

Wykład IV

Półprzewodniki samoistne i domieszkowe

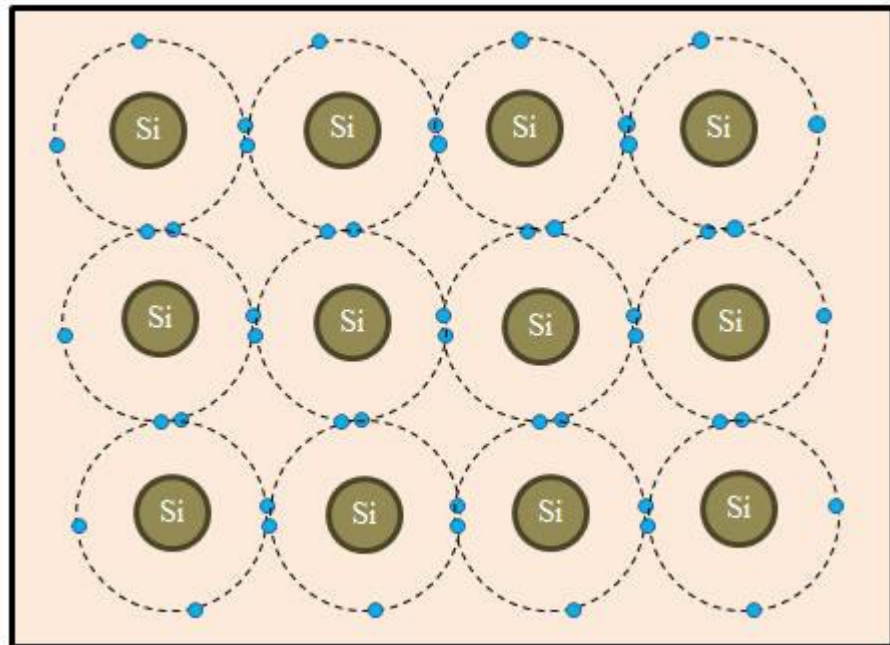
Półprzewodniki (Si, Ge, GaAs)

Konfiguracja elektronowa Si :

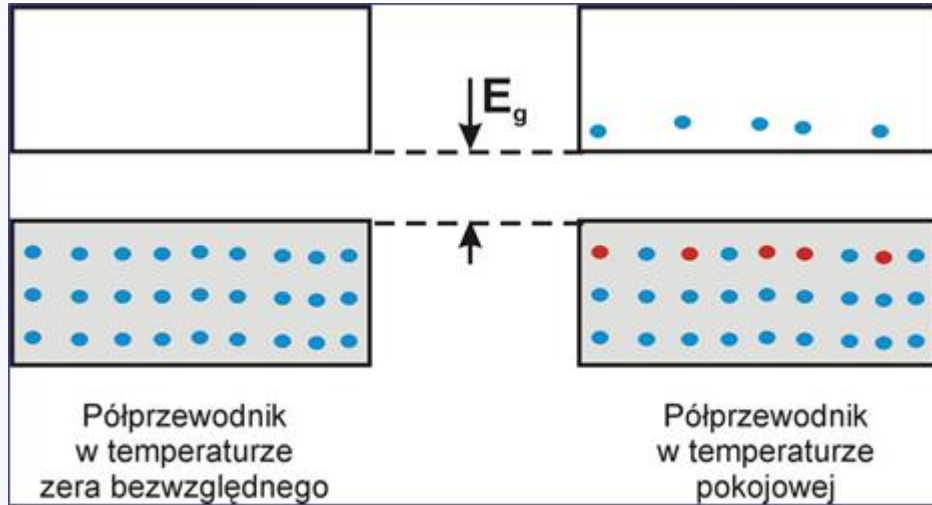


4 elektrony walencyjne

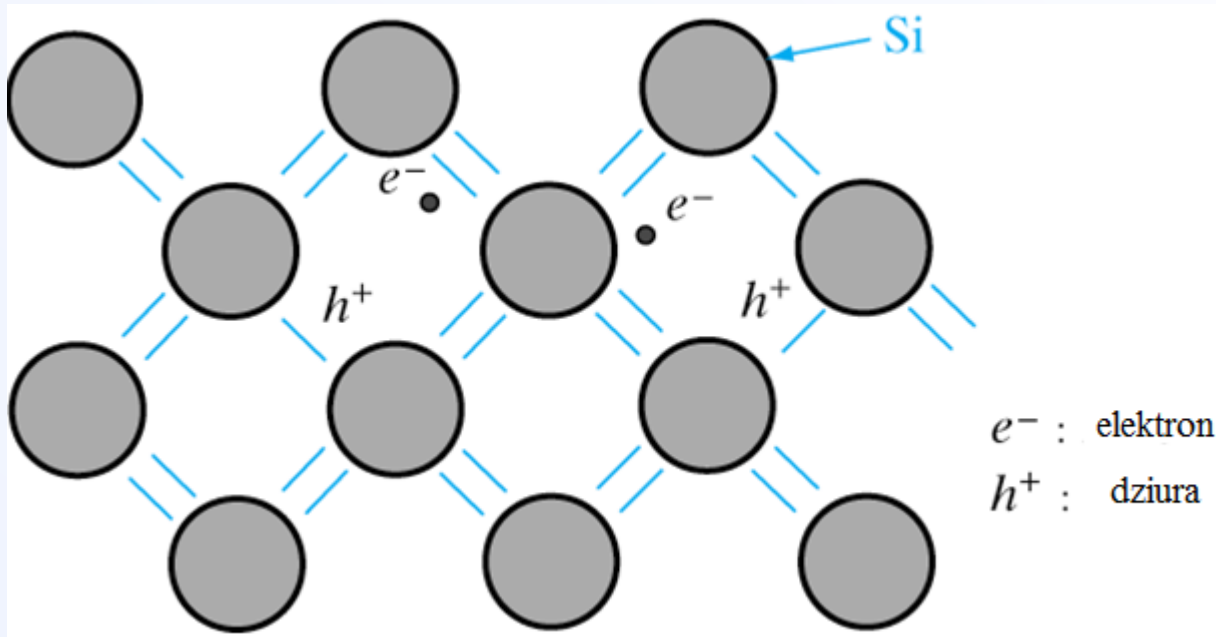
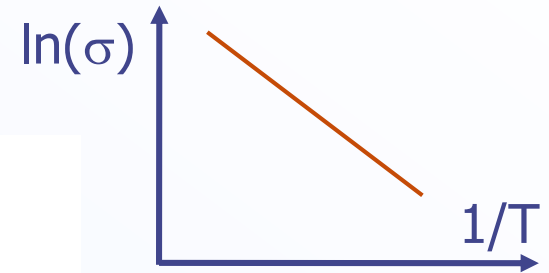
Półprzewodnik samoistny



