

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

МЕТА: вивчити явище електропровідності твердих тіл.

5.1 Теорія

Явище електропровідності у твердих тілах зв'язане з переміщенням вільних зарядів під дією електричного поля. Таке переміщення зарядів приводить до зміни їх енергії. Можливі значення енергії електронів у твердих тілах утворюють смуги енергії, які називають **енергетичними зонами**. Оскільки електропровідність викликана рухом валентних електронів, то її особливості зумовлені характером заповнення валентними електронами квантових станів енергетичної зони, яка називається **валентною зоною**. При температурах T , близьких до 0°K , можливі два випадки:

а) квантові стани валентної зони повністю заповнені електронами. Тверде тіло з такою валентною зоною буде погано проводити електричний струм, тому що валентні електрони не можуть рухатись під дією зовнішнього електричного поля. Цей рух приводив би до зміни їх енергії, що мусить супроводжуватись переходом електронів в інші квантові стани. Але всі стани зайняті і переходити нікуди. Це тверде тіло – **діелектрик**;

б) якщо квантові стани валентної зони заповнені електронами частково, то вказаних обмежень на їх рух під дією зовнішнього електричного поля не існує. Тверді тіла з таким заповненням валентної зони добре проводять струм – це гарні **провідники**. Дослід показує, що високу електропровідність мають метали. Отже, в металах квантові стани валентної зони заповнені електронами частково.

Встановлено, що електропровідність напівпровідників з підвищенням температури різко збільшується, на відміну від металів, де вона монотонно знижується. Зростання електропровідності напівпровідників із збільшенням температури зонна теорія твердого тіла пояснює так: над валентною енергетичною зоною розташована зона збуджених станів. Ця зона відділена від валентної зони смугою заборонених енергій, тобто таких значень енергій, які вільний електрон не може мати. Ці енергії утворюють **заборонену зону**. Енергетична **ширина забороненої зони** позначається ΔE_g . Цей параметр є важливою характеристикою оптичних та електричних властивостей напівпровідників.

Із збільшенням температури деякі електрони валентної зони переходять в зону збуджених станів. Зона збуджених станів в цьому випадку буде частково заповнена електронами, які під дією зовнішнього електричного поля будуть рухатись так, як в металах. З цієї причини ця зона називається **зоною провідності**. Ймовірність переходу електронів із валентної зони в зону провідності визначається у відповідності із статистикою Максвела – Больцмана виразом:

$$W = A \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (5.1)$$

де k – стала Больцмана, A – нормуючий множник.

Отже, концентрація вільних електронів у зоні провідності змінюється з T за формулою:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (5.2)$$

де n – концентрація вільних електронів при температурі T . Згідно з електронною теорією електропровідності, вираз для питомої провідності має вигляд:

$$\sigma = en\mu, \quad (5.3)$$

де e – заряд електрона, n та μ – концентрація і рухливість електронів.

Експеримент показує, що рухливість μ із збільшенням температури у металах зменшується. Аналогічна залежність $\mu(T)$ спостерігається в напівпровідниках і в ізоляторах при помірних температурах. Але для напівпровідників температурна залежність концентрації значно більш сильна, ніж рухливості, і тому вважають:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{\Delta E_g}{2kT}}, \quad (5.4)$$

де σ_0 – стала величина.

Звідси впливає принципова відмінність залежності $\sigma(T)$ напівпровідників від металів. В металах, із збільшенням температури σ зменшується, а в напівпровідниках – стійко зростає. Відмінність між напівпровідниками і діелектриками має умовний характер. Якщо ширина забороненої зони не перевищує 3eV – це **напівпровідник**, а якщо більше – **діелектрик**.

У напівпровідниках провідність здійснюється не тільки вільними електронами зони

провідності, але і за рахунок переміщень вакансій валентних електронів, які перейшли у зону провідності. Ці вакансії мають позитивний заряд. Концентрація вакансій у власних напівпровідниках дорівнює концентрації вільних електронів. Ці вакансії називають дірками. Рухливість дірок значно нижча рухливості електронів. Вираз для питомої провідності власного напівпровідника має вигляд:

$$\sigma = en(\mu_n + \mu_p), \quad (5.5)$$

де μ_n і μ_p – рухливість електронів і дірок.

