

§ 13. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ.

★ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА ★



Електричний струм можуть проводити рідини та тверді речовини, за певних умов електричний струм проводять і гази. Вивчення електричного струму в різних середовищах почнемо з вивчення струму в металах. По-перше, тому, що всі без винятку метали добре проводять електричний струм, а по-друге, саме з провідністю металів пов'язане широке застосування електричної енергії в житті людини.



Як експериментально визначили природу електричного струму в металах

Ви вже знаєте, що створення електричного поля в металевому провіднику спричиняє появу в ньому електричного струму. Згідно з класичною теорією електропровідності металів *електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.*

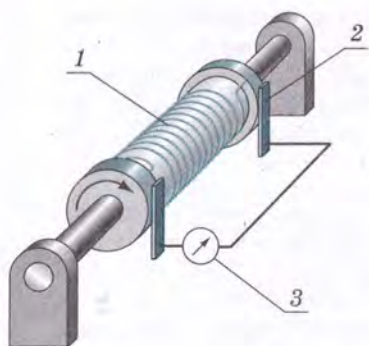


Рис. 13.1. Схема дослідження електричного струму в металах: 1 — котушка з металевим дротом; 2 — зовнішні контакти; 3 — чутливий гальванометр. Котушці надають швидкого обертання й різко зупиняють. У результаті в колі виникає електричний струм, який реєструється гальванометром

Першим експериментальним доказом цього положення офіційно вважається результат дослідів американських фізиків *Р. Толмена* і *Т. Стюарда* в 1916 р.* Ідея дослідів базувалась на таких міркуваннях учених. Якщо металевому провіднику надати швидкого руху, а потім різко зупинити, то наявні в провіднику вільні заряджені частинки рухатимуться за інерцією (аналогічно тому, як у випадку різкої зупинки транспорту в ньому продовжують рух незакріплені предмети) (рис. 13.1). Але ж рух вільних частинок в одному напрямку і є електричним струмом. Цей струм, а також його напрямок можна зафіксувати гальванометром. За напрямком струму легко визначити знак заряду частинок, що рухалися за інерцією.

Результати дослідів, як і очікувалось, свідчили про те, що струм створювався рухом *негативно* заряджених частинок. Але цього замало для того, щоб визначити, які саме частинки є носіями струму в металах. Як у кожної людини є свої унікальні відбитки пальців, за якими можна ідентифікувати людину, так і в частинок є свій ідентифікатор — це відношення модуля заряду $|q_0|$ частинки до її маси m . Тож учені мали визначити це відношення. Знаючи довжину та опір дроту котушки, швидкість її руху до гальмування та вимірюючи заряд q , який пройшов через гальванометр за час гальмування котушки, вчені розраховували відношення $\frac{|q_0|}{m}$. Виявилось, що у випадку, коли котушка містила мідний дріт, $\frac{|q_0|}{m} = 1,6 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, що доволі точно (враховуючи труднощі дослідів) збіглося зі значенням такого відношення для електронів, визначеним іншими способами: $\frac{|e|}{m} = 1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Таким чином, дослідів підтвердили уявлення класичної теорії електропровідності металів, яка розглядає внутрішню будову металу як утворену позитивно зарядженими йонами кристалічну ґратку, що перебуває в «газі» вільних електронів. У випадку появи в металевому провіднику електричного поля на хаотичний рух електронів накладається дрейф електронів у напрямку, протилежному напрямку

* Слід зазначити, що схожий дослід був здійснений російськими вченими *Леонідом Ісааковичем Мандельштамом* і *Миколою Дмитровичем Папалексі* в 1911 р., але його результат не був опублікований авторами.

напруженості електричного поля. Цей дрейф електронів і являє собою електричний струм.

Зазначена класична теорія обґрунтовує закони Ома та Джоуля — Ленца і пояснює деякі електричні явища. Однак у деяких випадках висновки класичної теорії суперечать результатам дослідів, а розв'язати ці суперечності можливо тільки за допомогою уявлень квантової фізики, з деякими положеннями якої ви ознайомитесь у § 49 підручника.

