

ЛЕКЦІЯ (31.03.2020) Напівпровідникові діоди

Світлодіоди

Світлодіодом називають напівпровідниковий прилад, що випромінює з одним $p-n$ переходом, призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії в енергію світлового випромінювання.

У світлодіодах $p-n$ перехід завжди зміщений в прямому напрямку (рис. 1). При цьому спостерігається інтенсивна інжекція неосновних носіїв заряду: електронів в p -область і дірок в n -область. При зустрічі електронів і дірок відбувається ясна рекомбінація з виділенням енергії через перехід електронів з одного енергетичного рівня на інший. У багатьох напівпровідників рекомбінація носить безвипромінюючий характер – енергія, що виділяється віддається кристалічній решітці. Однак, у напівпровідників виконаних на основі карбіду кремнію (SiC), галію (Ga), миш'яку (As) і деяких інших елементів, рекомбінація є випромінювальною, тобто енергія рекомбінації виділяється у вигляді квантів випромінювання – *фотонів*.

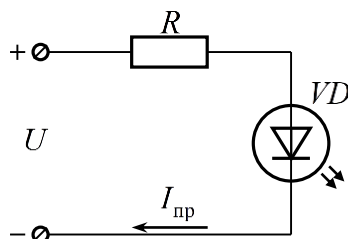


Рис.1 – Схема включення і умовне позначення світлодіода

У таких напівпровідниках проходження через $p-n$ перехід струму в прямому напрямку супроводжується некогерентним оптичним випромінюванням певного спектрального складу. Частота випромінювання залежить від матеріалу світлодіодів і складу легуючих домішок. Найбільшого поширення набули світлодіоди, що випромінюють жовтий, червоний і зелений світло.

Довжина хвилі λ випромінюваного світла однозначно визначається енергією кванта, яка при випромінювальній рекомбінації в напівпровіднику приблизно дорівнює ширині забороненої зони.

$$\lambda = \frac{h}{\epsilon_3},$$

де h – постійна Планка.

В даний час світлодіоди різних типів дозволяють покрити діапазони довжин хвиль випромінювання від 366 нм до 950 нм і більше (табл.1).

Класифікація світлодіодів за колірним спектром

Колір	Довжина хвилі (нм)	Напруга (В)	Матеріал напівпровідника
Інфрачервоний	$\lambda > 760$	$\Delta U < 1,9$	Арсенід галію (GaAs) Алюмінію галію арсенід (AlGaAs)
Червоний	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta U < 2,03$	Алюмінію-галію арсенід (AlGaAs) Галію арсенід-фосфід (GaAsP) Алюмінію-галію-індію фосфід (AlGaInP) Галію(III) фосфід (GaP)
Помаранчевий	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < \Delta U < 2,10$	Галію фосфід-арсенід (GaAsP) Алюмінію-галію-індію фосфід (AlGaInP) Галію(III) фосфід (GaP)
Жовтий	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < \Delta U < 2,18$	Галію арсенід-фосфід (GaAsP) Алюмінію-галію-індію фосфід (AlGaInP) Галію(III) фосфід (GaP)
Зелений	$500 < \lambda < 570$	$1,9 < \Delta U < 4,0$	Індія-галію нітрид (InGaN) / Галію(III) нітрид (GaN) Галію(III) фосфід (GaP) Алюмінію-галію-індію фосфід (AlGaInP) Алюмінію-галію фосфід (AlGaP)
Блакитний	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Селенід цинку (ZnSe) Індія-галію нітрид (InGaN) Карбід кремнію (SiC) в якості субстрату Кремній (Si) в якості субстрату
Фіолетовий	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta U < 4,0$	Індія-галію нітрид (InGaN)
Пурпурний	Суміш декількох спектрів	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Подвійний: синій/червоний діод, синій з червоним люмінофором, або білий з пурпурним пластиком
Ультрафіолетовий	$\lambda < 400$	$3,1 < \Delta U < 4,4$	Нітрид алюмінію (AlN) (210 nm) Нітрид алюмінію-галію (AlGaIn) Нітрид алюмінію-галію-індію (AlGaInN)
Білий	Широкий спектр	$\Delta U \approx 3,5$	Синій/ ультрафіолетовий діод з люмінофором

