

Урок 10 Електричний струм в металах

Мета уроку:

Навчальна: Формувати уявлення про основні теорії провідності металів; встановити залежність опору металів від температури і розкрити практичне застосування цієї залежності; з'ясувати фізичну суть явища надпровідності, проблематику його дослідження і перспективи використання; поглибити знання учнів про природу електричного струму в металах.

Розвивальна. З метою розвитку мислення розвивати вміння: аналізувати навчальний матеріал, умову задачі, хід розв'язання задачі; розкривати загальне і конкретне; встановлювати закономірності; систематизувати, встановлювати зв'язки нового з раніше вивченим;

Виховна. Виховувати уважність, зібраність, спостережливість.

Тип уроку: Комбінований.

Наочність і обладнання: навчальна презентація, комп'ютер, підручник.

Хід уроку

I. ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ЕТАП

II. АКТУАЛІЗАЦІЯ ОПОРНИХ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ

Ми вже знаємо, що:

Електричний струм – це напрямлений (упорядкований) рух частинок, які мають електричний заряд.

Які це частинки в металах, рідинах, газах?

На сьогоднішньому уроці ми розглянемо, що таке електричний струм в металах.

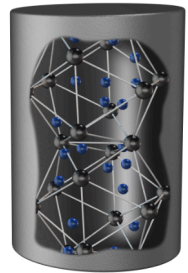
III. ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

1. Електричний струм в металах

Проблемне питання

- Яка внутрішня будова металевго провідника?

У будь-якому металі частина електронів покидає свої місця в атомі, у результаті чого атом перетворюється на позитивний йон. Позитивні йони та нейтральні атоми в металах розміщуються у строгому порядку, утворюючи так звані кристалічні ґратки.



- Як рухаються вільні електрони за відсутності електричного поля?

За відсутності електричного поля вільні електрони всередині металевго провідника рухаються хаотично у вигляді електронного газу.

Негативний заряд усіх вільних електронів за абсолютним значенням дорівнює позитивному заряду всіх йонів кристалічних ґраток. Тому за звичайних умов металевий провідник електрично нейтральний.

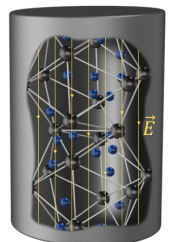
Проблемне питання

- Які електричні заряди рухаються під дією електричного поля в металевих провідниках?

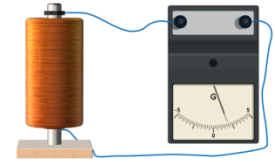
У 1899 р. німецький фізик-експериментатор *Карл Рікке* (1845-1915) на трамвайній підстанції у Штутгарті вмикав у головний провід, яким подавалося живлення трамвайним лініям, послідовно три металевих циліндри, тісно притиснутих один до одного торцями: два крайніх – мідних, а середній – алюмінієвий. Через ці циліндри понад рік проходив електричний струм. У результаті точного зважування до експерименту та після експерименту виявилося, що дифузія в металах не відбулася: у мідних циліндрах не було атомів алюмінію, і навпаки.

Таким чином Рікке довів, що *під час проходження провідником електричного струму йони не переміщуються, а в різних металах переміщуються лише електрони.*

Електричний струм у металах – це напрямлений рух електронів під дією електричного поля.



В 1916 р. американський фізик *Річард Толмен* (1881–1948) і шотландський фізик *Томас Стюарт* (1890–1958) провели дослід. Вони розкручували до великої швидкості котушку з мідного тонкого дроту навколо її осі, потім різко гальмували її і при цьому реєстрували в колі короткочасний електричний струм, зумовлений інерцією носіїв заряду, якими виявилися саме електрони.



2. Середня швидкість напрямленого руху електронів

Проблемне питання

- Як швидко рухаються електрони?

Середня швидкість *хаотичного руху* вільних електронів – близько 300 км/с.

Середня швидкість *направленого руху* вільних електронів – кілька міліметрів за секунду.

- Чому ж, щойно ми натискаємо вмикач лампи, вона відразу спалахує?