2 Як, з точки зору класичної фізики, рухаються електрони в металевому провіднику, в якому створене електричне поле

Згідно з класичною теорією, електрони в процесі руху під дією електричного поля зіштовхуються з позитивними йонами кристалічної ґратки. Серед цих зіткнень є такі, за яких електрони всю енергію, здобуту під час розгону в електричному полі, передають ґраткам. Саме такі зіткнення — їх називають *ефективними* — і є «відповідальними» за опір металу.

Нехай середній інтервал часу між зіткненнями дорівнює τ . Тоді можна уявити модель руху електрона в металі, коли в цьому металі створене електричне поле напруженістю \vec{E} . В інтервалі часу від 0 до τ електрон рухається з прискоренням $\vec{a} = \frac{|e|\vec{E}}{m}$, отже, модуль швидкості напрямленого руху електрона лінійно зростає з часом. У момент часу τ електрон зіштовхується з йоном і зупиняється. Далі він знову прискорюється електричним полем і процес повторюється. Розмірковуючи подібним чином, можна визначити середню швидкість \bar{v} напрямленого руху (швидкість дрейфу) електрона.

Подамо силу струму I в провіднику через швидкість дрейфу \bar{v} електронів. За інтервал часу Δt через переріз площею S провідника проходить N електронів: $N = nS\bar{v}\Delta t$, де n — концентрація електронів у провіднику. При цьому переноситься заряд $\Delta q = |e|N = n|e|S\bar{v}\Delta t$.

Отже, в провіднику тече струм $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = n|e|S\bar{v}$.

Оцінимо середню швидкість напрямленого руху електронів, наприклад, у мідному проводі перерізом 10 мм^2 за сили струму в ньому 10 А .

У більшості металів концентрація вільних електронів приблизно дорівнює концентрації атомів, оскільки один із валентних електронів кожного атома є *колективізованим*, тобто вільним. Таким чином, значення концентрації вільних електронів у металах розташоване в межах $10^{28} \dots 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Так, для міді $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Тоді за сили струму 10 А в мідному дроті перерізом 10 мм^2 швидкість напрямленого руху вільних електронів дорівнює:

$$\bar{v} = \frac{I}{n|e|S} = \frac{10}{8,4 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0,74 \text{ (мм/с)}.$$

Як бачите, отримане значення швидкості напрямленого руху вільних електронів надзвичайно мале порівняно зі значенням швидкості, з якою поширюється електричне поле в провіднику ($v \approx 3 \cdot 10^8$ м/с). Завдяки дії електричного поля вільні електрони, розташовані в будь-якій точці провідника, втягуються в направлений рух майже миттєво, а сам цей рух відбувається з дуже малою швидкістю. (Спробуйте обчислити, через який інтервал часу після вмикання плеєра ви почули б музику в навушниках, якби електричне поле поширювалось зі швидкістю напрямленого руху електронів.)

3 Як опір металів залежить від температури

Опір металевого провідника залежить не тільки від його геометричних параметрів та речовини, з якої він виготовлений, але й від температури (останнє доводиться у квантовій теорії електропровідності металів).

Досліди доводять: якщо температура є не надто високою і не надто низькою, залежності питомого опору та опору провідника від температури передаються формулами:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T);$$

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (*)$$

де ρ_0 , ρ — питомі опори речовини провідника відповідно за температури $T_0 = 273$ К (0°C) і за даної температури T ; R_0 , R — опори провідника за температури $T_0 = 273$ К (0°C) і за даної температури T ; α — температурний коефіцієнт опору; ΔT — різниця температур ($\Delta T = T - 273$ К).

Температурний коефіцієнт опору α — фізична величина, яка характеризує залежність опору речовини від температури і чисельно дорівнює відносній зміні питомого опору ρ речовини в разі нагрівання її на 1 К:

$$\alpha = \frac{1 \cdot \Delta \rho}{\rho \Delta T}.$$

Одиниця температурного коефіцієнту в СІ — кельвін у мінус першому степені (K^{-1}).

