

1. Електропровідність напівпровідників. Будова напівпровідників.

Типи провідностей.

Усі тверді тіла за здатністю проводити електричний струм поділяються на:

- провідники;
- напівпровідники;
- діелектрики.

Пояснити причину такої поведінки матеріалів досить зручно на основі зонної теорії твердих тіл, згідно якої структуру тіла можна подати у вигляді комбінації трьох зон:

- валентної зони;
- зони провідності;
- забороненої зони.

За даною теорією у провідників (металів) має місце перекриття зони провідності і валентної зони, у напівпровідників та ізоляторів ці дві зони розділені забороненою зоною (рис. 1.1). Зауважимо, що при кімнатній температурі ширина забороненої зони у напівпровідників не перевищує 4 еВ, а для діелектриків вона більша цього значення. Крім цього, при підвищенні температури ширина забороненої зони зменшується.

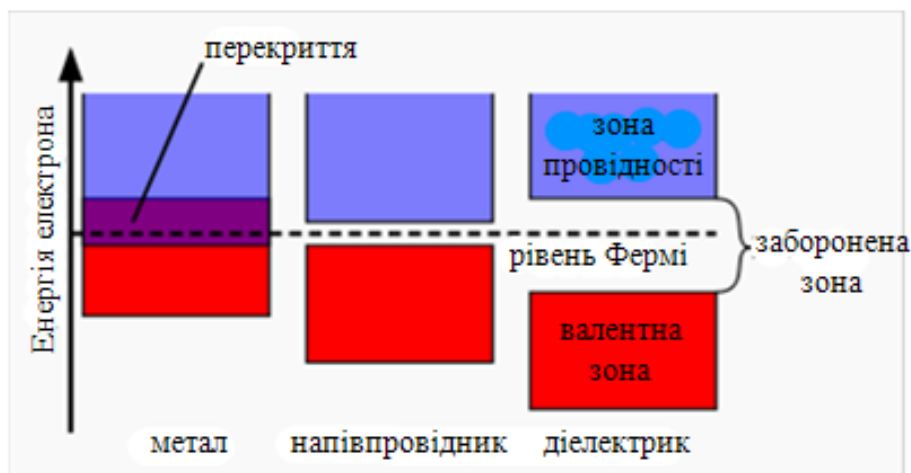


Рис. 1.1. Спрощена схема зонних структур провідників, напівпровідників та діелектриків.

Перейдемо тепер, безпосередньо, до розгляду властивостей напівпровідникових матеріалів як основи функціонування пристроїв напівпровідникової електроніки.

Кількість відомих у даний час напівпровідникових матеріалів досить велика. Для виготовлення напівпровідникових приладів застосовуються прості напівпровідникові речовини – *германій, кремній, селен* та складні напівпровідникові матеріали: *арсенід галію, фосфід галію* та ін. Значення питомого електричного опору в чистих напівпровідникових матеріалах лежать у діапазоні від $0,65 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (германій) до $10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (селен).

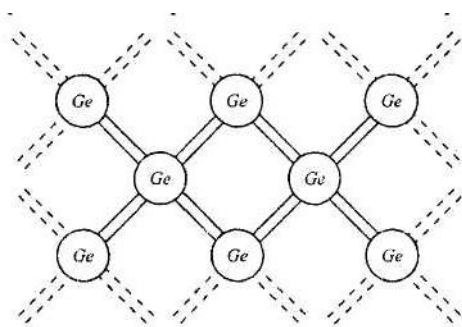


Рис. 1.2. Структура кристалічної ґратки чистого германію при температурі абсолютного нуля.

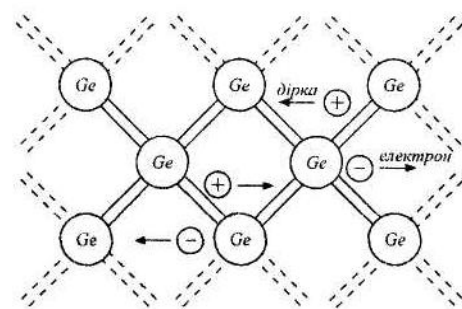


Рис. 1.3. Створення рухомих носіїв заряду при температурі вище абсолютного нуля.

