# E3. Badanie temperaturowej zależności oporu elektrycznego ciał stałych

***Celem ćwiczenia*** *jest poznanie temperaturowej zależności przepływu prądu elektrycznego przez przewodnik i półprzewodnik oraz doświadczalne wyznaczenie energii aktywacji przewodnictwa dla półprzewodnika (część B), a dla przewodnika - temperaturowego współczynnika oporu (część A).*

Przepływ prądu w jakimkolwiek materiale przewodzącym jest wywołany działaniem pola elektrycznego na ***nośniki ładunku*** znajdujące się w jego wnętrzu. Każdy rodzaj materii zawiera różnorodne ładunki elektryczne, nośnikami ładunku zaś są tylko te elementy naładowane, które pod wpływem pola elektrycznego mogą się poruszać. Jeżeli do przewodnika przyłożymy ***napięcie U***, to wytworzone pole elektryczne spowoduje przepływ ***prądu elektrycznego o natężeniu I***. Iloraz:

$$\frac{U}{I} = R \qquad (1)$$

nazywamy ***oporem elektrycznym*** i wyrażamy go w *omach* [1Ω=1V/1A]. (→***prawo Ohma***)
Opór elektryczny R opornika zależy od jego rozmiarów (długości $l$ i pola przekroju poprzecznego S) oraz od rodzaju materiału, z którego jest wykonany:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma}\frac{l}{S}, \qquad (2)$$

gdzie ρ oznacza tzw. ***opór właściwy***, a jego odwrotność σ nazywa się ***przewodnictwem właściwym.*** Obie wyżej wymienione wielkości charakteryzują rodzaj i skład materiału przewodzącego i zależą od temperatury. Przebieg tej zależności jest skorelowany ze strukturą elektronową, specyfiką wiązań chemicznych i krystalicznych oraz różnorodnymi zjawiskami na poziomie molekularnym.

Z aplikacyjnego punktu widzenia znajomość temperaturowej charakterystyki oporu materiału pozwala na tworzenie z jego wykorzystaniem precyzyjnych termometrów elektronicznych.

Klasyczna teoria przewodnictwa pokazuje, że przewodnictwo właściwe można w uproszczony sposób zapisać jako:

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu, \qquad (3)$$

gdzie: e – oznacza ładunek elementarny, n – koncentrację nośników ładunku, μ -ich ruchliwość, zdefiniowaną jako iloraz średniej prędkości nośnika ładunku przez ***natężenie pola elektrycznego E*** ($\mu = v_{śr.}/E$), wywołującego ich przepływ.

Na podstawie powyższej zależności (3) można łatwo scharakteryzować temperaturową zależność przewodnictwa, a co za tym idzie i oporu elektrycznego ciał stałych, poprzez analizę dwóch wielkości, mianowicie: ***koncentracji nośników ładunku*** (n) i ***ich ruchliwości*** (μ). Zależą one od struktury elektronowej materii, a szczególnie od rodzaju wiązań krystalicznych, łączących poszczególne atomy czy cząsteczki w strukturę ciała stałego.

**A.** W strukturze **kryształu metalicznego** (tworzą je wszystkie metale ), zewnętrzne elektrony walencyjne są słabo związane z atomami i oddzielają się od nich tworząc tak zwany gaz elektronowy, czyli zbiór elektronów swobodnych mogących poruszać się w sieci krystalicznej utworzonej przez dodatnie jony. **Liczba n jest w tej grupie bardzo duża** (np. dla srebra jest rzędu $10^{24}$ na $cm^3$ ) **i niezależna od temperatury**.

Ruchliwość ładunku zależy zaś od temperatury, malejąc wraz z jej wzrostem (dzieje się tak dlatego, że – wraz ze wzrostem temperatury - na skutek coraz intensywniejszych drgań sieci krystalicznej rośnie prawdopodobieństwo zderzeń elektronów swobodnych z jonami tworzącymi tę sieć w następstwie czego maleje średnia droga swobodna poruszającego się elektronu).
W konsekwencji, przewodnictwo właściwe przewodnika maleje, a ***opór elektryczny rośnie wraz ze wzrostem temperatury***, co przedstawia następująca zależność:

$$R_t = R_o\left(1 + \alpha \cdot t\right), \qquad (4)$$

gdzie $\alpha$ jest ***temperaturowym współczynnikiem oporu*** przewodnika, $R_t$ – oporem w temperaturze t, a $R_o$ – oporem w temperaturze $0^oC$.
Równanie (4) jest słuszne dla czystych metali. Gdy zawierają one zanieczyszczenia, pojawia się dodatkowy opór, tzw. resztkowy, który nie zależy od temperatury. W ***pewnych stopach metali*** osiąga on tak duże wartości, że ***opór całkowity*** takiego stopu jest praktycznie ***niezależny od temperatury***.

