

# Wykład VI a

## Koncentracja elektronów i dziur w półprzewodniku Złącze p-n



# Przypomnienie z wykładu III

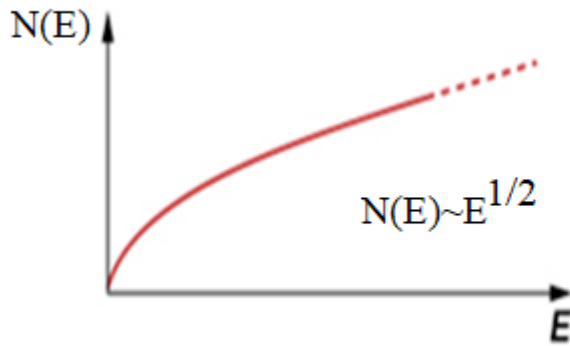
**Jak liczy się koncentrację elektronów w metalu?**

- **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**

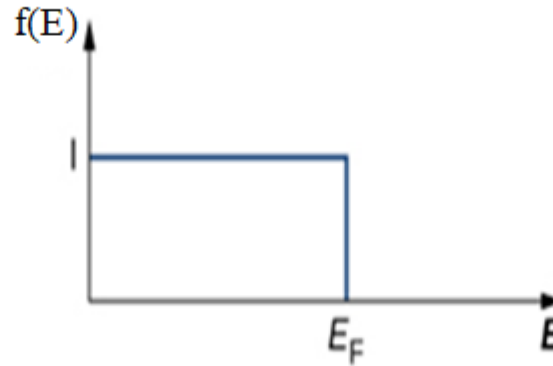
**Jak to sobie przypomnimy, to obliczymy koncentrację elektronów w półprzewodniku typu n (p)...**



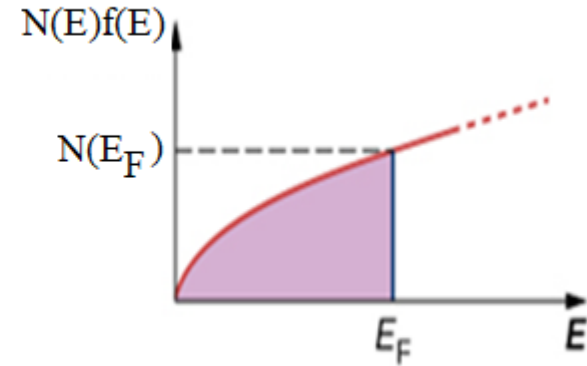
# Koncentracja elektronów w metalu



Gęstość stanów

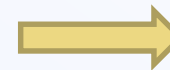


Funkcja rozkładu  
Fermiego-Diraca



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)



# Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej w półprzewodniku

Koncentracja elektronów w metalu  $n = \int_0^{E_F} f(E)N(E)dE$

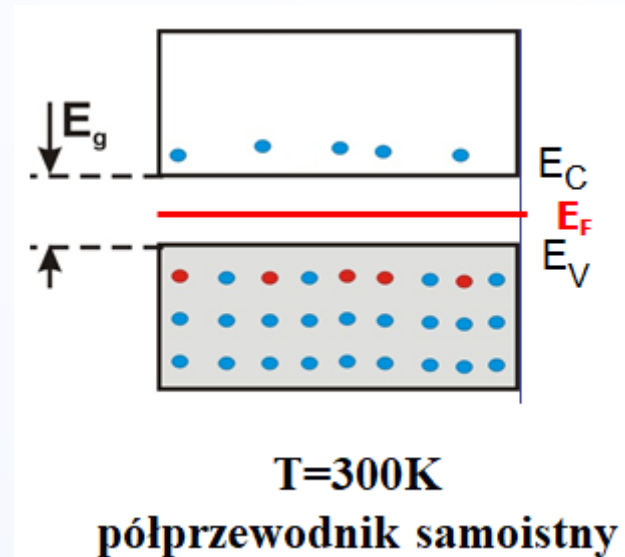
Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa:

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

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

$$\rightarrow E_C - E_F > kT$$

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



# Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa

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

$$f(E) \sim \exp\left[-\frac{(E - E_F)}{kT}\right]; \quad N(E) \sim \sqrt{E}$$

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

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

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

Uwaga:  
Pojawia się pojęcie masy efektywnej elektronu  $m_n^*$



gdzie  $N_C$  - efektywna gęstość stanów (wszystkie stany zastępuje się stanami na dnie pasma przewodnictwa)

Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa =  
(efektywna gęstość stanów  $N_C$ ) x (funkcja Boltzmann)



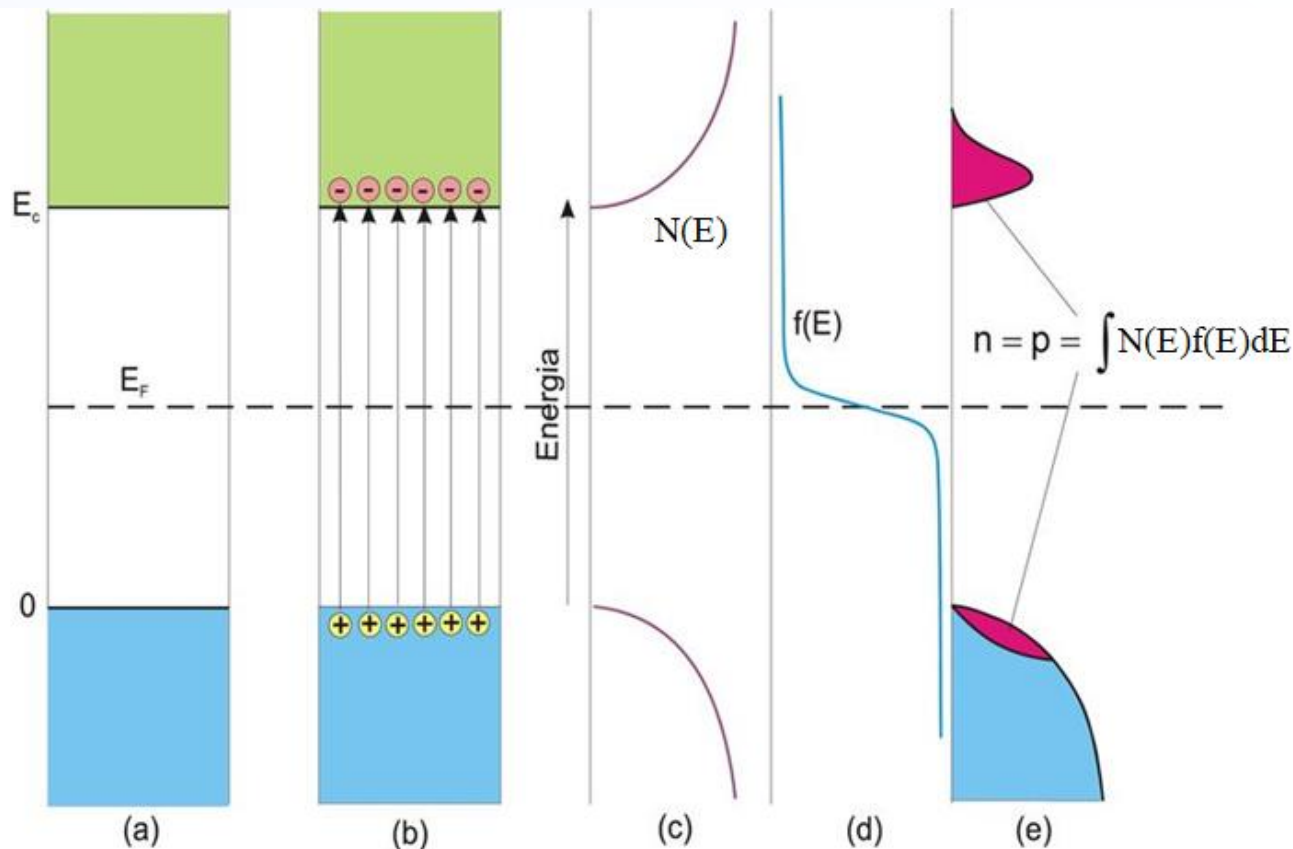
# Koncentracja dziur w paśmie walencyjnym

