

CHƯƠNG 27

DÒNG ĐIỆN VÀ ĐIỆN TRỞ

Trong chương này, chúng ta sẽ xem xét đến dịch chuyển của điện tích trong một vùng không gian được gọi là dòng điện. Rất nhiều những ứng dụng thực tế liên quan đến dòng điện. Thông thường thì dòng điện tồn tại trong vật dẫn chẳng hạn như sợi dây đồng. Cũng có khi bên ngoài vật dẫn, đó là dòng electron trong máy gia tốc. Chương này chúng ta sẽ mô tả dòng điện ở mức độ vi mô, mô tả những yếu tố ảnh hưởng đến sự di chuyển của điện tích. Một mô hình cổ điển được sử dụng để mô tả sự dẫn điện trong kim loại và bàn về những giới hạn của mô hình này.

27.1. DÒNG ĐIỆN

Dòng điện tích di chuyển trong một khối vật liệu phụ thuộc vào bản chất vật liệu đó và điện áp giữa hai đầu khối vật liệu. Chúng ta định nghĩa **cường độ dòng điện I** tại một điểm là số lượng điện tích trên một đơn vị thời gian qua bề mặt cắt ngang tại điểm đó.

Nếu có một lượng điện tích ΔQ di chuyển qua một mặt cắt ngang trong khoảng thời gian Δt thì chúng ta có **cường độ dòng điện trung bình I_{avg}** như sau:

$$I_{avg} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (27.1)$$

Nếu số lượng điện tích trên một đơn vị thời gian của dòng điện tích thay đổi theo thời gian thì cường độ dòng điện thay đổi theo thời gian, ta định nghĩa **cường độ dòng điện tức thời I** là giới hạn của **cường độ dòng điện trung bình khi $\Delta t \rightarrow 0$** :

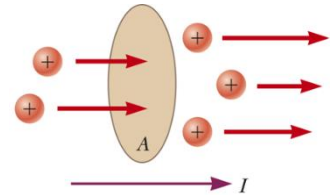
$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (27.2)$$

Trong hệ SI đơn vị của cường độ dòng điện là **ampere (A)** – dòng điện 1 A tương đương với điện tích 1 C chạy qua một tiết diện trong 1 s:

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

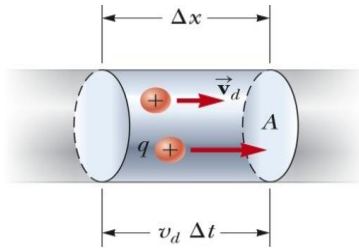
Điện tích chạy qua tiết diện có thể là âm, hoặc dương, hoặc cả điện tích âm và dương. **Quy ước chiều của dòng điện là chiều di chuyển của các hạt mang điện tích dương.** Đối với dây dẫn kim loại như đồng, nhôm thì hạt mang điện là electron có điện tích âm. Do vậy chiều dòng điện thì ngược với chiều di chuyển của electron. Nhưng trong một số trường hợp như trong chất khí và dung dịch điện ly thì dòng điện bao gồm dòng di chuyển của điện tích âm và điện tích dương.

Mô hình dòng điện vi mô

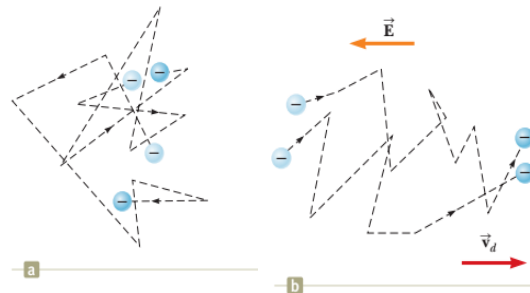


Hình 27. 1 Chiều của dòng điện là chiều di chuyển của các hạt mang điện tích dương

Xét chuyển động của hạt mang điện trong một đoạn dây dẫn vô cùng bé Δx như hình 27.2. Nếu n là mật độ hạt mang điện thì điện tích trong đoạn dây là $\Delta Q = (nA\Delta x)q$, với q là điện tích của một hạt mang điện.



Hình 27. 2 Một đoạn dây dẫn vô cùng bé Δx có diện tích mặt cắt ngang là A



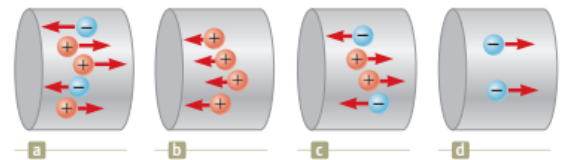
Hình 27. 3 Sơ đồ chuyển động của hai hạt mang điện trong dây dẫn khi (a) không có điện trường ngoài và (b) có điện trường ngoài.

Giả sử **vận tốc di chuyển của hạt mang điện** là v_d theo phương song song với trục của đoạn dây thì quãng đường hạt đi được $\Delta x = v_d \Delta t$, nên $\Delta Q = (nAv_d \Delta t)q$. Do vậy:

$$I_{avg} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_d A \quad (27.3)$$

Thật vậy vận tốc v_d của hạt mang điện có được khi áp vào hai đầu đoạn dây một điện trường, còn gọi là **vận tốc trôi**. Nếu không có điện trường này thì các hạt mang điện chuyển động ngẫu nhiên và zigzag do va chạm liên tục vào nhau (hình 27.3a). Khi có điện trường ngoài áp vào, hạt mang điện thay đổi như hình 27.3b với vận tốc trôi ngược chiều điện trường.

Câu hỏi 27.1: Giả sử các điện tích âm và điện tích dương chuyển động theo phương ngang ở 4 vùng không gian như hình 27.4. Hãy sắp xếp giá trị cường độ dòng điện theo thứ tự từ lớn đến nhỏ.



