

Ćwiczenie 122

Przerwa energetyczna w germanie

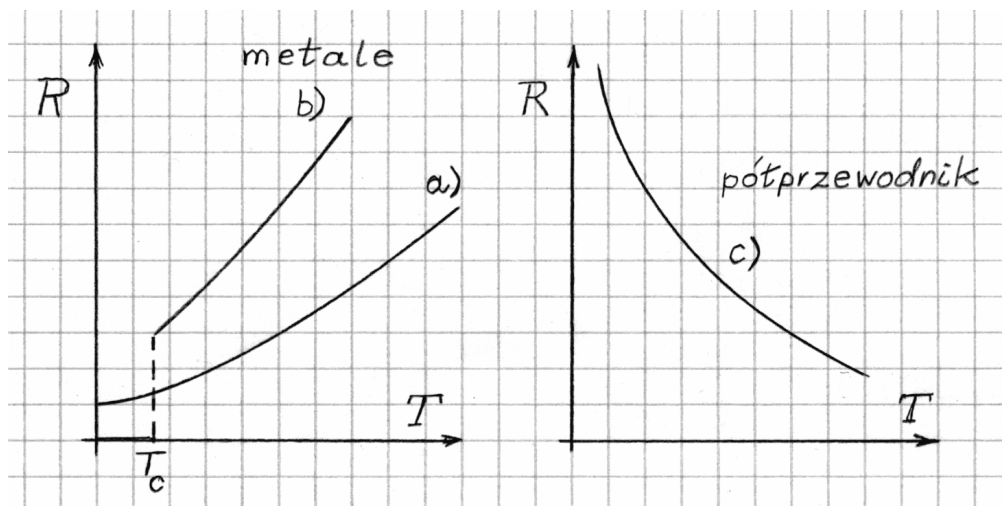
Cel ćwiczenia

Wyznaczenie szerokości przerwy energetycznej przez pomiar zależności oporu monokryształu germanu od temperatury.

Wprowadzenie

Eksperymentalne badania przewodnictwa elektrycznego ciał stałych były podstawą do podziału ciał stałych na metale, półprzewodniki i izolatory. Metalami nazwano substancje dobrze przewodzące prąd, izolatorami - materiały prawie nie przewodzące prądu, a do nieprecyzyjnie sprecyzowanej kategorii *półprzewodników* zaliczono ciała stałe o pośredniej wartości oporu właściwego. Współcześnie, jednoznacznego kryterium odróżniającym półprzewodniki od metali dostarcza pomiar oporu w funkcji temperatury malejącej do wartości bliskich zera bezwzględnego (rys. 1). Opór zwykłych metali maleje i dla $T \rightarrow 0$ K dąży do skończonej wartości nazwanej oporem resztkowym (ćw. 121). W przypadku metali nadprzewodzących następuje całkowity zanik oporu poniżej temperatury krytycznej T_c . Opór półprzewodników rośnie i w granicy $T \rightarrow 0$ K dąży do nieskończoności, zatem w zerze bezwzględnym półprzewodnik nie przewodzi prądu.

Przy wykorzystaniu efektu Halla można oszacować koncentrację nośników prądu w zadanej temperaturze. Okazuje się ona być o rzędy wielkości mniejsza niż dla metali i będąca rosnącą funkcją temperatury.



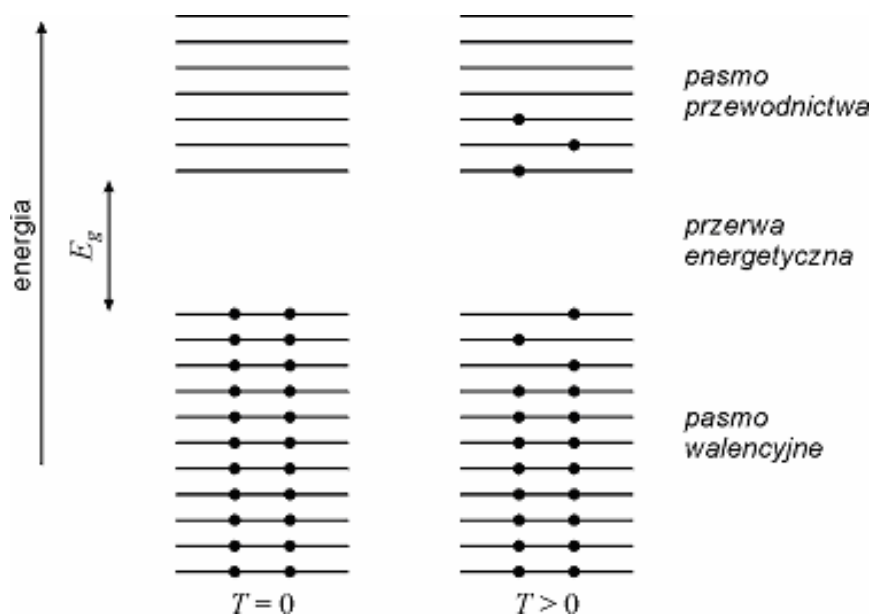
Rys. 1. Zależność oporu elektrycznego od temperatury dla: a) metalu normalnego, b) metalu wykazującego zjawisko nadprzewodnictwa, c) półprzewodnika.

Opisany wyżej zachowanie tak metali jak i półprzewodników tłumaczy pasmowa teoria własności elektronowych ciał stałych. Podstawą teorii jest zastosowanie praw mechaniki kwantowej (równanie Schrödingera i zakaz Pauliego) do elektronów poruszających się w zbiorze atomów ułożonych w kryształ. Od sformułowania modelu Bohra wiadomo, że w przypadku pojedynczych atomów mamy dyskretne *poziomy* energetyczne określające dopuszczalne wartości energii elektronu. Nazwa „teoria pasmowa” wynika stąd, że w ciele stałym jest inaczej – dopuszczalne wartości energii elektronów walencyjnych tworzą kwaziaciągłe *pasma* o określonej szerokości. Pasma złożone są z wielkiej ilości bardzo blisko siebie położonych poziomów¹.

Wykres pasmowy półprzewodnika (rys. 2) charakteryzuje obecność *przerwy energetycznej*, to znaczy przedziału energii, którego nie mogą zajmować elektrony. Przerwa energetyczna oddziela *pasmo walencyjne*, które w niskich temperaturach jest całkowicie wypełnione przez elektrony, od pustego *pasma przewodnictwa*. Szerokość przerwy energetycznej oznaczamy symbolem E_g (od ang. *gap* – przerwa).

W temperaturze zera bezwzględnej półprzewodnik nie przewodzi prądu gdyż:

- (a) w paśmie przewodnictwa nie ma elektronów,
- (b) elektrony pasma walencyjnego nie tworzą wypadkowego prądu dlatego, że każdemu elektronowi o danej prędkości towarzyszy drugi elektron poruszający się dokładnie przeciwnie i w efekcie wypadkowy prąd jest równy zeru.



Rys. 2. Schemat energetyczny półprzewodnika i jego obsadzenie przez elektrony w zerze bezwzględnym ($T = 0$) oraz w skończonej temperaturze ($T > 0$).

¹ Przykładowo, pasmo walencyjne germanu musi pomieścić wszystkie elektrony walencyjne, których liczba, dla próbki o objętości 1 cm^3 , jest iloczynem liczby atomów (dla Ge $4,4 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) \times 4 elektrony walencyjne na atom. Taka liczba poziomów wypełnia szerokość pasma walencyjnego (dla Ge 12 eV). Pasma przewodnictwa nie ma górnego kresu.

Koncentracja nośników prądu w półprzewodniku samoistnym

W półprzewodnikach szerokość przerwy energetycznej jest na tyle mała (rzędu 1 eV, patrz tabela 1), że pod wpływem temperatury część elektronów „przeskakuje” z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Stają się tam elektronami swobodnymi. Pozostałe po elektronie puste miejsce w paśmie walencyjnym, nazwane krótko *dziurą*, zachowuje się jak cząstka o ładunku dodatnim. Dziury, na równi z elektronami swobodnymi, są nośnikami prądu. Z przedstawionego opisu wynika, że w półprzewodniku samoistnym (bez domieszek innych pierwiastków) liczba elektronów jest równa liczbie dziur.

Tabela 1. Wartości przerwy energetycznej, koncentracji samoistnej, stałej A oraz ruchliwości elektronów i dziur w wybranych półprzewodnikach ($T = 300$ K). Dane z podręcznika [3].

Półprzewodnik	E_g [eV]	n [$1/\text{cm}^3$]	A [$\text{K}^{-3}\text{cm}^{-3}$]	μ_n [cm^2/Vs]	μ_p [cm^2/Vs]
Ge	0,67	$2,4 \cdot 10^{13}$	$2,3 \cdot 10^{30}$	3900	1900
Si	1,12	$1,4 \cdot 10^{10}$	$10,8 \cdot 10^{30}$	1350	480
GaAs	1,424	$2 \cdot 10^6$	$0,12 \cdot 10^{30}$	8500	450

Przez *koncentrację* elektronów n oraz dziur p rozumiemy ich liczbę w jednostce objętości. (Symbole p i n pochodzą od ang. nazw znaku ładunku nośników, *positive* i *negative*.) W podręcznikach fizyki ciała stałego [1], [2] wyprowadza się, że iloczyn np dla półprzewodnika o temperaturze T wynosi

$$np = AT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right), \quad (1a)$$

gdzie k_B oznacza stałą Boltzmanna, A – stałą charakterystyczną dla danego półprzewodnika (podana w tab. 1). Wzór (1a) jest słuszny tak dla półprzewodnika samoistnego (bez domieszek) jak i domieszkowanego.

Dla półprzewodnika samoistnego mamy $n = p$. Obliczenie pierwiastka z (1a) daje

$$n = p = \sqrt{A} T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right). \quad (1b)$$

Przepływ prądu w półprzewodniku i jego przewodność właściwa.

Przyłożone do półprzewodnika pole elektryczne \mathbf{E} wytwarza uporządkowany ruch nośników, czyli prąd elektryczny. Średnia prędkość nośników, zwana prędkością dryfu \mathbf{v} , jest proporcjonalna do przyłożonego pola.

$$\mathbf{v} = \mu \mathbf{E}. \quad (2)$$

Współczynnik proporcjonalności μ nosi nazwę *ruchliwości*. Wartości ruchliwości elektronów μ_n i dziur μ_p w kilku półprzewodnikach w temperaturze pokojowej podaje tabela 1.

Przepływ prądu w półprzewodniku i w efekcie jego przewodność właściwa zależy zarówno od tego ile jest nośników (koncentracja) jak i od tego, jak szybko płyną w przyłożonym polu (ruchliwość). Wzór na przewodność właściwą półprzewodnika

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (3)$$

zawiera dwa składniki pochodzące odpowiednio od ruchu elektronów i dziur. Odpowiednie ruchliwości oznaczane są przez μ_n i μ_p , symbol e oznacza ładunek elementarny.

Przewodność właściwa zmienia się z temperaturą zarówno na skutek wzrostu liczby nośników prądu jak i zmiany ich ruchliwości. Ruchliwość nośników w półprzewodnikach maleje ze wzrostem temperatury w wyniku oddziaływania z drganiami termicznymi atomów (podobnie jak w metalach, patrz ćw. 121). Zależność ruchliwości elektronów i dziur półprzewodnika od temperatury opisuje przybliżona zależność

$$\mu \propto T^{-\frac{3}{2}}. \quad (4)$$

Spadek ruchliwości opisany wzorem (4) prawie całkowicie kompensuje czynnik $T^{3/2}$ we wzorze (1b) i w rezultacie temperaturowa zależność przewodności właściwej jest opisana przez czynnik wykładniczy wzoru (1b),

$$\sigma \propto \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right). \quad (5)$$

Opór właściwy ρ jest odwrotnością przewodności właściwej, zatem

$$\rho \propto \exp\left(\frac{E_g}{2k_B T}\right). \quad (6)$$

Wyznaczenie E_g na podstawie pomiaru zależności oporu półprzewodnika od temperatury.

W celu wyznaczenia szerokości przerwy energetycznej mierzymy opór R próbki półprzewodnika w funkcji temperatury T . Opór R jednorodnej próbki półprzewodnika o dowolnym kształcie jest proporcjonalny do oporu właściwego (6), zatem

$$R = B \exp\left(\frac{E_g}{2k_B T}\right), \quad (7)$$

gdzie B jest pewną stałą. Logarytmując obustronnie ten wzór otrzymujemy

$$\ln R = \ln B + \frac{E_g}{2k_B} \frac{1}{T}. \quad (8)$$

Zatem wykres $\ln R$ w funkcji $1/T$ winien przedstawiać prostą o współczynniku nachylenia

$$a = \frac{E_g}{2k_B}. \quad (9)$$

Na podstawie wartości a i niepewności $u(a)$ prostej dopasowanej do zbioru punktów eksperymentalnych $\{1/T_i, \ln R_i\}$ otrzymujemy wartość i niepewność E_g .

Opisana metoda wyznaczania szerokości przerwy energetycznej wymaga pomiaru $R(T)$ w zakresie temperatur, w którym koncentracja nośników jest stosunkowo duża. Dla germanu jest to zakres od temperatury pokojowej w górę. W przypadku krzemu analogiczny pomiar należy wykonać w temperaturach powyżej 100°C .

Prawie wszystkie zastosowania półprzewodników w elektronice wiążą się z ich domieszkowaniem (ćwiczenie 123). Jednym z nielicznych zastosowań półprzewodników samoistnych jest *termistor* – element elektroniczny o oporze silnie zależnym od temperatury. Termistor jest elementem tanim i bardziej czułym na wpływ temperatury, niż np. opornik Pt (ćw. 121). Wykorzystując wzór (7) obliczyć można, że wzrost temperatury od 20°C do 21°C powoduje zmniejszenie oporu germanu o 4,3%, podczas gdy opornik Pt w tym samym przedziale temperatury powiększa swój opór o 0,35%. Czułość termistora jest zatem o ponad rząd wielkości większa. Termistory stosowane są najpowszechniej w niektórych układach elektronicznych do kompensacji wpływu temperatury oraz jako sensory w termometrach cyfrowych codziennego użytku i czujnikach temperatury.

Literatura

- [1] C. Kittel, *Fizyka ciała stałego*. Warszawa, PWN 1998
- [2] H. Ibach, H. Lüth, *Fizyka ciała stałego*. Warszawa, PWN 1996
- [3] A. Bar-Lev, *Semiconductors and electronic devices*, Prentice Hall 1984