

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 $i_{\text{диф}}$) 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 $E_{\text{вн}}$, 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 $i_{\text{др}}$, яка протилежна дифузійній складовій $i_{\text{диф}}$, що зумовлена рухом основних носіїв

зарядів (внаслідок протікання i_{diff} відбувається рекомбінація рухомих основних носіїв зарядів).

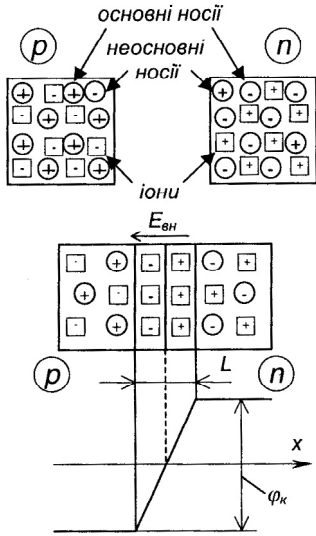


Рис. 1.1 – Утворення на межі між шарами p - та n -типу p - n переходу з потенціальним бар'єром φ_k

У сталому стані

$$i_{diff} + i_{dr} = 0. \quad (1.1)$$

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 $\varphi_{kGe} = (0,4 \div 0,6)V$, а для кремнію $\varphi_{kSi} = (0,6 \div 0,8)V$.

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 $U_{зн}$, внаслідок чого до його внутрішнього електричного поля додається зовнішнє електричне поле з напруженістю $E_{зн}$.

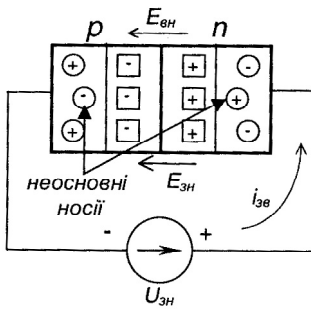


Рис. 1.2 – Зворотнє вмикання $p-n$ переходу

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

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

Оскільки електричний опір $p-n$ переходу дуже великий, то майже вся напруга $U_{зн}$ прикладається до нього.

Отже, різниця потенціалів на $p-n$ переході становить

$$\varphi_{рез} = \varphi_k + U_{зн}. \quad (1.3)$$

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

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

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

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

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

Різниця потенціалів становить

$$\varphi_{рез} = \varphi_k - U_{зн} \quad (1.6)$$

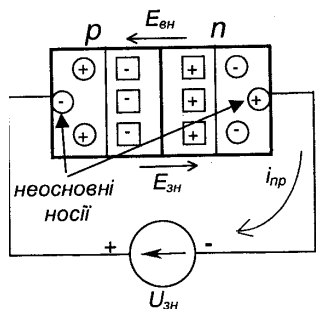


Рис. 1.3 – Пряме вмикання p - n переходу

У цьому випадку через p - n перехід тече прямий струм

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

який зумовлений дифузійною складовою струму, тобто залежить від концентрації основних рухомих носіїв зарядів, і є великим.

Таким чином, p - n перехід має вентиляльні властивості (від німецького слова *ventil* – клапан), тобто за прямого вмикання його опір малий, а за зворотного – великий.

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.

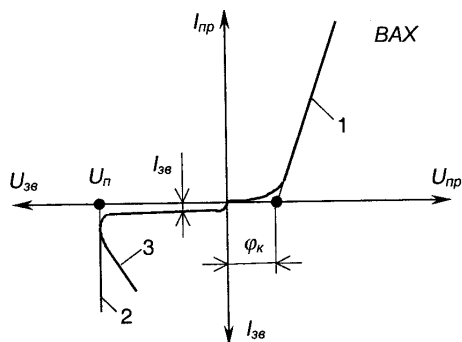


Рис. 1.4 – Теоретична ВАХ p - n переходу

Якщо напруга прямого вмикання $U_{нр} < \varphi_k$ через перехід, опір якого великий, проходить малий струм. Як тільки зі збільшенням $U_{нр}$ останнє досягне значення $U_{нр} = \varphi_k$, запірні 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 (запирні 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 пробую;
- наявність неосновних носіїв (що виникають внаслідок теплової генерації) в шарах p - і n -типу.

НП прилади поділяються на такі групи:

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