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

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

Tu też pojawia się pojęcie masy efektywnej, dla dziur  $m_p^*$





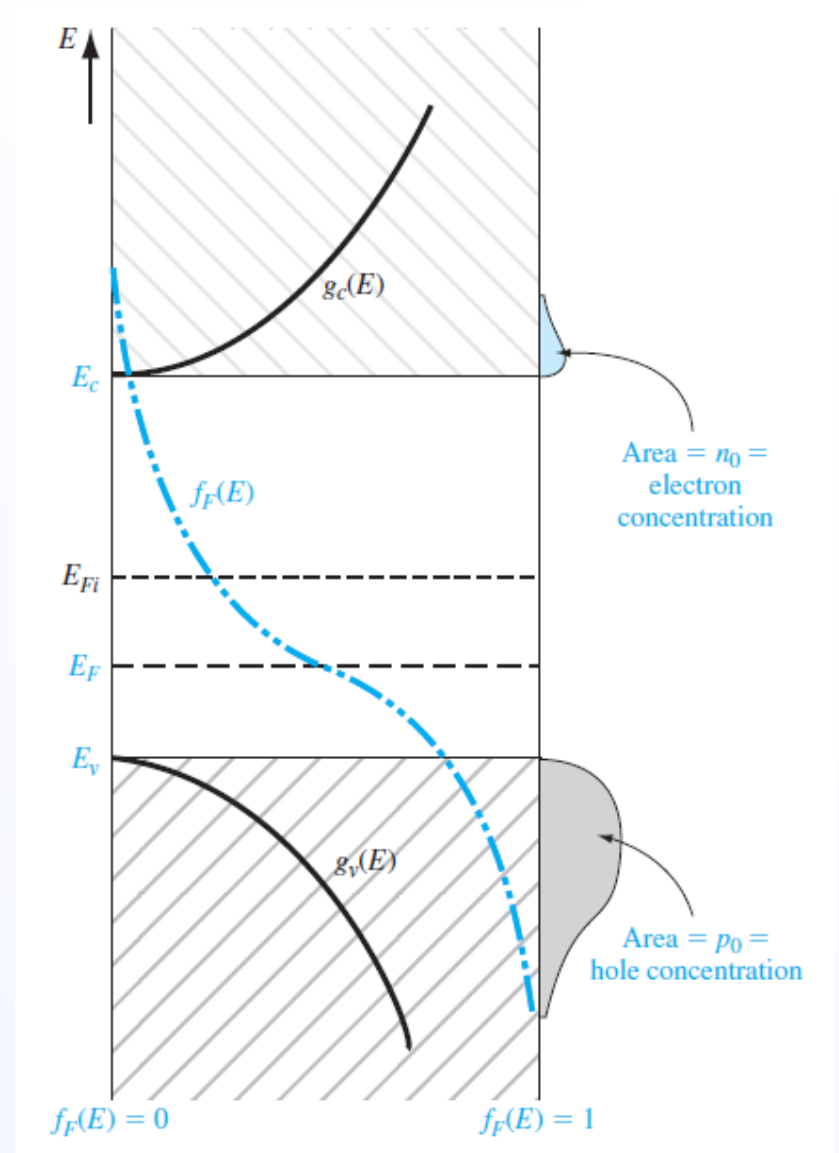
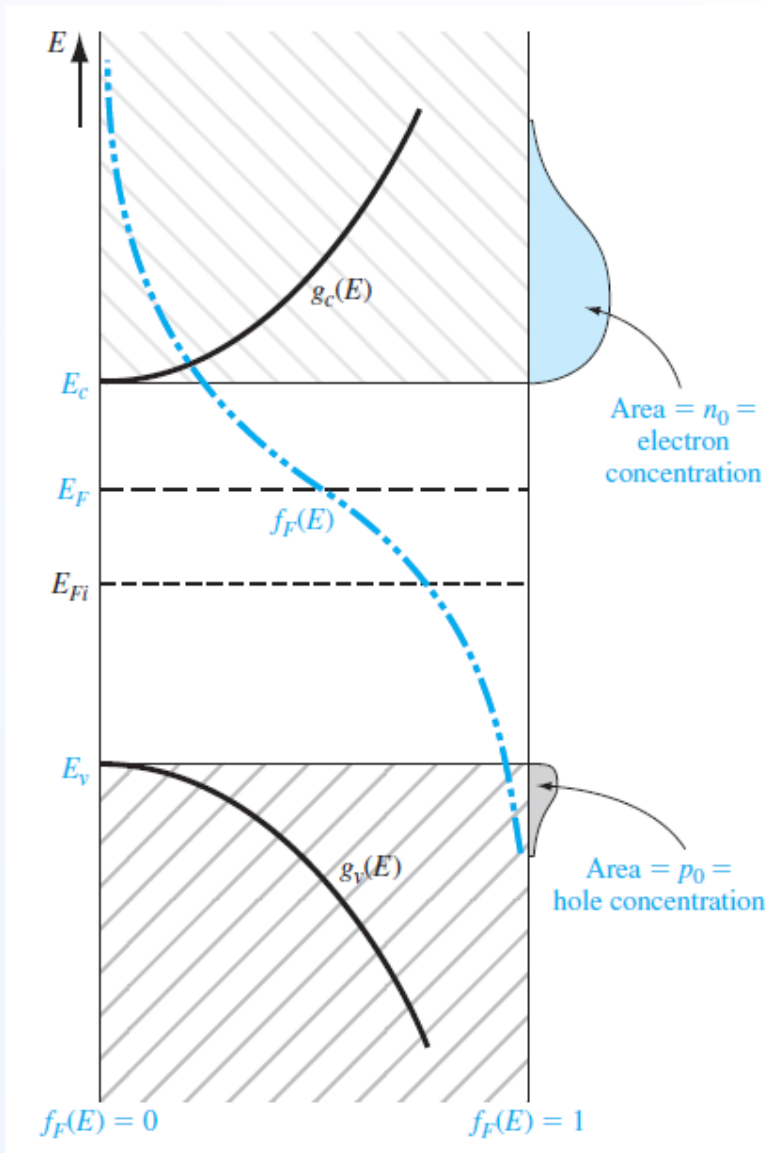
Schematyczne przedstawienie modelu półprzewodnika samoistnego. Pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa w 0 K (a) i  $T > 0$  (b). Funkcje gęstości stanów (c), funkcje rozkładu (d) oraz koncentracja nośników (e).

