

FIZYKOCHEMIA CIAŁA STAŁEGO
LABORATORIUM

**Pomiar właściwości
elektrycznych ciał stałych**

**Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki**

Kraków 2023

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z fizykochemicznymi podstawami procesu przewodzenia prądu elektrycznego oraz z metodami pomiaru przewodnictwa elektrycznego.

Wprowadzenie

Prąd elektryczny definiuje się jako uporządkowany ruch ładunków elektrycznych spowodowany obecnością pola elektrycznego, czyli przyłożonej różnicy potencjałów elektrycznych zwanych również napięciem. Ponieważ nie istnieje coś takiego jak izolowany ładunek elektryczny do powstania prądu wymagany jest nośnik ładunku, najczęściej są to elektrony, ale mogą to być również dziury (wakancje po elektronach) oraz jony i to w dużej mierze od rodzaju tych cząstek i charakteru ich oddziaływań z materiałem zależą właściwości elektryczne materiału. Taka podstawową właściwością jest zdolność materiału do przewodzenia prądu elektrycznego opisywana przez wartość przewodnictwa właściwego σ [s/m; s/cm] (s=simens) albo jego odwrotność: opór właściwy, ρ [$\Omega \cdot m$]. Ze względu na charakter i wartość przewodnictwa można dokonać podziału jakościowego materiałów na:

- przewodniki metaliczne** materiały, w których pasmo walencyjne elektronów nakłada się z pasmem przewodnictwa. Np. metale, grafit;
- półprzewodniki** materiały o aktywowanym charakterze przewodnictwa. Tj. zdolność do przewodzenia rośnie pod wpływem temperatury, światła, pola magnetycznego itp.;
- izolatory** to półprzewodniki, których opór właściwy w RT $> 10^7 \Omega \cdot m$;
- nadprzewodniki** materiały wykazujące efekt nadprzewodnictwa, czyli spadku oporu do 0 w niskiej temperaturze. W temperaturach wyższych materiały te mogą być zarówno przewodnikami metalicznymi jak i półprzewodnikami.

Albo ze względu na rodzaj nośników ładunków:

- elektronowe** nośnikami ładunku są elektrony;
- dziurowe** nośnikami ładunku są wakancje po elektronach (dziury) w paśmie walencyjnym;
- jonowe** nośnikami są ujemnie lub dodatnie naładowane jony (lub wakancje);
- mieszane** przewodzenie zachodzi zarówno poprzez jony jak i elektrony/dziury,

Zależność przewodnictwa od temperatury:

W pierwszej kolejności należy zastanowić się nad ogólnym opisem przewodnictwa materiałów, który w najprostszym przypadku opisuje się jako zależność od koncentracji nośników - c , ich ładunku q , i ruchliwości μ :

$$\sigma = q^2 c \mu, \quad (1)$$

a w przypadku, gdy w materiale obecne jest więcej niż jeden typ nośnika prądu, przewodnictwo elektryczne jest sumą przewodnictw cząstkowych:

$$\sigma = \sum_i q_i^2 c_i \mu_i. \quad (2)$$

W przypadku przewodników typu metalicznego, w których pasmo przewodzenia nakłada się na pasmo walencyjne liczba nośników prądu nie zależy od temperatury. Wzrost temperatury powoduje natomiast zwiększenie się amplitudy drgań sieci krystalicznej co zwiększa prawdopodobieństwo rozpraszania elektronów i skutkuje obniżeniem ich ruchliwości. Zależność temperaturowa przewodnictwa w przewodnikach metalicznych wyraża się wzorem:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{T}. \quad (3)$$

W przypadku półprzewodników, podniesienie temperatury powoduje zwiększenie ilości nośników prądu zgodnie z równaniem Arrheniusa co prowadzi do następującego wyrażenia:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\left(\frac{-Ea}{kT}\right)}, \quad (4)$$

gdzie Ea to energia aktywacji procesu przewodnictwa (tutaj w eV), a k stała Boltzmanna.

