

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторних робіт

**«Визначення питомого електричного опору  
однорідних напівпровідників і тонких напівпровідникових шарів»**  
з розділу «Контактні та безконтактні методи визначення  
питомого електричного опору напівпровідників»  
дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів»  
для студентів напряму підготовки 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 1 від 02.04.09

Харків НТУ «ХПІ» 2009

**Методичні вказівки** до лабораторних робіт «Визначення питомого електричного опору однорідних напівпровідників і тонких напівпровідникових шарів» з розділу «Контактні та безконтактні методи визначення питомого електричного опору напівпровідників» дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів» для студентів напряму підготовки 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка» / Уклад.: В.Р. Копач, Г.С. Хрипунов, М.В. Кіріченко, Р.В. Зайцев. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – 48 с.

Укладачі: В.Р. Копач,  
Г.С. Хрипунов,  
М.В. Кіріченко,  
Р.В. Зайцев

Рецензент проф. О.О. Булгаков

Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики

## ВСТУП

Методичні вказівки до лабораторних робіт з розділу «Контактні та безконтактні методи визначення питомого електричного опору напівпровідників» дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів» стосуються двох лабораторних робіт: «Визначення питомого електричного опору однорідних напівпровідників за їхнім повним електричним опором» і «Визначення питомого електричного опору однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом».

Питомий електричний опір  $\rho$  напівпровідників належить до важливих електричних параметрів цих матеріалів. Тому його визначення є вкрай актуальним. Серед методів визначення  $\rho$  найбільшого поширення набули контактні методи, до яких зокрема належать досить зручні у реалізації методи амперметра-вольтметра і моста постійного струму, котрі дозволяють визначати  $\rho$  однорідних зразків правильної геометричної форми з омичними контактами, а також чотиризондовий метод, котрий використовується для визначення  $\rho$  зразків з однорідних напівпровідників довільної форми і не потребує наявності омичних контактів. Тому перша із запропонованих лабораторних робіт знайомить студента з двома варіантами реалізації методу амперметра-вольтметра: визначення  $\rho$  за результатами дослідження статичної вольт-амперної характеристики на постійному струмі й динамічної – на змінному струмі, а також з технікою використання одинарного моста постійного струму. Друга лабораторна робота знайомить студента зі специфікою застосування чотиризондового методу у випадку однорідних тонких напівпровідникових шарів з обмеженими розмірами планарної поверхні.

Після вивчення теоретичної частини та отримання індивідуального завдання, яке визначає викладач, студент має приступати до виконання кожної лабораторної роботи згідно з пунктом “Порядок дій”. По завершенню роботи студент складає звіт, зміст якого визначено у відповідному пункті, та захищає його, відповідаючи на запитання викладача.

Методичні вказівки призначені для студентів напрямків підготовки фізико-технічного і метрологічного профілів університетів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

### ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ОДНОРІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ ЗА ЇХНІМ ПОВНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ОПОРОМ

Мета роботи – навчитися визначати питомий електричний опір однорідних напівпровідників за їхнім повним електричним опором при застосуванні методів амперметра-вольтметра і одинарного моста постійного струму.

#### 1.1 Загальні відомості

Фізичною передумовою можливості визначення питомого електричного опору  $\rho$  однорідного напівпровідникового матеріалу за його повним електричним опором  $R$  є те, що при слабких електричних полях, коли вольт-амперна характеристика  $I = I(U)$  досліджуваного зразка з такого матеріалу у формі прямокутного паралелепіпеда, циліндра або стержня з круглим чи прямокутним перетином підпорядковується закону Ома, зв'язок напруги  $U$  і сили струму  $I$  між омичними контактами зразка згідно з [1] описується формулою

$$\frac{U}{I} = R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.1)$$

де  $l$  – розмір зразка у напрямку протікання струму;  $S$  – площа поперечного перетину зразка перпендикулярного до напрямку протікання струму.

Деякі типові приклади геометрії зразків, що переважно використовуються для визначення  $\rho$  при застосуванні зазначених у меті роботи методів, наведено на рис. 1.1.

З формули (1.1) випливає, що при звісних значеннях  $R$ ,  $l$  і  $S$  величина  $\rho$  визначається таким чином:

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (1.2)$$

Поряд з однорідністю досліджуваного матеріалу за  $\rho$  суттєвою вимогою, котра забезпечує можливість використання формули (1.2) для визначення  $\rho$  за звісним значенням  $R$ , є омичність обох контактів (3 на рис. 1) між

металевими електродами (2 на рис. 1.1) і цим матеріалом (1 на рис. 1.1). Омичні контакти не повинні вносити помітний додатковий опір у повний опір зразка. Тому їхній опір має бути значно меншим за опір напівпровідникового матеріалу, а їхня вольт-амперна характеристика у робочому інтервалі напруги і струму повинна бути лінійною. Крім того, омичні контакти не повинні інжектувати неосновні носії заряду.

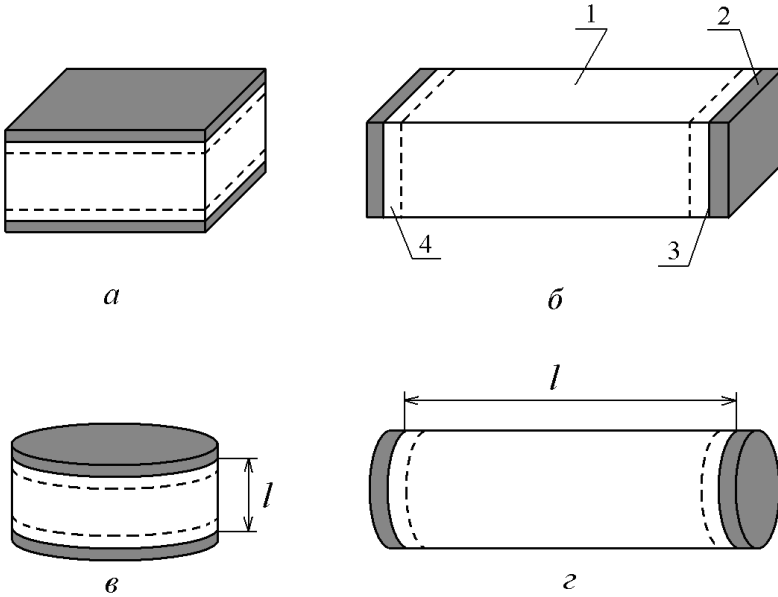


Рисунок 1.1 – Деякі типові приклади геометрії зразків:

$a, б$  – зразки у формі прямокутного паралелепіпеда;

$в, з$  – зразки циліндричної форми;

1 – напівпровідниковий матеріал; 2 – металеві електроди; 3 – омичні контакти;

4 – області збагачення напівпровідника основними носіями заряду

З метою забезпечення омичності контактів метал і технологію для їх виготовлення обирають відповідно до таких теоретично й експериментально обґрунтованих критеріїв:

1) робота виходу металу повинна бути меншою, ніж у напівпровідника, якщо напівпровідник n-типу провідності, і більшою, якщо напівпровідник p-типу провідності;

2) метал має створювати у приконтактній області 4 напівпровідника 1 домішкові центри, котрі відповідають типу провідності напівпровідника, тобто вмішувати донорну домішку при контакті з напівпровідником *n*-типу і акцепторну при контакті з напівпровідником *p*-типу;

3) спосіб реалізації контакту повинен забезпечувати деяке проникнення атомів електродного матеріалу в приконтактну область 4 напівпровідника 1.

Питомий опір якісного омичного контакту складає менше  $10^{-3}$  Ом·см<sup>2</sup> [2], що досягається при концентрації домішкових центрів у приконтактній області напівпровідника більше  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> [3]. Тому області 4 називаються областями або шарами збагачення основними носіями заряду і виготовлення омичних контактів базується у більшості випадків на утворенні безпосередньо біля границі з металом дуже тонкого сильно легованого напівпровідникового шару, який у відповідній літературі зазвичай називається шаром збагачення. При цьому навіть відпадає необхідність дотримуватись першого із зазначених вище критеріїв вибору електродного матеріалу. З іншого боку, висока концентрація домішок сприяє суттєвому ослабленню інжекції неосновних носіїв заряду у приконтактну область напівпровідника і зниженню їхнього часу життя. Остання обставина у свою чергу є додатковим чинником, що значно запобігає появі у основному об'ємі напівпровідника 1 надлишкових носіїв заряду. Грунтовні відомості про електродні матеріали і методи виготовлення омичних контактів при їхньому застосуванні наведено у [2-5].

Зразки описаних типів за допомогою контактної пристрою, конструкція якого залежить від геометричних особливостей досліджуваних об'єктів, гальванічно з'єднуються з вимірювальним колом або з приладом для визначення їхнього повного електричного опору *R*.

При застосуванні методу амперметра-вольтметра [6] величина *R* розраховується за формулою (1.1), у яку підставляються значення *U* і *I*, експериментально виміряні на омичній ділянці вольт-амперної характеристики зразків. Тому для впевненості відносно правомірності використання формули (1.2) з метою визначення питомого опору напівпровідникового матеріалу у разі реалізації саме цього методу необхідно дослідити вольт-амперну характеристику зразка з відповідного матеріалу у деякому діапазоні значень *U*, обгрунтованому далі.

При застосуванні одинарного моста постійного струму [6] у випадку виміру так званим нульовим методом величина *R* може бути розрахованою після урівноважування моста за формулою

$$R = R_C \frac{R_A}{R_B}, \quad (1.3)$$

де  $R_C$  – опір зразкового резистора у плечі порівняння моста;  $R_A$  і  $R_B$  – опори зразкових резисторів у плечах відношення моста А і В відповідно.

Після цього для визначення питомого електричного опору  $\rho$  досліджуваного напівпровідникового матеріалу використовується формула (1.2). У випадку використання моста постійного струму напруга  $U$  на досліджуваному зразку також повинна відповідати омичній ділянці його вольт-амперної характеристики. Тому перед визначенням  $R$  мостом постійного струму необхідно дослідити вольт-амперну характеристику відповідного зразка. Але у порівнянні з методом амперметра-вольтметра, котрий дозволяє визначати  $R$ , а слідом і  $\rho$ , з відносною похибкою до 1 %, метод одинарного моста постійного струму забезпечує підвищення точності визначення цих величин приблизно на один-два порядки.

Запропонована лабораторна робота спрямована на допомогу у придбанні практичних навиків з визначення питомого опору напівпровідників найбільш широкого використання, котрі мають  $10^{-3} \leq \rho \leq 10^6$  Ом·см. При цьому застосування методів амперметра-вольтметра і одинарного моста постійного струму не викликає специфічних труднощів. Виміри на зразках з  $\rho > 10^6$  Ом·см методами амперметра-вольтметра і моста постійного струму можуть бути ускладнені наявністю додаткових ємнісної та поверхневої компонент струму, а також поляризаційних ефектів. Засоби подолання зазначених ускладнень викладені, наприклад, у навчальному посібнику [1].

## 1.2 Метод амперметра-вольтметра і особливості його реалізації

### 1.2.1 Визначення повного електричного опору за результатами дослідження вольт-амперної характеристики

Згідно з викладеним вище при реалізації методу амперметра-вольтметра повний електричний опір досліджуваного зразка розраховується за формулою (1.1) при використанні експериментальних значень  $U_\Omega$  і  $I_\Omega(U_\Omega)$ , що відповідають омичній ділянці вольт-амперної характеристики  $I = I(U)$ , котра у випадку однорідного напівпровідника та омичних контактів описується співвідношенням

$$I = \frac{1}{R} U, \quad (1.4)$$

де  $R(U) = \text{const}$ .

Ця ділянка вольт-амперної характеристики має місце, коли діапазон робочих значень  $U$  відповідає нерівності

$$0 < U < U^*, \quad (1.5)$$

де  $U^*$  – напруга, при помітному перевищенні якої слабе електричне поле (суттєво менше за 1000 В/см) у напівпровідниковому матеріалі змінюється сильним (більше 1000 В/см), що приводить до суперлінійного зростання струму з підвищенням напруги на зразку [7], а це у свою чергу – до зменшення  $R$  при збільшенні  $U$ .

Якісний вигляд типової вольт-амперної характеристики так званої однорідної напівпровідникової структури на основі однорідного напівпровідникового матеріалу з омичними контактами наведено на рис. 1.2.

Таким чином, вимірювання вольт-амперної характеристики досліджуваного зразка і встановлення діапазону значень  $U$ , що відповідає умові

(1.5), є важливим етапом експерименту з визначення питомого електричного опору однорідного напівпровідника при застосуванні методу амперметра-вольтметра. Цей етап може бути реалізовано завдяки вимірюванню вольт-амперної характеристики  $I = I(U)$  зразка як у статичному режимі на постійному струмі, так і у динамічному режимі на змінному струмі. У першому випадку вольт-амперна характеристика називається статичною, у другому – динамічною.