W półprzewodniku samoistnym koncentracja równowagowa elektronów w paśmie przewodnictwa jest równa koncentracji równowagowej dziur w paśmie walencyjnym

$$n_0 = p_0 = n_i$$

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$





Półprzewodnik typu n

$$n_0 > p_0$$

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

Półprzewodnik typu p

$$p_0 > n_0$$





# Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej

Równanie prawdziwe dla wszystkich półprzewodników:  $n_0 p_0 = n_i^2$  (\*)

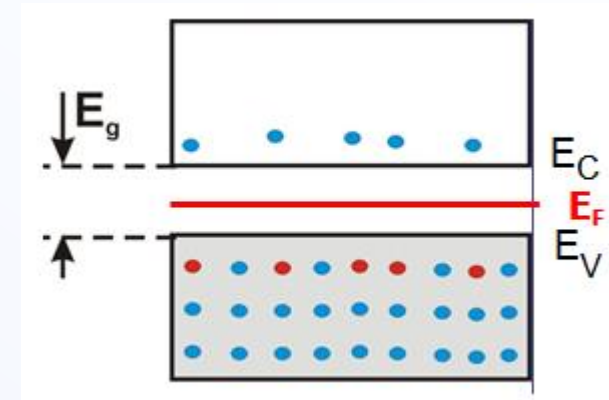
W półprzewodniku samoistnym  $n_0 = p_0 = n_i$

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

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

Po podstawieniu do równania (\*)

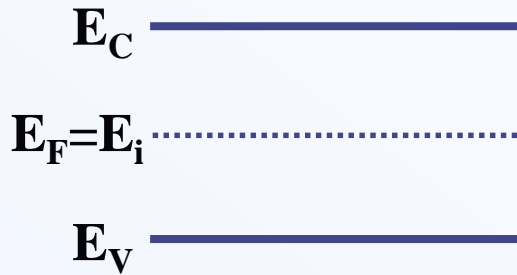
$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_g / 2kT}$$



