

Лекція 1. КЛАСИФІКАЦІЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ.

НАПІВПРОВІДНИКОВІ РЕЗИСТОРИ, ДІОДИ.

1.1. Напівпровідники. Загальні відомості.

1.2. Фізичні основи роботи електронно-діркового переходу (*p-n* переходу).

1.3. Класифікація напівпровідникових приладів.

1.4. Напівпровідникові резистори.

1.5. Напівпровідникові діоди.

1.1. Напівпровідники. Загальні відомості

Напівпровідники (НП) належать до класу речовин, що мають тверду кристалічну структуру і за питомою провідністю ($10^4 \div 10^{-10}$ Сим/см) займають проміжне місце між провідниками ($10^4 \div 10^6$ Сим/см) та діелектриками (10^{-10} Сим/см та менше).

При виготовленні НП приладів частіше використовують кремній (*Si* – має робочу температуру до 140°C), германій (*Ge* – найбільша робоча температура 75°C), арсенід галію (*GaAs* – працює при температурах до $350 \div 400^\circ\text{C}$).

До НП також відносять селен, телур, деякі окисли, карбіди та сульфіди.

НП мають такі властивості:

- 1) негативний температурний коефіцієнт опору – із збільшенням температури їх опір зменшується (у провідників – зростає);
- 2) додавання домішок призводить до зниження питомого опору (у провідників – до збільшення);
- 3) на електричну провідність НП впливають радіація, електромагнітне випромінювання.

Електрони, що розташовані на зовнішній орбіті атома речовини, мають назву валентних.

Процеси електропровідності НП і діелектриків подібні, але суттєво відрізняються від електропровідності провідників.

Так у провідників валентні електрони слабше зв'язані з ядром, а тому досить легко покидають свої атоми і стають вільними. Якщо до провідника прикласти зовнішнє електричне поле, виникне впорядкований рух електронів – електричний струм.

У НП усі валентні електрони міцно зчеплені з кристалічними ґратками завдяки так званому ковалентному зв'язку. Доки цей зв'язок існує, електрони не можуть переносити електричний заряд у матеріалі.

Якщо помістити НП в електричне поле, виникне спрямований рух зарядів – електричний струм. На відміну від провідників струм в НП забезпечується носіями двох зарядів – позитивного \oplus (дірки) та негативного \ominus (електрони).

Провідність чистого НП має назву власної, сам же НП відносять до *i*-типу. Власна провідність зазвичай невелика.

Для того, щоб знизити питомий опір напівпровідника (*g*) і надати йому певного типу електропровідності – *n* (*negativ*) – електронного, при переважанні вільних електронів, або *p* (*positiv*) – діркового при переважанні дірок – у чисті напівпровідники вносять певні домішки. Такий процес називають легуванням, а відповідні напівпровідникові матеріали – легованими. В якості легуючих

домішок застосовують елементи III і V груп періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва. Легуючі елементи III групи створюють діркову електропровідність напівпровідникових матеріалів і їх називають акцепторними домішками, а елементи V групи – електронну електропровідність і їх називають донорними домішками. Слід зазначити, що питомий опір (ρ) легованого напівпровідника суттєво залежить від концентрації домішок.

1.2. Фізичні основи роботи електронно-діркового переходу ($p-n$ переходу)

Основне значення для роботи напівпровідникових приладів має електронно-дірковий перехід, який скорочено називають $p-n$ переходом.

Електронно-дірковим переходом називають область на границі двох напівпровідників, один з яких має електронну, а другий – діркову електропровідність.

На практиці $p-n$ перехід отримують введенням у домішковий напівпровідник додаткової легуючої домішки. Фізичні процеси, що відбуваються у $p-n$ переході, визначають параметри та характеристики більшості НП приладів.