5.2 Експериментальна частина

Для визначення ширини забороненої зони ΔE_g використовується залежність зворотного струму насичення германієвого діоду від температури. Густина струму $j = \sigma E$. E – напруженість електричного поля в провіднику. Для ділянки провідника довжиною L , $E = U/L$, де U – напруга на цій ділянці провідника. Весь струм $I = jS$, де S – площа поперечного перерізу провідника. Отримуємо:

$$\frac{I}{S} = \sigma \frac{U}{L} \Rightarrow I = \sigma \cdot S \frac{U}{L}.$$

Величину $S \frac{U}{L}$ можна вважати сталою, а $\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right)$.

Тоді при сталій напрузі, що прикладена до напівпровідникового зразка, залежність струму від температури має вигляд:

$$I = \sigma_0 S \frac{U}{L} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right). \quad (5.6)$$

Якщо взяти натуральний логарифм від (5.6), то отримаємо:

$$\ln I = \ln\left(\sigma_0 S \frac{U}{L}\right) - \frac{\Delta E_g}{2kT}. \quad (5.7)$$

Графік функції $\ln I = f(1/T)$ для напівпровідника має вигляд прямої лінії, як це показано на рис. 5.1.

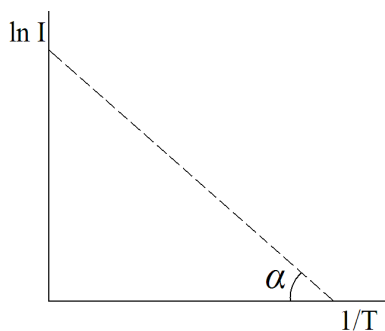


Рисунок 5.1

Із виразу (5.7) видно, що тангенс кута нахилу прямої $\ln I = f(1/T)$ дорівнює:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta E_g}{2k} \Rightarrow \Delta E_g = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.8)$$

Для знаходження $\operatorname{tg} \alpha$ і відповідно ΔE_g потрібно побудувати графік $\ln I = f(1/T)$, а для цього потрібно експериментально встановити значення струму через напівпровідник при різних температурах.

Дослід і теорія p - n переходів (діодів) із германію вказують на те, що зворотний струм насичення I_S збільшується із зростанням температури T відповідно до формули (5.6). На рис. 5.2 показані вольт-амперні характеристики германієвого p - n переходу для зворотного напрямку при різних температурах.

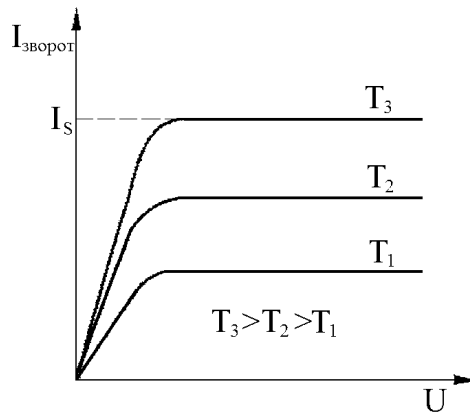
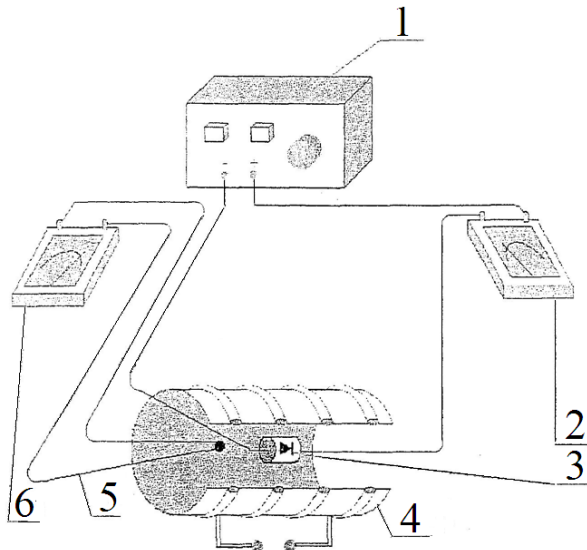


