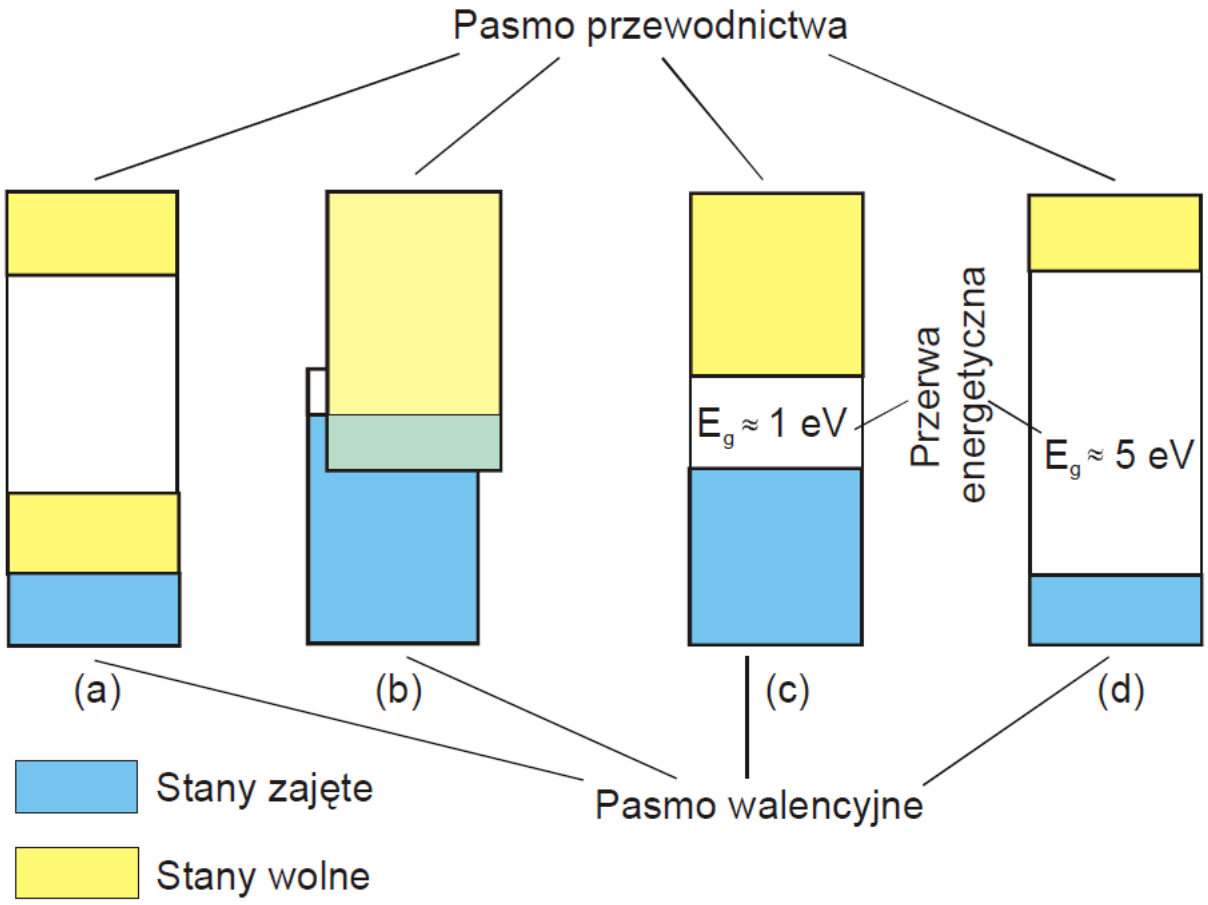
# Wykład Va

# Koncentracja elektronów i dziur w półprzewodnikach

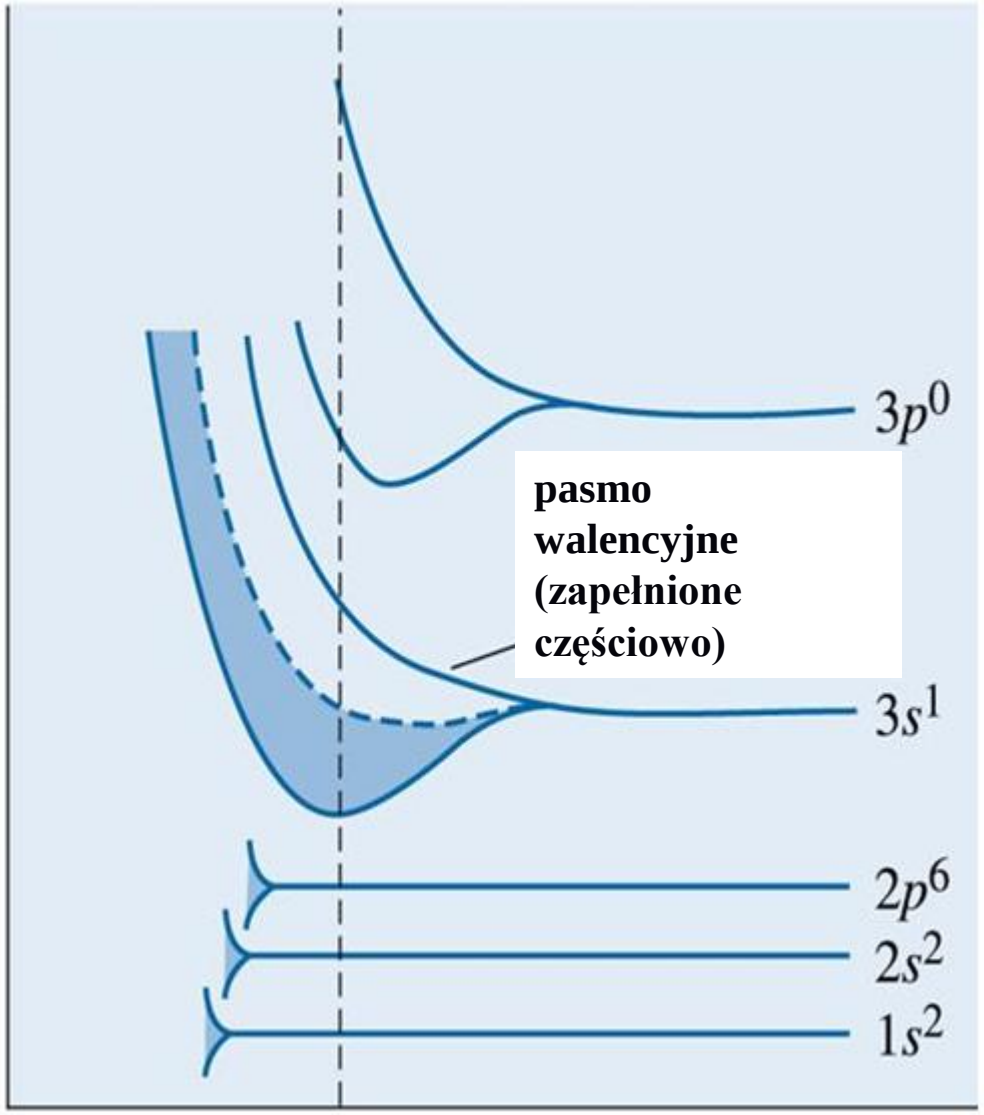
# Metale, izolatory, półprzewodniki

- **Zbliżenie atomów w krysztale prowadzi do rozszczepienia poziomów energetycznych. Istotnemu rozszczepieniu ulegają poziomy elektronów walencyjnych.**
- **Rozszczepione poziomy grupują się w pasma**