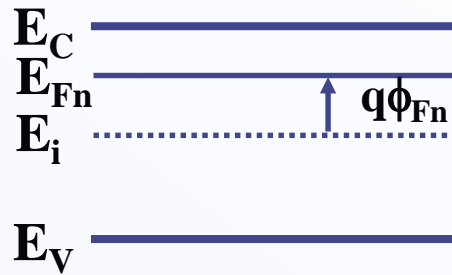
gdzie  $E_C - E_V = E_g$



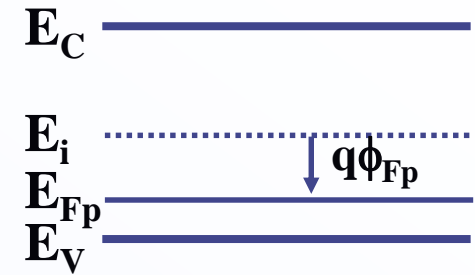
# Koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku domieszkowym



samoistny



n-typu



p-typu

**Wpływ domieszkowania na poziom Fermiego  $E_F$**

**n-typu: poziom Fermiego przesuwają się do góry**

**p-typu: poziom Fermiego przesuwają się w dół**

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

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

$$q\phi_F = E_F - E_i$$



# Półprzewodnik w polu elektrycznym

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

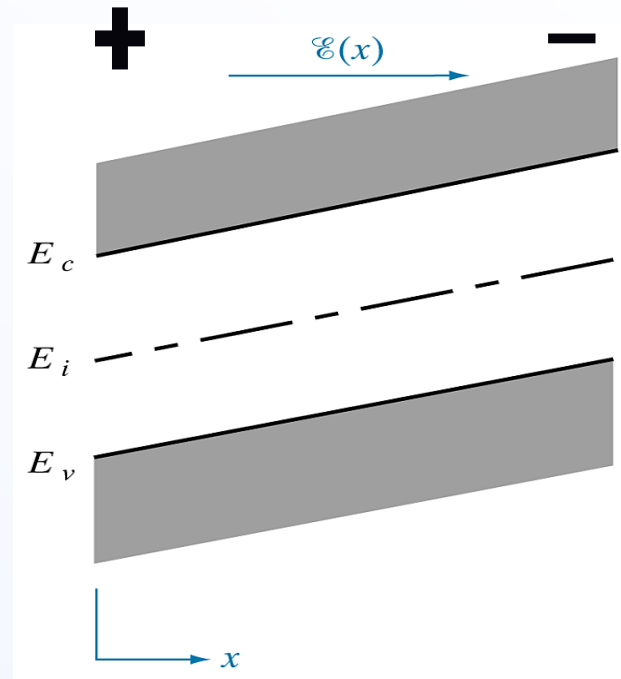
$$-e\varepsilon(x) = -(-e)\frac{dV}{dx}$$