Półprzewodnik samoistny

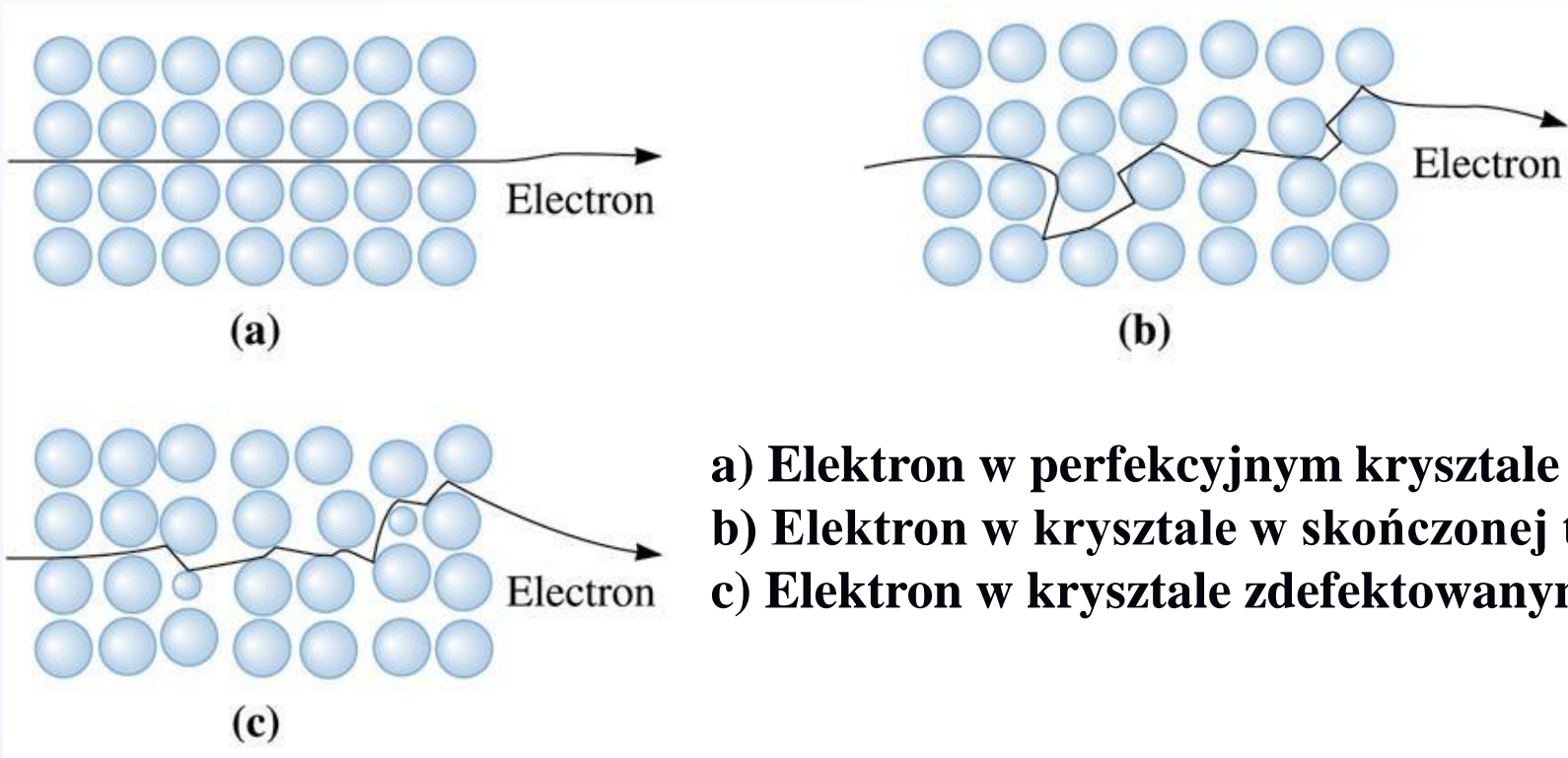


$$n_0 p_0 = n_i^2$$



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

Transport elektronów w kryształach



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

$$\sigma = en\mu$$

Przewodność właściwa

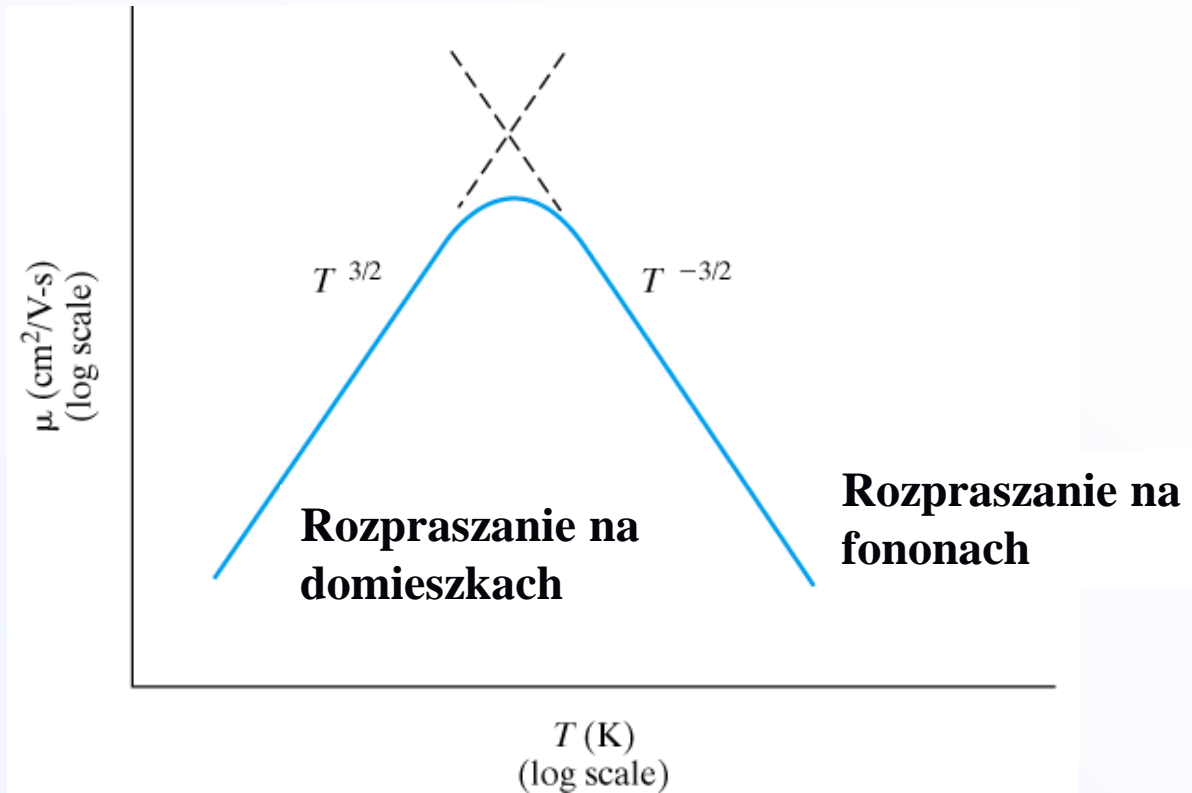
$$\mu = \frac{v}{E}$$

Prędkość elektronu

Natężenie pola elektrycznego

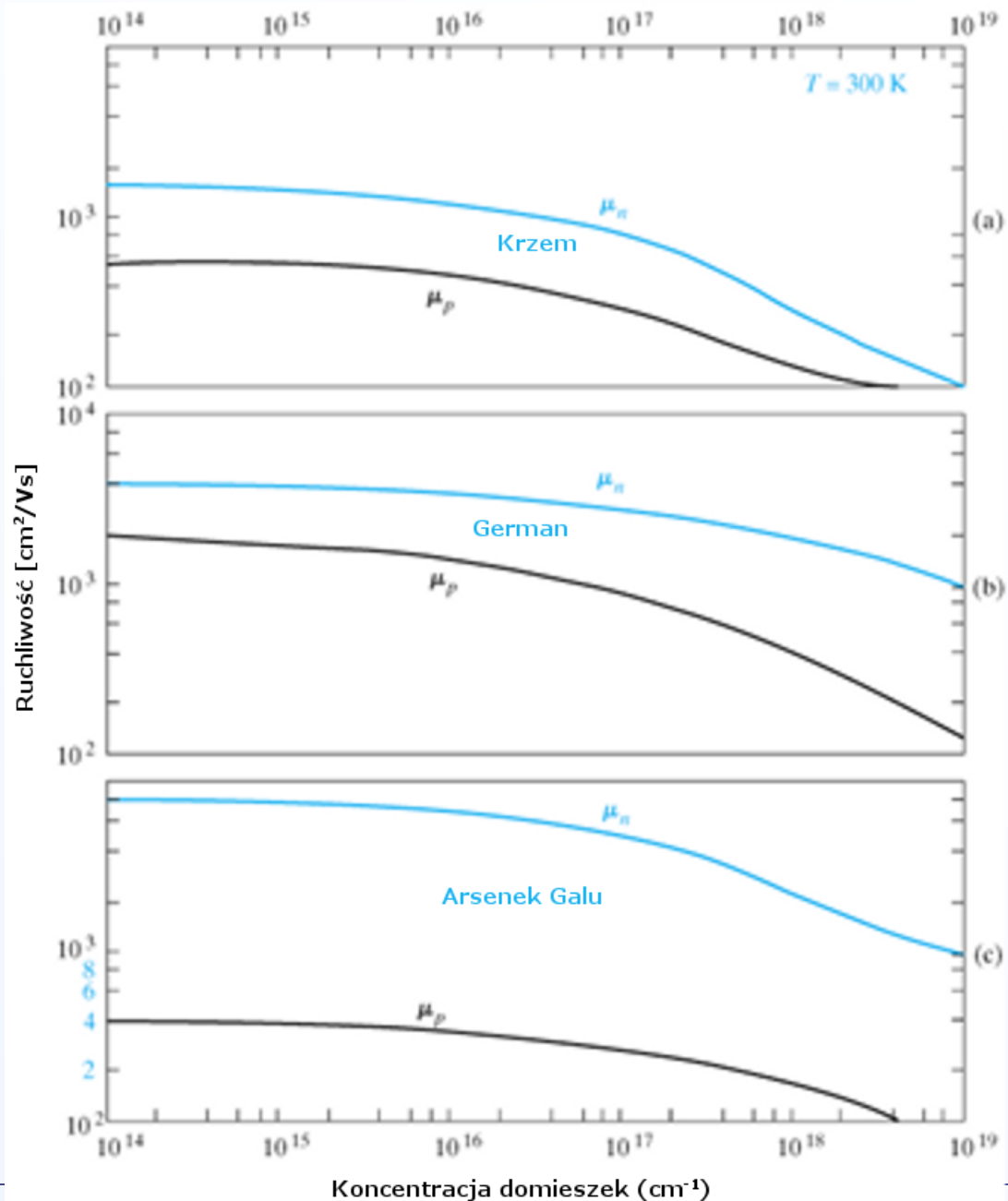
Ruchliwość

Ruchliwość w półprzewodnikach



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

**Ruchliwość
elektronów
jest większa
od ruchliwości
dziur**

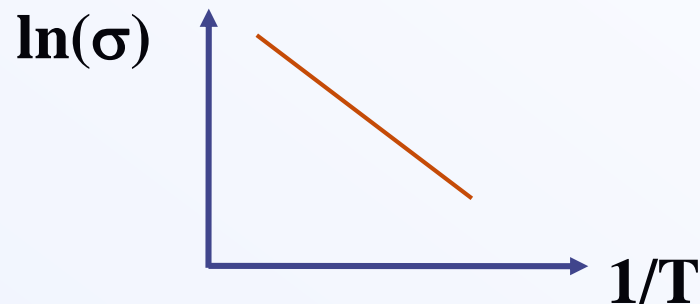