Metody pomiarów

Ponieważ nie istnieje możliwość bezpośredniego pomiaru przewodnictwa właściwego materiału, wartość tą wyznacza się z pośrednio z pomiaru oporu próbki mierzonego dzięki wykorzystaniu prawa Ohma:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (5)$$

gdzie U – potencjał i I – natężenie prądu. Opór obiektu o prostej i znanej geometrii można obliczyć wykorzystując opór właściwy ρ :

$$R = \frac{\sigma \cdot l}{S}, \quad (6)$$

gdzie l – to długość obiektu, a S – pole powierzchni przekroju. Z kolei opór właściwy jest ściśle powiązany z przewodnictwem materiałów:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (7)$$

Jak wynika z równania (5), pomiar oporu próbki realizowany jest poprzez przepuszczenie prądu przez obwód i pomiar spadku napięcia. Najczęściej spotykanym sposobem realizacji takiego pomiaru jest znany z wszystkich multimetrów tak zwany układ dwusondowy, którego schematyczny obwód zastępczy widoczny jest na rysunku 1. Pomiar polega na przyłożeniu elektrod do przeciwnych stron próbki i pomiaru spadku napięcia. Główną wadą takiego systemu pomiarowego jest fakt, że nie mierzymy oporu samej próbki, ale sumaryczny opór próbki, przewodów, elektrod, itp. Nie ma to wielkiego znaczenia, jeżeli opór przewodów jest pomijalny, ale w przypadku konieczności wprowadzenia próbki do wysokiej temperatury, na długiej sondzie elektrycznej opór przewodów może zmieniać się od 1 do $\sim 100 \Omega$ i w niektórych przypadkach być wielokrotnie wyższy od oporu samej próbki.

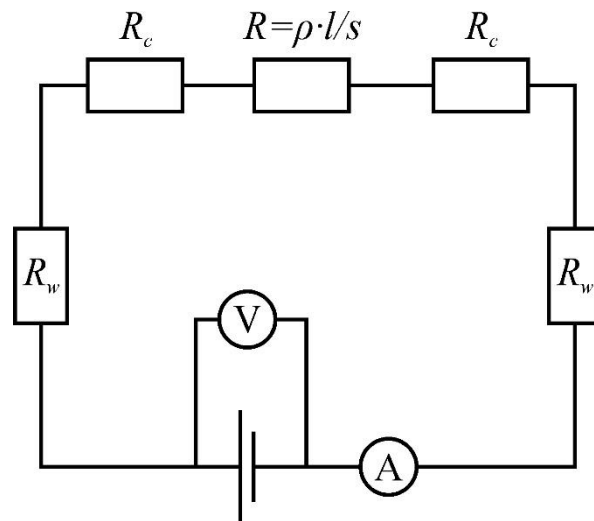


Fig. 1. Obwód zastępczy dla układu 2-sondowego.

Najdokładniejszą metodą pomiaru jest układ **4-sondowy**. W jego przypadku do końców próbki doprowadzamy sondy prądowe „I”, przez które przepływa prąd elektryczny. Pomędzy nimi, do materiału przypięte są sondy napięciowe „V”, na których następuje pomiar spadku potencjału. Podłączenie próbki pokazane jest na rysunku 2 a schemat układu elektrycznego na rysunku 3.

