

Робота 3-15

ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

Укладачі: Бригінець В.П., Гриб Б.М., Гусева О.А., Мойсеєнко В.І.

Мета роботи. Вивчення роботи термоелемента, визначення параметрів його оптимального режиму; визначення коефіцієнта Пельтьє $p-n$ переходу.

Короткі теоретичні відомості

Ефект Пельтьє, відкритий в 1834 р., відноситься до так званих термоелектричних явищ (разом з ефектами Зеебека і Томсона).

Ефект Пельтьє полягає в тому, що при проходженні струму в колі, що складається з різних провідників, в місцях контакту на додаток до теплоти Джоуля – Ленца виділяється або поглинається (залежно від напрямку струму) деяка кількість теплоти Q_{II} – теплота Пельтьє. Теплота Пельтьє пропорційна заряду q , що пройшов через контакт:

$$Q_{II} = \pm \Pi q = \pm \Pi It, \quad (1)$$

де Π – коефіцієнт Пельтьє, який залежить від природи контактуючих матеріалів.

Коефіцієнт Пельтьє можна визначити як кількість теплоти, що виділяється (або що поглинається) на контакті при проходженні через нього одиниці заряду.

Ефект Пельтьє проявляється на будь-якому контакті двох різних провідників (два різних металів, метал-напівпровідник, двох різних напівпровідників). У всіх випадках він пов'язаний з тим, що середня енергія контактних носіїв струму, які пройшли через контакт, відрізняється від середньої енергії власних носіїв в цій області.

При встановленні теплової рівноваги носії струму, що пройшли через контакт, струму повинні передати енергію кристалічній ґратці (область спаю нагрівається) або ж забрати у неї, якщо енергії недостатньо (область спаю охолоджується).

Детальніше розглянемо ефект Пельтьє на контакті металу з напівпровідником. На рис.1 зображена схема енергетичних рівнів на контакті металу з напівпровідником n -типу (n -тип провідності утворюється за рахунок введення донорних домішок, атоми яких віддають електрони в зону провідності (ЗП)). Таким чином, електрони повністю заповнюють рівні валентної зони (ВЗ) і частково рівні ЗП, на рисунку це відповідає косо заштрихованим областям. Рівень Фермі (E_F) лежить між ЗП і рівнями донорів (E_D).

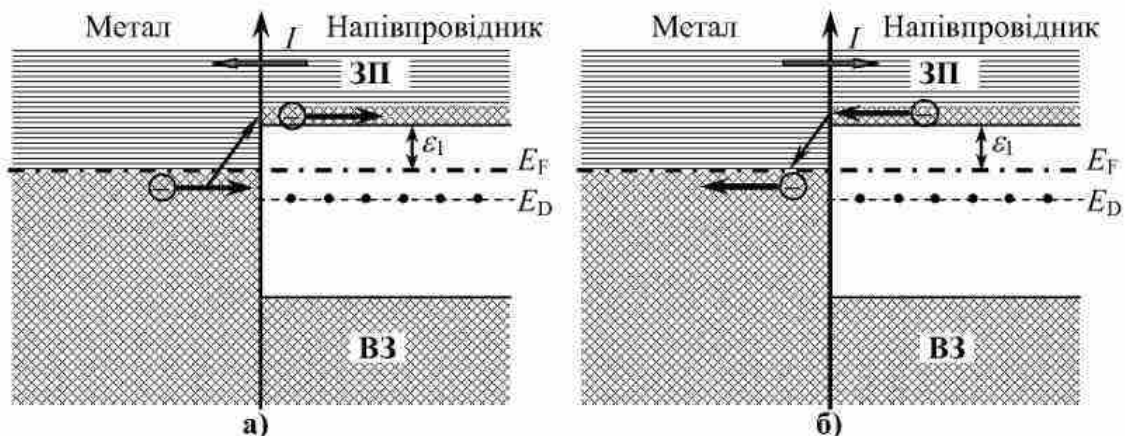


Рис. 1

У металі рівень Фермі слугує верхньою межею заповнених рівнів. Умова термодинамічної рівноваги відповідає співпадінню рівнів Фермі по обидві боки контакту. Електричний струм пов'язаний з рухом електронів, що знаходяться поблизу E_F в металі, і на рівнях ЗП в напівпровіднику. При протіканні струму в напрямі, показаному на рис.1а, електрони з рівня E_F в металі повинні перейти на рівні ЗП в напівпровіднику. При цьому енергія¹ ε_1 , якої недостає електронам, забирається у кристалічної ґратки, що

¹ Величина ε_1 залежить від напівпровідника, природи і концентрації домішок.