Półprzewodnik samoistny

Przewodność: $\sigma = en_i\mu$

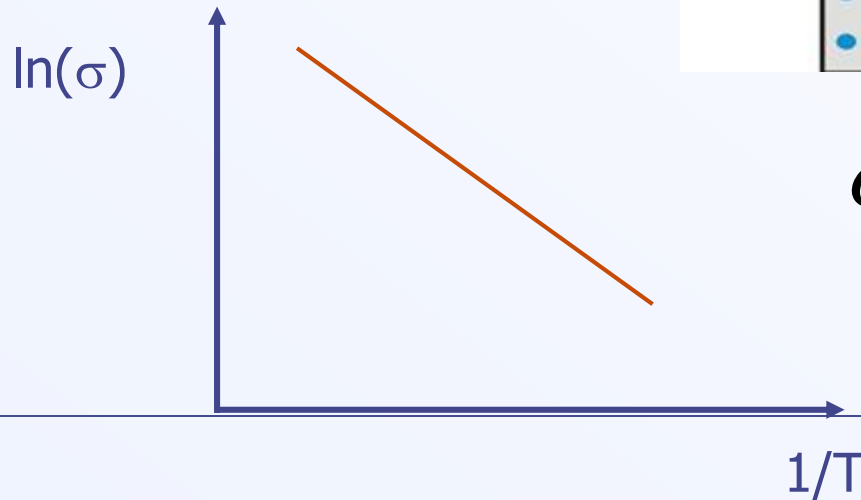
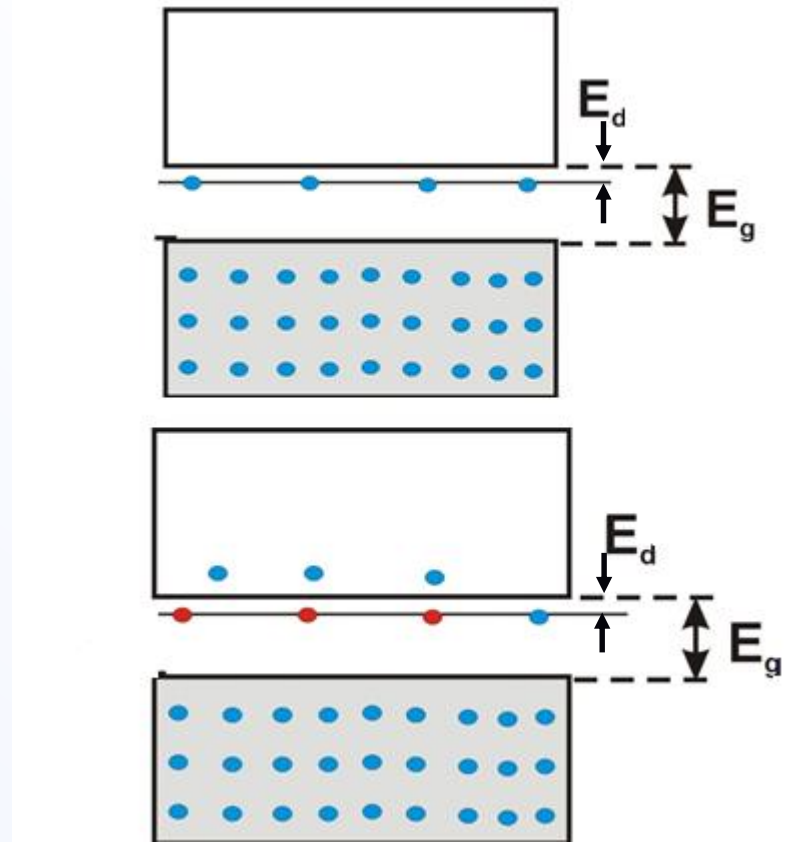
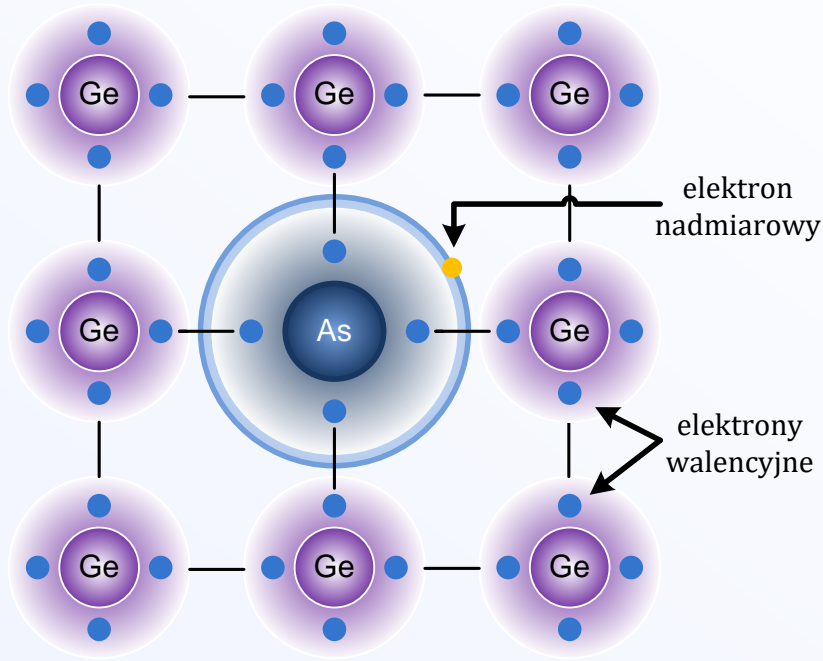
Jeśli ruchliwość nie zmienia się istotnie wraz ze zmianą temperatury to

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



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


Półprzewodnik typu n



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

PERIODIC CHART OF THE ELEMENTS

| IA | IIA | IIIB | IVB | VB | VIB | VIIIB | VIII | IB | IIB | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | VIIIA | 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.