Основні параметри і характеристики світлодіодів:

1. *Яскравість світіння* при заданому прямому струмі або силі світла (мкд) – світловий потік, який припадає на одиницю тілесного кута в заданому напрямку (0,1...10 мкд);
2. *Постійна пряма напруга* ($U_{пр}$) – падіння напруги при заданому струмі (2...4 В);
3. *Максимально допустимий прямий струм* ($I_{пр\ max}$) (10...50 мА);
4. *Максимально допустима зворотна напруга* ($U_{пр\ max}$) (зазвичай не більше 5 В)
5. *Кут випромінювання* (α) – плоский кут, в межах якого сила світла

становить не менше половини її максимального значення;

6. *Спектральна характеристика* – залежність відносної потужності випромінювання від довжини випромінюваної хвилі при певній температурі.

7. *Колір світіння або довжина хвилі випромінювання (λ)* – довжина хвилі відповідає максимуму спектральної характеристики випромінювання (366...950 нм);

У порівнянні з іншими електричними джерелами світла світлодіоди мають наступні переваги:

- висока світлова віддача. Сучасні світлодіоди зрівнялися за цим параметром з натрієвими газорозрядними лампами і металогалогенними лампами, досягнувши 150 Люмен на Ватт;
- висока механічна міцність, вібростійкість;
- тривалий термін служби – від 30 тис. до 100 тис. годин. При тривалій роботі і/або поганому охолодженні відбувається «отруєння» кристалу і поступове падіння яскравості;
- спектр сучасних світлодіодів буває різним – від теплого білого 2700 К, до холодного білого 6500 К.
- мала інерційність. Світлодіод є швидкодіючим джерелом світла, при роботі в номінальному режимі його перемикання здійснюється за $10^{-7} \dots 10^{-9}$ с;
- кількість циклів включення-виключення не мають істотного впливу на термін служби світлодіодів;
- різний кут випромінювання – від 15 до 180 градусів;
- безпека – не потрібні високі напруги, низька температура світлодіода або арматури (зазвичай не вище 60°C);
- нечутливість до низьких і дуже низьких температур. Однак, високі температури світлодіодам протипоказані, як і будь-яким напівпровідникам;
- екологічність – відсутність ртуті, фосфору і ультрафіолетового випромінювання на відміну від люмінесцентних ламп.

Останнім часом все більше застосування отримують надяскраві освітлювальні світлодіоди "білого світла". Розрізняють два види білих світлодіодів: псевдобілий, що складається з трьох світлодіодів червоного, зеленого і синього світіння в одному корпусі і пристрій на основі блакитного світлодіода, покритого шаром люмінофора жовтого діапазону світіння. Світло приблизно білого спектра виходить шляхом змішування синього світла від світлодіода і більш довгохвильового перевипромінюваного від люмінофора. Основним недоліком білих світлодіодів є обмежений термін служби через вигорання люмінофора.

Фотодіоди

Фотодіодом називається фотоелектричний прилад з одним $p-n$ переходом, в якому використовується явище внутрішнього фотоелефекту.

Крім $p-n$ фотодіодів, існують і $p-i-n$ фотодіоди, в яких між шарами p і n знаходиться шар нелегованого напівпровідника i , фотодіоди Шоттки, лавинні фотодіоди і фотодіоди з гетероструктур.

Внутрішнім фотоелефектом називається процес іонізації атомів кристалічної решітки напівпровідника або домішки в ній квантами світла, що супроводжується утворенням рухливих носіїв заряду.

При іонізації атомів генерується електронно-діркові пари, які під впливом градієнта концентрації дифундують до $p-n$ переходу. На межі переходу вони поділяються і неосновні носії під впливом електричного поля, величина якого визначається контактною різницею потенціалів, перекидаються через перехід в область, де вони є основними носіями заряду. Струм, створований неосновними носіями заряду, при переході в область, де вони є основними носіями заряду, називають *повним фотострумом*.

