

Урок 82

Тема: Електродинаміка.

Тема уроку: Електропровідність напівпровідників. Напівпровідники як елементи сучасної мікроелектроніки.

Напівпровідникові матеріали

1.Класифікація напівпровідникових матеріалів та їх властивості.

До напівпровідників відносяться речовини, які за електричними властивостями займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. **Питома електропровідність** напівпровідників $\sigma = 10^2 \dots 10^{-8}$ См/м (у діелектриків $\sigma < 10^{-12}$ См/м, у металів $\sigma = 10^3 \dots 10^4$ См/м).

Другою характерною прикметою напівпровідників є сильна залежність їх електропровідності від температури, концентрації домішок, від впливу світлового та іонізуючого випромінювання, а також від інших енергетичних впливів. Відзначні ознаки напівпровідників порівняно з провідниками і діелектриками зумовлені відмінністю в механізмі їх електричної провідності.

НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Неорганічні		Органічні	
Молекулярні кристали	Хімічні з'єднання: $A^{IV} B^{IV}$ $A^{III} B^V$ $A^{II} B^{VI}$ - різні склади Прості: - германій - кремній - селен		
Молекулярні комплекси			
		Металоорганічні комплекси	

Відомо, що електропровідність металів, які є добрими провідниками електричного струму, зумовлена валентними електронами, які обертаються навколо ядер на зовнішніх оболонках. Внаслідок значного перекриття зовнішніх оболонок сусідніх атомів метала ці атоми можуть вільно обмінюватися валентними електронами.

Іншими словами, в металах валентні електрони можуть вільно переміщуватись між атомами. Такі електрони називають **вільними**.

В створенні електричного струму можуть приймати участь лише рухомі носії електричних зарядів. Тому електропровідність речовини тим більша, чим більше в одиниці об'єму цієї речовини знаходиться рухомих носіїв електричних зарядів. В металах практично всі валентні електрони (які є носіями елементарного негативного заряду) являються вільними, що і забезпечує високу електропровідність металів.

Більшість напівпровідників, які широко використовуються в радіoeлектроніці, відносяться до кристалічних тіл, атоми яких утворюють просторову решітку. Взаємне притягання атомів, утворюючих кристалічну решітку, здійснюється за рахунок ковалентного зв'язку, тобто загальної пари валентних електронів, які обертаються на одній орбіті навколо цих атомів. Згідно принципу Паулі загальну орбіту можуть мати лише два електрони з різними спінами і тому число ковалентних зв'язків атома визначається його валентністю.

Така кристалічна структура, де всі електрони пов'язані з атомами не повинна проводити електричний струм. Однак під дією зовнішніх сил в напівпровіднику виникає електропровідність.

2. Власні і до мішкові напівпровідники. Елементарні напівпровідники

кремній, германій.

При деяких зовнішніх впливах (температури, напруги, світла та ін.) з'являються електрони, енергія яких стає достатньою для виходу із валентної зони і переходу в зону провідності. Ці електрони звільняються від зв'язків та стають вільними, створюючи *струм електронів*.

Вихід електрону з валентної зони приводить до появи в ній незаповненого енергетичного рівня. Вакантний енергетичний стан називається *діркою*. Воно має некомпенсований позитивний заряд, який дорівнює заряду електрона. В результаті виникає пара електрон – дірка. Цей процес називається *генерацією* зарядів.

Валентні електрони сусідніх атомів можуть переходити на вільні (незаповнені) енергетичні рівні, утворюючи дірки в іншому місці. Це приводить до того, що дірка в одному місці заповнюється (зникає), а в іншому – виникає, тобто вона буде хаотично переміщуватись по кристалічних ґратах, створюючи *дірковий струм*.

Таким чином, струм в напівпровіднику може бути обумовлений рухом як вільних електронів, так і дірок.

Дірки та електрони при зустрічі можуть з'єднуватись та зникати. Цей процес називається *рекомбінацією* зарядів.

Вільні електрони та дірки є носіями електричних зарядів: електрони – негативних n , дірки – позитивних p .

В бездомішковому напівпровіднику кількість вільних електронів дорівнює кількості дірок, тобто концентрації електронів n_i та дірок p_i однакові

$$n_i = p_i$$

$$n_i \cdot p_i = n_i^2 = p_i^2$$

Для кремнію $p_i = n_i = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, для германію $p_i = n_i = 2.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, тобто в кремнію кількість вільних електронів менша ніж в германію завдяки більшій енергії іонізації.

У власному напівпровіднику концентрація електронів та дірок установлюється як результат динамічної рівноваги двох безперервних процесів: генерації та рекомбінації рухомих носіїв.

В електронних приладах частіше застосовують до мішкові напівпровідники, які дозволяють змінювати властивості напівпровідників.

Атом акцепторної домішки

Вільний електрон Атом донорної домішки

\

Валентні електрони

б

а

Рис. Кристалічні ґрати до мішкових напівпровідників

а — n – типу; б — p – типу

В електроніці застосовують напівпровідники, частину атомів яких заміщують атомами іншої речовини. Такі напівпровідники називаються *до мішковими* напівпровідниками.

3. Основні та неосновні носії зарядів, їх концентрація, механізм розсіяння та рухливості. Не рівновісні носії заряду та механізм рекомбінації.

Напівпровідник з електронною електропровідністю

При введенні в чотирьох валентний напівпровідник до мішкових п'ятивалентних атомів (фосфору *P*, сурми *8b*). Чотири електрони атома домішки вступають в зв'язок

з чотирма валентними електронами сусідніх атомів основного напівпровідника. П'ятий валентний електрон виявляється майже не зв'язаним з своїм атомом і при одержанні додаткової незначної енергії, яка зветься **енергією активації**, відривається від атома і стає вільним. Домішки, які збільшують число вільних електронів, називають **донорними** або просто **донорами**,

Атоми п'ятивалентних домішок, які "загубили" по одному електрону, перетворюються в позитивні іони. На відміну від дірок позитивні іони міцно зв'язані з кристалічною решіткою основного напівпровідника, є нерухомими позитивними зарядами і тому не можуть приймати безпосередньої участі в створенні електричного струму в напівпровіднику.

Незначна енергія активації домішок ΔW , яка дорівнює 0,16 еВ для кремнію і 0,01...0,13 еВ для германію, вже при кімнатній температурі приводить до повної іонізації п'ятивалентних атомів домішок і появи в зоні провідності вільних електронів.

Оскільки в цьому випадку поява вільних електронів не супроводжується одночасним збільшенням дірок в валентній зоні, то в такому напівпровіднику концентрація електронів виявляється значно вищою концентрації дірок. Дірки в такому напівпровіднику утворюються лише в результаті розриву ковалентних зв'язків між атомами основної речовини.

Напівпровідники, в яких концентрація вільних електронів в зоні провідності перевищує концентрацію дірок в валентній зоні, називаються напівпровідниками з електронною електропровідністю або **напівпровідниками n-типу**.

Рухомі носії заряду, яких в напівпровіднику більшість, називають **основними**. Відповідно ті носії, яких в напівпровіднику менше, називають **неосновними** для даного типу напівпровідника. В напівпровіднику n-типу основними носіями заряду є електрони, а неосновними-дірки.

Напівпровідники з дірковою електропровідністю

• Якщо в кристалі чотирьох валентного елемента частина атомів заміщена атомами трьох валентного елемента (галія *Ga*, Індій *In*), то для створення чотирьох ковалентних зв'язків у до мішкового атома не вистачає одного електрона (рйет-43?а). Цей електрон можна одержати від атома основного елемента напівпровідника за рахунок розриву ковалентного зв'язку. Розрив зв'язку веде до появи дірки, тому що супроводжується створенням вільного рівня в валентній зоні. Домішки, які захоплюють електрони з валентної зони, називають **акцепторними** або **акцепторами**. Енергія активації акцепторів ДИ/д складає для германія 0,01. ..0,012 еВ і для кремнію 0,04. ..0, 16 еВ, що значно менше ширини забороненої зони бездомішкового напівпровідника. •

Завдяки малому значенню енергії активації акцепторів вже при кімнатній температурі електрони з валентної зони переходять на рівні акцепторів. Ці електрони, перетворюючи домішкові атоми в негативні іони, втрачають свою здатність переміщуватися по кристалічній решітці і не можуть брати участь у створенні електричного струму.

За рахунок іонізації атомів початкового матеріалу з валентної зони частина електронів потрапляє в зону провідності. Проте електронів в зоні провідності значно менше, ніж дірок у валентній зоні.

Тому дірки в таких напівпровідниках є **основними**, а електрони - **неосновними рухомими носіями заряду**. Такі напівпровідники носять назву **напівпровідників із дірковою електропровідністю** або **напівпровідники p – типу**.

Висновки:

1. 5- ти валентний атом донорові домішки перетворюється в позитивний іон донору, оскільки чотири 1-но валентні електрони ідуть на ковалентні зв'язки, а п'ятий електрон залишає атом, утворюючи електронну провідність напівпровідника;

2. 3-х валентний атом акцепторної домішки перетворюється в негативний іон акцептора, оскільки для ковалентного зв'язку необхідні чотири електрони, один з яких захоплюється атомом акцептора з атома напівпровідника де залишається дірка, що утворює діркову провідність напівпровідника;
3. Домішки, утворюючи донором-акцепторні зв'язки, зміщують зону заборони, що приводить до виникнення напів провідності германію Ge та кремнію Si.

Струми в напівпровідника

У власному напівпровіднику електрон та дірка знаходиться в стані хаотичного теплового руху.

Як відомо, струм – це направлене переміщення носіїв заряду. Він виникає в напівпровіднику при наявності електричного поля або області з різною концентрацією носіїв заряду.

Струм напівпровідника має дві складові – електронну I_n та діркову I_p

$$I = I_n + I_p$$

Далі будемо розглядати не струм, а щільність струму

$$J = I / S$$

де S – площа перерізу напівпровідника, крізь яку проходить струм I .

Дрейфовий струм

Дрейфовий струм виникає в напівпровіднику, якщо до нього прикладається електричне поле. Щільність електронної складової дрейфового струму дорівнює:

$$J_{др\ n} = en\mu_n E ,$$

де e – Заряд електрону ($1.6 \cdot 10^{-9}$ Кл)

n – концентрація електронів;

μ_n – рухомість електронів;

E - напруженість електричного поля.

Рухомість електронів μ_n – є їх здатність переміщуватись під дією електричного поля.

Аналогічно щільність діркової складової дрейфового струму знаходиться за формулою:

$$J_{др\ p} = e p \mu_p E ,$$

де p – концентрація дірок, μ_p – рухомість дірок.

Загальна щільність дрейфового струму в напівпровіднику дорівнює сумі

$$J_{др} = J_{др\ p} + J_{др\ n} ,$$

$$J_{\partial p} = eE(\mu_n n + \mu_p p) .$$

4. Дифузійний струм

В областях напівпровідника з різною концентрацією електронів (дірок) вірогідність зіткнення електронів (дірок) більше там, де вища їх концентрація. Тому, за законами фізики, носії заряду, будуть намагатися перейти із областей менших зіткнень, тобто переміщуватись із області більших концентрацій в область менших концентрацій (дифузія). Оскільки дифузія є переносом носіїв заряду, то в напівпровіднику з'являється дифузійний електричний струм. Він намагається вирівняти концентрацію носіїв.

Дифузійний струм електронів (як і струм дірок) рухається в бік зменшення концентрації і так само як струм мусить бути негативним. Однак відповідно з прийнятим в техніці умовним направленням вважається, що дифузійний струм електронів рухається в бік зростання концентрації електронів, тобто назустріч потоку електронів, тому в рівнянні (4.1) стоїть знак "+".

Загальна щільність дифузійного струму в напівпровіднику буде

$$J_{\partial \text{иф}} = J_{\partial \text{иф } n} + J_{\partial \text{иф } p}$$