

20. Półprzewodniki: gęstość nośników, prawo działania mas, potencjał chemiczny.

Półprzewodnik jest to izolator, w którym w stanie równowagi termicznej część nośników ładunku uzyskuje swobodę ruchu.

W temperaturze zera bezwzględne czyste i doskonałe kryształy większości półprzewodników byłyby izolatorami. Charakterystyczne właściwości półprzewodnikowe wywołane są zazwyczaj przez: termiczne wzbudzenie, obce domieszki, defekty sieci. Półprzewodnikami nazywamy w praktyce przewodniki elektronowe, których wartość oporu elektrycznego w temperaturze pokojowej zawarta jest w granicach od $\sim 10^{-2}$ do $\sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, tj. zawiera się pomiędzy wartościami oporu dobrych przewodników ($\sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) a izolatorów (10^{14} do $10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$). Opór elektryczny półprzewodników jest zazwyczaj zależy od temperatury. Do przyrządów, których działanie jest oparte na właściwościach półprzewodników, zalicza się tranzystory, prostowniki, modulatory, detektory, termistory i fotokomórki.

W idealnym dielektryku albo wszystkie stany są zajęte albo wszystkie są puste (w $T=0$ K). Ze wzrostem temperatury istnieje niezerowe prawdopodobieństwo przejścia elektronu do pasma przewodnictwa. Przewodzenie jest elektronowe a także dziurowe (jeśli wypadnie elektron, to powstanie dziura, która rozluźnia pasmo i elektrony mogą poruszać się w obrębie pasma).

Półprzewodniki: Si ($E_g = 1,12$ eV), Ge ($E_g = 0,67$ eV) w $T=300$ K

Gęstość (koncentracja) nośników

Elektrony w paśmie przewodnictwa (E_c - dno pasma przewodnictwa):

$$n_c(T) = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) \cdot \frac{dE}{e^{\beta(E-\mu)} + 1}$$

Dziury w paśmie walencyjnym (E_v - szczyt pasma walencyjnego):

$$p_v(T) = \int_{-\infty}^{E_v} g_v(E) \cdot \underbrace{\left[1 - \frac{1}{e^{\beta(E-\mu)} + 1} \right]}_{\text{ubytek elektronów}} dE = \int_{-\infty}^{E_v} g_v(E) \cdot \frac{1}{e^{\beta(\mu-E)} + 1} dE$$

Potencjał chemiczny jest bardzo czuły na domieszki. Zrobimy prostszy układ - półprzewodniki samoistne, bez domieszek, które w $T=0$ K są idealnymi izolatorami.

Przybliżenia: półprzewodniki samoistne i niezwyrodniałe, tj.:

$$\begin{aligned} E_c - \mu &\gg k_B T \\ \mu - E_v &\gg k_B T \end{aligned}$$

poziom μ jest daleko od poziomów E_c i E_v (w sensie energii termicznej)

$$\frac{1}{e^{\beta(E-\mu)} + 1} \approx e^{-\beta(E-\mu)} \quad \text{dla } E > E_c$$

$$\frac{1}{e^{\beta(\mu-E)} + 1} \approx e^{-\beta(\mu-E)} \quad \text{dla } E < E_v$$

$$n_c(T) = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) e^{-\beta(E-\mu)} dE = e^{-\beta(E_c-\mu)} \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) e^{-\beta(E-E_c)} dE$$

przyjmujemy
$$N_c = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) e^{-\beta(E-E_c)} dE$$

(nie zależy od domieszek)

$$P_v = \int_{E_c}^{\infty} g_v(E) e^{-\beta(E_v-E)} dE$$

koncentracje nośników:
$$n_c(T) = N_c(T) e^{-\beta(E_c-\mu)}$$

$$p_v(T) = P_v(T) e^{-\beta(\mu-E_v)}$$

Policzmy g_c , g_v , P_v , N_v :

$$p_v(T) = P_v(T) e^{-\beta(\mu-E_v)}$$

$$g_v(E) \propto \sqrt{E_v - E}$$

$$g_c(E) \propto \sqrt{E - E_c}$$

Po prostym całkowaniu otrzymujemy:

$$N_c(T) = 2,5 \left(\frac{m_c}{m} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300\text{K}} \right) 10^{19} / \text{cm}^3$$

$$P_v(T) = 2,5 \left(\frac{m_v}{m} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300\text{K}} \right) 10^{19} / \text{cm}^3$$

gdzie m_c^3, m_v^3 - iloczyny wartości głównych tensora masy efektywnej.

Prawo działania mas.

W iloczynie: $n_c \cdot p_v$ zredukuje się potencjał chemiczny.

$$n_c \cdot p_v = N_c \cdot P_v \cdot e^{-(E_c - E_v)\beta} \quad \text{gdzie } E_c - E_v = E_g \text{ - przerwa energetyczna}$$

$$n_c \cdot p_v = N_c \cdot P_v \cdot e^{-E_g\beta}$$

dla półprzewodników samoistnych: $n_c(T) = p_v(T) = n_i(T)$, co prowadzi do układu równań:

$$\begin{cases} n_i(T) = \sqrt{N_c(T) \cdot P_v(T)} e^{-\beta E_g / 2} \\ n_i(T) = n_c = N_c(T) e^{-\beta (E_c - \mu)} \\ n_i(T) = p_v = P_v(T) e^{-\beta (\mu - E_v)} \end{cases}$$

jedyne rozwiązanie:

$$\mu = E_v + \frac{1}{2} E_g + \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{P_v}{N_c}$$

Jeżeli $T=0K$:

$$\mu(0) = E_F = E_v + \frac{1}{2} E_g$$

czyli energia Fermiego jest dokładnie w połowie przerwy energetycznej.

