

WŁASNOŚCI ELEKTRYCZNE DRUTU OPOROWEGO 41

O przepływie prądu elektrycznego mówimy, gdy ładunki elektryczne poruszają się w sposób ukierunkowany, np. wzdłuż metalowego drutu. W metalach możliwość ruchu mają elektrony przewodnictwa, które przed utworzeniem kryształu metalu były w oddzielnych atomach elektronami walencyjnymi, tzn. obsadzały najbardziej zewnętrzne powłoki elektronowe. Gdy atomy tworzą sieć krystaliczną metalu, to dyskretne, charakterystyczne dla poszczególnych atomów wartości energii (obsadzone i nieobsadzone poziomy energetyczne) ulegają rozszczepieniu i tworzą zbiory blisko leżących poziomów, zwane pasmami. Pasma obsadzone elektronami, położone w skali energii najwyżej, nazywa się **pasmem przewodnictwa metalu**. Elektrony z położonych bliżej jądra atomu powłok elektronowych, nie biorą udziału w przewodzeniu prądu, gdyż są zbyt silnie związane z jądrami poszczególnych atomów. W paśmie przewodnictwa tylko część poziomów o energii mniejszej lub równej tzw. energii Fermiego E_F , jest zapełniona elektronami. Nieobsadzone poziomy dają elektronom o energii bliskiej E_F możliwość ruchu, gdyż, aby się poruszać elektron musi zwiększyć swoją energię całkowitą o wartość odpowiadającą energii kinetycznej. Wewnątrz metalu elektrony przewodnictwa możemy traktować jako elektrony swobodne, podobnie do cząsteczek gazu idealnego umieszczonego w zamkniętym naczyniu. Nie mogą one jednak opuścić metalu i wyjść na zewnątrz, bez dostarczenia im dość sporej (w porównaniu z energią kinetyczną ich ruchu) energii. Elektrony przewodnictwa biorą udział w chaotycznym ruchu cieplnym, podobnym do ruchu atomów w gazie idealnym. Po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego E są unoszone w kierunku przeciwnym do pola elektrycznego (elektrony niosą ładunek ujemny), ze średnią prędkością v_u . Prędkość ta jest bardzo mała i w typowych warunkach przepływu prądu wynosi ok. $7.4 \cdot 10^{-5}$ m/s, czyli nie osiąga nawet 0.1 mm/s. Gdyby sygnał elektryczny rozchodził się tak jak podłużna fala sprężysta (np. fala akustyczna), to żarówka oddalona o 1 metr od kontaktu, zaświeciła by po upływie prawie 3 godzin od momentu włączenia prądu. Na szczęście tak nie jest, gdyż po zamknięciu obwodu elektrycznego wzdłuż drutu rozchodzi się fala elektromagnetyczna z prędkością równą prędkości światła c . Ta fala wymusza praktycznie jednoczesny start wszystkich elektronów przewodnictwa w kierunku przeciwnym do pola elektrycznego we wnętrzu metalu. Prostym dowodem na powstanie fali elektromagnetycznej w momencie włączenia prądu elektrycznego są towarzyszące temu trzaski w odbiornikach radiowych. Również rozchodzenie się sygnałów elektrycznych w liniach telegraficznych i telefonicznych odbywa się na analogicznej zasadzie. Jako prostą analogię tego mechanizmu można podać start kolumny piechurów na komendę "marsz!". Mimo iż prędkość piechura niewiele przekracza wartość 1 m/s, to cała kolumna rusza praktycznie jednocześnie, gdyż prędkość dźwięku w powietrzu jest wielokrotnie większa (ok. 300 m/s) i wszyscy piechurzy słyszą komendę praktycznie w tym samym momencie.