**B. W półprzewodnikach,** w których ruchliwość ładunku jest słabo zależna od temperatury, decydująca dla jego oporu jest silna temperaturowa zależność koncentracji nośników ładunku. Koncentracja ta rośnie wraz ze wzrostem temperatury w sposób opisany wzorem:

$$n = n_o \exp\left(\frac{-E}{k \cdot T}\right) \qquad (5)$$

gdzie: *E* oznacza ***energię aktywacji przewodnictwa***, k – stałą Boltzmanna, a T- temperaturę w skali Kelvina. Prowadzi to do analogicznej zależności dla przewodnictwa właściwego:

$$\sigma = \sigma_o \exp\left(\frac{-E}{k \cdot T}\right) \qquad (6)$$

i do następującej zależności dla oporu całkowitego:

$$R = R_o \cdot \exp\left(\frac{E}{k \cdot T}\right), \qquad (7)$$

która pokazuje, że ***opór półprzewodnika maleje wraz ze wzrostem temperatury***.

Ażeby zrozumieć sens fizyczny energii aktywacji E, należy rozważyć budowę krystaliczną materiału. Typowe półprzewodniki (np. Ge, Si ) to kryształy walencyjne, gdzie sąsiednie atomy tworzące trwałą strukturę ciała stałego powiązane są wzajemnie wiązaniami kowalencyjnymi, czyli poprzez pary uwspólnionych elektronów. Elektrony te są zlokalizowane, czyli nie mogą się przemieszczać, chyba że dzięki dostarczonej z zewnątrz energii wiązanie zostanie rozerwane. Energia ta może pochodzić od drgań cieplnych sieci krystalicznej – mówimy wtedy że nastąpiło termiczne wzbudzenie nośnika ładunku czyli uwolnienie jednego elektronu. Oczywiście proces ten jest silnie uzależniony od temperatury układu. W każdym akcie oderwania elektronu od jego macierzystego atomu pozostaje po nim puste miejsce w wiązaniu walencyjnym. To puste miejsce, w fizyce półprzewodników zwane dziurą, może zostać zapełnione przez elektron należący do sąsiedniego atomu, w rezultacie czego dziura przesunie się w kierunku przeciwnym do ruchu elektronu. Dziurze jako obiektowi, utożsamianemu z brakiem elektronu nadaje się ładunek elementarny dodatni. Tak więc poprzez rozerwanie jednego wiązania tworzą się dwa nośniki prądu: elektron i dziura, może więc występować przewodnictwo elektronowe i dziurowe. Podobny proces wygenerowania nośników ładunku może zajść **dzięki energii promienistej** – efekt ten to **zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne**. Tworzenie w ramach struktury kryształu walencyjnego swobodnych elektronów lub dziur możliwe jest również przez wprowadzenie odpowiednich domieszek. Domieszka pierwiastka pięciowartościowego zastąpi atom macierzysty (np. german lub krzem), jeden elektron natomiast zostanie w nadmiarze i może pełnić rolę nośnika ładunku elektrycznego. Półprzewodnik taki nazywa się półprzewodnikiem typu n , a domieszka – domieszką donorową. Gdy do tego samego kryształu wprowadzić pierwiastek trójwartościowy, to trzy jego elektrony walencyjne biorą udział w wiązaniach chemicznych, w jednym zaś wiązaniu brakuje elektronu czyli powstaje dziura. Taki kryształ jest wiec półprzewodnikiem typu p z domieszką akceptorową. Półprzewodnik nie zawierający domieszek nazywamy samoistnym. Bardziej wnikliwą analizę zjawisk elektronowych w półprzewodnikach przedstawia teoria pasmowa. Własności elektronów rozważa się tu w odniesieniu do ich energii, która w ciele stałym może przyjmować tylko takie wartości, które mieszczą się w ściśle określonych przedziałach. Nazywamy je pasmami energetycznymi. Termiczne generowanie nośników ładunku opisane powyżej jest równoznaczne z przenoszeniem elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa leżącego wyżej na skali energii. Z wartości energii aktywacji E można zaś wnioskować o szerokości energetycznej przedziału zabronionego, oddzielającego oba pasma.