приводить до охолодження області контакту. При зворотному напрямі струму (рис.1 б) електрони з рівнів ЗП "спускаються" на рівень E_F в металі, віддаючи енергію, отже область контакту нагрівається. Очевидно, повинна виконуватися рівність

$$Q_{II} = \varepsilon_1 \frac{q}{e} = \frac{\varepsilon}{e} I t,$$

де e – заряд електрона.

Урахувавши (1), отримуємо, що даний контакт метал – напівпровідник n -типу характеризується коефіцієнтом Пельтьє:

$$\Pi_{m,n} \cong \frac{\varepsilon_1}{e}. \quad (2)$$

Тепер розглянемо контакт металу з напівпровідником p -типу. Напівпровідник p -типу провідності утворюється в результаті введення акцепторних домішок, атоми яких забирають електрони з ВЗ. У ВЗ з'являються дірки, рух яких створює струм. Рівень Фермі лежить між ВЗ і рівнем акцепторів (E_A). Струм через контакт в напрямі, показаному на рис.2а, відповідає переходам електронів з рівнів ВЗ на рівень E_F в металі. Енергія $\sim \varepsilon_2$, якої не вистачає, забирається у кристалічної ґратки і спай охолоджується. При протилежному напрямі струму (рис.2 б) електрони з рівня E_F в металі "спускаються" на рівні ВЗ, віддаючи енергію ґратці, і спай нагрівається.

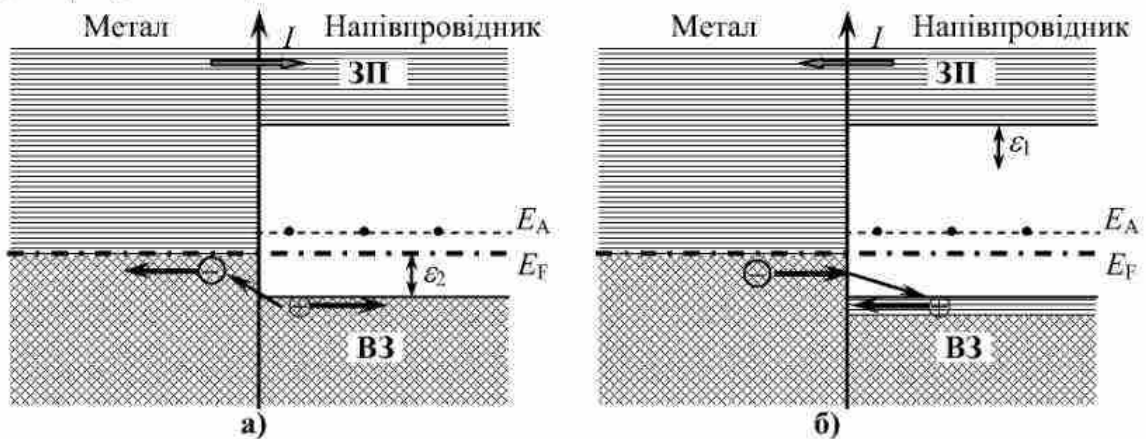


Рис. 2

Очевидно, коефіцієнт Пельтьє контакту метал - напівпровідник p -типа буде

$$\Pi_{m,p} \cong \frac{\varepsilon_2}{e}. \quad (3)$$

Якщо струм протікає через два послідовно з'єднаних контакти, зображених на рис.3, то напрям струму, показаний на рис.3а, відповідає охолодженню обох контактів (1, 1') за рахунок ефекту Пельтьє. При протилежному напрямі струму (рис.3б) обидва контакти (2, 2') за рахунок теплоти Пельтьє нагріваються. Загальна кількість теплоти Пельтьє на обох контактах можна охарактеризувати коефіцієнтом Пельтьє

$$\Pi_{n,p} = \Pi_{m,p} + \Pi_{m,n} \cong \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{e} \quad (4)$$

як це впливає з (2) і (3).

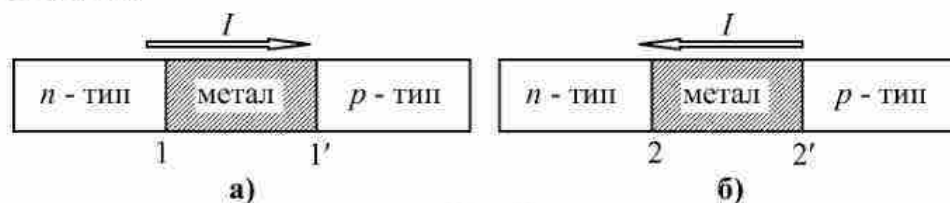


Рис. 3

Термоелемент, що вивчається в даній роботі, схематично зображений на рис.4.