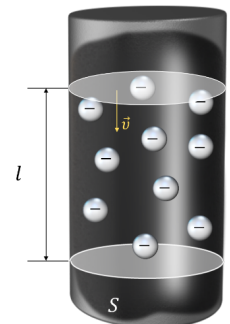
Річ у тім, що електричне поле поширюється в провіднику зі швидкістю 300000 км/с. Завдяки дії поля вільні електрони, розташовані в будь-якій точці провідника, майже миттєво втягуються в напрямлений рух.

Визначимо *середню швидкість $\bar{v}$ напрямленого руху електронів*. За інтервал часу t через переріз площею S провідника проходить N електронів:

$$N = nV = nSl = nS\bar{v}t$$

n – концентрація вільних електронів у провіднику.

$$q = N|e| \quad I = \frac{q}{t} \quad I = n|e|\bar{v}S \quad \Rightarrow \quad \bar{v} = \frac{I}{n|e|S}$$



3. Залежність опору металів від температури

Проблемне питання

- Як опір металів залежить від температури?

Опір металевого провідника збільшується в разі підвищення температури.

Залежність питомого опору та опору провідника від температури:

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

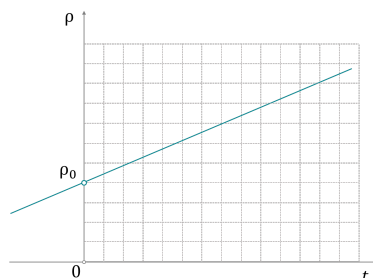
ρ_0 , R_0 – питомий опір і опір провідника за 0 °C

ρ , R – 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 коефіцієнту в СІ – **обернений кельвін** (кельвін у мінус першому степені): $[\alpha] = \text{K}^{-1}$



Графік залежності питомого опору провідника від температури (лінійна ділянка). *Зі збільшенням температури питомий опір провідника збільшується.*

Середній температурний коефіцієнт опору α речовини при температурі 293 К, $\times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

Алюміній	4,2	Платина	4,2
Вольфрам	4,6	Ртуть	0,89
Залізо	6,51	Свинець	3,66
Константан	0,01	Срібло	4,2
Латунь	1	Сталь	6
Манганін	0,03	Титан	3,5
Мідь	4,3	Фарфор	—
Нікелін	0,02	Цинк	4,2
Ніхром	0,2	Ебоніт	—
Олово	4,2	Ербій	252

4. Надпровідність

У 1911 р. голландський фізик *Гейке Камерлінг-Оннес* (1853-1926) уперше виявив зникнення електричного опору в ртуті за її охолодження до температури, нижчої від 4,12 К. У 1913 р. цей ефект було виявлено в білого олова (за температури 3,69 К) та свинцю (7,26 К).

Надпровідність – властивість деяких провідників стрибкоподібно зменшувати питомий опір до нуля за умови охолодження нижче певної критичної температури.

Властивості надпровідності:

- В кільцевому провіднику в надпровідному стані сила струму може не змінюватись як завгодно довго без джерела живлення.
- Неможливість створення всередині речовини в надпровідному стані магнітного поля. Зовнішнє магнітне поле не проникає всередину надпровідників.
- Надпровідний стан руйнується в достатньо сильному магнітному полі.

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 (1909-1992) розробили *квантову теорію надпровідності*.

IV. ЗАКРІПЛЕННЯ НОВИХ ЗНАНЬ І ВМІНЬ

1. Обчислити швидкість упорядкованого руху електронів у провіді, який має переріз 5 мм^2 , при силі струму 10 А , якщо концентрація електронів провідності становить $5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Дано:

$$S = 5 \text{ мм}^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$I = 10 \text{ А}$$

$$n = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\bar{v} = ?$$

Розв'язання $\bar{v} = \frac{I}{n|e|S}$ $[\bar{v}] = \frac{\text{А}}{\text{м}^{-3} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{А}}{\text{м}^{-3} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$\bar{v} = \frac{10}{5 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Відповідь: $\bar{v} = 0,25 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$.

2. آلюмінєвий провідник при 0°C має опір 20 Ом . Знайдіть опір цього провідника при температурі 300°C .

