

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторної роботи
«Вимірювання електропровідності чотиризондовим методом»
з навчальної дисципліни
«Основи термоелектрики
та її застосування»
для студентів усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 3 від 30.10.2025 р.

Харків
НТУ «ХПІ»

2025

Методичні вказівки до лабораторної роботи «Вимірювання електропровідності чотиризондовим методом» з навчальної дисципліни «Основи термоелектрики та її застосування» для студентів усіх форм навчання / уклад.: О. І. Рогачова, К. В. Мартинова. – Харків: НТУ «ХП», 2025. – 13 с.

Укладачі: О. І. Рогачова
К. В. Мартинова

Рецензент проф. С.В. Малихін

Кафедра фізики

ВСТУП

Дослідження електричних властивостей матеріалів є одним із ключових напрямів сучасної фізики твердого тіла та основою термоелектричного матеріалознавства. Визначення електропровідності матеріалів є однією з базових задач цієї галузі, оскільки дозволяє зробити висновки про переважні механізми провідності, а також про концентрацію та рухливість носіїв заряду, наявність у кристалі домішок і дефектів, а також оцінити придатність матеріалів для практичного використання.

Перевага чотиризондового методу для вимірювання електропровідності полягає в його високій точності і універсальності. Він не потребує виготовлення омичних контактів на поверхні чи спеціальної геометрії зразка, тому може бути використаний для дослідження зразків різної форми, тонких плівок і матеріалів із високим опором.

У ході лабораторної роботи студенти мають можливість на практиці ознайомитись з конструкцією експериментальної установки для чотиризондового методу вимірювання електропровідності, експериментально визначити величину електропровідності різних матеріалів (металів, напівпровідників, діелектриків). Це сприяє глибшому розумінню транспортних властивостей твердих тіл.

Таким чином, робота має як навчальне, так і практичне значення: студенти опановують методику вимірювань, навчаються аналізувати результати, проводити статистичну обробку даних. З іншого боку, розуміння електронних властивостей матеріалів різних типів формує у студентів фундамент для подальшого вивчення термоелектричних явищ у твердих тілах та їх практичного застосування.

Мета роботи – опанування чотиризондового методу вимірювання електропровідності твердих тіл за кімнатної температури.

Короткі теоретичні відомості

Для визначення електропровідності σ розрізняють контактні та безконтактні методи.

У контактних методах на поверхні зразка створюються металеві контакти, через два з яких пропускають струм I . Між цією чи іншою парою контактів вимірюють падіння напруги $U = \rho \cdot I \cdot F$, де коефіцієнт F залежить від форми і розмірів зразка і контактів. Значення F визначають теоретично. За результатами вимірювання I і U обчислюють питомий опір ρ . Значення електропровідності визначають як $\sigma = 1/\rho$.

Найпростішим методом такого типу є визначення ρ за повним опором зразка. Якщо зразок має форму паралелепіпеда, на торці якого нанесені омичні контакти, то справедливе співвідношення:

$$\frac{U}{I} = R = \rho \frac{a}{S}, \quad (1)$$

де R – опір зразка; a – довжина; S – площа поперечного перерізу. Тут функція F має найпростіший вигляд $F = \frac{a}{S}$. Вимірявши окремо U і I , або одразу R , наприклад, за допомогою моста опорю, за формулою (1) можна обчислити питомий опір ρ , що не викликає труднощів у разі зразків із середнім значенням ρ ($\rho = 10^{-2} — 10^6$ Ом·см) і низькоомних зразків з $\rho < 10^{-2}$ Ом·см.

Для низькоомних зразків значення опорю може бути співмірним за величиною з опором струмопідвідних проводів, що необхідно враховувати. При вимірюваннях на високоомних зразках ($\rho \geq 10^6$ Ом·см), спосіб визначення σ , що розглядається, може бути ускладнений наявністю емнісного струму, поляризаційними ефектами і поверхневими витоками.