Hình 27. 4 Câu hỏi 27.1

Bài tập mẫu 27.1:

Một dây đồng dùng trong một tòa nhà chung cư có diện tích mặt cắt $3,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ có dòng điện không đổi 10 A chạy qua. Giả sử mỗi nguyên tử đồng chứa một electron tự do. Khối lượng riêng của đồng là $8,92 \text{ g/cm}^3$, phân tử gam của đồng là 63,5 g/mol. Tính vận tốc trôi của các electron trong dây.

Giải :

Ta có 1 mol lượng chất chứa $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ nguyên tử và 1 mol đồng có khối lượng $M = 63,5 \text{ g}$. Như vậy, 1 mol đồng sẽ có thể tích: $V = \frac{M}{\rho}$

Từ giả thuyết mỗi nguyên tử đồng chứa một electron tự do ta tìm được mật độ electron trong dây đồng: $n = \frac{N_A}{V} = \frac{N_A \rho}{M}$

Vậy ta tính được vận tốc trôi (với $I_{avg} = I$ do dòng điện là dòng không đổi):

$$v_d = \frac{I_{avg}}{nqA} = \frac{IM}{N_A \rho q A} = \frac{10.63,5}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 8920 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,31 \cdot 10^{-6}} = 2,23 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

27.2. ĐIỆN TRỞ

Mật độ dòng điện J được định nghĩa là cường độ dòng điện trên một đơn vị diện tích.

$$J = \frac{I}{A} = nqv_d \quad (27.4)$$

Đối với một số loại vật liệu, mật độ dòng điện tỷ lệ với cường độ điện trường ngoài áp vào dây dẫn:

$$J = \sigma E \quad (27.5)$$

Trong đó σ được gọi là độ dẫn điện của vật dẫn, **phương trình (27.5)** được gọi là **định luật Ohm**. Đối với hầu hết vật liệu dẫn điện thì σ là hằng số, tức là không phụ thuộc vào điện trường E áp vào dây dẫn.

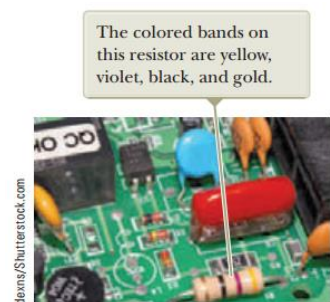
Ngoài ra ta có thể xây dựng công thức định luật Ohm sử dụng phổ biến là:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (27.6)$$

Với $R = \frac{l}{\sigma A}$ là điện trở của đoạn dây.

Điện trở được định nghĩa là *tỷ số của hiệu điện thế ở hai đầu dây và cường độ dòng điện trong đoạn dây*. Trong hệ đơn vị SI, điện trở có đơn vị là ohm (Ω): $1 \Omega = \frac{1V}{1A}$

Hầu hết các mạch điện đều sử dụng điện trở để điều chỉnh dòng điện ở các phần khác nhau trong mạch điện. Điện trở có hai loại phổ biến là điện trở lõi carbon và điện trở lõi kim loại. Giá trị của điện trở được quy ước bằng mã màu như trong bảng 27.1. Hai màu đầu tiên trên điện trở cho ta hai số đầu trong giá trị điện trở, màu thứ ba biểu diễn số mũ và màu cuối cùng cho biết dung sai của giá trị điện trở. Ví dụ dải màu trên điện trở ở hình 27.5 là vàng (yellow), tím, đen và vàng (gold), tra trong bảng 27.1 ta đọc được giá trị của điện trở là : vàng (= 4), tím (= 7), đen (= 10^0), sai số 5%, tức là $47 \cdot 10^0 \Omega = 47 \Omega$ – sai số 2 Ω .



Hình 27. 5 Một điện trở gắn trong một mạch điện tích hợp.

Bảng 27.1 : Bảng mã màu quy ước cho điện trở

Table 27.1		Color Coding for Resistors	
Color	Number	Multiplier	Tolerance
Black	0	1	
Brown	1	10^1	
Red	2	10^2	
Orange	3	10^3	
Yellow	4	10^4	
Green	5	10^5	
Blue	6	10^6	
Violet	7	10^7	
Gray	8	10^8	
White	9	10^9	
Gold		10^{-1}	5%
Silver		10^{-2}	10%
Colorless			20%

Điện trở suất là nghịch đảo của độ dẫn điện σ , ký hiệu là ρ , có đơn vị là Ωm :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (27.8)$$

Như vậy, điện trở qua một đoạn dây chiều dài l là:

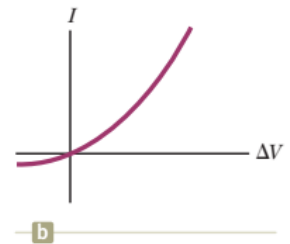
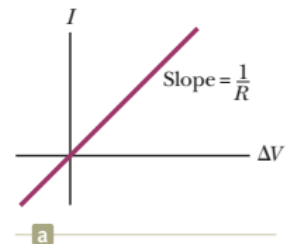
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (27.9)$$

Bảng 27.2 cho ta giá trị điện trở suất ở các vật liệu khác nhau đo ở 20°C . Trong bảng này ta thấy giá trị điện trở suất rất thấp của những chất dẫn điện tốt như bạc, đồng; ngược lại giá trị rất cao của những chất cách điện tốt như thủy tinh, cao su.

