоторезисторах) (рис. 9.1).

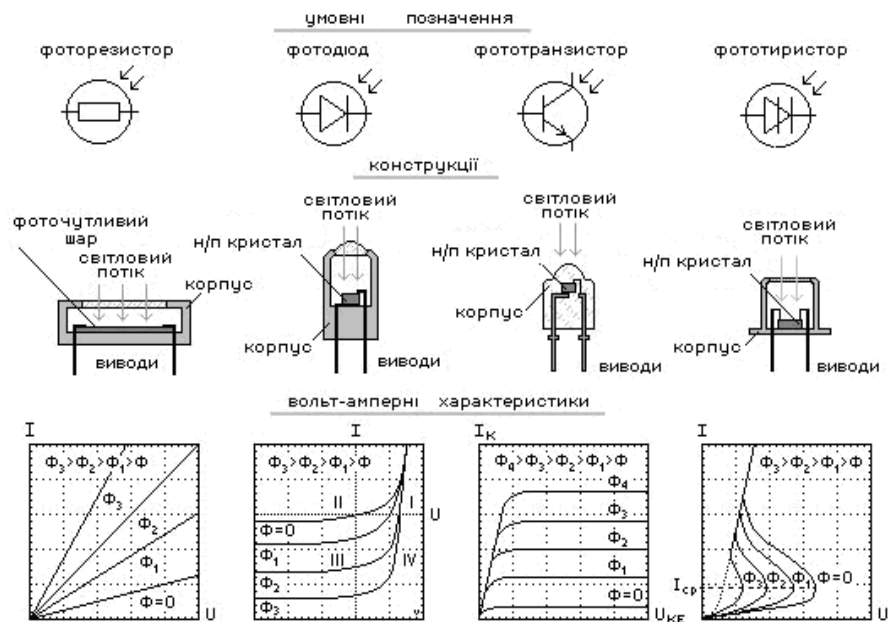


Рис. 9.1. Позначення, конструкції та типові вольт-амперні характеристики напівпровідникових фотоприймачів

Ефективність протікання фотоелектричних процесів характеризується квантовим виходом, який дорівнює відношенню кількості генерованих пар електрон - дірка до кількості падаючих квантів випромінювання. З різних причин це відношення завжди менше від одиниці. Світлова хвиля затухає експоненціально в напівпровіднику. Коефіцієнт поглинання змінюється в залежності від матеріалу і сильно залежить від довжини світлової хвилі. Глибину поглинання можна визначити як товщину шару напівпровідника, після проходження якого потік випромінювання зменшується в  $e = 2,718$  разів.

Основними характеристиками ФП є спектральна, частотна і енергетична (світлова).

### ***Фоторезистор***

*Фоторезистор* – напівпровідниковий елемент, який змінює свій електричний опір під дією зовнішнього випромінювання оптичного діапазону. Його принцип дії заснований на внутрішньому фотоефекті в напівпровідниках. Фоторезистор – це шар (монокристал або плівка) напівпровідникового матеріалу на підкладці (або без неї) з нанесеними на нього омичними електродами, за допомогою яких прилад вмикається до електричного кола (рис. 9.2). Внаслідок дії потоку випромінювання, що падає на робочу поверхню фоторезистора, його внутрішній опір зменшується внаслідок генерування пар вільних носіїв заряду (електронів і дірок), за рахунок чого збільшується електропровідність напівпровідника.

Розрізняють три групи фоторезисторів: *плівкові, монокристалічні та леговані* домішками. До плівкових відносять ФР із свинцевих сполук сірки (PbS), селену (PbSe) і телуру (PbTe). Монокристалічні виготовляють з антимоніду індію (InSb), телуридів кадмію і ртуті ( $Hg_xCd_{1-x}Te$ ), сульфїду (CdS) і селенїду (CdSe) кадмію. Леговані ФР (з германію, легованого різними домішками) працюють лише при низьких температурах. Матеріали на основі кадмію чутливі до випромінювань у видимій і ближній інфрачервоній областях, а на основі свинцю – на довжинах хвиль 1-5 мкм.