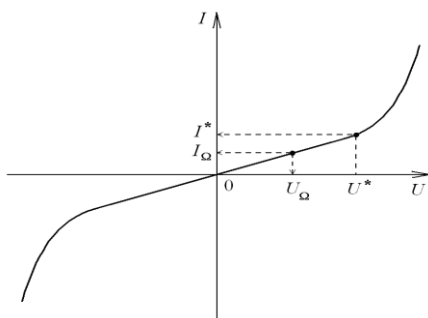


Рисунок 1.2 – Якісний вигляд типової вольт-амперної характеристики однорідної напівпровідникової структури

### 1.2.2 Вимірювання статичної вольт-амперної характеристики і визначення повного електричного опору зразка за отриманими результатами

Для вимірювання статичної вольт-амперної характеристики досліджуваних зразків використовується так звана схема амперметра-вольтметра [6], котра у модифікованому сучасному вигляді зображена на рис. 1.3.



Для живлення вимірювального кола за наведеною на рис. 1.3 схемою може бути використане джерело стабілізованої постійної напруги 1, подібне за своїми технічними характеристиками, наприклад, до типу ТЕС-5020, яке у разі останнього забезпечує можливість змінювати напругу на вихідних клеммах від нуля до 60 В і силу струму у зовнішньому колі від нуля до 6 А. Резистивний дільник напруги 2 призначений для реалізації можливості забезпечувати більш точне регулювання напруги  $U_K$ , що подається на вхід вимірювального кола, у порівнянні з регулятором напруги джерела 1. Таким дільником може бути, наприклад, реостат або змінний резистор.

При цьому повний опір  $R_D$  дільника напруги 2 має забезпечувати силу струму  $I_K$  у вимірювальному колі не меншу за величину  $I_E^*$ , яка може бути розрахована за формулою

$$I_K^* = \frac{U^*}{R_{\min}}, \quad (1.6)$$

де  $R_{\min}$  – найменше можливе значення повного електричного опору досліджуваного зразка.

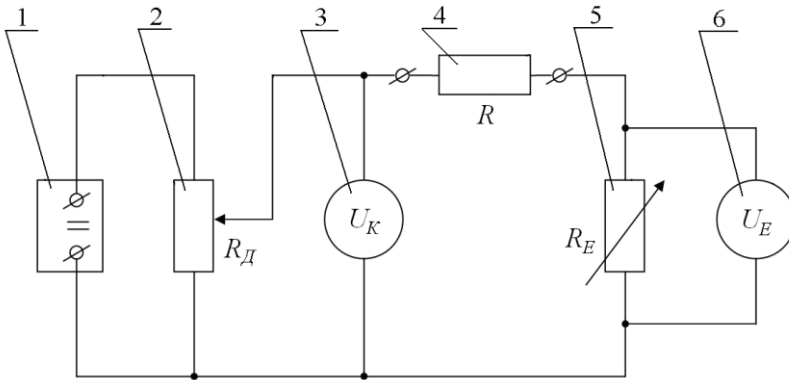


Рисунок 1.3 – Схема амперметра-вольтметра для вимірювання статичної вольт-амперної характеристики:

1 – джерело стабілізованої постійної напруги; 2 – резистивний дільник напруги; 3 – цифровий вольтметр для виміру напруги, що подається до кола досліджуваного зразка; 4 – досліджуваний зразок; 5 – змінний еталонний резистор; 6 – цифровий вольтметр для виміру напруги на еталонному резисторі

Тоді максимально припустима величина електричного опору ділянка  $R_{Д\max}$  розраховується, виходячи зі співвідношення

$$I_K^* = \frac{U^*}{R_{\min}} = \frac{U_K^*}{R_{Д\max}}, \quad (1.7)$$

де

$$U_K^* = U^* + U_E, \quad (1.8)$$

$U_E$  – напруга на змінному еталонному резисторі 5 з опором  $R_E \ll R_{\min}$ , яким може бути, наприклад, магазин еталонних опорів типу Р-33.

Оскільки  $R_E \ll R_{\min}$ , то  $U_E \ll U^*$  і тому співвідношення (1.8) спрощується і набуває такого вигляду:

$$U_K^* \cong U^*. \quad (1.9)$$

Очевидно, що наслідком співвідношень (1.7) і (1.9) є таке рівняння:

$$R_{Д\max} \cong R_{\min}, \quad (1.10)$$

звідки випливає, що при визначенні повного електричного опору досліджуваного зразка резистивний діляник напруги 2 повинен мати опір

$$R_{Д} < R_{\min}. \quad (1.11)$$

Цифровий вольтметр 3 для виміру напруги  $U_K$ , що подається до кола досліджуваного зразка 4, повинен мати внутрішній опір  $R_{B_3} \gg R_{Д}$  і може бути подібним за своїми технічними характеристиками до вимірювального приладу типу В7-37, діапазон виміру постійної напруги у якого складає  $10^{-4} - 10^3$  В при класі точності  $\gamma_{i\delta}$ , що дорівнює 0,5, забезпечуючи проведення вимірів з відносною інструментальною похибкою 0,5 %;  $R_B = 10$  МОм.

Зі схеми на рис. 1.3 видно, що напруга  $U$  на досліджуваному зразку точно може бути визначеною за формулою

$$U = U_K - U_E, \quad (1.12)$$

а сила струму  $I$  в зразку – за формулою

$$I = I_E = \frac{U_E}{R_E}. \quad (1.13)$$

Напруга  $U_E$  на змінному еталонному резисторі 5 вимірюється цифровим вольтметром 6, котрий повинен мати внутрішній опір  $R_{B6} \gg R_E$  і може бути подібним за своїми технічними характеристиками до вимірювального приладу типу В7-38, діапазон виміру постійної напруги у якого складає  $10^{-5} - 10^3$  В при класі точності  $\gamma_{\text{вд}}$ , що дорівнює 0,07 %, забезпечуючи проведення вимірів з відносною інструментальною похибкою 0,07 %;  $R_B = 10$  МОм. Таким чином, еталонний резистор 5 разом з вольтметром 6 виконують функцію амперметра, внутрішній опір якого дорівнює  $R_E$  і на відміну від опору існуючих амперметрів, як приладів, може бути суттєво нижчим завдяки використанню існуючих еталонних резисторів з  $R_E \ll 1$  Ом. Ця обставина є дуже важливою з точки зору полегшення визначення повного опору досліджуваного зразка за його вольт-амперною характеристикою. Дійсно, після підстановки  $U$  і  $I$  відповідно до формул (1.12) і (1.13) у формулу (1.1) з урахуванням умови (1.5) маємо

$$R = \left( \frac{U_K}{U_E} - 1 \right) R_E. \quad (1.14)$$

Якщо  $R_E \ll R$ , то  $U_E \ll U$ , а оскільки при цьому  $U_K \cong U$ , то  $U_E \ll U_K$  і тоді  $U_K/U_E \gg 1$ , у зв'язку з чим формула (1.14) спрощується і набуває такого вигляду:

$$R \approx \frac{U_K}{U_E} R_E. \quad (1.15)$$

Таким чином, визначення повного електричного опору досліджуваного зразка за результатами вимірювання його статичної вольт-амперної характеристики для наступного розрахунку за формулою (1.2) питомого

опору напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлено цей зразок, складається з трьох етапів:

1) знаходження за результатами виміру вольт-амперної характеристики зразка  $I = I(U)$  діапазону робочих значень напруг  $U$ , котрому відповідає омична ділянка вольт-амперної характеристики, що описується співвідношенням (1.4);

2) вибір найбільш оптимального значення  $U = U_K - U_E$  і відповідного до нього значення  $I = U_E/R_E$ ;

3) максимально точний розрахунок повного опору  $R$  досліджуваного зразка за формулою (1.14) або з деяким наближенням – за формулою (1.15).

Вимір вольт-амперної характеристики на першому етапі дослідження здійснюється шляхом ступінчастої зміни напруги  $U_K$  від нуля до  $U_K > U^*$  з відповідною ступінчастою реєстрацією величин  $U_E$ , за якими згідно з формулою (1.13) розраховуються значення  $I(U)$ .

Стосовно другого етапу слід відмітити, що під найбільш оптимальним значенням  $U \cong U_K$  розуміється таке, при якому з мінімально можливою похибкою визначається величина  $I$  та є відсутнім можливий помітний розігрів зразка відповідно до закону Джоуля-Ленца, котрий веде до монотонної зміни сили струму при фіксованому значенні  $U$ .

Абсолютна і відносна похибки визначення питомого опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу у разі використання двох вимірювальних приладів згідно з [8, 9] можуть бути розрахованими при цьому таким чином.

Відносна похибка розрахованого за формулою (1.15) значення повного електричного опору розраховується за співвідношенням

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta_i U_K + \Delta_6 U_K}{U_K} + \frac{\Delta_i U_E + \Delta_6 U_E}{U_E}, \quad (1.16)$$

де  $\Delta_i U_K$  і  $\Delta_i U_A$  – абсолютні інструментальні похибки вольтметра для виміру напруги, що подається до кола досліджуваного зразка, та вольтметра для виміру напруги на еталонному резисторі відповідно;  $\Delta_6 U_K$  і  $\Delta_6 U_E$  – абсолютні похибки відліку  $U_K$  та  $U_E$  відповідно.

У більшості випадків у співвідношенні (1.16) абсолютні похибки відліку зазначених величин дорівнюють половині ціни ділення або кроку відповідного вимірювального приладу. А величини абсолютної інструментальної похибки для кожного вимірювального приладу визначаються виходячи з його класу точності за формулою

$$\Delta_s A = \frac{\gamma_{i\delta} A_{MAX}}{100}, \quad (1.17)$$

де  $\Delta_s A$  – абсолютна інструментальна похибка вимірювального приладу;  $\gamma_{i\delta}$  – клас точності вимірювального приладу;  $A_{MAX}$  – максимальне значення шкали вимірювального приладу.

Далі, якщо припустити, що у формулі (1.2) величини  $S$  і  $l$  не мають похибки вимірювання, то відносна похибка визначення  $\rho$  за цією формулою дорівнює відповідній похибці визначення  $R$ :

$$\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \varepsilon_R. \quad (1.18)$$

Абсолютну похибку розрахованого значення  $\rho$  можна визначити за формулою

$$\Delta\rho = \rho \cdot \varepsilon_\rho = \rho \cdot \varepsilon_R. \quad (1.19)$$

Абсолютну похибку вимірювання округлюють до однієї значущої цифри, а числове значення результату вимірювання округлюють так, щоб розряд його останньої цифри відповідав розряду останньої цифри похибки.

### **1.2.3 Вимірювання динамічної вольт-амперної характеристики і визначення повного електричного опору зразка за отриманими результатами**

Певним недоліком описаного у попередньому пункті варіанта методу амперметра-вольтметра є необхідність у поточечному ступінчастому вимірі вольт-амперної характеристики та наступному її графічному відображенню, тільки після чого можна зробити висновок про тип контакту металевих електродів з напівпровідником і визначити питомий опір  $\rho$  досліджуваного напівпровідника за формулою (1.2) при наявності дійсно омичних контактів. Істотно, що такий підхід до визначення  $\rho$  потребує відносно багато часу через тривалість процедури остаточної візуалізації статичної вольт-амперної характеристики. Цей недолік може бути усунений завдяки безпосередній візуалізації динамічної вольт-амперної характеристики на екрані осцилографа, котрий є однією зі складових так званої схеми харак-

терографа [10], за принципом якої вже досить давно промислово виготовляються прилади, що у ряді випадків мають ідентичну назву. До зазначених приладів належать, наприклад, прилади таких типів: Л2-46, EMG-1579-102TR «Orion, EMG», ET-100KR «Agilent Technologies». Спрощену концептуальну схему характерографа для вимірювання динамічних вольт-амперних характеристик двополюсників, до яких належать і зразки, зображені на рис. 1.1, наведено на рис. 1.4, з якого випливає, що ця схема є ще одним варіантом схеми амперметра-вольтметра, показаної на рис. 1.3.