Для всіх металевих провідників $\alpha > 0$. Наприклад, температурний коефіцієнт опору алюмінію становить $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, заліза — $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, міді — $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Зверніть увагу: розв'язуючи задачі, формулу, яка описує температурну залежність опору провідників, простіше подавати у вигляді: $R = R_0 (1 + \alpha t)$, де R_0 , R — опори провідника за 0°C і $t^\circ\text{C}$; α — температурний коефіцієнт опору; t — температура за шкалою Цельсія. (Спробуйте самостійно довести, що остання формула еквівалентна формулі (*)).

4 Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений *Гейке Камерлінг-Оннес* (1853–1926), досліджуючи, як поводить ся ртуть за температур, близьких до абсолютного нуля, помітив дивне явище: у разі зниження температури ртуті до 4,1 К її питомий опір стрибком падав до нуля. Аналогічне явище спостерігалось з оловом, свинцем та іншими металами. Це явище назвали *надпровідністю* (рис. 13.2). Зараз відомі багато речовин і матеріалів, які за відповідної температури переходять у надпровідний стан.

Якщо в замкненому провіднику, який перебуває в надпровідному стані, створити електричний струм, то струм буде існувати в провіднику без підтримки джерела струму необмежений час. Ця та інші властивості надпровідників відкривають широкі можливості їх застосування в техніці та промисловості. Тільки створення надпровідних ліній електропередач дозволить зекономити 10–15 % електроенергії.

Широкому застосуванню надпровідників перешкоджає «ціна питання». Дотепер знайдено матеріали, які переходять у надпровідний стан за температури близько 100 К (–173 °С) і нижче. Тобто труднощі в застосуванні надпровідності пов'язані з необхідністю охолодження матеріалів до низьких температур.

А це доволі дорого коштує.

Зараз учені працюють над отриманням надпровідних матеріалів, які зберігають свої властивості за кімнатної температури.

Надпровідність неможливо пояснити з погляду класичної теорії електропровідності металів. У 1957 р. група американських учених (*Джон Бардін, Леон Купер, Джон Роберт Шифер*) і незалежно від них радянський вчений *Микола Миколайович Боголюбов* (1909–1992) розробили *квантову теорію надпровідності*.

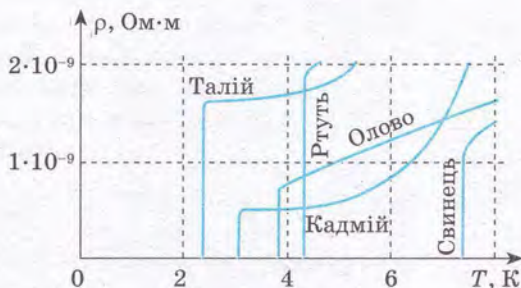


Рис. 13.2. Графіки зміни питомого опору деяких металів за температур, близьких до абсолютного нуля. З наближенням до нульової позначки питомий опір цих металів стрибком падає до нуля — метал переходить у надпровідний стан



5

Які явища називають термоелектричними

Термоелектричні явища — сукупність фізичних явищ, зумовлених взаємозв'язком між тепловими та електричними процесами у твердих провідниках.

До термоелектричних явищ належать *ефект Зеебека* (виникнення ЕРС в електричному колі, складеному з послідовно з'єднаних

різнорідних провідників, контакти між якими мають різну температуру), *ефект Пельтьє* (виділення або поглинання теплоти під час проходження електричного струму через контакт двох різнорідних провідників), *ефект Томсона* (виділення теплоти (окрім джоулевої) або поглинання теплоти в провіднику зі струмом, вздовж якого є градієнт температури).

Ефект Зеебека в металах використовується в *термопарах* — термочутливих елементах, які розміщують у приладах для вимірювання температури, сили струму, освітленості тощо.★

★ 6 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Електричне коло складається з джерела струму, міліамперметра, опір якого 20 Ом, та реостата, виготовленого із залізного дроту. За температури 0 °С міліамперметр показує 30 мА Опір реостата за цієї температури дорівнює 200 Ом. Яким буде показ міліамперметра, якщо реостат нагріється на 50 °С? Температурний коефіцієнт опору заліза становить $6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Внутрішнім опором джерела, а також зміною опору амперметра та з'єднувальних проводів унаслідок нагрівання знехтувати.