**a) i b) - metale,**
**c) Półprzewodnik (przerwa wzbr. 1eV-umownie)**
**d) izolator**

# Powstawanie pasm w krysztale sodu

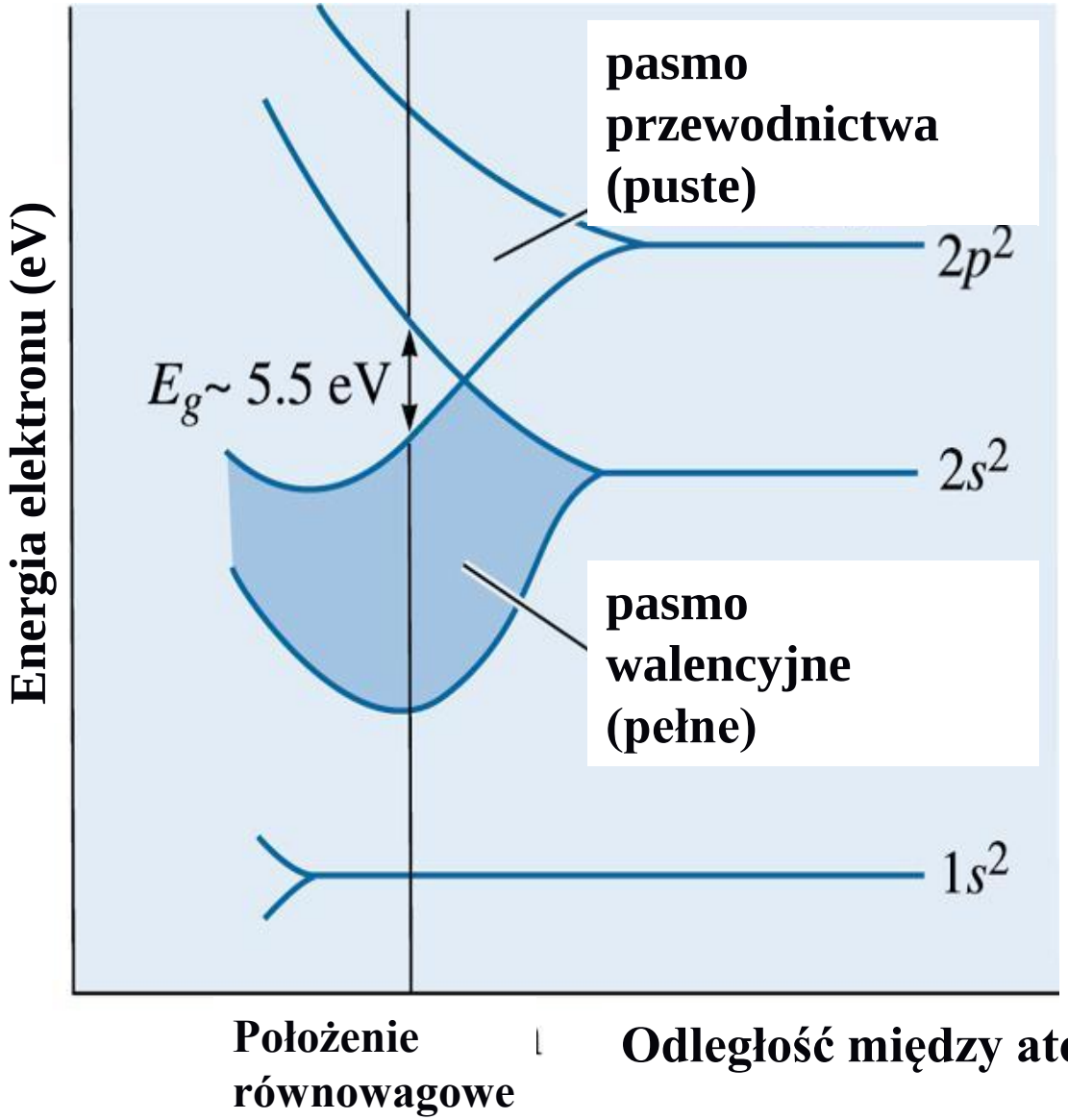



**Konfiguracja w izolowanym atomie Na:**

$1s^2\ 2s^2 2p^6\ 3s^1$

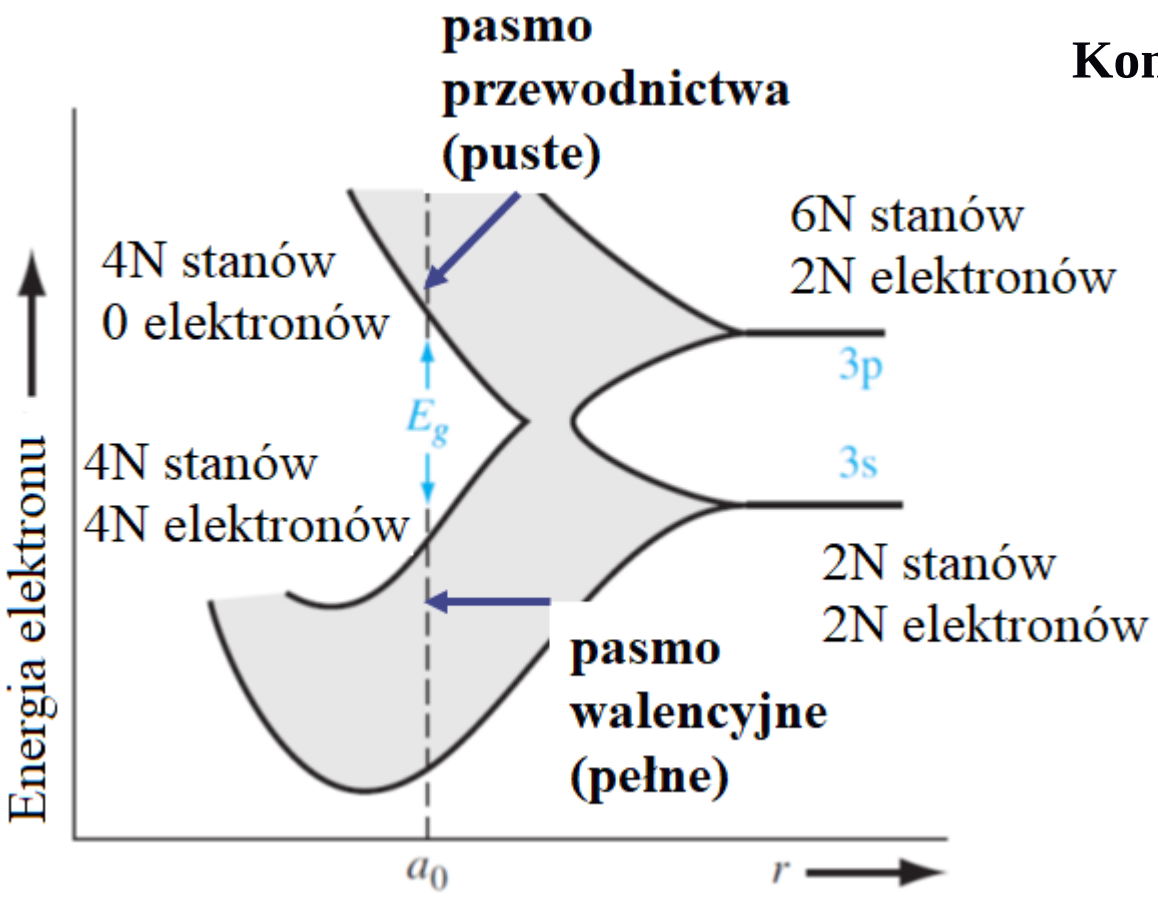
**Ne**

# Powstawanie pasm w krysztale diamentu




**Konfiguracja w izolowanym atomie C:**
**$1s^2 2s^2 2p^2$**

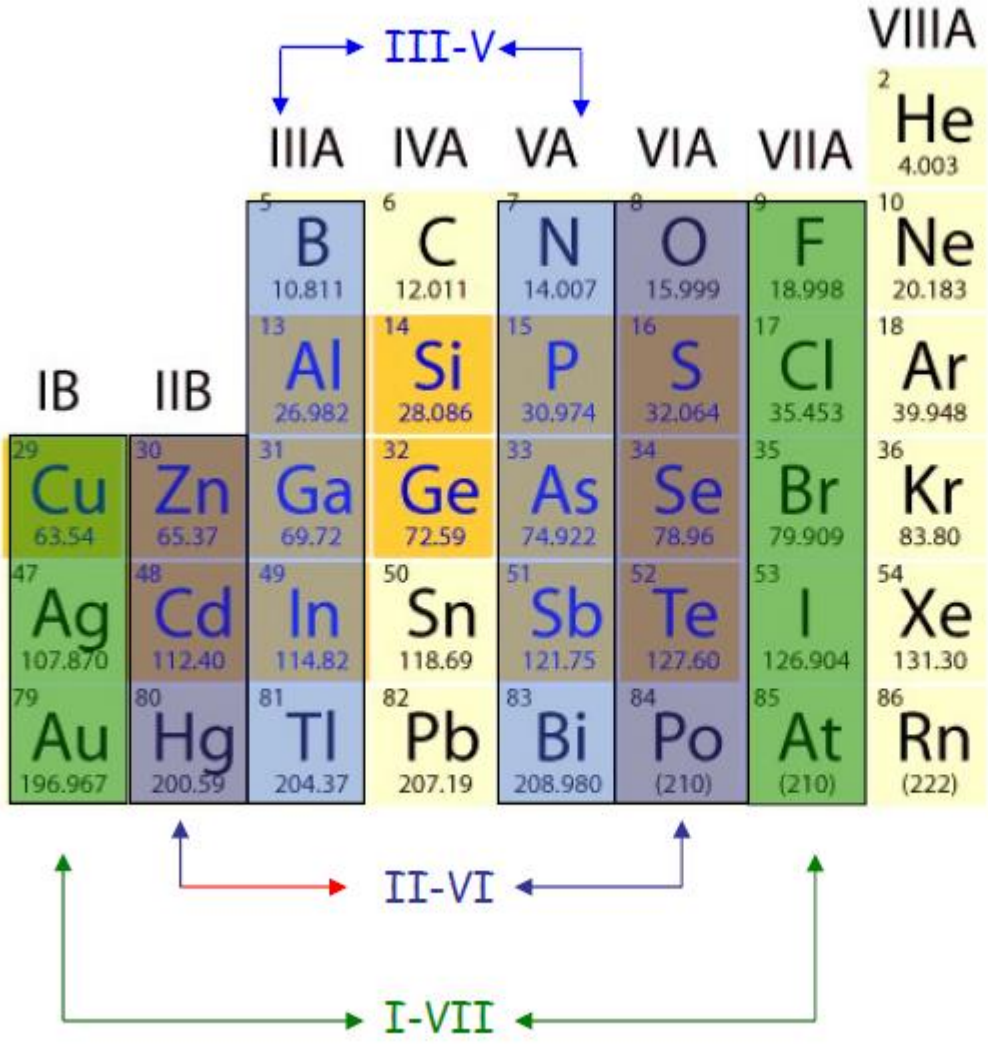
# Powstawanie pasm w krysztale krzemu




**Konfiguracja w izolowanym atomie Si:**

**$1s^2\ 2s^2 2p^6\ 3s^2 3p^2$**

# Półprzewodniki




Grupa III-V

Groupa II-VI

Grupa I-VII

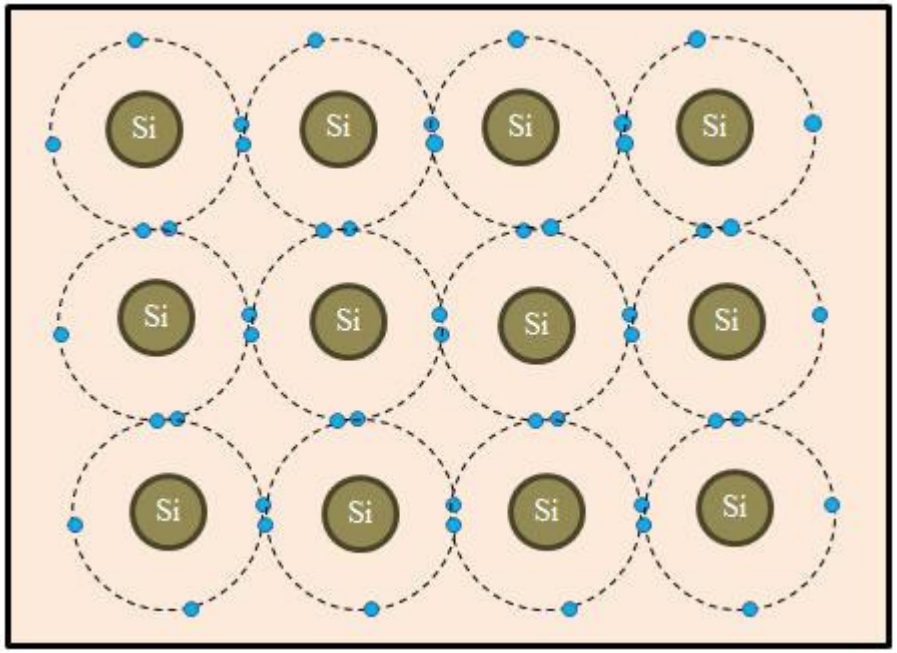
# Półprzewodniki (Si, Ge, GaAs)