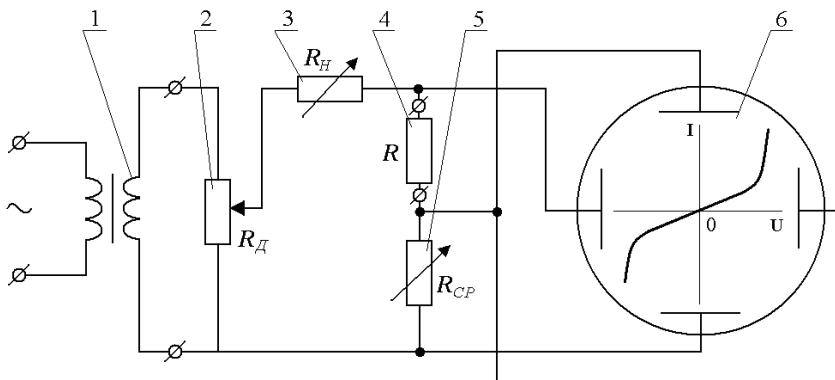


Рисунок 1.4 – Спрощена схема характерографа для вимірювання динамічних вольт-амперних характеристик:

- 1 – трансформатор; 2 – резистивний дільник напруги;
- 3 – баластний або навантажувальний резистор; 4 – досліджуваний зразок;
- 5 – струмовий резистор; 6 – електронно-променева трубка осцилографа

Як видно з рис. 1.4, характерограф є комплектом з джерела регульованої за амплітудою змінної напруги – трансформатора 1 і резистивного дільника напруги 2, змінних резисторів 3 та 5 і осцилографа з електронно-променевою трубкою 6 або з рідинно-кристалічним дисплеєм. Змінна напруга подається з первинної обмотки трансформатора на вторинну (гальванічно розв'язану з першою) обмотку, до якої через резистивний дільник напруги 2 підключені з'єднані послідовно досліджуваний зразок 4 і резистори 3 та 5 з відомими опорами. Напруга  $U$  з досліджуваного зразка подається на підсилювач горизонтального відхилення електронного променя осцилографа. Напруга  $U_{CP} = I \cdot R_{CP}$  зі струмового резистора 5, пропорційна силі струму  $I$  через досліджуваний зразок 4, подається на підсилювач вертикального відхилення електронного променя осцилографа. При цьому із

змінюю величин  $U$  і  $I(U) = U_{CP} / R_{CP}$  електронний промінь у випадку осцилографа з електронно-променевою трубкою викреслює на екрані осцилографа вольт-амперну характеристику досліджуваного зразка 4 в заданих масштабах напруги і сили струму, котрі визначаються коефіцієнтами підсилення у вказаних вище відповідних каналах осцилографа. Описаний варіант методу амперметра-вольтметра дозволяє протягом експерименту безпосередньо візуалізувати вольт-амперну характеристику досліджуваного зразка 4 на екрані осцилографа, що підвищує експресність дослідження і забезпечує наочність його результату. Зазначені переваги цього варіанта методу амперметра-вольтметра дозволяють широко і успішно застосовувати його не тільки для швидкої ідентифікації типу контакту металу з напівпровідником та визначення наявності омичної ділянки для досліджуваної вольт-амперної характеристики, але й для досконалого вивчення деяких особливостей вольт-амперних характеристик різноманітних напівпровідникових структур, котрі значно складніше спостерігати при вимірах статичних вольт-амперних характеристик.

Таким чином, визначення повного електричного опору досліджуваного зразка за результатами вимірювання його динамічної вольт-амперної характеристики для наступного розрахунку за формулою (1.2) питомого опору напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлено цей зразок, на відміну від випадку визначення  $R$  за результатами вимірювання статичної вольт-амперної характеристики, складається не з трьох, а з двох етапів:

- 1) візуалізація вольт-амперної характеристики зразка на екрані осцилографа та ідентифікація її ділянки, яка відповідає співвідношенню (1.4);
- 2) розрахунок за формулою (1.1) величини  $R$  за експериментальними значеннями  $U$  і  $I(U)$ , котрі відповідають цій ділянці.

Абсолютна і відносна похибки визначення питомого опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу можуть бути розраховані при цьому таким чином. У разі використання характерографа відносна похибка визначення повного електричного опору розраховується за формулою

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta_s U + \Delta_a U}{U} + \frac{\Delta_s I + \Delta_a I}{I}, \quad (1.20)$$

де  $\Delta_s U$  і  $\Delta_s I$  – абсолютні інструментальні похибки характерографа з визначення величин  $U$  та  $I(U)$  відповідно;  $\Delta_a U$  і  $\Delta_a I$  – абсолютні похибки відліку  $U$  та  $I$  відповідно.

Під час розрахунку похибки вимірювання, проведеного за допомогою характерографа, рекомендується використовувати похибку відліку

близько 0,5 ділення координатного растра відповідної величини. Абсолютні інструментальні похибки характерографа з визначення  $U$  та  $I$  розраховуються за формулою (1.17) з урахуванням класу точності приладу  $\gamma_{i\delta}$ , який, наприклад для характерографа EMG-1579-102TR «Orion, EMG», забезпечує точність виміру 5 %.

Використовуючи отримане значення  $\varepsilon_R$ , розраховують відносну та абсолютну похибки отриманого значення питомого електричного опору за формулами (1.18) та (1.19).

### 1.3 Метод одинарного моста постійного струму і особливості його реалізації

Сучасні прилади з мостовими схемами постійного струму для вимірювання активних опорів виготовляються переважно як комбіновані мости, котрі за допомогою спеціальних перемикачів дозволяють утворювати схему чотириплечого одинарного або подвійного моста. Одинарний міст може забезпечити вимір опорів від  $10^{-4}$  Ом до  $10^8$  Ом, а подвійний – від  $10^{-8}$  Ом до  $10^2$  Ом. Прикладом одинарно-подвійних мостів є мости типів P39, P329, МОД-61, P4833 та інші [6]. Наведені вище діапазони виміру опорів одинарним і подвійним мостами у порівнянні з діапазоном питомого опору напівпровідників найбільш широкого використання ( $10^{-3} \leq \rho \leq 10^6$  Ом·см) вказують на достатність застосування для дослідження таких напівпровідників чотириплечого одинарного моста.

На рис. 1.5 зображено спрощені типові схеми чотириплечого одинарного моста для виміру опорів  $R$  у діапазонах від  $10^{-4}$  Ом до  $10^2$  Ом (див. рис. 1.5, а), від  $10^2$  Ом до  $10^5$  Ом (див. рис. 1.5, б), від  $10^5$  Ом до  $10^8$  Ом (див. рис. 1.5, в).

Застосування цих схем у випадку виміру  $R$  так званим нульовим методом передбачає урівноважування моста шляхом підбору певних величин опорів резисторів  $R_C$ ,  $R_A$  і  $R_B$  за допомогою відповідних перемикачів на панелі керування приладу таким чином, щоб різниця потенціалів  $U_{24}$  між точками 2 та 4 на цих схемах дорівнювала нулю. При цьому сила струму  $I_\Gamma$  між точками 2 і 4 у так званій діагоналі моста, яку вимірює гальванометр  $\Gamma$ , повинна дорівнювати нулю.

Наприклад, зі схеми в на рис. 1.5 впливає, що  $I_\Gamma = 0$  при  $U_{24} = 0$ , коли

$$I_R R = I_{R_A} R_A \quad (1.21)$$

та



$$I_{R_C} R_C = I_{R_B} R_B, \quad (1.22)$$

де  $I_R, I_{R_A}, I_{R_C}, I_{R_B}$  – сили струмів, котрі течуть у резисторах, опори яких позначені у індексах.

З іншого боку, завдяки  $I_I = 0$  мають місце такі співвідношення:

$$I_R = I_{R_C}; \quad I_{R_A} = I_{R_B}. \quad (1.23)$$

Тому ділення рівняння (1.21) на рівняння (1.22) з урахуванням співвідношень (1.23) відтворює співвідношення

$$\frac{R}{R_C} = \frac{R_A}{R_B}, \quad (1.24)$$

котре є умовою урівноважування або балансу моста. З цього співвідношення і випливає робоча формула (1.3) одинарного моста постійного струму. Аналогічним чином співвідношення (1.23) може бути знайдене також для схем *a* і *b* на рис. 1.5.

Особливістю схеми *a* (див. рис. 1.5) є чотиризатискне підключення вимірюваного опору  $R$  до клем С1, П1, С2, П2, при чому до клем П1 і С2 – каліброваними проводами з опором кожного  $r = 0,01$  Ом. Для виключення впливу цих опорів на результат виміру опори плеча порівняння  $R_C$  та плеча відношення  $R_A$  зменшуються на 0,01 Ом. Це дозволяє виключити вплив опору з'єднувальних некаліброваних проводів на результати виміру при малих значеннях  $R$ .

Особливості схеми *b* (див. рис. 1.5) пов'язані з необхідністю зменшення впливу струмів витоку (ізоляційних струмів) на результат виміру великих опорів. Це зумовлено тим, що у колах для виміру великих опорів використовуються високочутливі гальванометри і відносно великі напруги  $U_0$ , але опір ізоляції елементів схеми, сумірний з вимірюваним опором, може значною мірою впливати на результат виміру. Тому для підвищення межі виміру до  $10^8$  Ом за рахунок зменшення впливу струмів витоку на результат виміру використовується відповідний захист, котрий знижує вплив струмів витоку у 10000 разів. Для цього, наприклад, усі плечі моста закріплюються на металевій панелі, а інші його елементи – гальванометр, вимірюваний опір і джерело живлення – також встановлюються на металевих пластинах, котрі підключаються до клеми, яка з'єднана з вказаною ви-

ще металевою панеллю (пунктир на рис. 1.5, в). Крім того, з цією панеллю перемичкою з'єднана точка 3 моста. Описаний захист дозволяє також знизити вимогу до опору ізоляції з  $2 \cdot 10^{12}$  Ом до  $5 \cdot 10^8$  Ом.

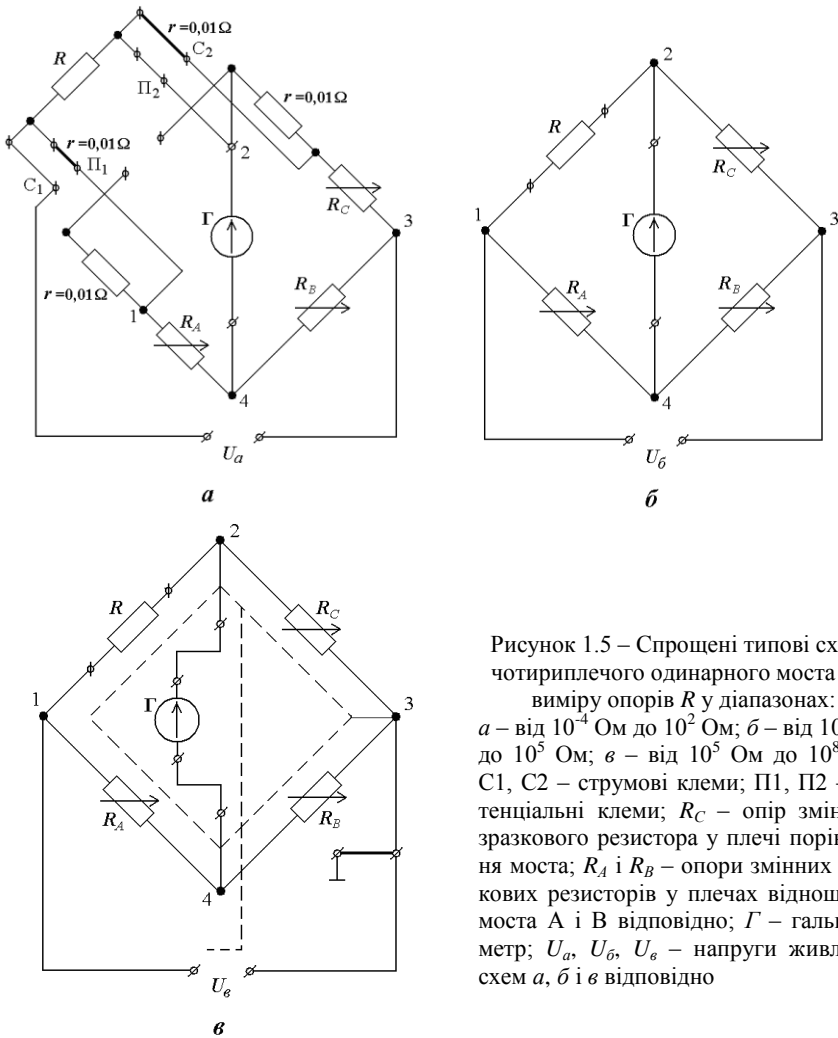


Рисунок 1.5 – Спрощені типові схеми чотириплечого одинарного моста для виміру опорів  $R$  у діапазонах:  $a$  – від  $10^{-4}$  Ом до  $10^2$  Ом;  $б$  – від  $10^2$  Ом до  $10^5$  Ом;  $в$  – від  $10^5$  Ом до  $10^8$  Ом;  $C_1, C_2$  – струмові клеми;  $\Pi_1, \Pi_2$  – потенціальні клеми;  $R_C$  – опір змінного зразкового резистора у плечі порівняння моста;  $R_A$  і  $R_B$  – опори змінних зразкових резисторів у плечах відношення моста А і В відповідно;  $\Gamma$  – гальванометр;  $U_a, U_b, U_v$  – напруги живлення схем  $a, б$  і  $в$  відповідно

При проведенні вимірів за допомогою одинарного моста відносна похибка визначення питомого опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу відповідає класу точності приладу, який, у разі використання одинарного моста Р4833, складає 0,1, тобто  $\varepsilon_R = 0,1 \%$ . Абсолютна похибка може бути розрахована за формулою (1.19).

## **1.4 Порядок виконання роботи**

### **1.4.1 Завдання для виконання роботи**

Послідовно, спочатку методом амперметра-вольтметра за статичною та динамічною вольт-амперними характеристиками, а потім за допомогою одинарного моста постійного струму визначити повний опір наданого зразку правильної геометричної форми з досліджуваного напівпровідникового матеріалу і з омічними контактами до нього. За отриманими результатами визначити питомий опір досліджуваного напівпровідникового матеріалу і розрахувати абсолютні та відносні похибки визначення цього параметра залежно від методу його дослідження.

### **1.4.2 Порядок дій**

1. За допомогою наданих інструкцій, котрі знаходяться на робочих місцях біля відповідного вимірювального устаткування, ознайомитись з особливостями використання:

- 1) лабораторного стенду для виміру статичних вольт-амперних характеристик згідно зі схемою, наведеною на рис. 1.3;
- 2) промислового характерографа для виміру динамічних вольт-амперних характеристик;
- 3) промислового чотириплечого одинарного моста постійного струму.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного вимірювального устаткування підключити його до живильної електромережі для попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача зразок правильної геометричної форми з досліджуваного однорідного напівпровідникового матеріалу і з омічними контактами до нього, визначити відстань  $l$  між електродами та площу  $S$  поперечного перетину зразка перпендикулярного до напрямку протікання струму, після чого встановити зразок у контактний пристрій і за допомогою цифрового тестера, котрий забезпечує вимір електричного опору з похибкою не більше 0,1 Ом, перевірити наявність належного гальванічного кон-

такту між електродами зразка і двома відповідними выводами контактного пристрою, за допомогою яких останній поєднується з вимірювальним устаткуванням.

4. За допомогою контактної пристрою поєднати зразок з лабораторним стендом для виміру статичних вольт-амперних характеристик і у діапазоні напруги  $U$  з кроком  $\Delta U$ , запропонованих викладачем, виміряти статичну вольт-амперну характеристику зразка  $I = I(U)$  при двох протилежних напрямках струму, розраховуючи величину  $U$  за експериментальними значеннями  $U_K$  та  $U_E$  згідно з формулою (1.12), а величину  $I$  – за експериментальними значеннями  $U_E$  та  $R_E$  згідно з формулою (1.13).

5. Використовуючи програму електронних таблиць Excel 2007, побудувати вимірну статичну вольт-амперну характеристику зразка, після чого за її виглядом переконатися у омичній властивості контактів між металевими електродами і досліджуванним напівпровідниковим матеріалом, та з діапазону значень  $U$ , котрий відповідає нерівності (1.5), визначити оптимальне значення  $U$  й відповідне йому значення  $I$ , за якими згідно з формулою (1.1) (що еквівалентно використанню формул (1.14) або (1.15)) розрахувати повний опір  $R$  зразка.

6. За значеннями повного опору  $R$  та геометричних параметрів  $l$  і  $S$  зразка згідно з формулою (1.2) розрахувати питомий опір  $\rho$  досліджуваного напівпровідникового матеріалу.

7. Використовуючи формули (1.16)-(1.18) і (1.19) розрахувати відносну та абсолютну похибки визначення  $\rho$  за цим методом дослідження питомого опору напівпровідникового матеріалу.

8. За допомогою контактної пристрою поєднати зразок з промисловим характерографом і у попередньому діапазоні значень  $U$  візуалізувати його динамічну вольт-амперну характеристику при двох протилежних напрямках струму.

9. За виглядом цієї характеристики переконатися у омичній властивості контактів між металевими електродами і досліджуванним напівпровідниковим матеріалом, та з діапазону значень  $U$ , котрий відповідає нерівності (1.5), визначити оптимальне значення  $U$  й відповідне йому значення  $I$ , за якими згідно з формулою (1.1) розрахувати повний опір  $R$  зразка.

10. За значеннями повного опору  $R$  та геометричних параметрів  $l$  і  $S$  зразка згідно з формулою (1.2) розрахувати питомий опір  $\rho$  досліджуваного напівпровідникового матеріалу.

11. Використовуючи формули (1.17), (1.20), (1.18) і (1.19) розрахувати відносну та абсолютну похибки визначення  $\rho$  за цим методом дослідження питомого опору напівпровідникового матеріалу.

12. За допомогою контактної пристрою поєднати зразок з промисловим чотириплечим одинарним мостом постійного струму, використовуючи залежно від результату попередніх вимірів повного опору  $R$  зразка чотириза- тискну схему моста (рис. 1.5, *a*) або двозатискну схему моста (рис. 1.5, *б, в*), після чого з максимально можливою точністю визначити величину  $R$ , кори- стуючись:

1) експериментальними значеннями величин опорів резисторів  $R_C$ ,  $R_A$  і  $R_B$ , при яких досягається повне урівноважування моста;

2) формулою (1.3).

13. За значеннями повного опору  $R$  та геометричних параметрів  $l$  і  $S$  зра- зка згідно з формулою (1.2) розрахувати питомий опір  $\rho$  досліджуваного напівпровідникового матеріалу.

14. Використовуючи інформацію про клас точності моста, визначити від- носну похибку виміру  $R$ , а потім за формулами (1.18) і (1.19) розрахувати відносну та абсолютну похибки визначення  $\rho$  за цим методом дослідження питомого опору напівпровідникового матеріалу.

15. Величини параметрів  $R$  і  $\rho$ , а також відносної і абсолютної похибок визначення  $\rho$ , отримані кожним з методів, використаних при виконанні роботи, звести у табл. 1.1, вигляд якої запропоновано нижче.

16. Приступити до оформлення звіту.

Таблиця 1.1 – Значення повного опору  $R$  зразка з геометричними пара- метрами  $l = \dots$  см і  $S = \dots$  см<sup>2</sup>, а також питомого опору  $\rho$  напівпровіднико- вого матеріалу цього зразка і абсолютної  $\Delta\rho$  та відносної  $\Delta\rho/\rho$  похибок ви- значення  $\rho$  залежно від використаного методу дослідження

Метод дослідження	$R$ , Ом	$\rho$ , Ом·см	$\Delta\rho/\rho$ , %	$\Delta\rho$ , Ом·см	$\rho \pm \Delta\rho$ , Ом·см
А-В: статична ВАХ					
А-В: динамічна ВАХ					
Одинарний міст постійного струму					

Примітка: А-В – метод амперметра-вольтметра; ВАХ – вольт-амперна характеристика.

### 1.4.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Основні співвідношення, які використовуються для опису вольт-амперної характеристики зразка і визначення досліджуваних параметрів, а також похибок їхнього визначення.
3. Креслення досліджуваного зразка з його геометричними розмірами.
4. Спрощенні електричні схеми вимірювального устаткування.
5. Таблиця з масивом експериментальних даних, отриманих при вимірі статичної вольт-амперної характеристики зразка і побудована за цими даними статична вольт-амперна характеристика.
6. Копія динамічної вольт-амперної характеристики зразка, візуалізованої за допомогою промислового характерографа.
7. Розрахунки повного опору зразка, питомого опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу, а також абсолютної та відносної похибок визначення останнього.
8. Заповнена табл. 1.1 за наведеним вище зразком.
9. Висновки.

### Запитання для самоперевірки

1. Що є фізичною передумовою можливості визначення питомого електричного опору однорідного напівпровідникового матеріалу за його повним електричним опором?
2. Якими мають бути геометрія зразка з досліджуваного напівпровідникового матеріалу і тип контакту металевих електродів з цим матеріалом при визначенні питомого електричного опору однорідного напівпровідникового матеріалу за його повним електричним опором?
3. Як за експериментальною вольт-амперною характеристикою зразка з досліджуваного напівпровідникового матеріалу переконатися у належній відповідності типу контакту металевих електродів з цим матеріалом до існуючих вимог та визначити повний електричний опір зразка, котрий має не залежати від напруги на зразку?
4. Завдяки якому прийому можна визначити силу струму у досліджуваному зразку з невідомим повним опором без використання амперметра?
5. У чому полягає методика вимірювання статичної вольт-амперної характеристики досліджуваного зразка за так званою схемою амперметра-вольтметра і з яких етапів складається послідовність визначення питомого

електричного опору напівпровідникового матеріалу зразка за цією характеристикою?

6. Як розраховуються абсолютна і відносна похибки визначення питомого електричного опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу за його статичною вольт-амперною характеристикою?

7. Завдяки якій схемі може бути візуалізованою динамічна вольт-амперна характеристика зразка з досліджуваного напівпровідникового матеріалу?

8. З яких етапів складається послідовність визначення питомого електричного опору напівпровідникового матеріалу зразка за його динамічною вольт-амперною характеристикою?

9. Як розраховуються абсолютна і відносна похибки визначення питомого електричного опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу за його динамічною вольт-амперною характеристикою?

10. Яким чином визначається повний опір досліджуваного зразка за допомогою одинарного чотириплечого моста постійного струму?

11. З чим пов'язані і якими є відмінності у схемах одинарного чотириплечого моста постійного струму при визначенні повних опорів досліджуваних зразків у діапазонах  $10^{-4}$  Ом ÷  $10^2$  Ом,  $10^2$  Ом ÷  $10^5$  Ом,  $10^5$  Ом ÷  $10^8$  Ом?

12. Як розраховуються абсолютна і відносна похибки визначення питомого електричного опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу за його повним опором, вимірним одинарним чотириплечим мостом постійного струму?

13. Проаналізувати переваги і недоліки розглянутих у лабораторній роботі методів визначення питомого електричного опору однорідного напівпровідникового матеріалу за його повним електричним опором.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

### **ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ОДНОРІДНИХ ТОНКИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ШАРІВ ЧОТИРИЗОНДОВИМ МЕТОДОМ**

Мета роботи – навчитися визначати питомий електричний опір однорідних тонких напівпровідникових шарів з обмеженою за розмірами поверхню чотиризондовим методом при його реалізації у звичайному однокомбінаційному і двокомбінаційному варіантах.

## 2.1 Загальні відомості

Чотиризондовий метод широко застосовується у лабораторній та виробничій практиці для визначення питомого електричного опору напівпровідникових монокристалів, пластин і однорідних тонких шарів у діапазоні  $10^{-4} \div 5 \cdot 10^3$  Ом·см, а також поверхневого електричного опору неоднорідних за товщиною епітаксialьних, дифузійних й іонно-легованих шарів у діапазоні  $1 \div 5 \cdot 10^5$  Ом [11, 12]. Окрім високих метрологічних показників перевагою чотиризондового методу є те, що для його застосування не потребується створення омичних контактів до зразка та можливе достатньо експресне визначення питомого опору однорідного напівпровідникового матеріалу в зразках різної форми і з різними розмірами. Умовою його застосування з точки зору форми зразка є наявність плоскої поверхні, лінійні розміри якої більші за розміри системи зондів.

Чотиризондовий метод базується на явищі розтікання струму у точці контакту металевого вістря струмового зонда з поверхнею напівпровідника при пропусканні струму  $I_{ij}$  між двома точковими струмовими зондами з номерами  $i$  і  $j$  на цій поверхні та виникнення завдяки зазначеному процесу між двома іншими точками тієї ж самої поверхні, де встановлено два потенціальних металевих точкових зонди з номерами  $h$  і  $k$ , різниці потенціалів  $U_{hk}$ , пов'язаної у разі однорідного напівпровідника певним співвідношенням з його питомим електричним опором  $\rho$  і з особливостями позиціонування системи зондів. При цьому, як показано на рис. 2.1, вказані зонди встановлюються на плоску напівпровідникову поверхню зразка зазвичай або уздовж однієї прямої лінії (рис. 2.1, а), або у вершинах квадрата (рис. 2.1, б).

У теорії чотиризондового методу [11] напівпровідникові шари вважаються тонкими, якщо між їх товщиною  $t$  і найменшою відстанню  $s_{\min}$  між точковими вістрями сусідніх зондів, розташованих уздовж однієї лінії, має місце співвідношення

$$t < 0,4s_{\min} . \quad (2.1)$$

У такому випадку згідно з цією теорією при необмеженості планарних розмірів однорідних напівпровідникових шарів та коли  $i = 1, j = 4$  ( $I_{ij} = I_{14}$ ), а  $h = 2, k = 3$  ( $U_{hk} = U_{23}$ ), питомий опір таких шарів з нижньою ізолюючою границею може бути визначено за формулою



$$\rho = \frac{2\pi t}{\ln \left[ \frac{(s_1 + s_2)(s_2 + s_3)}{s_1 s_3} \right]} \frac{U_{23}}{I_{14}}, \quad (2.2)$$

де  $s_1, s_2, s_3$  – відстані між першим і другим, другим і третім, третім і четвертим зондами відповідно.

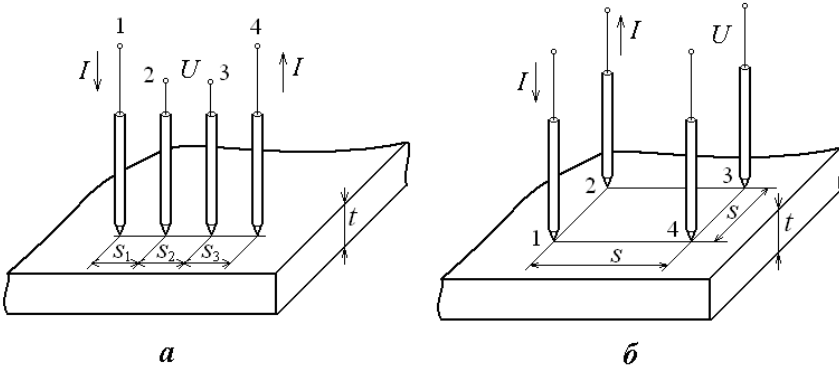


Рисунок 2.1 – Розташування системи зондів 1–4 у точках з відповідними номерами поверх напівпровідникового шару товщиною  $t$ :

- $a$  – уздовж однієї лінії зі співрозмірними відстанями між точковими вістрями сусідніх зондів  $s_1, s_2; s_3$ ;
- $b$  – у вершинах квадрата зі стороною розміром  $s$

Коли

$$s_1 = s_2 = s_3 = s, \quad (2.3)$$

що частіше за все реалізується у лабораторній та виробничій практиці, то формула (2.2) перетворюється і набуває такого вигляду:

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \frac{U_{23}}{I_{14}} \approx 4,53 \frac{U_{23}}{I_{14}} t = G_l \frac{U_{23}}{I_{14}} t, \quad (2.4)$$

де у даному випадку  $G_l = \frac{\pi}{\ln 2} \approx 4,53$ .

Для пропускання струму  $I_{ij}$  і виміру напруги  $U_{hk}$  можна використовувати будь-які пари зондів. При цьому коефіцієнт  $G_l$  у формулі (2.4) буде набувати значень, котрі згідно з можливими комбінаціями використання струмових і потенціальних зондів наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт  $G_l$  для розрахунку питомого опору тонких однорідних напівпровідникових шарів за експериментальними значеннями  $I_{ij}$  та  $U_{hk}$  при однакових міжзондових відстанях і різних комбінаціях використання струмових і потенціальних зондів

Зонди		$G_l$
струмові	потенціальні	
$i-j$	$h-k$	
1-4	2-3	$\pi/\ln 2 \approx 4,53$
1-2	3-4	$2\pi/(\ln 4 - \ln 3) \approx 21,84$
1-3	2-4	$2\pi/(\ln 3 - \ln 2) \approx 15,50$
2-4	1-3	$2\pi/(\ln 3 - \ln 2) \approx 15,50$
3-4	1-2	$2\pi/(\ln 4 - \ln 3) \approx 21,84$
2-3	1-4	$\pi/\ln 2 \approx 4,53$

З табл. 2.1 і формули (2.4) видно, що при фіксованих значеннях  $\rho$ ,  $t$  та  $I_{ij}$  вимірюване значення  $U_{hk}$  зростає зі зменшенням  $G_l$ . Тому використання першої й останньої з наведених у табл. 2.1 комбінацій зондів є найбільш переважним.

При розташуванні вістрій зондів у вершинах квадрата (рис. 2.1, б) незалежно від можливих комбінацій використання струмових і потенціальних зондів з послідовною зміною їх номерів ( $i = 1, j = 2$  ( $I_{ij} = I_{12}$ ) та  $h = 3, k = 4$  ( $U_{hk} = U_{34}$ );  $i = 2, j = 3$  ( $I_{ij} = I_{23}$ ) та  $h = 1, k = 4$  ( $U_{hk} = U_{14}$ );  $i = 3, j = 4$  ( $I_{ij} = I_{34}$ ) та  $h = 1, k = 2$  ( $U_{hk} = U_{12}$ );  $i = 1, j = 4$  ( $I_{ij} = I_{14}$ ) та  $h = 2, k = 3$  ( $U_{hk} = U_{23}$ )) питомий опір однорідних напівпровідникових шарів з нижньою ізолюючою границею може бути визначено за формулою

$$\rho = \frac{2\pi t}{\ln 2} \frac{U_{hk}}{I_{ij}} \approx 9,06 \frac{U_{hk}}{I_{ij}} t = G_{\square} \frac{U_{hk}}{I_{ij}} t, \quad (2.5)$$

де у даному випадку  $G_{\square} = \frac{2\pi}{\ln 2} \approx 9,06$ .

Порівняння значень коефіцієнтів  $G_l \approx 4,53$  і  $G_{\square} \approx 9,06$  дозволяє зробити висновок, що при лінійному розташуванні системи зондів чотиризондовий метод визначення  $\rho$  є найбільш чутливим. Поряд з цим, при розташуванні системи зондів у вершинах квадрата з'являється можливість досліджувати  $\rho$  на зразках з більш обмеженими розмірами у площині розташування вістер зондів.

Як було відмічено раніше, чотиризондовий метод застосовується також для визначення поверхневого електричного опору  $\rho_s$  неоднорідних за товщиною епітаксіальних, дифузійних й іонно-легованих шарів. При цьому для лінійного розташування вістер зондів з однаковими міжзондовими відстанями поверх таких тонких шарів з ізолюючими границями і необмеженими за розмірами їхніми планарними поверхнями поверхневий електричний опір знаходиться за формулою

$$\rho_s = G_l \frac{U_{hk}}{I_{ij}}, \quad (2.6)$$

а для розташування вістер зондів у вершинах квадрата – за формулою

$$\rho_s = G_{\square} \frac{U_{hk}}{I_{ij}}. \quad (2.7)$$

Коли під верхнім тонким напівпровідниковим шаром з поверхневим опором  $\rho_{S_2}$ , на який лінійно з однаковими відстанями встановлюються зонди, знаходиться ще один тонкий напівпровідниковий шар з поверхневим опором  $\rho_{S_1}$  того ж типу провідності, що й верхній, і ці обидва шари мають необмежені розміри планарних поверхонь, а комбінація струмових та потенціальних зондів є найбільш переважною, величини  $\rho_{S_1}$  і  $\rho_{S_2}$  пов'язані з експериментальними значеннями  $I_{ij}$  та  $U_{hk}$  співвідношенням

$$\left( \frac{1}{\rho_{S_1}} + \frac{1}{\rho_{S_2}} \right)^{-1} \approx 4,53 \frac{U_{23}}{I_{14}}. \quad (2.8)$$

При цьому, якщо значення  $\rho_{S_1}$  є визначеним перед виготовленням верхнього шару за будь-якою технологією, то експериментальні значення  $I_{14}$  та  $U_{23}$  для досліджуваного двошарового зразка дозволяють відповідно до співвідношення (2.8) розрахувати  $\rho_{S_2}$  за формулою

$$\rho_{S_2} \approx \left( \frac{I_{14}}{4,53U_{23}} - \frac{1}{\rho_{S_1}} \right)^{-1}. \quad (2.9)$$

Порівняння формул (2.4) і (2.5) відповідно з формулами (2.6) і (2.7) показує, що у випадку однорідного тонкого напівпровідникового шару завтовшки  $t$  зв'язок між його питомим й поверхневим опором описується співвідношенням

$$\rho = \rho_s t. \quad (2.10)$$

Тому якщо верхній шар досліджуваного двошарового зразка є однорідним за електричними властивостями, то після визначення для нього  $\rho_{S_2}$  за формулою (2.9) величина  $\rho_2$  може бути розрахована за формулою (2.10).

## **2.2 Вплив форми та реальних розмірів планарної поверхні тонких напівпровідникових шарів при визначенні поверхневого і питомого опорів однокомбінаційним чотиризондовим методом**

### **2.2.1 Лінійне розташування системи зондів з однаковими міжзондовими відстанями**

Якщо при виконанні співвідношення (2.1) геометричні розміри планарної поверхні однорідного напівпровідникового шару і міжзондові відстані є сумірними, то значення коефіцієнта  $G_l$  у формулах (2.4) та (2.6) будуть відрізнятися від наведених у табл. 2.1. Це зумовлено підвищенням

густини струму у досліджуваному зразку зі зменшенням його об'єму, а тому і підвищенням вимірюваного значення  $U_{hk}$  при незмінних значеннях  $I_{ij}$ ,  $\rho$  і  $t$ .

Залежність коефіцієнта  $G_l$  від геометричних розмірів таких зразків круглої та прямокутної форми розрахована і неодноразово експериментально підтверджена у відповідних науково-дослідних роботах, зокрема, у [9, 10]. Так, наприклад, згідно з результатами цих досліджень для зразка круглої форми з діаметром  $D$ , котрий має ізолюючі поверхні, що обмежують його, у загальному випадку, коли центр лінійної системи зондів зміщено на  $2\alpha s$  у напрямку лінії зондів відносно геометричного центра зразка та на  $2\beta s$  у напрямку, перпендикулярному до лінії зондів (що зображено на рис. 2.2, а), коефіцієнт  $G_l$  розраховується за формулою

$$G_l = \frac{\pi}{\ln(2F)}, \quad (2.11)$$

де

$$F = \left\{ \frac{\left[ MH(s/D)^4 - (M+H-16)(s/D)^2 + 1 \right] \times \dots}{\left[ MQ(s/D)^4 - (M+Q-4)(s/D)^2 + 1 \right] \times \dots} \times \left[ PQ(s/D)^4 - (P+Q-16)(s/D)^2 + 1 \right]^{1/2} \dots \dots \dots \left[ PH(s/D)^4 - (P+H-4)(s/D)^2 + 1 \right] \right\},$$

$$M = (3 + \alpha)^2 + \beta^2, \quad Q = (1 + \alpha)^2 + \beta^2,$$

$$P = (3 - \alpha)^2 + \beta^2, \quad H = (1 - \alpha)^2 + \beta^2.$$

При розташуванні зондової групи у центрі такого зразка ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ ; рис. 2.2, б) формула (2.11) зводиться до вигляду

$$G_l = \frac{\pi}{\ln 2 + \ln \left[ \frac{(1 + 3s^2/D^2)}{(1 - 3s^2/D^2)} \right]} \quad (2.12)$$

Для вибіркових значень відношення  $s/D$  у випадку зразків круглої форми значення коефіцієнта  $G_l$ , розраховані за формулою (2.12), наведено в табл. 2.2.

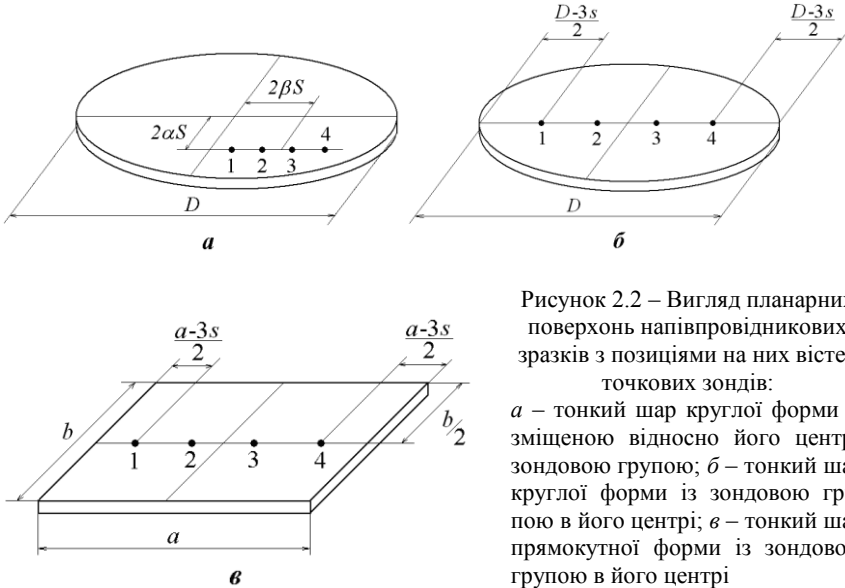


Рисунок 2.2 – Вигляд планарних поверхонь напівпровідникових зразків з позиціями на них вістер точкових зондів:

$a$  – тонкий шар круглої форми зі зміщеною відносно його центра зондовою групою;  $b$  – тонкий шар круглої форми із зондовою групою в його центрі;  $в$  – тонкий шар прямокутної форми із зондовою групою в його центрі

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнта  $G_l$  для круглих тонких напівпровідникових шарів з ізолюючими обмежуючими поверхнями при різних співвідношеннях  $s/D$

$s/D$	$G_l$	$s/D$	$G_l$	$s/D$	$G_l$	$s/D$	$G_l$	$s/D$	$G_l$
0,000	4,532	0,025	4,508	0,050	4,436	0,075	4,322	0,100	4,171
0,005	4,531	0,030	4,497	0,055	4,417	0,080	4,294	0,133	3,927
0,010	4,528	0,035	4,485	0,060	4,395	0,085	4,265	0,200	3,362
0,015	4,524	0,040	4,470	0,065	4,372	0,090	4,235	0,250	2,929
0,020	4,517	0,045	4,454	0,070	4,348	0,095	4,204	0,333	2,266

У табл. 2.3 наведено значення коефіцієнта  $G_I$  для прямокутних зразків з обмеженими розмірами планарної поверхні у випадку, коли зондова група розміщується у центрі зразка, котрий має довжину  $a$  та ширину  $b$ , а лінія зондів зорієнтована вздовж осьової лінії, яка паралельна до більшої за розмірами сторони (рис. 2.2, в).

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнта  $G_I$  для прямокутних тонких напівпровідникових шарів з ізолюючими обмежуючими поверхнями при різних співвідношеннях  $a/b$  і  $b/s$

$b/s$	$G_I$			
	$a/b = 1$	$a/b = 2$	$a/b = 3$	$a/b \geq 4$
1,00			0,9988	0,9994
1,25			1,2467	1,2248
1,50		1,4788	1,4893	1,4893
1,75		1,7196	1,7238	1,7238
2,00		1,9454	1,9475	1,9475
2,50		2,3532	2,3541	2,3541
3,00	2,4575	2,7000	2,7005	2,7005
4,00	3,1137	3,2246	3,2248	3,2248
5,00	3,5098	3,5749	3,5750	3,5750
7,50	4,0095	4,0361	4,0362	4,0362
10,00	4,2209	4,2357	4,2357	4,2357
15,00	4,3882	4,3947	4,3947	4,3947
20,00	4,4516	4,4553	4,4553	4,4553
40,00	4,5120	4,5129	4,5129	4,5129
$\infty$	4,5324	4,5324	4,5324	4,5324

### 2.2.2 Розташування системи зондів у вершинах квадрата

При дослідженні круглих зразків з розташуванням зондів у вершинах квадрата, коли у загальному випадку центр зондового квадрата зміщено на  $2as$  у напрямку сторони квадрата уздовж якої тече струм, і на  $2bs$  у перпендикулярному до неї напрямку (рис. 2.3, а), коефіцієнт  $G_{\square}$  розраховується за формулою

$$G_{\square} = \frac{2\pi}{\ln(2Z)}, \quad (2.13)$$

де при

$$\begin{aligned} A &= (\alpha - 1)^2 + (\beta + 1)^2, & C &= (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2, \\ B &= (\alpha + 1)^2 + (\beta + 1)^2, & E &= (\alpha + 1)^2 + (\beta - 1)^2 \end{aligned}$$

множник  $Z$  знаходиться таким чином:

$$Z = \left\{ \frac{\left[ AE(s/D)^4 - (A + E - 8)(s/D)^2 + 1 \right] \times \dots}{\left[ AC(s/D)^4 - (A + C - 4)(s/D)^2 + 1 \right] \times \dots} \times \left[ BC(s/D)^4 + (B + C - 8)(s/D)^2 + 1 \right] \right\}^{1/2} \dots \times \left[ BE(s/D)^4 - (B + E - 4)(s/D)^2 + 1 \right] \dots$$

При розташуванні зондів у центрі зразка ( $\alpha = \beta = 0$ ; рисунок 2.3, б) формула (2.13) зводиться до вигляду

$$G_{\square} = \frac{2\pi}{\ln 2 + \ln \left[ \frac{(1 + 2s^2/D^2)}{(1 + 4s^2/D^2)} \right]}. \quad (2.14)$$

У окремому випадку квадратного зразка (рис. 2.3, в, г) коефіцієнт  $G_{\square}$  слабо залежить від кута повороту  $\varphi$  діагоналі зондового квадрата відносно осової лінії зразка. Максимальна розбіжність в значеннях  $G_{\square}$  має місце при зміні  $\varphi$  від  $0^\circ$  до  $45^\circ$  і перевищує 5 % лише у вузькому інтервалі  $0,5 \leq s/a \leq 0,7$  (рис. 2.4).



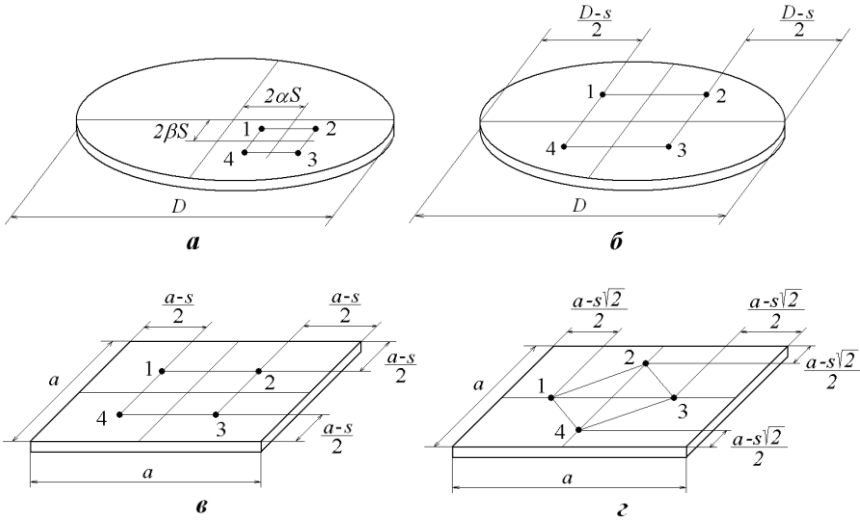


Рисунок 2.3 – Вигляд планарних поверхонь напівпровідникових зразків з позиціями на них вістер точкових зондів:  
*a* – тонкий шар круглої форми зі зміщенням відносно його центра зондовим квадратом; *б* – тонкий шар круглої форми із зондовим квадратом в його центрі; *в* – тонкий шар квадратної форми із зондовим квадратом в його центрі з розгортанням діагоналі зондового квадрата на кут  $\varphi = 45^\circ$  відносно осьової лінії зразка; *г* – тонкий шар квадратної форми із зондовим квадратом в його центрі при  $\varphi = 0^\circ$

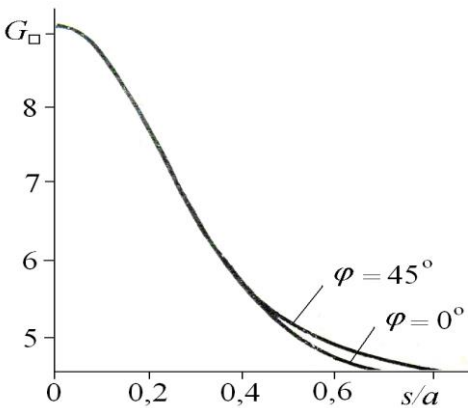


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта  $G_{\square}$  від співвідношення  $s/a$  при розташуванні зондів у вершинах квадрата на квадратній поверхні тонкого напівпровідникового шару зі стороною  $a$

## 2.3 Методика визначення поверхневого і питомого опорів однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом

### 2.3.1 Однокомбінаційний чотиризондовий метод

Принципову електричну схему методу зображено на рис. 2.5 стосовно лінійної системи розташування зондів поверх досліджуваного напівпровідникового шару. Виходячи з обґрунтованої у пункті 2.1 найбільш прийнятної комбінації струмових і потенціальних зондів, на рис. 2.5 струмові зонди мають номери 1 і 4, а потенціальні – номери 2 і 3.

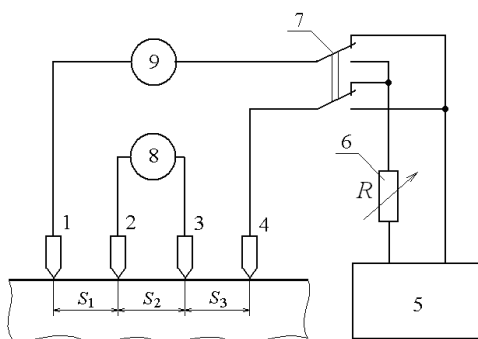


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема чотиризондового методу:

1–4 – система зондів; 5 – джерело постійної напруги; 6 – змінний резистор для регулювання режиму роботи джерела живлення вимірювального кола; 7 – перемикач напруги струму; 8 – прилад для виміру різниці потенціалів  $U_{23}$ ; 9 – прилад для виміру струму  $I_{14}$

Струм  $I_{14}$  через зонди 1 і 4 створюється регулюючим джерелом постійної напруги 5, котре завдяки змінному резистору 6 з достатньо високим опором працює у режимі генератора струму. Перемикач 7 дозволяє змінювати напрям струму у напівпровідниковому шарі. Різниця потенціалів  $U_{23}$ , яка виникає між відповідними зондами при протіканні у напівпровідниковому шарі струму  $I_{14}$ , реєструється потенціометром, подібним, наприклад, до Р4833, або цифровим вольтметром 8, подібним, наприклад, до В7-37 з якомога більшим входним опором для мінімізації струму у колі потенціальних зондів. Завдяки цьому падіння напруги на контактних опорах вимірювальних зондів є нехтовно малим у порівнянні з різницею потенціалів  $U_{23}$ . Сила струму  $I_{14}$  реєструється цифровим міліамперметром або, подібно до раніше зображеної схеми амперметра-вольтметра (рис. 1.3), шляхом виміру напруги на еталонному струмовому резисторі, увімкненому послідовно у коло зондів 1 і 4. Найменший робочий струм визначається можливістю виміру досить малих напруг  $U_{23}$ , а найбільший обмежується інжекцією нерівноважних носіїв заряду у напівпровідниковий матеріал зі струмового зонду і нагріванням зразка. У табл. 2.4 наведено рекомендовані значення гранич-

них робочих струмів, а також мінімальних вхідних опорів вольтметра для виміру  $U_{23}$  залежно, наприклад, від питомого опору кремнію.

Таблиця 2.4 – Рекомендовані значення граничних робочих струмів  $I_{14}$ , а також мінімальних вхідних опорів вольтметра  $R_B$  для виміру  $U_{23}$  залежно від питомого опору  $\rho$  кремнію

$\rho$ , Ом·см	$I_{14}$ , мА	$R_B$ , Ом
$10^{-3}$	100	$10^3$
$10^{-2}$	10	$10^4$
$10^{-1}$	10	$10^5$
1,0	1	$10^6$
10	1	$10^7$
$10^2$	0,1	$10^8$
$10^3$	0,01	$2 \cdot 10^8$

Це забезпечується тим, що підпружинені зонди ковзають в направляючих отворах, котрі зроблені у діелектричному тілі головки. Залежно від товщини і міцності досліджуваного напівпровідникового шару рекомендована сила підтискання зондів складає 0,3-2,0 Н.

Для зниження похибки визначення  $\rho_S$  і  $\rho$  поряд з урахуванням рекомендацій, наведених у табл. 2.4, треба забезпечити якомога суттєвіше зменшення похибок іншої природи. Згідно з [11, 12] причинами таких похибок можуть бути: зумовлене поверхневими і зовнішніми факторами порушення первинної однорідності тонких напівпровідникових шарів за їх товщиною; кінцеві розміри контактних площадок під зондами; деяке відхилення реальних міжзондових відстаней від використаних при розрахунку  $\rho_S$  і  $\rho$  за відповідними формулами; виникнення термо-ЕРС уздовж лінії зондів під впливом градієнта температури, породженого локальним нагрівом зразка струмовими зондами; фотопровідність і фото-ЕРС, котрі виникають під впливом опромінювання та стають помітними при  $\rho > 200$  Ом·см.