Біля межі розділу напівпровідника і металу може утворюватися запірний шар, концентрація носіїв заряду в якому менша, ніж в об'ємі напівпровідника. Такий шар матиме підвищений опір. Умова осібності контакту передбачає відсутність запірного шару або будь-якого іншого шару із підвищеним опором.

Концентрація носіїв заряду в напівпровіднику однакова у всьому зразку, аж до межі металом-напівпровідник. У разі наявності

антизапірного шару вона може дещо зростати. Опір такого шару менший, ніж опору шару такої ж товщини в об'ємі напівпровідника. Проте, оскільки товщина антизапірного шару значно менша за довжину зразка, його внеском в загальний опір зразка можна знехтувати. Таким чином, при омичному контакті опір шару будь-якої товщини поблизу межі метал-напівпровідник не перевищує опір шару такої ж товщини в об'ємі напівпровідника. Протікання струму через контакт не змінює концентрацію носіїв заряду в напівпровіднику.

Реалізація розглянутих методів вимірювання σ потребує створення на зразку омичних контактів. Якщо ці контакти мають підвищений опір, отримані значення σ виявляються заниженими. Такого недоліку позбавлені зондові методи вимірювання σ .

Двезондовий метод передбачає нанесення точкових контактів на торці зразка і встановлення на поверхні двох точкових зондів, розташованих на відстані l один від одного. Різновидом цього методу є однозондовий метод, при якому одна з клем потенціометра з'єднується безпосередньо зі струмопідвідним контактом.

Розглянуті методи вимірювання σ потребують зразків правильної та чітко визначеної геометричної форми. Однак на практиці часто виникають ситуації, коли цю умову не можна виконати – наприклад, при визначенні електропровідності матеріалу в різних ділянках напівпровідникового злитка або визначити σ матеріалу в пластині неправильної геометричної форми.

Такі задачі призвели до розвитку спеціальних методів визначення σ , які не висувають суворих вимог до геометрії зразка. Серед них найбільш поширеним є чотиризондовий метод. Його переваги полягають не лише у високій точності, а й у тому, що для його застосування не потрібно створення омичних контактів із зразком. Метод дозволяє вимірювати електропровідність як об'ємних зразків різної форми і розмірів, так і тонких шарів напівпровідникових структур.

Єдиною вимогою до форми зразка є наявність пласкої поверхні, лінійні розміри якої мають перевищувати лінійні розміри системи зондів.

Теорія методу

Розглянемо теоретичні засади чотиризондового методу вимірювання σ для зразка, який можна моделювати як напівнескінчений об'єм, обмежений пласкою поверхнею.

На рис. 1 наведено схематичне зображення вимірювальної головки. На пласкій поверхні зразка вздовж прямої лінії розміщені чотири металевих зонди з малою площиною зіткнення, відстань між якими l_1 , l_2 і l_3 . Через два зовнішні зонди 1 і 4 пропускають електричний струм I_{14} , на двох внутрішніх зондах 2 і 3 вимірюють різницю потенціалів U_{23} . За значеннями I_{14} та U_{23} можна визначити питомий опір зразка.

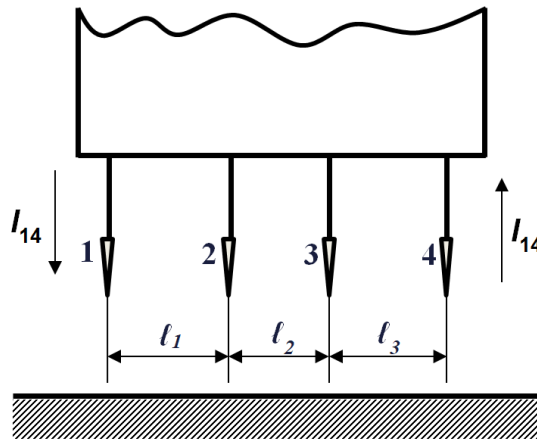


Рисунок 1 – Схематичне зображення чотиризондової вимірювальної головки у випадку лінійного розташування зондів

Розглянемо випадок лінійного розташування зондів. Припущення, на яких ґрунтується чотиризондовий метод вимірювання σ :

- 1) зонди розташовані на пласкій поверхні однорідного ізотропного зразка напівнескінченного об'єму;
- 2) зонди мають контакти з поверхнею зразка в точках, які розташовані вздовж прямої лінії;
- 3) інжекція носіїв заряду в об'ємі зразка відсутня.

