

Дідовець В'ячеслав Євгенович

Група ДК-09-19- КП
Група ДК-09-19- КФ
Група ДК-09-19- КМ

Заняття (практичне) № 12.11

Тема: ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ.

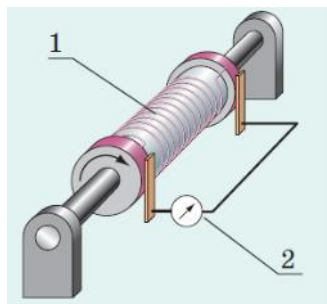
Вольфрамова нитка лампи розжарювання поступово тоншає через випаровування металу; в решті-решт у найтоншому місці нитка перегоряє. А чому лампа найчастіше перегоряє в той момент, коли її вмикають?

Як рухаються електрони в металевому провіднику

У 1900 р., через три роки після відкриття електрона, німецький фізик Пауль Друде (1863–1906) запропонував електронну теорію провідності металів, відповідно до якої електрони в металах поводяться подібно до молекул ідеального газу. Зараз ця теорія має назву *класична електронна теорія*.

Згідно із класичною електронною теорією внутрішня будова металу являє собою утворену позитивно зарядженими йонами кристалічну ґратку, яка перебуває в «газі» вільних електронів. Якщо в металевому провіднику створити електричне поле, то на хаотичний рух електронів накладатиметься дрейф електронів у напрямку сили, що діє на електрони з боку електричного поля. Цей дрейф електронів і є електричним струмом.

Дослід Стюарта — Толмена.



Якщо металевому провіднику (1) надати швидкого обертання, а потім різко зупинити, то вільні заряджені частинки рухатимуться за інерцією — в провіднику виникне короточасний електричний струм. За відхиленням стрілки гальванометра (2) можна виявити, заряди якого знаку створюють цей струм, а знаючи опір провідника, силу струму та лінійну швидкість обертання, дізнатися, які саме частинки створюють струм.

Такий дослід у 1916 р. здійснили американські вчені Річард Толмен (1881–1948) і Томас Стюарт (1890–1958). Вони експериментально довели, що *електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів*.

Уявімо модель руху електрона в металі, в якому створено електричне поле. Відповідно до класичної теорії електрон досить короткий час розганяється електричним полем, потім, зіткнувшись із позитивним йоном, змінює напрямок свого руху, потім знову набирає швидкості в напрямку дії поля, знову зіштовхується з йоном і т. д. Під

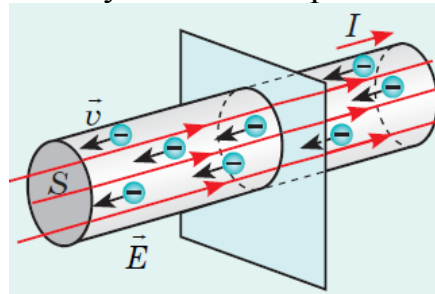
час зіткнень електрон передає йону частину кінетичної енергії, здобутої внаслідок дії поля. Саме ці зіткнення «відповідальні» за опір металу.

Визначимо *середню швидкість \vec{v} напрямленого руху електронів*. За інтервал часу t через переріз площею S провідника проходить N електронів: $N = nS\vec{v}t$, де n — концентрація вільних електронів у провіднику. При цьому переноситься заряд $q = N|e|$. За означенням: $I = \frac{q}{t}$. Отже, маємо:

$$I = n|e|\bar{v}S \Rightarrow \bar{v} = \frac{I}{n|e|S}$$

Як швидко рухаються електрони

Середня швидкість хаотичного руху вільних електронів величезна — близько 300 км/с. Разом із тим середня швидкість їхнього напрямленого руху надзвичайно мала — кілька десятих міліметра за секунду. Чому ж, щойно ми натискаємо вмикач лампи, вона відразу спалахує? Річ у тім, що електричне поле поширюється в провіднику зі швидкістю 300 000 км/с. Завдяки дії поля вільні електрони, розташовані в будь-якій точці провідника, майже миттєво втягуються в напрямлений рух.