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

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

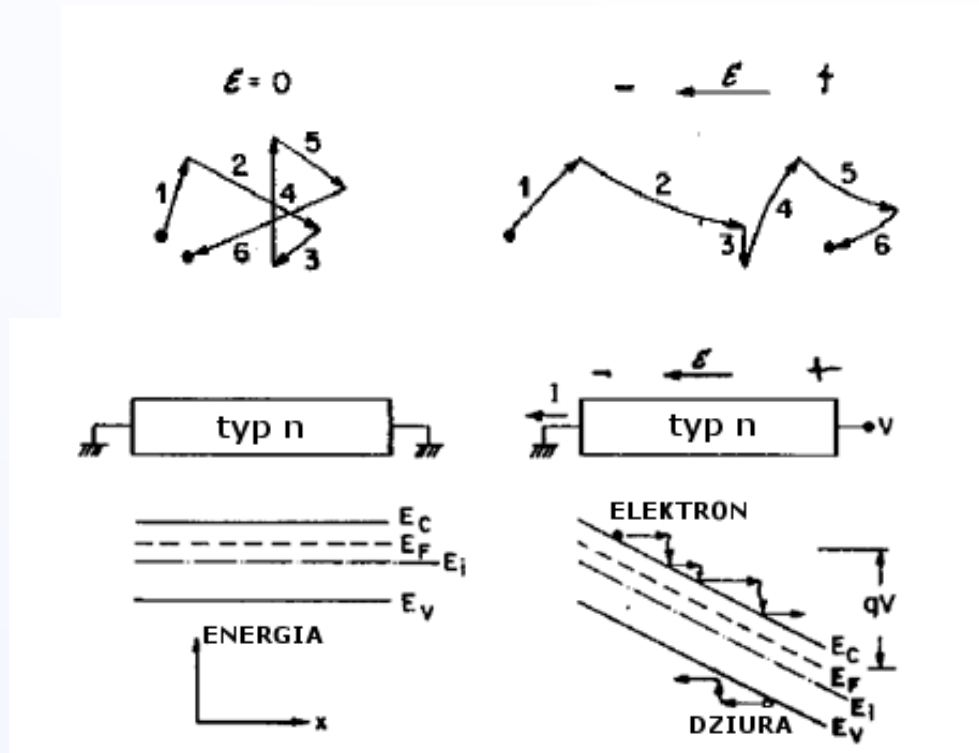
$$V = -cx \rightarrow$$

$$E_p = cex$$



# Gęstość prądu unoszenia

Prąd unoszenia:  
wynika z obecności  
pola elektrycznego



$$J_x = \sigma \varepsilon_x$$

$$J_x = qn \mu_n \varepsilon_x$$

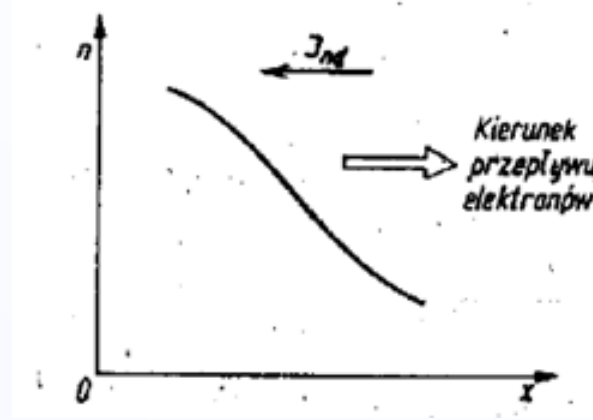
Całkowity prąd unoszenia elektronowy i dziurowy:

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

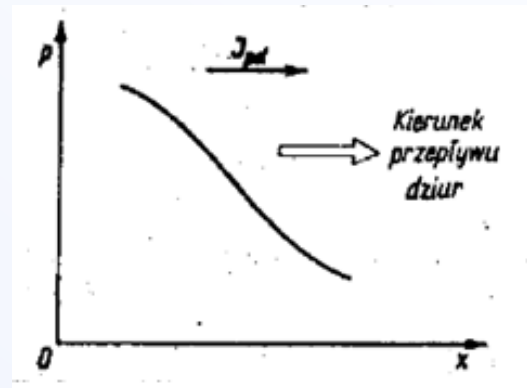


# Gęstość prądu dyfuzyjnego

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) :

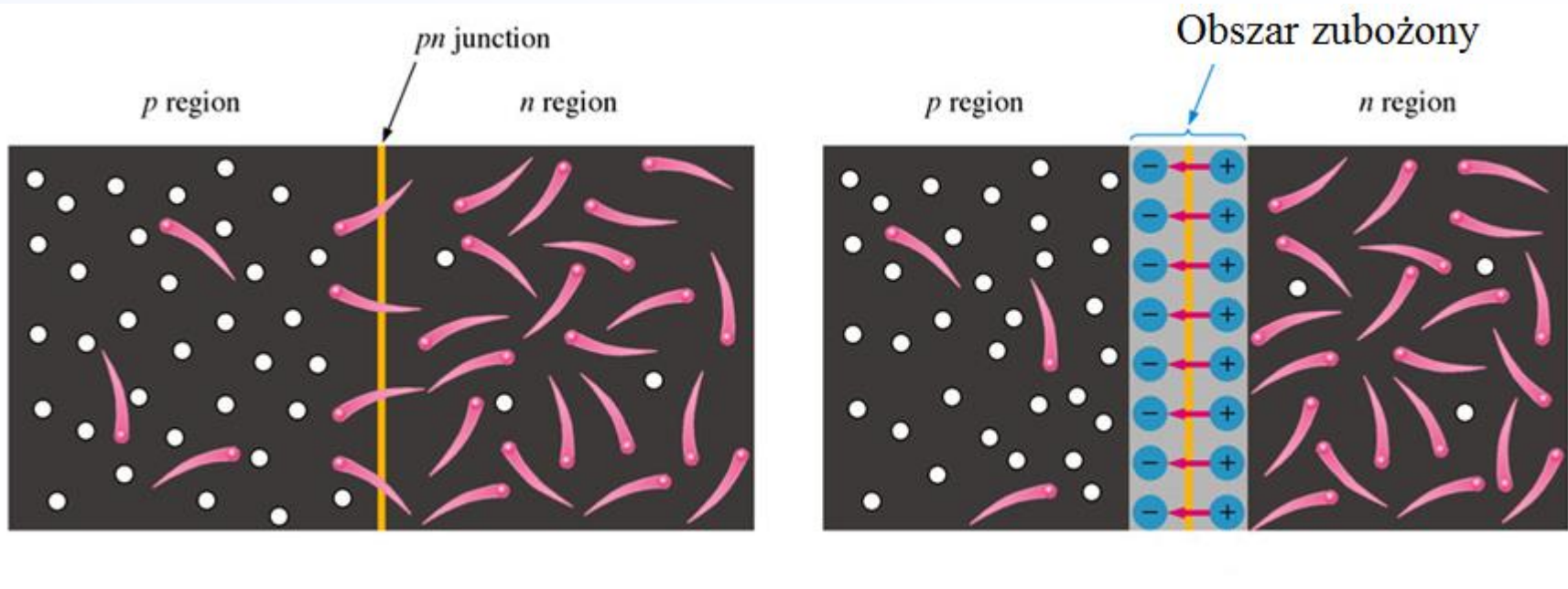
$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}_n(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_p(\mathbf{x})$$