Припустимо, що концентрація основних носіїв в обох шарах НП однакова (рис. 1.1). При об'єднанні двох НП виникає взаємна дифузія (яку можна вважати за дифузійний струм $i_{диф}$) електронів із n -шару у p -шар (вони заповнюють вільні ковалентні зв'язки), а дірок – у протилежному напрямку. Внаслідок цього у приконтатній зоні НП p -типу (завдяки іонам акцепторної домішки $[-]$) з'являється негативний заряд, а у приконтатній зоні НП n -типу (завдяки іонам донорної домішки $[+]$) – позитивний заряд. Між цими зарядами виникає внутрішнє електричне поле з напруженістю $E_{вн}$, що гальмує рух основних носіїв зарядів. З іншої сторони, це поле виявляється прискорюючим для неосновних рухомих носіїв зарядів (теплових), внаслідок чого через межу між НП виникає дрейфова складова струму $i_{др}$, яка протилежна дифузійній складовій $i_{диф}$, що зумовлена рухом основних носіїв зарядів (внаслідок протікання $i_{диф}$ відбувається рекомбінація рухомих основних носіїв зарядів).

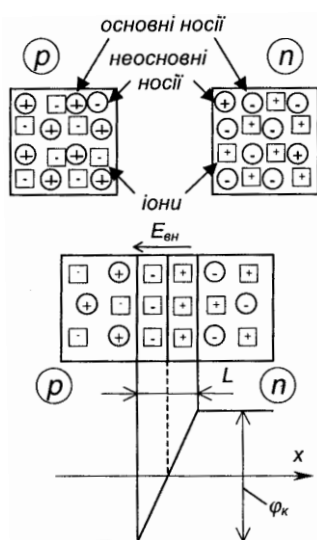


Рис. 1.1 – Утворення на межі між шарами p - та n -типу $p-n$ переходу з потенціальним бар'єром φ_k

У сталому стані

$$i_{диф} + i_{др} = 0. \quad (1.1)$$

Ця рівновага настає за певної контактної різниці потенціалів, що визначається величиною об'ємного заряду і називається потенціальним бар'єром φ_k .

Величина φ_k залежить від матеріалу НП і його температури. Для германію $\varphi_{kGe} = (0,4 \div 0,6)$ В, а для кремнію $\varphi_{kSi} = (0,6 \div 0,8)$ В.

Зона об'ємного заряду – це і є електронно-дірковий перехід ($p-n$ перехід). Ширина його, позначена як L , вимірюється десятками мікронів. Оскільки у $p-n$ переході відсутні рухомі носії зарядів (він заповнений нерухомими іонами), то його електричний опір дуже великий.

Розглянемо поведінку p - n переходу при підключенні до нього зовнішньої напруги. Можливе пряме або зворотне вмикання. При зворотному вмиканні, як показано на рис. 1.2, до p - n переходу прикладається зовнішня напруга U_{zn} , внаслідок чого до його внутрішнього електричного поля додається зовнішнє електричне поле з напруженістю E_{zn} .

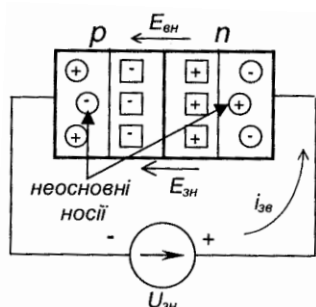


Рис. 1.2 – Зворотне вмикання p - n переходу

У результаті електричне поле в p - n переході зростає і його напруженість дорівнює

$$E_{рез} = E_{вн} + E_{zn}. \quad (1.2)$$

Оскільки електричний опір p - n переходу дуже великий, то майже вся напруга U_{zn} прикладається до нього. Отже, різниця потенціалів на p - n переході становить

$$\varphi_{рез} = \varphi_{к} + U_{zn}. \quad (1.3)$$

Запірні властивості p - n переходу при цьому зростають, дифузійна складова струму $i_{диф}$ зменшується, а дрейфова $i_{др}$ не змінюється (бо залежить лише від ступеня нагріву речовини).