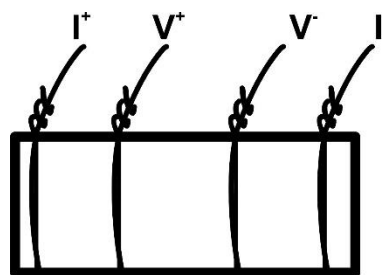


Fig. 2. Schemat połączenia próbki do układu 4-sondowego

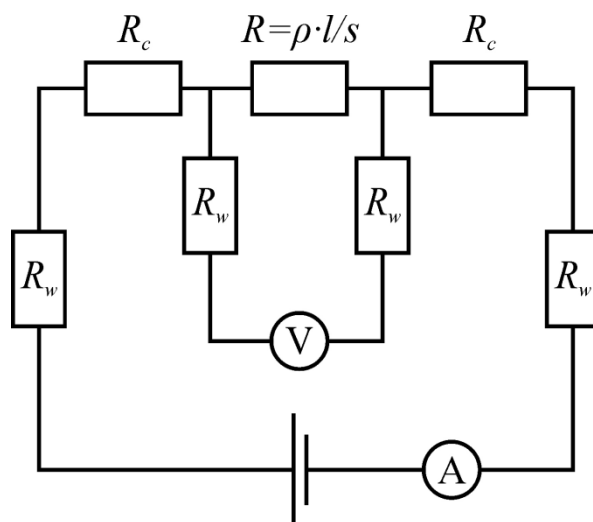


Fig. 3. Schemat elektryczny dla układu 4-sondowego

Układ ten korzysta z faktu, że opór woltomierza jest przynajmniej 3 rzędy większy od oporu próbki i prąd płynący przez próbkę jest równy prądowi zmierzonemu za pomocą amperomierza, a napięcie zmierzone przez woltomierz jest równe spadkowi napięcia na próbce, co pozwala na wyeliminowanie wpływu oporu przewodów i elektrod dzięki czemu możliwy jest pomiar oporu samej próbki. Do jego głównych minusów należy zaliczyć konieczność przygotowania elektrod napięciowych na wszystkich próbkach, co jest czasochłonne oraz mocno limitujące w kwestii akceptowalnych wymiarów i kształtów próbki.

Przeprowadzenie ćwiczenia:

1. Należy dokonać pomiarów zależności przewodnictwa właściwego od temperatury dla dostarczonego przez prowadzącego materiału. Próbka znajduje się w piecu elektrycznym, zamocowana do Studenckiej Demonstracyjnej Sondy Elektrycznej „Marchewka 1”. Po poinstruowaniu przez prowadzącego zasad obsługi pieca i przyrządów pomiarowych należy dokonać pomiarów oporu elektrycznego próbki od temperatury XXX°C co około YY°C.
2. W trakcie oczekiwania na stabilizację temperatury pieca pomiędzy poszczególnymi pomiarami należy przygotować kolejną próbkę do pomiarów metodą cztero-sondową poprzez zamontowanie sond na dostarczonej próbce. Schemat podłączenia znajduje się na Rys. 4.

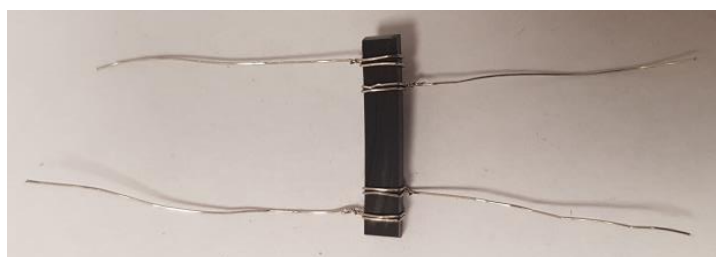


Fig. 4. Próbka z zamontowanymi sondami elektrycznymi

3. Posługując się dołączoną skrzynką testową i multimetrem należy sprawdzić zasadę działania pomiarów cztero-sondowych.

Opracowanie wyników:

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- wykres przewodnictwa właściwego w skali Arrheniusa w oparciu o zmierzone dane oraz dane dostarczone przez prowadzącego
- zmierzoną energię aktywacji przewodnictwa dla najbardziej charakterystycznego(nych) zakresu(ów) temperatur
- wyjaśnienie zaobserwowanych zjawisk
- krótkie wnioski.

(Sprawozdanie powinno zawierać także prezentację drogi do osiągnięcia tych cel)

Aby wyznaczyć energię aktywacji przewodnictwa, wyrażenie (4) możemy zapisać jako:

$$T = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (8)$$

po obustronnym zlogarytmowaniu otrzymujemy:

$$\ln(\sigma) = \ln(\sigma_0) - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T}. \quad (9)$$

Łatwo zauważyć, że w układzie Arrheniusa współczynnik kierunkowy dla regresji liniowej będzie odpowiadał wartości $-E_a/R$.

UWAGA! Ze względu na pilotażowy charakter ćwiczenia powyższa instrukcja może ulegać bieżącym zmianom.

UWAGA 2! Należy pamiętać o jednostkach!!!