

## 3–121. Ćwiczenie nr. 121 Termometr oporowy i termopara

*Małgorzata Nowina-Konopka, Andrzej Zięba*

### Cel ćwiczenia

Wyznaczenie współczynnika temperaturowego oporu platyny. Pomiar charakterystyki termopary miedź-konstantan.

### Wprowadzenie

Każda mierzalna wielkość fizyczna, która zmienia się z temperaturą, może zostać wykorzystana do budowy termometru. W ćwiczeniu poznajemy dwa zjawiska umożliwiające pomiar temperatury metodami elektrycznymi.

### Oporność metali

Zjawisko oporu elektrycznego w metalu jest wynikiem rozpraszania nośników prądu – elektronów. Rozpraszanie zakłóca ich uporządkowany ruch w kierunku wyznaczonym przez przyłożone pole elektryczne. Mechanika kwantowa uczy, że doskonale periodyczny układ atomów nie rozprasza elektronów. W konsekwencji opór doskonałego kryształu, bez domieszek obcych atomów i bez dyslokacji, w temperaturze zera bezwzględnej powinien zmaleć do zera<sup>1</sup>.

W rzeczywistym metalu istnieją dwa podstawowe mechanizmy rozpraszania elektronów, a więc dwa źródła oporności.

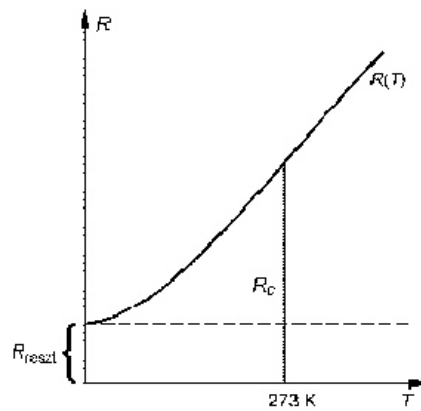
1. Rozpraszanie elektronów na drganiach termicznych sieci krystalicznej. W języku mechaniki kwantowej mówimy o zderzeniach elektronów z fononami czyli kwantami drgań sieci krystalicznej. W wysokich temperaturach energia drgań sieci, a więc i liczba fononów jest proporcjonalna do temperatury bezwzględnej  $T$ . Prawdopodobieństwo zderzenia elektronu z fononem, a w konsekwencji opór elektryczny są w grubym przybliżeniu wprost proporcjonalne do  $T$ .

W niskich temperaturach liczba fononów szybko maleje do zera. W konsekwencji składnik oporu związany z fononami również maleje do zera. Zależna od temperatury i malejąca do zera w 0 K część oporu nosi nazwę oporu idealnego  $R_i$ . Nazwa bierze się stąd, że opór ten występuje w każdym kryształ, również w idealnym kryształ bez domieszek i wad struktury. Rozpraszanie elektron-fonon jest głównym, lecz nie jedynym źródłem oporu idealnego. Mniejszy wkład wnoszą rozpraszanie elektron-elektron, a w atomach pierwiastków magnetycznych takich jak Fe czy Mn – rozpraszanie na momentach magnetycznych atomów.

2. Rozpraszanie na niedoskonałościach sieci, które zaburzają jej periodyczność. Są nimi obce atomy (zwłaszcza w stopach) i dyslokacje. Ta część oporu jest niezależna od temperatury i nosi nazwę oporu resztkowego, gdyż jest „resztką” oporu, która pozostaje również w zerze bezwzględnym (rys.121.1). W czystych pierwiastkach metalicznych oporność resztkowa jest mała. Natomiast w stopach osiąga duże wartości (większe od oporu idealnego), gdyż losowe rozmieszczenie różnych atomów w węzłach sieci czyni ją siecią nieperiodyczną. Dlatego oporność stopów jest na ogół dużo większa od oporności metali czystych i słabo zależy od temperatury.

---

<sup>1</sup>Faktu tego nie należy mylić ze zjawiskiem nadprzewodnictwa, które polega na tym, że w wielu metalach opór raptownie znika poniżej określonej temperatury rzędu kilku kelwinów, również w przypadku obecności w metalu dużej liczby obcych atomów i innych niedoskonałości struktury.