Через перехід протікає зворотний струм

$$i_{zv} = i_{др} - i_{диф}. \quad (1.4)$$

Оскільки $i_{диф} \rightarrow 0$, то зворотний струм визначається концентрацією неосновних носіїв зарядів і є незначним.

При прямому вмиканні, як показано на рис. 1.3, за зазначеної полярності зовнішньої напруги зовнішнє електричне поле спрямоване назустріч внутрішньому, і результуюча напруженість зменшується

$$E_{рез} = E_{вн} - E_{zn}. \quad (1.5)$$

При цьому $i_{диф}$ зростає, а $i_{др}$ зменшується.

Різниця потенціалів становить

$$\varphi_{рез} = \varphi_{к} - U_{zn} \quad (1.6)$$

У цьому випадку через p - n перехід тече прямий струм

$$i_{пр} = i_{диф} - i_{др}, \quad (1.7)$$

який зумовлений дифузійною складовою струму, тобто залежить від концентрації основних рухомих носіїв зарядів, і є великим. Таким чином, p - n перехід має вентильні властивості (від німецького слова *ventil* – клапан), тобто за прямого вмикання його опір малий, а за зворотного – великий.

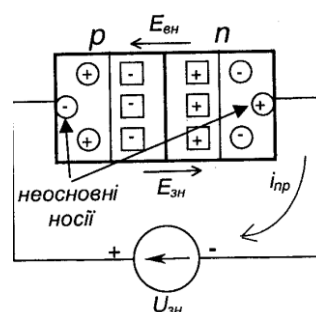


Рис. 1.3 – Пряме вмикання p - n переходу

Оскільки у p - n переходу явно виражені нелінійні властивості, то залежність струму, що через нього протікає, від прикладеної напруги ілюструють за допомогою вольт-амперної характеристики

(ВАХ). Теоретична ВАХ p - n переходу показана на рис. 1.4. Вона має пряму (1) та зворотну (2, 3) гілки.

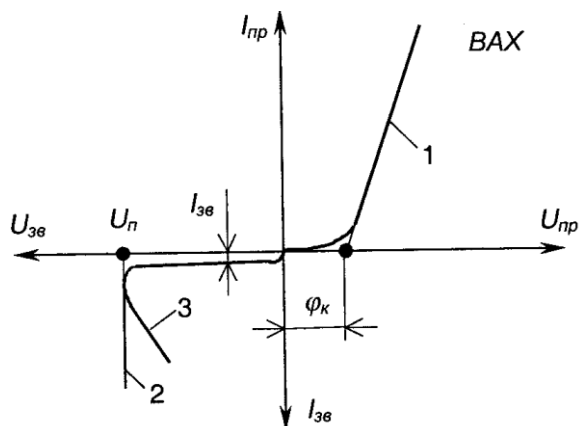


Рис. 1.4 – Теоретична ВАХ p - n переходу

Якщо напруга прямого вмикання $U_{np} < \varphi_k$ через перехід, опір якого великий, проходить малий струм. Як тільки зі збільшенням U_{np} останнє досягне значення $U_{np} = \varphi_k$, заперні властивості p - n переходу зникають, і струм через перехід визначається лише провідністю p - і n - шарів.

За зростання від нуля зворотної напруги $U_{зв}$, швидкість руху неосновних носіїв через перехід зростає. За $U_{зв} = U_n$ швидкість рухомих носіїв така, що їх енергії вистачає для виникнення в матеріалі ударної іонізації – вибивання додаткових носіїв заряду. Внаслідок цього відбувається лавиноподібне збільшення зворотного струму. Це явище називається електричним пробоем p - n переходу, а U_n – напругою пробую. Якщо при цьому p - n перехід ефективно охолоджується, різке зростання потужності, що в ньому виділяється ($U_{зв} \cdot I_{зв}$) не призводить до суттєвих змін температури структури і електричний пробій протікає при незмінній напрузі. Це явище має зворотний характер. Тобто, при зниженні напруги U_n заперні властивості p - n переходу відновлюються (гілка 2 ВАХ).