Дано:

$$R_0 = 20 \text{ Ом}$$

$$t = 300^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

$$R = ?$$

Розв'язання $R = R_0(1 + \alpha t)$

Врахуємо $\Delta t = t - t_0 = t$, де $t_0 = 0^\circ\text{C}$, а $\Delta t, ^\circ\text{C} = \Delta T, \text{К}$

$$[R] = \text{Ом} \cdot \text{К}^{-1} \cdot ^\circ\text{C} = \text{Ом}$$

$$R = 20 \cdot (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 300) = 45,2 \text{ (Ом)}$$

Відповідь: $R = 45,2 \text{ Ом}$.

3. Опір платиного провідника при температурі 20°C становить 20 Ом , а при температурі 500°C – 59 Ом . Визначте температурний коефіцієнт опору платини.

Дано:

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$R_1 = 20 \text{ Ом}$$

$$t_2 = 500^\circ\text{C}$$

$$R_2 = 59 \text{ Ом}$$

Розв'язання $R_1 = R_0(1 + \alpha t_1)$ $R_2 = R_0(1 + \alpha t_2)$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2} \quad R_1 + R_1 \alpha t_2 = R_2 + R_2 \alpha t_1$$

$$\alpha(R_1 t_2 - R_2 t_1) = R_2 - R_1$$

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}$$

$\alpha - ?$	$[\alpha] = \frac{0_{\text{М}} - 0_{\text{М}}}{0_{\text{М}} \cdot ^\circ\text{C} - 0_{\text{М}} \cdot ^\circ\text{C}} = \text{K}^{-1} \quad (\Delta t, ^\circ\text{C} = \Delta T, \text{K})$ $\alpha = \frac{59-20}{20 \cdot 500 - 59 \cdot 20} \approx 0,0044 \text{ (K}^{-1}\text{)}$ Відповідь: $\alpha \approx 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.
--------------	--

4. На скільки градусів потрібно нагріти мідний провідник, узятий при 0°C , щоб його опір збільшився в три рази?

Дано: $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ $R = 3R_0$	Розв'язання $R = R_0(1 + \alpha t)$ $t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{3R_0}{R_0} - 1 \right) = \frac{2}{\alpha}$ $[t] = \frac{1}{\text{K}^{-1}} = ^\circ\text{C} \quad (\Delta t, ^\circ\text{C} = \Delta T, \text{K})$ $t = \frac{2}{4,3 \cdot 10^{-3}} \approx 465 \text{ (}^\circ\text{C)}$ Відповідь: $t \approx 465 ^\circ\text{C}$.
$t - ?$	

5. З мідного дроту довжиною 120 м і діаметром 3 мм виготовили котушку. Знайдіть, на скільки зміниться її опір внаслідок нагрівання від $20 ^\circ\text{C}$ до $70 ^\circ\text{C}$. (Зміною геометричних розмірів у процесі нагрівання знехтувати.)

Дано: $l = 120 \text{ м}$ $d = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $t_1 = 20 ^\circ\text{C}$ $t_2 = 70 ^\circ\text{C}$ $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Розв'язання $R = R_2 - R_1$ $R_1 = R_0(1 + \alpha t_1) \quad R_2 = R_0(1 + \alpha t_2) \quad \Delta R = R_0 \alpha (t_2 - t_1)$ $R_0 = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\rho l}{\pi d^2} \quad \Delta R = \frac{4\rho l \alpha}{\pi d^2} (t_2 - t_1)$ $[\Delta R] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{K}^{-1}}{\text{м}^2} \cdot (^\circ\text{C} - ^\circ\text{C}) = \text{Ом}$ $\Delta R = \frac{4 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 120 \cdot 4,3 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2} \cdot (70 - 20) \approx 0,062 \text{ (Ом)}$ Відповідь: $\Delta R \approx 0,062 \text{ Ом}$.
$\Delta R - ?$	

6. Вугільний і мідний стрижні однакової довжини з'єднані послідовно. При якому відношенні їх поперечних перерізів загальний опір цих стрижнів не буде залежати від температури?