Як опір металів залежить від температури

Опір металевого провідника залежить не тільки від його геометричних розмірів і речовини, з якої він виготовлений, а й від температури (останнє обґрунтовано в квантовій теорії електропровідності металів). Досліди свідчать: якщо температура t металу є не надто низькою і не надто високою ($t < t_{\text{плав}}$), питомий опір металу та опір металевого провідника залежать від температури майже лінійно (рис. 5.1):

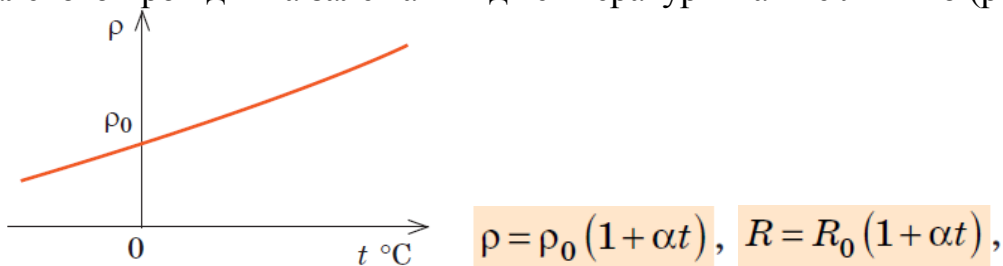


Рис.5.1

де ρ_0, R_0 — відповідно питомий опір і опір провідника за температури 0°C ; ρ, R — відповідно питомий опір і опір провідника за температури t ; α — *температурний коефіцієнт електричного опору*.

Температурний коефіцієнт електричного опору — це фізична величина, яка характеризує залежність питомого опору речовини від температури.

Одиниця температурного коефіцієнта в СІ — *обернений кельвін (кельвін у мінус першому степені)*: $[\alpha] = \text{K}^{-1}$.

Для всіх металів $\alpha > 0$. Наприклад, температурний коефіцієнт електричного опору алюмінію становить $0,0038 \text{ K}^{-1}$.

Якщо температура металу зменшується, наближаючись до абсолютного нуля (0 К, -273°C), або збільшується, наближаючись до температури плавлення, то залежність $\rho(t)$ вже не буде лінійною (рис. 5.2).

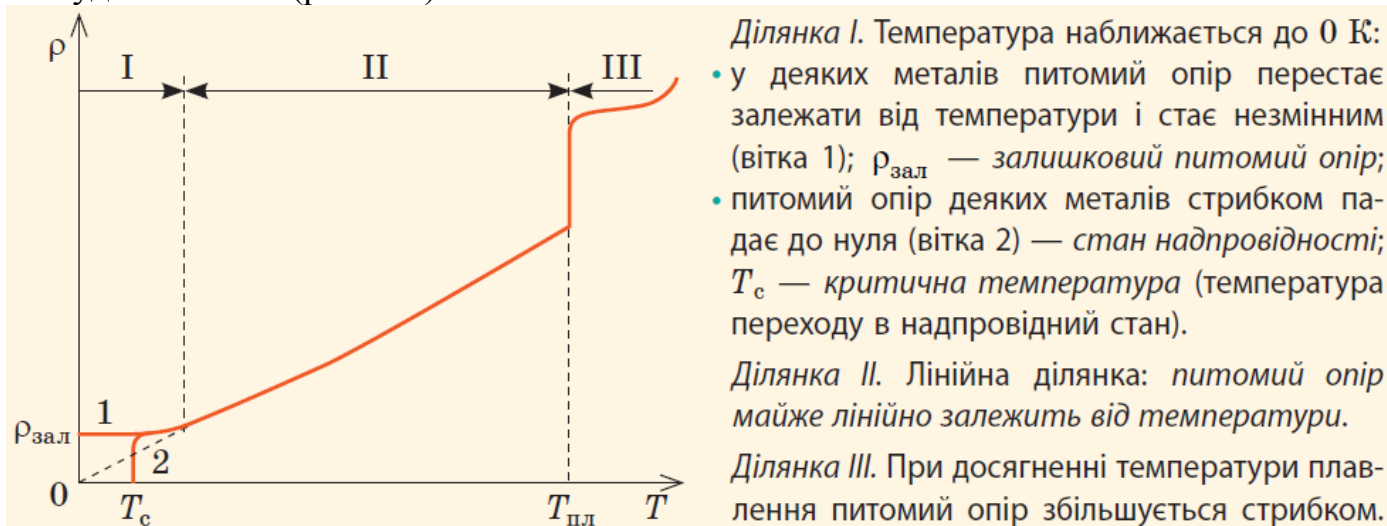


Рис. 5.2. Приблизний графік зміни питомого опору металу в широкому діапазоні температур

Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений Гейке Камерлінг-Оннес (1853–1926), досліджуючи, як поводить ртуть за температур, близьких до абсолютного нуля, помітив дивне явище: в разі зниження температури ртуті до 4,1 К її питомий опір стрибком падав до нуля.

Аналогічне явище спостерігалось з оловом, свинцем і низкою інших металів (рис. 5.3). Це явище назвали *надпровідністю*. Зараз відомо багато речовин і матеріалів, які за відповідної температури переходять у надпровідний стан.

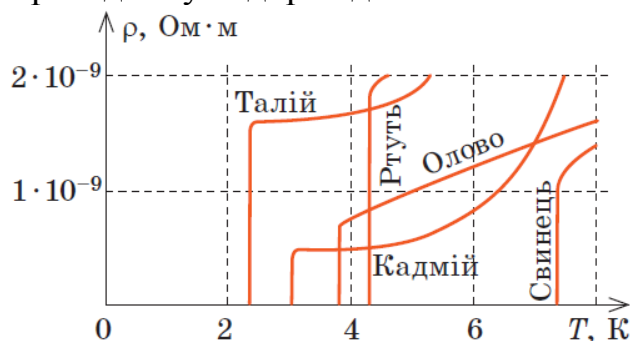


Рис. 5.3. Графіки зміни питомого опору деяких металів за температур, близьких до абсолютного нуля

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

Труднощі широкого застосування надпровідників пов'язані з необхідністю охолодження матеріалів до низьких температур — це досить дорого коштує. Зараз знайдено матеріали, які переходять у надпровідний стан за температури близько 100 К (-173°C) і нижче. Останній «рекорд» високотемпературної надпровідності був

поставлений у 2015 р.: за величезного тиску (1 млн атм.) сірководень H_2S () був переведений у надпровідний стан за температури -70°C .

Надпровідність неможливо пояснити з точки зору класичної теорії електропровідності металів. У 1957 р. група американських учених: Джон Бардін (1908–1991), Леон Купер (народ. 1930), Джон Шріффер (народ. 1931) — і незалежно від них радянський вчений Микола Миколайович Боголюбов розробили *квантову теорію надпровідності*.

Приклад розв'язування задач

Задача. Електричне коло складається із джерела струму, міліамперметра опором 20 Ом і реостата, обмотка якого виготовлена зі сталі. За температури 0°C показ міліамперметра 30 мА, а опір реостата — 200 Ом. Яким буде показ міліамперметра, якщо обмотка реостата нагріється до 50°C ? Внутрішнім опором джерела та опором з'єднувальних дротів знехтувати.

Аналіз фізичної проблеми. Обмотка реостата нагрівається, і її опір збільшується, що спричиняє збільшення повного опору кола. Відповідно до закону Ома сила струму в колі зменшується. Реостат і міліамперметр з'єднані послідовно, внутрішній опір джерела дорівнює нулю, тому загальний опір кола становить $R + R_A$, де R — опір обмотки реостата за $t = 50^\circ\text{C}$. Температурний коефіцієнт опору сталі знайдемо в довідковій літературі.

Дано:

$$R_A = 20 \text{ Ом}$$

$$t_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$I_0 = 30 \text{ мА} = 0,03 \text{ А}$$

$$R_0 = 200 \text{ Ом}$$

$$t = 50^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 0,006 \text{ К}^{-1}$$

$$I = ?$$

Пошук математичної моделі, розв'язання. Запишемо закон Ома для повного кола для двох теплових станів обмотки реостата.

До нагрівання:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_A} \Rightarrow \mathcal{E} = I_0(R_0 + R_A).$$

Після нагрівання:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_A}, \text{ де } R = R_0(1 + \alpha t).$$

Після підстановки \mathcal{E} і R одержуємо:
$$I = \frac{I_0(R_0 + R_A)}{R_0(1 + \alpha t) + R_A}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[I] = \frac{\text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{Ом}} = \text{А}; \quad I = \frac{0,03 \cdot (200 + 20)}{200 \cdot (1 + 0,006 \cdot 50) + 20} \approx 24 \cdot 10^{-3} \text{ (А)}.$$

Аналіз результату. Сила струму зменшилась — це реальний результат.

Відповідь: $I \approx 24 \text{ мА}$.