Відповідно до принципу суперпозиції, електричний потенціал у будь-якій точці зразка дорівнює сумі потенціалів, створюваних струмом кожного зонда. При цьому потенціал вважають додатнім для струму, що входить у зразок (зонд 1), і від'ємним – для струму, який виходить зі зразка

(зонд 4). Для системи чотирьох зондів, розташованих на відстанях l_1 , l_2 і l_3 один від одного, потенціали вимірювальних зондів 2 та 3 визначаються як:

$$U_2 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2 + l_3} \right); \quad (2)$$

$$U_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{l_1 + l_2} - \frac{1}{l_3} \right). \quad (3)$$

Різниця потенціалів:

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I_{14}\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2 + l_3} - \frac{1}{l_1 + l_2} + \frac{1}{l_3} \right). \quad (4)$$

Звідси питомий опір зразка:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_3} - \frac{1}{l_2 + l_3} - \frac{1}{l_1 + l_2}} \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}}. \quad (5)$$

І питома провідність:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I_{14}}{2\pi \cdot U_{23}} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_3} - \frac{1}{l_2 + l_3} - \frac{1}{l_1 + l_2} \right). \quad (6)$$

Якщо відстані між зондами однакові, тобто $l_1 = l_2 = l_3 = l$, то:

$$\rho = 2\pi l \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}}, \quad \sigma = \frac{I_{14}}{U_{23}} \cdot \frac{1}{2\pi l}. \quad (7)$$

Система з чотирьох зондів конструктивно оформлюється у вигляді чотиризондової головки з фіксованою відстанню між зондами. Кут заточування вістря зонда становить 45–150°. Чотиризондову головку кріплять до маніпулятора, за допомогою якого зонди встановлюються на поверхні зразка. Зонди притискаються до поверхні із силою до 2 Н. В якості матеріалу для зондів використовують тверді метали і сплави.

Похибка вимірювання σ чотиризондовим методом визначається як складовими похибки величин, які входять у формулу, так і низкою експериментальних чинників. До основних джерел похибки належать розмір контактної майданчика зонда, опів контактів, нестабільність

температури зразка, наявність термо-е.р.с., а також вплив освітленості зразка. Додатковим джерелом може бути відмінність у відстанях між зондами (Δx_i) веде до похибки виміру σ . Якщо значення Δx_i відомі, їх можна використовувати для корекції отриманого значення σ .

Оскільки напівпровідники мають відносно високий температурний коефіцієнт опору, то при вимірюваннях за рахунок протікання струму через зразок можливо не тільки локальне нагрівання, але й загальне підвищення температури зразка. Для мінімізації нагріву зразка необхідно обирати робочий струм якомога меншим, підтримуючи при цьому сталу температуру зразка. Водночас робочий струм має бути достатнім для забезпечення необхідної точності вимірювань.

Вимірювання різниці потенціалів проводять для двох протилежних напрямків струму, а отримані значення усереднюють, що дозволило виключити поздовжню складову термо-е.р.с., що виникає на зразку внаслідок градієнта температури. Зменшення робочого струму водночас знижує ефект модуляції провідності зразка, викликаний інжекцією носіїв заряду при протіканні струму.

Якщо напруга на ділянці зразка вимірюється компенсаційним методом, і в момент вимірювання струм через зонди дорівнює нулю, вплив опору зондів на значення σ виключається. Проте така ситуація є ідеалізованою. У реальному експерименті будь-який фіксує «нульовий» струм з певною похибкою, що визначається мінімальним струмом $i_{r \min}$, який він може зареєструвати. Щоб опори зондів ($R_{31} + R_{32}$) не впливали на результат експерименту, вони мають бути значено меншими, ніж сума ($R + R_r$) (R – опір ділянки між зондами; R_r – внутрішній опір нульового приладу). Якщо умова ($R_{31} + R_{32} + R_r$) $\ll R$ виконується, похибка буде мінімальною і становитиме $i_{r \min}/I$.

