

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Найбільш характерна особливість усіх металів – їх висока електропровідність. Ще на початку XIX сторіччя Г.Ом встановив, що за сталою температурою струм I крізь зразок пропорційний до напруги U :

$$U = R \cdot I \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності R зветься електроопором і залежить як від розмірів зразка, так і від природи металу. У випадку зразка, що має стале значення площі перерізу S уздовж усієї довжини L

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

де ρ - питомий електроопір металу є однією з найважливіших характеристик.

Часто закон Ома записують у так званій диференціальній формі:

$$j = \sigma E \quad (3)$$

де $j = I/S$ – густина струму. $E = U/L$ – напруженість електричного поля, $\sigma = 1/\rho$ - питома електропровідність (провідність). У рамках найпростішої моделі Друде-Лоренца провідність виявляється пропорційною до середнього терміну релаксації τ (тобто терміну вільного перебігу носіїв поміж зіткненнями), а коефіцієнт пропорційності утримує концентрацію n , заряд e и масу m електрона:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (4)$$

С урахуванням зонної структури металів І.М.Ліфшиц отримав такий вираз для провідності:

$$\sigma = \frac{2}{3} \cdot \frac{|e|^2 S_F l}{(2\pi\hbar)^3} \quad (4')$$

где S_F - площа ізоенергетичної поверхні Фермі у імпульсному просторі для визначеного типу носіїв струму, l – середня довжина вільного перебігу носіїв, яка, очевидно, лінійно зв'язана з терміном релаксації з (4'). Для квадратичного изотропного закону дисперсії формула (4') переходить у (4).

1 .Температурна залежність провідності. Правило Матиссена.

У формулі Ліфшиця від температури залежить тільки довжина вільного перебігу носіїв струму. Отже, характер залежності $\sigma(T)$ повністю визначається залежністю $l(T)$. Причиною розсіювання електронів є їх взаємодія з коливаннями решітки (фононами), а також з домішковими атомами, дефектами структури, поверхнею металу і т.п. В достатньо чистих

та досконалих кристалах головним процесом розсіювання, що визначає електричний опір майже за усі температури, є розсіювання електронів на фононах. Ця частина електроопору зветься ідеальною.

Якщо б електричний опір визначався тільки розсіюванням електронів на фононах, то при $T \rightarrow 0$ опір металу прямував би до нуля. Але будь-який реальний метал має різні порушення періодичності кристалічної решітки (дислокації, вакансії, домішки сторонніх атомів и т.п.).

При розсіюванні на цих дефектах довжина вільного перебігу електрона визначається середньою віддаллю між ними і практично не залежить від температури. Таким чином, при надто низьких температурах, коли розсіюванням на фононах можна нехтувати, опір металу залежить тільки від концентрації C і природи дефектів решітки. Такий опір зветься залишковим $\rho_{\text{зал}}(C)$. Ймовірність розсіювання електронів на фононах і дефектах майже не залежать одна від одної, тому внесок цих механізмів у загальний опір металу можливо надати у вигляді суми двох доданків:

$$\rho_{\text{мет}} = \rho_{\text{зал}}(C) + \rho_{\text{ід}}(T) \quad (5)$$

Ця формула є відзеркаленням емпіричного правила Матіссена, згідно з яким надлишок до електроопору металу за рахунок домішок і дефектів не залежить від температури. Правило Матіссена виконується наближено. Головні причини відхилення від правила Матіссена такі:

а) непружний характер розсіювання електронів на деяких домішках і дефектах;

б) вплив домішок на фононий спектр металу.

Але у більшості випадків відхилення від правила Матіссена малі, тобто залежності $\rho(T)$ для чистого металу і металу з домішками практично паралельні.