Rysunek 121.1: Typowa zależność oporu metalu od temperatury

Doświadczalne prawo głoszące, że oporność właściwa metalu jest sumą oporności idealnej i oporności resztkowej

$$\rho(T) = \rho_i(T) + \rho_{\text{reszt}}, \quad (121.1)$$

nosi nazwę reguły Matthiessena.

Nie ma analitycznego wzoru, który mógłby opisać funkcję  $R(T)$  w pełnym zakresie temperatur. W małym zakresie temperatur, np.  $0 \div 100^\circ\text{C}$ , zależność  $R(T)$  jest w przybliżeniu liniowa. Zależność liniową można opisać wzorem

$$R(T) = R_0(1 + \alpha t), \quad (121.2)$$

gdzie  $t$  oznacza temperaturę w  $^\circ\text{C}$ , natomiast  $R_0$  jest wartością oporności metalu w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ . Współczynnik  $\alpha$  nazywamy temperaturowym współczynnikiem oporu, jego wartość zależy od rodzaju metalu.

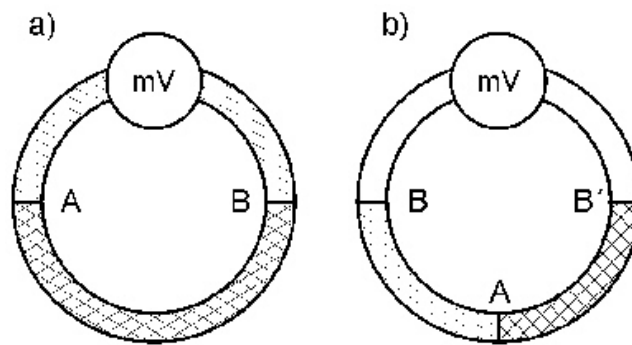
Zależność oporności metali od temperatury została wykorzystana do konstrukcji termometrów oporowych. Pożądana jest odporność metalu na utlenianie i wpływ temperatury. Szczególne znaczenie mają termometry oporowe platynowe, które umożliwiają pomiar temperatury w zakresie od kilkunastu K do około 900 K. Dzięki chemicznej obojętności platyny wskazania termometru cechuje wyjątkowa dokładność i stabilność w czasie. Wadą termometrów Pt są stosunkowo duże rozmiary sondy oraz konieczność stosowania układów nieczułych na oporność doprowadzeń.

W zakresie temperatur helowych (4 K), gdzie oporność i napięcie termoelektryczne metali stają się bardzo mało czułe na zmiany temperatury, szerokie zastosowanie znalazł oporowy termometr węglowy.

### Napięcie termoelektryczne

Utwórzmy obwód elektryczny z dwóch różnych metali (rys. 121.2a). Jeżeli cały obwód znajduje się w jednakowej temperaturze, to nie zaobserwujemy żadnego prądu (przepływ prądu byłby pogwałceniem II zasady termodynamiki). Jeżeli jednak temperatury wzdłuż obwodu będą różne, włączony w obwód galwanometr wykaże powstawanie różnicy potencjałów i przepływ prądu. Doświadczenie wykazuje, że powstałe napięcie termoelektryczne zależy wyłącznie od wartości temperatur na złączach A i B oraz rodzaju metali tworzących złącze.

Zjawisko powstawania siły termoelektrycznej zostało wykorzystane do pomiaru temperatury za pomocą tzw. termopar. Typową termoparę stanowią dwa metale zespawane w złączu pomiarowym A. Pozostałe końce, połączone przewodami z miernikiem napięcia, stanowią złącza odniesienia BB' (rys. 121.2b), które należy utrzymywać w stałej temperaturze, na przykład  $0^\circ\text{C}$ . Zwróćmy uwagę, że obecnie termopara składa się co najmniej z trzech metali, gdyż przewody stanowią trzeci metal, a wewnątrz miernika mogą istnieć dalsze złącza. Napięcie termoelektryczne jest jednak takie samo jak w przypadku złącza dwóch metali (rys. 121.2a), o ile tylko



Rysunek 121.2: Schemat budowy termopary: a) złożonej z dwu metali; b) zawierającej trzy metale

obydwa złącza odniesienia, B i B', mają tę samą temperaturę.