Основні носії залишаються в області генерації пари. Якщо коло розімкнути, то електрони накопичуються в n -області, а дірки в p -області. Об'ємний заряд цих носіїв частково компенсує заряд іонів замикаючого шару, знижуючи потенційний бар'єр. Це призводить до порушення умов термодинамічної рівноваги і виникненню струму дифузії через $p-n$ перехід.

Новий рівноважний стан відповідає меншій висоті потенційного бар'єру, рівній $U_k - E_\phi$, при якому потік неосновних носіїв заряду через перехід, викликаний світловим опроміненням, повністю урівноважений зустрічним дифузійним потоком основних носіїв заряду.

ЕРС, на значення якої знижується потенційний бар'єр називають *фото ЕРС* (E_ϕ).

Для переходу в зону провідності електрон, який знаходиться в валентній зоні, повинен отримувати приріст енергії, що перевищує ширину забороненої зони. Власний фотоелефект виникає в тому випадку, якщо енергія кванта світла перевищує $\Delta\varepsilon$. Для кремнію максимальна довжина хвилі лежить в інфрачервоній області $\lambda \approx 1,1$ мкм. Межа фотоелефекту відповідає переходу електрона з самого верхнього рівня валентної зони на найнижчий рівень зони провідності.

Якщо в результаті іонізації електронно-діркові пари генеруються на відстані від $p-n$ переходу більшому дифузійної довжини, вони встигають рекомбінувати не досягнувши $p-n$ переходу і не вносять вкладу в фотострум.

ВАХ фотодіода при різних значеннях світлового потоку наведено на рис.2.

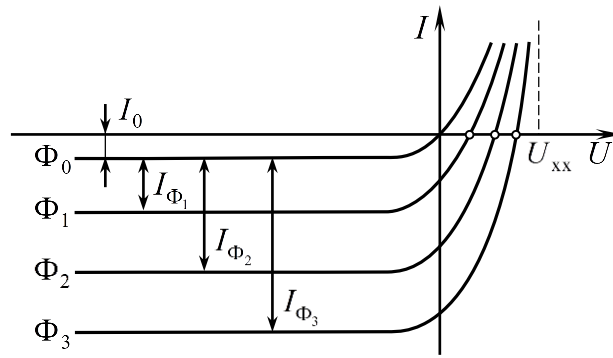


Рис. 2 – ВАХ фотодіода при різних значеннях світлового потоку

Тут $\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$. Значення фотоструму в першому наближенні можна знайти з виразу

$$I_{\Phi} = S_{\text{інт}} \cdot \Phi,$$

де $S_{\text{інт}}$ – інтегральна чутливість;
 Φ – світловий потік.

Як впливає з принципу роботи фотодіода, фотострум підсумовується зі зворотним струмом теплового походження

$$I_{\text{заг}} = I_{\Phi} - I_0 \left(1^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

де φ_T – температурний потенціал $\varphi_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ мВ}$.

Якщо фотодіод замкнено на резистор R , то напруга на p - n переході $U_{\text{вих}} = IR$, тоді

$$I_{\text{заг}} = I_{\Phi} - I_0 \left(1^{\frac{IR}{\varphi_T}} - 1 \right).$$

Вирішивши це рівняння щодо $U_{\text{вих}}$ отримаємо рівняння, яке аналітично описує ВАХ фотодіода

$$U_{\text{вих}} = \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I_{\Phi} + I_{\text{заг}}}{I_0} \right).$$

Фотодіод можна включити в схему, як із зовнішнім джерелом живлення (рис. 3, а), так і без нього (рис. 3, б).