Залишковий опір може слугувати зручним критерієм чистоти і досконалості металу. На практиці зручніше, однак, користуватись не $\rho_{\text{зал}}(C)$, а відношенням опору зразка при кімнатній температурі до опору при температурі кипіння рідкого гелію ($R_{293\text{К}} / R_{4,2\text{К}}$). Для металів дуже високої чистоти це відношення досягає значень $10^3 \div 10^4$, у рекордних випадках аж 10^5 . Для технічно чистих металів ($\approx 99,9\%$) відношення ($R_{293\text{К}} / R_{4,2\text{К}}$) не перевищує 10^2 . В концентрованих сплавах розглянуте відношення є меншим ніж 2.

З наведених оцінок плине, що при кімнатній температурі загальний електроопір металу практично визначається його ідеальною складовою, бо $\rho_{\text{зал}}(C)$ дає лише незначний ($\approx 1\%$) надлишок до $\rho_{\text{ід}}(T)$. Навпаки у випадку концентрованих сплавів $\rho_{\text{зал}}(C)$ більше ніж $\rho_{\text{ід}}(T)$ (інколи у декілька десятків разів). Слід, однак, підкреслити, що різні домішки неоднаково збільшують опір визначеного металу. Наприклад, додавання до міді 1%

цинку збільшує питомий електроопір на $0.2 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а 1% заліза – на $9,5 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (для міді $\rho_{20^\circ\text{C}} = 1,65 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

Теоретично формула для ідеального електроопору $\rho_{\text{ид}}(T)$ була отримана Блохом і Грюнайzenом [1]:

$$\rho_{\text{ид}}(T) = \frac{BT^5}{M\Theta^6} \int_0^{\Theta/T} \frac{z^5 dz}{(e^z - 1)(1 - e^{-z})} \quad (6)$$

де M – атомна маса, B – деяка стала, яка пов'язана з питомим об'ємом, Θ – температура Дебая.

Модель Блоха-Грюнайзена заснована на наступних спрощуючих припущеннях:

а) електрони у металі вважаються майже вільними, а залежність їх енергії від імпульсу характеризується квадратичним законом дисперсії;

б) теплові коливання описуються у дебаєвському наближенні фоновий спектр.

При високих температурах $\Theta/T \ll 1$ у підінтегральному виразі $z \ll 1$ і формула Блоха-Грюнайзена переходить у лінійну залежність

$$\rho_{\text{ид}}(T) \approx \frac{B}{4M\Theta^2} T = \text{const} \cdot T \quad (7)$$

При низьких температурах $\Theta/T \gg 1$ верхню межу інтеграла в (6) можна вважати нескінченною і інтеграл прямує до сталого значення 124,4. Таким чином

$$\rho_{\text{ид}}(T) = 124,4 \frac{B}{M\Theta^6} T^5 = \text{const} \cdot T \quad (8)$$

Оскільки у (8) не враховане розсіювання електронів на електронах, особливості зонної структури електронів (енергетичний спектр) у даному металі та інш., залежність $\rho \approx T^5$ виконується лише для одновалентних неперехідних металів (Li, Na, Cu). Для більшості інших металів при низьких температурах більш влучною є апроксимація степеневою залежністю $\rho \approx T^m$, де $4 \leq m \leq 5$.

Як показують експерименти, наближена до лінійної залежність $\rho(T)$ (див.(7)) справедлива не тільки при $T \gg \Theta$, але і при більш низьких температурах аж до $T \approx \Theta/3$. Традиційно, при опису лінійної залежності $\rho(T)$ температуру визначають за шкалою Цельсія і відтоді замість (7) можливо записати:

$$\rho(t) = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (9)$$

де ρ_0 - питомий опір при 0°C , t – температура за шкалою Цельсія, α - температурний коефіцієнт опору (ТКО), який вважається таким, що не залежить від температури. З (9) постає, що

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (10)$$

Залежність (9) подібна до формул газових законів Гей-Люссака і Шарля, а також виразу для теплового розширення твердих тіл при середніх та високих температурах. У всіх вказаних випадках, як і в (10), температурний коефіцієнт має однакову розмірність $[K^{-1}]$. Чисельне значення α для усіх чистих металів, згідно з (9), повинно бути однаковим і дорівнювати $1/273 = 3,66 \cdot 10^{-3} K^{-1}$, оскільки ідеальний електроопір повинний прямувати до нуля, коли температура сягає $-273^\circ C$. У дійсності значення ТКО для різних металів трохи різняться, а для конкретного металу величина α залежить від температурного інтервалу її визначення. Останнє свідчить про наближений характер лінійної залежності $\rho(T)$ за формулою (9).

