

**ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ**

**Кафедра фізики**

**ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до лабораторних робіт**

**Харків - 2014**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики 25 грудня 2009 р., протокол № 5.

Описано лабораторні роботи з фізики за темою «Фізика твердого тіла» відповідно до чинної програми. Виконання лабораторної роботи включає попередню підготовку, проведення експериментів і складання звіту про результати досліджень. При підготовці до виконання роботи необхідно вивчити теоретичний вступ, опис лабораторної установки й методи вимірювань, дотримуватися зазначеного порядку виконання експериментальної й розрахункової частин роботи. При проведенні експериментів необхідно неухильно виконувати всі встановлені в лабораторії правила техніки безпеки.

Методичні вказівки призначені для студентів усіх спеціальностей, що вивчають курс «Фізика», усіх форм навчання.

Укладачі:

доценти О.П. Шамшин,  
С.О. Катрич,  
Н.В. Глейзер

Рецензент

доц. А.Т. Котвицький

ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт

Відповідальний за випуск Глейзер Н.В.

Редактор Еткало О.О.

---

Підписано до друку 10.02.10 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,50. Тираж 200. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра «Фізика»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З  
ФІЗИКИ  
**ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА**

Зав. кафедри „Фізика”

Р.В. Вовк

Голова метод. комісії  
факультету АТЗ

О.В. Єлізаренко

Декан факультету АТЗ

О.М. Прогонний

Автори

О.П. Шамшин  
С.О. Катрич  
Н.В. Глейзер

Харків 2009

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики 25 грудня 2009 р., протокол № 5.

Описано лабораторні роботи з фізики за темою «Фізика твердого тіла» відповідно до чинної програми. Виконання лабораторної роботи включає попередню підготовку, проведення експериментів і складання звіту про результати досліджень. При підготовці до виконання роботи необхідно вивчити теоретичний вступ, опис лабораторної установки й методи вимірювань, дотримуватися зазначеного порядку виконання експериментальної й розрахункової частин роботи. При проведенні експериментів необхідно неухильно виконувати всі встановлені в лабораторії правила техніки безпеки.

Методичні вказівки призначені для студентів усіх спеціальностей, що вивчають курс «Фізика», усіх форм навчання.

Укладачі:

доценти О.П. Шамшин,  
С.О. Катрич  
Н.В. Глейзер

Рецензент

доц. А.Т. Котвицький

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 4  |
| Лабораторна робота 8.1. Визначення інтегральної чутливості фотоелемента.....                     | 5  |
| Лабораторна робота 8.2. Дослідження р-n-переходу в напівпровідниковому діоді.....                | 9  |
| Лабораторна робота 8.3. Внутрішній фотоефект у напівпровідниках.....                             | 13 |
| Лабораторна робота 8.4. Визначення сталої термопари та термо-ЕРС.....                            | 20 |
| Лабораторна робота 8.5. Дослідження залежності опору металів від температури.....                | 24 |
| Лабораторна робота 8.6. Залежність електричної провідності напівпровідників від температури..... | 30 |

## ВСТУП

Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики для студентів усіх форм навчання «Елементи фізики твердого тіла» містить опис лабораторних робіт з курсу загальної фізики за темою «Елементи фізики твердого тіла». До складу увійшли лабораторні роботи, які виконуються на кафедрі фізики УкрДАЗТ згідно з навчальним планом.

Лабораторні роботи є одним з основних видів самостійної роботи. Їхнє призначення – допомога студентам пізнати сутність фізичних явищ, глибше усвідомити фізичні закони, ознайомитися з методами фізичного експерименту, навчитися обробляти експериментальні результати.

Описи робіт мають теоретичні відомості, опис лабораторної установки, методи вимірювання, порядок виконання експериментальної та розрахункової частин роботи. У кожній роботі наведені контрольні запитання.

Студенти повинні ретельно готуватися до виконання лабораторних робіт. При підготовці їм необхідно:

- 1) вивчити теорію досліджуваного явища за підручником, конспектом лекцій або навчальним посібником, орієнтуючись на контрольні запитання;

- 2) коротко законспектувати зміст роботи, математичні викладки, намалювати акуратно й розбірливо схему установки і заготовити таблицю для занесення в неї результатів експерименту.

Звіт з лабораторної роботи оформляється на окремих аркушах.

Результати вимірювань записуються в таблицю в одній системі одиниць (СІ).

Робота вважається виконаною, якщо викладач позитивно оцінює отримані результати.

Виконана й оформлена робота повинна бути здана викладачу для оцінки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8.1

### Визначення інтегральної чутливості фотоелементу

**Мета роботи:** дослідити залежність величини фотоструму від величини падаючого світлового потоку.

### Теоретичні відомості

Напівпровідникові фотоелементи, які інакше називають вентильними або фотогальванічними, застосовуються для перетворення енергії випромінювання в електричну енергію. Основним елементом такого пристрою є шар, що має односторонню провідність. За такий шар можна використати р-n-перехід або контакт метал-напівпровідник, якому притаманні вентильні властивості. Електрони, поглинаючи фотони, отримують енергію, достатню для подолання потенціального бар'єра, що виникає на контакті або р-n-переході. При цьому в колі виникає електрорушійна сила та пов'язаний з нею струм. Таке явище має назву вентильного фотоефекту (окремий випадок внутрішнього фотоефекту).

У даній роботі використовується сірчистосрібний фотоелемент, який відноситься до типу вентильних. Будову такого фотоелемента наведено на рисунку 1.

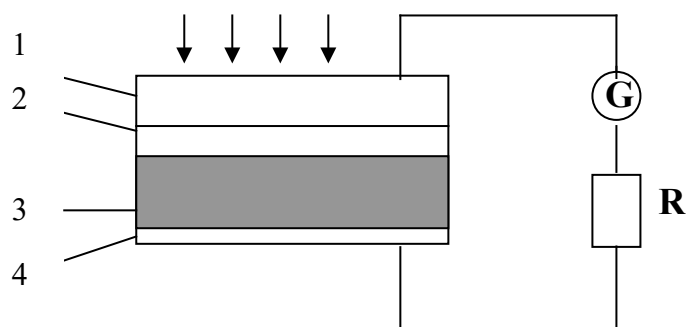


Рисунок 1

Верхній напівпрозорий електрод 1 – це дуже тонкий шар металу, нанесений розпорошенням у вакуумі на шар напівпровідника 3. При цьому між провідником та напівпровідником (у даному випадку між сріблом та сірчистим

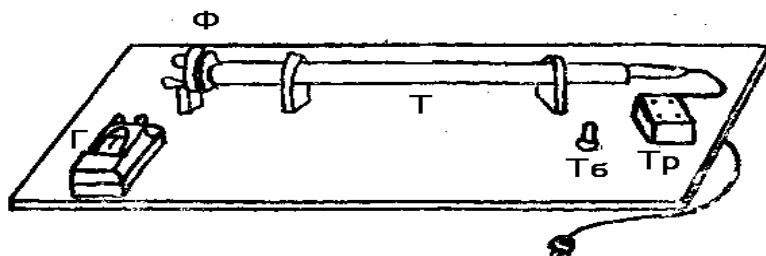
сріблом) утворюється запірний шар 2. Світло, що падає на поверхню фотоелемента, викликає рух електронів усередині фотоелемента від верхнього напівпрозорого електрода крізь запірний шар до напівпровідника та нижнього електроду. Унаслідок цього на верхньому електроді фотоелемента виникає позитивний надлишковий заряд, а на нижньому – від’ємний. Таким чином, виникає різниця потенціалів на електродах фотоелемента, і в зовнішньому колі протікає електричний струм (фотострум), величина якого нелінійно залежить від світлового потоку.

У даній роботі необхідно побудувати графік залежності фотоструму від величини світлового потоку, тобто залежність  $i = f(\Phi)$ .

### Опис установки

Фотоелемент  $\Phi$ , захищений металевою трубкою  $T$  від розсіяного світла, закріплений нерухомо на дерев’яній підставці (рисунок 2). Клеми фотоелемента з’єднані з гальванометром. Усередині металевої трубки меншого діаметра знаходиться електрична лампочка із силою світла 2 кд. Лампочка живиться від понижуючого трансформатора  $Tr$ . Металева трубка з лампочкою вставляється в захисну трубку фотоелемента. Переміщуючи трубку з лампочкою всередині трубки з фотоелементом, можна змінювати відстань  $l$  між лампочкою та фотоелементом. Мінімальна відстань від лампочки до фотоелемента  $R$  вказана на панелі установки.

Рисунок 2



### Порядок виконання роботи



1 Увімкнути трансформатор, що живить лампочку, та, переміщуючи трубку з лампочкою всередині трубки з фотоелементом, встановити стрілку гальванометра на 20-ту поділку шкали.

2 Переміщуючи трубку з лампочкою, встановити стрілку гальванометра на 18, 16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2-гу поділку шкали. Для кожного значення фотоструму необхідно знайти  $l$  шляхом додавання  $R$  до відстані, на яку висунуто трубку під час отримання нових показань гальванометра.

Усі дані досліду занести в таблицю 1.

Таблиця 1

| Кількість поділок гальванометра<br>а | Фотострум,<br>$i, A$ | Відстань від лампочки до фотоелемента,<br>$l, м$ | Освітленість,<br>$E, лк$ | Світловий потік,<br>$\Phi, лм$ |
|--------------------------------------|----------------------|--|--------------------------|--------------------------------|
| 20                                   |                      |  |                          |                                |
| 18                                   |                      |  |                          |                                |
| 16                                   |                      |  |                          |                                |
| 14                                   |                      |  |                          |                                |
| 12                                   |                      |  |                          |                                |
| 10                                   |                      |  |                          |                                |
| 8                                    |                      |  |                          |                                |
| 6                                    |                      |  |                          |                                |
| 4                                    |                      |  |                          |                                |
| 2                                    |                      |  |                          |                                |

3 Обчислити освітленість фотоелемента:

$$E = \frac{I}{l^2},$$

де  $I = 2к\delta$  – сила світла лампочки.

4 Обчислити світловий потік, що падає на фотоелемент:

$$\Phi = ES,$$

де  $S = 1,8 \text{ см}^2$  – площа поверхні фотоелемента.

5 За даними таблиці 1 побудувати графік залежності  $i = f(\Phi)$  та визначити інтегральну чутливість фотоелемента:

$$\eta = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi}.$$

### Контрольні запитання

- 1 У чому суть вентильного фотоефекту?
- 2 Пояснити механізм утворення запірного шару на межі метал-напівпровідник  $n$ -типу; метал-напівпровідник  $p$ -типу.
- 3 Що називають внутрішнім фотоефектом?
- 4 Що називають червоною границею фотоефекту?
- 5 Нарисуйте графік залежності енергії фотоелектронів від частоти при зовнішньому фотоефекті.
- 6 Як побудований сірчистосрібний фотоелемент?
- 7 За рахунок чого виникає контактна різниця потенціалів?
- 8 Де застосовуються фотоелементи?

### Звіт про виконану роботу

- 1 Величини, що вимірюються:  
 $i$  – фотострум,  $[i] = A$ ;  
 $l_0$  – відстань, на яку висувається труба,  $[l_0] = m$ .  
Величини, що обчислюються:  
 $l = l_0 + R$  – відстань між лампочкою та фотоелементом,  $[l] = m$ ;  
 $E = \frac{I}{j^2}$  – освітленість фотоелемента,  $[E] = лк$ ;  
 $\Phi = ES$  – світловий потік, що падає на фотоелемент,  $[\Phi] = лм$ .
- 2 Результати експерименту.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8.2

### Дослідження р-п-переходу в напівпровідниковому діоді

**Мета роботи:** дослідження залежності опору  $p-n$ -переходу від величини та полярності напруги; дослідження  $p-n$ -переходу як випрямляча змінного струму.

## Теоретичні відомості

Контакт двох напівпровідників, один з яких має електронну, а інший – діркову провідність, називається  $p-n$ -переходом.

На межі розподілу двох напівпровідників виникає дифузія основних носіїв струму через границю  $p-n$ -переходу: електронів з  $n$ - до  $p$ -області, а дірок у зворотному напрямку. У  $n$ -напівпровіднику внаслідок переходу електронів поблизу границі утворюється некомпенсований позитивний заряд іонізованих донорних атомів. У  $p$ -напівпровіднику утворюється від’ємний заряд нерухомих іонізованих акцепторів. Ці об’ємні заряди утворюють поблизу границі подвійний електричний шар, електричне поле якого перешкоджає руху основних носіїв струму через границю  $p-n$ -переходу. Товщина подвійного шару становить приблизно  $10^{-6} - 10^{-7}$  м, а контактна різниця потенціалів – десятки частки вольт. Носії струму при звичайних температурах не здатні здолати таку різницю потенціалів, тому рівноважний контактний шар є запірним.

Якщо на  $n$ -напівпровідник подати додатний потенціал, а на  $p$ -напівпровідник – від’ємний потенціал, то запірний шар розширюється та його опір збільшується. Через  $p-n$ -перехід тече малий струм, зумовлений неосновними носіями.

Якщо на  $n$ -напівпровідник подати від’ємний потенціал, а на  $p$ -напівпровідник – додатний, ширина запірного шару зменшується, його опір падає та основні носії рухаються через  $p-n$ -перехід, утворюючи великий струм основних носіїв. Основний струм набагато більше струму неосновних носіїв. Отже,  $p-n$ -перехід має вентильні властивості, тобто пропускає струм тільки в одному напрямку.

## Опис лабораторної установки

Постійна напруга від регульованого джерела може змінюватися від 0 до 8 В та вимірюється вольтметром з ціною поділки 1 В. Міліамперметр  $A_1$  ( $I_{ном} = 50\text{мА}$ ) використовується для

вимірювання прямого струму  $p-n$ -переходу, а міліамперметр  $A_2$  ( $I_{ном} = 5\text{мА}$ ) – для вимірювання зворотного струму діода. Схема для вимірювання прямого струму діода зображена на рисунку 1. Для вимірювання зворотного струму слід натиснути кнопку в правій верхній частині панелі лабораторного макета. При цьому змінюється полярність живлення схеми та під'єднується інший прилад  $A_2$  для вимірювання струму.

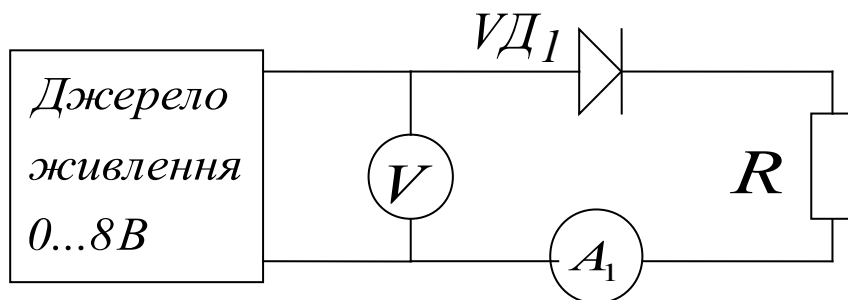
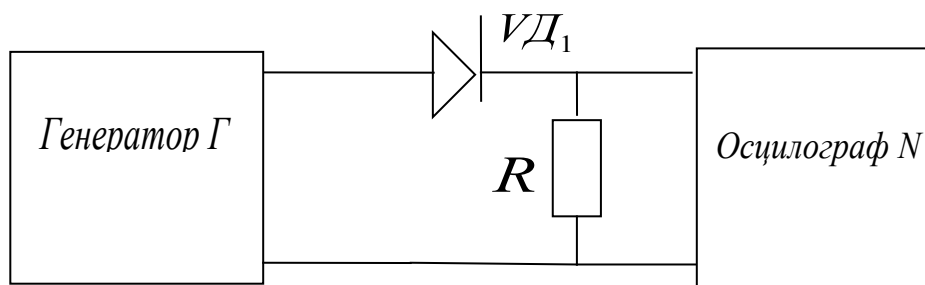


Рисунок 1

У даній схемі використовується світлодіод, який під час проходження прямого струму випромінює світло. Для обмеження прямого струму діода послідовно з ним вмикається резистор  $R = 120\text{ Ом}$ .

Для дослідження випрямних властивостей  $p-n$ -переходу тумблером на лівому боці панелі вмикають осцилограф  $N$  та на його екрані спостерігаються односторонню провідність  $p-n$ -переходу, на який подають коливання з генератора  $\Gamma$ . Схему зображено на рисунку 2.



## Порядок виконання роботи

- 1 Дослідження  $p-n$ -переходу при прямому вмиканні.

Увімкнути макет. Увімкнути схему для вимірювання прямого струму. Регулятор напруги встановити в крайнє положення, щоб напруга на вольтметрі дорівнювала нулю. Змінюючи напругу через 1 В від 0 до 8 В, виміряти силу струму в колі. Результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

| $U(B)$                        | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{np}(mA)$                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $U_R = I_{np}R$               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $U_d = U - U_R$               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $R_{np} = \frac{U_d}{I_{np}}$ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

За отриманими даними обчислити напругу на резисторі:  $U_R = I_{np}R$ , де  $R=120$  Ом.

Обчислити напругу на  $p-n$ -переході:  $U_d = U - U_R$ , де  $U$  – вхідна напруга.

Знайти прямий опір  $p-n$ -переходу  $R_{np}$  для всіх значень вхідної напруги за формулою  $R_{np} = \frac{U_d}{I_{np}}$ .

За отриманими даними побудувати графіки залежностей  $I_{np}(U_d)$  та  $R_{np}(U_d)$ .

2 Дослідження  $p-n$ -переходу при зворотному вмиканні. Натисканням кнопки увімкнути схему для вимірювання зворотного струму діода. Збільшуючи напругу через 1 В від 0 до 8 В виміряти силу зворотного струму. Результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2

| $U(B)$                 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{зв}(mA)$           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $R_{зв} = \frac{U}{I}$ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Використовуючи отримані дані, знайти значення зворотного опору  $p-n$ -переходу для всіх значень вхідної напруги. Оскільки  $R_{зв} \gg R$ , то  $R_{pd} \approx \frac{U}{I_{pd}}$ .

Побудувати графіки залежностей  $I_{зв}(U)$  та  $R_{зв}(U)$ .

3 Дослідження  $p-n$ -переходу як випрямляча змінного струму.

Увімкнути схему для спостереження змінного струму. Отримати на екрані осцилографа стійке зображення синусоїди та нарисувати її. Потім увімкнути діод та нарисувати осцилограму.

### Контрольні запитання

1 Які речовини належать до напівпровідників?

2 Що називають валентною зоною, забороненою зоною, зоною провідності?

3 Пояснити відмінності між металами, напівпровідниками та діелектриками з позицій зонної теорії.

4 Описати власну провідність напівпровідників з позицій зонної теорії.

5 Яка домішка називається донорною? Яка домішка називається акцепторною?

6 Описати домішкову провідність напівпровідників з позицій зонної теорії.

7 Як утворюється  $p-n$ -перехід та які його властивості?

8 Чим відрізняється температурна залежність опору напівпровідників від температурної залежності опору металів?

9 Які напівпровідникові прилади вам відомі та де вони застосовуються?

10 Якими квантовими числами характеризується стан електрона в атомі? Сформулювати принцип Паулі.

### Звіт про виконану роботу

1 Величини, що вимірюються:

$U$  – вхідна напруга;

$I_{np}$  – сила струму в колі при прямому вмиканні;

$I_{зв}$  – сила струму в колі при зворотному вмиканні.

Величини, що обчислюються:

а) напруга на резисторі  $U_R = I_{np}R$ ;

б) напруга на діоді  $U_d = U - U_R$ ;

- в) опір  $p-n$ -переходу при прямому вмиканні  $R_{np} = \frac{U_d}{I_{np}}$ ;
- г) опір  $p-n$ -переходу при зворотному вмиканні  $R_{ze} = \frac{U}{I_{ze}}$ .

2 Результати експерименту.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8.3

### Внутрішній фотоэффект у напівпровідниках

**Мета роботи:** дослідити залежність струму через фоторезистор від величини падаючого світлового потоку та величини прикладеної напруги.

#### Теоретичні відомості

Прилади, робота яких ґрунтується на внутрішньому фотоэффекті, називаються фотооперами або фоторезисторами.

Фоторезистор ФСД-12, який використовується в роботі, виготовлений із селеніду кадмію, який має ширину забороненої зони 1,5 еВ. Максимуму спектральної чутливості даного фоторезистора відповідає довжина хвилі електромагнітного випромінювання  $7,8 \cdot 10^{-7}$  м. Інтегральну чутливість ІЗото резистора можна оцінити відношенням числа квантів, що викликали фотоэффект, до загального числа квантів випромінювання, що потрапили на чутливу поверхню ІЗото резистора. Оскільки експериментально квантовий вихід визначити складно, інтегральну чутливість визначають як відношення величини відносної зміни опору ІЗото резистора до приросту потоку енергії випромінювання, що викликав цю зміну:

$$\eta = \frac{\Delta R_{\phi}}{R_{\phi} \cdot \Delta \Phi_n}$$

де  $R_\phi$  – опір чутливого шару фоторезистора під час опромінювання його потоком  $\Phi_n$  (визначається для середнього значення потоку в проміжку  $\Delta\Phi_n$ ).

На рисунку 1 показано залежність  $R_\phi(\Phi_n)$ .

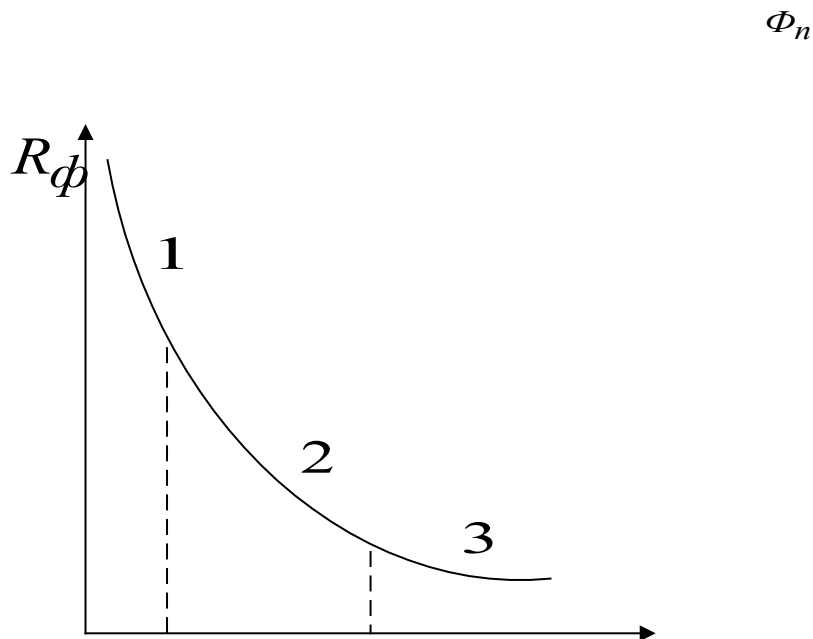


Рисунок 1

Оскільки залежність  $R_\phi$  від  $\Phi_n$  нелінійна, то інтегральну чутливість  $\eta$  фоторезистора, як правило, визначають на різних ділянках залежності, наприклад, на ділянках 1, 2, 3.

У тих випадках, коли в колі фоторезистора змінюється сила струму  $i$  (чи напруга на резисторі  $u$ ), прийнято визначати струмову чи вольтову чутливість  $\eta$  як відношення приросту струму (чи напруги) до приросту світлового потоку  $\Delta\Phi_n$ , який падає на поверхню фоторезистора, що його викликав:



$$\eta_i = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi_n}$$

Оскільки сила струму в колі фоторезистора залежить не тільки від падаючого світлового потоку, але й від напруги на фоторезисторі, введено поняття питомої чутливості  $\eta_{num}$ , яка є величиною струмової чи вольтової чутливості, що припадає на одиницю напруги:

$$\eta_{num} = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi_n \cdot u}$$

де  $u$  – напруга на фоторезисторі.

## Опис лабораторної установки та методика експерименту

Схема лабораторної установки показана на рисунку 2.

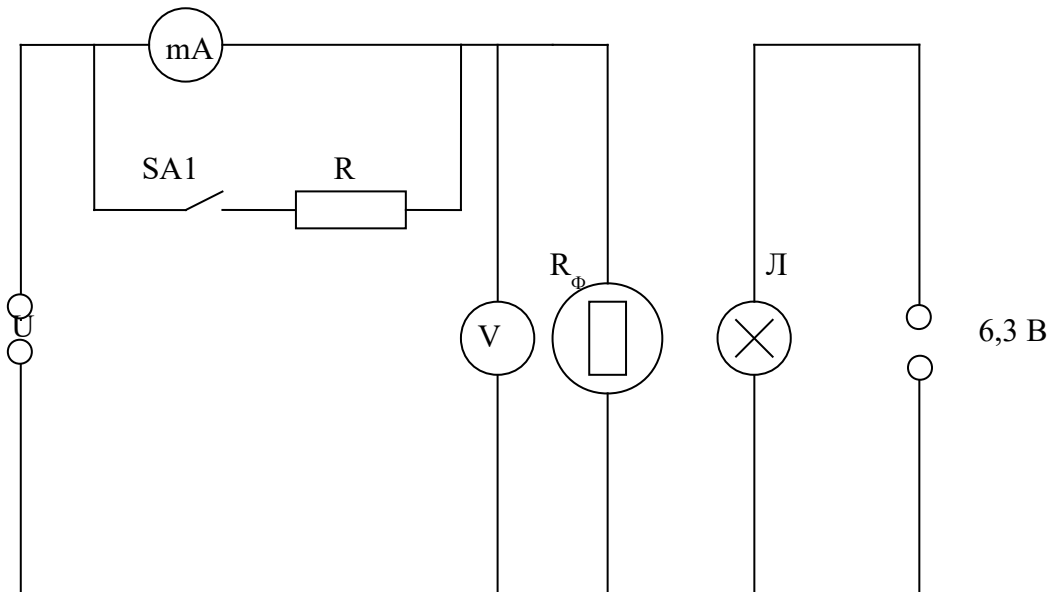


Рисунок 2

Світло від лампи розжарювання падає на фоторезистор  $R_\phi$  та змінює його опір. За допомогою вольтметра вимірюється напруга на фоторезисторі, яка може змінюватися від 0 до 10 В. Міліамперметр вимірює силу струму, що тече крізь фоторезистор. При великих падаючих світлових потоках опір  $R_{\text{ш}}$  під'єднується тумблером SA1 та максимальний струм, що

вимірюється, становить 5 мА. Падаючий світловий потік розраховується за формулою

$$\Phi_n = \frac{I \cdot S}{r^2} \cos \alpha, \quad (1)$$

де  $I$  – сила світла лампи;  $S = 28 \text{ мм}^2$  – площа чутливого до світла шару фоторезистора;  $\alpha = 0$  – кут між напрямком світлового потоку та нормаллю до чутливої до світла поверхні;  $r$  – відстань від лампи до фоторезистора, що визначається за шкалою на приладі.

Сила світла лампи

$$I = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{4\pi},$$

де  $\Phi$  – світловий потік, що випромінюється лампою;  $\omega = 4\pi$  – повний тілесний кут.

Світловий потік можна знайти, знаючи величину світлової віддачі лампи

$$H = \frac{\Phi}{P},$$

де  $P = ui$  – потужність, що споживається лампою.

Для даної лампи  $H = 6,1 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$  при  $u = 6,3 \text{ В}$ ,  $i = 0,22 \text{ А}$ ;

$$\Phi = H \cdot u \cdot i = 6,1 \cdot 6,3 \cdot 0,22 = 8,5 (\text{лм}).$$

$$\text{Сила світла лампи } I = \frac{8,5}{4 \cdot 3,14} = 0,43 \text{ кд} \dots$$

Підставляючи в (1) значення  $I$ , площі  $S$  чутливої до світла поверхні резистора, отримаємо величину падаючого світлового потоку  $\Phi_n$ :

$$\Phi_n = \frac{0,43 \cdot 28 \cdot 10^{-6}}{r^2} = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{r^2}.$$

Отже, падаючий світловий потік змінюється обернено пропорційно до квадрата відстані від фоторезистора до лампи розжарювання.

## Порядок виконання роботи

1 Під'єднати до міліамперметра шунт та виставити межу вимірювання сили струму  $i_{max} = 5mA$ .

2 Увімкнути живлення фоторезистора, встановивши напругу 10 В та живлення лампи 6,3 В.

3 Визначити силу струму в резисторі при мінімальній відстані між резистором та лампою, а потім, збільшуючи  $r$  через 1 см, зняти залежність сили струму  $i$  від падаючого світлового потоку  $\Phi_n$  за умови сталої напруги на резисторі. Світловий потік обчислити за формулою:  $\Phi_n = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{r^2}$  ( $r$  виразити в метрах).

4 Обчислити опір фоторезистора  $R_\phi$  для всіх значень сили струму за формулою:

$$R_\phi = \frac{u}{i}.$$

Дані занести в таблицю 1

Таблиця 1

| № п/п | $r$ , м | $i$ , А | $R$ , Ом | $\Phi_n$ , лм | $u$ , В |
|-------|---------|---------|----------|---------------|---------|
| 1     |         |         |          |               |         |
| 2     |         |         |          |               |         |
| 3     |         |         |          |               |         |
| 4     |         |         |          |               |         |
| 5     |         |         |          |               |         |
| 6     |         |         |          |               |         |
| 7     |         |         |          |               |         |
| 8     |         |         |          |               |         |

5 Побудувати графік залежності  $R_\phi$  від  $\Phi_n$ .

6 Розрахувати за графіком для трьох ділянок інтегральну чутливість фоторезистора

$$\eta = \frac{\Delta R_{\phi}}{R_{\phi} \cdot \Delta \Phi_n},$$

де  $R_{\phi}$  береться для середнього значення потоку в проміжку  $\Delta \Phi_n$ .

7 Побудувати графік залежності  $i$  від  $\Phi_n$ .

8 Розрахувати за графіком залежності  $i(\Phi_n)$  струмову та питому чутливість фоторезистора для трьох ділянок характеристики.

$$\eta_i = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi_n};$$

$$\eta_{\text{пит}} = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi_n \cdot u}.$$

9 Встановити лампу на відстані 4 см від фоторезистора та змінюючи вхідну напругу через 1 В (від 10 В до 0), зняти залежність сили струму  $i$  в резисторі від напруги  $u$  при сталому світловому потоці  $\Phi_n = \text{const}$ . Дані занести в таблицю 2.

Таблиця 2

| № п/п | $u, B$ | $i, A$ |
|-------|--------|--------|
| 1     | 10     |        |
| 2     | 9      |        |
| 3     | 8      |        |
| 4     | 7      |        |
| 5     | 6      |        |
| 6     | 5      |        |
| 7     | 4      |        |
| 8     | 3      |        |
| 9     | 2      |        |
| 10    | 1      |        |

10 Побудувати графік залежності струму від напруги  $i=f(u)$  при сталому світловому потоці.

## Контрольні запитання

- 1 Пояснити властивості напівпровідників з точки зору зонної теорії.
- 2 Що називають внутрішнім фотоефектом? Описати внутрішній фотоефект з позицій зонної теорії.
- 3 Чи існує червона границя внутрішнього фотоефекту?
- 4 Що називають потоком випромінювання?
- 5 Що називають фоторезистором?
- 6 Що називають інтегральною чутливістю фоторезистора?
- 7 Що називають струмовою чутливістю фоторезистора?
- 8 З якою метою під'єднують шунт до амперметра?
- 9 Як залежить величина падаючого потоку від відстані між фоторезистором та лампою?
- 10 Як залежить опір фоторезистора, сила струму у фоторезисторі при  $u = const$  від величини падаючого потоку  $\Phi_n$ ?

## Звіт про виконану роботу

1 Величини, які вимірюються:

$r$  – відстань між фоторезистором та лампою,  $[r] = \text{Ом}$ ;

$i$  – сила струму у фоторезисторі,  $[i] = \text{А}$ ;

$u$  - напруга на фоторезисторі,  $[u] = \text{В}$ .

Величини, що обчислюються:

падаючий світловий потік  $\Phi_n$ :  $\Phi_n = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{r^2}$ ;  $[\Phi_n] = \text{лм}$ ;

опір фоторезистора  $R_\phi$ :  $R_\phi = \frac{u}{i}$ ,  $[R_\phi] = \text{Ом}$ ;

інтегральна чутливість фоторезистора  $\eta$ :  $\eta = \frac{\Delta R_\phi}{R_\phi \cdot \Delta \Phi_n}$ ,

$[\eta] = \text{лм}^{-1}$  ;

струмова чутливість фоторезистора  $\eta_i$ :  $\eta_i = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi_n}$ ,  $[\eta_i] = \frac{\text{А}}{\text{лм}}$ ;

питома чутливість фоторезистора  $\eta_{num}$  :  $\eta_{num} = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi_n \cdot u}$ ,

$[\eta_{num}] = \frac{\text{А}}{\text{лм} \cdot \text{В}}$ .

## 2. Результати експерименту.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8.4

#### Визначення сталої термопары та термо-ЕРС

**Мета роботи:** визначення термо-ЕРС та сталої термопары.

#### Теоретичні відомості

Пристрій, який складається з послідовно з'єднаних провідників, виготовлених з різнорідних металів, називається термопарою. Термопары використовуються для вимірювання температури. Для цього один контакт, наприклад ВС, підтримують при сталій температурі  $T_{ВС}$ , а інший (контакт ДА) вміщують в те середовище, температуру якого  $T_{ДА}$  слід виміряти (рисунок 1).

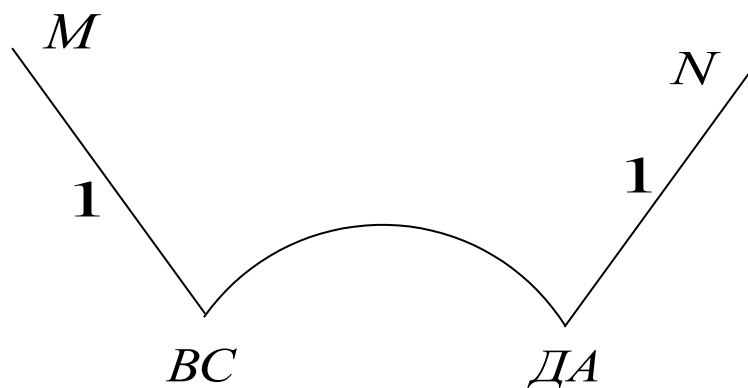


Рисунок 1

У такому колі виникає термо-ЕРС, яка дорівнює

$$\varepsilon = \frac{1}{e} \{ [W_{F1}(T_{BC}) - W_{F2}(T_{BC})] + [W_{F2}(T_{AD}) - W_{F1}(T_{AD})] \},$$

де  $W_{F1}$  – енергія Фермі металу 1;

$W_{F2}$  – енергія Фермі металу 2.

При достатньо малій різниці температур контактів дану формулу можна подати у спрощеному вигляді

$$\varepsilon = \alpha(T_2 - T_1),$$

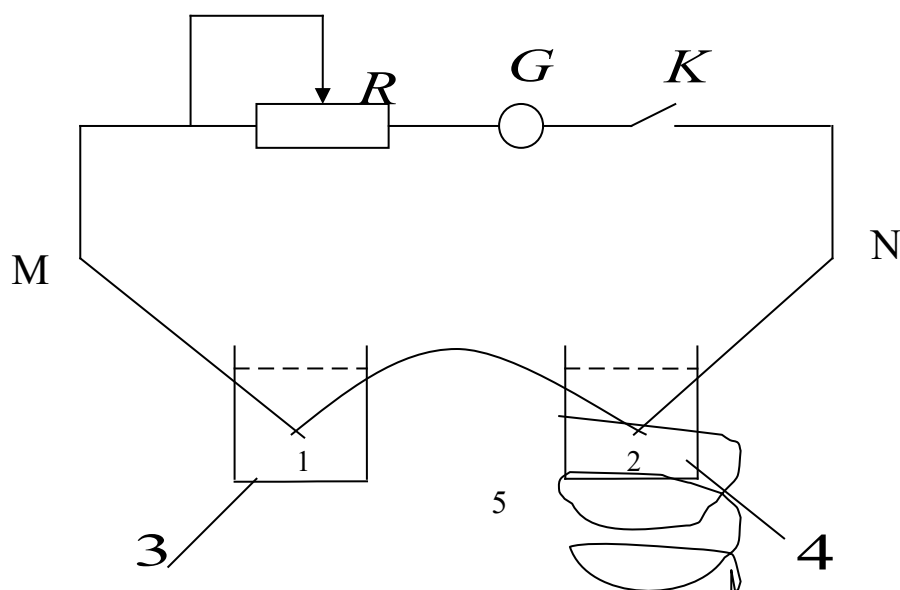
де  $\alpha$  – стала термопар,  $T_1 = T_{DA}$ ;  $T_2 = T_{BC}$ .

Найбільш часто вживаними є контакти мідь-константан, хромель-алюмель, хромель-копель.

### Опис установки

Для визначення термо-ЕРС використовується установка, принципова електрична схема якої зображена на рисунку 2.

Послідовно з термопарою вмикається магазин опорів  $R$  та гальванометр  $G$ . Один контакт термопар 1 вміщується в посудину з водою при кімнатній температурі, а інший – в посудину з водою 4, яка підігривається електроплиткою 5. Оскільки контакти  $M$  та  $N$  знаходяться при одній і тій самій температурі, то на величину термо-ЕРС вони не впливають.



1,2 – контакти термопар; 3,4 – посудини з водою;

5 – спіраль електроплитки

Рисунок 2

Для замкнутого кола з термопарою закон Ома

$$\varepsilon = I(R_0 + R),$$

де  $\varepsilon$  – термо-ЕРС;  $I$  – сила струму;  $R_0$  – опір всього кола, крім додаткового опору.

При одній і тій самій різниці температур  $T_2 - T_1$  контактів 1 і 2 при різних додаткових опорах  $R_1$  та  $R_2$  у колі термопари будуть протікати відповідні струми  $I_1$  та  $I_2$ .

На основі цих дослідів складаємо систему рівнянь, за якою можна розрахувати термо-ЕРС:

$$\begin{cases} \varepsilon = I_1(R_0 + R_1) \\ \varepsilon = I_2(R_0 + R_2) \end{cases}.$$

Звідки

$$\varepsilon = \frac{R_2 - R_1}{I_1 - I_2} I_1 I_2.$$

Визначимо сталу термопари, використовуючи формулу

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{T_2 - T_1} = \frac{\varepsilon}{t_2 - t_1},$$

де  $t_1, t_2$  – температури контактів термопари за шкалою Цельсія.

### Порядок виконання роботи

- 1 Виміряти температуру  $t_1$  води в посудині.
- 2 Увімкнути електроплитку.
- 3 При наближенні температури води  $t_2$  до  $40^\circ\text{C}$  вимкнути електроплитку.
- 4 При температурі  $t_2$  та опорі  $R_1$  записати показання гальванометра  $I_1$ .
- 5 Встановити опір  $R_2$ , при тій самій температурі виміряти струм  $I_2$  в колі термопари.
- 6 Повторити операції 3-5 для інших значень температури  $t_2$ .



7 Розрахувати при кожній температурі величину термо-ЕРС та сталу термопару.

8 Результати вимірювань та обчислень занести в таблицю 1.

Таблиця 1

| № п/п | $t_2, \text{ }^\circ\text{C}$ | $R_1, \text{ Ом}$ | $I_1, \text{ мА}$ | $R_2, \text{ Ом}$ | $I_2, \text{ мА}$ | $\varepsilon, \text{ В}$ | $\alpha, \frac{\text{В}}{\text{К}}$ |
|-------|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 1     | 40                            |                   |                   |                   |                   |                          |                                     |
| 2     | 60                            |                   |                   |                   |                   |                          |                                     |
| 3     | 80                            |                   |                   |                   |                   |                          |                                     |

9 Побудувати графік залежності термо-ЕРС від різниці температур  $t_2 - t_1$ . Розрахувати середнє значення сталої термопару.

### Контрольні запитання

1 Як виникають внутрішня та зовнішня контактні різниці потенціалів?

2 Від чого залежить внутрішня контактна різниця потенціалів?

3 Що називають термопарою?

4 Чому дорівнює термо-ЕРС?

5 Яким є енергетичний спектр електронів у металі?

6 Який зв'язок між енергетичним спектром електронів у кристалі та енергетичним спектром електронів в ізольованому атомі?

7 У чому зміст принципу Паулі?

### Звіт про виконану роботу

1 Величини, що вимірюються:

$t_1$  – кімнатна температура;  $[t_1] = \text{К}$ ;

$t_2$  – температура контакту,  $[t_2] = \text{К}$ ;

$I_1, I_2$  сила струму в колі термопару,  $[I_1, I_2] = \text{А}$ .

Величини, що обчислюються:

$\varepsilon$  -термо-ЕРС:  $\varepsilon = \frac{R_2 - R_1}{I_1 - I_2} I_1 I_2$ ,  $[\varepsilon] = \text{В}$ ;

$\alpha$  – стала термопар:  $\alpha = \frac{\varepsilon}{t_2 - t_1}$ ,  $[\alpha] = \frac{B}{K}$ .

2 Результати експерименту.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8.5

### Дослідження залежності опору металів від температури

**Мета роботи:** визначення температурної залежності опору металів з позицій класичної та квантової теорії провідності.

### Теоретичні відомості

Квантова теорія металів внесла істотні зміни в класичні уявлення про їхню провідність. Як відомо, електричний струм у металах є результатом упорядкованого руху електронів. Цей рух виникає під дією електричного поля, створюваного в металі джерелом струму. Для того, щоб електрони почали упорядковано рухатися під дією електричного поля, вони повинні змінити свою енергію, тобто "прийняти" енергію від джерела струму. При звичайних напругах електрони приймають невелику енергію  $\sim 0,01$  еВ. З квантової точки зору, електрон може прийняти невелику енергію лише в тому випадку, якщо існують близькі енергетичні рівні, не зайняті іншими електронами. Тоді, одержавши енергію, електрон буде переходити на ці вільні рівні зони провідності, і виникає електричний струм – рух електронів у напрямку, протилежному напрямку зовнішнього електричного поля.

Коефіцієнт питомої провідності, відповідно до квантової теорії, обчислюється за формулою

$$\sigma = \frac{n_0 e^2 \bar{\lambda}(F)}{m u(F)},$$

де  $\bar{\lambda}(F)$  – середня довжина вільного пробігу електрона, що знаходиться на рівні Фермі, м:

$$\bar{\lambda}(F) = \frac{E \cdot d}{\pi \cdot n_0 k T},$$

де  $E$  – модуль Юнга,  $\text{н/м}^2$ ;

$d$  – період кристалічних ґрат,  $\text{м}$ ;

$n_0$  – число атомів в одиниці об'єму,  $1/\text{м}^3$ ;

$k$  – постійна Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К. Для одновалентних металів,  $\frac{\text{Ом}}{\text{м}}$ ,

$$\sigma = \frac{e^2 E d}{m \bar{u}(F) \pi R T},$$

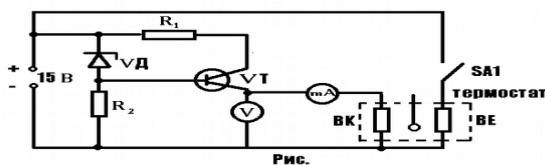
$\bar{u}(F)$  – середня швидкість теплового руху електрона,  
 $\bar{u}(F) \approx 1,5 \text{ м/с}$ .

Середня швидкість  $\bar{u}(F)$  практично не залежить від температури, тому що зі зміною температури рівень Фермі залишається майже незмінним.

У класичній теорії вільні електрони розглядаються як класичний електронний газ, частки якого зіштовхуються з позитивними іонами кристалічних ґрат. У цьому, з класичної точки зору, полягає причина електричного опору металів. У квантовій теорії рух електронів крізь ґрати металу розглядається як поширення дебройлівських електронних хвиль. Характер взаємодії цих хвиль з іонами ґрат якісно відмінний від простого зіткнення електронів з іонами. Електронні хвилі розсіюються на іонах кристалічних ґрат. Новий погляд на характер взаємодії електронів із ґратами металу привів до нового тлумачення природи опору. При поширенні електронних хвиль крізь ґрати металу відбувається розсіювання, подібне до розсіювання світла (електромагнітні хвилі) мутним середовищем.

Зовсім правильні ідеальні кристалічні ґратки, у вузлах яких знаходяться нерухомі іони, не розсіює електронні хвилі. У таких ґратах відсутні центри розсіювання – неоднорідності, спотворювання правильності ґрат, що перебільшують за розмірами довжину дебройлівських хвиль. Потік електронних хвиль повинний проходити крізь такі ґрати безперешкодно. Подібні ґрати не чинили б ніякого опору руху електронів. Електричний опір металу дорівнював би нулю, якби іони ґрат металу були нерухомі.

Однак добре відомо, що при будь-якій температурі частки твердого тіла у вузлах ґрат роблять коливання. Хаотичні теплові коливання часток у вузлах кристалічних ґрат створюють у них флуктуації щільності. Справді, за рахунок теплових коливань відстані між частками в ґратах, а отже, густина речовини, можуть бути неоднаковими в сусідніх малих об'ємах усередині металу. Результатом теплових коливань часток у вузлах ґрат є поява лінійних неоднородностей щільності. Лінійні розміри областей у металі, де виявляються ці неоднорідності, значно більші, ніж довжина дебройлівських хвиль. Вільні електрони, що рухаються крізь ґрати металу, розсіюються на теплових коливаннях іонів. Це є причиною електричного опору чистих металів. Електричний опір металів є результатом розсіювання електронів провідності на фононах – теплових коливаннях ґрат.



З підвищенням температури зростає розсіювання електричних хвиль на теплових коливаннях ґрат і відбуваються зменшення середньої довжини вільного пробігу електронів. При кімнатних температурах  $\lambda(F)$  обернено пропорційна першому степеню температури. Це приводить до добре підтвердженої на досвіді залежності коефіцієнта питомої провідності від температури ( $\sigma_{кв} \sim \frac{1}{T}$ ); ( $\rho \sim T$ ).

### Опис лабораторної установки

Схему лабораторної установки показано на рисунку 1.

Резистор ВК вміщений в термостат з нагрівачем ВЕ, який підключений до джерела живлення. Величина струму в колі дорівнює 10 мА та підтримується сталою стабілізатором.

Останній складається з стабілітрона VD, транзистора VT та резисторів  $R_1$  та  $R_2$ .

### Порядок виконання роботи

1 Ввімкнути живлення тумблером SA1.

2 Визначити та занести в таблицю значення падінь напруги на резисторі BK під час зміни температури через кожні  $5^\circ\text{C}$ . Вимірювання провести як під час нагрівання, так і під час охолодження резистора BK. Знайти середнє значення  $\bar{U}$  та занести в таблицю 1.

$$I = 10 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

Таблиця 1

| $t, ^\circ\text{C}$          |                  | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |
|------------------------------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $U, \text{В}$                | Нагрівання       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| $U, \text{В}$                | Охолодження      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| $\bar{U}, \text{В}$          | Середнє значення |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| $R = \frac{U}{I}, \text{Ом}$ |                  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

3 За даними таблиці обчислити опір резистора BK для всіх значень температури. Результати занести в таблицю 1.

4 Побудувати графік  $R = f(T)$ .

5 За формулою  $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_2 t_2 - R_1 t_1}$  та даними таблиці 1 обчислити температурний коефіцієнт опору.

6 Використовуючи дані таблиці 2, за знайденим значенням  $\alpha$  ідентифікувати метал резистора.

Таблиця 2

| Метал     | Температурний коефіцієнт опору<br>$\alpha, 10^{-3} \text{K}^{-1}$ | Модуль Юнга<br>$E, 10^{10} \frac{\text{H}}{\text{м}^2}$ | Період кристалічних грат<br>$d, 10^{-10} \text{м}$ | Кількість атомів в елементарному об'ємі<br>$n_0, 10^{28} \text{м}^{-3}$ |
|-----------|---|---|--|---|
| Залізо    | 6,2   | 6,9   | 2,87   | 8,5   |
| Марганець | 0,01  | 16,3  | 2,15   | 8,0   |

|                |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|
| Латунь         | 1,6  | 9,8  | 3,06 | 7,84 |
| Мідь           | 4    | 12,3 | 3,61 | 8,45 |
| Константа<br>н | 0,01 | 12,4 | 4,47 | 6,96 |
| Ніхром         | 0,4  | 14,2 | 3,12 | 9,39 |
| Нікель         | 5,4  | 20,5 | 3,52 | 9,14 |
| Олово          | 4,4  | 10,7 | 6,49 | 3,62 |

### Контрольні запитання

- 1 Пояснити наявність опору металів з позицій класичної теорії.
- 2 Пояснити наявність опору металів з точки зору квантової теорії.
- 3 Що називають хвилею де Бройля?
- 4 Що називають середньою довжиною вільного пробігу?
- 5 Що називають питомою провідністю? Від яких параметрів вона залежить?
- 6 Як пояснити залежність опору металів від температури з класичної точки зору?
- 7 Як пояснити залежність опору металів від температури з точки зору квантової теорії?
- 8 Розповісти про провідники з позицій зонної теорії провідності.
- 9 Чим відрізняється спектр електронів у кристалі від спектра у відокремленому атомі?
- 10 Чому середня швидкість теплового руху електронів не залежить від температури?
- 11 Сформулювати принцип Паулі.
- 12 Побудувати та пояснити залежність енергії Фермі від температури.

### Звіт про виконану роботу

1 Величини, що вимірюються:

$U_{нагрів}$  – напруга при нагріванні опору,  $[U_{нагрів}] = B$ .

$U_{охолодж}$  – напруга при охолодженні опору,  $[U_{охолодж}] = B$ .

Величини, що обчислюються:

а)  $\bar{U} = \frac{U_{\text{нагрів}} + U_{\text{охолодж}}}{2}$  – середнє значення напруги між значеннями напруги під час нагрівання та охолодження,  $[\bar{U}] = B$ ;

б)  $R = \frac{U}{I}$ ,

де  $R$  – опір провідника визначається за законом Ома;

в)  $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_2 t_2 - R_1 t_1}$  – термічний коефіцієнт опору,  $[\alpha] = \frac{I}{K}$ ;

г)  $\bar{\lambda} = \frac{Ed}{\pi n_0 k T}$  – середня довжина вільного пробігу електронів,  $[\bar{\lambda}] = m$ ;

д)  $\sigma = \frac{n_0 e^2 \bar{\lambda}(F)}{m \cdot u(F)}$  – коефіцієнт питомої провідності,  $[\sigma] = \frac{Cm}{m}$ ;

2 Результати експерименту.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8.6

**Залежність електричної провідності напівпровідників від температури**

**Мета роботи:** експериментально дослідити залежність опору напівпровідника від температури.

### Теоретичні відомості

Залежність електропровідності напівпровідників від температури використовується в терморезисторах. Матеріалом для виготовлення терморезисторів, як правило, є суміші окислів сульфідів, нітридів та карбідів металів, які мають напівпровідникові властивості.

Основною характеристикою терморезистора є температурна залежність його опору, хід якої збігається з ходом температурної залежності питомого опору напівпровідника, з якого виготовлений терморезистор. У робочому діапазоні температур ця залежність достатньо точно визначається співвідношенням:

$$R_T = A e^{\frac{\varepsilon_g}{2kT}},$$

$$\sigma_T = A' e^{-\frac{\varepsilon_g}{2kT}}$$

де  $R_T$  – опір терморезистора при температурі  $T$ ;

$A, A'$  – величина, яка залежить від матеріалу та геометричних розмірів терморезистора.

Логарифмуючи попередні формули, отримаємо:

$$\ln R_T = \ln A + \frac{\varepsilon_g}{2kT},$$

$$\ln \sigma_T = \ln A' - \frac{\varepsilon_g}{2kT}.$$

В електрон-вольтах  $\frac{1}{2k} = 5,8 \cdot 10^3 \frac{eB}{K}$ , тоді

$$\ln R_T = \ln A + \frac{5,8 \cdot 10^3}{T} \varepsilon_g,$$

$$\ln \sigma_T = \ln A' - \frac{5,8 \cdot 10^3}{T} \varepsilon_g.$$

Якщо побудувати графік залежності  $\ln \sigma = f\left(\frac{5,8 \cdot 10^3}{T}\right)$ , то він буде мати вигляд, показаний на рисунку 1.

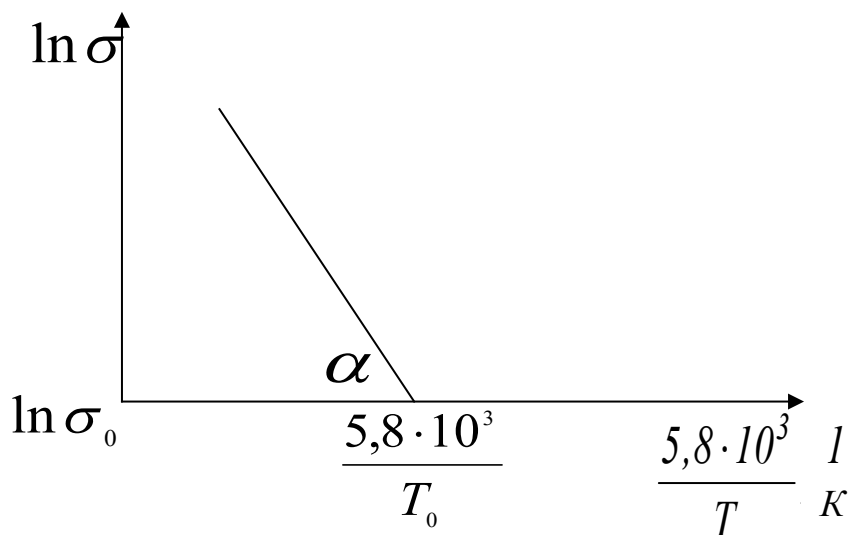


Рисунок 1

Тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис дорівнює ширині забороненої зони  $\varepsilon_g$ , яка виражена в електрон-вольтах:



$$\varepsilon_g = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta \left( \frac{5,8 \cdot 10^3}{T} \right)} = \frac{\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1}{5,8 \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

## Опис лабораторної установки

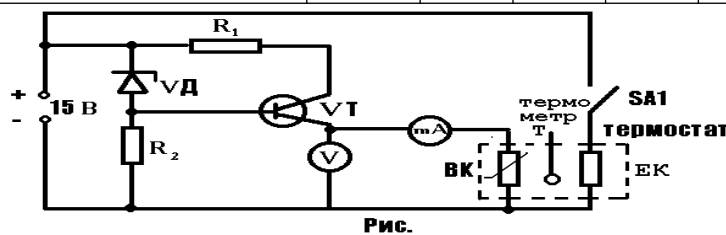
Германієвий напівпровідник ВК уміщений в термостат з нагрівачем ЕК, який під'єднується до джерела живлення вимикачем SA1. Величина струму в колі ВК під час зміни опору ВК, яке викликане його нагріванням, підтримується стабільною стабілізатором. Стабілізатор струму складається зі стабілізатора VD, трансформатора VT та резисторів  $R_1$  і  $R_2$  (рисунок 2).

## Порядок виконання роботи

1 Увімкнути живлення тумблером SA1. Значення початкової температури та напруги на термоопорі ВК занести в таблицю 1.

Таблиця 1

| $t, ^\circ\text{C}$                                      | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Нагрівання $U_1, \text{В}$                               |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Охолодження $U_2, \text{В}$                              |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Середнє $U_{\text{сеп}}, \text{В}$                       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| $\sigma = \frac{I}{U_{\text{сеп}} \cdot l}, \text{СМ/М}$ |    |    |    |    |    |    |    |    |    |



2

Рисунок 2 Визначити та занести в таблицю 1 значення падіння напруги  $U_1$  та  $U_2$  на термоопорі при зміні температури через кожні  $5^\circ\text{C}$ .

Провести вимірювання як під час нагрівання, так і під час охолодження.

3 За даними таблиці 1 обчислити середнє значення падіння напруги на термоопорі  $U_{сер}$  та його провідність  $\sigma$  для всіх значень температури. Результати занести в таблицю 1. Вважати  $l = 1\text{см}$ .

4 Обчислити значення  $T, \frac{5,8 \cdot 10^5}{T}, \ln \sigma$  для всіх температур. Результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2

|   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| T, К                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\frac{5,8 \cdot 10^3}{T}, \frac{1}{K}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\ln \sigma$                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

За даними таблиці 2 побудувати графік залежності  $\ln \sigma = f\left(\frac{5,8 \cdot 10^3}{T}\right)$ .

5 За графіком залежності  $\ln \sigma = f\left(\frac{5,8 \cdot 10^3}{T}\right)$  визначити ширину забороненої зони германію в електрон-вольтах

$$\Delta \varepsilon = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta(\ln \sigma)}{\Delta\left(\frac{5,8 \cdot 10^3}{T}\right)} = \frac{\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1}{5,8 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}$$

6 Визначити концентрацію електронів провідності при температурі  $70^\circ\text{C}$  з формули

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{n_2}{n_1},$$

де  $n_1 = 2,4 \cdot 10^{19} \text{м}^{-3}$  – концентрація електронів провідності при температурі  $T_1 = 300\text{K}$ ;  $n_2$  при температурі  $T_2 = 343\text{K}$ . Значення  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  взяти з таблиці 1.

### Контрольні запитання

1 Що називають рухливістю носіїв струму? Як залежить рухливість носіїв від температури?

2 Пояснити хід залежності логарифма концентрації носіїв від зворотної температури.

3 Що називають власною та домішковою провідністю?

4 Як пояснити наявність ділянки домішкового вичерпання?

5 Пояснити зміну провідності напівпровідника з ростом температури.

6 Що характеризує тангенс кута нахилу  $\alpha$  ?

7 Що називають терморезистором?

### **Звіт про виконану роботу**

1 Величини, що вимірюються:

$U_1$  – напруга при нагріванні опору,  $[U_1] = B$ .

$U_2$  – напруга при охолодженні опору,  $[U_2] = B$ .

Величини, що обчислюються

а)  $U_{сер} = \frac{U_1 + U_2}{2}$  – середнє значення напруги між значеннями напруги під час нагрівання та охолодження,  $[U_{сер}] = B$ ;

б)  $\sigma = \frac{I}{U_{сер} \cdot l}$ ,

де  $\sigma$  -провідність.  $[\sigma] = C_m$ .

в)  $\ln \sigma$  логарифм провідності;

г) абсолютна температура  $T = t(^{\circ}C) + 273$ .  $[T] = K$

д)  $\frac{5,8 \cdot 10^5}{T}$ ;  $\left[ \frac{I}{K} \right]$

2 Результати експерименту.