



Politechnika Wroclawska

Laboratorium Półprzewodniki, Dielektryki i Magnetyki

Ćwiczenie nr 6

Badanie przewodnictwa elektrycznego w polach stałych

I. Zagadnienia do przygotowania:

1. Co to jest TWR i jak go wyznaczyć?
2. Konduktywność półprzewodnika niedomieszkowanego i domieszkowanego w funkcji temperatury.
3. Mechanizmy termicznej generacji nośników w półprzewodnikach niedomieszkowanych i domieszkowanych.
4. Zależność ruchliwości nośników od temperatury w półprzewodnikach.
5. Rodzaje i parametry termistorów.
6. Przewodnictwo elektryczne w materiałach amorficznych – zależność $\sigma=f(T)$ dla hoppingu.
7. Wykres Arrheniusa, sposób wyznaczania energii aktywacji.

II. Program ćwiczenia:

1. Pomiary konduktywności materiałów półprzewodnikowych i amorficznych w funkcji temperatury

III. Literatura:

1. Wykład PDM
2. Wiesław Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”
3. R. Zallen, Fizyka ciał amorficznych, PWN, Warszawa 1994

W czasie wykonywania ćwiczenia przestrzegaj przepisów BHP!

1. Wstęp

1.1. Zależność przewodności od temperatury

Do podstawowych wielkości charakteryzujących właściwości elektryczne materiałów należą przewodność (konduktywność) σ oraz przenikalność elektryczna ϵ .

Przewodność elektryczna jest funkcją koncentracji nośników ładunku (n) i ich ruchliwości (μ).

$$\sigma(T) = q \cdot n(T) \cdot \mu(T) \quad (1)$$

1.2. Metale

W przewodnikach (metalach) koncentracja elektronów ma dużą wartość i nie zależy od temperatury, a o zależności temperaturowej przewodnictwa decyduje zmniejszanie się ruchliwości ze wzrostem temperatury, zatem przewodnictwo właściwe metali maleje ze wzrostem temperatury. Dla metali w pobliżu temperatury pokojowej zależność rezystywności $\rho = \frac{1}{\sigma}$ od temperatury jest w przybliżeniu liniowa i można ją opisać zależnością:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (2)$$

gdzie ρ_0 to rezystywność w temperaturze odniesienia T_0 (zwykle pokojowej lub 0°C), $\Delta T = T - T_0$ a α to temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR).

1.3. Półprzewodniki i dielektryki

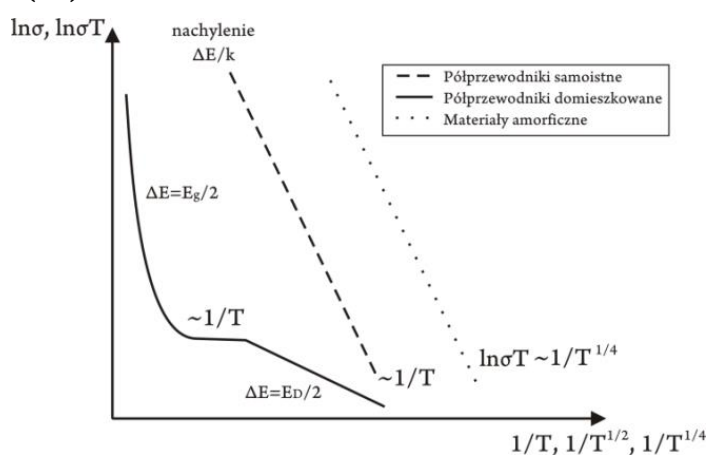
W półprzewodnikach i dielektrykach wpływ temperatury na przewodnictwo w określonych przedziałach temperatury można opisać zależnością:

$$\sigma(T) = \sigma_0(T)e^{-\frac{W}{kT}} \quad (3)$$

gdzie: $\sigma_0(T) \sim \frac{1}{T^n}$, dla przewodnictwa elektronowego $n=0$, a jonowego $n=1$.

Zależnie od rodzaju materiału i mechanizmu przewodnictwa stosuje się różne wykresy do przedstawienia zależności przewodności od temperatury. Najczęściej stosowane są:

- wykres Arrheniusa opisujący zależność logarytmu przewodności od odwrotności temperatury w skali bezwzględnej $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$
- wykres $\ln(\sigma T) = f\left(\frac{1}{T}\right)$
- wykres $\ln \sigma = f\left(T^{\frac{1}{4}}\right)$



Rysunek 1. Różne sposoby przedstawienia zależności przewodności od temperatury w zależności od rodzaju materiału

1.3.1. Półprzewodniki samoistne

W półprzewodnikach samoistnych pary nośników elektron – dziura powstają wyłącznie wskutek przejść elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (generacja pasmo – pasmo). Wówczas:

$$n = p \sim e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (4)$$

gdzie n , p – koncentracje elektronów i dziur, E_g – szerokość przerwy zabronionej, k – stała Boltzmanna.

Ruchliwość nośników prądu μ w półprzewodnikach wynika z kilku mechanizmów rozpraszania nośników. W przedziale temperatur, w którym pracują typowe przyrządy półprzewodnikowe, jest ona potęgową funkcją temperatury $\mu \sim T^p$ z ujemną wartością wykładnika p przez co ruchliwość maleje wraz ze wzrostem temperatury.

Wpływ tego zjawiska na przewodność półprzewodników samoistnych jest znikomy – dominującym czynnikiem są zmiany koncentracji nośników. W związku z tym, zależność przewodnictwa od temperatury dla półprzewodnika samoistnego określa relacja:

$$\sigma(T) = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (5)$$

która wykreślona na wykresie Arrheniusa daje linię prostą o nachyleniu zależnym od szerokości przerwy zabronionej (rysunek 1).

1.3.2. Półprzewodniki domieszkowane

Dla półprzewodników z jednym rodzajem domieszek pary nośników mogą powstawać w drodze dwóch różnych procesów – jonizacji domieszek oraz generacji pasmo – pasmo. Procesy te różnią się znacznie energią aktywacji.

W niższych temperaturach dominuje jonizacja atomów domieszki. Na wykresie Arrheniusa (rysunek 1) odpowiada temu odcinek prostej nachyleniu zależnym od energii aktywacji $\Delta E = \frac{E_D}{2}$ gdzie E_D to odległość poziomu domieszkowego od krawędzi pasma przewodnictwa dla domieszek donorowych lub od krawędzi pasma walencyjnego dla domieszek akceptorowych.

Dla temperatur odpowiednio wysokich następuje dalsze zwiększanie koncentracji nośników na skutek generacji pasmo – pasmo, identycznie jak w półprzewodniku niedomieszkowanym.

W przedziale temperatur, dla których wszystkie domieszki już zostały zjonizowane a generacja pasmo – pasmo jest pomijalna, koncentracja nośników w półprzewodniku jest stała. Przewodność półprzewodnika zależy wówczas jedynie od opisanych wcześniej słabych zmian ruchliwości nośników od temperatury dając niemal poziomy odcinek na wykresie Arrheniusa.

1.3.3. Półprzewodniki amorficzne

Dla półprzewodników amorficznych o stosunkowo dużej gęstości stanów w przerwie ruchliwości obserwujemy przewodnictwo hoppingowe, które związane jest z mechanizmem transportu zwanym przeskokami o zmiennym zasięgu. Ocenę temperaturowej zależności przewodnictwa hoppingowego na poziomie Fermiego przeprowadził Mott (1969) (prawo $T^{1/4}$). Jak widać na rysunku 1, dzięki odpowiedniemu wyborowi współrzędnych, obserwowana zależność przewodnictwa od temperatury odpowiada relacji:

$$\sigma(T) \sim e^{-\frac{A}{T^{1/4}}}, \text{ gdzie } A \approx \left[\frac{\alpha^3}{k \cdot n(E_F)} \right]^{1/4} \quad (6)$$

α – odwrotność długości lokalizacji, $n(E_F)$ – gęstość stanów na poziomie Fermiego, k – stała Boltzmanna.

1.4. Wpływ temperatury właściwości dielektryczne materiałów

Podstawową wielkością, która opisuje właściwości dielektryczne materiału jest zespolona przenikalność elektryczna $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, składowa rzeczywista (ϵ') reprezentuje zdolność do gromadzenia energii, składowa urojona (ϵ'') reprezentuje straty energii elektrycznej na ciepło spowodowane polaryzacją relaksacyjną. Całkowita przewodność materiału będzie sumą stało- i zmiennoprądowego mechanizmu przewodnictwa:

$$\sigma(\omega, T) = \sigma_{ac}(\omega, T) + \sigma_{dc}(T) = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''(\omega T) + \sigma_{dc}(T) \quad (7)$$

Parametry materiałowe ε' , ε'' , σ są wielkościami zależnymi od temperatury i częstotliwości. Wpływ temperatury na przenikalność elektryczną ε' i współczynnik stratności ε'' zależy od rodzaju polaryzacji elektronowej, jonowej, dipolowej i relaksacyjnej występującej w materiale.

2. Przebieg ćwiczenia

2.1. Termostolik

Stanowisko wyposażone jest w termostolik dający możliwość zmian temperatury w zakresie $-10^{\circ}\text{C} \div 125^{\circ}\text{C}$. Urządzenie wykorzystuje ogniwo Peltiera sterowane mikroprocesorowym sterownikiem PID. Uwaga: uzyskanie temperatury -10°C może być niemożliwe przy wysokiej temperaturze otoczenia oraz wysokim poziomie wilgotności względnej.

Badany element należy położyć na powierzchni stolika, przykryć materiałem termoizolacyjnym i docisnąć obciążnikiem. W ten sposób zapewnia się dobry kontakt termiczny badanego elementu ze stolikiem oraz zmniejszenie wymiany ciepła z otoczeniem.

Na wyświetlaczu LCD widoczne są:

- temperatura ustawiona
- temperatura stolika
- wskaźnik mocy grzania/chłodzenia.

Nastawę temperatury zmienia się przyciskami „+” i „-”.

2.2. Pomiary

Grupa ćwiczeniowa otrzymuje zestaw próbek dla których przeprowadza pomiary ich rezystancji w funkcji temperatury we wskazanym przez prowadzącego zakresie temperatur. Pomiaru rezystancji dokonuje się multimetrami równocześnie dla wszystkich próbek.

Pomiary należy przeprowadzać zaczawszy od temperatury wysokiej, zmniejszając ją stopniowo. Krok zmian należy dobrać tak, aby otrzymać około $7 \div 10$ pomiarów w zadanym zakresie temperatur. Po zmianie nastawy temperatury należy odczekać na ustabilizowanie się temperatury stolika oraz wyników pomiaru rezystancji. Zapisywać należy rzeczywistą temperaturę, odczytaną z wyświetlacza stolika, ponieważ może ona się różnić od wartości nastawionej.

W wypadku pomiarów elementów o małej rezystancji, rzędu kilku omów, należy uwzględnić rezystancję przewodów pomiarowych. Można ją zmierzyć dołączając w miejsce próbki zwoję.

2.3. Analiza wyników pomiaru

Dla każdej ze zmierzonych próbek należy przeprowadzić następujące operacje:

- Wstępnie rozpoznać charakter zależności $R(T)$ i $G(T)$
- Dla próbek wykonanych z metalu obliczyć TWR na podstawie zależności $R=f(T)$
- Dla próbek wykazujących zależność konduktancji od temperatury typową dla półprzewodników wykreślić wykres Arrheniusa i wyliczyć energie aktywacji.
- Dla pozostałych próbek przedstawić zależność konduktancji w odpowiednim układzie współrzędnych, w którym uzyska się wykres zbliżony do linii prostej.
- Jeśli żadna z powyższych metod nie będzie skuteczna sporządzić wykres $R = f(T)$ (skala liniowa) i, o ile to możliwe, wyznaczyć TWR badanego elementu w zakresie temperatur, w którym na powyższym wykresie widoczny jest odcinek liniowej zależności rezystancji od temperatury.

Do sprawozdania należy dołączać kilka wykresów drukowanych na jednej kartce.