Основним матеріалом для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів є кристали германію або кремнію. Германій чотиривалентний, тому кожний його атом в кристалічній ґратці зв'язаний з чотирма іншими атомами. Внаслідок цього утворюється міцна структура кристалічної решітки чистого германію при температурі абсолютного нуля (рис. 1.2). При температурах вище абсолютного нуля деякі валентні електрони дістають енергію, достатню для їх відриву від атомів (рис. 1.3). Ці вільні електрони рухаються хаотично в кристалі, однак під дією електричного поля їх рух набуває

направленого характеру, створюючи електричний струм.

Внаслідок відриву електрона від атом виникає вільний зв'язок, а атом набуває позитивного заряду.

Валентні електрони сусідніх атомів можуть займати вільні зв'язки, але тоді такі зв'язки і позитивні заряди виникають в інших місцях кристалічної ґратки.

Внаслідок цього вільні зв'язки теж рухомі, але з позитивним зарядом, і називаються дірками.

Одночасно в напівпровіднику відбувається протилежний процес відновлення розірваних зв'язків, який називається рекомбінацією.

Пари електрон-дірка безперервно виникають внаслідок теплового збудження і безперервно рекомбінують. Середня кількість пар залишається постійною і визначається температурою кристалу.

Наприклад при температурі 300 К в 1 см^3 чистого германію знаходиться $2,5 \cdot 10^{13}$ вільних електронів. Всього атомів германію в 1 см^3 $4,4 \cdot 10^{22}$. Звідси вільних електронів менше однієї мільярдної частини.

Внаслідок цього провідність чистого германію досить низька, викликана парними носіями зарядів і називається власною провідністю.

Для зниження питомого опору напівпровідника та надання йому певного типу електропровідності – *електронної* при переважанні вільних електронів або *діркової* при переважанні дірок – у чисті напівпровідники вносять певні домішки. Такий процес називають *легуванням*, а відповідні напівпровідникові матеріали – *легованими*. Основними методами легування напівпровідників є дифузія та іонна імплантація.

В якості легуючих домішок застосовують елементи II, III та V, VI груп періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва. Легуючі елементи II і III груп створюють діркову електропровідність напівпровідникових матеріалів і називаються *акцепторними* домішками, елементи V і VI груп – електронну електропровідність і називаються *донорними* домішками.

Якщо в розплавлений германій додати невелику кількість п'ятивалентного елемента, наприклад миш'яку, то при охолодженні виникає кристал, в якому на місці атомів германію виявляються атоми миш'яку (рис. 1.4). Кожний атом створює чотири ковалентні зв'язки з сусідніми атомами германію, а ще один електрон виявляється надлишковим. Цей електрон може вільно рухатися в кристалі, внаслідок чого підвищується його провідність. Домішковий атом при цьому набуває позитивного заряду. Така домішка

називається донорною. Електрони, виділені донором, рухомі, а позитивні заряди зв'язані.

Інші зв'язки виникають, якщо в кристал германію ввести тривалентну домішку, наприклад бор або алюміній. Атом бору має на один валентний зв'язок менше і забирає в сусіднього атома германію електрон, створюючи вільний зв'язок, тобто дірку (рис. 1.5). При цьому атом домішки дістає додатковий негативний заряд. Така домішка називається акцепторною.

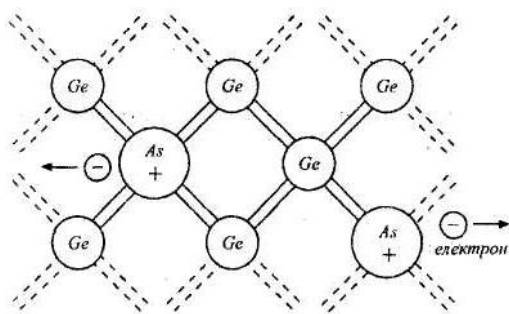


Рис. 1.4. Створення рухомих електронів в германії з донорною домішкою миш'яку.