Явище електричного пробую використовується, наприклад, при створенні такого НП приладу як стабілітрон.

За неефективного тепловідведення, температура структури зростає (кількість рухомих носіїв під час цього збільшується також за рахунок теплової генерації), доки електричний пробій не переходить у тепловий, під час цього НП розплавляється і p - n перехід руйнується. Тепловий пробій, зрозуміло, незворотний (гілка 3 ВАХ).

Отже, p - n перехід – це явище, що виникає на межі двох НП різного типу провідності і характеризується відсутністю у прилеглий до цієї межі зоні вільних носіїв заряду, через що її опір нескінченний. Тому p - n перехід ще називають заперним шаром.

Насамкінець зазначимо властивості p - n переходу, що (в основному) використовуються під час побудови електронних НП приладів:

- одностороння провідність (вентильні властивості);
- дуже великий опір зони p - n переходу як зони, де немає вільних носіїв заряду (заперні властивості);
- зміна ширини p - n переходу зі зміною величини зворотної напруги (як результат – зміна ємності p - n переходу);

- стабільність напруги на $p-n$ переході у режимі електричного пробою;
- наявність неосновних носіїв (що виникають внаслідок теплової генерації) в шарах p - і n -типу.

1.3. Класифікація напівпровідникових приладів

НП прилади поділяються на такі групи:

- НП резистори;
- НП діоди;
- біполярні та уніполярні (польові) транзистори;
- тиристори.

1.4. Напівпровідникові резистори

НП резистори – це такі НП прилади, які виготовлені на основі одношарових НП структур p - або n -типу і мають два зовнішні електроди.

Умовне позначення резисторів на схемах - R .

Всі напівпровідникові резистори поділяються на лінійні та нелінійні.

У лінійних резисторів питомий електричний опір не залежить від прикладеної напруги. Їх умовне позначення наведено на рис. 1.5, а.

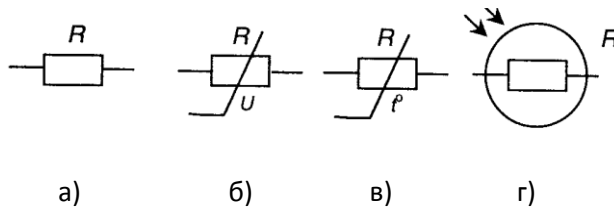


Рис. 1.5 – Умовні позначення лінійного резистора (а), варистора (б), терморезистора (в), фоторезистора (г)

Нелінійні резистори (варистори) – це такі НП резистори, у яких питомий опір залежить від прикладеної напруги. Їх умовне позначення наведено на рис. 1.5, б. Варистор має нелінійну симетричну ВАХ, зображену на рис. 1.6. Один з основних параметрів варистора – коефіцієнт

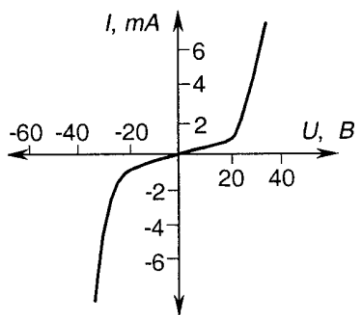


Рис. 1.6 – ВАХ варистора

нелінійності λ , який визначається відношенням статичного опору варистора R_{cm} до його динамічного опору R_d :

$$\lambda = \frac{R_{cm}}{R_d} = \frac{U}{I} : \frac{dU}{dI} = const \quad (1.8)$$

де U , I – напруга на варисторі та струм через нього. Варистори використовують як обмежувачі напруги для захисту НП приладів від короточасних перенапруг.

