

KLASYFIKACJA MATERIAŁÓW

1. Klasyfikacja materiałów według przewodnictwa elektrycznego

Rozważamy własności makroskopowe materiałów:
przewodnictwo i oporność elektryczną.

Przypomnienie:

Przypomnienie:
prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Przypomnienie:
prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

opór elektryczny

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (2)$$

Przypomnienie:
prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

opór elektryczny

$$R = \varrho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (2)$$

przewodnictwo właściwe

$$\sigma = \frac{1}{\varrho} \quad (3)$$

Przypomnienie:
prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

opór elektryczny

$$R = \varrho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (2)$$

przewodnictwo właściwe

$$\sigma = \frac{1}{\varrho} \quad (3)$$

różniczkowe prawo Ohma

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

Przypomnienie:
prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

opór elektryczny

$$R = \varrho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (2)$$

przewodnictwo właściwe

$$\sigma = \frac{1}{\varrho} \quad (3)$$

różniczkowe prawo Ohma

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

wymiar $[\sigma] = (\Omega\text{m})^{-1}$

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

$$\sigma \geq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

$$\sigma \geq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(2) półprzewodniki:

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

$$\sigma \geq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(2) półprzewodniki:

$$\sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1} \leq \sigma \leq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

$$\sigma \geq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(2) półprzewodniki:

$$\sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1} \leq \sigma \leq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(3) izolatory (dielektryki):

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

$$\sigma \geq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(2) półprzewodniki:

$$\sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1} \leq \sigma \leq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(3) izolatory (dielektryki):

$$\sigma \leq \sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1}$$

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

$$\sigma \geq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(2) półprzewodniki:

$$\sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1} \leq \sigma \leq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(3) izolatory (dielektryki):

$$\sigma \leq \sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1}$$

Zauważmy bardzo szeroki zakres zmian przewodnictwa właściwego półprzewodników:

Zakresy wartości przewodnictwa właściwego

(w temperaturze pokojowej, czyli $T = 300\text{K}$)

(1) metale:

$$\sigma \geq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(2) półprzewodniki:

$$\sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1} \leq \sigma \leq \sim 10^6 (\Omega\text{m})^{-1}$$

(3) izolatory (dielektryki):

$$\sigma \leq \sim 10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1}$$

Zauważmy bardzo szeroki zakres zmian przewodnictwa właściwego półprzewodników:

σ zmienia się o **14 rzędów wielkości**.

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

$$\varrho(T) = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)] , \quad (5)$$

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

$$\varrho(T) = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)] , \quad (5)$$

$\varrho_0 = \varrho(T_0)$ = opór właściwy metalu w temperaturze T_0 (na ogół przyjmuje się $T_0 = 290 - 300$ K)

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

$$\varrho(T) = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)] , \quad (5)$$

$\varrho_0 = \varrho(T_0)$ = opór właściwy metalu w temperaturze T_0 (na ogół przyjmuje się $T_0 = 290 - 300$ K)

α = temperaturowy współczynnik oporu ($\alpha > 0$)

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

$$\varrho(T) = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)] , \quad (5)$$

$\varrho_0 = \varrho(T_0)$ = opór właściwy metalu w temperaturze T_0 (na ogół przyjmuje się $T_0 = 290 - 300$ K)

α = temperaturowy współczynnik oporu ($\alpha > 0$)

zwykle $\alpha \simeq (1/273)\text{K}^{-1}$.

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

$$\varrho(T) = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)] , \quad (5)$$

$\varrho_0 = \varrho(T_0)$ = opór właściwy metalu w temperaturze T_0 (na ogół przyjmuje się $T_0 = 290 - 300$ K)

α = temperaturowy współczynnik oporu ($\alpha > 0$)

zwykle $\alpha \simeq (1/273)\text{K}^{-1}$.

Główny wkład do oporu metalu pochodzi od rozpraszania elektronów na drgających jonach sieci krystalicznej.

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

$$\varrho(T) = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)] , \quad (5)$$

$\varrho_0 = \varrho(T_0)$ = opór właściwy metalu w temperaturze T_0 (na ogół przyjmuje się $T_0 = 290 - 300$ K)

α = temperaturowy współczynnik oporu ($\alpha > 0$)

zwykle $\alpha \simeq (1/273)\text{K}^{-1}$.

Główny wkład do oporu metalu pochodzi od rozpraszania elektronów na drgających jonach sieci krystalicznej. A zatem:

Zależność temperaturowa oporu właściwego metali

$$\varrho(T) = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)] , \quad (5)$$

$\varrho_0 = \varrho(T_0)$ = opór właściwy metalu w temperaturze T_0 (na ogół przyjmuje się $T_0 = 290 - 300$ K)

α = temperaturowy współczynnik oporu ($\alpha > 0$)

zwykle $\alpha \simeq (1/273)\text{K}^{-1}$.

Główny wkład do oporu metalu pochodzi od rozpraszania elektronów na drgających jonach sieci krystalicznej. A zatem:

Przyczyną liniowego wzrostu oporu właściwego metalu z temperaturą jest liniowy wzrost amplitudy drgań jonów wokół położenia równowagi.

Zależność temperaturowa oporu właściwego półprzewodników

Zależność temperaturowa oporu właściwego półprzewodników

Opór właściwy

$$\varrho(T) = \varrho_0 \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (6)$$

Zależność temperaturowa oporu właściwego półprzewodników

Opór właściwy

$$\varrho(T) = \varrho_0 \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (6)$$

$A > 0$.

Zależność temperaturowa oporu właściwego półprzewodników

Opór właściwy

$$\varrho(T) = \varrho_0 \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (6)$$

$A > 0$.

Przewodnictwo właściwe

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{A}{T}\right) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (7)$$

Zależność temperaturowa oporu właściwego półprzewodników

Opór właściwy

$$\varrho(T) = \varrho_0 \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (6)$$

$A > 0$.

Przewodnictwo właściwe

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{A}{T}\right) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (7)$$

gdzie $A = E_a/k_B$, E_a = energia aktywacji.

Energia aktywacji

Energia aktywacji

$$E_a = \begin{cases} E_g & \text{dla półprzewodników samoistnych} \\ E_c^{min} - E_D & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } n \\ E_A - E_v^{max} & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } p \end{cases}$$

Energia aktywacji

$$E_a = \begin{cases} E_g & \text{dla półprzewodników samoistnych} \\ E_c^{min} - E_D & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } n \\ E_A - E_v^{max} & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } p \end{cases}$$

E_D = energia poziomu donorowego, E_A = energia poziomu akceptorowego

Energia aktywacji

$$E_a = \begin{cases} E_g & \text{dla półprzewodników samoistnych} \\ E_c^{min} - E_D & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } n \\ E_A - E_v^{max} & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } p \end{cases}$$

E_D = energia poziomu donorowego, E_A = energia poziomu akceptorowego

Przyczyną wykładniczego wzrostu przewodnictwa właściwego półprzewodnika z temperaturą jest wzrost liczby nośników w pasmie zgodny z rozkładem Boltzmanna

Energia aktywacji

$$E_a = \begin{cases} E_g & \text{dla półprzewodników samoistnych} \\ E_c^{min} - E_D & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } n \\ E_A - E_v^{max} & \text{dla półprzewodników domieszkowanych} \\ & \text{typu } p \end{cases}$$

E_D = energia poziomu donorowego, E_A = energia poziomu akceptorowego

Przyczyną wykładniczego wzrostu przewodnictwa właściwego półprzewodnika z temperaturą jest wzrost liczby nośników w pasmie zgodny z rozkładem Boltzmanna

$$N(E) \sim \exp(-E_a/(k_B T)) . \quad (8)$$

Uwaga

Powyższe zależności nie odnoszą się do bardzo niskich temperatur.

Uwaga

Powyższe zależności nie odnoszą się do bardzo niskich temperatur.

W granicy $T \rightarrow 0$ zachodzą własności:

Uwaga

Powyższe zależności nie odnoszą się do bardzo niskich temperatur.

W granicy $T \rightarrow 0$ zachodzą własności:
dla półprzewodników

Uwaga

Powyższe zależności nie odnoszą się do bardzo niskich temperatur.

W granicy $T \rightarrow 0$ zachodzą własności:

dla półprzewodników

$$\varrho_0^{\text{samolist}} \rightarrow 0,$$

Uwaga

Powyższe zależności nie odnoszą się do bardzo niskich temperatur.

W granicy $T \rightarrow 0$ zachodzą własności:

dla półprzewodników

$$\varrho_0^{\text{samoiśt}} \rightarrow 0,$$

$$\varrho_0^{\text{domieszek}} > 0,$$

Uwaga

Powyższe zależności nie odnoszą się do bardzo niskich temperatur.

W granicy $T \rightarrow 0$ zachodzą własności:

dla półprzewodników

$$\rho_0^{samoist} \rightarrow 0,$$

$$\rho_0^{domieszk} > 0,$$

natomiast dla metali idealnych (bez defektów sieci)

$$\rho_0^{metal} = 0.$$

2. Klasyfikacja materiałów według wartości przerwy energetycznej

W tej klasyfikacji opieramy się na mikroskopowych własnościach materiałów i korzystamy z różnic ich elektronowej struktury pasmowej.

Struktura pasmowa w skrócie

Struktura pasmowa w skrócie

Stany elektronów walencyjnych w atomach tworzą w kryształach **elektronowe pasmo walencyjne**.

Struktura pasmowa w skrócie

Stany elektronów walencyjnych w atomach tworzą w kryształach **elektronowe pasmo walencyjne**. Kolejne wzbudzone stany atomowe (nie obsadzone w atomie w stanie podstawowym) tworzą w kryształach kolejne **pasma przewodnictwa**.

Struktura pasmowa w skrócie

Stany elektronów walencyjnych w atomach tworzą w kryształach **elektronowe pasmo walencyjne**. Kolejne wzbudzone stany atomowe (nie obsadzone w atomie w stanie podstawowym) tworzą w kryształach kolejne **pasma przewodnictwa**.

Rozważamy pasmo walencyjne o najwyższej energii równej E_v^{max} i pasmo przewodnictwa o najniższej energii E_c^{min} .

Struktura pasmowa w skrócie

Stany elektronów walencyjnych w atomach tworzą w kryształach **elektronowe pasmo walencyjne**. Kolejne wzbudzone stany atomowe (nie obsadzone w atomie w stanie podstawowym) tworzą w kryształach kolejne **pasma przewodnictwa**.

Rozważamy pasmo walencyjne o najwyższej energii równej E_v^{max} i pasmo przewodnictwa o najniższej energii E_c^{min} .

Definiujemy **przerwę energetyczną**, która określa szerokość pasma energii wzbronionych, jako

Struktura pasmowa w skrócie

Stany elektronów walencyjnych w atomach tworzą w kryształach **elektronowe pasmo walencyjne**. Kolejne wzbudzone stany atomowe (nie obsadzone w atomie w stanie podstawowym) tworzą w kryształach kolejne **pasma przewodnictwa**.

Rozważamy pasmo walencyjne o najwyższej energii równej E_v^{max} i pasmo przewodnictwa o najniższej energii E_c^{min} .

Definiujemy **przerwę energetyczną**, która określa szerokość pasma energii wzbronionych, jako

$$E_g = E_c^{min} - E_v^{max} . \quad (9)$$

Struktura pasmowa w skrócie

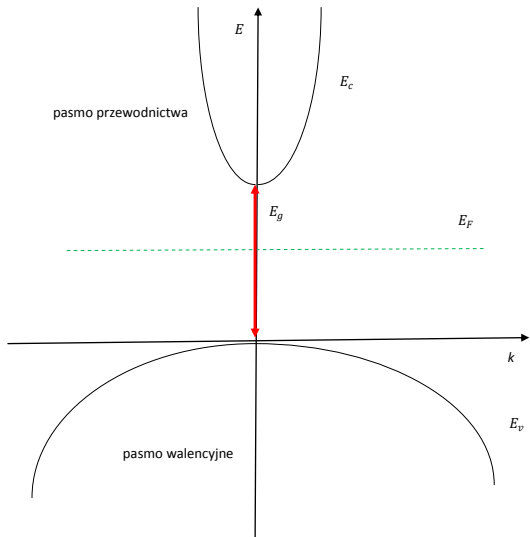
Stany elektronów walencyjnych w atomach tworzą w kryształach **elektronowe pasmo walencyjne**. Kolejne wzbudzone stany atomowe (nie obsadzone w atomie w stanie podstawowym) tworzą w kryształach kolejne **pasma przewodnictwa**.

Rozważamy pasmo walencyjne o najwyższej energii równej E_v^{max} i pasmo przewodnictwa o najniższej energii E_c^{min} .

Definiujemy **przerwę energetyczną**, która określa szerokość pasma energii wzbronionych, jako

$$E_g = E_c^{min} - E_v^{max} . \quad (9)$$

Wprowadzamy ponadto **energię Fermiego** E_F , która jest definiowana jako maksymalna energia stanu jednoelektronowego osadzonego przez elektron w temperaturze $T = 0$.



Klasyfikacja materiałów według wartości przerwy energetycznej

Klasyfikacja materiałów według wartości przerwy energetycznej

(1) metale

Klasyfikacja materiałów według wartości przerwy energetycznej

(1) metale

$E_g < 0$, $E_F \in$ pasma przewodnictwa

Klasyfikacja materiałów według wartości przerwy energetycznej

(1) metale

$E_g < 0$, $E_F \in$ pasma przewodnictwa

(2) półprzewodniki

$0 \leq E_g \leq \sim 3$ eV, $E_v^{max} < E_F < E_c^{min}$

Klasyfikacja materiałów według wartości przerwy energetycznej

(1) metale

$E_g < 0$, $E_F \in$ pasma przewodnictwa

(2) półprzewodniki

$0 \leq E_g \leq \sim 3$ eV, $E_v^{max} < E_F < E_c^{min}$

(3) dielektryki

$E_g > 3$ eV, $E_v^{max} < E_F < E_c^{min}$

Dla porównania:

Dla porównania:
zakres promieniowania widzialnego

Dla porównania:
zakres promieniowania widzialnego

$$1.5 \text{ eV} \leq h\nu_{\text{widzialne}} \leq 3 \text{ eV} \quad (10)$$

Dla porównania:
zakres promieniowania widzialnego

$$1.5 \text{ eV} \leq h\nu_{\text{widzialne}} \leq 3 \text{ eV} \quad (10)$$

Umowna granica ($E_g \simeq 3 \text{ eV}$) pomiędzy półprzewodnikami i dielektrykami oznacza, że półprzewodniki są nieprzezroczyste dla promieniowania nadfioletowego, a dielektryki stają się przezroczyste dla tego promieniowania.

Przykładowe wartości przerwy energetycznej
w $T = 300 \text{ K}$ dla półprzewodników i dielektryków

Przykładowe wartości przerwy energetycznej
w $T = 300$ K dla półprzewodników i dielektryków

| materiał | E_g [eV] |
|----------|------------|
| Ge | 0.7 |
| Si | 1.1 |
| GaAs | 1.4 |
| AlAs | 2.1 |
| CdS | 2.6 |
| ZnSe | 2.8 |
| GaN | 3.5 |
| AgBr | 2.68 |
| AgCl | 3.35 |
| NaCl | 8.5 |
| KCl | 8.5 |
| LiF | 11.0 |

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

- ▶ **zachowanie nieomowe**, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

- ▶ **zachowanie nieomowe**, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma

$$R \neq \frac{U}{I},$$

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

- ▶ **zachowanie nieomowe**, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma

$$R \neq \frac{U}{I},$$

natomiast

$$R = f(U, I, T, \dots)$$

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

- ▶ **zachowanie nieomowe**, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma

$$R \neq \frac{U}{I},$$

natomiast

$$R = f(U, I, T, \dots)$$

- ▶ **silny wpływ domieszek na własności elektryczne**

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

- ▶ **zachowanie nieomowe**, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma

$$R \neq \frac{U}{I},$$

natomiast

$$R = f(U, I, T, \dots)$$

- ▶ **silny wpływ domieszek na własności elektryczne**
- ▶ nośniki prądu posiadają zarówno **ładunek ujemny (elektrony)** jak i **dodatni (dziury)**

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

- ▶ **zachowanie nieomowe**, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma

$$R \neq \frac{U}{I},$$

natomiast

$$R = f(U, I, T, \dots)$$

- ▶ **silny wpływ domieszek na własności elektryczne**
- ▶ nośniki prądu posiadają zarówno **ładunek ujemny (elektrony) jak i dodatni (dziury)**
- ▶ duża siła termoelektryczna

Inne charakterystyczne własności półprzewodników

- ▶ **zachowanie nieomowe**, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma

$$R \neq \frac{U}{I},$$

natomiast

$$R = f(U, I, T, \dots)$$

- ▶ **silny wpływ domieszek na własności elektryczne**
- ▶ nośniki prądu posiadają zarówno **ładunek ujemny (elektrony) jak i dodatni (dziury)**
- ▶ duża siła termoelektryczna
- ▶ czułość na światło: powstawanie napięcia oraz zmiana oporu pod wpływem światła

Fundamentalne własności półprzewodników można podsumować następująco:

Fundamentalne własności półprzewodników można podsumować następująco:

półprzewodnik **w stanie podstawowym**, w którym posiada zapełnione pasmo walencyjne i puste pasmo przewodnictwa, zachowuje się jak **izolator**,

Fundamentalne własności półprzewodników można podsumować następująco:

półprzewodnik **w stanie podstawowym**, w którym posiada zapełnione pasmo walencyjne i puste pasmo przewodnictwa, zachowuje się jak **izolator**, natomiast półprzewodnik **w stanie wzbudzonym**, który posiada nośniki ładunku w pasmach, np. wskutek absorpcji promieniowania widzialnego, zachowuje się jak **metal**.