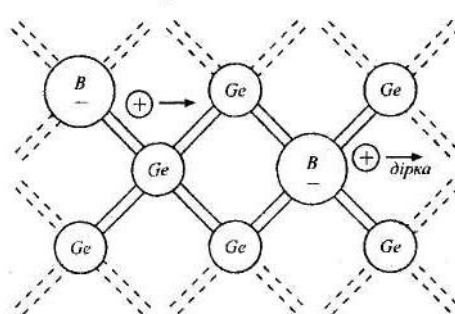


Рис. 1.5. Утворення дірок в германії з акцепторною домішкою бору.

У домішковому напівпровіднику один із видів носіїв заряду переважає над іншими. Тому ті носії, яких більше, називають основними.

Напівпровідник з донорними домішками називають напівпровідником *n*-типу, а з акцепторними – напівпровідником *p*-типу.

Питомий електричний опір легованого напівпровідника істотно залежить від концентрації домішок. При концентрації домішок $10^{20} - 10^{21}$ на 1 см^3 речовини він може бути знижений до $5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для германію та $5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для кремнію. Проте навіть у сильнолегованих напівпровідниках один атом домішки припадає на $10^3 - 10^4$ атомів напівпровідника.

Слабелеговані напівпровідники використовують для виготовлення малопотужних напівпровідникових діодів та транзисторів. У потужних та імпульсних діодах, транзисторах та тиристорах застосовують сильнолеговані напівпровідники з малими питомими опорами.

2. Електронно-дірковий перехід.

Основою переважної більшості напівпровідникових приладів є електронно-дірковий перехід (p – n -перехід).

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

Електронно-дірковий перехід одержують їх хімічним об'єднанням.

На практиці p – n -перехід одержують введенням в домішковий напівпровідник додаткової легуючої домішки. Наприклад, при введенні донорної домішки в певну частину напівпровідника p -типу в ньому утворюється область напівпровідника n -типу, що граничить з напівпровідником p -типу.

Утворення p – n -переходу при стикуванні двох напівпровідників з різними типами провідності відбувається наступним чином.

До стикування в обох напівпровідниках електрони, дірки і нерухомі іони розподіляються рівномірно (рис. 1.6).

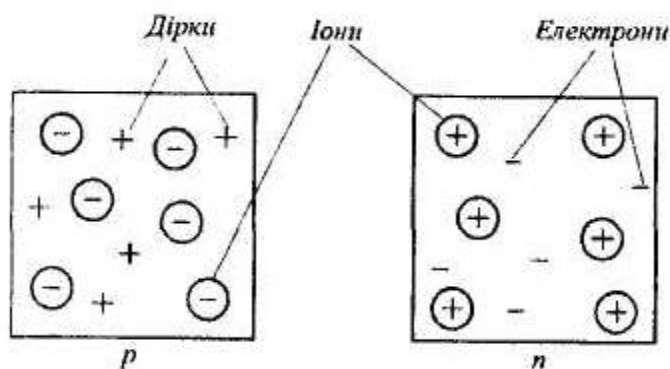


Рис. 1.6. Напівпровідники двох типів провідності до їх стикування.

При стикуванні напівпровідників у пограничному шарі відбувається рекомбінація електронів і дірок (рис. 1.7). Вільні електрони із зони напівпровідника n -типу займають вільні рівні у валентній зоні напівпровідника p -типу. В результаті біля границі двох напівпровідників утворюється шар, що немає рухомих носіїв заряду з високим електричним опором – запірний шар.

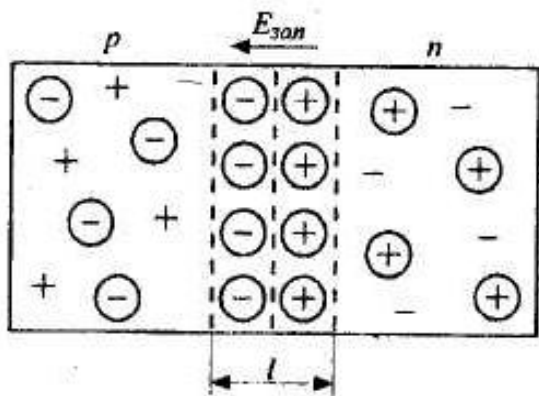


Рис. 1.7. Рекомбінація електронів і дірок та утворення запірного шару.

