

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Тема: визначення температурної залежності електропровідності металів і напівпровідників.

Мета: дослідити зміну електропровідності металічних і напівпровідникових зразків при зміні температури шляхом безпосереднього виміру електричного опору зразків при нагріванні в лабораторній електропечі.

Прилади і матеріали: установка ФПК-07

Література

1. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников: учебное пособие. – 2 изд. – М.: Высш. шк., 1984. – 352 с.
2. Бонч-Бруевич В.Л. Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1977.
3. Фізичні основи електронної техніки: підручник / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лук'янець та ін. Львів: Бескид Біт, 2004. – 880 с.
4. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки: курс лекцій: навчальний посібник / Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, З. Ю. Готра та ін. – Івано-Франківськ : Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. – 263 с.

Теоретичні відомості

Розглянемо залежність електропровідності напівпровідників від температури і концентрації домішок.

За наявності одного типу вільних носіїв заряду (електронів) питома електропровідність становить:

$$\sigma_n = en\mu_n, \quad (1)$$

де e – заряд електрона; n – концентрація вільних електронів; μ_n – дрейфова рухливість електронів.

Якщо носіями заряду є електрони і дірки, то отримуємо:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p, \quad (2)$$

В області власної електропровідності рівноважні концентрації електронів і дірок однакові тому:

$$\sigma_i = e(\mu_n + \mu_p)n_i = e(\mu_n + \mu_p)\sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (3)$$

де E_g – ширина забороненої зони.

Хоча рухливості μ_n і μ_p , а також ефективна густина станів N_c і N_v залежать від температури, все ж основний вклад у температурну залежність σ_i дає експоненціальний член. Тому коефіцієнт перед експонентою вважатимемо константою, що спостерігається в широких інтервалах температур.

Звідси,

$$\lg \sigma_i = A - \frac{0,43E_g}{2k \cdot 10^3} \frac{10^3}{T}, \quad (4)$$

де $A \sim \ln\left[(\mu_n + \mu_p)\sqrt{N_c N_v}\right]$, тобто в області власної електропровідності $\lg \sigma_i$, є практично лінійною функцією ($1/T$); причому кутовий коефіцієнт прямої визначається шириною забороненої зони E_g , а саме:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,43E_g}{2k \cdot 10^3} \quad (5)$$

Звідки:

$$E_g = 0,4 \operatorname{tg} \alpha, \text{ eВ.} \quad (6)$$

У домішковій області один із доданків (1) малий, порівняно з іншими, оскільки концентрація неосновних носіїв заряду набагато менша від концентрації основних носіїв заряду. Звідси для рівноважних концентрацій (1) дає одночленну експоненціальну залежність від температури аж до області виснаження домішки або, якщо така відсутня, до області власної електропровідності. В електронному напівпровіднику маємо:

$$\sigma_n = e \mu_n \sqrt{\frac{N_c N_d}{2}} \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right), \quad (7)$$

відповідно у дірковому напівпровіднику –

$$\sigma_p = e \mu_p \sqrt{\frac{N_v N_a}{2}} e\left(-\frac{E_a}{2kT}\right), \quad (8)$$

де N_c , N_v , N_d , N_a – густини станів в зоні провідності, валентній зоні, донорних рівнів, акцепторних рівнів відповідно. Тоді:

$$\lg \sigma_n = B - \frac{0,43 E_d}{2k \cdot 10^3} \cdot \frac{10^3}{T}, \quad (9)$$

де $B \sim \lg \mu_n \sqrt{\frac{N_c N_d}{2}}$.

Звідки

$$\operatorname{tg} \alpha_d = \frac{0,43 E_d}{2k \cdot 10^3}, \quad (10)$$

Тому

$$E_d = 0,4 \operatorname{tg} \alpha_d, \text{ eВ.} \quad (11)$$

Аналогічно

$$\lg \sigma_p = C - \frac{0,43 E_a}{2k \cdot 10^3} \cdot \frac{10^3}{T}, \quad (12)$$

де $C \sim \lg \mu_p \sqrt{\frac{N_v N_a}{2}}$.

Звідки

$$\operatorname{tg} \alpha_a = \frac{0,43 E_a}{2k \cdot 10^3} \quad (13)$$

Тому

$$E_a = 0,4 \operatorname{tg} \alpha_a, \text{ eВ.} \quad (14)$$

Для області виснаження домішок хід функції $\sigma(T)$ визначається залежністю $\mu(T)$.

На рис. 1 наведено криві $\lg \sigma = f(1/T)$ для електронного напівпровідника при різній концентрації донорів N_d і для діркового напівпровідника при різній концентрації акцепторів N_a . Якщо в обох випадках розглядається один і той самий напівпровідник (наприклад, кремній), то в області власної електропровідності крива має однаковий нахил. Кут нахилу кривих у домішковій області визначається енергією йонізації донорів і акцепторів, згідно з (10), (13).