Bảng 27.2: Bảng giá trị điện trở suất và hệ số nhiệt độ của các vật liệu khác nhau

Table 27.2 Resistivities and Temperature Coefficients of Resistivity for Various Materials

Material	Resistivity ^a ($\Omega \cdot \text{m}$)	Temperature Coefficient ^b α [$(^\circ\text{C})^{-1}$]
Silver	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Copper	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Gold	2.44×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Aluminum	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Tungsten	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Iron	10×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Platinum	11×10^{-8}	3.92×10^{-3}
Lead	22×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Nichrome ^c	1.00×10^{-6}	0.4×10^{-3}
Carbon	3.5×10^{-5}	-0.5×10^{-3}
Germanium	0.46	-48×10^{-3}
Silicon ^d	2.3×10^3	-75×10^{-3}
Glass	10^{10} to 10^{14}	
Hard rubber	$\sim 10^{13}$	
Sulfur	10^{15}	
Quartz (fused)	75×10^{16}	



Hình 27.6 (a) (b)

Vật liệu Ohmic và non-Ohmic (Ohmic & non-Ohmic material): Vật liệu thỏa mãn định luật Ohm được gọi là vật liệu Ohmic, tức là trong mạch điện, dòng điện đi qua vật đó và hiệu điện thế giữa hai đầu vật đó tỷ lệ tuyến tính với nhau như hình (27.6 a). Ví dụ điển hình của chất dẫn điện Ohmic đó là điện trở. Ngược lại, vật liệu không thỏa mãn định luật Ohm gọi là vật liệu non-Ohmic. Ví dụ điển hình cho linh kiện điện tử non-Ohmic đó là các linh kiện rất cơ bản trong mạch điện như diode bán dẫn (mối liên hệ giữa dòng điện và hiệu điện thế như trên hình 27.6 b), *transistor*.

Câu hỏi 27.2: Một dây dẫn hình trụ bán kính r , chiều dài l . Nếu cả r và l tăng gấp đôi thì điện trở của dây (a) tăng, (b) giảm và (c) không đổi?

Câu hỏi 27.3: Trong hình 27.6 b, nếu ta tăng điện thế áp vào diode thì điện trở của nó (a) tăng, (b) giảm hay (c) không đổi?

Bài tập mẫu 27.2:

Bán kính của một dây Nichrome 22-gauge là 0,32 mm. (a) Tính điện trở trên một đơn vị chiều dài của dây này. (b) Nếu hiệu điện thế giữa hai điểm trên dây cách nhau 1 m thì dòng điện trên dây là bao nhiêu? (AWG – American Wire Gauge là chỉ số chỉ độ lớn của dây điện theo tiêu chuẩn Mỹ. Chỉ số AWG có tỷ lệ nghịch với độ lớn của dây điện)

Giải

Ta có thể mô hình hóa dây dẫn này dạng hình trụ. Áp dụng biểu thức (27.9) và dùng bảng 27.2 để có giá trị điện trở suất của Nichrome, ta tính được điện trở trên một đơn vị chiều dài của dây này:

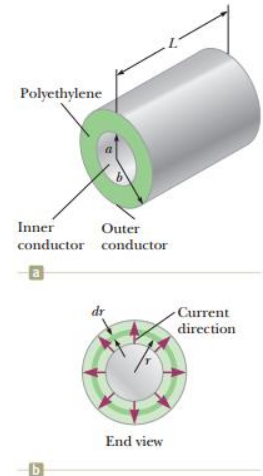
$$\frac{R}{l} = \frac{\rho}{A} = \frac{\rho}{\pi r^2} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot (0,32 \cdot 10^{-3})^2} = 3,1 \Omega/m$$

Áp dụng phương trình 27.6 ta tính được dòng điện chạy trong dây:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\Delta V}{\left(\frac{R}{l}\right) \cdot l} = \frac{10}{3,1 \cdot 1} = 3,2 \text{ A}$$

Bài tập mẫu 27.3:

Cáp đồng trục là loại cáp sử dụng rộng rãi cho truyền hình cáp và những ứng dụng điện tử khác. Một cáp đồng trục bao gồm hai dây dẫn hình trụ đồng trục. Vùng giữa các dây dẫn là chất dẻo polyetylen như trong hình 27.7a. Có một dòng rò rỉ qua lớp chất dẻo này. (Cáp được thiết kế để dẫn dòng điện dọc theo chiều dài của nó, nhưng đó không phải là dòng điện đang được xem xét ở đây). Bán kính của dây dẫn bên trong $a = 0,5 \text{ cm}$, bán kính của dây dẫn ngoài $b = 1,75 \text{ cm}$ và chiều dài dây dẫn là $L = 15 \text{ cm}$. Điện trở suất của lớp chất dẻo là $1 \cdot 10^{13} \Omega \cdot m$. Hãy tính điện trở của lớp chất dẻo ở giữa hai dây.



Giải

Chia nhỏ phần chất dẻo ra thành những lớp vỏ hình trụ đồng tâm vô cùng nhỏ có bề dày dr như hình 27.7 b. Bất kỳ hạt mang điện nào di chuyển từ phần dẫn điện bên trong đến bên ngoài đều phải đi qua lớp vỏ này.

Hình 27. 7 Bài tập mẫu 27.3

Từ phương trình 27.9 ta tính được điện trở của lớp vỏ bề dày dr , diện tích A :

$$dR = \rho \frac{dr}{A} = \frac{\rho}{2\pi r L} dr$$

Lấy tích phân biểu thức trên với r thay đổi từ a đến b , ta tính được điện trở của lớp chất dẻo:

$$R = \int dR = \frac{\rho}{2\pi L} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{b}{a} = \frac{10^{13}}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,15} \ln \frac{1,75}{0,5} = 1,33 \cdot 10^{13} \Omega$$

Phân tích: Nếu phần dây dẫn trong 15 cm cáp đồng trục này sử dụng dây đồng thì điện trở của dây dẫn hình trụ bên trong là:

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{l}{A} = 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{0,15}{\pi (5 \cdot 10^{-3})^2} = 3,2 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Ta thấy điện trở của phần dẫn nhỏ hơn phần chất dẻo khoảng 10^{18} lần nên chủ yếu các hạt mang điện sẽ di chuyển dọc theo chiều dài dây dẫn, chỉ một phần rất nhỏ hạt mang điện di chuyển theo hướng xuyên tâm.