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

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



# Złącze p-n

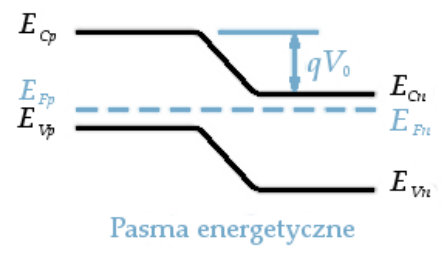
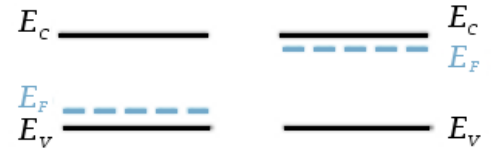
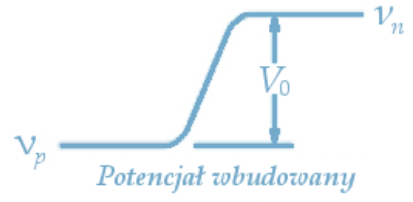
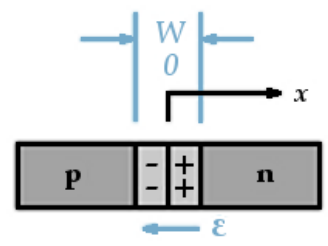