У сплавах з високою концентрацією домішок питомий електроопір ρ_0 при $0^\circ C$ може у декілька разів (або у декілька десятків разів) перевищувати ρ_0 відповідного чистого металу. Згідно з (10) це призводить до такого ж зменшення ТКО сплаву. Окрім того, за рахунок змінення фононого і електронного спектрів похідні $d\rho/dT$ сплаву і чистого металу можуть суттєво різнитись, аж до того, що у деяких сплавах $d\rho/dT$ може не тільки дорівнювати нулеві, а і стати від'ємною величиною [2].

2. Зразки для досліджень

Серед металічних матеріалів, якими користуються на практиці, велику групу складають електротехнічні метали і сплави (мідь, алюміній, вольфрам, платина, ніхром, манганін, константан та інш.). У даній лабораторній роботі пропонується дослідити резистивні властивості деяких матеріалів з цієї групи.

Однією з важливіших у практичному відношенні електротехнічних характеристик є питомий електроопір при звичайних (кімнатних) температурах. Серед чистих металів найбільш низьке значення ρ мають (у порядку зростання): срібло, мідь, алюміній. Внаслідок високої коштовності срібло застосовують тільки в особливих випадках. Мідь використовують дуже широко у вигляді дроту в обмотках трансформаторів, електродвигунів, генераторів, реле та інших пристроїв. Окрім того, мідь - основа багаточисельних сплавів, у тому рахунку електротехнічних: манганіна, константана та інш. Питомий опір алюмінія на 60% вищий, ніж у міді, однак він приблизно у 3 рази легший за мідь та дешевший. Застосовується для виготовлення електродроту і силових кабелів електроживлення, у якості конденсаторної фольги та інш. Алюміній також – основа багаточисельних сплавів.

У ряді випадків потрібні матеріали з високим питомим опором (електронагрівачі, еталонні резистори, баластні резистори та інш.). З цією метою розроблені високолеговані сплави з питомим опором від 40 до $100 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Для зразкових катушок і магазинів опору (еталонних резисторів), деталей електровимірювальних приборів ці сплави повинні ще

й мати мінімальне значення ТКО. Цю вимогу краще за усі матеріали задовольняє манганін, у якого значення α змінюється від $+0,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при 0°C до $-0,05 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при 100°C , а при 20°C ТКО манганіну практично дорівнює нулеві. Позитивною якістю манганіну є відсутність термо-ЕРС у парі з міддю и низька хімічна активність.

Для виготовлення металевих термометрів опору бажані великі значення ТКО. Цій вимозі задовольняють усі чисті метали. Однак завдяки хімічній стійкості і іншим корисним технологічним і фізичним характеристикам у якості термометричного матеріалу вибрана платина. Для неї проведені ретельні градуїровки і складені таблиці. Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ-68) у діапазоні від 13,81K до 903,89K заснована на платиновому термометрі опору. На рис.1 наведені температурні залежності $\rho(T)$ і $\alpha(T)$ для платини, узяті з градуїровочних таблиць [3]. Видно, що чутливість платинового термометра нижче за 50K починає різко зменшуватись, а ТКО також зменшується від $\approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при 0°C до $\approx 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при 20K. Треба відмітити, що ТКО манганіну при 10K складає $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ і цей матеріал використовується у якості низькотемпературного термометра опору [3].

