



**ĆWICZENIE**  
**44**

**POMIAR ZALEŻNOŚCI OPORU METALI**  
**I PÓŁPRZEWODNIKÓW OD TEMPERATURY**

**Cel ćwiczenia:** Pomiar zależności oporu elektrycznego (rezystancji) metalu i półprzewodnika od temperatury oraz wyznaczenie temperaturowego współczynnika oporu metalu i szerokości pasma wzbronionego półprzewodnika (tzw. przerwy wzbronionej).

**Zagadnienia:** Zależność oporu metalu i półprzewodnika od temperatury, wpływ zmiany temperatury na koncentrację i ruchliwość swobodnych nośników prądu w metalach i półprzewodnikach. Półprzewodnik samoistny i domieszkowany. Struktura pasmowa półprzewodników.

## 1. Wprowadzenie

Ciała stałe pod względem własności elektrycznych dzielimy na przewodniki, półprzewodniki i izolatory. To co je zasadniczo różni to koncentracja swobodnych elektronów, które są nośnikami prądu. Mówiąc swobodny elektron mamy na myśli to, że nie jest on związany z konkretnym atomem, lecz może poruszać się w całej sieci krystalicznej. O takim swobodnym elektronie mówimy, że znajduje się w paśmie przewodnictwa.

### Metale

W metalach koncentracja elektronów swobodnych, czyli liczba elektronów przypadających na jednostkę objętości, jest bardzo duża (np. w miedzi  $8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ). Jest tak dlatego, że podczas gdy atomy metalu łączą się tworząc strukturę krystaliczną, z każdego atomu uwalnia się średnio biorąc jeden najslabiej związany elektron walencyjny stając się elektronem swobodnym. Czyli koncentracja elektronów swobodnych jest bliska koncentracji atomów metalu i praktycznie nie zależy od temperatury. Zatem o zmianie oporu metalu w funkcji temperatury decyduje druga wielkość fizyczna zwana ruchliwością elektronów.

Ruchliwość elektronów  $\mu$  związana jest ze średnią prędkością unoszenia  $\vec{v}_{sr,u}$  gazu elektronowego wzdłuż kierunku przyłożonego do metalu pola elektrycznego (pole to pojawia się, gdy przykładamy do próbki napięcie). Nie należy tej prędkości mylić z prędkością pojedynczych elektronów, która w temperaturze pokojowej jest rzędu  $10^6 \text{ m/s}$  i wynika z ich chaotycznego ruchu cieplnego, podobnego do chaotycznego ruchu cząsteczek zwykłego gazu. Jednak, gdy nie ma zewnętrznego pola elektrycznego, to średnia po wszystkich elektronach prędkość unoszenia będzie równa zeru. Dzieje się tak dlatego, że w tym chaotycznym ruchu cieplnym, średnio biorąc, tyle samo elektronów porusza się w określonym kierunku co w kierunku przeciwnym. Dopiero gdy przyłożymy pole elektryczne, to na ten chaotyczny ruch elektronów nałoży się ruch elektronów wzdłuż pola elektrycznego z już niezerową średnią prędkością unoszenia, która jest rzędu  $10^{-4} \text{ m/s}$ . Jednak sama wartość tej prędkości nie jest dobrym parametrem charakteryzującym łatwość poruszania się elektronów w sieci krystalicznej, ponieważ gdy przyłożymy większe napięcie do próbki, to pojawi się większe pole elektryczne, a to spowoduje wzrost tej średniej prędkości unoszenia mimo stałej temperatury. Żeby więc uzyskać parametr mówiący o łatwości przemieszczania się gazu elektronowego w kryształach pod wpływem pola elektrycznego  $E$ , ale niezależny od wielkości tego pola, wprowadzono tzw. ruchliwość elektronów  $\mu$ . Zdefiniowano ją jako stosunek średniej prędkości unoszenia elektronów do natężenia pola elektrycznego wywołującego tę prędkość:

$$\mu = \frac{\vec{v}_{sr,u}}{E}. \quad (1)$$

W metalach, gdy temperatura rośnie, to w danym polu elektrycznym maleje średnia prędkość unoszenia gazu elektronowego (choć jednocześnie rosną prędkości pojedynczych elektronów wynikające z ich chaotycznego ruchu cieplnego). Dlaczego ze wzrostem temperatury ta średnia prędkość unoszenia maleje? Przyczyna jest prosta. W wyższej temperaturze atomy sieci krystalicznej silniej drgają, utrudniając w ten sposób przemieszczanie się gazu elektronowego w określonym kierunku. Mówimy, że elektrony są rozpraszane na drganiach sieci krystalicznej. Te rozpraszania powodują, że w wyższej temperaturze elektrony mają mniejszą ruchliwość.

Podsumujmy, w metalach koncentracja elektronów swobodnych  $n$  jest wysoka i nie zmienia się ze wzrostem temperatury, a ich ruchliwość  $\mu$  maleje. Wynika stąd, że elektryczna przewodność właściwa  $\sigma$  wyrażona wzorem:

$$\sigma = en\mu, \quad (2)$$

gdzie:  $e$  – ładunek elektronu, też maleje.

Opór właściwy jest odwrotnością przewodności właściwej. Zatem gdy temperatura rośnie opór metalu też rośnie. Powyżej pewnej temperatury (rzędu 100 K, ale różnej dla różnych metali) wzrost ten jest liniowy (rys. 1) i można go zapisać równaniem:

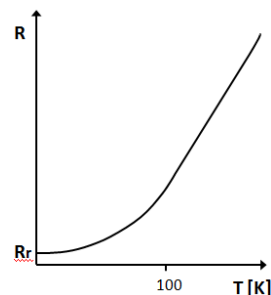
$$R_{m,t} = R_{m,o}(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (3)$$

gdzie:  $R_{m,o}$  – opór metalu w temperaturze początkowej  $t_o$ ,

$R_{m,t}$  – opór metalu w temperaturze  $t=t_o+\Delta t$ .

$\alpha$  – temperaturowy współczynnik oporu zależny od rodzaju materiału. Im większa jest jego wartość, tym szybciej zmienia się opór metalu przy zmianie temperatury.

Gdy schładzamy metal poniżej tej temperatury, drgania atomów zanikają i opór próbki zależy głównie od defektów struktury krystalicznej (wszelkich odstępstw od periodyczności sieci wynikających np. z obecności dyslokacji, wakansów, zanieczyszczeń itd.). Jak widać na rys.1, w tym zakresie niskich temperatur opór metalu też rośnie ze wzrostem temperatury, ale już nieliniowo. W temperaturze bliskiej zera bezwzględnego pozostaje jedynie tzw. rezystancja resztkowa, tym mniejsza im czystsza jest próbka i mniej zawiera defektów.

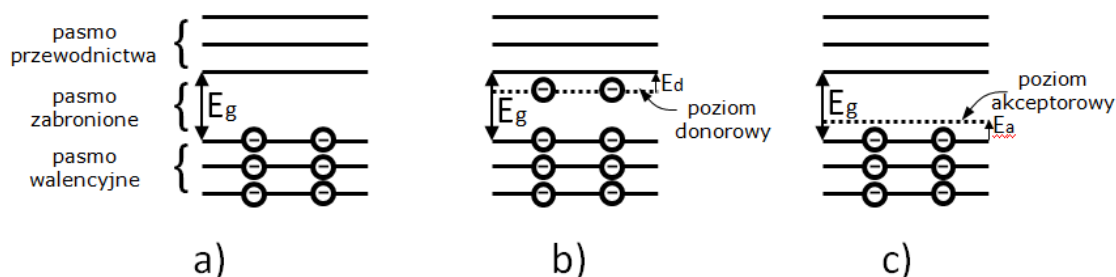


Rys. 1. Zależność oporu metali od temperatury.

## Półprzewodniki

### Półprzewodniki samoistne

Półprzewodniki samoistne to takie, w których sieć krystaliczna nie jest zaburzona atomami obcego pierwiastka, np. domieszkami. Generalnie, w półprzewodnikach koncentracja elektronów swobodnych silnie zależy od temperatury. W temperaturze bliskiej zera bezwzględnego koncentracja ta praktycznie jest równa zero. Atomy tworzące sieć krystaliczną w tej



Rys. 2. Model pasmowy półprzewodnika.  $E_g$  - szerokość pasma wzbronionego.

a) Półprzewodnik samoistny w temperaturze bliskiej zera bezwzględnego.

b) Półprzewodnik typu  $n$  (z domieszkami donorowymi).  $E_d$  - energia aktywacji donorów.

c) Półprzewodnik typu  $p$  (z domieszkami akceptorowymi).  $E_a$  - energia aktywacji akceptorów.

ekstremalnie niskiej temperaturze nie pozbywają się elektronów, nawet tych najsłabiej z nimi związanych elektronów walencyjnych. Mówimy, że elektrony walencyjne wypełniają całkowicie pasmo walencyjne zwane też pasmem podstawowym (rys. 2a.) Te związane elektrony nie mogą przewodzić prądu. Brak jest elektronów swobodnych, czyli pasmo przewodnictwa jest puste. To powoduje, że opór półprzewodnika jest bardzo duży. Pasmo przewodnictwa przedzielone jest od pasma walencyjnego tzw. pasmem wzbronionym, którego szerokość dla półprzewodników najczęściej nie przekracza 3 eV. Oznacza to, że aby uzyskać elektrony swobodne w paśmie przewodnictwa należy dostarczyć elektronom walencyjnym odpowiednio dużą energię pozwalającą na przeskok przez pasmo wzbronione. Mówiąc inaczej dostarczona energia pozwala elektronom walencyjnym pokonać energię wiązania i stać się elektronami swobodnymi mogącymi przewodzić prąd. Jednym ze sposobów dostarczania energii elektronom jest podgrzewanie próbki. Gdy temperatura półprzewodnika jest odpowiednio wysoka i rośnie, to koncentracja elektronów swobodnych rośnie eksponencjalnie. Jest to bardzo silny wzrost i mimo, że ze wzrostem temperatury ruchliwość elektronów swobodnych, podobnie jak w metalach, maleje, to jednak przewodnictwo silnie rośnie tak jak koncentracja, czyli też eksponencjalnie. Zatem opór półprzewodnika maleje eksponencjalnie ze wzrostem temperatury, co można zapisać wzorem:

$$R_s = R_{os} \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (4)$$

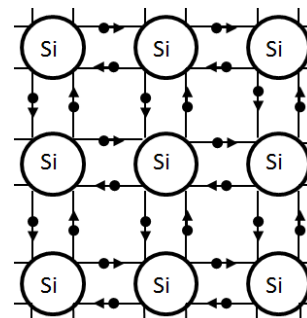
gdzie:  $R_{os}$  — w przybliżeniu stała wartość zależna od rodzaju półprzewodnika i jego wymiarów,  
 $E_g$  — szerokość pasma wzbronionego, zależna od rodzaju półprzewodnika,  
 $T$  — temperatura wyrażona w Kelwinach,  
 $k$  — stała Boltzmana.

Ze wzoru (4) wynika, że im szersze jest pasmo wzbronione danego półprzewodnika, to w danej temperaturze większy jest jego opór. Wynika to z tego, że przy większej przerwie wzbronionej trudniej elektronom wzbudzić się z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, a zatem w paśmie przewodnictwa mniej jest elektronów swobodnych. Prowadzi to do tego, że przewodnictwo półprzewodnika maleje, czyli jego opór rośnie.

Zwróćmy jeszcze uwagę na to, że nawet w wysokich temperaturach w półprzewodnikach koncentracja elektronów swobodnych jest kilka rzędów mniejsza niż w metalach, a więc półprzewodniki mają większy opór właściwy.

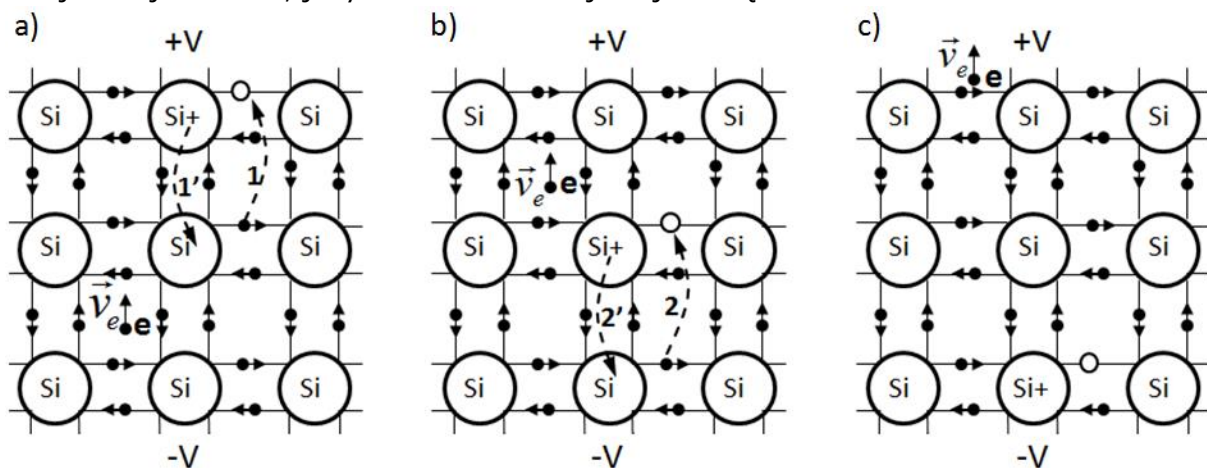
Przykładem półprzewodnika samoistnego jest krzem (Si) tworzący regularną sieć krystaliczną. Krzem należy do IV grupy układu okresowego pierwiastków. Oznacza to, że posiada on cztery elektrony walencyjne i to właśnie one tworzą wiązania z czterema sąsiednimi atomami krzemu (rys. 3). W tej sytuacji każdy atom krzemu otoczony jest ośmioma elektronami walencyjnymi; czterema własnymi i po jednym od każdego z czterech sąsiadujących atomów krzemu. Taki stan z ośmioma elektronami walencyjnymi wokół każdego atomu krzemu (czyli z tzw. oktetem) jest najkorzystniejszy energetycznie, więc utworzona w ten sposób sieć krystaliczna jest trwała.

Należy jeszcze wspomnieć, że gdy elektron walencyjny uwolni się od pewnego atomu (np. wskutek podgrzania próbki) i stanie się elektronem swobodnym, to taki stan atomu w półprzewodniku z brakującym elektronem walencyjnym nazywamy dziurą. Posiada ona nie zrównoważony ładunek dodatni. Ze sposobu w jaki powstaje dziura wynika, że w półprzewodniku samoistnym liczba dziur jest równa liczbie elektronów swobodnych. Powstała dziura chętnie przyłączyłaby do siebie jakiś elektron, aby atom z powrotem miał komplet ośmiu elektronów. Jednak elektron, który się uwolnił, w wyniku uzyskanej energii cieplnej, porusza się



**Rys. 3. Półprzewodnik samoistny (brak obcych atomów) w temperaturze bliskiej 0 K (wszystkie elektrony walencyjne są związane). Strzałki przy elektronach wskazują na atomy, z którymi te elektrony dodatkowo się wiążą.**

chaotycznie i jest już gdzieś daleko w kryształ (na rys. 4a. elektron oznaczony literą **e**). Zatem atom z brakującym elektronem (Si+) najchętniej przyłączyłby do siebie najslabiej związany elektron walencyjny z sąsiedniego atomu. Ułatwiamy mu to zadanie, gdy do półprzewodnika podłączamy napięcie wywołujące w półprzewodniku pole elektryczne. To pole elektryczne do spółki z polem elektrycznym dodatniej dziury przeciąga elektron z sąsiedniego atomu na tę dziurę (rys. 4a. proces oznaczony linią kreskowaną 1). Dotychczasowa dziura przestaje być dziurą i staje się obojętnym atomem z kompletem elektronów (rys. 4b). Ale w atomie, z którego przeciągnięty został elektron walencyjny jest teraz niedomiar elektronów, więc teraz ten atom stał się dziurą i proces się powtarza. Nowa dziura razem z przyłożonym pole elektrycznym przeciąga do siebie elektron walencyjny z następnego atomu (rys. 4b, proces oznaczony linią kreskowaną 2). Dziura staje się obojętnym atomem, a ten następny atom dziurą itd. W wyniku tego procesu kolejne elektrony walencyjne związane z atomami, w wyniku przyłożonego napięcia, przeciągane są z atomu na atom w kierunku dodatniego potencjału elektrycznego +V. Efekt tego procesu jest taki jakby dodatnia dziura przemieszczała się w przeciwnym kierunku, czyli do ujemnego potencjału -V przyłożonego napięcia (rys. 4, procesy oznaczone liniami kreskowanymi 1' i 2'). Oczywiście, to przewodnictwo dodaje się do wcześniej omówionego przewodnictwa wynikającego z ruchu elektronów swobodnych (takich jak ten na rys. 4 oznaczony literą **e** poruszający się z prędkością  $\vec{v}_e$ ), które przemieszczają się do potencjału dodatniego +V. Po uwzględnieniu przewodnictwa dziurowego wzór (4) na opór półprzewodnika pozostaje dalej taki sam, jedynie wartość stałej  $R_{os}$  jest większa.



Rys. 4. Rysunek wyjaśniający przewodnictwo dziurowe i elektronowe. Przewodnictwo elektronowe wynika z ruchu elektronów swobodnych, czyli niezwiązanych z konkretnymi atomami, lecz poruszających się w całym kryształ. Na rysunku literą **e** oznaczono jeden z elektronów swobodnych poruszający się z prędkością  $\vec{v}_e$  w stronę dodatniego potencjału +V. Przewodnictwo dziurowe, czyli ruch dodatnich dziur w stronę potencjału ujemnego -V (strzałki 1' i 2'), wynika z przeskoków elektronów walencyjnych między sąsiednimi atomami w stronę przeciwną (strzałki 1 i 2).

### Półprzewodniki domieszkowane

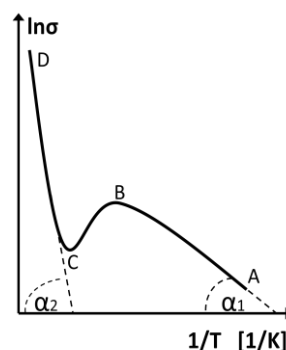
Przedstawiony powyżej mechanizm przewodzenia prądu elektrycznego dotyczył półprzewodników samoistnych, czyli bez domieszek. Elektrony w paśmie przewodnictwa pochodziły z pasma walencyjnego. Jeżeli w sieci krystalicznej zamiast podstawowego pierwiastka tworzącego sieć w co którymś węzle sieci umieścimy inny pierwiastek, to mówimy, że półprzewodnik jest domieszkowany. Załóżmy, że sieć krystaliczna zbudowana jest z podstawowego pierwiastka należącego do IV grupy układu okresowego pierwiastków, czyli zawierającego cztery elektrony walencyjne, np. z krzemu (Si). I załóżmy dodatkowo, że co któryś atom podstawowy zastąpimy atomem pierwiastka z V grupy, czyli zawierającym pięć elektronów walencyjnych, np. arsenem (As). To piąty elektron walencyjny arsenu, czyli domieszki, nie bierze udziału w wiązaniach z czterema sąsiednimi atomami krzemu. Ten, można powiedzieć, zbędny w tworzeniu sieci krystalicznej elektron jest dużo słabiej związany z atomem domieszki, niż elektrony walencyjne z atomami podstawowymi. Dlatego już niewielkie

(znacznie mniejsze niż w przypadku półprzewodników samoistnych) podgrzanie próbki powyżej temperatury zera bezwzględnej powoduje oderwanie tego elektronu od atomu domieszki, przez co staje się on elektronem swobodnym. W teorii pasmowej mówimy, że elektron został wzbudzony z poziomu domieszkowego do pasma przewodnictwa. Taką domieszkę, która dostarcza elektronów swobodnych nazywamy donorem, a poziom energetyczny tego "zbędnego" elektronu domieszki poziomem donorowym (rys. 2b). Półprzewodnik zawierający donory nazywamy półprzewodnikiem typu n, od angielskiego *negative*, gdyż w takim półprzewodniku przeważającymi, czyli większościami nośnikami prądu są elektrony swobodne posiadające ładunek ujemny.

Zauważmy, że w niskich temperaturach obecność domieszek bardzo mocno wpływa na zwiększenie przewodnictwa. Zastąpienie zaledwie jednego na milion atomu krzemu atomem arsenu powoduje, że w pewnym zakresie niskich temperatur opór elektryczny maleje 3 miliony razy w stosunku do próbki niedomieszkowanej. Dzieje się tak dlatego, że taka temperatura jest za niska aby powodować wzbudzenia cieplne elektronów z pasma walencyjnego, czyli z podstawowych atomów tworzących sieć, ale wystarczająco wysoka, żeby wzbudzać elektrony z poziomu domieszkowego do pasma przewodnictwa. Natomiast w wyższych temperaturach, w których w paśmie przewodnictwa przeważają elektrony wzbudzone z pasma walencyjnego, opór elektryczny próbki domieszkowanej praktycznie nie różni się od oporu próbki samoistnej.

Natomiast jeżeli w sieci krystalicznej zbudowanej z atomów należących do IV grupy układu okresowego, zawierających cztery elektrony walencyjne, co któryś atom zastąpimy atomem pierwiastka należącego do III grupy zawierającego tylko trzy elektrony walencyjne, to już w niskich temperaturach w półprzewodniku mamy niedomiar elektronów walencyjnych i tworzą się dziury. Półprzewodnik tak domieszkowany nazywamy półprzewodnikiem typu p, od angielskiego słowa *positive*, gdyż teraz większościami nośnikami prądu są dziury posiadające nie zrównoważony ładunek dodatni. Opisując ten przypadek przy pomocy struktury pasmowej mówimy, że elektron walencyjny atomu sieci podstawowej wzbudzany jest na poziom domieszkowy, w tym przypadku zwany poziomem akceptorowym (rys. 2c). Brakuje więc elektronu walencyjnego w atomie podstawowym sieci. Oznacza to powstanie dziury w paśmie walencyjnym, która, jak już mówiliśmy przy omawianiu przewodnictwa samoistnego, przewodzi prąd.