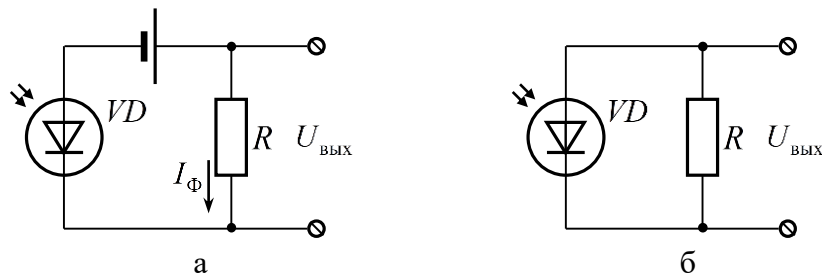


Рис. 3 – Схеми включення фотодіода: а – із зовнішнім джерелом живлення; б – фотодіод замкнутий на резистор

В схемі із зовнішнім джерелом живлення (рис. 3, а) під дією прикладеної напруги в колі фотодіода протікає невеликий тепловий струм при відсутності освітлення. При висвітленні фотодіода потік неосновних носіїв заряду збільшується, внаслідок чого збільшується струм в колі, який визначається напругою джерела і світловим потоком.

При замиканні фотодіода на резистор (рис. 3, б) струм у зовнішньому колі створюється за рахунок фото-ЕРС. При цьому фотодіод працює в режимі фотогенератора безпосередньо перетворюючи світлову енергію в електричну.

Основні параметри і характеристики фотодіодів:

1. Вольтамперна характеристика ($I_d = f(U_d)$ при $\Phi = \text{const}$) визначає залежність струму фотодіода від напруги на ньому при постійній величині світлового потоку;

2. Світлова характеристика відображає залежність струму фотодіода від величини світлового потоку при постійній напрузі на фотодіоді ($I_d = f(\Phi)$ при $U_d = \text{const}$). У широкому діапазоні змін світлового потоку світлова характеристика фотодіода виявляється лінійною.

3. Спектральна характеристика показує відносну зміну струму фотодіода від довжини хвилі падаючого на фотодіод світла (рис. 4);

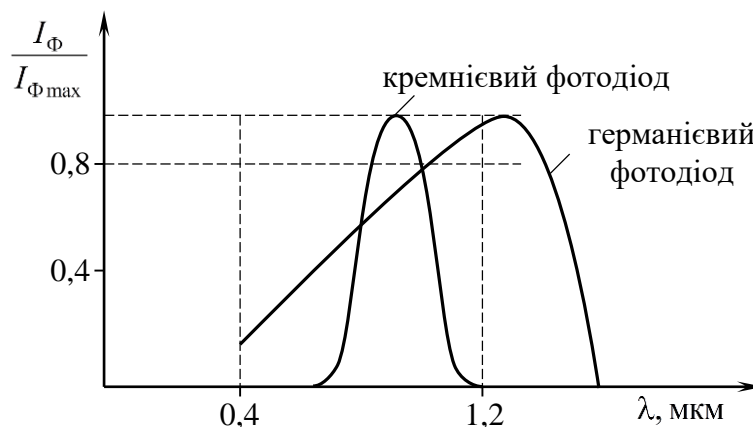


Рис. 4 – Спектральна характеристика фотодіода

4. Інтегральна чутливість ($S_{\text{інт}}$) – відношення фотоструму діода до потоку падаючого монохроматичного випромінювання із заданою довжиною хвилі:

$$S_{\text{інт}} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi};$$

5. Робоча напруга (U_p) – постійна напруга, що прикладена до фотодіоду, при якій забезпечуються номінальні параметри при тривалій його роботі в заданих експлуатаційних умовах;

6. Темнової струм (I_T) – струм, що протікає через фотодіод при відсутності на ньому світлового випромінювання;

7. Гранична частота – частота вимірювання яскравості світлового потоку, на якій інтегральна чутливість зменшується в $\sqrt{2}$ (близько 107 Гц).

Оптопари

Світло- і фотодіоди як і інші оптичні прилади часто застосовують спільно в так званих оптопарах.

Оптрон (оптопара) – електронний прилад, що складається з оптичного випромінювача і фотоприймача, пов'язаних оптичним каналом і об'єднаних в загальному корпусі.

Принцип роботи оптрона полягає в перетворенні електричного сигналу в світлове випромінювання, його передачі по оптичному каналу і подальшому перетворенні назад в електричний сигнал.