Найбільш істотною причиною порушення однорідності тонких напівпровідникових шарів за їх товщиною при незмінній концентрації основної легуючої домішки в усіх мікрооб'єктах таких зразків може бути виник-

Система з чотирьох зондів конструктивно оформлюється у вигляді чотиризондової головки, тіло якої виготовляється з діелектричного матеріалу. Зонди виготовляються з твердих металів, наприклад вольфраму, або сплавів, наприклад карбідів вольфраму ВК-10, ВК-15, ВК-20. Відстані між зондами є строго фіксованими. Кут заточки вістер зондів складає 45-150°. Зондова головка прикріплюється до маніпулятора, за допомогою якого зонди встановлюються на поверхню зразка. Конструкція головки повинна обов'язково забезпечувати індивідуальне підтискання кожного зонда до поверхні зразка.

нення приповерхневої області просторового заряду (ОПЗ) завширшки  $W_{ОПЗ}$ , що обумовлюється взаємодією електронів або дірок приповерхневого об'єму напівпровідникових шарів з їх поверхневими електронними станами різної природи. Залежно від природи цих станів і їх поверхневої густини  $N_s$ , а також від типу і об'ємної концентрації  $N$  повністю іонізованої легуючої домішки ОПЗ буде або збагачена, або збіднена основними носіями заряду у порівнянні з рештою об'єму напівпровідникового шару. При цьому згідно з [13]

$$W_{i i \zeta} \propto \left( \frac{\varepsilon_0 \varepsilon k T}{e^2 N} \right)^{1/2}, \quad (2.15)$$

де  $\varepsilon_0$  – електрична стала вакууму, котра дорівнює  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність напівпровідника;  $k$  – стала Больцмана, котра дорівнює  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $e$  – абсолютне значення заряду електрона, котре дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Якщо ОПЗ збагачена основними носіями заряду, то у формулі (2.15) знак пропорційності можна змінити на знак приблизної рівності. При ОПЗ, збідненій основними носіями заряду,

$$W_{i i \zeta} = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon k T}{e^2 N} \right)^{1/2} \left( \frac{e\varphi_s}{k T} \right)^{1/2} = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \varphi_s}{e N} \right)^{1/2}, \quad (2.16)$$

де  $\varphi_s$  – електростатичний потенціал зарядженої поверхні напівпровідникового шару.

З іншого боку, коли ОПЗ збіднена основними носіями заряду, то її ширина при умові повного заповнення всіх поверхневих електронних станів з густиною  $N_s$  приблизно може бути визначена таким чином:

$$W_{i i \zeta} \approx N_s / N. \quad (2.17)$$

Тоді з формул (2.16) і (2.17) випливає, що

$$\varphi_s \approx \frac{e N_s^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon N}. \quad (2.18)$$

Користуючись співвідношеннями (2.15) – (2.18) досить легко знайти, що, наприклад, для монокристалічного кремнію при 300 К,  $N_s < 10^{11} \text{ см}^{-2}$  і  $N > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , незалежно від типу області просторового заряду,  $W_{\text{ОПЗ}} < 0,01 \text{ мкм}$ , а у випадку ОПЗ, збідненої основними носіями заряду,  $\varphi_s < 0,01 \text{ В}$ , тобто  $e\varphi_s/(kT) < 0,4$ . Ці числові значення дозволяють вважати, що при товщині  $t$  монокристалічного шару кремнію більше 0,1 мкм у разі  $N > 10^{17} \text{ см}^{-3}$  зазначеним типом його неоднорідності практично можна знехтувати. Згідно з [14] значенням  $N > 10^{17} \text{ см}^{-3}$  як у випадках електронного, так і діркового кремнію відповідають значення  $\rho < 10^{-1} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Досить схожими до наведених для кремнію є діапазони  $t$  і  $\rho$ , у межах яких можна знехтувати впливом поверхні на електричну однорідність інших, практично важливих і досить сильно легованих напівпровідникових шарів, до яких належать, наприклад, шари індій-олов'яного оксиду (ІТО), ZnO:Al, ZnO:In, CdS:In, Cu<sub>2-x</sub>S, Cu<sub>2-x</sub>Te та інші, подібні до перелічених.

При отриманні формул (2.2) та (2.4)-(2.9) припускалось, що контакт зондів з поверхнею напівпровідника є точковим. Але очевидно, що на практиці ця умова не може бути виконана, внаслідок чого у результат визначення  $\rho_s$  і  $\rho$  вноситься систематична похибка  $\delta$ . Ця похибка залежить від способу розташування зондів.

При лінійному еквідистантному (див. співвідношення (2.3)) розташуванні зондів величина  $\delta$  складається з систематичної похибки  $\delta_r$ , обумовленої скінченням радіусом  $r$  контактів з напівпровідником струмових зондів, і з систематичної похибки  $\delta_U$ , обумовленої скінченням радіусом  $r$  контактів з напівпровідником потенціальних зондів. Якщо контакт скінченного радіуса  $r$  має місце під одним зі струмових зондів, наприклад під зондом 1, то

$$\delta_{I_1} = \frac{1}{2 \ln 2} \ln \left( \frac{6 - r^2/s^2}{6 - 2r^2/s^2} \right). \quad (2.19)$$

Якщо контакт скінченного радіуса  $r$  має місце під одним з потенціальних зондів, наприклад під зондом 2, то

$$\delta_{U_2} = -\frac{1}{2 \ln 2} \ln \left( \frac{2 + r^2/s^2}{2 - r^2/s^2} \right). \quad (2.20)$$

При розташуванні зондів у вершинах квадрата систематична похибка у випадках контакту скінченного радіуса  $r$  як під одним із струмових зондів  $\delta_r$ , так і під одним з потенціальних зондів  $\delta_U$ , описується співвідношенням

$$\delta_{I,U} = -\frac{1}{2 \ln 2} \ln \left[ \frac{2(1+r^4/s^4)}{1+(1-r^2/s^2)^2} \right]. \quad (2.21)$$

Для перелічених вище випадків, якщо контакти скінченного радіуса  $r$  мають місце під усіма чотирма зондами, то результуюче значення  $\delta$  можна наближено оцінити як алгебраїчну суму систематичних похибок, обумовлених скінченим значенням  $r$  для кожного з чотирьох зондів.

Легко довести, що при

$$\frac{r}{s} < 0,05 \quad (2.22)$$

систематичною похибкою  $\delta$  практично можна знехтувати. Експериментально у разі  $s \approx 1$  мм співвідношення (2.22) може бути реалізоване при  $r < 50$  мкм, що досить легко забезпечити, наприклад, шляхом електрохімічного заточування вольфрамової проволочки діаметром 0,3-0,5 мм до радіуса закруглення її торця близько 30 мкм.

При періодичному використанні зондової головки між стінками її направляючих отворів і зондами під впливом взаємного тертя цих конструкційних елементів можуть декілька збільшуватись первинні мікротвори. Це повинно зумовлювати невідтворюваність відстані між зондами. Якщо місце знаходження контакту кожного зонда з напівпровідником флюктує незалежно з середнім відхиленням  $\Delta s$ , то випадкова відносна похибка визначення питомого опору за формулами (2.6) і (2.10) при еквідистантному лінійному розташуванні зондів з довірчою ймовірністю 0,95 розраховується таким чином:

$$\varepsilon_\rho(\Delta s) = \frac{\sqrt{5}}{2 \ln 2} (2\Delta s/s) \cdot 100\%. \quad (2.23)$$

Для усунення похибки, пов'язаної з можливим виникненням термо-ЕРС, вимір різниці потенціалів між потенціальними зондами треба проводити при двох протилежних напрямках струму через струмові зонди, після чого отримані значення  $U_{hk}$  слід усереднити.

Для усунення похибок, пов'язаних з можливим впливом фотопродності і фото-ЕРС, виміри на зразках з  $\rho > 200$  Ом·см слід здійснювати при їх затемненні. Між тим, як було показано вище, наближення тонкого однорідного напівпровідникового шару насправді може відповідати зразкам тільки з  $\rho < 10^{-1}$  Ом·см, а тому для таких шарів цими похибками можна знехтувати навіть при вимірах без їх затемнення.

### 2.3.2 Двокомбінаційний чотиризондовий метод

Як виходить із усього наведеного вище, найбільш тяжкими для усунення джерелами випадкової похибки є невідтворюваність міжзондових відстаней і пов'язана з цим помилка у визначенні числових значень розглянутих раніше поправкових коефіцієнтів  $G_I$  та  $G_{\square}$ , котрі враховують вплив геометрії планарної поверхні досліджуваних зразків. Застосування двокомбінаційного чотиризондового методу дозволяє у деяких випадках обмежити ці джерела похибок. Суть зазначеного методу і методика визначення  $\rho$  тонких однорідних напівпровідникових шарів за його допомогою полягають у такому.

При лінійному еквідистантному розташуванні чотирьох зондів у довільній області зразка (див. рис. 2.1, *a*) за допомогою схеми, зображеної на рисунку 2.5, та з урахуванням перелічених у пункті 2.3.1 вимог до умов проведення коректного експерименту виконуються послідовно два виміри, за результатами яких розраховуються опори  $R_a$  і  $R_b$ :

$$R_a = U_{23} / I_{14}, \quad (2.24)$$

$$R_b = U_{24} / I_{13}. \quad (2.25)$$

Далі згідно з [12] для тонкого шару круглої форми за умови розташування лінії зондів вздовж його діаметра коефіцієнт  $G_I^*$  може бути розрахований за формулою

$$G_l^* = \frac{\pi}{\ln 2} \left( 1 + \frac{1}{\xi} \right) f(\xi), \quad (2.26)$$

де  $\xi = (R_a/R_b) / [(R_a/R_b) - 1]$ , а функція  $f(\xi)$  задовольняє рівняння

$$\left( \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \right) \frac{\ln 2}{f(\xi)} = ch^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[ \frac{\ln 2}{f(\xi)} \right] \right\}.$$

Множник

$$\left( 1 + \frac{1}{\xi} \right) f(\xi)$$

у співвідношенні (2.26) є поправковою функцією, яка враховує геометричні особливості досліджуваного зразка. Тоді з урахуванням (2.24) – (2.26) формула (2.4) для визначення  $\rho$  набуває вигляду

$$\rho = R_a G_l^* t. \quad (2.27)$$

Перевага такого способу введення поправкової функції полягає у тому, що ця функція не залежить від міжзондових відстаней, у зв'язку з чим виключаються як випадкова похибка, обумовлена невідтворюваністю міжзондових відстаней, так і пов'язана з цим похибка визначення числового значення поправкової функції.

З похибкою не більше 0,05 % в інтервалі значень  $R_a/R_b$ , котрий визначається саме чотиризондовим методом, залежність  $G_l^*$  від  $R_a/R_b$  виражається поліномом другого ступеня

$$G_l^* = -14,696 + 25,173(R_a/R_b) - 7,872(R_a/R_b)^2. \quad (2.28)$$

Тобто при реалізації співвідношення  $R_a/R_b$  формула (2.27) для визначення  $\rho$  з урахуванням (2.28) остаточно набуває такого вигляду:

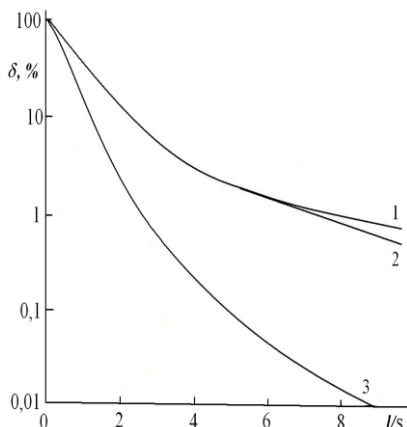


$$\rho = R_a[-14,696 + 25,173(R_a/R_b) - 7,872(R_a/R_b)^2]t. \quad (2.29)$$

Теоретично та експериментально доведено, що вираз (2.28), а тому і формула (2.29), є придатними й при довільній орієнтації лінії зондів, якщо система зондів знаходиться на деякій відстані від краю круглого зразка.

Рисунок 2.6 – Залежність випадкової похибки визначення  $\rho_s$  від  $l/s$  при орієнтуванні лінії зондів перпендикулярно до діаметра  $D$  зразка:

1 та 2 – однокомбінаційний чотиризондовий метод (1 –  $D/s = 80$ ; 2 –  $D/s = \infty$ ); 3 – двокомбінаційний чотиризондовий метод



При відстані  $l \geq 5s$  від краю круглого зразка похибка розрахунку  $\rho$  або  $\rho_s$  не перевищує 0,1 %. Таким чином, випадкова похибка двокомбінаційного чотиризондового методу набагато нижче від похибки традиційного однокомбінаційного чотиризондового методу, що наглядно ілюструє рис. 2.6 з [12].

## 2.4 Порядок виконання роботи

### 2.4.1 Завдання для виконання роботи

Однокомбінаційним і двокомбінаційним чотиризондовими методами визначити питомі опори однорідних тонких напівпровідникових шарів прямокутної й круглої форми з обмеженими розмірами планарних поверхонь. Оцінити та порівняти відносні похибки визначення питомого опору зразків залежно від особливостей реалізації чотиризондового методу.

### 2.4.2 Порядок дій

1. За допомогою наданої інструкції, котра знаходиться на робочому місці біля відповідного вимірювального устаткування, ознайомитись з особливостями використання лабораторного стенда для виміру питомого опору тонких напівпровідникових шарів відповідно до схеми, наведеної на

рис. 2.5, а також з особливостями конструкції чотиризондової головки, до складу якої входить лінійна еквідистантна система зондів.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного вимірювального устаткування підключити його до живильної електромережі для попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача для досліджень однорідні тонкі напівпровідникові зразки прямокутної та круглої форми з розмірами їх планарних поверхонь, що у декілька разів перевищують відстань між першим і четвертим крайніми зондами головки, та з питомим опором менше 0,1 Ом·см, котрі можуть являти собою плівкові шари на жорсткій підкладці з матеріалу, що має набагато більший питомий опір, або напівпровідникові пластини за товшки не більше 200 мкм.

4. Характерні планарні розміри наданих для дослідження зразків визначити за допомогою мірної лінійки, товщину напівпровідникових шарів з'ясувати у викладача. Визначені геометричні параметри кожного із зразків занести у відповідні рядки табл. 2.5. Після цього на підставі даних з табл. 2.2 і 2.3 для кожного зразка занести у табл. 2.5 значення коефіцієнта  $G_I$ .

Таблиця 2.5 – Матеріали напівпровідникових шарів і геометричні параметри досліджуваних зразків та поправкові коефіцієнти  $G_I$ , визначені після наведених у таблиці результатів необхідних для цього проміжних розрахунків

Номер зразка	Матеріал зразка	$s$ , мм	$D$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	$t$ , мм	$t/s$	$s/D$	$b/s$	$a/b$	$G_I$
1											
2											

5. Розмістити напівпровідниковий зразок на предметному столику під зондовою голівкою таким чином, щоб зонди проектувались на планарну поверхню зразка як на рис. 2.2, *б* у випадку круглої планарної поверхні або як на рис. 2.2, *в* у випадку прямокутної планарної поверхні, і за допомогою мікроманіпулятора опустити голівку до дотику зондів з поверхнею зразка з силою не менше 0,3 Н. Про належне підтискання усіх чотирьох зондів до поверхні зразка мають свідчити наявність заданої сили струму  $I_{14}$  у колі зондів 1 і 4 та різниці потенціалів  $U_{23}$  між зондами 2 і 3.

6. Встановити силу струму  $I_{14}$  не вищу від вказаної у табл. 2.4 і виміряти різницю потенціалів  $U_{23}$ . Стабільність величини  $U_{23}$  протягом декількох хвилин при незмінному значенні величини  $I_{14}$  має бути підтвердженням оптимального вибору останньої. У противному разі слід зменшувати  $I_{14}$ , поки не буде досягнуто вказаної стабільності  $U_{23}$ .

7. Виміряти для кожного із зразків стабільне значення  $U_{23}$  і відповідне до нього значення  $I_{14}$  занести у табл. 2.6, після чого для досліджуваних зразків за формулою (2.4), котра відповідає однокомбінаційному чотиризондовому методу, розрахувати питомі опори напівпровідникових матеріалів і теж занести їх значення у відповідні рядки табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати експериментів з визначення питомих опорів напівпровідникових матеріалів досліджуваних зразків однокомбінаційним чотиризондовим методом та розрахунку похибок такого визначення

Номер зразка	$I_{14}$ , А	$U_{23}$ , В	$\rho$ , Ом·см	$\varepsilon_p(\Delta s)$ , %	$\Delta\rho$ , Ом·см
1					
2					

8. За формулою (2.23) розрахувати випадкову відносну похибку  $\varepsilon_p(\Delta s)$  визначення питомих опорів досліджених напівпровідникових шарів однокомбінаційним чотиризондовим методом, після чого занести її значення у відповідний стовпчик табл. 2.6. Отримання необхідних даних для виконання вказаного розрахунку слід здійснити таким чином. За допомогою оптичного стереоскопічного мікроскопа (наприклад, типу МБС-9) виміряти для використаної лінійної системи зондів з точністю до 0,05 мм міжзондові відстані  $s_1$ ,  $s_2$  та  $s_3$ . Після цього розрахувати середнє відхилення  $\Delta s$  за формулою

$$\square s = (|s - s_1| + |s - s_2| + |s - s_3|) / 3, \text{ де } s = (s_1 + s_2 + s_3) / 3.$$

9. Абсолютні похибки  $\Delta\rho$  визначених значень  $\rho$  розрахувати за формулою (1.19) і теж занести у відповідні рядки табл. 2.6.

10. Для визначення питомого опору напівпровідникового шару зразка № 1 круглої форми двокомбінаційним чотиризондовим методом виконати

необхідні для цього згідно з пунктом 2.3.2 виміри та інші необхідні дії у запропонованій нижче послідовності.

11. Стосовно зразка № 1 повторити дії 5-6, і виміряні при цьому значення  $U_{23}$  та  $I_{14}$  занести у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати експериментів з визначення питомого опору напівпровідникового матеріалу круглого зразка двокомбінаційним чотиризондовим методом та розрахунку похибок такого визначення

Номер зразка	$I_{14}$ , А	$U_{23}$ , В	$R_a$	$I_{13}$ , А	$U_{24}$ , В	$R_b$	$\rho$ , Ом·см	$\Delta\rho/\rho$ , %	$\Delta\rho$ , Ом·см
1									

12. Здійснити вимір різниці потенціалів  $U_{24}$  при силі струму  $I_{13} = I_{14}$  і занести ці значення у табл. 2.7.

13. За формулами (2.24) і (2.25) розрахувати значення  $R_a$  та  $R_b$  і занести їх у табл. 2.7.

14. За формулою (2.29) розрахувати питомий опір напівпровідникового шару зразка № 1 і занести у табл. 2.7 визначене значення  $\rho$ .

15. У табл. 2.7 навести відоме значення максимальної відносної похибки визначення  $\rho$  двокомбінаційним чотиризондовим методом та розраховану за формулою (1.19) максимальну абсолютну похибку  $\Delta\rho$  отриманого значення.

16. Приступити до оформлення звіту.

### 2.4.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Основні співвідношення, які використовуються для визначення питомого опору тонких однорідних напівпровідникових шарів і похибок його визначення при використанні одно- та двокомбінаційного чотиризондового методу.
3. Креслення досліджуваних зразків з їхніми геометричними розмірами.
4. Спрощена електрична схема вимірювального кола.
5. Розрахунки питомих опорів досліджуваних напівпровідникових матеріалів, а також абсолютних та відносних похибок визначення вказаних параметрів.
6. Заповнені табл. 2.5 – 2.7 за наведеними вище зразками.
7. Висновки.

## Запитання та завдання для самоперевірки

1. Яке фізичне явище є підґрунтям для чотиризондового методу визначення питомого опору напівпровідникового матеріалу?
2. За яким критерієм в теорії чотиризондового методу напівпровідникові шари вважаються тонкими?
3. Що є найбільш істотним чинником порушення однорідності тонких напівпровідникових шарів за їх товщиною при незмінній концентрації основної легуючої домішки в усіх мікрооб'ємах таких зразків?
4. Обґрунтувати діапазони концентрацій основних носіїв заряду в напівпровідникових шарах і відповідних до них питомих опорів, при яких ці шари за умов незмінної концентрації основної легуючої домішки в усіх їхніх мікрооб'ємах і товщини більше 0,1 мкм можна вважати електрично однорідними.
5. Користуючись принциповою електричною схемою чотиризондового методу пояснити суть його реалізації у однокомбінаційному варіанті для визначення питомого опору тонких однорідних напівпровідникових шарів з планарними діелектричними поверхнями необмежених розмірів і навести формули, за допомогою яких опрацьовуються відповідні експериментальні дані для визначення  $\rho$  таких шарів при використанні лінійної системи зондів та при розташуванні зондів у вершинах квадрата.
6. Пояснити методику урахування особливостей форми і реальних геометричних розмірів планарних поверхонь досліджуваних напівпровідникових шарів при визначенні  $\rho$  однокомбінаційним чотиризондовим методом.
7. Перелічити основні причини і навести формули для розрахунку похибок визначення  $\rho$  однокомбінаційним чотиризондовим методом.
8. Які переваги і недоліки притаманні однокомбінаційному чотиризондовому методу?
9. Сформулювати суть двокомбінаційного чотиризондового методу і його переваги у порівнянні з однокомбінаційним чотиризондовим методом.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воробьев Ю.В., Добровольский В.Н, Стриха В.И. Методы исследования полупроводников. – Киев: Вища школа, 1988.
2. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. – М.: Радио и связь, 1982.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.1. – М.: Мир, 1984.

4. Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерение параметров полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1970.
5. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. – М.: Мир, 1975.
6. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др./ Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990.
8. Назаров Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высш. шк., 2002.
9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Юнович А.Э., Остробородова В.В. Спецпрактикум по физике полупроводников. – М.: МГУ, 1976.
11. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур – М.: Радио и связь, 1985.
12. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. – М.: Высш. шк., 1987.
13. Пека Г.П. Физические явления на поверхности полупроводников. – Киев: Вища школа, 1984.
14. Технология полупроводникового кремния / Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоный И.Ф. и др. – М.: Металлургия, 1992.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. Визначення питомого електричного опору однорідних напівпровідників за їхнім повним електричним опором.....	4
1.1 Загальні відомості.....	4
1.2 Метод амперметра-вольтметра і особливості його реалізації.....	7
1.2.1 Визначення повного електричного опору за результатами дослідження вольт-амперної характеристики.....	7
1.2.2 Вимірювання статичної вольт-амперної характеристики і визначення повного електричного опору зразка за отриманими результатами.....	8
1.2.3 Вимірювання динамічної вольт-амперної характеристики і визначення повного електричного опору зразка за отриманими результатами.....	13
1.3 Метод одинарного моста постійного струму і особливості його реалізації.....	16
1.4 Порядок виконання роботи.....	19
1.4.1 Завдання для виконання роботи.....	19
1.4.2 Порядок дій.....	19
1.4.3 Зміст звіту.....	22
Запитання для самоперевірки.....	22
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. Визначення питомого електричного опору однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом.....	23
2.1 Загальні відомості.....	24
2.2 Вплив форми та реальних розмірів планарної поверхні тонких напівпровідникових шарів при визначенні поверхневого і питомого опорів однокомбінаційним чотиризондовим методом.....	28
2.2.1 Лінійне розташування системи зондів з однаковими між зондовими відстанями.....	28
2.2.2 Розташування системи зондів у вершинах квадрата.....	31
2.3 Методика визначення поверхневого і питомого опорів однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом.....	34
2.3.1 Однокомбінаційний чотиризондовий метод.....	34
2.3.2 Двокомбінаційний чотиризондовий метод.....	39
2.4 Порядок виконання роботи.....	41
2.4.1 Завдання для виконання роботи.....	41
2.4.2 Порядок дій.....	42
2.4.3 Зміст звіту.....	44
Запитання та завдання для самоперевірки.....	45
Список літератури.....	46

Навчальне видання

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до лабораторних робіт**  
**«Визначення питомого електричного опору**  
**однорідних напівпровідників і тонких напівпровідникових шарів»**  
**з розділу «Контактні та безконтактні методи визначення**  
**питомого електричного опору напівпровідників»**  
**дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів»**  
**для студентів напряму підготовки**  
**6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»**

Укладачі: КОПАЧ Володимир Романович  
ХРИПУНОВ Геннадій Семенович  
КІРІЧЕНКО Михайло Валерійович  
ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович

Відповідальний за випуск А.В. Меріуц

Роботу до видання рекомендував О.П. Сук

Редактор Л.Л. Яковлева

План 2009 р., поз. 81

Підписано до друку 20.07.09. Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.

Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,5.

Обл.-вид. 3,0. Тираж 50 прим. Зам. № \_\_\_\_\_. Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

---

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.