Дано: $l_1 = l_2 = l$ $\rho_{1\text{в}} = 821 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\rho_{2\text{м}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Розв'язання $R_1 = \frac{\rho_1 l_1}{S_1} (1 + \alpha t) \quad R_2 = \frac{\rho_2 l_2}{S_2} (1 + \alpha t)$ $R_1 = R_2 \quad \frac{\rho_1 l_1}{S_1} (1 + \alpha t) = \frac{\rho_2 l_2}{S_2} (1 + \alpha t)$ $\frac{S_1}{S_2} = \frac{\rho_1 l_1}{\rho_2 l_2} = \frac{\rho_1 l}{\rho_2 l} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad \left[\frac{S_1}{S_2} \right] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{м}} = 1$ $\frac{S_1}{S_2} = \frac{821 \cdot 10^{-8}}{1,7 \cdot 10^{-8}} \approx 483$
$\frac{S_1}{S_2} - ?$	

Відповідь: $\frac{S_1}{S_2} \approx 483$; площа поперечного перерізу вугільного стрижня повинна бути в 483 рази більшою за мідний.

7. Через два мідних провідники, з'єднаних послідовно, проходить струм. Порівняти швидкості упорядкованого руху електронів, якщо діаметр другого провідника у 2 рази менший, ніж першого.

Дано:

$$d_1 = 2d_2$$

Розв'язання

$$\bar{v} = \frac{I}{n|e|S} \quad S = \frac{\pi d^2}{4} \quad \Rightarrow \quad \bar{v} = \frac{4I}{n|e|\pi d^2}$$

$$\bar{v}_1 = \frac{4I}{n|e|\pi d_1^2} \quad \bar{v}_2 = \frac{4I}{n|e|\pi d_2^2}$$

$$\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} = ?$$

$$\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} = \frac{\frac{4I}{n|e|\pi d_1^2}}{\frac{4I}{n|e|\pi d_2^2}} = \frac{d_2^2}{d_1^2} = \frac{d_2^2}{4d_2^2} = \frac{1}{4}$$

Відповідь: $\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} = \frac{1}{4}$.

V. ПІДБИТТЯ ПІДСУМКІВ УРОКУ

Бесіда за питаннями

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?

VI. ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ

Опрацювати § 5, Вправа № 5 (2-4)

Додаткові задачі

1. При проходженні електричного струму по провіднику його опір збільшився в два рази внаслідок нагрівання від 0°C до 250 °C. Визначте температурний коефіцієнт опору речовини, з якої виготовили провідник.

Дано:

$$t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R = 2R_0$$

$$\alpha = ?$$

Розв'язання

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$\alpha = \frac{1}{t} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) = \frac{1}{t} \left(\frac{2R_0}{R_0} - 1 \right) = \frac{1}{t}$$

$$[\alpha] = \frac{1}{^{\circ}\text{C}} = \text{K}^{-1} \quad (\Delta t, ^{\circ}\text{C} = \Delta T, \text{K})$$

$$\alpha = \frac{1}{250} = 0,004 \text{ (K}^{-1}\text{)}$$

Відповідь: $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$.

2. Константановий дріт має масу 89 г і площу поперечного перерізу 0,1 мм². На скільки змінився опір дроту внаслідок його нагрівання від 0°C до 100 °C. (Зміною геометричних розмірів при нагріванні знехтувати.)

Дано:

$$m = 89 \text{ г} = 0,089 \text{ кг}$$

$$S = 0,1 \text{ мм}^2$$

$$= 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$$

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

$$t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\rho' = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\rho = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Розв'язання

$$\Delta R = R - R_0$$

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad R_0 = \rho' \frac{l}{S}$$

$$m = \rho V = \rho S l \quad l = \frac{m}{\rho S} \quad R_0 = \rho' \frac{\frac{m}{\rho S}}{S} = \frac{\rho' m}{\rho S^2}$$

$$\Delta R = \frac{\rho' m}{\rho S^2} (1 + \alpha t) - \frac{\rho' m}{\rho S^2} = \frac{\rho' m \alpha t}{\rho S^2}$$

$$[\Delta R] = \frac{\text{Ом}\cdot\text{м}\cdot\text{кг}\cdot\text{K}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\cdot\text{м}^4} = \text{Ом}$$

$$\Delta R = \frac{5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,089 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 100}{8900 \cdot (1 \cdot 10^{-7})^2} = 1 \text{ (Ом)}$$

Відповідь: $\Delta R = 1 \text{ Ом}$.

$$\Delta R = ?$$

3. Вугільний і мідний стрижні однакового перерізу з'єднані послідовно. При якому співвідношенні їхніх довжин загальний опір цих стрижнів не буде залежати від температури?