I — ?

Дано:

$$R_a = 20 \text{ Ом}$$

$$t_0 = 0 \text{ °С}$$

$$I_0 = 30 \text{ мА} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ А}$$

$$R_0 = 200 \text{ Ом}$$

$$t_1 = 50 \text{ °С}$$

$$\alpha = 6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

Аналіз фізичної проблеми. Оскільки реостат нагрівається, його опір збільшується, що, в свою чергу, спричиняє зміну опору зовнішнього кола і відповідно — сили струму в ньому. Тоді, записавши закон Ома для повного кола для двох значень сили струму та формулу залежності опору від температури, з отриманих рівнянь знайдемо шукану величину.

Пошук математичної моделі, розв'язання. До нагрівання реостата сила струму за законом Ома для повного кола дорівнює $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_a}$.

Після нагрівання реостата $I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_a}$. Тут $R = R_0(1 + \alpha t_1)$, де α — термічний коефіцієнт опору заліза. Разом розв'язуючи записані рівняння, одержуємо: $I = \frac{I_0(R_0 + R_a)}{R_0(1 + \alpha t_1) + R_a}$.

Визначимо значення шуканої величини:

$$\{I\} = \frac{A(\text{Ом} + \text{Ом})}{(\text{Ом} + \text{Ом})} = A; \quad I = \frac{3 \cdot 10^{-2}(200 + 20)}{200(1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot 50) + 20} \approx 24 \cdot 10^{-3}, \quad I \approx 24 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Відповідь: після нагрівання реостата показ міліамперметра становитиме приблизно 24 мА.

**Підбиваємо підсумки**

Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

За відсутності електричного поля вільні електрони в металах рухаються хаотично. Якщо ж у металевому провіднику створити електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, починають рухатися напрямлено.

Залежність опору металевих провідників від температури передається формулою: $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$, де R_0 , R — опори провідника відповідно за температури $T_0 = 273$ К і даної температури T ; α — температурний коефіцієнт опору; ΔT — різниця температур ($\Delta T = T - 273$ К).

У разі зменшення температури деяких металів до температур, близьких до абсолютного нуля, їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.

Термоелектричними явищами називається сукупність фізичних явищ, зумовлених взаємозв'язком між тепловими та електричними процесами у твердих провідниках.

Термопара — термочутливий елемент у пристроях для вимірювання температури, сили струму, освітленості тощо.

**Контрольні запитання**

1. Що являє собою електричний струм у металах?
2. Опишіть суть дослідів учених щодо виявлення природи електричного струму в металах.
3. Як рухаються електрони в металевому провіднику з точки зору класичної фізики, якщо в провіднику створено електричне поле?
4. У чому полягає причина опору металів?
5. Чи залежить опір металів від температури? Якщо залежить, то як?
6. У чому полягає явище надпровідності?
7. Які явища називаються термоелектричними?
8. Що таке термопара? Де вона застосовується?

**★ Вправа № 13**

1. Металевий волосок розжарювання електричної лампи поступово тоншає через випаровування металу з його поверхні; врешті-решт у найтоншому місці волосок перегоріє. Поясніть, чому лампа перегоріє найчастіше саме в той момент, коли її вмикають.
2. Яку довжину має вольфрамовий волосок розжарювання лампи, розрахованої на напругу 220 В і потужність 220 Вт? Температура розжареного волоска 2700 К, його діаметр — 0,03 мм. Питомий опір вольфраму $5,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м за температури 293 К. Вважайте, що питомий опір вольфраму прямо пропорційний абсолютній температурі.
3. На котушку намотано сталевий провід діаметром 1,2 мм. Маса проводу 0,2 кг. На котушку подається напруга 53,8 В. Визначте силу струму в дроті, якщо дріт нагрівся до температури 393 К. Питомий опір сталі за температури 293 К дорівнює $1,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, температурний коефіцієнт опору сталі $6,0 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹. Густина сталі $7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. ★