Умову малості струму i через зонди, і, відповідно, малого падіння напруги на їх опорах можна забезпечити, якщо між зондами включити не потенціометр з нульовим приладом, а високоомний вольтметр V . У цьому випадку процес вимірювання напруги істотно прискорюється. В ідеальному випадку потенціометр можна розглядати як прилад з нескінченно великим вхідним опором. У реальному випадку (при $i_{r \min} \neq 0$) він має великий, але скінчений опір.

Якщо відстань від зондів до поверхні зразка значно перевищує l , зразок можна розглядати як напівнескінченний простір. Чим менше l , меншим буде розмір зразків, для яких справедлива формула (7).

При вимірі величини σ чотиризондовим методом фактично визначається середнє значення σ в межах малого об'єму зразка. Падіння напруги на середніх вимірювальних зондах U вимірюють потенціометром, а I – штангенциркулем або відліковим мікроскопом.

Метод вимірювання електропровідності за кімнатної температури

Електрична схема експериментальної установки наведена на рис. 2. Зразок 1 ставиться на підкладку. Згори на зразок опускаються вимірювальні зонди, виготовлені з вольфрамового дроту діаметром 0,5 мм, загострені на кінцях. Через два крайні зонди від стабілізованого джерела живлення СПП-35 пропускається струм, величина та контроль якого здійснюється за допомогою універсального цифрового вольтметра В7-21А. Між двома середніми зондами за допомогою мультиметра Keithley 2000 вимірюється падіння напруги.

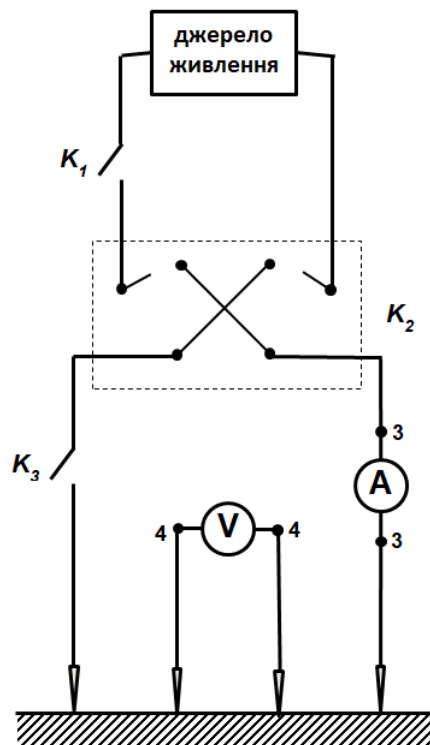


Рисунок 2 – Електрична схема установки для вимірювання електропровідності чотиризондовим методом

Ключ K_1 призначений для вмикання струму через зразок, трипозиційний перемикач K_2 дозволяє змінювати напрямок струму через зонди 1 і 4. Ключ K_3 представлений у вигляді мікрвимикача, розташованого ліворуч від вимірювального столика і включається натисканням на платівку при опущених на зразок зондах. При опусканні платівки ключ K_3 розмикається.

Порядок виконання роботи

Перед початком вимірювань необхідно ознайомитись з методами вимірювання σ та правилами експлуатації приладів: мультиметра Keithley 2000, універсального вольтметра В7-21А та джерела живлення СП-35.

1. Увімкнути щиток на стіні (220 В).
2. Включити прилади Keithley 2000 (час прогрівання не менше 30 хвилин)
3. Включити джерело живлення СП-35 (регуляторами вихідної напруги виставити необхідне значення сили струму).
4. Для вимірювання струму через зразок підключити універсальний вольтметр В7-21А до клем 1-1 на вимірювальному стенді.
5. Відрегулювати струм через зразок. Для цього затиснути зразок зондами (опустити зонди на зразок) та увімкнути струм Регуляторами вихідної напруги виставити необхідне значення сили струму.
6. Для вимірювання падіння напруги на зразку підключити мультиметр Keithley 2000 на вимірювальному стенді до клем 2-2.