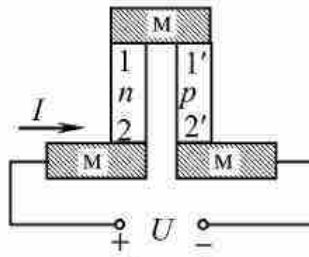


Рис. 4

Буквами m, n, p позначені відповідно металеві і напівпровідникові пластини $n-n$ і $p-p$ типів провідності; цифрами $1, 1', 2, 2'$ – контакти між пластинами.

При показаній на рис.4 полярності напруги через термоелемент тече струм такого напрямку, при якому тепло Пельтьє виділяється на контактах $2, 2'$ і поглинається на контактах $1, 1'$. Металева пластина, що замикає два останні контакти, охолоджується і це дозволяє використовувати останній пристрій як холодильний елемент.

Оптимальний режим роботи холодильного термоелемента. Ефективність роботи термоелемента визначається як $\Delta T = T_0 - T$, де T_0 – температура навколишнього середовища, T – температура охолоджуваного спая.

При протіканні струму I через термоелемент повна кількість теплоти Пельтьє, що поглинається в спаях $1, 1'$

$$Q_{\Pi} = \Pi_{n,p} I,$$

тобто потужність, що поглинається

$$W_{\Pi} = \Pi_{n,p} I.$$

Крім того, при протіканні струму по всіх термоелементах у них виділяється теплота Джоуля-Ленца, потужність якої

$$W_{Дж} = RI^2,$$

де R – опір термоелемента: $R = U/I$.

Розрахунок показує, що у першому наближенні близько половини теплоти Джоуля-Ленца припадає на холодні спая, тому загальна потужність, що поглинається на холодних спаях, становить

$$W_{заг} = \Pi_{n,p} I - \frac{1}{2} I^2 R.$$

Температура холодних спаяв знижуватиметься, якщо $W_{заг} > 0$, до тих пір, поки $W_{заг}$ не зрівноважиться потоком теплоти між холодними і гарячими спаями, викликаним теплопровідністю $n-n$ і $p-p$ гілок елементів (рештою потоків теплоти можна нехтувати). Якщо вважати температуру гарячого спая рівною кімнатній, що спеціально забезпечується його контактом з масивною металевою пластиною (радіатором), то потік теплоти до холодного спая

$$W_{\Gamma} = \kappa \Delta T,$$

де κ – коефіцієнт, який залежить від коефіцієнтів теплопровідності матеріалів $p-n$ і $p-p$ гілок термоелемента та їхніх геометричних розмірів.

Стационарні умови (незмінна температура T) досягаються, коли $W_{заг} = W_{\Gamma}$, тобто при

$$\Delta T = \frac{\Pi_{n,p} I - (1/2) I^2 R}{\kappa}. \quad (5)$$

З (5) видно, що ΔT залежить від сили струму. Оптимальному режиму роботи відповідає струм термоелемента $I_{опт}$, коли ΔT максимально ($\Delta T_{опт}$):

$$\left. \frac{d(\Delta T)}{dI} \right|_{I_{\text{опт}}} = 0,$$

звідки $I_{\text{опт}} = \Pi/R$. В результаті легкого визначити коефіцієнт Пельтьє:

$$\Pi_{\text{р.п.}} = I_{\text{опт}} R = U_{\text{опт}}. \quad (6)$$

Крім того, з урахуванням (5) отримуємо

$$\kappa = \frac{I_{\text{опт}} U_{\text{опт}}}{2\Delta T_{\text{опт}}}, \quad (7)$$

Таким чином, з умови оптимального режиму роботи термоелемента, можна визначити його важливі параметри.

Опис експериментальної установки

Спрощена схема експериментальної установки зображена на рис.5.

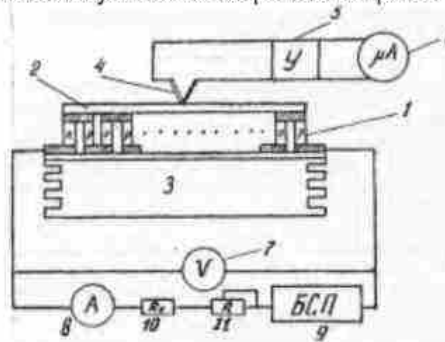


Рис. 5

У роботі використовується батарея 1 з послідовно з'єднаних 24-х термоелементів, холодні спаї яких знаходяться у контакті з електроізолюючою пластиною 2, що має хорошу теплопровідність. Спаї, які нагріваються, укріплені на масивному радіаторі 3, що дозволяє підтримувати їх температуру близькою до кімнатної.

Температура холодних спаїв вимірюється за допомогою термопари 4, сигнал з якою після підсилювача 5 потрапляє на мікроамперметр 6. ТермоЕРС термопари пропорційна ΔT , тому, знаючи коефіцієнт пропорційності, який залежить від чутливості установки, за показами мікроамперметра \mathcal{E} можна знайти ΔT :

$$\Delta T = \beta \mathcal{E}.$$

Падіння напруги на батареї $U' = 24U$ вимірюється вольтметром 7 (тут U – падіння напруги на одному термоелементі), а струм I через батарею – амперметром 8.