* 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 |
|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|

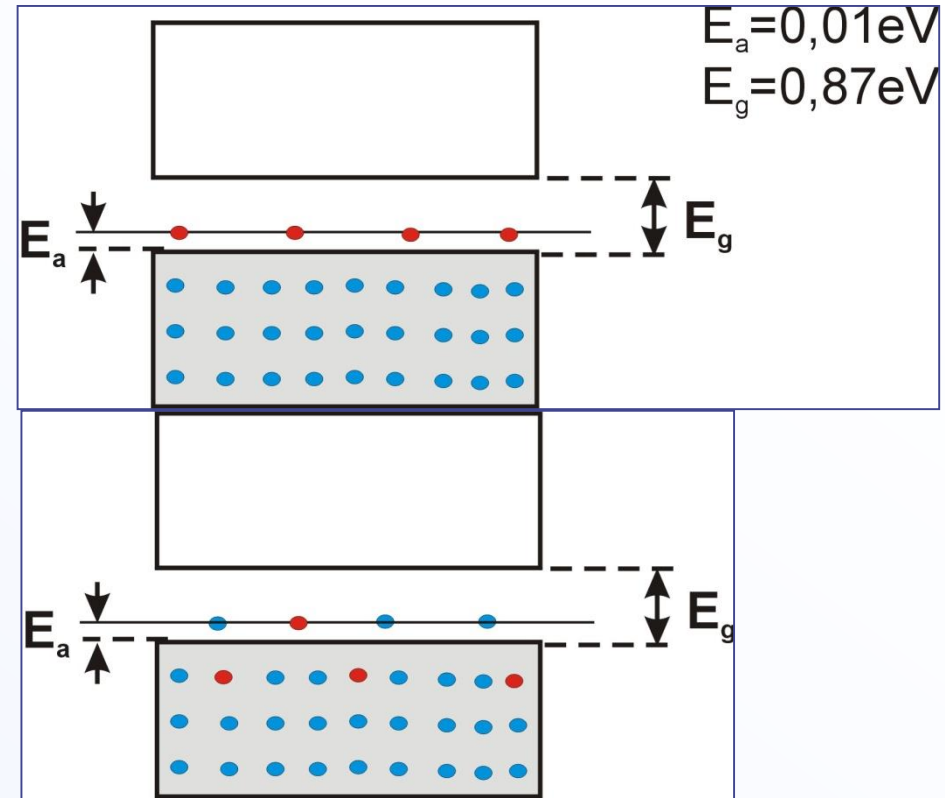
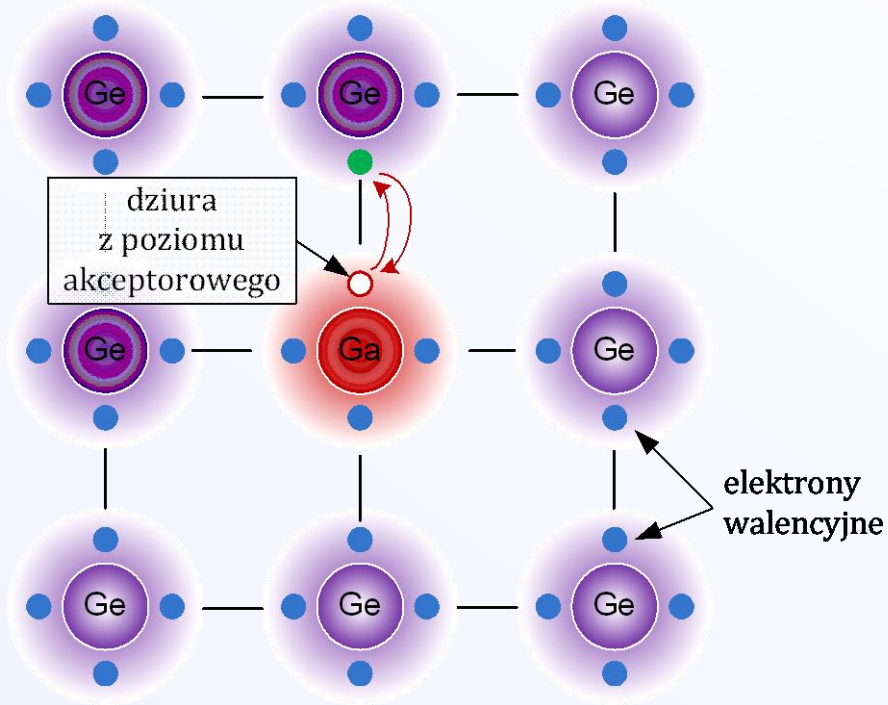
Atomic weights corrected to conform to the 1963 values of the Commission on Atomic Weights.

† 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) |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|

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

Półprzewodnik typu p




$\ln(\sigma)$

$1/T$

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

PERIODIC CHART OF THE ELEMENTS

| IA | IIA | IIIB | IVB | VB | VIB | VIIIB | VIII | IB | IIB | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | VIIIA | 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

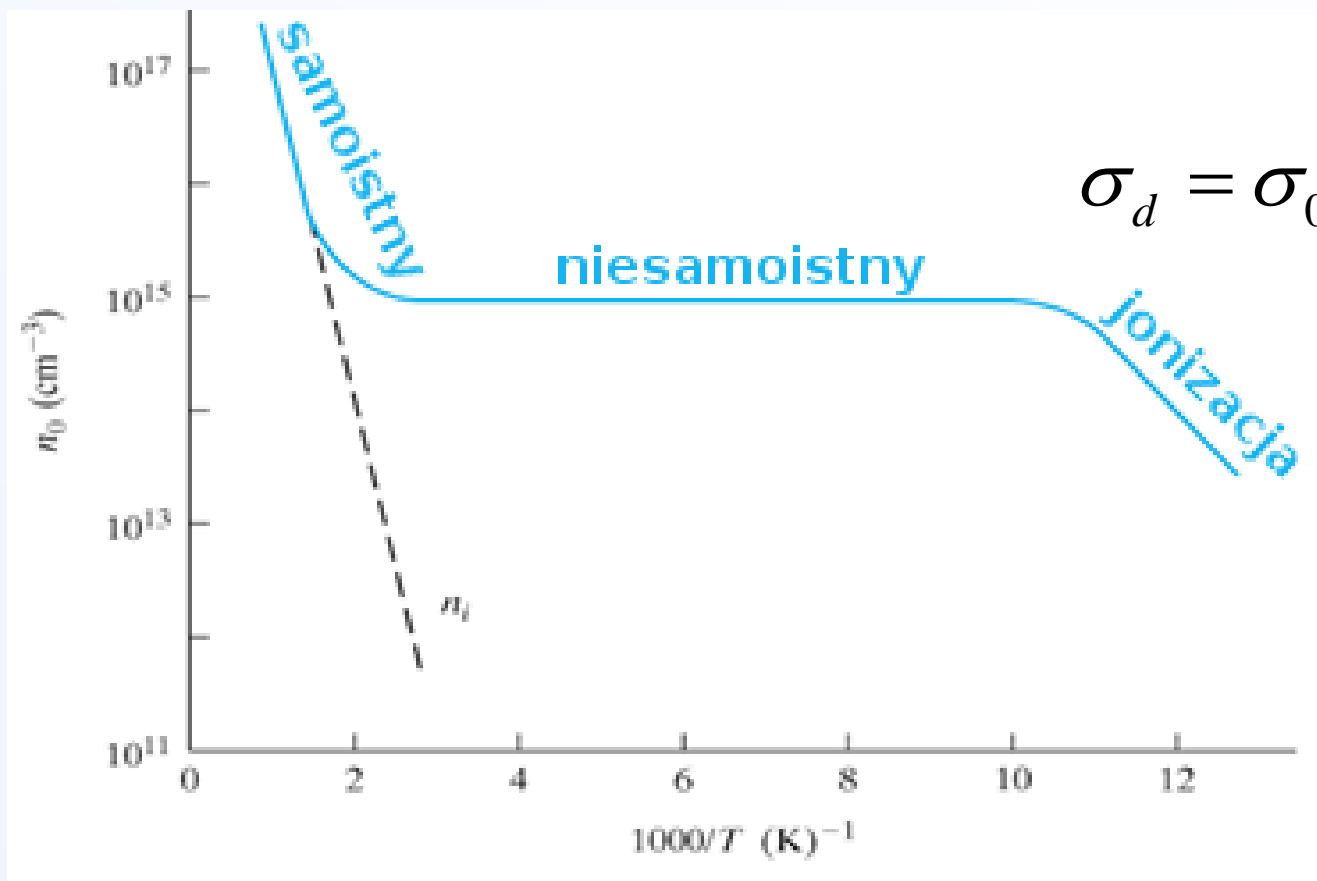
| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 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) |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|

Zależność przewodności od temperatury- półprzewodnik domieszkowy

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



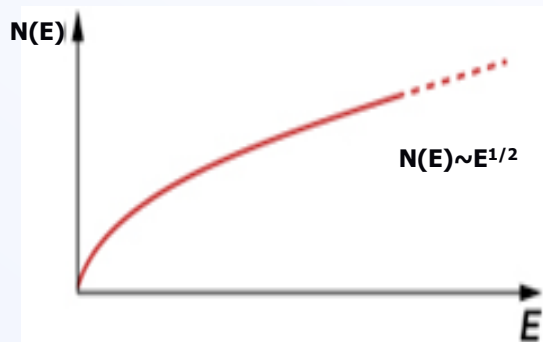
Przypomnienie z wykładu III

Jak liczy się koncentrację elektronów w metalu?