Класифікація

За ступенем інтеграції:

- оптопари, що складаються з двох і більше елементів (в т.ч. зібрані в одному корпусі);
- оптоелектронні інтегральні схеми, які містять одну або кілька оптопар з додатковими компонентами (підсилювачами і т.п.).

За типом оптичного каналу:

- з відкритим оптичним каналом;
- із закритим оптичним каналом.

За типом фотоприймача (рис.5):

- з фоторезистором;
- з фотодіодом;
- з фототиристором;
- з біполярним фототранзистором;
- з польовим фототранзистором.

Тип фотоприймача визначає лінійність передатної функції оптрона. Найбільшу лінійність мають резисторні оптрони і оптрони з прийомним фотодіодом. Транзисторні оптрони використовуються в імпульсних (ключових, цифрових) пристроях, в яких лінійність передачі не потрібна. Оптрони з фототиристорами застосовуються для гальванічної розв'язки схем управління від силових кіл.

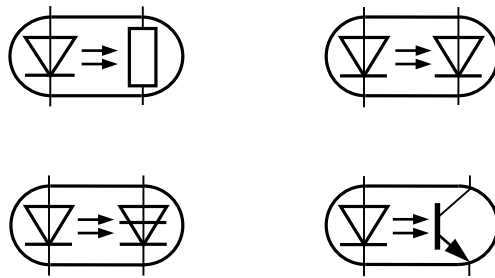


Рис.5 – Умовне позначення оптопар: а – з фоторезистором; б – з фотодіодом; в – з фототиристором; г – з біполярним фототранзистором

Нижня робоча частота оптрона не обмежена – оптрони можуть працювати в колах постійного струму. Верхня робоча частота оптронів, оптимізованих під передачу цифрових сигналів, досягає сотень МГц. Верхня робоча частота лінійних оптронів становить одиниці – сотні кГц.

Оптрони мають кілька областей застосування, що використовують їх різні властивості.

Оптрони використовуються для гальванічної розв'язки кіл – передачі сигналу без передачі напруги. Для деяких стандартних інтерфейсів передачі існують спеціалізовані мікросхеми оптронаї розв'язки. Безконтактне управління потужними, високовольтними колами по оптичним каналам дозволяє забезпечити дороге устаткування різних пристроїв і комплексів промислової електроніки від виходу з ладу.

Оптрони з відкритим оптичним каналом, доступним для механічного впливу (перекриття каналу або відображення світлового потоку), використовуються в якості датчиків (рис.6) у всіляких детекторах (паперу в принтері, цифрових спідометрах, координатні лічильники комп'ютерної миші).

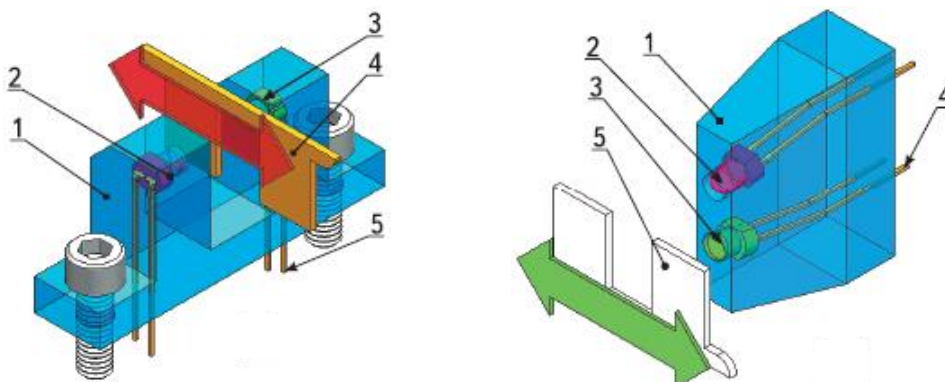


Рис.6 – Датчики на оптронах з відкритим каналом: а – з перекриттям каналу; б – з відображенням світлового потоку; 1 – корпус датчика; 2 – світлодіод; 3 – фотоприймач