Дано:

$$S_1 = S_2 = S$$

$$\rho_{1\text{В}} = 821 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\rho_{2\text{М}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\frac{l_1}{l_2} = ?$$

Розв'язання

$$R_1 = \frac{\rho_1 l_1}{S_1} (1 + \alpha t) \quad R_2 = \frac{\rho_2 l_2}{S_2} (1 + \alpha t)$$

$$R_1 = R_2 \quad \frac{\rho_1 l_1}{S_1} (1 + \alpha t) = \frac{\rho_2 l_2}{S_2} (1 + \alpha t)$$

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\rho_2 S_1}{S_2 \rho_1} = \frac{\rho_2 S}{\rho_1 S} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad \left[\frac{l_1}{l_2} \right] = \frac{\text{Ом}\cdot\text{м}}{\text{Ом}\cdot\text{м}} = 1$$

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8}}{821 \cdot 10^{-8}} \approx \frac{1}{483} \quad l_2 = 483 l_1$$

Відповідь: $l_2 = 483 l_1$; довжина мідного стрижня повинна бути у 483 більшою за вугільний.

4. Сила струму в лампочці кишенькового ліхтарика 0,32 А. Скільки електронів проходить через поперечний переріз нитки розжарювання за 0,1 с?

Дано:

$$I = 0,32 \text{ А}$$

$$t = 0,1 \text{ с}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$N = ?$$

Розв'язання

$$q = N|e| \Rightarrow N = \frac{q}{|e|} = \frac{It}{|e|}$$

$$[N] = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}} = 1 \quad N = \frac{0,32 \cdot 0,1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2 \cdot 10^{17}$$

Відповідь: $N = 2 \cdot 10^{17}$.

5. Визначити швидкість упорядкованого руху електронів у сталюму провіднику, концентрація електронів провідності в якому 10^{28} м^{-3} , при напруженості поля 96 мВ/м.

Дано:

$$n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

$$E = 96 \frac{\text{мВ}}{\text{м}}$$

$$= 9,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\rho = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\bar{v} = ?$$

Розв'язання

$$\bar{v} = \frac{I}{n|e|S} \quad I = \frac{U}{R} \quad U = El \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

$$\bar{v} = \frac{El}{\rho \frac{l}{S} n|e|S} = \frac{E}{\rho n|e|}$$

$$[\bar{v}] = \frac{\frac{\text{В}}{\text{м}}}{\frac{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Кл}}{\frac{\text{В}}{\text{А}} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}} = \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\frac{\text{В}}{\text{А}} \cdot \text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\bar{v} = \frac{9,6 \cdot 10^{-2}}{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Відповідь: $\bar{v} = 0,5 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$.

6. Обчислити швидкість упорядкованого руху електронів у мідному проводі, що має переріз 25 мм^2 , при силі струму 50 А, вважаючи, що на кожен атом припадає один електрон провідності.

Дано:

$$S = 25 \text{ мм}^2$$

$$= 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$I = 50 \text{ А}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\rho = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Розв'язання

$$\bar{v} = \frac{I}{n|e|S} \quad n = \frac{N}{V} = \frac{v N_A}{V} = \frac{m}{M} \cdot \frac{N_A}{V} = \rho \cdot \frac{N_A}{M}$$

$$\bar{v} = \frac{IM}{\rho N_A |e| S}$$

$$[\bar{v}] = \frac{\frac{\text{А} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2}}{\frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\bar{v} = \frac{50 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3}}{8900 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 25 \cdot 10^{-6}} \approx 1,5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Відповідь: $\bar{v} = 0,15 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$.

$M = 63,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
$\bar{\nu} = ?$