27.3.MỘT MÔ HÌNH DẪN ĐIỆN

Mô hình dẫn điện trong kim loại của Paul Drude được trình bày năm 1900. Trong kim loại luôn tồn tại electron tự do (còn gọi là electron dẫn) chuyển động theo phương bất kỳ và va chạm vào các nút mạng nguyên tử. Khi có điện trường áp vào thì electron chuyển động theo phương ngược chiều điện trường với vận tốc trôi v_d (có giá trị thông thường là 10^{-4} m/s) nhỏ hơn nhiều so với vận tốc electron chuyển động tự do (10^6 m/s).

Một số giả thiết của mô hình này:

- Chuyển động của electron sau va chạm không phụ thuộc vào chuyển động của nó trước va chạm.
- Năng lượng electron có được dưới tác dụng của điện trường được truyền cho các nguyên tử trong quá trình va chạm.

Chính vì truyền năng lượng cho các nguyên tử mà nhiệt độ của vật dẫn tăng lên.

Khi một electron tự do có khối lượng (m_e) và điện tích ($q = -e$) trong điện trường E thì chịu tác dụng một lực điện $\vec{F} = q\vec{E}$, theo định luật II Newton thì $\vec{F} = m\vec{a}$, nên:

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m_e} \quad (27.10)$$

Do vậy vận tốc trôi là:

$$\vec{v}_d = \frac{q\vec{E}}{m_e} \tau \quad (27.11)$$

Với τ là khoảng thời gian trung bình giữa hai va chạm liên tiếp. Từ đây suy ra mật độ dòng điện là:

$$J = nqv_d = \frac{nq^2E}{m_e} \tau \quad (27.12)$$

So sánh với biểu thức định luật Ohm $J = \sigma E$ thì ta có độ dẫn điện và điện trở suất của dây dẫn là:

$$\sigma = \frac{nq^2}{m_e} \tau \quad (27.13)$$

$$\rho = \frac{m_e}{nq^2\tau} \quad (27.14)$$

Ta thấy rằng cả hai đại lượng trên đều không phụ thuộc vào điện trường ngoài áp vào.

27.4.ĐIỆN TRỞ VÀ NHIỆT ĐỘ

Trong khoảng nhiệt độ giới hạn, điện trở suất của dây dẫn phụ thuộc gần như tuyến tính vào nhiệt độ theo phương trình sau:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (27.15)$$

Trong đó ρ là điện trở suất tại nhiệt độ T , ρ_0 là điện trở suất của dây dẫn tại nhiệt độ chuẩn T_0 (thường là 20°C), và α là hệ số nhiệt độ điện trở suất, được xác định theo hệ thức:

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (27.16)$$

Với $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ là độ thay đổi điện trở suất trong khoảng chênh lệch nhiệt độ $\Delta T = T - T_0$.

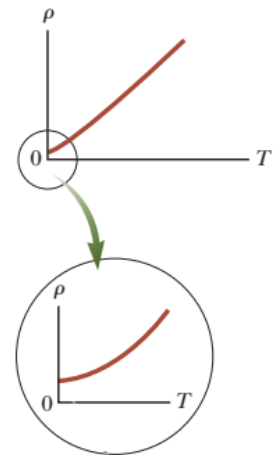
Hệ số nhiệt độ điện trở suất của những vật liệu khác nhau được cho trong bảng 27.2. Chú ý đơn vị của α là $(^\circ\text{C})^{-1}$.

Do điện trở tỉ lệ với điện trở suất (phương trình 27.9) nên sự thay đổi điện trở của dây dẫn theo nhiệt độ sẽ là:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (27.17)$$

Với R_0 là điện trở dây dẫn tại nhiệt độ T_0 .

Đối với kim loại, chẳng hạn như đồng, điện trở tỉ lệ gần như tuyến tính với nhiệt độ được biểu diễn như hình 27.8. Tuy nhiên, tồn tại một vùng phi tuyến ở nhiệt độ thấp, tức là tồn tại giá trị điện trở suất xác định khi nhiệt độ tiệm cận 0° tuyệt đối (hình ảnh phóng to vùng này bên dưới). Có thể giải thích về giá trị điện trở suất dư ở 0° tuyệt đối này là do va chạm giữa các electron với tạp chất và sự không hoàn hảo bên trong kim loại. Ngược lại, ở vùng nhiệt độ cao hơn (vùng tuyến tính), điện trở suất có được do sự va chạm giữa các electron với nhau và với nguyên tử kim loại.



Hình 27. 8 Điện trở suất thay đổi theo nhiệt độ trong kim loại.

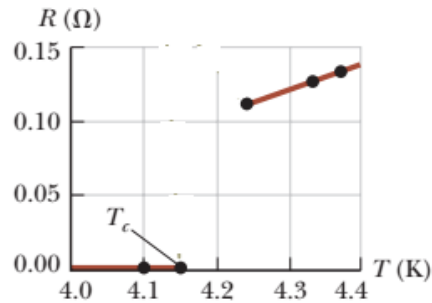
Lưu ý rằng ba trong số các giá trị trong bảng 27.2 là âm, cho thấy điện trở suất của các vật liệu này giảm khi nhiệt độ tăng. Nó biểu hiện một loại vật liệu gọi là chất bán dẫn (đã được giới thiệu trong phần 23.2). Có thể giải thích là do sự gia tăng mật độ của các hạt mang điện ở nhiệt độ cao hơn. Do các hạt mang điện trong chất bán dẫn thường liên quan đến các nguyên tử tạp chất (chúng ta sẽ thảo luận chi tiết hơn trong chương 43), nên điện trở suất của các vật liệu này rất nhạy cảm với các tạp chất đó.