Fizyczną przyczyną występowania napięcia termoelektrycznego jest powstanie na złączu dwóch metali kontaktowej różnicy potencjałów do kilku V, wynikającej z różnej wartości energii Fermiego. Pomimo to w obwodzie o stałej temperaturze prąd nie płynie, gdyż suma napięć kontaktowych wzdłuż obwodu jest równa zero. Napięcie kontaktowe w niewielkim stopniu zależy od temperatury, więc gdy temperatury złączy staną się różne, równowaga napięć zostaje zachwiana i pojawi się wypadkowe napięcie termoelektryczne

Charakterystyką termopary  $E(t)$  nazywamy zależność napięcia termoelektrycznego  $E$  od temperatury złącza pomiarowego A w sytuacji, gdy drugie złącze B (lub złącza B i B' w układzie z rysunku 121.2b) utrzymujemy w  $0^{\circ}\text{C}$ . Charakterystykę termopary podaje się w formie tabeli, wykresu, albo rozwinięcia w szereg potęgowy

$$E(T) = a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + \dots \quad (121.3)$$

W rozwinięciu (121.3) nie ma wyrazu wolnego, gdyż gdy obydwa złącza utrzymywane są w temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$  ( $t = 0$ ), napięcie termoelektryczne jest równe zero.

Współczynniki  $a_1, a_2, a_3, \dots$  wyznacza się przez komputerowe dopasowanie wielomianu (3) do zmierzonej zależności  $E(t)$ . Liczba wyrazów potrzebna do odtworzenia charakterystyki termopary zależy od zakresu temperatury i dokładności pomiaru. W przypadku małego zakresu temperatur rzędu kilkudziesięciu stopni może okazać się, że wystarcza wyraz liniowy

$$E(T) = a_1t. \quad (121.4)$$

Zastosowanie termopar pozwala na wykonywanie pomiarów temperatury w szerokim zakresie sięgającym od 4 K do 2000 K. Złącze pomiarowe termopary może być wykonane z cienkich drucików, posiada wtedy znikomą pojemność cieplną i krótki czas reakcji na zmianę temperatury. Wygodnym sposobem pomiaru niewielkich napięć termoelektrycznych (rzędu kilku mV) jest zastosowanie woltomierza cyfrowego. Wadą termopary (w porównaniu z termometrem oporowym) jest konieczność utrzymywania złącza odniesienia w stałej temperaturze i nieco mniejsza dokładność.

W zakresie  $77 \div 600$  K najczęściej stosowana jest termopara miedź-konstantan, charakteryzująca się stosunkowo dużą wartością napięcia termoelektrycznego.

Dla zakresu  $4 \div 77$  K stosuje się specjalne stopy, gdyż zwykle termopary posiadają zbyt małą czułość. Dla wysokich temperatur stosuje się układy metali trudno topliwych i odpornych na utlenienie. Przykładowo, termopara Pt-Pt<sub>0.90</sub>Rh<sub>0.10</sub> umożliwia pomiary do 1800 K.

W praktyce złącze odniesienia często znajduje się w temperaturze pokojowej  $t_0$ , różnej od  $0^{\circ}\text{C}$ . W tym przypadku woltomierz wskazuje

$$U = E(t) - E(t_0). \quad (121.5)$$

Dla uzyskania wartości  $E(t)$  należy w tym przypadku zmierzyć temperaturę złącza odniesienia  $t_0$  innym termometrem (np. rtęciowym) i do zmierzonej wartości napięcia dodawać stałą

poprawkę  $E(t_0)$ , odczytaną z charakterystyki termopary.

## Literatura

Podręczniki fizyki ciała stałego (patrz ćwic. 122)

Massalski J.: *Fizyka dla inżynierów*. T.I. Warszawa, WNT 1975

## Aparatura

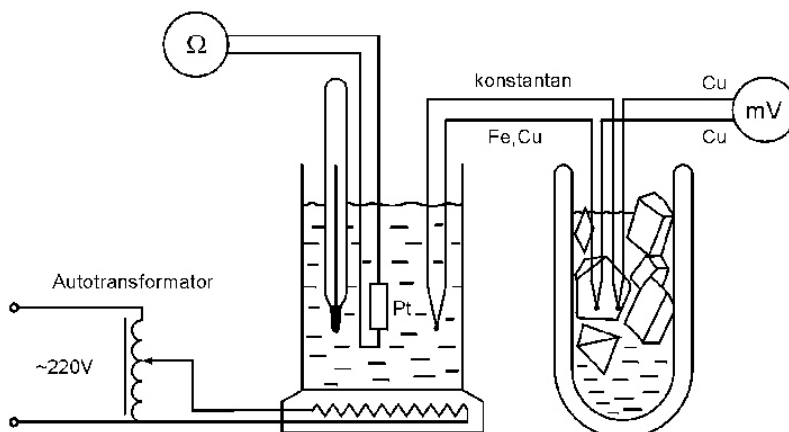
W skład zestawu pomiarowego (rys. 121.3) wchodzi poniżej wymienione przyrządy.