Однак у реальних напівпровідниках хід кривих може дещо відрізнятись від ідеалізованих кривих, зображених на рис. 1.

При концентрації домішки $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ наприклад, в германії хвильові функції сусідніх домішкових атомів помітно перекриваються. Оскільки в реальних кристалах практично завжди є частково скомпенсовані домішки при $N_d > N_a$ то при перекритті хвильових функцій сусідніх донорних центрів виникає можливість тунелювання електронів по донорних центрах. За дуже низької температури (при $T \approx 0 \text{ К}$) концентрація зайнятих центрів становить $N'_d = N_d - N_a$, а концентрація вільних центрів – N_a . У цьому випадку навіть

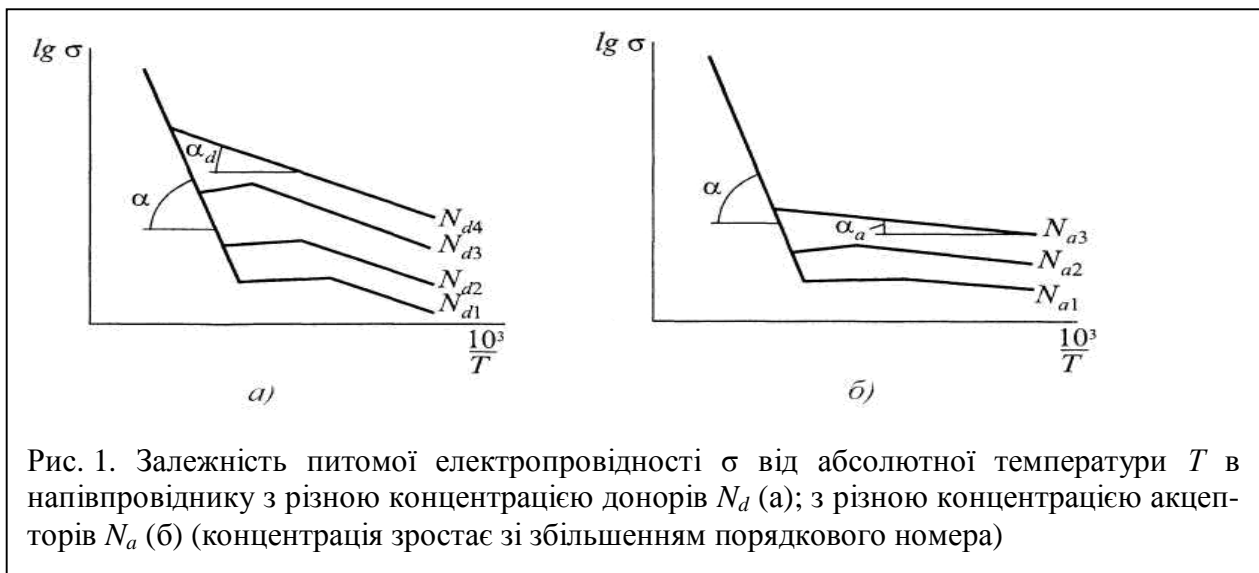


Рис. 1. Залежність питомої електропровідності σ від абсолютної температури T в напівпровіднику з різною концентрацією донорів N_d (а); з різною концентрацією акцепторів N_a (б) (концентрація зростає зі збільшенням порядкового номера)

при $T = 0$ К можлива електропровідність по домішках (по локалізованих станах). Але домішкові центри розташовані далеко один від одного, то рухливість електронів по домішкових рівнях значно менша від рухливості електронів зони провідності. Тому з підвищенням температури переважає звичайна зонна електропровідність. Але при підвищенні концентрації домішки перекриття хвильових функцій електронів сусідніх домішкових центрів виявляється настільки значним, що одиночний домішковий рівень розширюється, утворюючи в забороненій зоні напівпровідника або діелектрика домішкову зону, так що густина станів виявляється відмінною від нуля в тому місці забороненої зони, де виникає домішкова зона. При подальшому підвищенні концентрації донорів домішкова зона може зімкнутися із зоною провідності (або з валентною зоною для напівпровідника p -типу при підвищенні концентрації акцепторів). Оскільки різні дефекти структури, як і домішкові атоми (як окремих випадок дефектів структури), створюють рівні в забороненій зоні, домішкові зони можливі в неоднорідних напівпровідниках та діелектриках. Зазначимо, що електропровідність по домішковій зоні (по локалізованих станах) може впливати на загальну електропровідність, і масштаби цього впливу залежать від температури, а також від частоти, якщо електричне поле змінне. Хоч звичайно електропровідність по валентній зоні або по зоні провідності значно перевищує електропровідність по домішковій зоні, в ряді випадків останню необхідно враховувати.

