

Zależność oporności przewodników metalicznych i półprzewodników od temperatury.

Wyznaczanie szerokości przerwy energetycznej.

- I. Cel ćwiczenia:** badanie wpływu temperatury na oporność metali, stopów i termistorów oraz graficzne przedstawienie tej zależności.
- II. Przyrządy:** spirala grzejna, pojemnik z olejem, w którym zanurzony jest przewodnik metaliczny, przewodnik ze stopu i termistor, termometr, omomierz, wentylator chłodzący, układ elektryczny.
- III. Literatura:**
- [1] J. L. Kacperski – I pracownia fizyczna.
 - [2] T. Masewicz, S. J. Paul – Podstawy elektrotechniki, tom I.
 - [3] T. Rewaja (praca zbiorowa) – Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki na politechnice.
 - [4] Encyklopedia fizyki – tom II.
 - [5] Sz. Szczeniowski „Fizyka doświadczalna” część III – „Elektryczność i magnetyzm”.

IV. Wprowadzenie

IV.1 Zależność oporności metali od temperatury.

Opór elektryczny to wielkość charakteryzująca przeciwdziałanie jakie stawia płynącemu prądowi dany element obwodu elektrycznego. W przypadku prądu stałego opór R odcinka przewodnika (w którym nie występuje siła elektromotoryczna), jest wielkością skalarną równą stosunkowi napięcia U do natężenia prądu I . Wynika to bezpośrednio z prawa Ohma.

Opór albo inaczej rezystancja zależy od materiału z jakiego wykonany jest przewodnik oraz od jego wymiarów geometrycznych: długości i przekroju poprzecznego zgodnie ze wzorem

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

gdzie l – długość przewodnika, S – powierzchnia pola przekroju, ρ – oporność elektryczna właściwa, charakteryzująca materiał danego przewodnika.

Często zamiast **oporności właściwej** używa się wielkości $\sigma = 1/\rho$ zwanej **przewodnością elektryczną właściwą**.

Opór elektryczny metali jest wynikiem rozpraszania elektronów, które jest spowodowane z jednej strony deformacją sieci krystalicznej metali wskutek drgań cieplnych oraz z drugiej strony niejednorodnością struktury za co odpowiadają deformacje siatki lub atomy domieszek. Podwyższona temperatura próbki metalu powoduje wzrost liczby rozprożeń elektronów na jonach sieci krystalicznej, co powoduje zmniejszenie średniej składowej prędkości uporządkowanego ruchu elektronów wzdłuż badanej próbki metalu. Dla większości metali zależność ρ od temperatury opisuje wzór Blocha-Grüneisena, który przewiduje, że $\rho \sim T^5$ dla $T \ll \theta_D$ i $\rho \sim T$ dla $T \gg \theta_D$ (θ_D – temperatura Debye'a charakterystyczna dla danego ciała, poniżej której ciepło właściwe spełnia *prawo Debye'a*: ciepło właściwe $c_v \sim T^3$). Zależności powyższe zgadzają się z wynikami doświadczalnymi.

W związku z tym dla oporu przewodnika możemy napisać

$$R = \alpha T \quad (1)$$

gdzie α jest stałą zależną od kształtu i rozmiarów próbki.

Aby uniezależnić współczynnik nachylenia α prostej opisanej zależnością (1) od parametrów próbki oznaczmy przez R_0 opór w temperaturze T_0 (temperatura topnienia lodu):

$$R_0 = \alpha T_0 \quad (2)$$

Stąd

$$\alpha = \frac{R_0}{T_0} \quad (3)$$

i w konsekwencji otrzymamy

$$R = \frac{R_0}{T_0} T = \beta_0 R_0 T \quad (4)$$

β_0 jest stałą nazywaną temperaturowym współczynnikiem zmiany oporu .

Dla $T_0 = 273,16$ K, teoretyczna wartość współczynnika β_0 wynosi

$$\beta_0 = \frac{1}{T_0} = 0,00366 \text{ K}^{-1}$$

Dla metali β_0 ma wartość dodatnią. Metalem, którego własności najlepiej opisuje wzór (4) jest platyna. Dla innych metali równanie to nie jest dobrym przybliżeniem, bliższym doświadczeniu jest zależność

$$R = R_0(\beta_0 T + \beta_1 T^2 + \dots) \quad (5)$$

gdzie β_1, β_2, \dots – współczynniki temperaturowe oporności elektrycznej różnych rzędów dla danej próbki metalu. Współczynnik β_1 jest często ujemny.