*Termometr platynowy* w postaci oporowej spirali z drutu platynowego osadzonej w rurce ceramicznej. Osłona z cienkiego drutu zabezpiecza rurkę przed uszkodzeniem. Końce spirali platynowej są doprowadzone do odpowiednich zacisków osadzonych na płytce. Do płytki przymocowane jest mieszadełko, przez otwór w płytce wkłada się termometr.

*Termopara* wykonana z drutów miedzianego i konstantanowego o małej średnicy (0,2 mm). Stosowanie drutów o małej średnicy jest związane z zapobieganiem odprowadzaniu ciepła z obiektu, którego temperatura jest mierzona. W celu zabezpieczenia przed uszkodzeniem złącze pomiarowe i złącze odniesienia znajdują się w szklanych rurkach połączonych wężykiem z polietylenu. Zimny koniec termopary umieszczono w termosie wypełnionym mieszaniną wody i lodu, a gorący w kociołku z wodą.

*Kociołek z wodą* jest ogrzewany prądem sieciowym, którego napięcie reguluje się autotransformatorem.

*Multimetr cyfrowy* służy do pomiaru oporności. Napięcie termopary mierzy się woltomierzem cyfrowym, a w przypadku jego braku multimetrem.



Rysunek 121.3: Układ pomiarowy

## Wykonanie ćwiczenia

1. Zestawić układ pomiarowy według rysunku 121.3.  
**Uwaga.** Aby uzyskać temperaturę odniesienia  $0^{\circ}\text{C}$ , złącze termopary musi znajdować się w otoczeniu topniejących kawałków lodu (do lodu dolewamy małą ilość wody). W przypadku mieszaniny dużej ilości wody i małej lodu, lód pływa przy powierzchni, natomiast w pobliżu dna temperatura może wzrosnąć do kilku stopni powyżej  $0^{\circ}\text{C}$ ! Zjawisku temu sprzyja anomalna rozszerzalność cieplna wody. Wskutek większej gęstości wody w pobliżu dna nie powstaje konwekcja cieczy, która mogłaby doprowadzić do wyrównania temperatury w naczyniu.
2. Zmierzyć wartości  $E$  i  $R$  dla temperatury pokojowej.
3. Włączyć grzanie kociołka, podnosząc napięcie na autotransformatorze do wartości  $(100 \div 180)\text{V}$ . Nie dajemy pełnego napięcia  $220\text{V}$ , by uniknąć zbyt szybkiego grzania wody.
4. Mieszając cały czas wodę, odczytywać wskazania termometru, omomierza i woltomierza co  $5^{\circ}\text{C}$ , wpisać te dane do tabeli pomiarów.
5. Przerwać grzanie, gdy temperatura osiągnie  $95^{\circ}\text{C}$ .

## Opracowanie wyników

1. Wykonać wykres  $R(t)$  dla platyny.
2. Metodą najmniejszych kwadratów znaleźć parametry prostej. Nanieść ją na wykres.
3. Na podstawie wartości i niepewności współczynnika nachylenia prostej obliczyć wartość i niepewność pomiaru dla temperaturowego współczynnika oporu platyny. Stwierdzić, czy w granicach niepewności rozszerzonej otrzymana wartość  $\alpha$  jest zgodna z wartością tablicową. (Dla platyny  $\alpha = 3,96 \cdot 10^{-3} \text{ 1/deg.}$ )
4. Wykonać wykres cechowania termopary  $E(t)$ .
5. Do zależności  $E(t)$  dopasować prostą metodą graficzną. Wyznaczyć wartość współczynnika  $a_1$ .
6. Oceń jakościowo, czy linia prosta wystarcza dla określenia charakterystyki termopary w badanym zakresie temperatur, tzn. czy jest widoczne zakrzywienie charakterystyki.