Рисунок 5.2.
5.3 Завдання 1

- 1 Отримати залежність сили струму I напівпровіднику від температури T .
- 2 За допомогою отриманого графіка визначити ширину забороненої зони ΔE_g германію.
- 3 Порівняти отримане значення ΔE_g з довідковим.

Прилади і обладнання

1. Джерело постійного струму В-24М (чи інше).
2. Діод з германію (наприклад Д7Ж).
3. Вольтметри-амперметри М-2018.
4. Термопара.
5. Електрична пічка.
6. Провідники.



1 – джерело постійного струму В-24М (чи інше); 2 – прилад для вимірювання зворотного струму діода (прилад М-2018, шкала на 1,5 мА); 3 – досліджуваний діод; 4 – хромель-копелева (ХК) термопара для вимірювання T в пічці; 5 – електропіч для нагрівання діода; 6 – прилад для вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) термопар (прилад М-2018, або інший), шкала 15 мВ
Рисунок 5.3

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з електромонтажною схемою лабораторної установки, яка зображена на рис. 5.3.
2. Підключити пічку (5) та джерело (1) до електричної мережі змінного струму 220 В.
3. Від джерела (1) подати на діод напругу $U=10$ В. Напруга контролюється по вольтметру, який розташований на лицевій панелі джерела (1).
4. Занести показання приладів (2) і (6) до таблиці 5.1.
5. ЕРС термопару перевести в $^{\circ}\text{C}$, використовуючи такі дані для термопару, наприклад

$$\Delta t^{\circ}\text{C} \approx 14,4^{\circ}\text{C} . \quad (5.9)$$

Це означає, що температура в пічці вища від кімнатної на $14,4^{\circ}\text{C}$.

6. Визначити абсолютну температуру T діода за формулою $T = 273 + t_k + \Delta t$, де t_k – кімнатна температура. Знайти значення $1/T$ та занести до табл. 5.1.

Увага! Необхідно уважно стежити за температурою в пічці і не нагрівати діод вище 120÷130° С.

Показання приладів краще знімати при охолодженні діода в пічці. Внаслідок теплової інерції більш надійні експериментальні дані будуть при більш повільному охолодженні, тобто в кінці охолодження.

Таблиця 5.1

№ п/п	ЕРС термопар, мВ	Різниця Δt між температурою діода та кімнатною, °С	Абсолютна температура T діода, К	$1/T$, К ⁻¹	Сила зворотного струму I , в поділках шкали М-2018	$\ln I$, в поділках шкали
1						
2						
...						
10						

7. Знайти $\ln I$ та побудувати графік залежності $\ln I = f(1/T)$. Знайти із графіка $\operatorname{tg} \alpha$ і за формулою (5.3) обчислити ΔE_g .

8. Порівняти отриманий результат з довідковим ($\approx 0,7$ еВ). $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

9. Зробити висновки.

5.4 Завдання 2

Визначити ширину забороненої зони ΔE_g германію.

Прилади і обладнання

1. Цифровий мультиметр DT-838 з термопарою – 1 шт.
2. Цифровий мультиметр DT-830В – 1 шт.
3. Досліджуваний германієвий діод D9 – 1 шт.
4. Дротяна піч – 1 шт.
5. Джерело постійного струму АС-DC з вихідною напругою 6 В – 1 шт.
6. З'єднувальні провідники.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною, рис. 5.4.
2. Розташувати у циліндричній порожнині дротяної печі спай термопар та досліджуваний діод.
3. Виставити межі вимірювань на приладах: DT-838 (прилад 1) – „TEMP °С” для вимірювання температури; DT-830В (прилад 2) – „2000 Ω ” для вимірювання опору діода, включеного у заперному напрямку.
4. Ввімкнути джерело постійного струму до мережі.
5. Після розігріву печі з діодом та термопарою при досягненні температури 85° С вимкнути джерело струму від мережі.
6. Омметром DT-830В (прилад 2) через кожні 5° С знімати значення опору діода, який остигає та заносити до табл. 5.2. У разі необхідності перемкнути омметр на іншу межу вимірювання.