Niezależnie od mechanizmu przewodnictwa elektrycznego, dla jego ilościowego opisu wprowadza się wielkość skalarną zwaną natężeniem prądu J , charakteryzującą szybkość przepływu ładunku elektrycznego Q przez określony przekrój przewodnika:

$$J \equiv \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Jednostką natężenia prądu jest 1 amper (1A). Definicja tej jednostki w układzie SI jest oparta na pomiarze siły oddziaływania dwu równoległych, prostoliniowych przewodników, przez które płynie prąd o jednakowym natężeniu. Oddziaływanie przewodników odbywa się za pośrednictwem pól magnetycznych, wytwarzanych przez przepływający prąd.

Czasem, zamiast natężenia prądu J , trzeba użyć wielkość wektorową - wektor gęstości prądu \mathbf{j} zdefiniowany jako:

$$\mathbf{j} \equiv \frac{dJ}{dS} \mathbf{i}_0 \quad (2)$$

gdzie S jest powierzchnią przekroju poprzecznego przewodnika, a wektor \mathbf{i}_0 pokazuje kierunek przepływu prądu. Jednostką gęstości prądu \mathbf{j} jest amper na metr kwadratowy.

Jeśli do końców jednorodnego przewodnika o długości l przyłożymy różnicę potencjałów równą $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, to w przewodniku powstanie pole elektryczne o natężeniu E :

$$E = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} \mathbf{i}_o \quad (3)$$

Gęstość prądu \mathbf{j} jest proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego E w przewodniku:

$$\mathbf{j} = \sigma E \quad (4)$$

gdzie współczynnik proporcjonalności σ jest nazywany przewodnością elektryczną materiału. Odwrotność tej wielkości $\rho = 1/\sigma$ nazywamy opornością elektryczną danej substancji (dawniej nazywano ją oporem właściwym). Jednostką oporności jest 1 om·metr (1 $\Omega \cdot m$), a przewodności 1 $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ (1 siemens, czytaj zimens). Wartości oporności różnych materiałów zestawiono w Tabeli 2. Wzór (4) nosi nazwę różniczkowego prawa Ohma, gdyż może być przepisany przy użyciu pochodnych w postaci:

$$\frac{dJ}{dS} = \sigma \frac{d\varphi}{dl} \quad (5)$$

Prawo Ohma jest bardziej znane w postaci:

$$\Delta\varphi = U = J R \quad (6)$$

Różnica potencjałów $\Delta\varphi$ na końcach przewodnika zwana także napięciem elektrycznym U , jest proporcjonalna do natężenia prądu

J . Współczynnik proporcjonalności R nazywa się oporem elektrycznym danego przewodnika, albo jego rezystancją. Jednostką oporu elektrycznego jest 1 om [1 Ω]. Ze wzoru (6) wynika, że opór 1 Ω posiada taki odcinek przewodnika, w którym po przyłożeniu różnicy potencjałów 1 wolta, płynie prąd o natężeniu 1 ampera. Związek pomiędzy oporem elektrycznym przewodnika, a przewodnością σ , lub opornością elektryczną materiału ρ , z którego jest on wykonany podaje wzór (7):

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma S} \quad (7)$$

gdzie l - jest długością przewodnika, a S - powierzchnią jego przekroju.

Prawo Ohma (w obu formach matematycznych) przewiduje liniową zależność natężenia prądu (lub gęstości prądu) od przyłożonego napięcia U , (lub odpowiednio od natężenia pola elektrycznego E). Tak naprawdę taką zależność można otrzymać eksperymentalnie tylko dla metali i to w dodatku tylko w ściśle

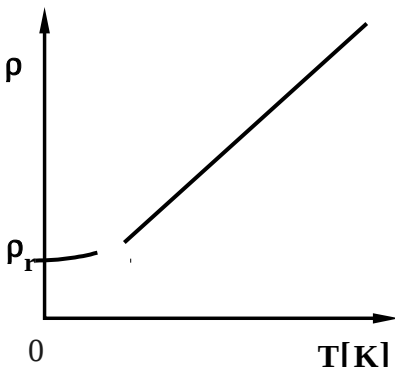
określonych warunkach, np. w stałej temperaturze, lub przy stosowaniu niewielkich napięć. Okazuje się bowiem, że opór R , a więc także oporność ρ , zależą silnie od takich parametrów jak temperatura T , czy też wartość napięcia pomiarowego U . Zaczniemy od metali. W dość szerokim przedziale temperatur (z wyjątkiem temperatur bardzo niskich, rzędu 10 kelwinów) ich oporność elektryczna ρ zwiększa się przy wzroście temperatury według wzoru:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (8)$$