Pochodna wyrażenia (5)

$$\frac{dR}{dT} = R_0(\beta_0 + 2\beta_1 T + \dots)$$

osiąga wówczas zero dla temperatury $T = T_m$. Opór jest wtedy maksymalny i zmienia się nieznacznie przy wzroście temperatury.

Oporność różnych metali z kilkoma wyjątkami wzrasta średnio 0,4% na każdy stopień. W zakresie od -30° do $+150^\circ\text{C}$ oporność w funkcji temperatury zmienia się liniowo. Przy niskich temperaturach tej proporcjonalności nie ma a metale wolniej zmieniają swoją oporność. W temperaturach bliskich zera bezwzględnego dla kilku metali następuje gwałtowny zanik oporności. Zjawisko to nazywamy nadprzewodnictwem.

Stopy wieloskładnikowe wykazują niekiedy słabą zależność oporu od temperatury i charakteryzują się wysoką wartością oporu właściwego. Niektóre stopy mają wartość T_m bliską temperaturze pokojowej np. nichrom, manganin, stop Monala.

Stopy, w skład których wchodzi metale nie wykazują nadprzewodnictwa.

IV.2 Zależność oporności półprzewodników od temperatury.

Oporność właściwa półprzewodników zawiera się między 10^{-4} i $10^7 \Omega\text{m}$. Zależność ich oporu od temperatury jest odwrotna niż metali. Przy oziębianiu do temperatury zera bezwzględnego stają się izolatorami.

Ich przewodnictwo bardzo silnie zależy od temperatury. Liczba elektronów w paśmie przewodzenia szybko wzrasta przy ogrzewaniu. Jeśli ΔE jest różnicą energii pomiędzy pasmem przewodzenia i pasmem walencyjnym, to prawdopodobieństwo P tego, że w ciągu jednostki czasu energia równa szerokości przerwy energetycznej stanie się dostępną dla któregoś z elektronów w

paśmie walencyjnym jest proporcjonalna do czynnika $\exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right)$, gdzie k oznacza stałą Boltzmana, T – temperaturę bezwzględną:

$$P \sim \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (6)$$

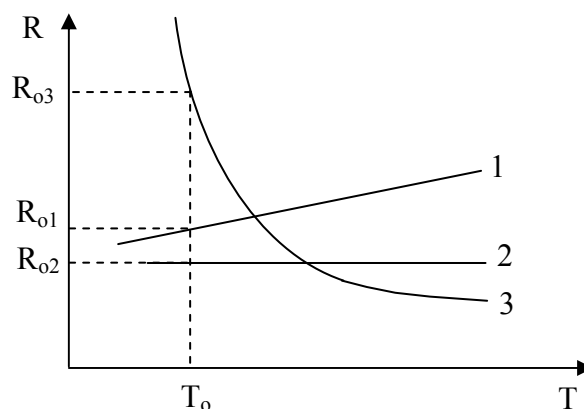
Energia dostarczona przy ogrzewaniu zostaje wykorzystana na przeniesienie elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia. Wynika stąd, że liczba elektronów w paśmie przewodzenia a więc i przewodność właściwa jest proporcjonalna do

$$\sigma \sim \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (7)$$

Dla termistorów, czyli półprzewodników będących tlenkami metali poddanych odpowiedniej obróbce (np. dwutlenek tytanu TiO_2 , tlenek niklu NiO) w niezbyt dużym zakresie temperatur przewodność termistorów opisuje zależność (7), czyli opór termistora wynosi

$$R_T = C \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (8)$$

gdzie R_T – opór termistora (indeks dolny „T” informuje o materiale, nie o temperaturze),
 C – stała materiałowa mająca wymiar oporu (Ω).



Rys. 1 Charakterystyka temperaturowo–oporowa: 1 – przewodnik metaliczny (np. miedź), 2 – stop konstantan (60%Cu + 40%Ni), 3 – półprzewodnik (dwutlenek tytanu TiO_2); R_{01} , R_{02} , R_{03} – opory tych materiałów w temperaturze T_0 .

V. Metoda pomiaru

W doświadczeniu wyznaczamy zależność oporu od temperatury dla czystego metalu, stopu i materiału półprzewodnikowego (termistora). Dla metalu i stopu otrzymujemy zależności liniowe natomiast dla termistora krzywą wykładniczą (rys.1).