Світлова характеристика фоторезистора  $I(\Phi)$  зберігає лінійність при невеликих світлових потоках і відповідає законові Столетова, який встановив,

що кількість електронів, звільнених світлом за одиницю часу (тобто струм), прямо пропорційна до світлового потоку при незмінному його спектральному складі:

$$I = S_I \Phi, \quad (9.1)$$

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

$$S = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) / \Delta E. \quad (9.2)$$

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

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

$$\Phi_n = m \sqrt{\frac{\overline{U_0^2}}{S_U}}, \quad (9.3)$$

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

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

$$\Delta \Phi = 10 \cdot \lg \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}}, \quad (9.4)$$

де  $\Phi_{\max}$ - $\Phi_{\min}$  – область значень світлового потоку  $\Phi$ , у межах якої енергетична характеристика залишається лінійною. Фоторезистор поводить себе як омичний опір, тобто його опір не залежить ні від прикладеної напруги, ні від її знаку.

При малих значеннях освітленості опір ФР істотно залежить від температури. Настільки ж помітним недоліком фоторезисторів при малих освітленостях є інерційність – при освітленості менше 1 лк час встановлення нового значення може складати декілька секунд.

*Темновий опір* – це опір чутливого шару  $R_T$  за відсутності опромінення ФР. У різних типів ФР величина  $R_T$  коливається від десятків Ом до десятків МОм. З усіх параметрів це найменш стабільна величина, значення якої сильно залежить від температури. Темновий опір прийнято визначати через 30 с після затемнення ФР, який попередньо знаходився при освітленості 200 лк. Це обумовлено інерційністю звільнення пасток захоплення після припинення освітлення.

На рис. 9.2, а показана типова схема ввімкнення ФР для реєстрації світлового потоку. Оскільки ФР є пасивним фотоприймачем, для його роботи необхідна зовнішня напруга живлення. Залежність фотоструму від прикладеної до ФР напруги за сталої освітленості називають вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Ці характеристики, як правило, лінійні (див. рис. 9.1).

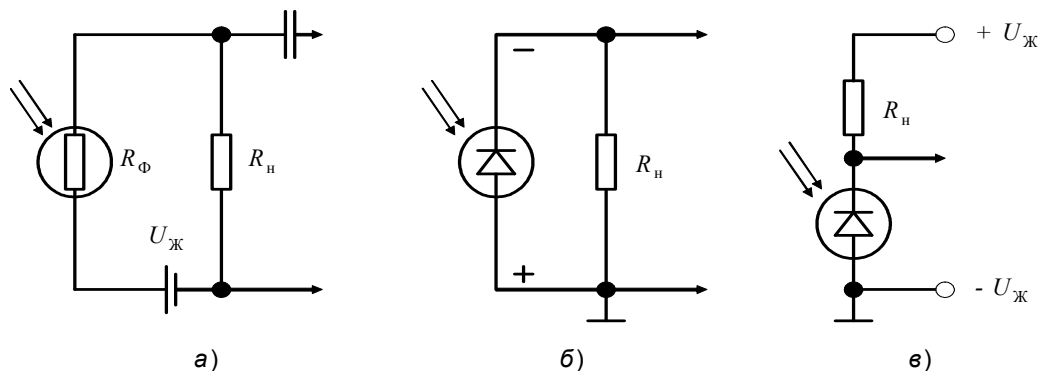


Рис. 9.2. Схеми ввімкнення фоторезистора (а) і фотодіода в фотогальванічному (б) та фотодіодному (в) режимах. Позначення:  $R_{\Phi}$  – опір ФР,  $R_n$  – опір навантаження,  $U_{\text{ж}}$  – напруга живлення

Перевагами фоторезисторів є їх відносна простота та невеликі робочі напруги, порівняно з фотопомножувачами. До позитивних характеристик ФР варто віднести можливість створення робочих поверхонь приймача різної площі і довжини, що дозволяє використовувати їх як елемент керування досить значними струмами, а також як давачі переміщень об'єктів контролю в діапазоні декількох міліметрів (наприклад, у системах спостереження за

положенням краю паперового полотна в рулонних друкованих машинах). Потужність розсіяння цілої низки ФР є достатньою для керування електричним колом потужністю в декілька ватт.