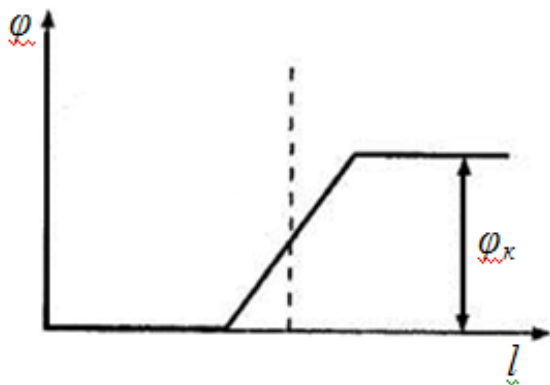


Рис. 1.8. Потенціальний бар'єр на границі двох напівпровідників.

напівпровідник n -типу, а також дірки з напівпровідника n -типу в напівпровідник p -типу. Таким чином контактна різниця потенціалів перешкоджає рухові основних носіїв заряду і не перешкоджає рухові неосновних носіїв заряду.

Однак при русі через p - n -перехід неосновних носії (дрейфовий струм $I_{др}$) відбувається зниження контактної різниці потенціалів ϕ_k , внаслідок чого деяка частина основних носіїв може перейти потенціальний бар'єр. При цьому виникає дифузійний струм $I_{диф}$, направлений назустріч дрейфовому $I_{др}$, тобто виникає динамічна рівновага, при якій $I_{диф} = I_{др}$.

Якщо до p - n -переходу прикласти зовнішню напругу, яка утворює в запірному шарі електричне поле напруженістю $E_{зовн}$, що співпадає за напрямом з полем нерухомих іонів напруженістю $E_{зоп}$, то внаслідок цього запірний шар розшириться (рис. 1.9, а). Опір p - n -переходу при цьому великий, а струм малий (за рахунок неосновних носіїв заряду). Струм при цьому називається зворотним, а p - n -перехід закритим.

Розширенню запірного шару перешкоджають нерухомі іони донорних і акцепторних домішок, які створюють на границі напівпровідників провідний подвійний електричний шар. Цей шар визначає контактну різницю потенціалів (потенціальний, бар'єр) ϕ_k на границі напівпровідників (рис. 1.8).

Різниця потенціалів ϕ_k утворює в запірному шарі електричне поле, яке перешкоджає як переходу електронів з напівпровідника n -типу в напівпровідник p -типу, так і переходу дірок в напівпровідник n -типу. Одночасно електрони можуть вільно рухатися з напівпровідника p -типу в напівпровідник

При протилежній полярності джерела напруги поле запірного шару зменшується (рис. 1.9, б). При напрузі $0,3 \div 0,5$ В запірний шар зникає. Опір p – n -переходу різко зменшується, виникає великий струм (прямий), p – n - перехід – відкритий. Опір відкритого p – n -переходу визначається лише опором напівпровідника.