Обробка результатів вимірювань та обчислення значень питомого опору та похибки

- 1) Величину електропровідності ρ розрахувати за формулою (7):

$$\sigma = \frac{I_{14}}{U_{23}} \cdot \frac{1}{2\pi l},$$

де I_{14} – сила струму через зразок; U_{23} – падіння напруги на зразку; l - відстань між зондами (у нашому випадку $l = l_1 = l_2 = l_3 = 1$ мм).

- 2) Розрахувати значення σ_1 і знайти середнє значення електропровідності для зразка $\langle \sigma \rangle$:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n} \quad (8)$$

n -число вимірів.

3) Визначити абсолютну похибку для кожного вимірювання:

$$\Delta \sigma_i = \sigma_i - \langle \sigma_i \rangle \quad (9)$$

4) Розрахувати середню квадратичну похибку результату за такою формулою:

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \sigma_i)^2}{n(n-1)}} \quad (10)$$

5). Визначити межі довірчого інтервалу $\Delta \rho = t_\alpha(n) \cdot \beta$. Значення $t_\alpha(n)$ визначити з табл. 1, де α - це надійність, $t_\alpha(n)$ — коефіцієнт Стюдента.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта Стюдента для різної кількості вимірювань заданої надійності α

$n-1$	$t_\alpha(n)$					
	α					
	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
1	1,00	2,0	3,1	6,3	12,7	63,7
2	0,82	1,3	1,9	2,9	4,3	9,9
3	0,77	1,3	1,6	2,4	3,2	5,8
4	0,74	1,2	1,5	2,1	2,8	4,6
5	0,73	1,2	1,5	2,0	2,6	4,0
6	0,72	1,1	1,4	1,9	2,4	3,7
7	0,71	1,1	1,4	1,9	2,4	3,5
8	0,71	1,1	1,4	1,9	2,3	3,4
9	0,70	1,1	1,4	1,8	2,3	3,3
10	0,70	1,1	1,4	1,8	2,2	3,2
50	0,68	1,1	1,3	1,7	2,0	2,7
100	0,68	1,0	1,3	1,7	2,0	2,6

б) Записати остаточний результат у вигляді:

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma \quad (11)$$

Контрольні запитання:

1. Чому вимірювання електропровідності напівпровідників проводять зазвичай при дуже слабкому освітленні чи темряві?
2. У яких випадках використовується чотиризондовий метод?
3. У чому переваги та недоліки чотиризондового методу?
4. У чому полягає суть чотиризондового методу вимірювання електропровідності?
5. Які основні припущення лежать в основі теоретичного опису чотиризондового методу?
6. Який вигляд має формула для розрахунку електропровідності в загальному випадку ($l_1 \neq l_2 \neq l_3$)?
7. Що таке антизапірний шар і як він впливає на результати вимірювань?
8. Для чого проводиться вимірювання напруги при двох напрямках струму?
9. Яким чином розраховується довірчий інтервал результатів?
10. Чому при вимірюваннях важливо, щоб відстань між зондами була значно меншою за розміри зразка?

Список літератури

1. Шаповаленко О.Г., Бондар В.М. Основи електричних вимірювань. – Київ: Либідь, 2002. – 320 с.
2. Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах. / Ю. М. Поплавко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. – 415 с. – Бібліогр. : с. 414–415.
3. Лавренова Д.Л., Хлистов В.М. Основи метрології та електричних вимірювань [Електронне видання]: навч. посіб. / Д.Л. Лавренова, В.М. Хлистов. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 123 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи «Вимірювання електропровідності
чотиризондовим методом» з курсу «Основи термoeлектрики та її
застосування» для студентів усіх форм навчання

Укладачі:

РОГАЧОВА Олена Іванівна
МАРТИНОВА Катерина Вікторівна

Відповідальний за випуск проф. Любченко О. А.
Роботу до видання рекомендував проф. Малихін С. В.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 780

Підписано до друку 2025 р. Гарнітура Times New Roman

Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія