

Materiały Elektroniki i Przetwarzania Energii

Ćwiczenie 6

Badanie przewodnictwa elektrycznego w polach stałych

dr hab. inż. Tomasz Piasecki, prof. uczelni, dr inż. Damian Nowak (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl,
damian.nowak@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Konduktywność metali w funkcji temperatury
2. Co to jest TWR i jak go wyznaczyć?
3. Konduktywność półprzewodnika niedomieszkowanego i domieszkowanego w funkcji temperatury
4. Mechanizmy termicznej generacji nośników w półprzewodnikach niedomieszkowanych i domieszkowanych
5. Zależność ruchliwości nośników od temperatury w półprzewodnikach
6. Rodzaje i parametry termistorów
7. Wykres Arrheniusa - sposób wyznaczania energii aktywacji.

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Przewodnictwo metaliczne	1
1.2	Przewodnictwo w półprzewodnikach	2
1.3	Wykres Arrheniusa	3
2	Przebieg ćwiczenia	4
2.1	Termostolik	4
2.2	Pomiary	4
2.3	Analiza wyników pomiarów	4



Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

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 oraz ładunku pojedynczego nośnika q . Koncentracja określa liczbę nośników w jednostce objętości natomiast ruchliwość jest to prędkość, jaką uzyskuje nośnik ładunku pod działaniem jednostkowego pola elektrycznego.

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

Jeżeli w procesie przewodzenia prądu uczestniczą różne rodzaje nośników podobne równanie można rozpisać dla każdego z nich i dodać je do siebie.

Rozważania opisane dalej pomijają zjawisko nadprzewodnictwa. Przewodność materiałów zależy od temperatury. Wynika to zazwyczaj z tego, że wraz z temperaturą zmienia się ich ruchliwość i/lub koncentracja. Ładunek zazwyczaj pozostaje bez zmian.

Odwrotnością konduktywności jest rezystywność ρ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

Rezystywność oraz konduktywność to tzw. parametry intensywne, niezależące od ilości rozważanej materii. Odnosząc się do kawałka takiej materii o znanym kształcie i rozmieszczeniu elektrod można operować wartościami ekstensywnymi, takimi jak rezystancja R czy konduktancja G , które są proporcjonalne do, odpowiednio, rezystywności i konduktywności. Współczynnik proporcjonalności zależy od geometrii elektrod i przyjmuje się go za stały¹. W celu zrozumienia bardzo dużych różnic w wartościach rezystywności różnych ciał konieczna jest znajomość mikroskopowej budowy substancji przewodzącej prąd elektryczny.

1.1 Przewodnictwo metaliczne

Przewodnikami są ciała, w których istnieją tzw. ładunki swobodne mogące poruszać się wewnątrz tych ciał. Typowymi przedstawicielami przewodników są metale - pierwiastki, których atomy posiadają jeden lub dwa elektrony na zewnętrznych powłokach elektronowych zwanych powłokami walencyjnymi. Elektrony walencyjne uwalniają się od swoich atomów przy łączeniu się takich atomów w większe zespoły i nie zajmują określonych miejsc w sieci krystalicznej, lecz mogą poruszać się swobodnie między zjonizowanymi atomami metalu. W związku z tym, nazywamy je elektronami swobodnymi lub elektronami przewodnictwa. W metalach koncentracja elektronów ma bardzo dużą wartość, rzędu $1 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$, i praktycznie nie zależy od temperatury. O zależności temperaturowej przewodnictwa decyduje zmniejszanie się ruchliwości ze wzrostem temperatury, ponieważ są one wydajniej rozpraszane w wyniku wzrostu amplitudy drgań atomów w sieci krystalicznej. Obserwujemy więc zmniejszanie się przewodnictwa metalu (czyli wzrost jego oporu) wraz ze wzrostem temperatury.

Dla metali w pobliżu temperatury pokojowej zależność rezystywności od temperatury jest w dość dobrym przybliżeniu liniowa i można ją opisać zależnością:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (3)$$

gdzie: ρ_0 to rezystywność w temperaturze odniesienia T_0 , $\Delta T = T - T_0$, a α to temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR). Zazwyczaj za temperaturę odniesienia TWR podawanych w literaturze przyjmuje się 0°C lub 25°C

Zastanów się, jak wyznaczyć TWR elementu metalowego na podstawie parametrów prostej $y = a + bx$ dopasowanej do punktów wykresu $R = f(T)$ tego elementu.

¹Chociaż chcąc dzielić włos na czworo należało by uwzględnić rozszerzalność termiczną. Pomijamy to w ćwiczeniu.

1.2 Przewodnictwo w półprzewodnikach

Na przewodnictwo w półprzewodnikach wpływ ma zarówno zależność koncentracji nośników od temperatury jak i ruchliwości nośników od temperatury.

Ruchliwość nośników w półprzewodnikach

Ruchliwość nośników prądu w półprzewodnikach jest wynikiem kilku mechanizmów rozpraszania nośników. W przedziale temperatur, w którym pracują typowe przyrządy półprzewodnikowe, jest ona potęgową funkcją temperatury $\mu \propto T^p$ z ujemną wartością wykładnika p . Zależność taka jest malejąca, zatem ruchliwość maleje wraz ze wzrostem temperatury.

Koncentracja nośników w półprzewodnikach

W niskich temperaturach elektrony walencyjne w półprzewodnikach nie są elektronami swobodnymi i nie mogą przemieszczać się w kryształ — półprzewodnik jest izolatorem. Oderwanie elektronu walencyjnego od atomu jest możliwe, ale wymaga dostarczenia odpowiedniej ilości energii, nie mniejszej od pewnej minimalnej wartości zwanej **energią aktywacji**. Wówczas uwolniony elektron może brać udział w przewodzeniu prądu. W przewodzeniu prądu w półprzewodniku uczestniczą nie tylko elektrony swobodne. W wyniku oderwania się elektronu od atomu powstaje wolne miejsce, tzw. dziura, która łatwo może być zapełniona przez elektron z sąsiedniego wiązania. W efekcie dziury przemieszczają się w stronę przeciwną do ruchu elektronów, zachowują się więc jak swobodne ładunki dodatnie. W półprzewodnikach nośniki biorące udział w przewodnictwie mogą powstawać na skutek wielu różnych zjawisk.

Podstawowym, występującym w każdym półprzewodniku, jest **termiczna generacja par nośników** elektron - dziura w pasmach, odpowiednio, przewodnictwa i walencyjnym:

$$n \propto e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (4a)$$

$$p \propto e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (4b)$$

gdzie E_g to szerokość przerwy energetycznej pomiędzy krawędziami pasma walencyjnego i przewodnictwa, k to stała Boltzmana a T jest temperaturą w skali bezwzględnej (Kelwina).

Liczbę dziur lub elektronów w półprzewodnikach możemy bardzo łatwo zwiększyć nie tylko przez zmianę warunków zewnętrznych, ale także przez odpowiednie domieszkowanie kryształu. Jeśli wprowadzimy do czterowartościowego półprzewodnika niewielką ilość pierwiastka pięciowartościowego (jak fosfor, antymon), zwiększamy liczbę elektronów swobodnych. Taki półprzewodnik jest półprzewodnikiem typu n, a zjonizowane atomy domieszkowe dostarczające jeden elektron nazywane są donorami. Obecność atomów trójwartościowych (jak bor, aluminium) w germanie lub krzemie powoduje zwiększenie liczby dziur, ponieważ atomy takie mają trzy elektrony walencyjne, które utworzą wiązania tylko z trzema elektronami atomu germanu lub krzemu. Czwarte wiązanie pozostanie niepełne - tworzy dziurę, która może być łatwo zapełniona przez elektron z sąsiedniego atomu Ge lub Si. Taki półprzewodnik jest półprzewodnikiem typu p, a atomy domieszkowe zwiększające liczbę dziur nazywamy akceptorami.

Jonizowanie się domieszek jest drugim ze źródeł nośników w półprzewodniku ale siłą rzeczy ma miejsce tylko w półprzewodnikach domieszkowanych. Domieszki te jonizują się w temperaturach znacznie niższych od wymaganych do zajęcia opisanej powyżej generacji termicznej. Energia potrzebna do ich jonizacji jest mniejsza. Energia ta w modelu pasmowym odpowiada odległości poziomu domieszkowego od krawędzi pasma przewodnictwa E_d dla domieszki donorowej lub poziomu domieszkowego od krawędzi pasma walencyjnego E_a dla domieszki akceptorowej.

Koncentracja nośników pochodzących ze zjonizowanych domieszek n_d i p_a zależy od temperatury w podobny sposób:

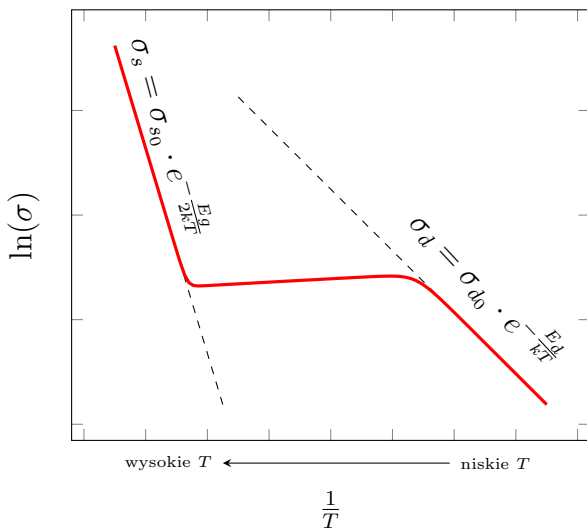
$$n_d \propto e^{-\frac{E_d}{kT}} \quad (5a)$$

$$p_a \propto e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (5b)$$

Dla typowych domieszek stosowanych w technologiach półprzewodnikowych, zwłaszcza przy przyrządach bazujących na złączach p-n, wszystkie domieszki są całkowicie zjonizowane przy temperaturach rzędu 100 - 150 K i dalsze podnoszenie temperatury nie powoduje już dodatkowego generowania nośników w ten sposób.

1.3 Wykres Arrheniusa

Zależności na koncentracje domieszek opisane równaniami (4) i (5) są zależnościami eksponencjalnymi od odwrotności temperatury w skali bezwzględnej. Zależność taka da linię prostą na tzw. wykresie Arrheniusa. Przedstawia on zależność logarytmu wykreślanej na nim wielkości fizycznej od odwrotności temperatury w skali bezwzględnej. Pierwotnie powstał na potrzeby chemii, gdyż podobną zależność od temperatury obserwuje się w równaniu Arrheniusa na stałą szybkości reakcji. Pojęcie to rozszerza się też na inne dziedziny nauki gdyż wiele zjawisk opisywanych jest zależnościami o podobnym charakterze.



Rysunek 1: Zależność przewodności właściwej od odwrotności temperatury dla półprzewodnika typu n.

nej postaci następująco:

$$G(T) = G_0 \cdot e^{-\frac{E}{nkT}} \quad (6)$$

gdzie G_0 jest to wielkość stała cechująca dany materiał i zjawisko, E – energia aktywacji, T – temperatura w kelwinach, k – stała Boltzmanna, n - wartość 1 przy jonizacji domieszek oraz 2 przy generacji termicznej. Logarytmując równanie (6) otrzymujemy:

$$\ln G(T) = \ln G_0 - \frac{E}{nk} \cdot \frac{1}{T} \quad (7)$$

²Zwróć uwagę na kierunek wzrostu temperatury na wykresie Arrheniusa. Przez zastosowanie skali odwrotnej temperatury wyższe są na lewo od niższych i skalę tę trzeba „czytać” od prawej do lewej.

Wykres Arrheniusa, na którym przedstawiono wyniki pomiaru konduktancji próbki półprzewodnika, jest wykresem, na którego osi pionowej Y przedstawiono $Y = \ln G$ lub $Y = \log_{10} G$, a oś X przedstawia $X = \frac{1}{T}$. Linia prosta na tym wykresie ma zatem równanie:

$$Y = \textit{intercept} + \textit{slope} \cdot X \quad (8)$$

gdzie *intercept* i *slope* to nazwy parametrów linii prostej dopasowanej za pomocą programu Origin. Znajdź podobieństwa pomiędzy (7) i (8) i zastanów się, jak wyznaczyć energię aktywacji na podstawie parametrów prostej dopasowanej do prostoliniowych odcinków wykresu Arrheniusa dla obu wspomnianych możliwych reprezentacji osi pionowej.

W sposób ten można określać parametry termistorów półprzewodnikowych, które stosuje się jako czujniki temperatury[2].

2 Przebieg ćwiczenia

2.1 Termostolik

Stanowisko wyposażone jest w termostolik dający możliwość zmian temperatury w zakresie -10°C do 90°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 temperatury, typowo od 80°C do 10°C . Pomiaru rezystancji dokonuje się multimetrami równocześnie dla wszystkich próbek. Pomiary należy przeprowadzać zaczynając od temperatury wysokiej, zmniejszając ją stopniowo. Krok zmian należy dobrać tak, aby otrzymać około co najmniej 10 pomiarów w zadanym zakresie temperatury. 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 zworę.

2.3 Analiza wyników pomiarów

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 $R=f(T)$ przyjmując za temperaturę odniesienia wartość 0°C .

- Dla próbek wykazujących zależność konduktancji od temperatury typową dla półprzewodników wykreślić wykres Arrheniusa i wyliczyć energię aktywacji. Zastanów się, czy jest to energia aktywacji domieszki czy szerokość przerwy zabronionej.
- 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.

Literatura

- [1] Wiesław Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”
- [2] Wikipedia: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Termistor>