# Protokół wyników

| Nr pary | Imię i nazwisko studenta | Wydział<br><br>grupa |
|---|---|---|
| data | Imię i nazwisko prowadzącego | Zaliczenie |

## Wykonanie ćwiczenia

*Metodyka ćwiczenia polega na pomiarze oporu przewodnika metalicznego ( część A ) oraz półprzewodnika samoistnego ( część B) w możliwie szerokim zakresie temperatury. Obie próbki pomiarowe łącznie z termometrami umieszczone są w aluminiowych zamkniętych probówkach. Dla jednorodności temperatury i prawidłowego jej odczytu dla próbki, wnętrze probówek wypełnione jest obojętną chemicznie i elektrycznie cieczą.*

**Przyrządy**: zestaw oporników, układ grzewczy, termometr elektroniczny, omomierz.

1. Podłączamy próbkę do miernika oporu, odczytujemy temperaturę i wartość oporu.
2. Zanurzamy probówkę pomiarową w zlewce z gorącą wodą ( około $60^0$ C) i czekamy 3-5 min na ustabilizowanie się temperatury we wnętrzu probówki.
3. Umieszczamy probówkę w statywie i w miarę jak jej zawartość stygnie dokonujemy co 2 stopnie odczytu oporu. Pomiary kończymy, gdy układ osiągnie temperaturę pokojową.

| **Tabela pomiarowa część A** | | **Tabela pomiarowa część B** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| t [$^0$C] | R [Ω] | t [$^0$C] | T [K] | $T^{-1}$ [$K^{-1}$] | R [Ω] | lnR |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

## Opracowanie wyników

A.

1. na papierze milimetrowym wykreślamy zależność oporu od temperatury R(t) i obliczamy współczynnik kierunkowy A otrzymanej prostej oraz wartość $R_o$ (patrz: *Graficzna analiza wyników).* Następnie obliczamy wartość współczynnika temperaturowego oporu $\alpha$ z zależności $A = R_o \cdot \alpha$, czyli: $\alpha = A/R_o$ *.

   *Wyjaśnienie: *Wzór (4) zapisany w postaci: $R_t = R_o + R_o \alpha t$ przedstawia równanie linii prostej typu: y=B+Ax, gdzie: A jest współczynnikiem kierunkowym prostej, tzn $A= R_o \cdot \alpha$, natomiast $B = R_o$ jest punktem, w którym prosta przecina oś y (dla t = 0°C).*

Uwaga: powyższe obliczenia można również wykonać, korzystając z odpowiedniego programu komputerowego.

B

Dla półprzewodnika:

na papierze milimetrowym wykonujemy wykres lnR = f(1/T)*.

- **Wykreślenie takiej zależności pozwala stosunkowo łatwo wyznaczyć wartość energii aktywacji przewodnictwa. Otóż, jeżeli wzór (7) zlogarytmujemy obustronnie, to otrzymamy równanie:* $\ln R = \ln R_o + \frac{E}{k}\frac{1}{T}$, *które jest równaniem linii prostej typu y=b+ax, gdzie y=lnR, x=1/T. Współczynnikiem kierunkowym a tej prostej jest wyrażenie E/k (czyli a=E/k).*

Obliczamy zatem współczynnik kierunkowy prostej *a*, następnie wartość energii aktywacji przewodnictwa $E=k \cdot a$, przyjmując stałą Boltzmanna k = 8.617 * $10^{-5}$ eV/K.

Obliczamy błąd bezwzględny energii aktywacji równy : $\Delta E = E\left|\frac{\Delta a}{a}\right|$ ($\Delta$a to błąd współczynnika kierunkowego *a*).

*Uwaga:*
*Analizę graficzną i wynikające z niej obliczenia możemy wykonać stosując komputerowy program liniowej regresji.:*

*A Wprowadzamy dane t i R, generujemy wykres , odczytujemy parametry wykresu.*

*B Wprowadzamy dane t i R (t jako X oraz R jako Y), następnie dokonujemy konwersji danych:*

*$t \rightarrow T$ (T=t+273), $T \rightarrow 1/T$ oraz $R \rightarrow \ln R$.*

*generujemy wykres, odczytujemy parametry wykresu.*