Також існують НП резистори, опір яких різко залежить від температури навколишнього середовища. Це – терморезистори, умовне позначення яких наведено на рис. 1.5, в.

Терморезистори поділяються на термістори, у яких із зростанням температури опір зменшується, та позистори, у яких із зростанням температури опір зростає (виконуються на основі сегнетоелектриків).

Залежність опору терморезистора від температури визначається експоненціальним законом:

$$R_m = ke^{\beta/T}, \quad (1.9)$$

де β , κ – коефіцієнти, що залежать від конструктивних розмірів та концентрації домішок у НП відповідно; T – абсолютна температура.

Терморезистори (термістори, позистори) використовуються як датчики температури у системах регулювання температури, теплового захисту, протипожежної сигналізації, для термостабілізації режимів роботи електронних пристроїв. Потужні позистори дозволяють забезпечувати захист електрообладнання від струмів перевантаження (замість теплових реле).

Фоторезистором (рис. 1.5, з) називається НП фотоелектричний прилад з внутрішнім фотоелементом, в якому використовується явище фотопровідності, тобто зміна електричної провідності напівпровідника під дією оптичного випромінювання.

Виготовляють фоторезистори з НП з однаковою провідністю (сірчистий свинець, вісмут, кадмій і т.п.).

Так як фоторезистор не має вентильних властивостей, то його підключення до джерела живлення не залежить від полярності прикладеної напруги.

За відсутності освітлення ($\Phi=0$) фоторезистор має великий темновий електричний опір R_m , тому темновий струм незначний і визначається за формулою:

$$I_m = \frac{E}{R_m + R_n}. \quad (1.10)$$

За наявності світлового потоку ($\Phi > 0$), електричний опір зменшується до величини R_{cv} , і відповідно світловий струм визначатиметься за формулою:

$$I_{cv} = \frac{E}{R_{cv} + R_n}. \quad (1.11)$$

Величина фотоструму визначається за формулою:

$$I_\phi = I_{cv} - I_m. \quad (1.12)$$

Питома чутливість фоторезистора:

$$K_0 = \frac{I_\phi}{\Phi U}, \quad (1.13)$$

де Φ – світловий потік, лм.

Інтегральна чутливість фоторезистора:

$$K_\phi = \frac{I_\phi}{\Phi}. \quad (1.14)$$

Фоторезистори, в основному, застосовують у пристроях автоматики.

1.5. Напівпровідникові діоди

Напівпровідникові діоди – це НП прилади, виготовлені на основі двошарових НП структур і які використовують властивості $p-n$ переходу.

Умовне позначення діодів на схемах – VD.

Широкого розповсюдження отримали випрямні діоди, дія яких базується на використанні вентильних властивостей $p-n$ переходу.

Структура та умовне позначення діода, а також ВАХ потужного випрямного діода наведені на рис. 1.7. Такі діоди призначені для випрямлення змінного струму низької частоти.

Виготовляються випрямні діоди переважно із кремнію (у перспективі – із арсеніду галію, як більш термостійкого).

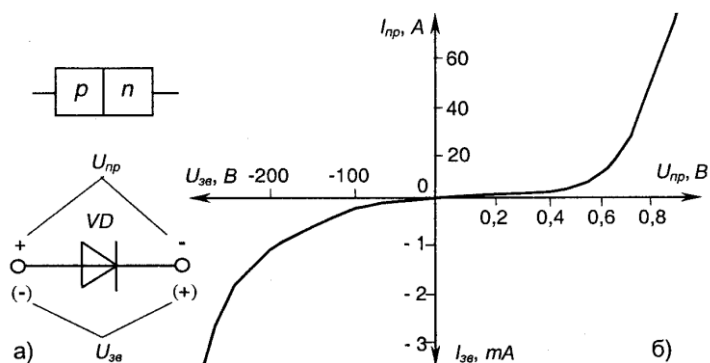


Рис. 1.7 – Структура та умовне позначення (а) і ВАХ (б) випрямного діода

Основними параметрами випрямних діодів є:

- граничний прями́й струм діода $I_{пр}$ – максимально допустиме середнє значення струму через діод у прямому напрямку за визначених умов охолодження, для сучасних діодів $I_{пр} = (0,1 \div 2200)$ А;
- максимально-допустимий прями́й струм діода (імпульсний) $I_{пр max}$, становить $(10 \div 50) I_{пр}$;
- прями́й спад напруги $U_{пр}$, тобто середнє значення напруги на діоді при граничному прямому струмі $I_{пр}$, для діодів з кремнію становить $(0,6 \div 0,8)$ В;
- максимально допустима зворотна напруга $U_{зв. max}$, що дорівнює максимально допустимому амплітудному значенню зворотної напруги, яка не призводить до виходу з ладу приладу за визначених умов охолодження, $U_{зв. max} = (50 \div 3000)$ В.

НП діод, на якому напруга в зоні електричного пробую майже не залежить від струму, називається стабілітроном.

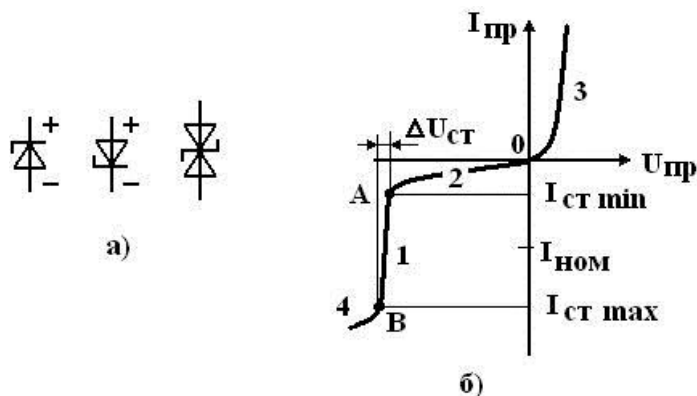


Рис. 1.8 – Умовне позначення а) та ВАХ б) стабілітрона

Як видно з ВАХ, наведеної на рис. 1.8, у зоні пробую напруга на стабілітроні майже не залежить від струму через нього $I_{ст}$. Стабілітрони використовують для стабілізації напруги. Щоб запобігти

тепловому пробою, їх конструкція забезпечує ефективне відведення тепла від кристалу напівпровідника.

Основними параметрами стабілітрона є:

- мінімальний струм стабілізації $I_{cm\ min}$ – мінімальний струм, за якого прилад гарантовано знаходиться в режимі стабілізації – складає одиниці міліампер;

- максимальний струм стабілізації $I_{cm\ max}$ – максимально допустимий струм, що може проходити через прилад, досягає $(0,02 \div 1,5)$ А;

- напруга стабілізації U_{cm} що становить від 1 до 1000 В;

- динамічний опір на ділянці стабілізації:

$$R_d = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}} \quad (1.15)$$

Найпростіша схема стабілізації наведена на рис. 1.9.

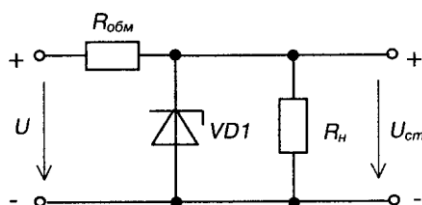


Рис. 1.9 – Схема елементарного стабілізатора напруги

Тунельний діод – це НП прилад, у якого специфічний тунельний ефект призводить до появи на ВАХ за прямої напруги ділянки негативної провідності – штрихова лінія на рис. 1.10 (там же наведено умовне позначення приладу). Як робоча використовується пряма гілка ВАХ.