3. Завдання до роботи і порядок її виконання

У даній лабораторній роботі треба визначити значення питомого електроопору низки металів і сплавів при кімнатній температурі и температурах кипіння води і рідкого азоту. Для кожного матеріалу визначити середнє значення ТКО $\bar{\alpha}$ у температурних інтервалах “азотна – кімнатна” і “кімнатна – точка кипіння води”. Після чого перевірити виконання правила Матіссена.

При виконанні роботи рекомендується дотримувати таку послідовність операцій.

1. З'єднати струмові і потенціальні дроти з відповідними клемми вимірювальної установки. Встановити невелике ($< 0,1\text{A}$) значення вимірювального струму, оцінити при кімнатній температурі падіння напруги на зразку і еталонному резисторі (зразковій катушці) і скоректувати робочий струм таким чином, щоб значення U_X и U_N були відображені 4-х або 5-ти значними числами. Якщо U_X и U_N відрізняються більше, ніж на порядок, замінити еталонну катушку на інший номінал. Провести вимірювання падінь напруги у такій послідовності: $U_X^+, U_N^+, U_N^-, U_X^-$ де позначки «+» и «-» відносяться до різних напрямків вимірювального струму.

2. Провести аналогічні вимірювання при температурах кипіння рідкого азоту і води. У разі необхідності скоректувати вимірювальний струм.

3. Провести обчислення опору усіх зразків при трьох температурах. Для кожного зразка обчислити відношення площі перерізу до довжини і за формулою (2) визначити значення питомого опору. Дані про ρ (в одиницях $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) занести до таблиці.

4. Обчислити середні значення ТКО $\bar{\alpha}$ усіх зразків в температурних інтервалах “азотна – кімнатна” і “кімнатна – точка кипіння води”. Результати (в одиницях 10^{-3} K^{-1}) занести до таблиці. Для обчислення $\bar{\alpha}$ значення питомого опору при 0°C (ρ_0) можна отримати шляхом лінійної екстраполяції значень ρ при 100°C і кімнатній температурі.

5. Для сплаву Д-16 и чистого алюмінію перевірити виконання правила Матіссена при трьох температурах. Дані $\Delta\rho = \rho_{\text{Д-16}} - \rho_{\text{Al}}$ також занести до таблиці.

Примітка . Більш докладно електровимірювальна схема описана у лабораторній роботі №1, а її принципова схема зображена на стенді біля установки.

4. Дані про зразки

1. Мідний дріт у лаковій ізоляції ПЭВ-2 діаметром $D = 0,38 \text{ мм}$ і довжиною $L = 90 \text{ см}$.

2. Алюмінієвий дріт без ізоляції : $D = 1.7 \text{ мм}$ и $L = 17 \text{ см}$..

3. Манганін МНМц3-12 (11,5÷13,5% Mn, 2,5÷3,5% Ni, решта Cu) . Дріт : $D = 1.0 \text{ мм}$, $L = 30 \text{ см}$.

4. Дуралюмін Д-16 (3,8 ÷ 4,8% Cu, 0,4 ÷ 0,8% Mn и Mg, решта алюміній. Стрічка : $S = 2,3 \times 1,1 \text{ мм}^2$, $L = 68 \text{ мм}$.

5. Константан (39 ÷ 41% Ni, 1 ÷ 2% Mn, 0,5% Fe, решта Cu). Дріт : $D = 0,15 \text{ мм}$, $L = 45 \text{ мм}$.

6. Аморфний сплав $\text{Fe}_{80}\text{B}_{14}\text{S}_6$. Отриманий шляхом охолодження зі швидкістю $\approx 10^6 \text{ K/с}$ з рідкої фази за двухвалковим методом. Стрічка : $S = 3,5 \text{ мм} \times 25 \text{ мкм}$, $L = 75 \text{ мм}$..

Література

1.Брандт Н.Б., Чудинов С.М. Электронная структура металлов. Из-во МГУ, М.:, 1973.

2.Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.:, Наука, 1978.

3. Геращенко О.А. и др. Температурные измерения. Справочник. Киев, Наукова думка, 1984.