Câu hỏi 27.4: Khi nào một bóng đèn sợi đốt mang nhiều dòng điện hơn? (a) ngay sau khi được bật và độ phát sáng của dây tóc kim loại đang tăng hoặc (b) sau khi nó được bật trong vài mili giây và ánh sáng đã ổn định?

27.5.SIÊU DẪN

Vật liệu siêu dẫn là kim loại và hợp chất của nó có điện trở gần như bằng 0 khi ở dưới một nhiệt độ tới hạn T_c . Hiện tượng siêu dẫn được nhà vật lý Hà Lan Heike Kamerlingh-Onnes phát hiện năm 1911 khi tiến hành thí nghiệm với thủy ngân với nhiệt độ tới hạn $T_c = 4,2\text{ K}$ (hình 27.9). Các phép đo thực nghiệm cho thấy giá trị điện trở suất của các chất siêu

dẫn dưới nhiệt độ T_C thấp hơn $4.10^{-25} \Omega.m$, tức là nhỏ hơn khoảng 10^{17} lần so với đồng. Thực tế có thể coi nó gần như bằng 0.



Hình 27. 9 Điện trở thay đổi theo nhiệt độ của một mẫu thủy

Ngày nay người ta đã tìm ra hàng ngàn vật liệu siêu dẫn với nhiệt độ tới hạn cao hơn, trong đó có cả vật liệu vô cơ. Bảng 27.3 cho ta một số ví dụ về chất siêu dẫn và nhiệt độ tới hạn của nó.

Bảng 27.3: Nhiệt độ tới hạn của một số vật liệu siêu dẫn

Material	T_c (K)
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	134
Tl—Ba—Ca—Cu—O	125
Bi—Sr—Ca—Cu—O	105
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
Nb ₃ Ge	23.2
Nb ₃ Sn	18.05
Nb	9.46
Pb	7.18
Hg	4.15
Sn	3.72
Al	1.19
Zn	0.88

Giá trị của nhiệt độ tới hạn rất phụ thuộc vào thành phần hóa học, áp suất và cấu trúc phân tử của vật liệu. Mặc dù đồng, bạc và vàng dẫn điện rất tốt nhưng lại không thể hiện tính siêu dẫn.

Một ứng dụng quan trọng và hữu ích của vật liệu siêu dẫn là nam châm siêu dẫn mà trong đó từ trường của nó lớn gấp 10 lần so với nam châm thông thường ở điều kiện tốt nhất. Do vậy, nó có khả năng dự trữ năng lượng lớn. Nam châm siêu dẫn được dùng trong kỹ thuật y khoa chụp ảnh cộng hưởng từ (magnetic resonance imaging, MRI) để tạo ra hình ảnh chụp các cơ quan trong cơ thể có chất lượng cao mà không cần dùng năng lượng bức xạ từ X-ray.

27.6. ĐIỆN NĂNG

Xét một mạch điện như hình 27.10. Giả sử có một lượng điện tích Q di chuyển trong mạch tạo thành dòng điện có cường độ I , từ hóa năng trong pin đã tạo thành lượng điện năng $U = Q\Delta V$. Khi điện tích di chuyển đến điện trở thì nó va chạm với các phân tử vật chất và truyền năng lượng cho các phân tử này làm cho điện trở nóng lên, ở đây ta bỏ qua lượng điện năng mất mát trên dây dẫn.

Độ giảm điện năng của hệ khi điện tích Q di chuyển qua điện trở R là:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}(Q\Delta V) = \frac{dQ}{dt}\Delta V = I\Delta V$$

Trong đó I là cường độ dòng điện qua điện trở. Năng lượng hệ được thu lại khi điện tích di chuyển về pin.

Công suất mạch điện:

$$P = I\Delta V \quad (27.18)$$

Mà $\Delta V = IR$ nên:

$$P = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R} \quad (27.19)$$

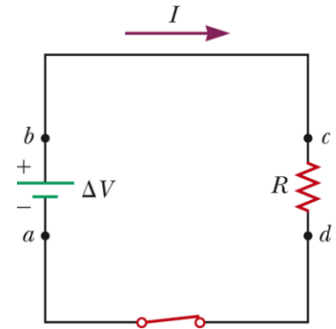
Biểu thức (27.19) chính là nội dung của định luật Joule – Lenz (hay còn gọi là định luật Joule thứ I). Phát biểu **định luật Joule thứ I**: công suất của nguồn nhiệt được tạo ra bởi một vật dẫn điện tỷ lệ thuận với điện trở của nó và với bình phương cường độ dòng điện qua vật dẫn.

Như vậy, trong mạch điện trên đã có sự chuyển hóa điện năng từ nguồn là do pin thành nội năng của vật liệu làm điện trở. Và khi nội năng của điện trở tăng sẽ làm nó nóng lên. Năng lượng này còn gọi là nhiệt Joule (Joule heating).