Напруга на термоелемент від стабілізованого джерела живлення 9 подається через обмежувальний опір 10 і реостат 11, що дозволяє регулювати живлення батареї.

Порядок виконання роботи

1. Відповідно до інструкції на робочому місці включити і відкалібрувати установку.
2. Виставляючи вказані в табл.1 значення сили струму I і переконавшись в кожному випадку, що стаціонарний тепловий режим вже досягнутий (покази мікроамперметра перестають змінюватися), виміряти відповідні величини I , U' і \mathcal{E} . Дані занести в табл.1.

Табл. 1

I, А					
U', В					
U, В					
\mathcal{E} , поділ					
ΔT , К					
$\frac{\Delta T}{I}$, $\frac{К}{А}$					

Обробка експериментальних даних

1. Обчислити падіння напруги на одному термоелементі $U = U'/24$ і занести його в табл.1.
2. Використовуючи наведене на робочому місці значення коефіцієнта β (град/дел.), обчислити $\Delta T = \beta \mathcal{E}$ і занести в таблицю.
3. Розрахувати відношення $\Delta T/I$ і занести в табл. 1. Згідно (5)

$$\frac{\Delta T}{I} = -\frac{1}{2\kappa}U + \frac{\Pi_{p,n}}{\kappa},$$

тобто є лінійну функцією U , де $-\frac{1}{2\kappa}$ – кутовий коефіцієнт, $\frac{\Pi_{p,n}}{\kappa}$ – відрізок, що відсікається на осі ординат.

На міліметровому папері поставити експериментальні точки залежності $\frac{\Delta T}{I}(U)$ і провести через них пряму.

4. По графіку визначити $-\frac{1}{2\kappa}$ та $\frac{\Pi_{p,n}}{\kappa}$, обчислити κ і $\Pi_{p,n}$. Дані занести в перший рядок табл.2.

5. За даними табл.1 на міліметровому папері побудувати графіки залежностей $\Delta T(I)$ та $U(I)$. По графіках визначити ΔT_{opt} , I_{opt} , U_{opt} . Згідно (6) і (7) обчислити κ і $\Pi_{p,n}$. Їх значення занести в другий рядок табл. 2. Порівняти параметри, отримані двома методами.

Табл.. 2

№ п/п	$\Pi_{p,n}$, В	κ , Вт/К
1		
2		

Додаткове завдання

1. Використовуючи метод найменших квадратів, за даними табл.1 обчислити $K = -\frac{1}{2\kappa}$ і $b = \frac{\Pi_{p,n}}{\kappa}$ як параметри лінійної залежності $y = Kx + b$, де $y = \Delta T/I$, $x = U$, як це випливає з (8)
2. Обчислити $\kappa = -1/2K$ і $\Pi_{p,n} = \kappa b$. Порівняти значення κ і $\Pi_{p,n}$ з даними табл. 2.

Контрольні запитання

1. У чому полягає сутність ефекту Пельтьє?
2. Що таке коефіцієнт Пельтьє, від чого залежить знак і величина теплоти Пельтьє?
3. У чому полягає відміна у заповненні енергетичних рівнів електронів у металах, та напівпровідниках n – та p – типів?
4. Побудуйте схему енергетичних рівнів на контакті метал-напівпровідник n – типу. Як пояснити виникнення ефекту Пельтьє при протіканні струму через такий контакт? Пояснити як знак теплоти Пельтьє залежить від напрямку струму.
5. Дати відповідь на питання пункту 4 для випадку контакту метал-напівпровідник p – типу.
6. Чим визначається значення коефіцієнта Пельтьє для даного контакту?
7. Як побудований використаний в роботі термоелемент? Опишіть принцип його дії.
8. Що таке оптимальний режим термоелемента?
9. Чому дорівнює повна потужність, що поглинається на холодному спаї термоелемента? У чому полягають умова стаціонарного теплового режиму?
10. Приведіть принципову схему експериментальної установки.
11. Як за експериментальними даними визначити знайти $\Pi_{p,n}$ та κ ?
12. Як зобразити схему енергетичних рівнів на $p-n$ – переході? Від чого залежить коефіцієнт Пельтьє такого переходу?
13. Як пояснити ефект Пельтьє на контакті двох різних металів?
14. Яке термоелектричне явище можна назвати зворотним ефекту Пельтьє? Як це явище застосовується в даній лабораторній роботі?

Література

1. Савельєв И.В. Курс общей физики. –М.: Наука, 1987, –Т.3. § 59, 62, 63, 64
2. Стильбанс Л.С. Фізика полупроводников. –М.: Сов. радио, 1967.