gdzie ρ_0 -oporność elektryczna danej substancji w temperaturze T_0 , α - współczynnik temperaturowy oporu, $\Delta T = T - T_0$ - różnica temperatur (w skali Celsjusza). Wykres tej zależności pokazano na Rys. 1. Okazuje się, że głównym mechanizmem odpowiedzialnym za utrudnianie ruchu elektronów w metalu są ich oddziaływania z dodatnimi jonami metalu, tworzącymi sieć krystaliczną. Jony te drgają wokół położeń równowagi. Przy wzroście temperatury rośnie amplituda

Substancja ρ [$\Omega \cdot m$] Szafir (a-
Al₂O₃) > 10¹⁶ Teflon > 10¹⁶ Kwarc
topiony 10¹⁴- 10¹⁶ Grafit C 10⁻¹ Krzem
(cz.) 2.5 · 10⁻³ Platyna 1.1 · 10⁻⁷
Miedź 1.7 · 10⁻⁸ Srebro 1.6 · 10⁻⁸
*Nadprzewodnik (0K < T < 100K)

Tabela 2. Oporności elektryczne ρ niektórych izolatorów, półprzewodników i metali w temperaturze pokojowej



Rys. 1. Zależność oporu właściwego metalu od temperatury

tych drgań, zwanych fononami. Zwiększa to tzw. przekrój czynny na rozpraszanie elektronów, czyli powierzchnię przeszkód, z którymi "zderza się" elektron. Oprócz rozpraszania elektronów na fononach, możliwe są jeszcze inne mechanizmy, jak np. rozpraszanie elektronów na innych elektronach przewodnictwa, na domieszkach obcych atomów w metalu, a także na defektach struktury krystalicznej, (zaburzeń regularnego ułożenia jonów w kryształach metalu). Udział tych mechanizmów staje się zauważalny dopiero w przedziale niskich temperatur, gdzie zależność $\rho = \rho(T)$ przestaje być liniową, a w temperaturze bliskiej zera bezwzględnej pojawia się niezależna od temperatury tzw. oporność resztkowa ρ_r , której wartość zależy tylko od czystości chemicznej i doskonałości struktury krystalicznej danej próbki (pokazano to na Rys. 1).

Opór właściwy ρ w temperaturze 20° C

<i>Metale</i>	$\rho \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$	<i>Metale</i>	$\rho \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
Aluminium	0,0282	Platyna	0,111
Cyna	0,114	Rtęć	0,958
Cynk	0,0522	Srebro	0,0162
Miedź	0,0168	Wolfram	0,055
Ołów	0,22	Żelazo (czyste)	0,0978

<i>Izolatory</i>	$\rho \times \Omega \text{ m}$	<i>Stopy</i>	$\rho \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
Bakelit	$10^{12} - 10^{14}$	Brąz fosforowy	0,038 – 0,17
Bursztyn	$10^{20} - 10^{22}$	Mosiądz	0,08 – 0,07
Ebonit	$10^{18} - 10^{20}$	Stal	0,07 – 0,1
Szkło	$10^{16} - 10^{17}$	Żeliwo	2,0 – 5,0

Stopy odporowe	$\rho \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
Konstantan (Cu, Ni)	0,47 – 0,50
Nikielina (Cu, Ni, Zn)	0,33
Manganian (Cu, Mn, Ni)	0,43 – 0,45
Chromonikielina (Cr, Ni, Fe)	1,06
Kantal (Fe, Cr, Al.)	1,35 – 1,45