Будова і принцип дії установки

Установка складається з об'єкта дослідження (електропечі з встановленими в ній досліджуваними зразками і датчиком) і вимірювального пристрою, виконаних у виді конструктивно закінчених виробів, які встановлюються на лабораторному столі і з'єднуються між собою кабелем. Схематичне зображення з'єднання пристроїв установки наведено в додатку.

Об'єкт дослідження конструктивно виконаний у виді збірного корпусу, у якому встановлені електропіч з розміщеними всередині зразками, датчиком (термометр опору) і лампочка, яка засвічується при включеній печі, вентилятор для охолодження електропечі і джерела живлення електропечі і вентилятора зі схемами керування, а також пристрої комутації й індикації. Електропіч служить для нагрівання зразків, температура яких вимірюється датчиком вимірювання температури. Вентилятор служить для прискорення охолодження електропечі після закінчення роботи з установкою. Джерела живлення зі схемами керування призначені для живлення електропечі і вентилятора і керуванням їхньою роботою з вимірювального пристрою. На передній панелі об'єкта дослідження знаходиться вікно, що дозволяє спостерігати електропіч і зразки, встановлені в ній. На цій же панелі розміщені наступні органи керування й індикації:

- вимикач "СЕТЬ" – призначений для включення живлення об'єкта дослідження;
- перемикач "ОБРАЗЕЦ" – призначений для почергового підключення зразків до вимірювального входу вимірювального пристрою;

Положенням перемикача "ОБРАЗЕЦ" відповідає підключення наступних зразків:

"1" – метал (мідь);

"2" – сплав з низьким температурним коефіцієнтом опору (манганін або константан);

Примітка: Даний зразок був введений в установку для демонстрації сплавів з малим температурним коефіцієнтом. Так як зміна опору зразка в робочому діапазоні температур складає всього 0,5 %, досліджувати зміну опору від температури даного зразка недоцільно.

"3" – напівпровідник (напівпровідниковий терморезистор);

"0" – у цьому положенні вимірювальний вхід вимірювального пристрою закорочений.

Індикатори "СЕТЬ" і "ВЕНТ" – призначені для індикації включення живлення об'єкта дослідження і вентилятора (управляються вимикачем "СЕТЬ" і вимірювального пристроєм відповідно).

На задній панелі об'єкта дослідження розташовані клема заземлення, тримачі запобіжників (закриті запобіжною скобою), мережевий шнур з вилкою і з'єднувальний шнур з роз'ємом для підключення об'єкта дослідження до вимірювального пристрою.

Об'єкт дослідження за допомогою мережевого шнура підключається до мережі 220 В, 50 Гц.

Вимірювальний пристрій виконаний у вигляді конструктивно закінченого виробу. У ньому застосована однокристална мікро-ЕОМ з відповідними додатковими пристроями, що дозволяють робити вимірювання температури зразків (температури в електропечі) об'єкта дослідження й опору зразків у процесі нагрівання, а також здійснювати функції керування установкою (включення і виключення електропечі і вентилятора об'єкта дослідження, зупинка індикації при знятті показань з індикатора і т.п.). До складу вимірювального пристрою входять також джерела його живлення і рідкокристалічний індикатор.

На передній панелі вимірювального пристрою розміщені наступні органи керування й індикації:

- рідкокристалічний індикатор – призначений для індикації вимірюваних величин (у верхній частині – температури в градусах Цельсія, у нижньої – опору в Омах), а також режимів роботи (відображається в правому верхньому куті);

- кнопки "НАГРЕВ" і "ВЕНТ" – призначені для включення і виключення (шляхом повторного натискання) електропечі і вентилятора об'єкта дослідження відповідно; при включеній печі на індикаторі з'являється напис "Warm", включеному вентиляторі – "Cool";

- кнопка "СТОП ИНД" – призначена для включення і виключення (шляхом повторного натискання) режиму зупинки індикації значень температури та опору при знятті показань з індикаторів. При включенні цього режиму, показання на індикаторі фіксуються в тому положенні, у якому вони знаходилися при натисканні кнопки "СТОП ИНД", при цьому режим роботи установки не змінюється (якщо перед натисканням було нагрівання печі, то нагрівання продовжується, якщо був включений вентилятор, то він продовжує працювати) і на індикаторі з'являється напис "Fixed". При повторному натисканні відбувається вимикання даного режиму і на індикаторах знову відобразяться поточні значення вимірюваних величин і режим роботи.