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

### Фотодіод

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

Якщо концентрація акцепторів у  $p$ -області дорівнює концентрації донорів в  $n$ -області, електронно-дірковий перехід є симетричним. У приймачах випромінювання найчастіше використовують несиметричні переходи, коли ступені легування  $p$ - і  $n$ -областей різні. Тоді фотострум тече з області з вищим ступенем легування в область з нижчим ступенем легування, тобто в базу ФД. Напрямок струму носіїв збігається з напрямком зворотного струму переходу (рис. 9.3), тобто із збільшенням освітленості зростає зворотний струм фотодіода.

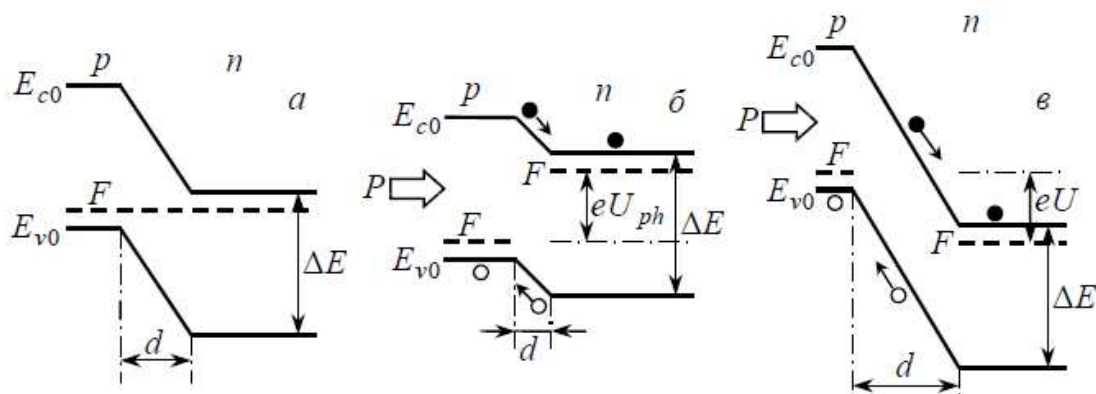


Рис. 9.3. Зонна енергетична схема  $p$ - $n$ -переходу в стані рівноваги (а), фотогальванічному (б) та фотодіодному (в) режимах

Фотодіод може працювати в двох режимах – фотодіодному та фотогальванічному. Схеми увімкнення ФД в електричне коло в цих режимах його роботи зображені на рис. 9.2. У *фотодіодному режимі* прилад під'єднується до джерела живлення, у цьому випадку на анод повинен подаватися «-», а на катод «+» (рис. 9.2,в). Цьому режимові відповідають залежності в III квадранті вольт-амперної характеристики (рис. 9.1). Залежності, наведені в IV квадранті, відображають *фотогальванічний режим* роботи, коли ФД може використовуватися без джерела живлення, тому що сам стає джерелом фото-ЕРС, генеруючи (під дією світла) носії зарядів – вільні електрони (рис. 9.2,б). Завдяки цьому фотодіод стає придатний для одержання електроенергії (один фотодіод здатний генерувати напруги у діапазоні 0-0,4 В залежно від струму навантаження, який, як правило, становить мікроампери).

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

Матеріалами для виготовлення фотодіодів найчастіше слугують германій і кремній. Спектральна чутливість германієвих фотодіодів знаходиться в діапазоні 0,5 - 1,7 мкм (з максимумом на довжині хвилі 1,2 - 1,65 мкм), а кремнієвих – між 0,6 - 1 мкм (максимум на довжині хвилі 0,8 - 0,95 мкм).

*Світловою характеристикою*, як уже згадувалося, називають залежність фотоструму  $I_{\phi}$  від світлового потоку  $\Phi$ , який падає на чутливу поверхню при сталій напрузі ( $U_{\phi} = \text{const}$ ). У випадку ФД світлові характеристики будують в залежності від освітленості їх поверхні  $E = \Phi/A$  ( $A$  – площа чутливої поверхні), а не від величини світлового потоку, оскільки розміри чутливого шару незначні. За світловою характеристикою визначається основний параметр будь-якого фотоприймача, в тому числі і ФД, – інтегральна чутливість  $S = I_{\phi}/(A\Phi)$ . Для багатьох напівпровідникових фотоприймачів інтегральна чутливість

залежить від прикладеної напруги (у тому числі для ФД у фотодіодному режимі), тому, як і у випадку ФР, користуються поняттям питомої чутливості:

$$S_0 = \frac{I_\phi}{AU_\phi\Phi} . \quad (9.5)$$

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

$$I_{\text{ФД}} = I_\phi - I_{pn} = I_\phi(\Phi) - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (9.6)$$

де  $I_\phi$  – фотострум;  $I_{pn}$  – струм  $p$ - $n$ -переходу;  $I_0$  – тепловий струм  $p$ - $n$ -переходу. За різних потоків випромінювання  $\Phi$  цей вираз задає сімейство ВАХ ФД (рис. 9.1). Квадрант I – це не робоча область для ФД, тут дифузійна складова струму набагато більша від фотоструму ( $I_{pn} \gg I_\phi$ ).