Основними параметрами тунельного діода є:

- струм піку I_n , що складає $(0,1 \div 100)$ мА;

- відношення струму піку I_n до струму западини I_3 :

$$\frac{I_n}{I_3} = (5 \div 20).$$

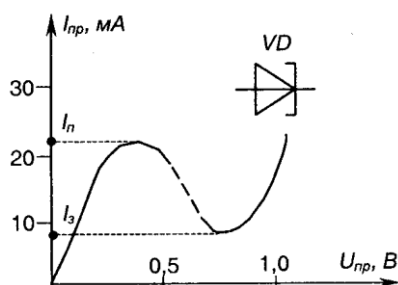


Рис. 1.10 – Умовне позначення та ВАХ тунельного діода

Тунельні діоди – швидкодіючі НП прилади, що застосовуються в генераторах високочастотних коливань та швидкодіючих імпульсних перемикачах.

Для роботи у високочастотних та імпульсних пристроях призначені також відповідно високочастотні та імпульсні діоди, що мають малу ємність – мінімальну тривалість перехідних процесів під час вмикання та вимикання.

Фотодіоди – фотоелектричні прилади з внутрішнім фотоефектом, який полягає у тому, що під дією світлової енергії відбувається іонізація атомів основної речовини та домішки. Як наслідок – струм за зворотного вмикання зростає.

Умовне позначення фотодіода наведено на рисунку 1.11, а.

Фотодіоди можуть працювати в одному з двох режимів:

1) без зовнішнього джерела електричної енергії (режим фотогенератора, або режим неробочого ходу);

2) з зовнішнім джерелом електроенергії (режим фотоперетворювача, або режим короткого замикання).

У першому режимі використовується фотогальванічний ефект – різновид внутрішнього фотоэффекту, який пов'язаний з утворенням різниці потенціалів (фото-е.р.с.). Для цього режиму характерна логарифмічна залежність вихідної напруги від освітлення, причому вихідна напруга не перевищує деякого певного значення за будь-якої освітленості (для кремнієвих фотодіодів $U_{НХ} \leq 0,7В$).

Режим фотоперетворювача відповідає поданій напрузі на фотодіод у заперному напрямку.

На рис. 1.12 наведено ВАХ фотодіода. На характеристиці т. а відповідає струму $I_{КЗ}$, а - т. б – напрузі $U_{НХ}$.

Фотодіоди, виготовляють із германію, кремнію, селену, арсеніду галію, арсеніду індію, сульфіду кадмію та інших НП матеріалів.

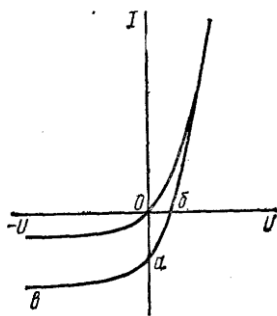


Рис. 1.11 – ВАХ фотодіода

Фотодіоди широко використовують як приймачі оптичного випромінювання.

Основними характеристиками фотодіодів є:

- діапазон довжини хвиль випромінювання, що приймається $\Delta\lambda$;
- інтегральна чутливість S_i ;
- темновий струм I_T ;
- постійна часу τ .

Умовне позначення фотодіода складається з букв ФД і порядкового номера розробки.

Світлодіоди – перетворюють енергію електричного поля в нетеплове оптичне випромінювання.

Умовне позначення світлодіода наведено на рисунку 1.12, б.

Під час протікання струму через діод з арсеніду галію рекомбінація носіїв заряду супроводжується не тільки виділенням тепла, як, наприклад, у кремнієвого діода, а ще й квантів світла. Зазвичай таке випромінювання є резонансним і лежить у вузькому діапазоні частот.

Для виготовлення світлодіодів використовують фосфід галію, арсенід галію, карбід кремнію та ін. Для світлодіодів видимого випромінювання часто використовують фосфід–арсенід галію. Для зміни довжини хвилі випромінювання потрібно змінити матеріал, з якого виготовлено світлодіод, або змінити струм. Так спектр зеленого випромінювання спостерігатиметься за довжини хвилі 0,5 мкм, червоного – 0,7 мкм, інфрачервоного – 1 мкм.