**Konfiguracja elektronowa Si :**

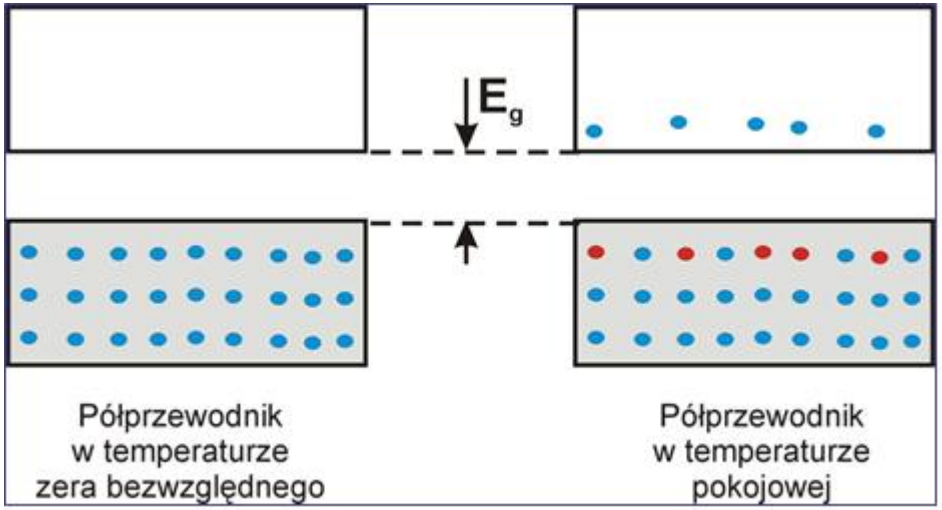
$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^2 = [Ne]\ 3s^2\ 3p^2$

**4 elektrony walencyjne**

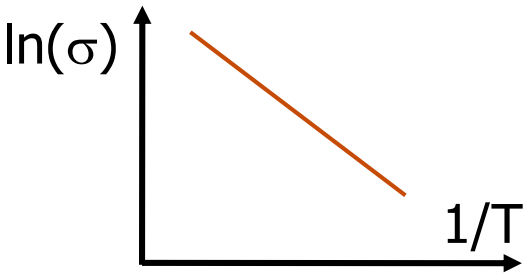
**Półprzewodnik samoistny**

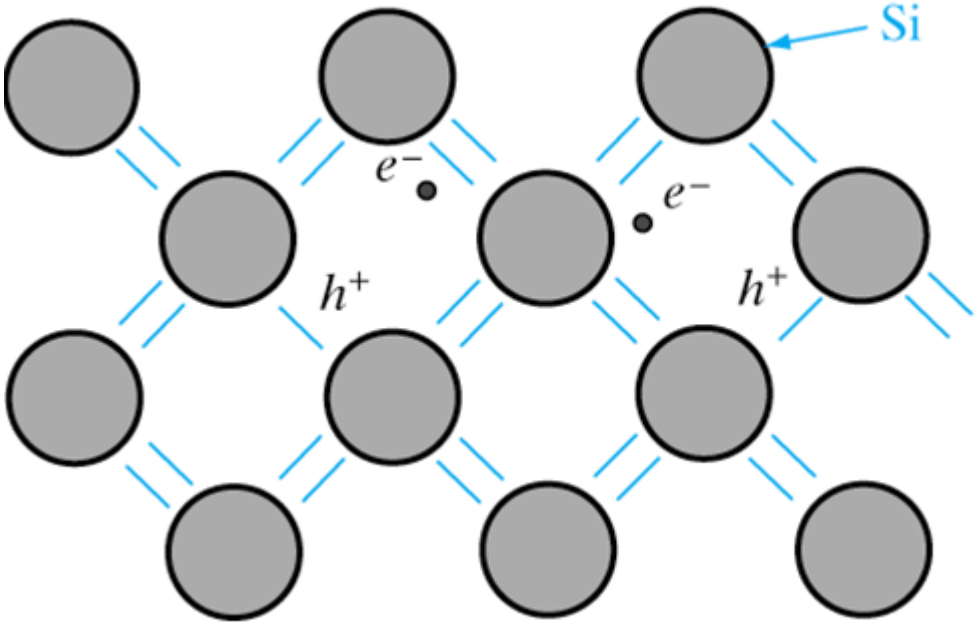


# Półprzewodnik samoistny




$$n_0 p_0 = n_i^2$$



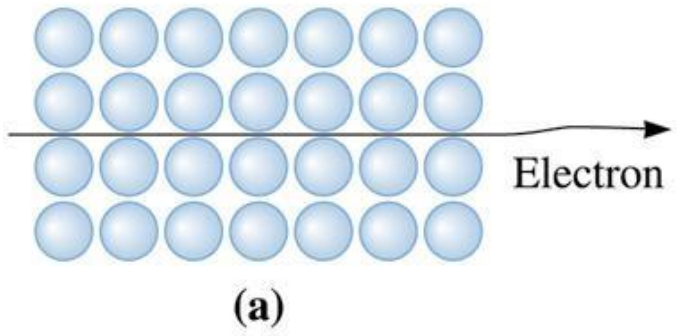



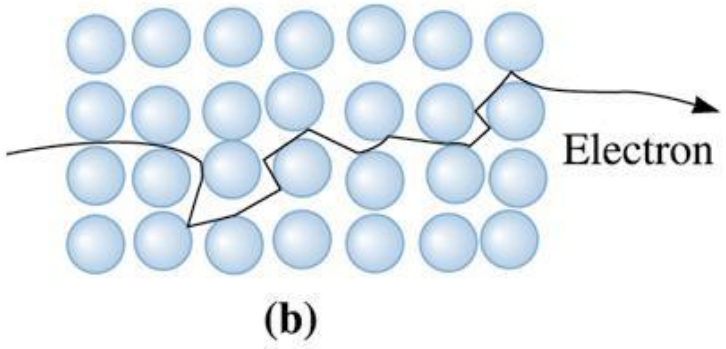

$e^-$ : elektron

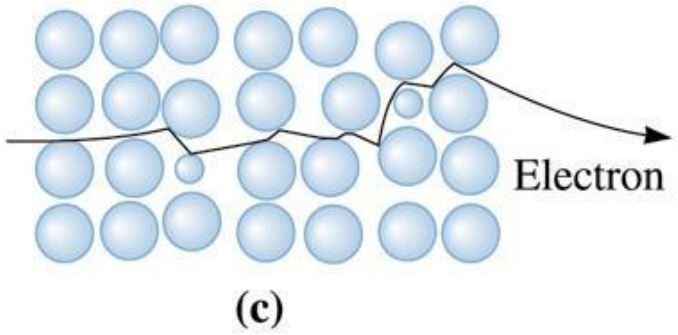
$h^+$ : dziura

$$\sigma_s = \sigma_{0s} e^{-E_g/2kT}$$

# Transport elektronów w krysztale




**a) Elektron w perfekcyjnym krysztale**
**b) Elektron w krysztale w skończonej temp.**
**c) Elektron w krysztale zdefektowanym**

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

$$\sigma = en\mu$$

**Przewodność właściwa**

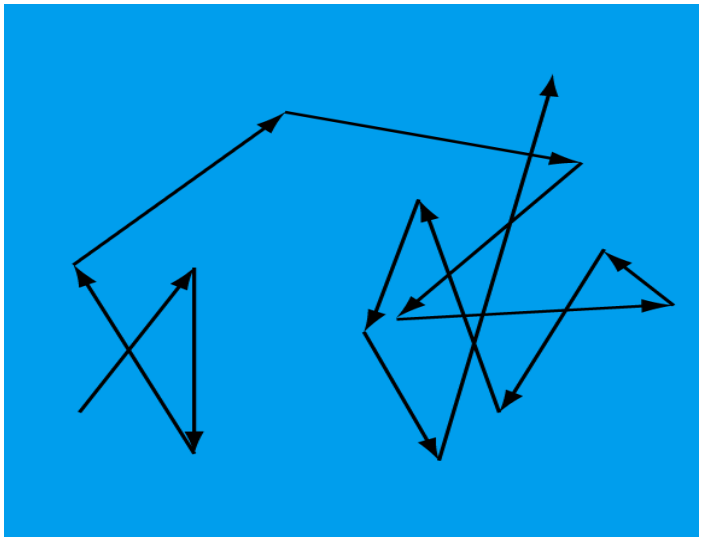
$$\mu = \frac{v}{E}$$

**Ruchliwość**

**Prędkość elektronu**

**Natężenie pola elektrycznego**

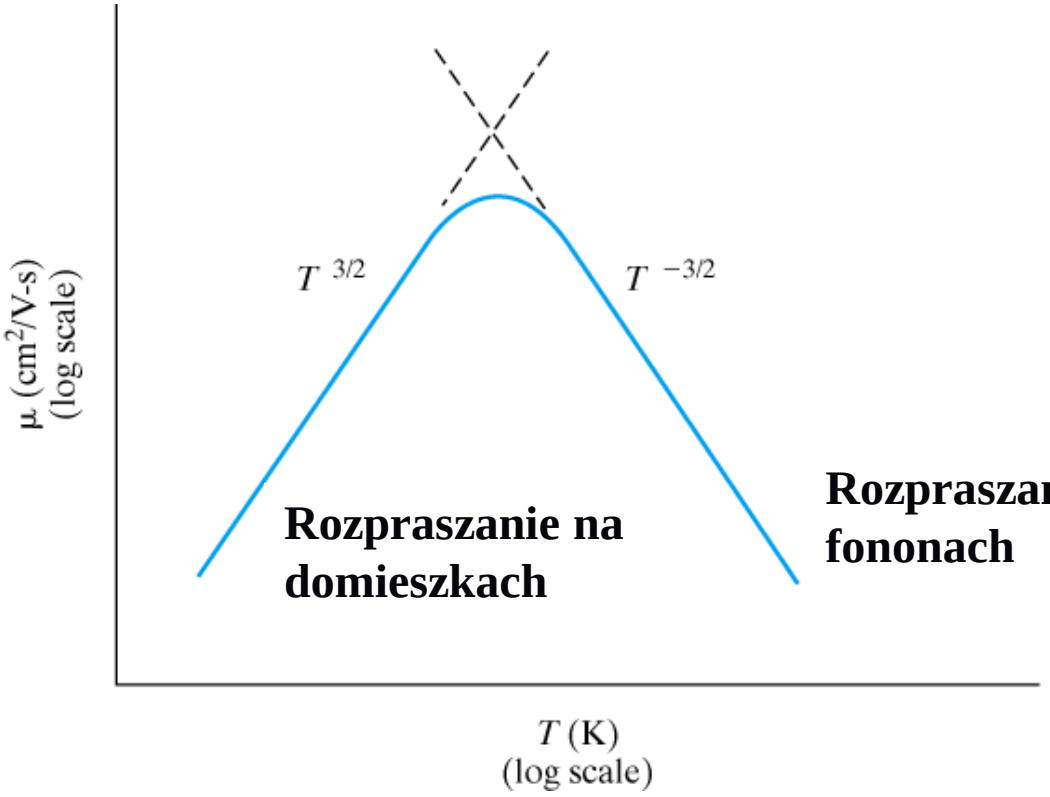
# Ruchliwość



**Elektrony w sieci ulegają rozproszeniu na skutek:**

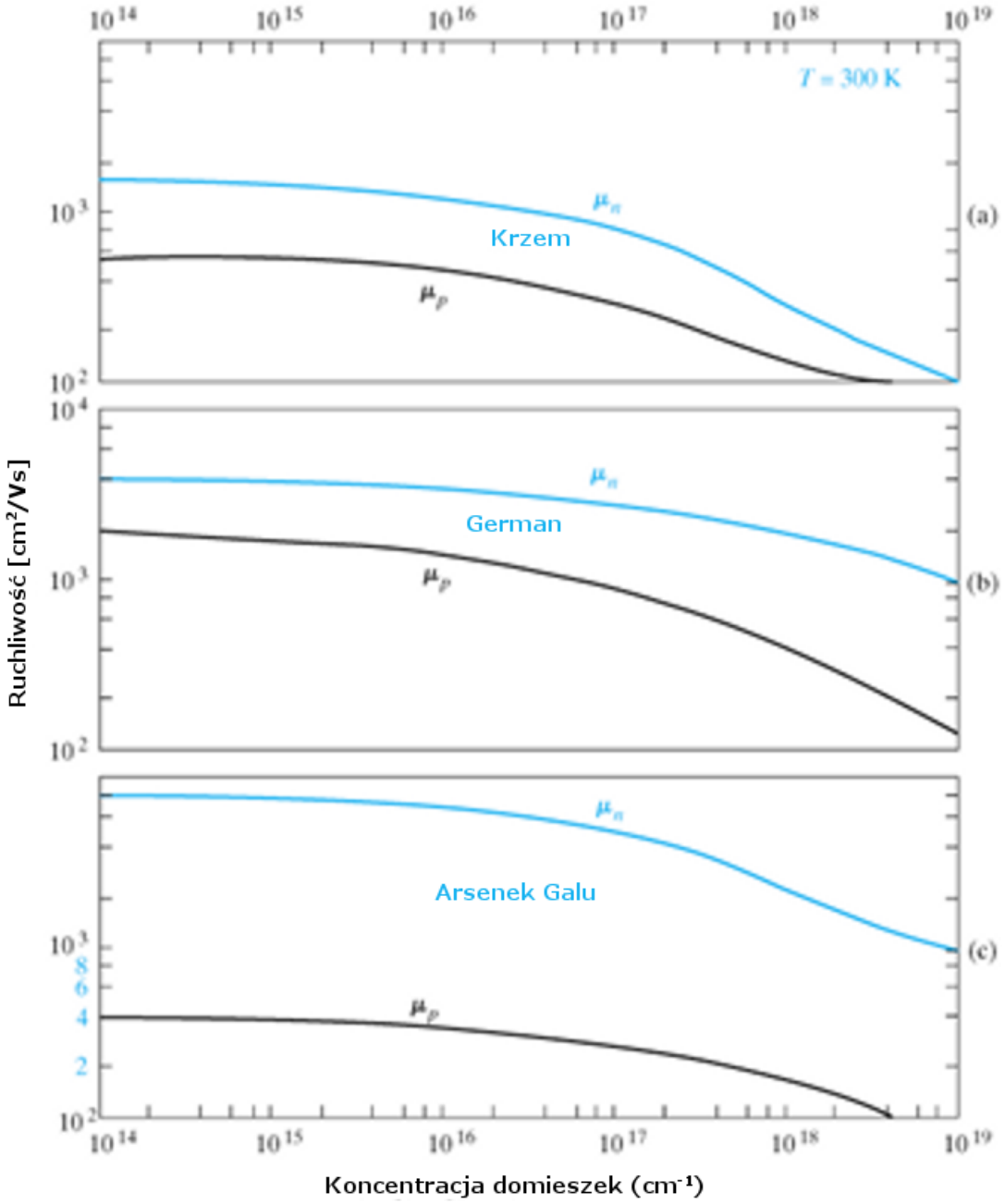
- **drgań sieci (fonony)**
- **defekty**
- **inne elektrony**

# Ruchliwość w półprzewodnikach




$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_\ell}$$

**Ruchliwość elektronów jest większa od ruchliwości dziur**

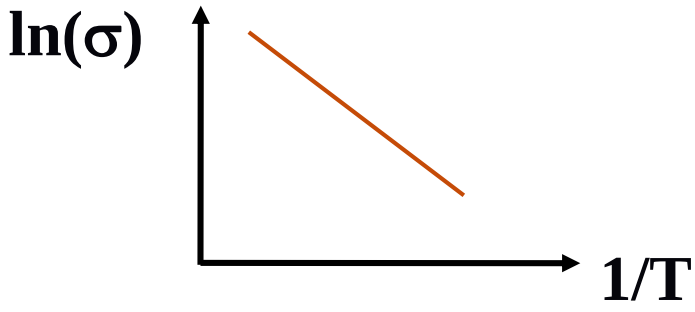


# Półprzewodnik samoistny

**Przewodność:** $\sigma = e n_i \mu$

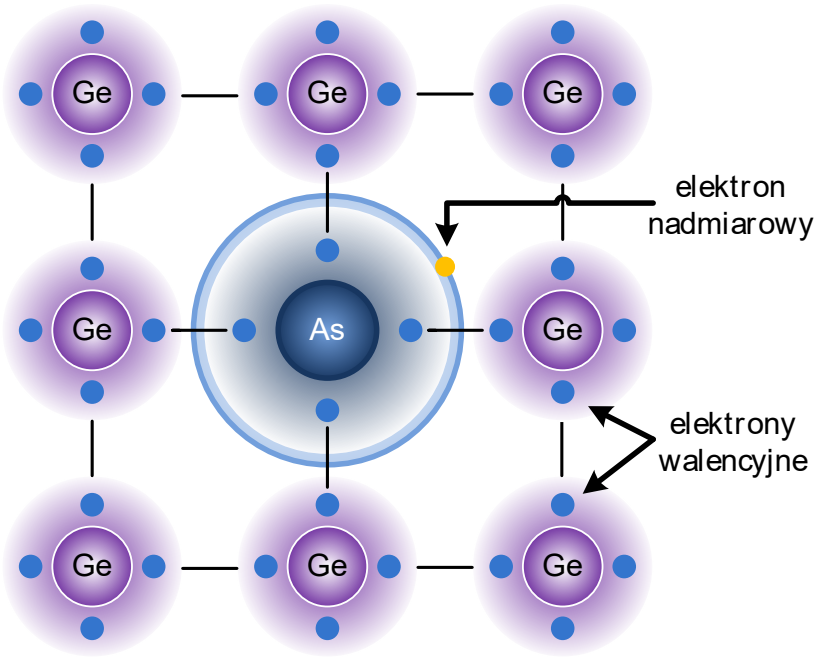
**Jeśli ruchliwość nie zmienia się istotnie wraz ze zmianą temperatury to**