Po zlogarytmowaniu wzoru (8) otrzymamy

$$\ln R_T = \ln C + \left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) = \ln C + \left(\frac{b}{T}\right) \quad (9)$$

W układzie współrzędnych (T^{-1} , $\ln R_T$) wykresem zależności (9) jest linia prosta o nachyleniu

$$b = \Delta E/2k.$$

Temperaturowy współczynnik zmiany oporu termistora wynosi

$$a_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{1}{R} \left(-\frac{b}{T^2} C \exp\left(\frac{b}{T}\right) \right) = -\frac{b}{T^2} \quad (10)$$

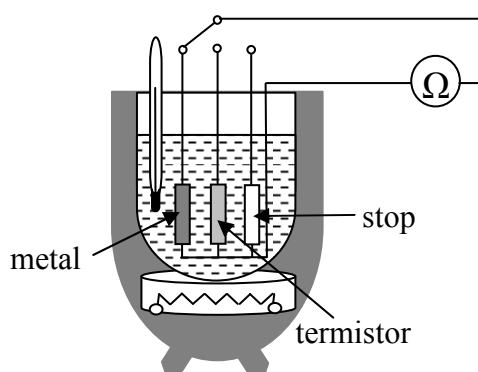
Zazwyczaj podaje się wartość tego współczynnika w temperaturze pokojowej, np. a_{300} .

Wyznaczenie współczynnika b daje możliwość wyznaczenia szerokości przerwy energetycznej ΔE :

$$\Delta E = 2kb \quad (11)$$

Energię podajemy w J (dżulach) i eV (elektronowoltach).

VI. Układ doświadczalny



Rys.2 Schemat zestawu pomiarowego

Przewodnik metalowy, termistor i stop zanurzone są w kąpieli olejowej, która jest podgrzewana spiralą grzejną. Do elementów badanych podłączony jest omomierz, który mierzy opór wymienionych elementów. Odpowiednim przełącznikiem przyłącza się badany element do omomierza.

VII. Pomiary i opracowanie

1. Włączyć ogrzewanie naczynia z badanymi elementami i doprowadzić temperaturę kąpieli do ok. 373K (100°C).
2. Wyłączyć ogrzewanie naczynia, włączyć chłodzenie (wentylator) i mierzyć wartość oporu elementów badanych zanurzonych w stygnącym oleju w odstępach np. co 5°C. Wyniki zapisać w tabeli pomiarów.

Tabela 1

Lp.	t (°C)	T (K)	R_M (Ω)	R_S (Ω)	R_T (Ω)

3. Na podstawie tabeli pomiarów sporządzić wykres zależności oporu od temperatury $R(t)$ dla metalu i stopu w układzie współrzędnych ($x = t$, $y = R$). Zaznaczyć na wykresie niepewności pomiarowe.

Jeśli temperatura wyrażona jest w stopniach Celsjusza, to zastępując we wzorze (4) temperaturę bezwzględną wyrażeniem $T = 273 + t$ otrzymuje się zależność

$$R = R_0(1 + \beta_0 t) = R_0 + R_0 \beta_0 t \quad (12)$$

4. W przyjętym układzie współrzędnych, stosownie do wzoru (12), zależność $R(t)$ powinna być liniowa. Metodą najmniejszych kwadratów obliczyć parametry m i c prostej $y = mx + c$ ($m = R_0 \beta_0$, $c = R_0$) oraz ich niepewności Δm i $\Delta c = \Delta R_0$. Obliczyć temperaturowy współczynnik zmiany oporu β_0 korzystając ze wzoru

$$\beta_0 = \frac{m}{R_0}$$

oraz jego niepewność $\Delta \beta_0$ z zależności

$$\Delta \beta_0 = \pm \beta_0 \left[\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta R_0}{R_0} \right].$$

5. Dla termistora sporządzić wykres w układzie współrzędnych ($x = T^{-1}$, $y = \ln R_T$). W tym układzie współrzędnych wykresem zależności (9) jest linia prosta, której współczynnik kierunkowy jest równy b . Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczyć wartość współczynnika b , oraz jego niepewność Δb . Korzystając ze wzoru (10) obliczyć a_{300} oraz Δa_{300} z zależności

$$\Delta a = \pm a \left(\frac{\Delta b}{b} + 2 \frac{\Delta T}{T} \right)$$

6. Wyznaczyć szerokość przerwy energetycznej ΔE korzystając ze wzoru (11), przyjmując $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$.
7. Obliczyć niepewność $\Delta(\Delta E) = \pm \Delta E \Delta b/b$.

Uwaga Do obliczeń parametrów prostej można wykorzystać program Excel i funkcję **REGLINP**. Funkcja ta pozwala obliczyć współczynniki prostej oraz ich niepewności.