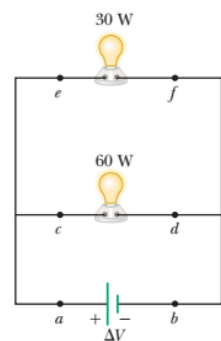
Nhiệt Joule còn được gọi là *Nhiệt Ohm* hoặc *trở nhiệt* vì mối quan hệ của định luật Joule–Lenz với định luật Ohm. Lý thuyết này là cơ sở cho phần lớn các ứng dụng thực tế liên quan đến *suối ấm bằng điện*. Tuy nhiên, trong các ứng dụng mà nhiệt là một sản phẩm không mong muốn khi sử dụng, các hao phí năng lượng này thường được gọi chung là *tổn thất điện trở* (resistive loss). Quá trình truyền tải điện năng đi xa là một ví dụ điển hình. Các đường dây điện truyền đi xa không thể xem như điện trở của dây bằng 0. Mà công suất thực của một đường dây $P = I^2 R = I \cdot \Delta V$. Như vậy, để giảm thiểu hao phí, người ta đã chọn phương án là truyền đi một dòng điện nhỏ, tương ứng hiệu điện thế giữa 2 điểm rất cao.

Nhiệt Joule ảnh hưởng đến toàn bộ dây dẫn điện nhưng nhiệt Joule không xuất hiện trong các vật liệu siêu dẫn, vì vật liệu này có điện trở bằng 0.

Câu hỏi 27.5 : Cho hai bóng đèn dây tóc như trên hình 27.11, hãy sắp xếp từ lớn nhất đến nhỏ nhất giá trị dòng điện tại các vị trí a \rightarrow f.



Hình 27. 10 Mạch điện gồm một điện trở R và nguồn điện pin có điện thế ΔV



Hình 27. 11
Câu hỏi 27.5

Bài tập mẫu 27.4 :

Dây Nichrome có điện trở suất cao và thường được dùng làm bộ phận làm nóng trong lò nướng bánh, bàn là và lò sưởi điện. Một lò sưởi điện dùng dây Nichrome có tổng trở 8 Ω . Áp một hiệu điện thế 120 V vào cho nó hoạt động. Tính dòng điện đi qua dây và công suất của lò sưởi.

Giải :

Áp dụng biểu thức (27.6) để tính dòng điện chạy trong dây :

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{120}{8} = 15A$$

Áp dụng biểu thức (17.19) để tính công suất của lò sưởi :

$$P = I^2 R = 15^2 \cdot 8 = 1800 W$$

Bài tập mẫu 27.5 :

Một dây điện trở đun nước cần phải tăng nhiệt độ của 1,5 kg nước từ 10°C lên 50°C trong 10 phút, với điện áp hoạt động là 110 V. (A) Điện trở cần thiết của dây điện trở là bao nhiêu ? (B) Hãy ước đoán giá thành của việc đun nước trên.

Giải :

Tính điện trở của dây điện trở:

Nhiệt lượng cần thiết để 1,5 kg nước tăng nhiệt độ từ 10°C lên 50°C là : $Q = mc\Delta T$

Công suất của dây điện trở là tỷ số nhiệt lượng cần thiết và thời gian thực hiện : $P = \frac{Q}{\Delta t}$

Theo đề bài ta có $\Delta t = 10 \text{ phút} = 600 \text{ giây}$.

Mà ta có : $P = \frac{(\Delta V)^2}{R}$

Từ đó ta tính được điện trở cần thiết của dây điện trở là :

$$R = \frac{(\Delta V)^2 \Delta t}{mc\Delta T} = \frac{110^2 \cdot 600}{1,5 \cdot 4186 \cdot (50 - 10)} = 28,9 \Omega$$

Ước đoán giá thành của việc đun nước:

Năng lượng truyền cho dây điện trở trong 10 phút đó là :

$$T_{ET} = P \cdot \Delta t = \frac{(\Delta V)^2}{R} \Delta t = \frac{110^2}{28,9} \cdot 10 \cdot \frac{1}{60} = 69,8 Wh = 0,0698 kWh$$

Giả sử tính theo giá điện hiện nay là 2570 VNĐ, ước đoán giá thành của việc đun nước này sẽ mất $0,0698 \cdot 2570 = 179 VNĐ$.

Câu hỏi trắc nghiệm (Objective question)

- (OQ2) Hai dây A và B có tiết diện tròn được làm bằng cùng một kim loại và có độ dài bằng nhau, nhưng điện trở của dây A lớn hơn ba lần so với dây B.
 - Tỷ lệ diện tích mặt cắt ngang của A so với B là bao nhiêu? (a) 3, (b) $\sqrt{3}$, (c) 1, (d) $1/\sqrt{3}$ và (e) $1/3$.
 - Tỉ số bán kính của A so với B là bao nhiêu? (a) 3, (b) $\sqrt{3}$, (c) 1, (d) $1/\sqrt{3}$ và (e) $1/3$.
- (OQ6) Ba dây được làm bằng đồng có tiết diện tròn. Dây 1 có chiều dài L và bán kính r. Dây 2 có chiều dài L và bán kính 2r. Dây 3 có chiều dài 2L và bán kính 3r. Dây nào có điện trở nhỏ nhất? (a) dây 1 (b) dây 2 (c) dây 3 (d) Tất cả đều có cùng điện trở. (e) Không đủ thông tin được đưa ra để trả lời câu hỏi.
- (OQ8) Một dây kim loại có điện trở $10\ \Omega$ ở nhiệt độ 20°C . Nếu cùng một dây có điện trở $10,6\ \Omega$ ở 90°C , điện trở của dây này là bao nhiêu khi nhiệt độ của nó là $-20,0^\circ\text{C}$? (a) 0,7 V, (b) 9,66 V, (c) 10,3 V, (d) 13,8 V và (e) 6,59 V.
- (OQ11) Hai dây dẫn A và B có cùng chiều dài và bán kính được kết nối với cùng một hiệu điện thế. Dây dẫn A có điện trở suất gấp đôi dây dẫn B. Tỷ lệ công suất của dây A so với dây B là bao nhiêu? (a) 2, (b) $\sqrt{2}$, (c) 1, (d) $1/\sqrt{2}$ và (e) $1/2$.