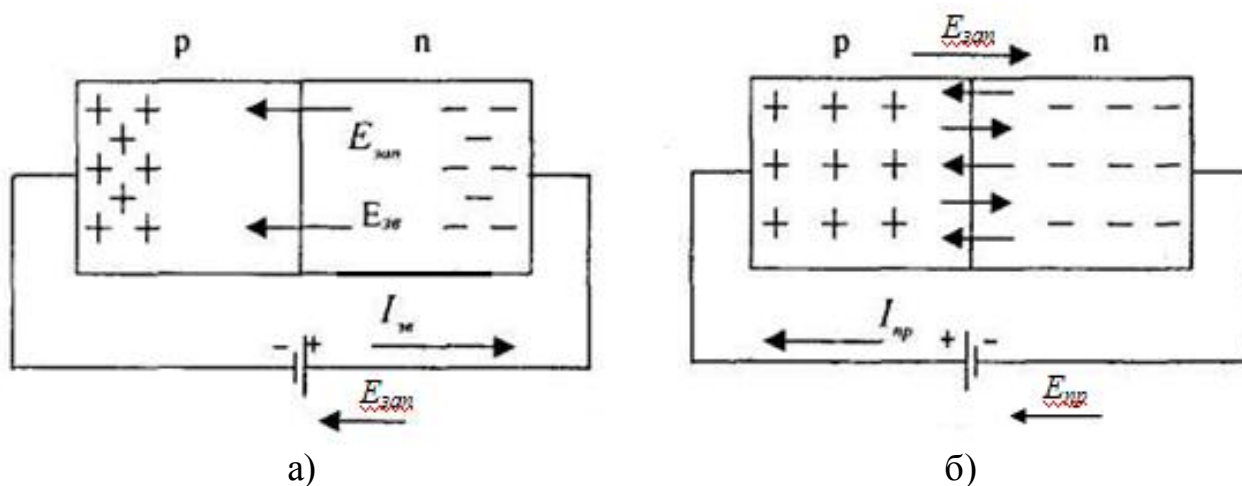


Рис. 1.9. Електронно-дірковий перехід у зовнішньому електричному полі:

- а) до p – n -переходу прикладена зворотна напруга;
- б) до p – n -переходу прикладена пряма напруга.

Властивості p – n -переходу використані в принципі роботи більшості напівпровідникових електронних елементів (діоди, транзистори, тиристори, інтегральні мікросхеми).

На рис. 1.10 показана повна ВАХ відкритого та закритого p – n -переходів. Як видно, ця характеристика є істотно нелінійною. На ділянці 1 $E_{зв} < E_{зп}$, прямий струм малий. На ділянці 2 $E_{зв} > E_{зп}$, запірний прошарок відсутній, струм визначається лише опором напівпровідника. На ділянці 3 запірний прошарок перешкоджає рухові основних носіїв, невеликий струм визначається рухом неосновних носіїв заряду. Злам ВАХ на початку координат зумовлений різними масштабами струму та напруги при прямому та зворотному напрямках напруги, яка прикладається до p – n -переходу. І нарешті, на ділянці 4 відбувається пробій p – n -переходу і зворотний струм швидко зростає. Це пов'язано з тим, що при рухові через p – n -перехід під дією електричного поля неосновні носії заряду набувають енергії, достатньої для ударної іонізації

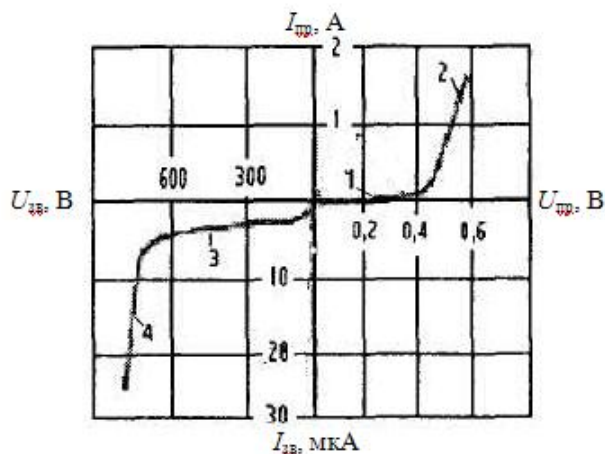


Рис. 1.10. ВАХ $p-n$ -переходу.

атомів напівпровідника. У переході починається лавиноподібне розмноження носіїв заряду – електронів та дірок що призводить до різкого збільшення зворотного струму через $p-n$ -перехід при майже незмінній зворотній напрузі. Цей вид електричного пробую називають *лавинним*. Звичайно він розвивається

в дещо широких $p-n$ -переходах, що утворюються в слабологованих напівпровідниках.

У сильнолегованих напівпровідниках ширина запірного прошарку менша, що перешкоджає виникненню лавинного пробую, тому що рухомі носії не одержують енергії, достатньої для ударної іонізації. У той же час може виникати *електричний пробій* $p-n$ -переходу, коли при досягненні критичної напруженості електричного поля в $p-n$ -переході за рахунок енергії поля з'являються пари носіїв електрон-дірка (ефект Зенера), та істотно зростає зворотний струм переходу.