Таблиця 5.2

№, п/п	Δt , °С	T , К	$1/T$, К ⁻¹	R , Ом	$\ln R$	ΔE_g , еВ
1	80					
2	75					
...	...					
12	25					

7. За результатами експерименту побудувати графік залежності $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

8. За формулою $\Delta E_g = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha$, де $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс кута нахилу прямої на графіку, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана, розрахувати ширину забороненої зони ΔE_g германію.

9. Порівняти отриманий результат з довідковим ($\approx 0,7$ еВ).

10. Зробити висновки.

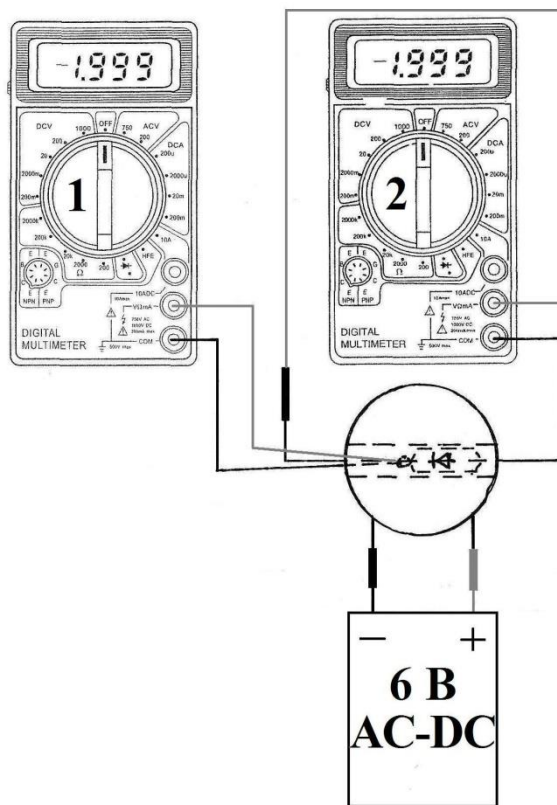


Рисунок 5.4

Контрольні запитання

1. Що таке валентна зона, заборонена та зона провідності?
2. Чим відрізняється електропровідність металів від напівпровідників?
3. Як залежить опір напівпровідника від температури (прямо пропорційно, обернено пропорційно, чи ще якимось чином)?
4. Що таке термо ерс?
5. Що таке рухливість зарядів?
6. Як розрахувати питому електропровідність власного напівпровідника?
7. У скільки разів зміниться струм через зразок з германію при сталій напрузі, якщо температура підвищиться від 27°C до 87°C ?

Література

1. Говорун Т.П. Фізика конденсованого стану матеріалів / Т.П. Говорун, В.О. Пчелінцев, В.М. Радзієвський, Л.В. Носонова. навч. посіб. - Суми: СумДУ, 2015. - 236 с.
2. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство , Ч. 3. Провідники та магнетики. /Ю. М. Поплавко, С. О. Воронов, Ю. І. Якименко.. Навчальний посібник. К.: НТУУ «КПІ», 2011. - 372 с.
3. Подопригора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М.. Фізика твердого тіла / Н.В. Подопригора, М.І. Садовий, О.М. Трифонова: навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів, – Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2014. – 416 с. Д
4. Кшнякин, В.С. Основи фізичного матеріалознавства [Електронний ресурс] / В.С. Кшнякин, А.С. Опанасюк, К.О. Дядюра. - Електронне вид. каф.: Електроніки і комп'ютерної техніки; ПМіТКМ. - Суми: СумДУ, 2015. - 466 с.