Podsumujmy to co zostało powiedziane o półprzewodnikach wyjaśniając zależność przewodnictwa półprzewodnika domieszkowanego od temperatury (rys. 5). Zwróćmy uwagę na to, że na osi poziomej jest odwrotność temperatury, czyli temperatura rośnie w lewą stronę. Pamiętajmy też, że przewodnictwo wyraża się wzorem (2). W zakresie niskich temperatur wzrost temperatury (przejście A→B) powoduje wzrost koncentracji  $n$  nośników prądu biorących się z domieszek, co decyduje o wzroście przewodnictwa. W temperaturze odpowiadającej punktowi B temperatura jest na tyle wysoka, że wszystkie domieszki są już zjonizowane. Oznacza to, że jeżeli półprzewodnik jest typu n, to z każdego atomu donora uwolnił się już jeden nadmiarowy elektron, który przeszedł do pasma przewodnictwa. Dalszy więc wzrost temperatury (przejście B→C) nie może już wywołać wzrostu koncentracji nośników biorących się z domieszek, dlatego na odcinku B→C koncentracja nośników prądu jest stała. W tym zakresie o tym, że gdy temperatura rośnie przewodnictwo maleje decyduje maleńczenie ruchliwości  $\mu$ . Powód tego jest taki sam jak w metalach. Ruchliwość maleje ze wzrostem temperatury, bo nośniki prądu rozpraszane są na coraz silniejszych drganiach sieci krystalicznej. Po przekroczeniu odpowiednio wysokiej temperatury, rzędu temperatury pokojowej, ale różnej dla różnych materiałów (punkt C), elektrony zaczynają być wzbudzone z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (przejście C→D). Jest to tzw. zakres przewodnictwa samoistnego. Wzrost



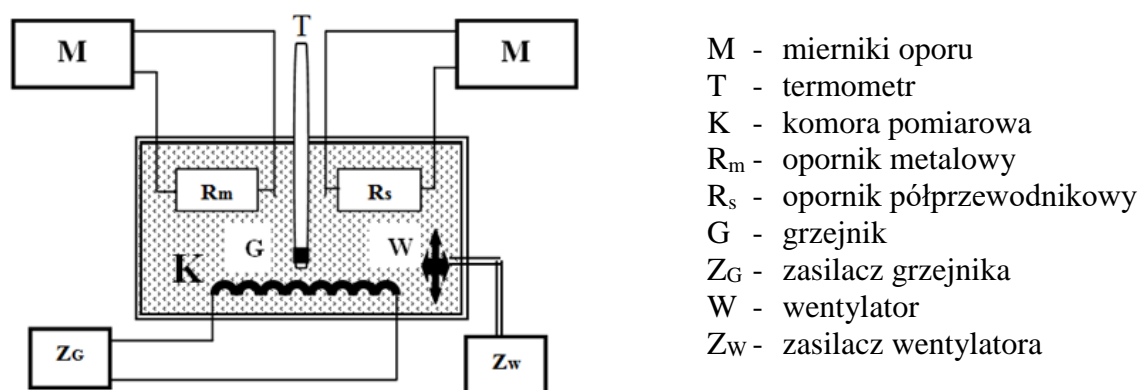
Rys.5. Zależność przewodnictwa półprzewodnika od odwrotności temperatury.

temperatury powoduje silny, eksponencjalny, wzrost koncentracji elektronów swobodnych oraz dziur i mimo, że ruchliwość dalej maleje, to wzrost koncentracji decyduje o wzroście przewodnictwa. W tym zakresie temperatur przewodnictwo samoistne dominuje nad przewodnictwem wynikającym z obecności domieszek. Innymi słowy domieszki nie odgrywają istotnej roli i zależność oporu półprzewodnika od temperatury można opisać wzorem (4). I właśnie w tym zakresie przewodnictwa samoistnego przeprowadzone zostaną pomiary w wykonywanym ćwiczeniu.

O ważności półprzewodników domieszkowanych świadczy fakt, że mają one szerokie zastosowanie w życiu codziennym. Tranzystory i diody półprzewodnikowe są podstawą działania wszystkich urządzeń elektronicznych np. takich jak sprzęt RTV czy AGD. Diody emitujące światło, czyli LED-y, wykorzystywane są powszechnie w ekranach telewizorów. Lasery półprzewodnikowe stosowane są do zapisu oraz odczytu danych na płytach CD i DVD. Różnego rodzaju termometry półprzewodnikowe wykorzystują silną zależność oporu od temperatury.