Для електричного пробую характерна зворотність, що полягає в тому, що початкові властивості $p-n$ -переходу цілком відновляються, якщо знизити напругу на $p-n$ -переході. Завдяки цьому електричний пробій використовують у якості робочого режиму в напівпровідникових діодах.

Якщо температура $p-n$ -переходу зростає внаслідок його нагрівання зворотним струмом, то при недостатньому тепловідводі посилюється процес генерації пар носіїв заряду. Це, у свою чергу, призводить до подальшого збільшення зворотного струму і нагрівання $p-n$ -переходу, що може викликати руйнацію переходу. Такий процес називають *тепловим пробоем*. Тепловий пробій руйнує $p-n$ -перехід.

Закритий $p-n$ -перехід має *електричну ємність*, що залежить від його площі S та ширини l , а також від діелектричної проникності запірного

прошарку ε : $C = \varepsilon \varepsilon_0 S / l$. Із збільшенням зворотної напруги ширина p - n -переходу зростає і ємність C p - n -переходу зменшується. Залежність ємності закритого p - n -переходу від зворотної напруги показана на рис. 1.11.

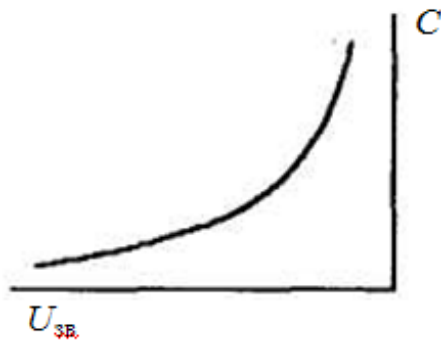


Рис. 1.11. Залежність ємності p - n -переходу від зворотної напруги.

Властивості чистих та легованих напівпровідників та характеристики p - n -переходу широко використовують у двоелектродних напівпровідникових приладах напівпровідникових резисторах та діодах. У більш складних приладах – транзисторах та тиристорах –

використовують електричні характеристики, що визначаються взаємодією декількох p - n -переходів.

3. Класифікація напівпровідникових приладів.

Напівпровідниковими називають прилади, дія яких базується на використанні властивостей напівпровідників.

Класифікація напівпровідникових приладів є наступною:

- 1) напівпровідникові резистори;
- 2) напівпровідникові діоди;
- 3) напівпровідникові фотоелектричні прилади;
- 4) біполярні транзистори;
- 5) польові транзистори;
- 6) тиристори;
- 7) напівпровідникові мікросхеми;
- 8) комбіновані напівпровідникові прилади.

Напівпровідникові резистори та діоди є двоелектродними приладами, біполярні та польові транзистори – триелектродними приладами. Тиристори можуть бути як двоелектродними, так і триелектродними.

У напівпровідникових резисторах застосовується ізотропний напівпровідниковий матеріал, і їхні електричні характеристики визначаються електричними властивостями однорідного напівпровідника. У напівпровідникових діодах використовуються напівпровідники з різними типами електропровідності, що утворюють один $p-n$ -перехід. Електричні характеристики діода визначаються електричними властивостями цього $p-n$ -переходу.

У біполярних транзисторах використовуються два $p-n$ -переходи. Електричні характеристики біполярних транзисторів визначаються взаємодією цих переходів. У польових транзисторах застосовуються напівпровідники з різними типами електропровідності, що утворюють один $p-n$ -перехід. Але на відміну від діодів та біполярних транзисторів електричні характеристики польових транзисторів залежать в основному від взаємодії ізотропного напівпровідникового каналу з $p-n$ -переходом.

У тиристорах застосовуються напівпровідники з різними типами електропровідності, що утворюють три $p-n$ -переходи або більше. Основні електричні характеристики тиристорів визначаються взаємодією цих переходів.

У напівпровідникових фотоелектричних приладах використовуються ефекти генерації світла та зміни електричних характеристик напівпровідникових структур під впливом оптичного випромінювання. Комбіновані напівпровідникові прилади являють собою декілька різноманітних напівпровідникових приладів, об'єднаних в однім корпусі.

Напівпровідникові мікросхеми та мікроелектронні вироби, що виконують певну функцію перетворення й обробки сигналу, всі елементи та міжелементні з'єднання яких виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідника.