

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Мета роботи: дослідження залежності електропровідності напівпровідника від типу носіїв заряду та їх концентрації.

Теоретичні відомості

Розглянемо механізм електропровідності напівпровідників на прикладі класичного напівпровідникового матеріалу – кремнію. Як відомо, він має кристалічні ґратки типу алмаза, кожен атом ґратки ковалентно зв'язаний з чотирма іншими атомами. Ковалентний зв'язок забезпечують чотири валентних електрони. При температурі, рівній абсолютному нулю, така структура надзвичайно стабільна і кристал є ізолятором. При температурі вище абсолютного нуля деякі валентні електрони одержують енергію достатню, щоб відірватися від атомів. Таким чином, у кристалі напівпровідника виникають рухливий електрон і незавершений ковалентний зв'язок, що одержав назву дірки. Дірка може бути заповнена електроном, що перейшов із сусіднього атома, створивши там наступний незавершений ковалентний зв'язок, тобто незавершений ковалентний зв'язок є рухливий. Іншими словами, дірка являє собою відсутність електрона, тому її можна розглядати як частинку, що має позитивний заряд, рівний за величиною заряду електрона. Напівпровідник, у якому в результаті розриву ковалентних зв'язків утвориться однакова кількість електронів і дірок, називається власним. Під впливом теплового збудження пари електрон – дірка безупинно виникають і безупинно рекомбінують з такою швидкістю, що в середньому кількість електронів і дірок залишається незмінною.

Власний напівпровідник являє собою кристал, у якому є рухливі електрони і дірки, що безладно переміщаються за відсутності електричного поля. Чим вища температура, тим більша кількість пар електрон – дірка виникає у власному напівпровіднику. Тепловий рух носіїв заряду відбувається в реальному кристалі, якому властиві такі неоднорідності, як теплове коливання атомів кристала, різного виду дефекти, домішки, дислокації. Це приводить до зіткнень заряду з цими неоднорідностями, що у свою чергу змінює напрямок руху. Тому тепловий рух носіїв заряду є безладним.

Відстань, яку пройшов електрон у період між двома зіткненнями, називається довжиною вільного пробігу, а усереднене значення усіх відрізків шляху – це середня довжина вільного пробігу. Час між двома зіткненнями і його усереднене значення називається відповідно часом вільного пробігу і його середнім значенням. Середня швидкість теплового руху електронів при кімнатній температурі становить 10^7 см/с.

Прикладемо електричне поле до кристала власного напівпровідника.

Його рухливі електрони під дією електричного поля почнуть рухатися в напрямку, протилежному напрямку поля. Спрямований рух рухливих носіїв заряду в електричному полі називається дрейфом, а швидкість їхнього спрямованого руху – дрейфовою швидкістю. Дірки, що являють собою вакантне місце в ковалентному зв'язку, також будуть направлено переміщатися, але протилежно напрямку руху електронів, тобто за напрямком електричного поля. Таким чином, струм у власному напівпровіднику характеризується двома складовими – електронним і дірковим струмами.

Розглянемо механізм електропровідності напівпровідника з домішками на прикладі кремнію, коли один з атомів у кристалічних ґратках напівпровідника заміщений атомом елементів V чи III групи. Такий напівпровідник називається домішковим, а його електропровідність, обумовлена наявністю в кристалі домішки, – домішковою. Введення атомів елементів V групи в кристал кремнію створює електронний тип електропровідності. Це відбувається в такий спосіб. Чотири валентних електрони кремнію утворюють ковалентний зв'язок з чотирма валентними електронами атома елемента V групи, наприклад, миш'яку. Один валентний електрон атома миш'яку є слабо зв'язаним з ним, тому він легко відривається від атома миш'яку і з цього моменту починає вільно переміщатися по кристалу, збільшуючи його електропровідність. Такі домішкові атоми, що віддають електрони, називають донорними. Іонізовані домішкові атоми миш'яку здобувають, таким чином, позитивний заряд, що залишається нерухомим. Отже, домішкові атоми миш'яку в кристалі кремнію створюють рухливі електрони і нерухомий позитивний заряд, а в цілому кристал залишається електронейтральним.

Аналогічна картина спостерігається, коли атоми кремнію в кристалічних ґратках замінюються домішковими атомами елементів III групи, наприклад, бором. Три валентних електрони атома бору утворюють ковалентний зв'язок із трьома валентними електронами атома кремнію. Один електрон атома кремнію в цьому випадку виявляється слабо зв'язаним зі своїм атомом, його перехід до атома бору створює незавершений ковалентний зв'язок (дірку), що вільно переміщається по кристалу, і нерухомий негативний заряд на іонізованих атомах бору. Домішкові атоми, що приймають електрони, називають акцепторними. Напівпровідник, що містить донорні домішки, називають напівпровідником *n*-типу, у цьому випадку електрони є основними носіями, тому що їхня кількість порівняно з дірками значно більша, а дірки є неосновними. Напівпровідник, що містить акцепторні домішки, називають напівпровідником *p*-типу, тому що дірки – основні носії й у цьому випадку вони забезпечують електропровідність кристала.

Число рухливих носіїв струму, створюваних домішками, значно перевищує число носіїв, що утворюються в результаті теплового порушення, навіть при дуже малих концентраціях домішкових атомів (один домішковий атом на мільйон атомів напівпровідника). Практично всі домішкові атоми напівпровідника виявляються іонізованими при кімнатній температурі, тому непе-

ликі зміни в температурі помітно не впливають на кількість основних носіїв струму в даному напівпровіднику.

Однак електропровідність кристала напівпровідника залежить не тільки від концентрації рухливих носіїв струму, але і від їхньої рухливості, тобто міри легкості, з якою вони переміщаються під впливом прикладеного електричного поля.

Параметр, що пов'язує дрейфову швидкість носіїв заряду з напруженістю електричного поля, називають рухливістю заряду. Позначимо її μ , тоді

$$v = \mu E_{\Pi} . \quad (4.1)$$

Звідки

$$\mu = v / E_{\Pi} = q\tau / m . \quad (4.2)$$

У загальному випадку густина струму пов'язана зі швидкістю руху носіїв струму співвідношенням

$$\bar{j} = qn\bar{v} = qn\mu\bar{E}_{\Pi} . \quad (4.3)$$

У загальному випадку густина струму пов'язана зі швидкістю руху носіїв струму співвідношенням

Питома провідність на підставі закону Ома визначається з врахуванням (4.3) у такий спосіб:

$$\sigma = j / E_{\Pi} = qn\mu . \quad (4.4)$$

Повна швидкість електрона характеризується тепловою швидкістю $\bar{v}_T$ і швидкістю дрейфу $\bar{v}_y$, тому час вільного пробігу електрона τ залежить від енергії. У зв'язку з цим при визначенні дрейфової швидкості необхідно усереднювати час вільного пробігу з урахуванням функції розподілу електронів за енергіями.

Приклад розв'язування задач

Обчисліть власну питому провідність германію при кімнатній температурі, якщо $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, власна концентрація носіїв заряду при даній температурі становить $2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, концентрація дірок $6,58 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Розв'язування.

Власна питома провідність германію при кімнатній температурі визначається за виразом:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p.$$

Використовуючи відношенням „діючих мас” визначимо концентрацію електронів у германії

$$n_0 p_0 = n_i^2,$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(2,1 \cdot 10^{19})^2}{6,58 \cdot 10^{20}} = 6,7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3},$$

$$\sigma = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,7 \cdot 10^{17} \cdot 0,39 + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,58 \cdot 10^{20} \cdot 0,19 = 20,05 \text{ См/м}.$$

Відповідь: $\sigma = 20,05 \text{ См/м}$.

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Обчисліть питомий опір напівпровідника n -типу, якщо концентрація електронів провідності в ньому дорівнює 10^{22} м^{-3} , а їх рухливість $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 2. При напруженості електричного поля 100 В/м густина струму через напівпровідник $6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Обчисліть концентрацію електронів провідності в напівпровіднику, якщо їх рухливість Дірковою складовою струму знехтувати.

Задача 3. Епітаксійний шар арсеніду галію, легованого сіркою, має при кімнатній температурі питомий опір $5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}$. Обчисліть концентрацію донорів в шарі, якщо рухливість електронів $0,8 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 4. Через пластину кремнію з питомим опором $0,01 \text{ Ом/м}$ протікає електричний струм густиною 10 мА/мм^2 . Знайдіть середню швидкість дрейфу електронів та дірок, якщо їх рухливості $0,14$ та $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 5. Власний питомий опір кремнію при 300 К дорівнює 2000 Ом , а рухливість електронів та дірок $0,14$ та $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Яку концентрацію носіїв струму має кремній?

Контрольні запитання

1. Поясніть механізм електропровідності в напівпровіднику з власним та домішковим типами провідності.
2. Енергія іонізації домішки. Мілкі та глибокі домішки.
3. Рухливість носіїв струму, її залежність від концентрації домішки і температури.
4. Провідність напівпровідників і її залежність від температури.