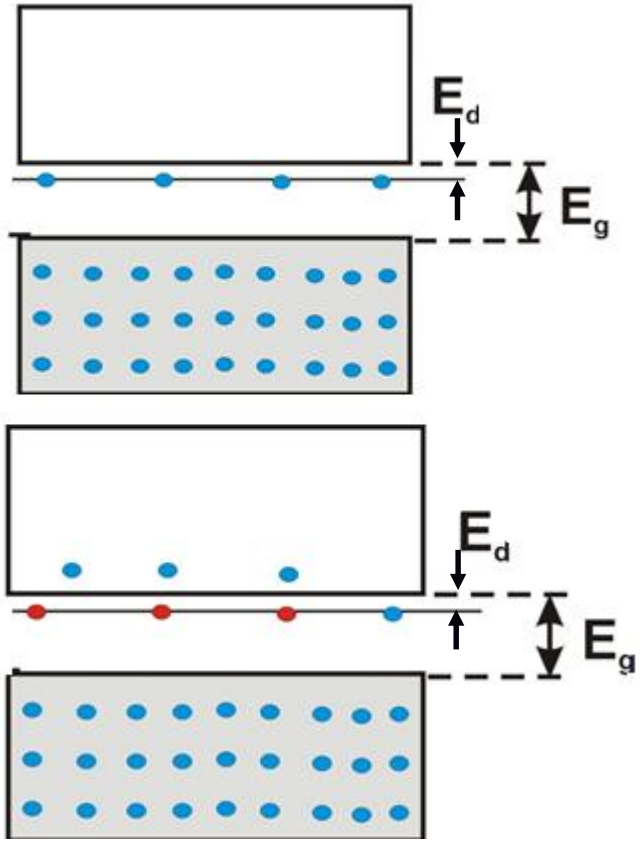
$$\sigma(T) \sim n_i(T)$$

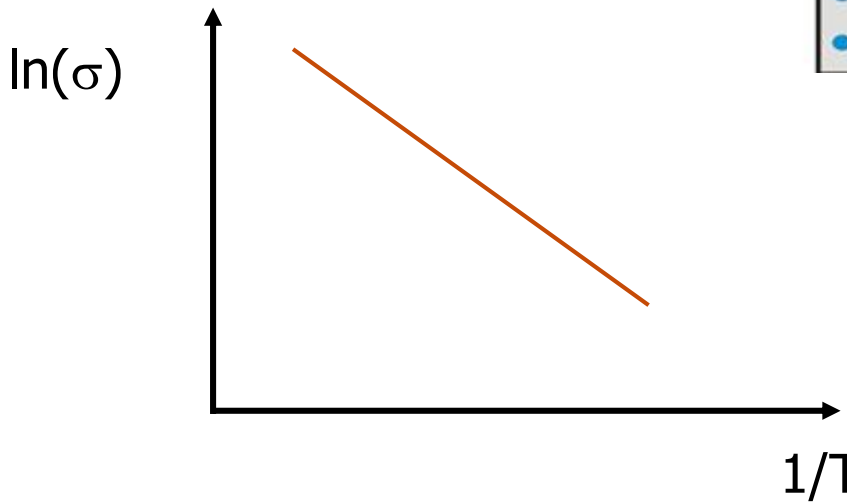



$$\sigma_i = \sigma_{0i} e^{-E_g / 2kT}$$

# Półprzewodnik typu n




$$\sigma_d = \sigma_{0d} e^{-E_d / 2kT}$$

# PERIODIC CHART OF THE ELEMENTS

| IA | IIA | IIIB | IVB | VB | VIB | VIIB | VIII | | IB | IIB | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | INERT GASES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 H 1.00797 | | | | | | | | | | | | | | | 1 H 1.00797 | 2 He 4.0026 |
| 3 Li 6.939 | 4 Be 9.0122 | | | | | | | | | | 5 B 10.811 | 6 C 12.0112 | 7 N 14.0067 | 8 O 15.9994 | 9 F 18.9984 | 10 Ne 20.183 |
| 11 Na 22.9898 | 12 Mg 24.312 | | | | | | | | | | 13 Al 26.9815 | 14 Si 28.086 | 15 P 30.9738 | 16 S 32.064 | 17 Cl 35.453 | 18 Ar 39.948 |
| 19 K 39.102 | 20 Ca 40.08 | 21 Sc 44.956 | 22 Ti 47.90 | 23 V 50.942 | 24 Cr 51.996 | 25 Mn 54.9380 | 26 Fe 55.847 | 27 Co 58.9332 | 28 Ni 58.71 | 29 Cu 63.54 | 30 Zn 65.37 | 31 Ga 69.72 | 32 Ge 72.59 | 33 As 74.9216 | 34 Se 78.96 | 35 Br 79.909 | 36 Kr 83.80 |
| 37 Rb 85.47 | 38 Sr 87.62 | 39 Y 88.905 | 40 Zr 91.22 | 41 Nb 92.906 | 42 Mo 95.94 | 43 Tc (99) | 44 Ru 101.07 | 45 Rh 102.905 | 46 Pd 106.4 | 47 Ag 107.870 | 48 Cd 112.40 | 49 In 114.82 | 50 Sn 118.69 | 51 Sb 121.75 | 52 Te 127.60 | 53 I 126.904 | 54 Xe 131.30 |
| 55 Cs 132.905 | 56 Ba 137.34 | ✳57 La 138.91 | 72 Hf 178.49 | 73 Ta 180.948 | 74 W 183.85 | 75 Re 186.2 | 76 Os 190.2 | 77 Ir 192.2 | 78 Pt 195.09 | 79 Au 196.967 | 80 Hg 200.59 | 81 Tl 204.37 | 82 Pb 207.19 | 83 Bi 208.980 | 84 Po (210) | 85 At (210) | 86 Rn (222) |
| 87 Fr (223) | 88 Ra (226) | ‡89 Ac (227) | 104 Rf (261) | 105 Db (262) | 106 Sg (266) | 107 Bh (262) | 108 Hs (265) | 109 Mt (266) | 110 ? (271) | 111 ? (272) | 112 ? (277) | | | | | | |

N-typu -donory

Numbers in parenthesis are mass numbers of most stable or most common isotope.

Atomic weights corrected to conform to the 1963 values of the Commission on Atomic Weights.

The group designations used here are the former Chemical Abstract Service numbers.

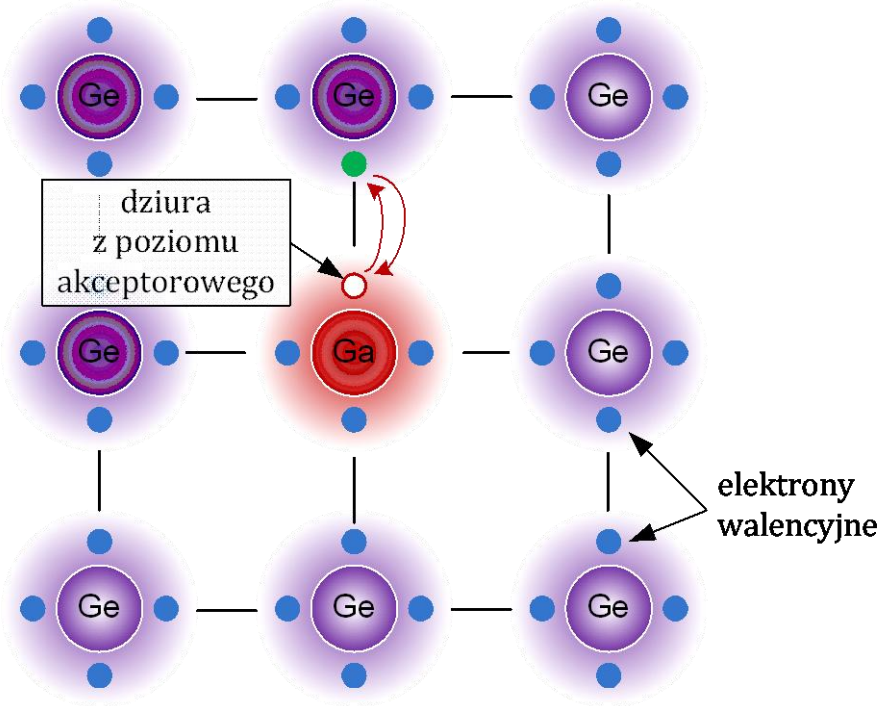
✳ Lanthanide Series

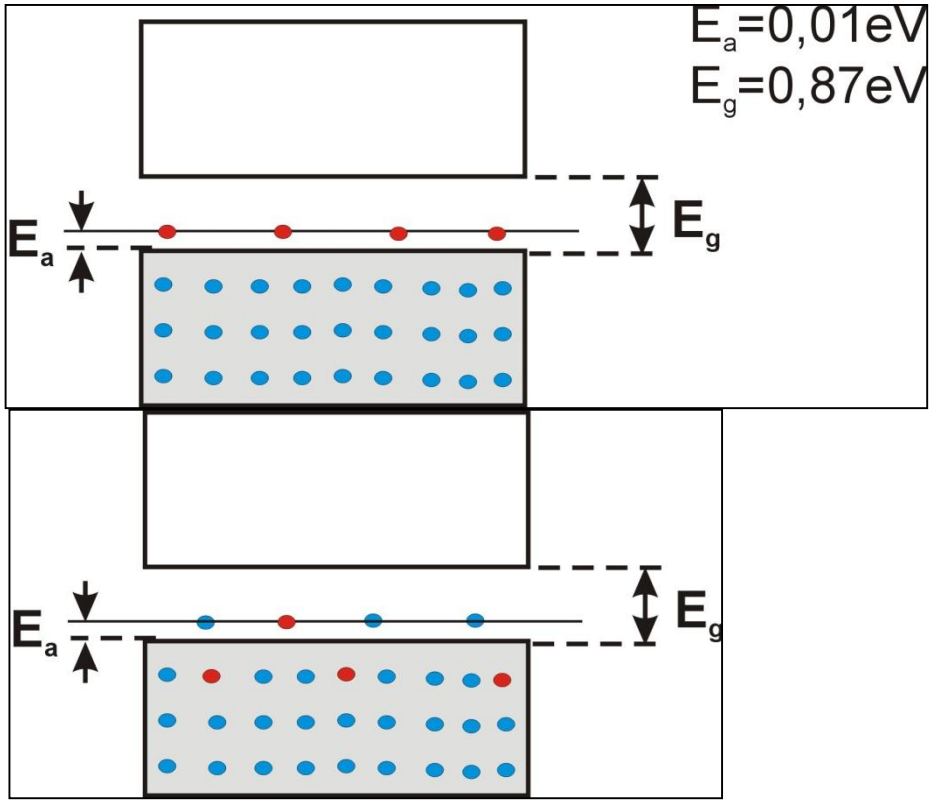
| 58 Ce 140.12 | 59 Pr 140.907 | 60 Nd 144.24 | 61 Pm (147) | 62 Sm 150.35 | 63 Eu 151.96 | 64 Gd 157.25 | 65 Tb 158.924 | 66 Dy 162.50 | 67 Ho 164.930 | 68 Er 167.26 | 69 Tm 168.934 | 70 Yb 173.04 | 71 Lu 174.97 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

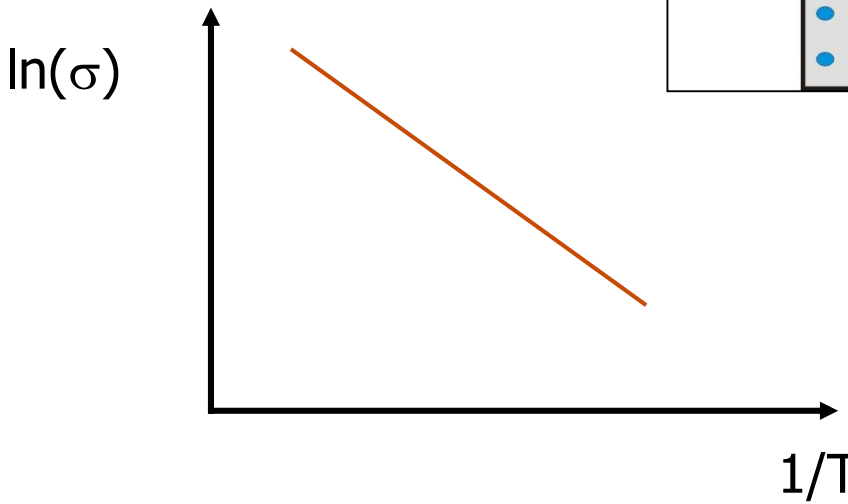
‡ Actinide Series

| 90 Th 232.038 | 91 Pa (231) | 92 U 238.03 | 93 Np (237) | 94 Pu (242) | 95 Am (243) | 96 Cm (247) | 97 Bk (247) | 98 Cf (249) | 99 Es (254) | 100 Fm (253) | 101 Md (256) | 102 No (256) | 103 Lr (257) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

# Półprzewodnik typu p




$$\sigma_d = \sigma_{0d} e^{-E_a/2kT}$$

# PERIODIC CHART OF THE ELEMENTS

| IA | IIA | IIIB | IVB | VB | VIB | VIIB | VIII | | IB | IIB | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | INERT GASES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 H 1.00797 | | | | | | | | | | | | | | | 1 H 1.00797 | 2 He 4.0026 |
| 3 Li 6.939 | 4 Be 9.0122 | | | | | | | | | | 5 B 10.811 | 6 C 12.0112 | 7 N 14.0067 | 8 O 15.9994 | 9 F 18.9984 | 10 Ne 20.183 |
| 11 Na 22.9898 | 12 Mg 24.312 | | | | | | | | | | 13 Al 26.9815 | 14 Si 28.086 | 15 P 30.9738 | 16 S 32.064 | 17 Cl 35.453 | 18 Ar 39.948 |
| 19 K 39.102 | 20 Ca 40.08 | 21 Sc 44.956 | 22 Ti 47.90 | 23 V 50.942 | 24 Cr 51.996 | 25 Mn 54.9380 | 26 Fe 55.847 | 27 Co 58.9332 | 28 Ni 58.71 | 29 Cu 63.54 | 30 Zn 65.37 | 31 Ga 69.72 | 32 Ge 72.59 | 33 As 74.9216 | 34 Se 78.96 | 35 Br 79.909 | 36 Kr 83.80 |
| 37 Rb 85.47 | 38 Sr 87.62 | 39 Y 88.905 | 40 Zr 91.22 | 41 Nb 92.906 | 42 Mo 95.94 | 43 Tc (99) | 44 Ru 101.07 | 45 Rh 102.905 | 46 Pd 106.4 | 47 Ag 107.870 | 48 Cd 112.40 | 49 In 114.82 | 50 Sn 118.69 | 51 Sb 121.75 | 52 Te 127.60 | 53 I 126.904 | 54 Xe 131.30 |
| 55 Cs 132.905 | 56 Ba 137.34 | ✳57 La 138.91 | 72 Hf 178.49 | 73 Ta 180.948 | 74 W 183.85 | 75 Re 186.2 | 76 Os 190.2 | 77 Ir 192.2 | 78 Pt 195.09 | 79 Au 196.967 | 80 Hg 200.59 | 81 Tl 204.37 | 82 Pb 207.19 | 83 Bi 208.980 | 84 Po (210) | 85 At (210) | 86 Rn (222) |
| 87 Fr (223) | 88 Ra (226) | ‡89 Ac (227) | 104 Rf (261) | 105 Db (262) | 106 Sg (266) | 107 Bh (262) | 108 Hs (265) | 109 Mt (266) | 110 ? (271) | 111 ? (272) | 112 ? (277) | | | | | | |

P-typu akceptory

Numbers in parenthesis are mass numbers of most stable or most common isotope.

Atomic weights corrected to conform to the 1963 values of the Commission on Atomic Weights.

The group designations used here are the former Chemical Abstract Service numbers.

✳ Lanthanide Series

| 58 Ce 140.12 | 59 Pr 140.907 | 60 Nd 144.24 | 61 Pm (147) | 62 Sm 150.35 | 63 Eu 151.96 | 64 Gd 157.25 | 65 Tb 158.924 | 66 Dy 162.50 | 67 Ho 164.930 | 68 Er 167.26 | 69 Tm 168.934 | 70 Yb 173.04 | 71 Lu 174.97 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

‡ Actinide Series

| 90 Th 232.038 | 91 Pa (231) | 92 U 238.03 | 93 Np (237) | 94 Pu (242) | 95 Am (243) | 96 Cm (247) | 97 Bk (247) | 98 Cf (249) | 99 Es (254) | 100 Fm (253) | 101 Md (256) | 102 No (256) | 103 Lr (257) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

# Koncentracja nośników w półprzewodniku

**Elektrony:**

$$n = \int_{E_c}^{\infty} N_C(E) f(E,T)\, dE$$

**Dziury:**

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} N_V(E)\,[1 - f(E,T)]\, dE$$

- **Gęstość stanów ($N_c$ i $N_v$)**

**Przybliżenie paraboliczne (swobodny elektron):** $N(E) = \dfrac{(2m)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} E^{1/2}$

**Półprzewodniki – j.w., ale $m$ zastępujemy $m^*$- masą efektywną**

$$N_C(E) = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3}\sqrt{E - E_C} \quad , \quad (E > E_C)$$

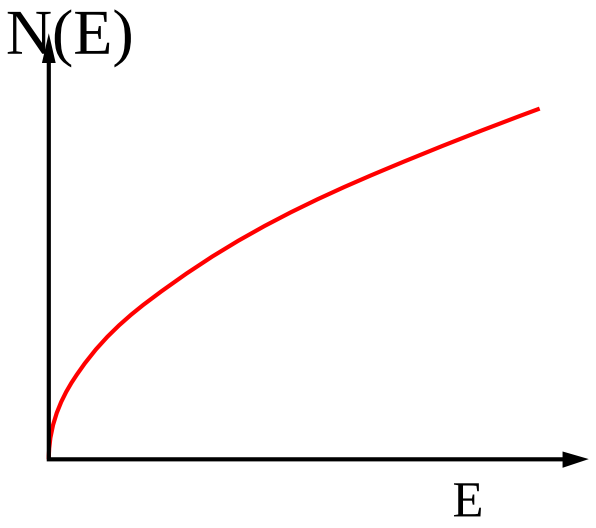
$$N_V(E) = \frac{(2m_p^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3}\sqrt{E_V - E} \quad , \quad (E < E_V)$$

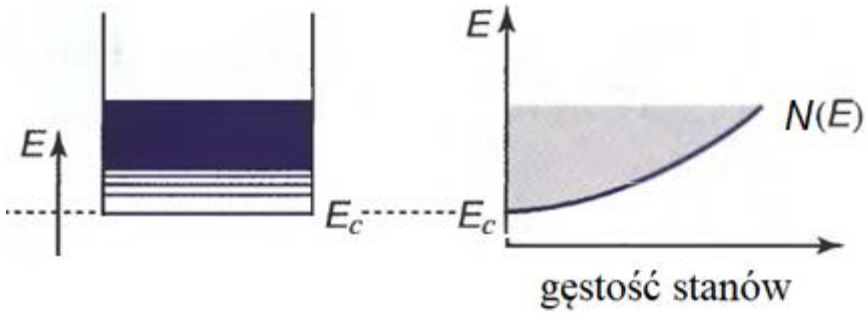
# Gęstość stanów

**Gęstość stanów N(E) jest to liczba stanów energetycznych na jednostkę objętości, których energia zawarta jest w przedziale od *E* do *E+dE* wynosi:**

$$N(E)dE = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{E}dE$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$$
$$\hbar = h/2\pi$$