Існують світлодіоди, які мають почерговий колір свічення з двома світловипромінюючими переходами, один з яких має максимум спектральної характеристики в червоній частині спектру, а

другий – у зеленій. Колір свічення такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи.

Основними параметрами світлодіодів є:

- сила світла, що вимірюється в канделах і вказується для певного значення прямого струму;
- яркість, що рівна відношенню сили світла до площі поверхні, яка світиться;
- постійна пряма напруга;
- колір свічення і довжина хвилі, що відповідає максимальному світловому потоку;
- максимально-допустимий постійний прямий струм;
- максимально-допустима зворотна напруга;
- робочий діапазон температури оточуючого середовища.

Основними характеристиками світлодіодів є:

- яркісна характеристика, що являє собою залежність яркості від прямого струму;
- світлова характеристика, що являє собою залежність сили світла від прямого струму;
- ВАХ, що являє собою залежність струму від напруги така ж сама, як і у звичайного випрямного діода.

Конструктивно світлодіоди виготовляються в металічних кор-пусах з лінзою, що забезпечує направлене випромінювання, або в прозорих пластмасових корпусах, що створюють розсіяне випромінювання. Виготовляються також безкорпусні світлодіоди.

Варикап – НП діод, в якому використовується залежність ємності $p-n$ переходу від зворотної напруги і який призначений для застосування в якості елемента з електрично-керованою ємністю.

В якості напівпровідникового матеріалу для виготовлення варикапів використовують Si .

Основними параметрами варикапа є:

- початкова ємність C_0 , яка фіксується за невеликої зворотної напруги $U_{зв} = (2\div 5)V$;

- коефіцієнт перекриття за ємністю $K_C = \frac{C_{max}}{C_{min}}$;

- добротність $Q_C = \frac{Q}{P}$, (відношення реактивної потужності варикапа до активної). Добротність варикапа може бути досить високою, так як вона шунтується достатньо високим опором діода за зворотного підключення.

Умовне позначення варикапа складається з 5 елементів, де другий елемент B означає – варикап.

Варикапи застосовують для автоматичного налаштування контурів радіоприймача або телевізора на потрібну станцію чи канал.

Умовні позначення фото-, світлодіода та варикапа наведені на рис. 1.12.

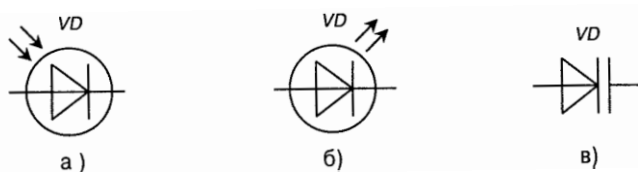


Рис. 1.12 - Умовні позначення фотодіода (а), світлодіода (б), варикапа (в)

Використовуються у пристроях промислової електроніки також і спеціальні типи НП діодів. Деякі з них розглянуті нижче.

Зворотний діод – це НП діод з критичною концентрацією домішок, в якому електрична провідність при зворотній напрузі внаслідок тунельного ефекту значно вища, ніж за прямої напруги.

Зворотний діод є різновидом тунельного діоду в якому струм піку рівний 0.

Магнітодіод – це НП діод, в якому використовується зміна ВАХ під дією магнітного поля.

Тензодіод – це НП діод, в якому використовується зміна ВАХ під дією механічної деформації.

Інжекційний лазер – це світлодіод з монохроматичним випромінюванням. Когерентне монохроматичне випромінювання забезпечується стимульованою фотонною рекомбінацією, яка виникає під час інжекції носіїв заряду за певного значення сили струму. Мінімальний струм, за якого забезпечується стимулююча фотонна рекомбінація називається пороговим. При збільшенні струму вище порогового значення відбувається погіршення монохроматичного випромінювання.