- **Najpierw wprowadza się pojęcie gęstości stanów, tzn. liczby stanów na jednostkę objętości, zawartych w pewnym przedziale energii**
- **Potem gęstość stanów mnoży się przez prawdopodobieństwo, że elektrony obsadzą te stany, czyli przez funkcję Fermiego-Diraca**
- **Potem sumuje się (całkuje) ten iloczyn po wszystkich energiach dostępnych w pasmie przewodnictwa**

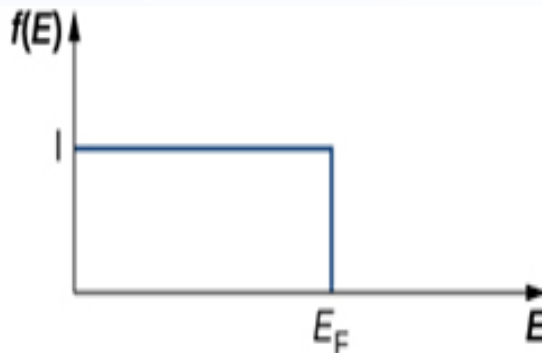
Jak to sobie przypomnimy, to obliczymy koncentrację elektronów w półprzewodniku typu n (p)...

Koncentracja elektronów w metalu



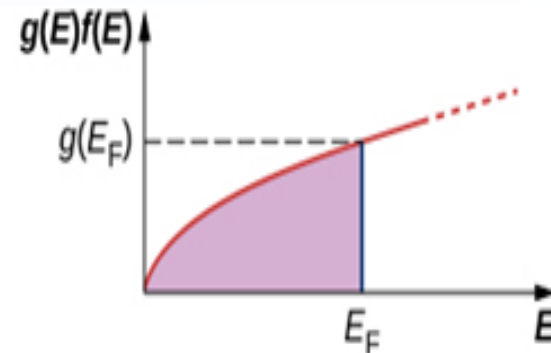
(a)

Gęstość stanów



(b)

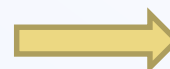
Funkcja rozkładu
Fermiego-Diraca



(c)

Gęstość stanów
obsadzonych
elektronami

$$n = \int_0^{E_F} f(E)N(E)dE = \frac{16\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{3h^3} E_F^{3/2}$$



pole pod wykresem c)

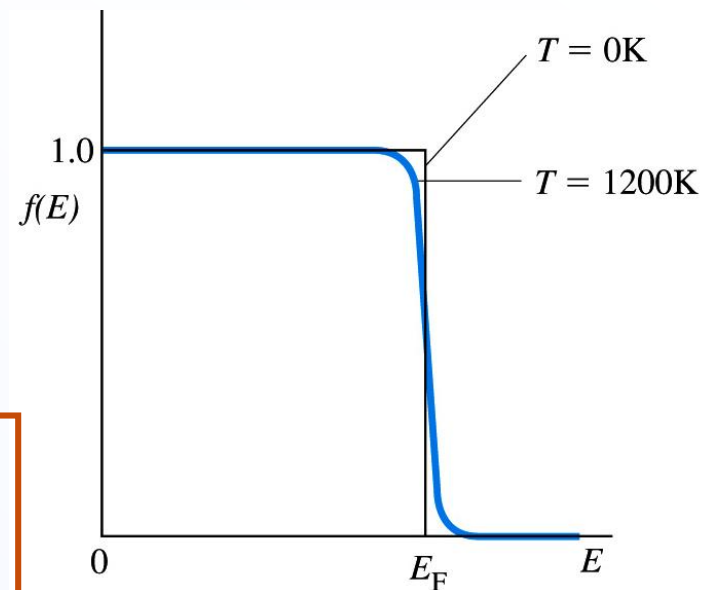
Funkcja rozkładu Fermiego-Diraca

Elektrony są fermionami.

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu fermionem:

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

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



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

$$f(E) = 0.5 \text{ dla } E = E_F$$

Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej w półprzewodniku

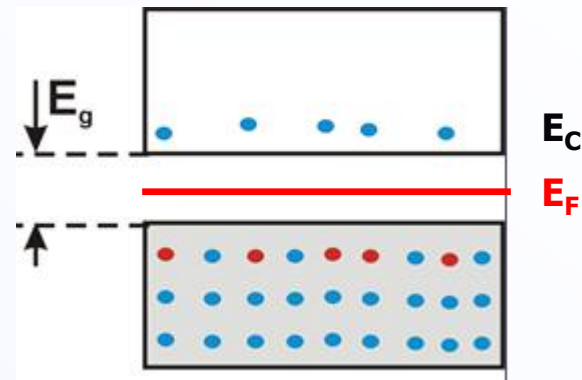
Koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa:

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

- kT (w 300K) = 0.025eV
- E_F znajduje się w połowie przerwy wzbronionej (w Si tj. 0.55eV)

$$\rightarrow E_C - E_F > kT$$

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



T=300K
półprzewodnik samoistny

Koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa

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

$$n_0 = N_C f(E_C) = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

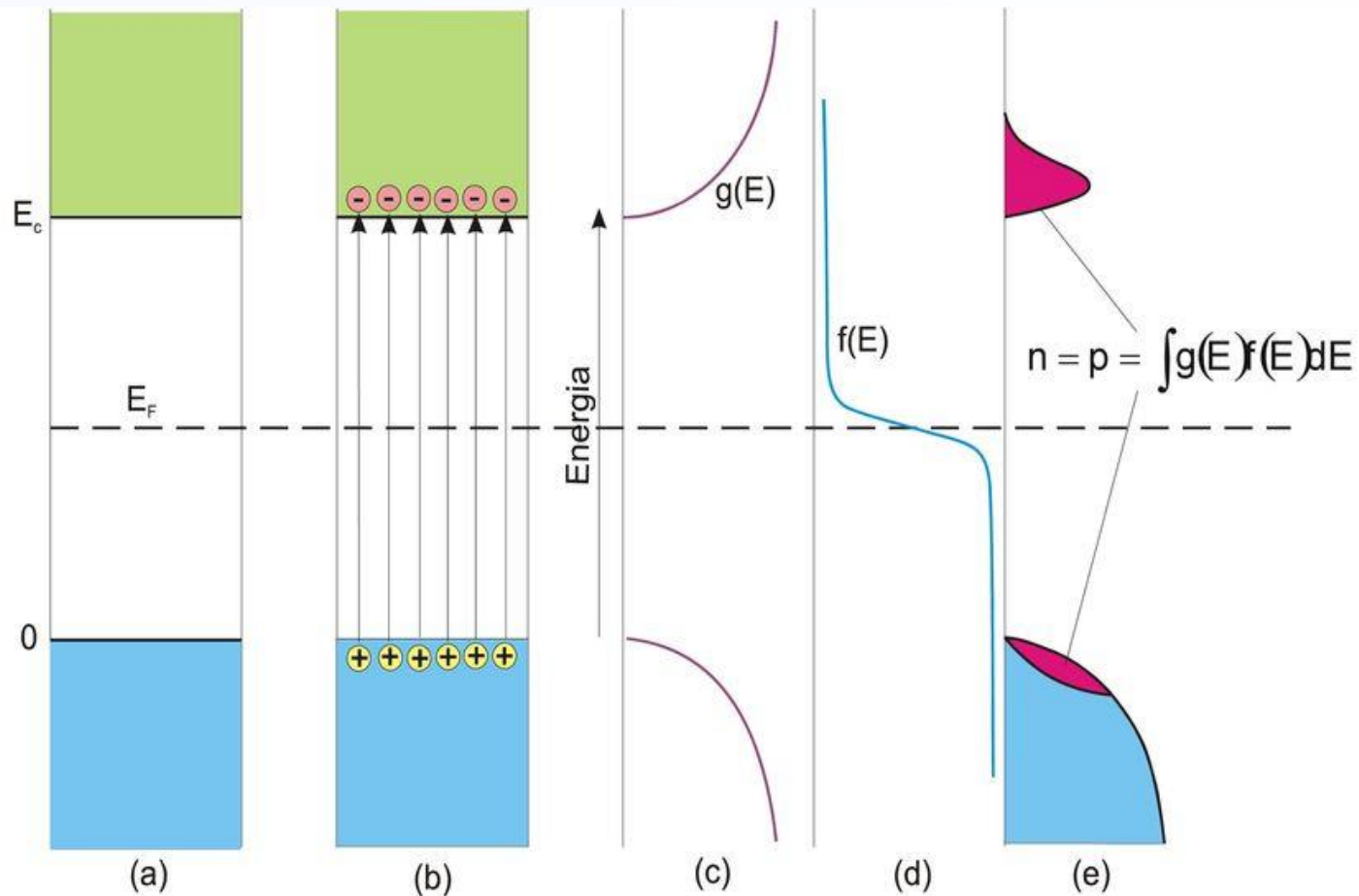
Koncentracja dziur w paśmie walencyjnym

$$p_0 = N_V [1 - f(E_V)] = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT}$$

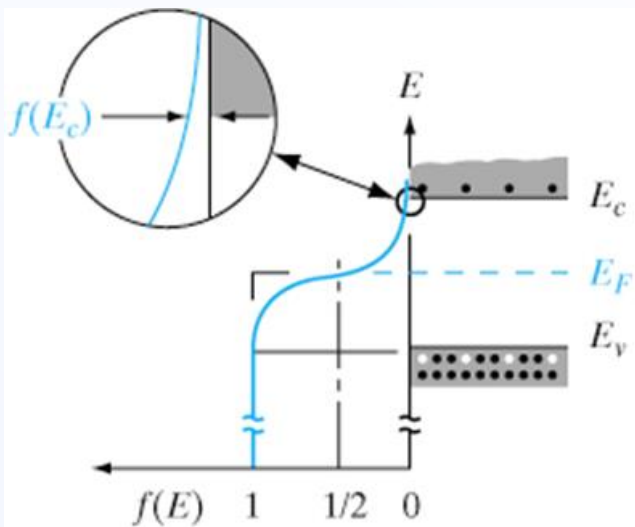
$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Koncentracja równowagowa elektronów w pasmie przewodnictwa jest równa koncentracji równowagowej dziur w paśmie walencyjnym

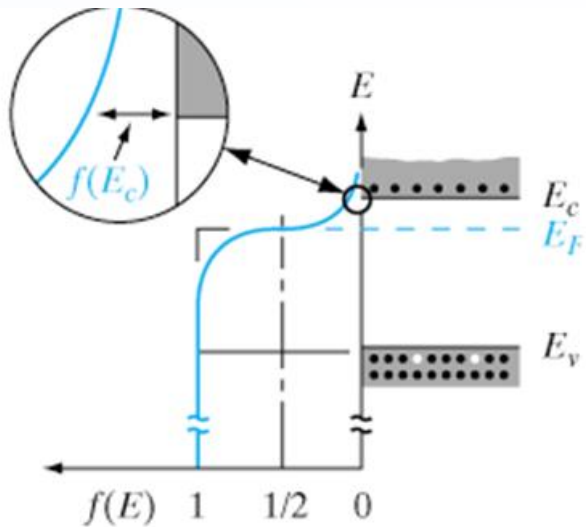
$$n_0 = p_0 = n_i$$



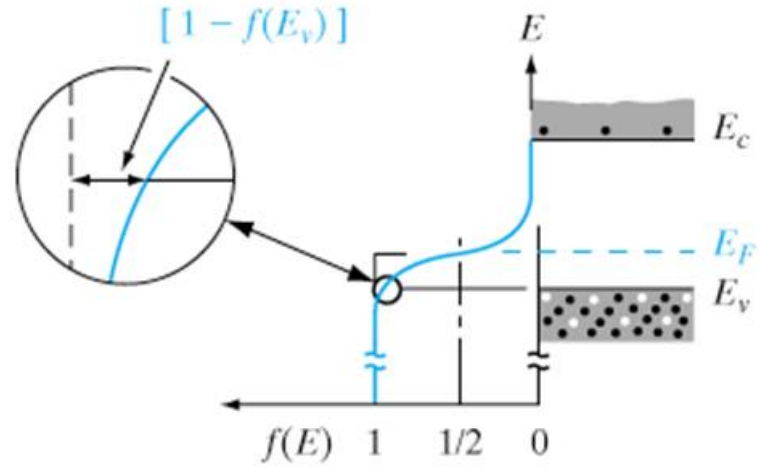
Schematyczne przedstawienie modelu półprzewodnika samoistnego. Pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa w 0 K (a) i $T > 0$ (b). Funkcje gęstości stanów (c), funkcje rozkładu (d) oraz koncentracja nośników (e).



(a) samoistny



(b) typu n



(c) typu p

Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej

Równanie prawdziwe dla wszystkich półprzewodników:

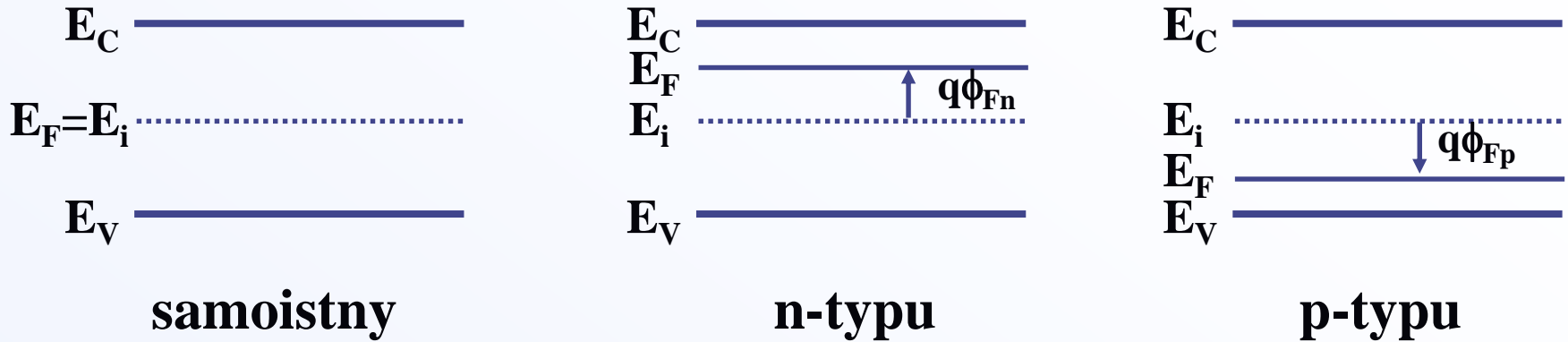
$$n_0 p_0 = n_i^2$$

W półprzewodniku samoistnym koncentracja dziur jest równa koncentracji elektronów, więc

$$n_0 = p_0 = n_i$$

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

Koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku domieszkowym



Wpływ domieszkowania na poziom Fermiego E_F

n-typu: poziom Fermiego przesuwana się do góry

p-typu: poziom Fermiego przesuwana się w dół

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

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

$$q\phi_F = E_F - E_i$$

Półprzewodnik w polu elektrycznym

$$F = -\frac{dE_p}{dx}$$

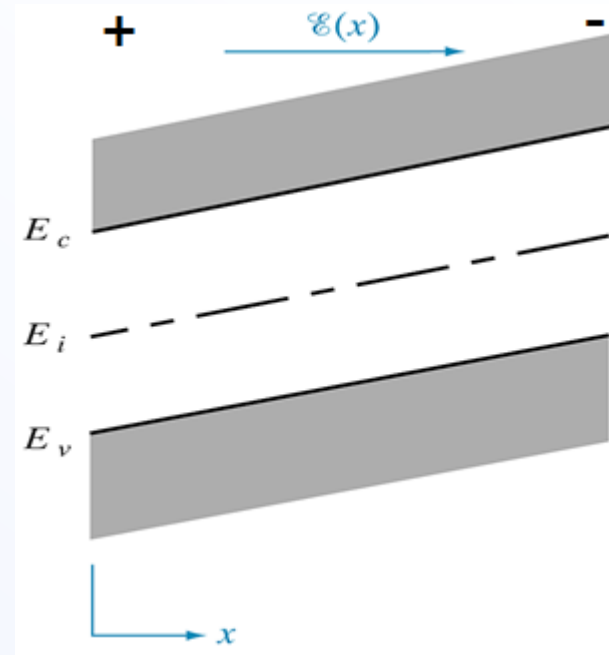
$$-e\varepsilon(x) = -(-e)\frac{dV}{dx}$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV}{dx}$$

$$\varepsilon(x) = \text{const} = c \rightarrow$$

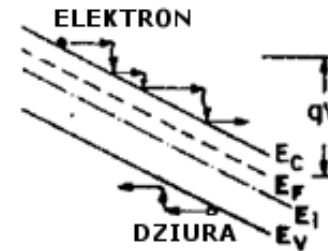
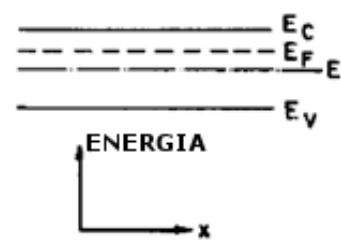
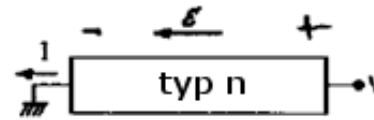
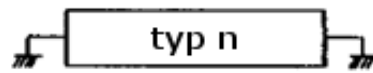
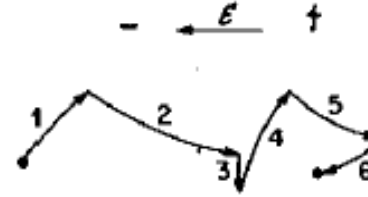
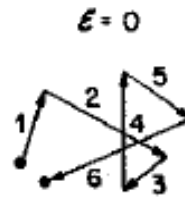
$$V = -cx \rightarrow$$

$$E_p = cex$$



Gęstość prądu unoszenia

Prąd unoszenia:
wynika z obecności
pola elektrycznego



$$J_x = qn\mu_n\epsilon_x$$

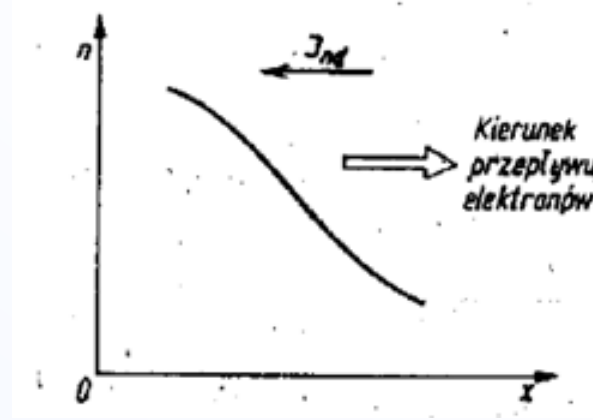
$$J_x = \sigma\epsilon_x$$

Całkowity prąd unoszenia elektronowy i dziurowy:

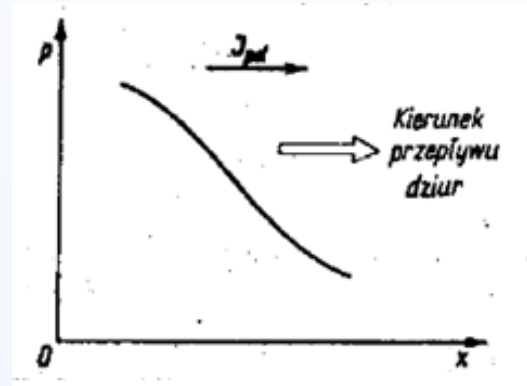
$$J_x = qn\mu_n\epsilon_x + qp\mu_p\epsilon_x = q(n\mu_n + p\mu_p)\epsilon_x = \sigma\epsilon_x$$

Gęstość prądu dyfuzyjnego

**Prąd dyfuzyjny:
wynika z gradientu
koncentracji
nośników**



$$J_n(\text{dyf}) = -(-q)D_n \frac{dn(x)}{dx} = +qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$



$$J_p(\text{dyf}) = -(+q)D_p \frac{dp(x)}{dx} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Całkowity prąd w obecności pola elektrycznego

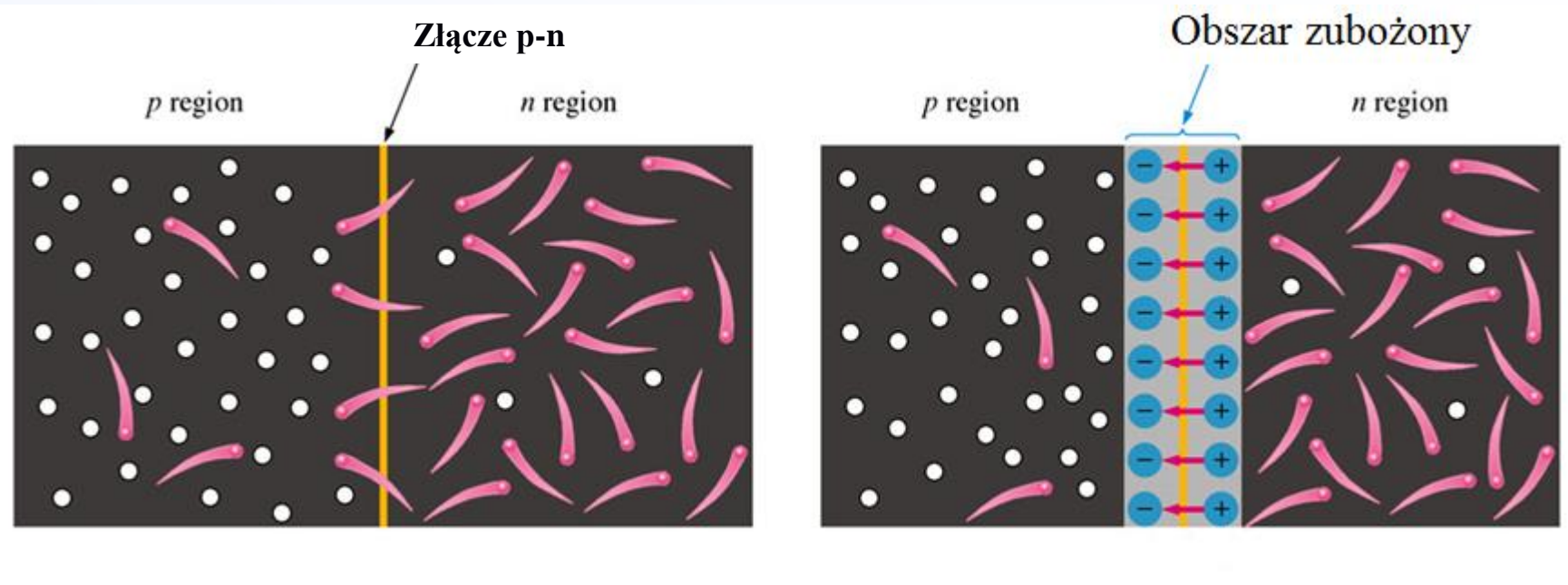
Całkowity prąd jest sumą prądu dyfuzyjnego (elektronowego i dziurowego) i prądu unoszenia (elektronowego i dziurowego) :

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}_n(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_p(\mathbf{x})$$

$$J_n(x) = q\mu_n n(x)\varepsilon(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p(x) = q\mu_p p(x)\varepsilon(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

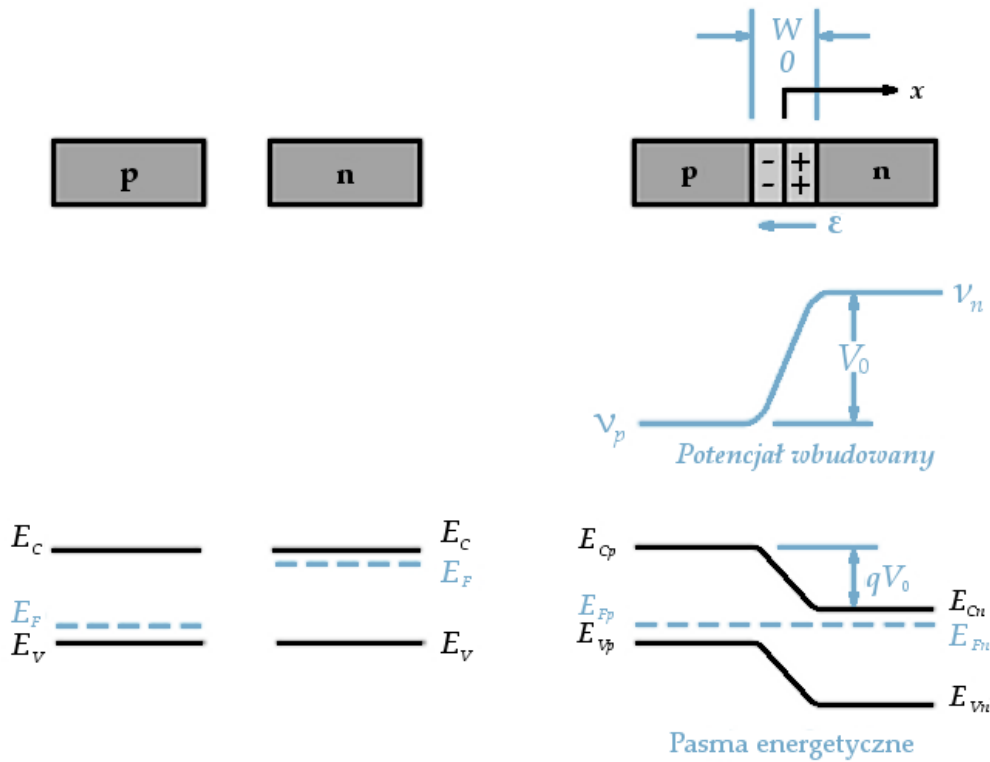
Złącze p-n



Tworzy się złącze p-n

Złącze po utworzeniu

Tworzenie się złącza p-n - diagram pasmowy złącza



W stanie równowagi gradient poziomu Fermiego jest równy zero!

$$\frac{dE_F}{dx} = 0$$

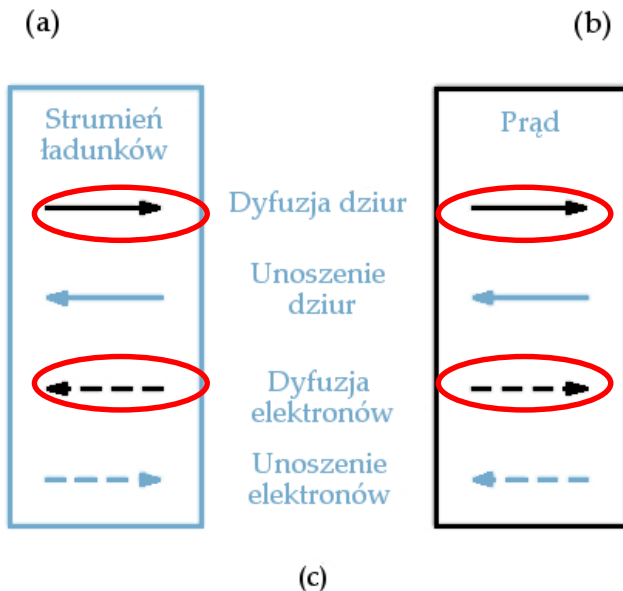
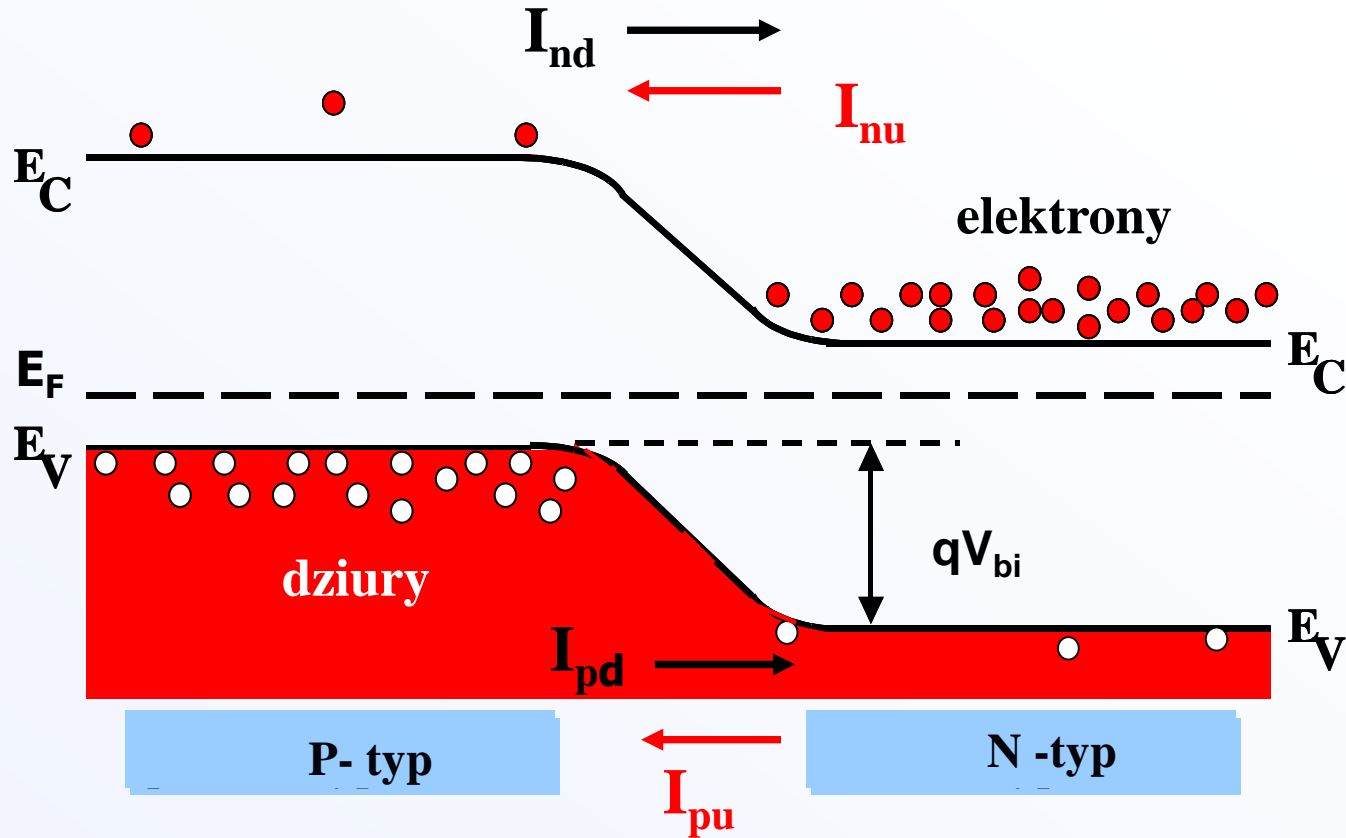


Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej

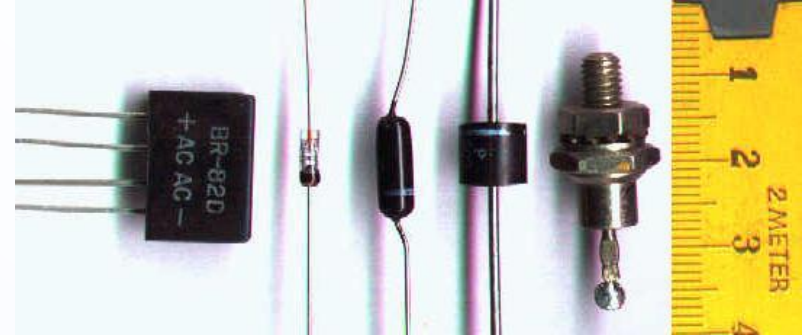


I_{nd} (I_{pd}) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

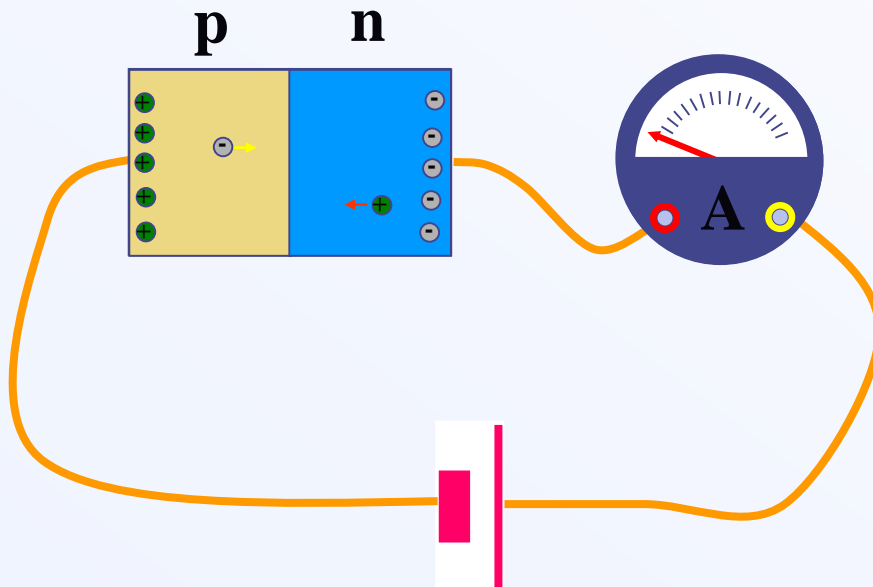
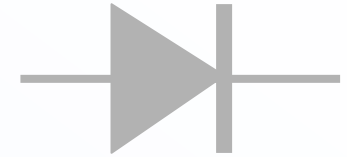
I_{nu} (I_{pu}) – prąd unoszenia elektronowy (dziurowy)

V_{bi} – potencjał wbudowany

Złącze p-n dioda półprzewodnikowa



Charakterystyka I-V - nieliniowa



Polaryzacja w kier.
przewodzenia

Polaryzacja
zaporowa