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

$$U_z - I_\phi R_n = U , \quad (9.7)$$

де  $U_z$  – величина зворотної напруги.

Оскільки у фотодіодному режимі (рис. 9.2, в) ФД і резистор навантаження з'єднані послідовно, через них протікає однаковий струм. Його можна визначити за точкою перетину ВАХ ФД і резистора у III квадранті (рис. 9.4). Таким чином, у фотодіодному режимі за заданого потоку випромінювання ФД є джерелом струму  $I_\phi$  по відношенню до зовнішнього кола. Значення цього струму практично не залежить від параметрів зовнішнього кола.

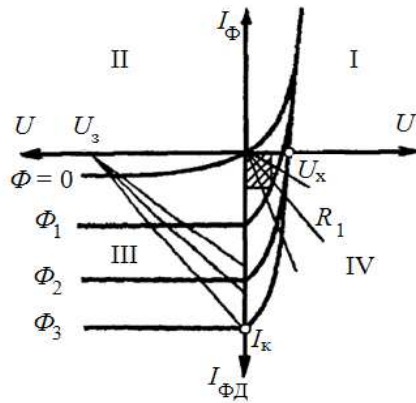


Рис. 9.4. Сімейство вольт-амперних характеристик фотодіода для різних рівнів світлових потоків  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  і для  $\Phi = 0$  [5]

Квадрант IV відповідає фотогальванічному режиму роботи ФД (рис. 9.4). Точки перетину ВАХ з віссю напруг відповідають значенням фото-ЕРС або напругам холостого ходу ( $R_n = \infty$ ). Тоді з виразу (9.6) легко одержати напругу на переході, яка дорівнює фото-ЕРС

$$U_x = \frac{kT}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_\phi}{I_0} \right). \quad (9.8)$$

Точки перетину ВАХ з віссю струмів відповідають значенням струмів короткого замикання ( $R_n = 0$ ). Проміжні значення опору навантаження визначаються лініями, які для різних значень  $R_n$  виходять з початку координат під різними кутами. При заданому значенні струму можна вибрати оптимальний режим роботи ФД у фотогальванічному режимі, коли на опорі буде виділятися найбільша електрична потужність. Оптимальному режиму відповідає для світлового потоку  $\Phi_1$  лінія навантаження  $R_1$  (площа заштрихованого прямокутника буде найбільшою – рис. 9.4).

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



При виконанні роботи передбачається використання широкого набору фотоприймачів. Їх заміна проводиться лише за участю викладача. У цьому випадку необхідно також ознайомитися з їх описом та паспортними характеристиками.

### **Порядок виконання роботи**

1. Вивчити схему установки, програмне забезпечення до неї та інструкції з експлуатації електроприладів, що використовуються при виконанні роботи.
2. Після співбесіди з викладачем одержати дозвіл на ввімкнення апаратури та перевірити її роботу.
3. Отримати набір напівпровідникових фотоприймачів та по чергово під'єднати їх до схеми.
4. Виміряти вольт-амперні характеристики фотоприймача для різних рівнів їх освітленості. Виконати обробку результатів вимірювання.
5. Для фіксованого значення напруги (для фоторезисторів у I чверті ВАХ, для фотодіодів у III чверті ВАХ) визначити величини фотострумів для різних рівнів світлових потоків на фотоприймач та побудувати їхні світлові характеристики.
6. Із світлових характеристик за тангенсом нахилу визначити чутливості відповідних фотоприймачів та порівняти їх. Зробити аргументовані висновки за результатами виконання роботи.
7. Виміряти і побудувати вольт-амперні характеристики наданих викладачем оптопар та за їх виглядом визначити тип фотоприймача у відповідній оптопарі.