Назадній панелі пристрою вимірювального розташовані вимикач "СЕТЬ", клема заземлення, тримачі запобіжників (закриті запобіжною скобою) і мережевий шнур з вилкою. Вимірювальний пристрій за допомогою мережевого шнура підключається до мережі 220 В, 50 Гц.

Принцип дії установки заснований на вимірюванні опору зразка в процесі його нагрівання.

У процесі виконання лабораторних робіт знімаються залежності опору зразків від їхньої температури при нагріванні зразків від температури навколишнього середовища до максимальної робочої температури.

Режим роботи установки переривчастий – через кожні 2 години роботи робиться перерва на 10–15 хв.

Завдання до роботи

1. Виміряти температурну залежність опору металу (міді) R_m від температури. Побудувати графік залежності $R_m(T)$. Визначити температурний коефіцієнт електричного опору α для міді.
2. Виміряти температурну залежність опору сплаву (константану) R_c від температури. Побудувати графік залежності $R_c(T)$.
3. Виміряти температурну залежність опору напівпровідника від температури. Побудувати графік залежності $lg\sigma(10^3/T)$.
4. З графіка залежності $lg\sigma(10^3/T)$ визначити ширину забороненої зони кремнію E_g .

Хід роботи

1. Підключіть мережні шнури вимірювального пристрою й об'єкта дослідження до мережі і включіть установку вимикачами "СЕТЬ" на задній панелі вимірювального пристрою і передній панелі об'єкта дослідження. При цьому на індикаторі вимірювального пристрою повинні встановитися наступні покази: опір – "0" (допускається індикація до значення двох знаків молодшого розряду), температура навколишнього середовища. На об'єкті дослідження повинний світитися індикатор "СЕТЬ" і не світитися індикатор "ВЕНТ".

2. Дайте прогрітися установці 3–5 хв.

3. Перемикачем "ОБРАЗЕЦ", розташованим на передній панелі об'єкта дослідження, виберіть зразок, опір якого буде досліджуватися.

4. У зв'язку з різною тепловою інерційністю датчика температури і зразків при нагріванні й охолодженні вимір опору зразків рекомендується виконувати наступним чином.

4.1. Натисніть кнопку "НАГРЕВ" вимірювального пристрою (при цьому на індикаторі з'явиться напис "Warm", а в печі об'єкта дослідження засвітиться лампочка).

4.2. Спостерігаючи за показаннями температури (вони повинні зростати), при досягненні температури виміру менше необхідної на 2...3°C (ряд температур вимірювання рекомендується вибирати через 5 чи 10°C), повторно натисніть кнопку "НАГРЕВ" (при цьому лампочка в печі повинна згаснути). Після цього, спостерігаючи за показаннями індикатора (вони будуть зростати на 3...4°C, а потім зменшуватися), при досягненні необхідної температури натисніть кнопку "СТОП ИНД" і (на індикаторі з'явиться напис "Fixed") зніміть показання з опору. Так як при режимі "СТОП ИНД" показання індикатора не обновляються і включення (виключення) печі або вентилятора не відображаються, то для продовження нормальної роботи необхідно повторно натискати кнопку "СТОП ИНД".

Примітка: При температурах вище 80°C, в наслідок швидкого охолодження печі, зупинку нагрівання варто робити за 1 ...2°C до необхідної температури.

4.3. Повторюючи дії за п. 4.2, при досягненні кожної температури вимірювання з обраного ряду, отримайте дані для побудови графіка залежності опору зразка від температури.

4.4. При досягненні максимальної температури (120°C) і спрацьовуванні захисту автоматично відключається нагрівання і включається вентилятор (при цьому на індикаторі з'являється напис "Cool").

5. По закінченні роботи необхідно відключити живлення установки вимикачами "СЕТЬ" (на задній панелі вимірювального пристрою і передньої панелі об'єкта дослідження)

і відключити мережні шнури вимірювального пристрою та об'єкта дослідження від живильної мережі.

Контрольні запитання

1. Залежність електропровідності власного напівпровідника від температури.
2. Рухливість носіїв заряду.
3. Залежність електропровідності домішкових напівпровідників від температури.
4. Залежність рухливості вільних носіїв заряду від температури.
5. Яка будова і принцип дії установки ФПК-07?

Додаток

Таблиця 1

№	t	T	$R_{m, n}$	$R_{m, o}$	$R_{m, c}$	
п/п	°C	К	Ом	Ом	Ом	
1.						
2.						

Таблиця 2

№	t	T	$\frac{10^3}{T}$	R_n	σ	$lg \sigma$
п/п	°C	К	К ⁻¹	Ом	Ом ⁻¹ м ⁻¹	
1.						
2.						