



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? Якщо ви не можете зараз відповісти на це запитання, поверніться до нього після опрацювання матеріалу параграфа.

1 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*.

Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

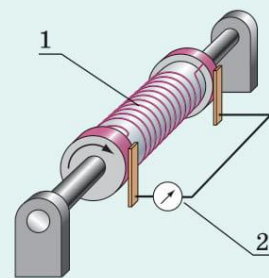
Уявімо модель руху електрона в металі, в якому створено електричне поле. Відповідно до класичної теорії електрон досить короткий час розганяється електричним полем, потім, зіткнувшись із позитивним йоном, змінює напрямок свого руху, потім знову набирає швидкості в напрямку дії поля, знову зіштовхується 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* \bar{v} *напрявленого руху електронів*. За інтервал часу t через переріз площею S провідника проходить N електронів: $N = nS\bar{v}t$, де n — концентрація

Дослід

Стюарта — Толмена

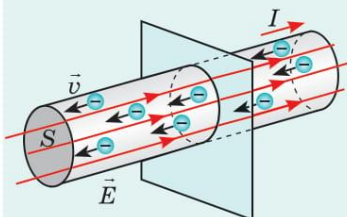
Якщо металевому провіднику (1) надати швидкого обертання, а потім різко зупинити, то вільні заряджені частинки рухатимуться за інерцією — в провіднику виникне короткочасний електричний струм. За відхиленням стрілки гальванометра (2) можна виявити, заряди якого знаку створюють цей струм, а знаючи опір 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.

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.



❓ Оцініть, через який інтервал часу після ввімкнення плеєра ви почули б музику в навушниках, якби електричне поле поширювалось зі швидкістю напрямленого руху електронів.

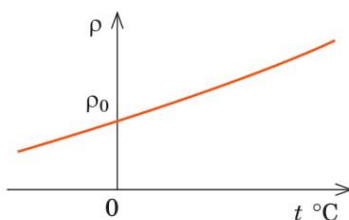


Рис. 5.1. Графік залежності питомого опору металу від температури (лінійна ділянка). Зі збільшенням температури питомий опір металу збільшується

вільних електронів у провіднику. При цьому переноситься заряд $q = N|e|$. За означенням:

$$I = \frac{q}{t}.$$

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

❓ Визначте середню швидкість напрямленого руху електронів у мідному проводі з перерізом 1 мм^2 за сили струму 1 А , якщо концентрація вільних електронів у міді $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

2 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 ($t < t_{\text{плавл}}$), питомий опір металу та опір металевого провідника залежать від температури майже лінійно (рис. 5.1):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad R = R_0(1 + \alpha t),$$

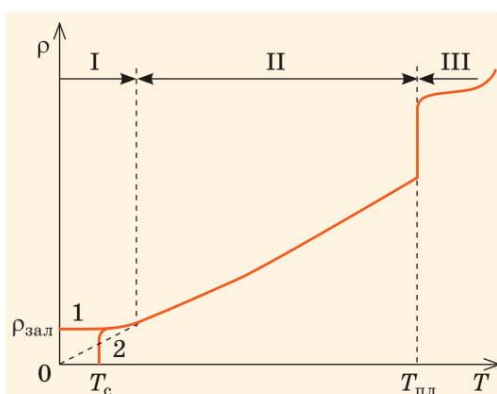
де ρ_0 , R_0 — відповідно питомий опір і опір провідника за температури $0 \text{ }^\circ\text{C}$; ρ , R — відповідно питомий опір і опір провідника за температури t ; α — температурний коефіцієнт електричного опору.

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): $[\alpha] = \text{K}^{-1} (\text{K}^{-1})$.

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

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



Ділянка I. Температура наближається до 0 К:

- у деяких металів питомий опір перестав залежати від температури і стає незмінним (вітка 1); $\rho_{\text{зал}}$ — залишковий питомий опір;
- питомий опір деяких металів стрибком падає до нуля (вітка 2) — стан надпровідності; T_c — критична температура (температура переходу в надпровідний стан).

Ділянка II. Лінійна ділянка: питомий опір майже лінійно залежить від температури.

Ділянка III. При досягненні температури плавлення питомий опір збільшується стрибком.

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

3 Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений *Гейке Камерлінг-Оннес* (1853–1926), досліджуючи, як поводить себе 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.

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

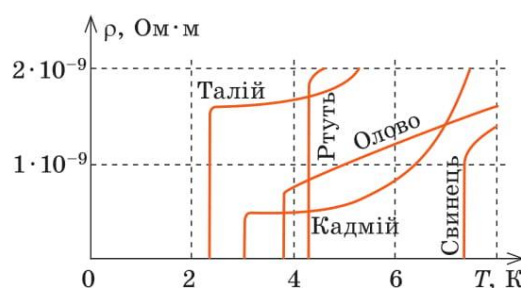
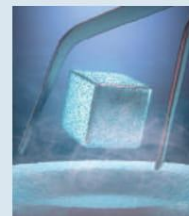


Рис. 5.3. Графіки зміни питомого опору деяких металів за температур, близьких до абсолютного нуля

«Труна Магомета»

Нульовий опір — це не єдина унікальна властивість матеріалів у надпровідному стані. У 1933 р. німецькі вчені *Вальтер Мейснер* (1882–1974) і *Роберт Оксенфельд* (1901–1993) виявили, що під час переходу в надпровідний стан магнітне поле повністю витісняється з провідника (*ефект Мейснера*).