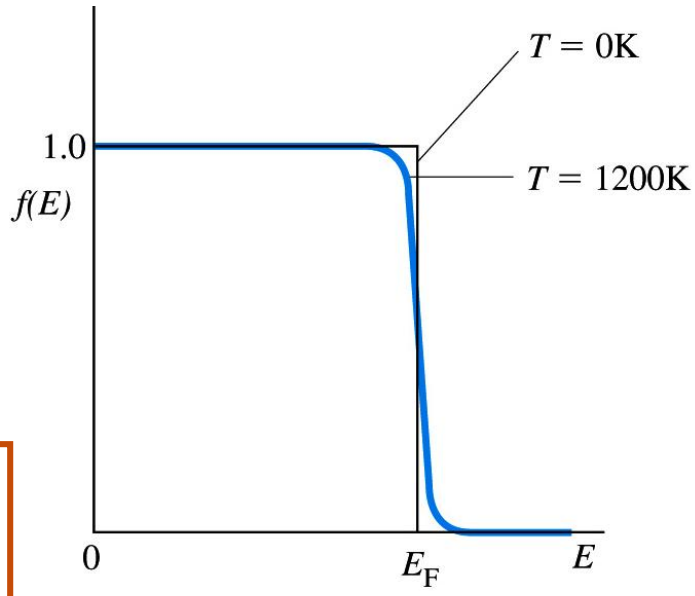



# Funkcja rozkładu Fermiego-Diraca

**Elektrony są fermionami.**

**Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu fermionem:**

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$




$k = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$

**Dla T = 0 K, f(E) =** $\begin{cases} 1 & E < E_F \\ 0 & E > E_F \end{cases}$

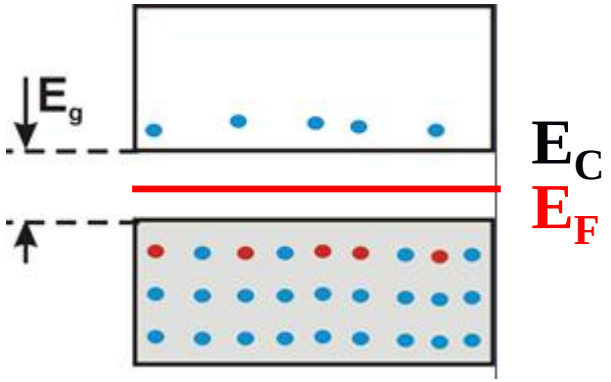
- **W T=0 zapełnione są wszystkie stany o energiach poniżej $E_F$**
- **Dla dowolnej temperatury prawdopodobieństwo zapełnienia stanu o energii $E_F$ wynosi 0.5:**

**f(E) = 0.5 dla E = $E_F$**

# Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej w półprzewodniku niezdegenerowanym

## Koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa:

$$n_0 = \int_{E_C}^{\infty} f(E) N_C(E) dE$$




T=300K
półprzewodnik samoistny

- $kT\ (w\ 300K) = 0.025eV$

- $E_F$ znajduje się w połowie przerwy wzbronionej (w Si tj. 0.55eV)

$$\rightarrow E_C - E_F > kT$$

$$f(E_C) = \frac{1}{1 + e^{(E_C - E_F)/kT}} \approx e^{-(E_C - E_F)/kT} \qquad (300K)$$

# Koncentracja nośników w półprzewodniku niezdegenerowanym

**Dla półprzewodnika niezdegenerowanego** $E - E_F \gg 2kT$ ➡

$$f(E,T) = \frac{1}{\exp\left[(E-E_F)/kT\right]+1} \sim \exp\left(-\frac{E-E_F}{kT}\right) \ll 1$$

$$n = \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} e^{E_F/kT} \int_{E_C}^{\infty} \sqrt{E-E_C} \cdot e^{-E/kT}\, dE$$

**Niech** $X_C = (E-E_C)/kT$ ➡

$$n = \frac{(2m_n^* kT)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} \exp\left(-\frac{E_C-E_F}{kT}\right) \int_0^{\infty} X_C^{1/2} e^{-X_C}\, dX_C$$

$$\int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$ ➡

**Efektywna gęstość stanów** ⬇

$$n = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C-E_F}{kT}\right) = N_{\text{eff}}^C \exp\left(-\frac{E_C-E_F}{kT}\right)$$

# Koncentracja nośników w półprzewodniku niezdegenerowanym

$$n = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) = N_{eff}^C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$p = 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) = N_{eff}^V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right)$$

$N_{eff}^C$ **efektywna gęstość stanów na dnie pasma przewodnictwa**

$N_{eff}^V$ **efektywna gęstość stanów przy wierzchołku pasma walencyjnego**

**Dla Si (300K)** $N_{eff}^C = 2.8 \cdot 10^{19} cm^{-3}$

$N_{eff}^V = 1.04 \cdot 10^{19} cm^{-3}$

# Wybrane parametry Si, GaAs, Ge

Table 4.2 | Commonly accepted values of $n_i$ at $T = 300$ K

| | |
|---|---|
| Silicon | $n_i = 1.5 \times 10^{10}\ \text{cm}^{-3}$ |
| Gallium arsenide | $n_i = 1.8 \times 10^{6}\ \text{cm}^{-3}$ |
| Germanium | $n_i = 2.4 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ |

Table 4.1 | Effective density of states function and density of states effective mass values

| | $N_c$ (cm$^{-3}$) | $N_v$ (cm$^{-3}$) | $m_n^*/m_0$ | $m_p^*/m_0$ |
|---|---|---|---|---|
| Silicon | $2.8 \times 10^{19}$ | $1.04 \times 10^{19}$ | 1.08 | 0.56 |
| Gallium arsenide | $4.7 \times 10^{17}$ | $7.0 \times 10^{18}$ | 0.067 | 0.48 |
| Germanium | $1.04 \times 10^{19}$ | $6.0 \times 10^{18}$ | 0.55 | 0.37 |

# Koncentracja elektronów i dziur w półprzewodniku

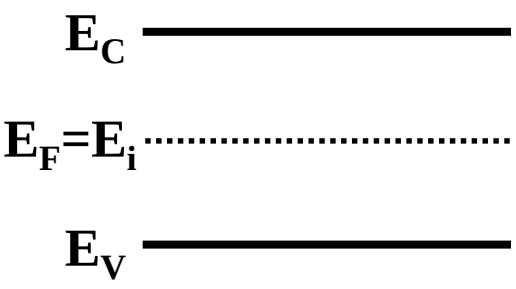
- $N(E) \sim \sqrt{E}$**;**
- $f(E)N(E)$ **maleje istotnie dla** $E > E_C$**, więc mało elektronów zajmuje stany powyżej dna pasma przewodnictwa;**
- **wprowadza się *efektywną gęstość stanów*** $N_C$ **(**$N_v$**): wszystkie stany zastępuje się stanami na dnie pasma przewodnictwa (u wierzchołka pasma walencyjnego);**
- **koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa (walencyjnym) =** ***efektywna gęstość stanów*** $N_C$ **(**$N_v$**) *x funkcja Fermiego-Diraca.***

# Położenie poziomu Fermiego w półprzewodniku samoistnym

(uwaga: tu efektywną gęstość stanów oznaczono $N_c$ i $N_v$)

$$n_0 = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = p_0 = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT}$$

$$E_F = E_i = \frac{E_c + E_V}{2} + \frac{kT}{2} ln \frac{N_V}{N_C} = \frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2} ln \frac{N_V}{N_C}$$




**półprzewodnik samoistny dla T=0 lub gdy $N_c=N_v$**

**Krzem $E_g$=1.12eV, 300K**

$$E_i = 0.56 + \frac{0.0259}{2} ln \frac{1.04}{2.8} \cong 0.56eV - 0.013\ eV$$

# Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej

**Równanie prawdziwe dla wszystkich półprzewodników:**

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

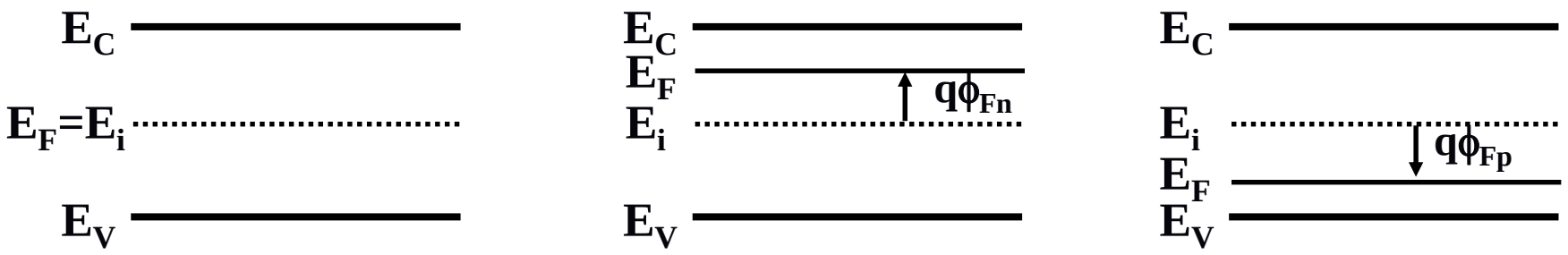
**W półprzewodniku samoistnym koncentracja dziur jest równa koncentracji elektronów, więc**

$$\boldsymbol{n_0 = p_0 = n_i}$$

(uwaga: tu efektywną gęstość stanów oznaczono $N_c$ i $N_v$)

$$\boldsymbol{n_i = \sqrt{N_C N_V}\, e^{-E_g / 2kT}}$$

# Koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku domieszkowanym




**samoistny** **n-typu** **p-typu**

$$n_0 = N_C e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

$$n_i = N_C e^{-\frac{E_c - E_i}{kT}}$$

$$p_0 = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}}$$

$$n_i = N_V e^{-\frac{E_i - E_V}{kT}}$$

$$n_0 = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p_0 = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

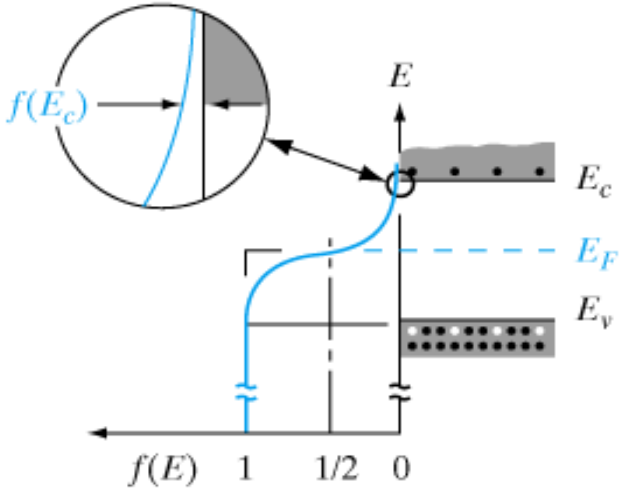
$$q\phi_F = E_F - E_i$$

**Wpływ domieszkowania na poziom Fermiego $E_F$**
**n-typu: poziom Fermiego przesuwa się do góry**
**p-typu: poziom Fermiego przesuwa się w dół**

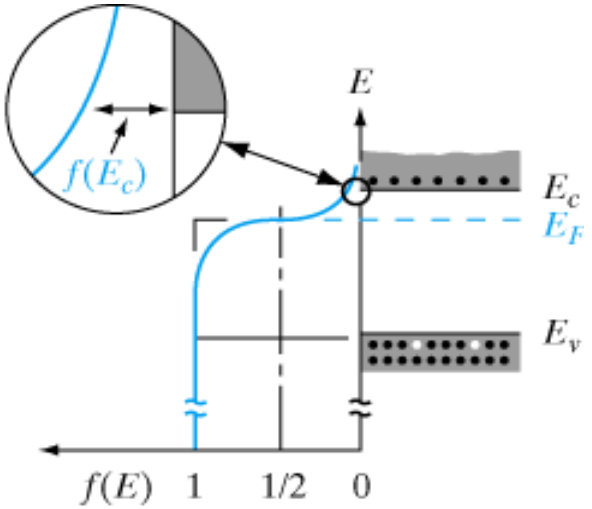
# Poziom Fermiego i koncentracja równowagowa nośników w półprzewodnikach

**Półprzewodnik samoistny**

$$n_i = p_i$$

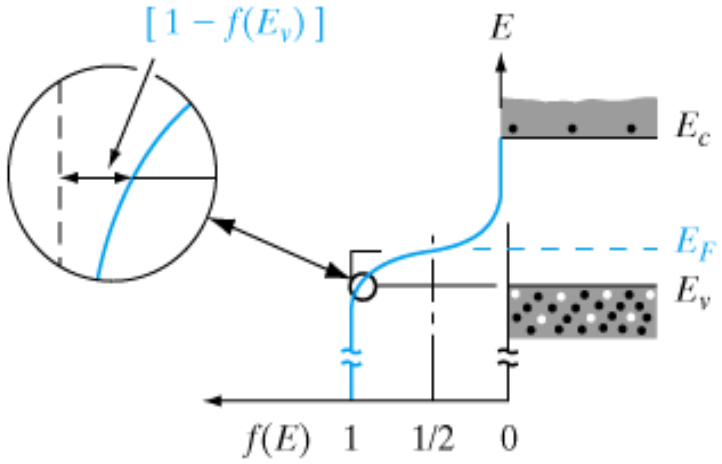



**Półprzewodnik typu n**




$$n_0 \gg p_0$$

**Półprzewodnik typu p**



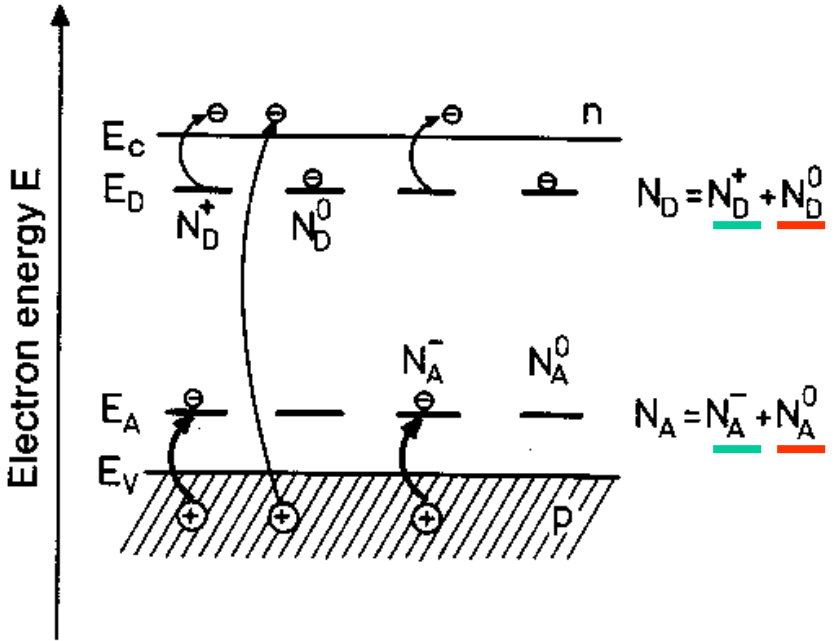

$$p_0 \gg n_0$$

# Koncentr. nośników w półprzew. domieszkowanych.

$$n = 2\left(\frac{2\pi m_n^* \not{k} T}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{\not{k} T}\right) = N_{\text{eff}}^C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{\not{k} T}\right)$$

$$p = 2\left(\frac{2\pi m_p^* \not{k} T}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_V - E_F}{\not{k} T}\right) = N_{\text{eff}}^V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{\not{k} T}\right)$$

$$np = N_{\text{eff}}^C N_{\text{eff}}^V \, e^{-E_g/\not{k} T}$$




**War. neutralności:**

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

# Konc. nośników w półprz. domieszk.

$$N_D = N_D^0 + N_D^+$$

$$N_A = N_A^0 + N_A^-$$

**Warunek neutralności**

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

**Donory obsadz. elektronami:**

$$n_D = N_D^0 = N_D\{1 + \exp[(E_D - E_F)/kT]\}^{-1}$$

**Akceptory obsadz. dziurami:**

$$p_A = N_A^0 = N_A\{1 + \exp[(E_F - E_A)/kT]\}^{-1}$$

---

## Czysty półprzewodnik typu n (p-podobnie)

$$n = N_{eff}^C e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

$$N_D = N_D^0 + N_D^+$$

$$N_D^0 = N_D\{1 + \exp[(E_D - E_F)/kT]\}^{-1}$$

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

$= 0$

$$n = N_D^+ + p$$

(tylko jeden typ domieszki)

Przybliżenie

$N_D^+ \gg n_i$ $\quad (np = n_i^2)$ $\quad \rightarrow$ $\quad n \approx N_D^+ = N_D - N_D^0$

Przykład: Si i niech n=$10^{17}$ cm$^{-3}$ $\quad n_i = 1.5 \times 10^{10}\ \text{cm}^{-3}$ at 300 K

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{2.25 \times 10^{20}}{10^{17}} = 2.25 \times 10^3\, cm^{-3}$$

$$n \approx N_D^+ = N_D - N_D^0 \qquad N_D^0 = N_D\{1 + \exp[(E_D - E_F)/kT]\}^{-1}$$

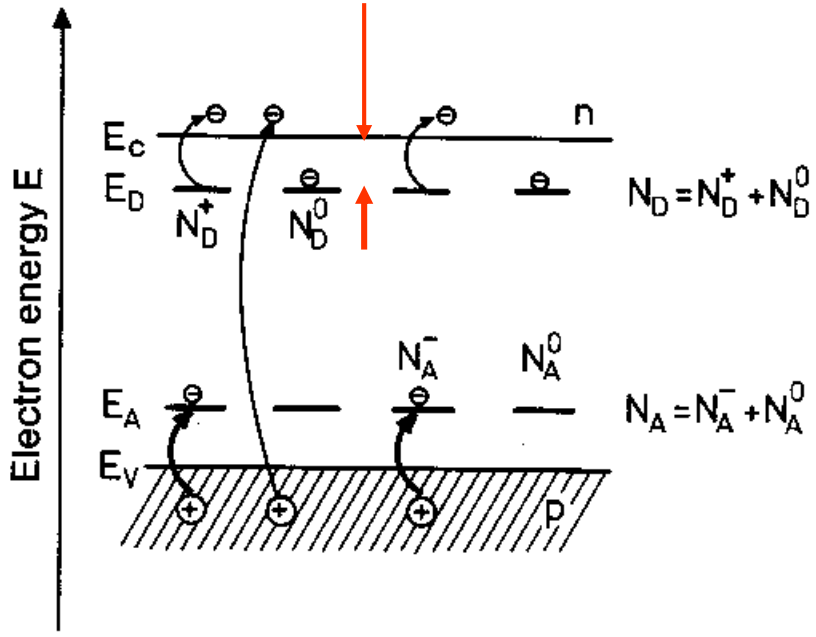
$$n \approx N_D \left(1 - \frac{1}{1 + \exp[(E_D - E_F)/kT]}\right)$$

$$n = N_{eff}^C e^{-(E_C - E_F)/kT} \longrightarrow (n/N_{eff}^C)\, e^{E_C/kT} = e^{E_F/kT}$$

$$n \approx \frac{N_D}{1 + e^{E_d/kT}\, n/N_{eff}^C} \qquad \textbf{gdzie} \quad E_d = E_C - E_D$$

$$n + \frac{n^2}{N_{eff}^C}\, e^{E_d/kT} \approx N_D$$

$$n \approx 2N_D \left(1 + \sqrt{1 + 4\,\frac{N_D}{N_{eff}^C}\, e^{E_d/kT}}\right)^{-1}$$



# Temperaturowa zależność koncentracji

$$n \approx 2N_{\mathrm{D}} \left( 1 + \sqrt{1 + 4 \frac{N_{\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{C}}} \mathrm{e}^{E_{\mathrm{d}}/kT}} \right)^{-1}$$

**I) Niskie temperatury**

$$4(N_{\mathrm{D}}/N_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{C}})\mathrm{e}^{E_{\mathrm{d}}/kT} \gg 1 \longrightarrow n \approx \sqrt{N_{\mathrm{D}} N_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{C}}}\ \mathrm{e}^{-E_{\mathrm{d}}/2kT}$$

**wymrażanie nośników**

**II) Wysokie temperatury**

$$4(N_{\mathrm{D}}/N_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{C}})\mathrm{e}^{E_{\mathrm{d}}/kT} \ll 1 \longrightarrow n \approx N_{\mathrm{D}} = \mathrm{const}$$

**nasycenie**

**III) B. wysokie temp.** $\longrightarrow$ $n \sim n_i$

**obszar samoistny**

# Koncentracja od temperatury