## 2. Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 6. W komorze pomiarowej znajdują się próbka metalowa o oporze  $R_m$  i półprzewodnikowa o oporze  $R_s$  oraz termometr, grzejnik i wentylator. Układ umożliwi pomiar zależności oporu metalu i półprzewodnika od temperatury zarówno podczas wzrostu temperatury (wykorzystujemy grzejnik), jak i podczas schładzania próbek (stosujemy wentylator). Pomiary należy przeprowadzić w zakresie od 20°C do 90°C.



Rys. 6. Schemat układu do pomiaru zależności oporu od temperatury.

## 3. Zadania do wykonania

### A) Pomiary:

Po połączeniu układu (rys. 6) i sprawdzeniu go przez prowadzącego ćwiczenia należy włączyć mierniki oporu do sieci. Mierzmy opory próbek w temperaturze pokojowej. Następnie, włączamy zasilacz grzejnika i zwiększając stopniowo napięcie zasilające grzejnik podwyższamy co kilka stopni temperaturę próbek, którą notujemy wraz z odpowiadającymi jej oporami badanych materiałów. Pomiary oporu prowadzi się w warunkach zbliżonych do równowagi cieplnej, tzn. wtedy, gdy temperatura prawie się nie zmienia. Po osiągnięciu 90°C, na życzenie prowadzącego zajęcia, pomiary można powtórzyć, tym razem schładzając próbki. W tym celu należy wyłączyć zasilacz grzałki i włączyć zasilacz wentylatora. Szczegółowy opis czynności wykonywanych w trakcie pomiarów znajduje się w instrukcji wykonawczej do tego ćwiczenia.

### B) Opracowanie wyników:

Narysować wykres oporu metalu od temperatury  $R_{m,t} = f(t)$ . Wykorzystując metodę regresji liniowej wyznaczyć współczynniki prostej najlepiej dopasowanej do wykresu. Znając te

współczynniki oraz korzystając z równania (3) określić temperaturowy współczynnik oporu badanego metalu i niepewność wyznaczenia tego współczynnika. Szczegółowy opis sposobu wyznaczenia temperaturowego współczynnika oporu metalu można znaleźć w instrukcji wykonawczej do tego ćwiczenia.

Dla półprzewodnika wykreślić zależność  $\ln(R_s) = f(1000/T)$ , gdzie  $T$  jest temperaturą w Kelwinach. Wykorzystując metodę regresji liniowej wyznaczyć współczynnik kierunkowy prostej najlepiej dopasowanej do wykresu. Mając ten współczynnik oraz korzystając ze wzoru (4) należy wyznaczyć szerokość pasma wzbronionego  $E_g$  i niepewność wyznaczenia tej szerokości. Szczegółowy opis sposobu wyznaczenia szerokości pasma wzbronionego można znaleźć w instrukcji wykonawczej do tego ćwiczenia.

#### 4. Pytania:

1. Omówić mechanizm przewodzenia prądu w metalach.
2. Wyjaśnić podstawowe mechanizmy rozpraszania swobodnych nośników ładunku w metalach.
3. Przedstawić zależność oporu elektrycznego metalu od temperatury (wykres i wzór). Wyjaśnij jakie znaczenie ma temperaturowy współczynnik oporu.
4. Opisać model pasmowy półprzewodnika. Wyjaśnij znaczenie szerokości pasma wzbronionego.
5. Omówić mechanizm przewodnictwa w półprzewodniku samoistnym i domieszkowym.
6. Przedstaw na wykresie i omów zależność przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika od temperatury
7. Co uzyskujemy dzięki domieszkowaniu półprzewodnika? Jak i do czego jest wykorzystywana ta właściwość?
8. Podać przykład przyrządu pomiarowego wykorzystującego zależność oporu od temperatury.
9. Za pomocą jakich metod będzie przeprowadzona analiza niepewności pomiarowych zmierzonych i obliczanych wielkości?

Opracował: Janusz Bożym