Якщо над провідником помістити магніт і, охолоджуючи, перевести провідник у надпровідний стан, магніт буде левітувати над надпровідником. Дослід, який демонструє ефект Мейснера, назвали «труна Магомета» — вважається, що труна з тілом пророка Магомета левітувала в повітрі без жодної підтримки.



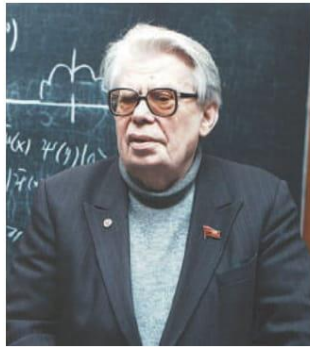


Рис. 5.4. Микола Миколайович Боголюбов (1909–1992) — видатний радянський фізик-теоретик і математик, засновник наукових шкіл у галузях нелінійної механіки, статистичної фізики і квантової теорії поля. У 1934–1959 рр. працював у Київському університеті, у 1965–1973 рр. — директор Інституту теоретичної фізики АН України (зараз цей інститут носить ім'я вченого)

до низьких температур — це досить дорого коштує. Зараз знайдено матеріали, які переходять у надпровідний стан за температури близько 100 К ($-173\text{ }^\circ\text{C}$) 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 $-70\text{ }^\circ\text{C}$.

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 (рис. 5.4) розробили квантову теорію надпровідності.

4

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Електричне коло складається із джерела струму, міліамперметра опором 20 Ом і реостата, обмотка якого виготовлена зі сталі. За температури $0\text{ }^\circ\text{C}$ показ міліамперметра 30 мА, а опір реостата — 200 Ом. Яким буде показ міліамперметра, якщо обмотка реостата нагріється до $50\text{ }^\circ\text{C}$? Внутрішнім опором джерела та опором з'єднувальних проводів 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 $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$. Температурний коефіцієнт опору сталі знайдемо в таблиці (див. Додаток 1).

Дано:
 $R_A = 20\text{ Ом}$
 $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$
 $I_0 = 30\text{ мА} = 0,03\text{ А}$
 $R_0 = 200\text{ Ом}$
 $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$
 $\alpha = 0,006\text{ К}^{-1}$

$I = ?$

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: $I \approx 24\text{ мА}$.



Підбиваємо підсумки

- Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.
 - За відсутності електричного поля вільні електрони в металах рухаються хаотично. Якщо в металевому провіднику існує електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, рухаються напрямлено.
 - Опір металевого провідника майже лінійно залежить від температури: $R = R_0(1 + \alpha t)$, де R_0 , R — опори провідника відповідно за температури $0\text{ }^\circ\text{C}$ і за даної температури t ; α — температурний коефіцієнт опору.
 - У разі зниження температури деяких металів до температур, близьких до абсолютного нуля, їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.



Контрольні запитання

1. Що являє собою електричний струм у металах? 2. Опишіть суть досліду Стюарта — Толмена 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 причина опору металів? 5. Чи залежить опір металів від температури? Якщо залежить, то як? 6. У чому полягає явище надпровідності?



Вправа № 5

1. На рис. 1 подано дослід. З якою метою здійснюється цей дослід? Назвіть використане обладнання. Як ви вважаєте, як і чому буде змінюватися показ вимірювального приладу під час нагрівання?
2. Чи виділяється теплота під час проходження струму в провіднику, який перебуває в надпровідному стані?
3. На рис. 2 подано графік залежності опору металевого провідника від температури. Яким є температурний коефіцієнт опору цього металу? Яка сила струму в провіднику за температури $150\text{ }^\circ\text{C}$, якщо напруга на кінцях провідника 5 В ?
4. Опір нікелінової обмотки електричної печі за температури $20\text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює 60 Ом . Яким буде опір обмотки, якщо температура сягне $700\text{ }^\circ\text{C}$?
5. Яку довжину має вольфрамова нитка лампи розжарювання, розрахованої на напругу 220 В і потужність 220 Вт ? Температура розжареної нитки становить 2700 К , її діаметр — $0,03\text{ мм}$.
6. На залежності опору металів від температури ґрунтується дія *термометрів опору* — *термоперетворювачів* (рис. 3). Дізнайтесь, як побудовані такі термометри, де їх застосовують, які метали використовують для виготовлення їхнього термометричного тіла.

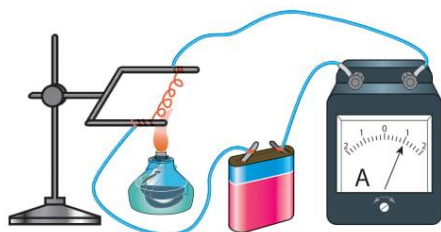


Рис. 1

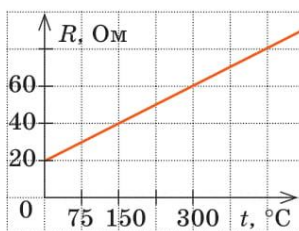


Рис. 2

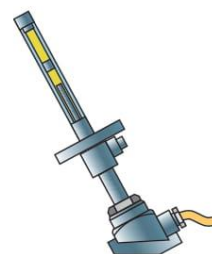


Рис. 3