Câu hỏi khái niệm

- (CQ3) Khi hiệu điện thế giữa hai đầu dây tăng gấp đôi, dòng điện được quan sát là tăng gấp 3. Bạn có thể kết luận gì về dây dẫn?
- (CQ5) Điện trở của dây đồng và silic thay đổi theo nhiệt độ như thế nào? Tại sao chúng lại có biểu hiện khác nhau?
- (CQ8) Tiêu đề một bài báo có dòng “Điện thế 10000 V xuyên qua cơ thể nạn nhân”. Hãy chỉ ra tiêu đề này sai chỗ nào?

Bài tập

- (P3) Một dây nhôm có diện tích mặt cắt ngang bằng $4 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2$ mang dòng điện 5 A. Mật độ của nhôm là $2,7\ \text{g/cm}^3$. Giả sử mỗi nguyên tử nhôm cung cấp một electron. Tìm tốc độ trôi của các electron trong dây.
ĐS: 0,13 mm/s
- (P10) Deuteri, hay còn gọi là hydro nặng, là một đồng vị bền của hydro có mặt phổ biến trong các đại dương của Trái Đất với tỉ lệ khoảng 1 nguyên tử trong 6400 nguyên tử hydro. Một máy phát Van de Graaff bắn ra một dòng deuteri mang năng lượng 2 MeV. Biết mỗi hạt nhân nguyên tử deuteri chứa 1 proton và 1 neutron. Cho dòng điện của chùm deuteri là $10\ \mu\text{A}$, hãy xác định khoảng cách trung bình giữa các nguyên tử deuteri.
ĐS : $2,21 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$
- (P13) Một ấm trà có diện tích bề mặt $700\ \text{cm}^2$ sẽ được mạ bạc. Nó được gắn vào điện cực âm của một bình điện phân có chứa bạc nitrat. Bình điện phân được cung cấp năng lượng bởi pin 12 V và có điện trở $1,8\ \Omega$. Mật độ bạc là $10,5 \cdot 10^3\ \text{kg/m}^3$, hỏi sau bao lâu thì mạ được lớp bạc dày 0,133 mm lên ấm trà (giả sử lớp bạc dày đều trên ấm trà)?

ĐS: 3,64 giờ

4. (P21) Một phần của dây Nichrom có bán kính 2,5 mm được dùng để tạo thành một cuộn dây đốt nóng. Cho dòng điện 9,25 A đi vào cuộn dây phải khi điện áp 120 V được đặt trên hai đầu của nó, hãy tìm (a) điện trở của cuộn dây và (b) chiều dài dây bạn phải sử dụng để tạo thành cuộn dây.

ĐS: (a) 13 Ω , (b) 170 m

5. (P25) Nếu độ lớn của vận tốc trôi của các electron tự do trong dây đồng là $7,84 \cdot 10^{-4}$ m/s thì điện trường trong dây dẫn là bao nhiêu?

ĐS: 0,18 V/m

6. (P24) Một dây sắt có diện tích mặt cắt ngang bằng $5 \cdot 10^{-6}$ m², mang dòng điện 30 A. (a) Có bao nhiêu kilogam sắt trong 1 mol sắt? (b) Tính mật độ mol của sắt (số mol sắt trên một mét khối). (c) Tính mật độ số nguyên tử sắt bằng số Avogadro. (d) Tính mật độ hạt mang điện biết mỗi nguyên tử sắt có hai electron tự do. (e) Tính tốc độ trôi của các electron dẫn trong dây này.

ĐS: (e) $2,21 \cdot 10^{-4}$ m/s

7. (P31) Một sợi dây đồng dài 34,5 m ở 20°C có bán kính 0,25 mm. Hiệu điện thế giữa 2 đầu dây là 9 V. (a) Hãy xác định dòng điện trong dây. (b) Nếu dây được làm nóng đến 30°C trong khi hiệu điện thế vẫn là 9 V, dòng điện trong dây là bao nhiêu?

ĐS: 3,01 A; 2,90 A

8. (P32) Một kỹ sư cần một điện trở có hệ số nhiệt bằng không ở 20°C. Cô thiết kế một cặp hình trụ tròn gồm một đoạn carbon và một đoạn Nichrome như hình bên. Thiết bị có tổng trở $R_1 + R_2 = 10 \Omega$, không phụ thuộc nhiệt độ và bán kính đồng nhất $r = 1,5$ mm. Bỏ qua sự giãn nở nhiệt của các vật và giả sử cả hai luôn ở cùng nhiệt độ. (a) Cô ấy có thể đáp ứng mục tiêu thiết kế với phương pháp này không? (b) Nếu có, hãy xác định độ dài l_1 và l_2 của mỗi phân đoạn. Nếu không, giải thích.



ĐS: $l_1 = 0,898$ m, $l_2 = 26,2$ m

9. (P33) Một dây nhôm có đường kính 0,1 mm có điện trường đều 0,2 V/m đặt dọc theo toàn bộ chiều dài của nó. Nhiệt độ của dây là 50°C. Giả sử mỗi nguyên tử nhôm có một electron tự do. (a) Sử dụng thông tin trong Bảng 27.2 để xác định điện trở suất của nhôm ở nhiệt độ này. Tính (b) mật độ dòng trong dây, (c) dòng điện trong dây, (d) tốc độ trôi của các electron dẫn và (e) hiệu điện thế giữa hai điểm cách nhau 2 m trên dây.

ĐS: $3,15 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$; $6,35 \cdot 10^6$ A/m²; 49,9 mA; $6,59 \cdot 10^{-4}$ m/s; 0,4 V

10. (P42) Một máy nấu nước cách nhiệt tốt đang làm nóng 109 kg nước từ 20°C đến 49°C trong 25 phút. Tìm điện trở của bộ phận làm nóng của nó, biết hiệu điện thế áp vào là 240 V.

ĐS: 6,53 Ω

11. (P49) Một cuộn dây Nichrome dài 25 m. Dây có đường kính 0,4 mm và ở 20°C. Nếu nó mang dòng điện 0,5 A, thì (a) cường độ của điện trường trong dây và (b) công suất của

nó là bao nhiêu? (c) Nếu nhiệt độ tăng lên 340°C và hiệu điện thế không đổi, công suất phát nhiệt của nó là bao nhiêu?

ĐS: 5,97 V/m; 74,6 W; 66,1 W.

12. (P50) Một Pin sạc có khối lượng 15 g cung cấp dòng điện trung bình 18 mA cho đầu DVD di động ở mức 1,6 V trong 2,4 h trước khi phải sạc lại pin. Bộ sạc duy trì mức điện áp 2,3 V trên pin và mang lại dòng sạc 13,5 mA trong 4,2 h. (a) Hiệu suất của pin (như một thiết bị lưu trữ năng lượng) là bao nhiêu? (b) Tính nội năng được tạo ra trong pin trong một chu kỳ nạp-xả? (c) Nếu pin được bao quanh bởi lớp cách nhiệt lý tưởng và có nhiệt dung riêng là $975 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$, nhiệt độ của nó sẽ tăng bao nhiêu trong chu kỳ?

ĐS: 0,53; 221 J; $15,1^{\circ}\text{C}$

13. (P52) Ước tính dưới đây có gì sai? Một chính trị gia đang chê bai việc sử dụng năng lượng một cách lãng phí và quyết định tập trung vào năng lượng được sử dụng để vận hành đồng hồ điện đặt ở Hoa Kỳ. Ông ước tính có 270 triệu đồng hồ, xấp xỉ một đồng hồ cho mỗi người dân. Đồng hồ sử dụng năng lượng ở mức trung bình 2,50 W. Chính trị gia này có một bài phát biểu trong đó ông phàn nàn rằng, với mức giá điện ngày nay, quốc gia này đang mất 100 triệu đô la mỗi năm để vận hành những chiếc đồng hồ này. Biết giá điện ở Mỹ trung bình khoảng $0,11 \text{ \$/1 kWh}$.

14. (P56) Một motor 120 V có công suất 2,5 hp. Nó có hiệu suất 90% trong việc chuyển đổi điện năng thành cơ năng. (a) Hỏi cường độ dòng điện chạy trong động cơ? (b) Tìm năng lượng cung cấp cho động cơ bằng cách truyền điện trong 3h hoạt động. (c) Nếu công ty điện tính phí $0,11\text{\$/1 kWh}$ thì chi phí để chạy động cơ trong 3h là bao nhiêu?

ĐS: 17,3 A; 22,4 MJ; 0,684

15. (P60) Trên bóng đèn A có ghi “25 W-120 V” và bóng đèn B có ghi “100 W-120 V” có nghĩa là mỗi bóng đèn có công suất tương ứng được truyền tới nó khi được kết nối với nguồn 120 V không đổi. (a) Tìm điện trở của mỗi bóng đèn. (b) 1 C điện tích truyền vào bóng đèn A trong bao lâu? (c) Điện tích này có khác khi thoát ra so với khi đi vào bóng đèn không? Giải thích. (d) Năng lượng 1 J truyền vào bóng đèn A trong bao lâu? (e) Theo cơ chế nào năng lượng này đi vào và thoát khỏi bóng đèn? Giải thích. (f) Tìm chi phí vận hành bóng đèn A liên tục trong 30 ngày, giả sử công ty điện bán sản phẩm của mình với giá $0,1\text{\$}$ mỗi kWh.

ĐS: (a) 576 – 144 Ω ; (b) 4,8 s; (c) Như nhau; (d) 0,04 s; (f) 1,98

16. (P66) Một chiếc xe chạy hoàn toàn bằng điện được thiết kế để chạy pin 12 V với tổng năng lượng dự trữ là $2 \cdot 10^7 \text{ J}$. Nếu động cơ điện đạt công suất 8 kW khi xe di chuyển với tốc độ ổn định 20 m/s, thì (a) cường độ dòng điện được truyền tới động cơ là bao nhiêu? (b) Xe có thể đi được bao xa trước khi hết pin?

ĐS: 667 A; 50 km

17. (P67) Một dây thẳng, hình trụ nằm dọc theo trục x có chiều dài 0,5 m và đường kính 0,2 mm. Nó được làm bằng vật liệu Ohmic, với điện trở suất là $\rho = 4 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Giả sử điện thế 4 V được duy trì ở đầu bên trái của dây ở $x = 0$, điện thế $V = 0$ ở $x = 0,5 \text{ m}$. Tìm (a)

độ lớn và hướng của điện trường trong dây, (b) điện trở của dây, (c) độ lớn và hướng của dòng điện trong dây và (d) mật độ dòng điện trong dây. (e) Chứng tỏ $E = \rho J$.

ĐS: (a) 8 V/m theo chiều dương trục x, (b) 0,637 Ω , (c) 6,28 A, (d) 200 MA/m²

18. Công ty điện lực cung cấp cho một nhà khách hàng các đường dây điện chính (120 V) với hai dây đồng, mỗi dây dài 50 m và có điện trở 0,185 Ω trên 300 m dây. (a) Tìm hiệu điện thế tại nhà của khách hàng với dòng tải 110 A. Đối với dòng tải này, hãy tìm (b) công suất cung cấp cho khách hàng và (c) công suất hao phí do biến thành nội năng trong dây đồng.

ĐS: 116 V; 12,8 kW; 436 W