**Tworzy się złącze p-n**

**Złącze po utworzeniu**

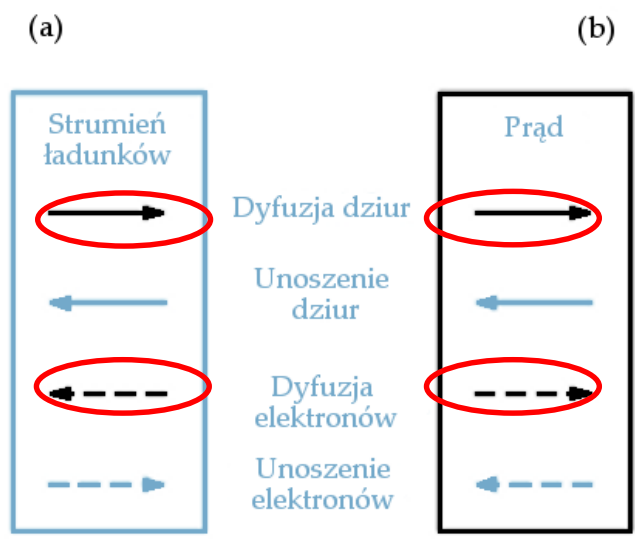


# Tworzenie się złącza p-n - diagram pasmowy złącza



**W stanie równowagi gradient poziomu Fermiego jest równy zeru!**

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



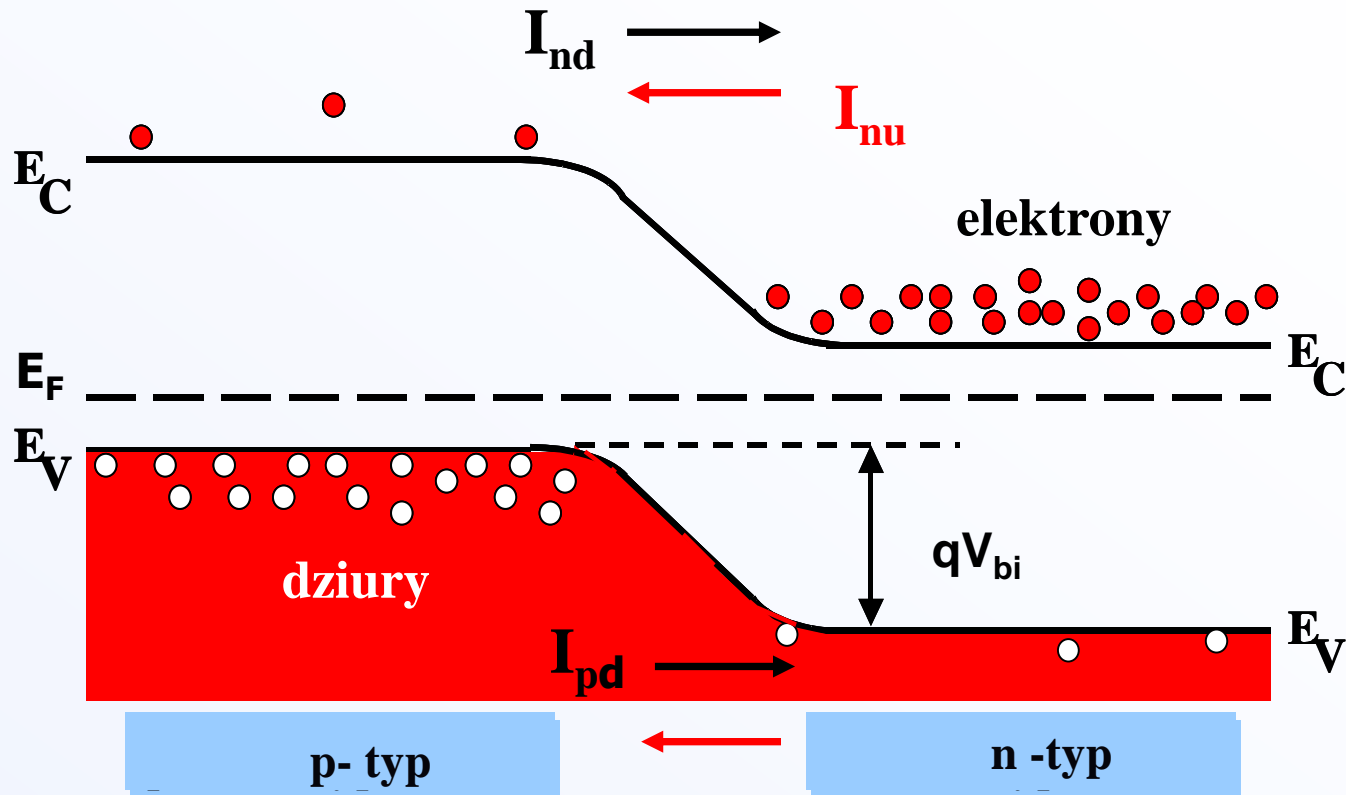
Dyfuzja dziur  
Unoszenie dziur  
Dyfuzja elektronów  
Unoszenie elektronów

(c)





# Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej



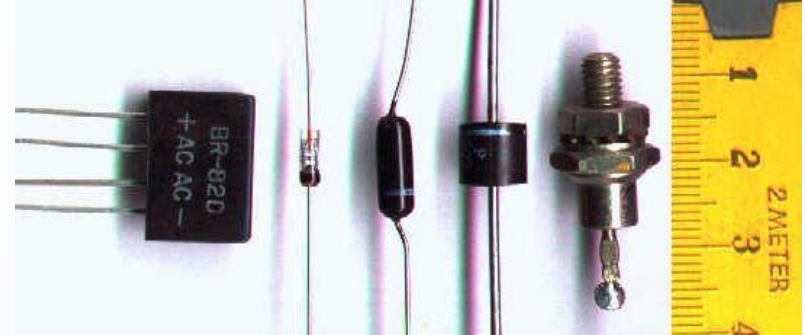
$I_{nd}$  ( $I_{pd}$ ) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

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

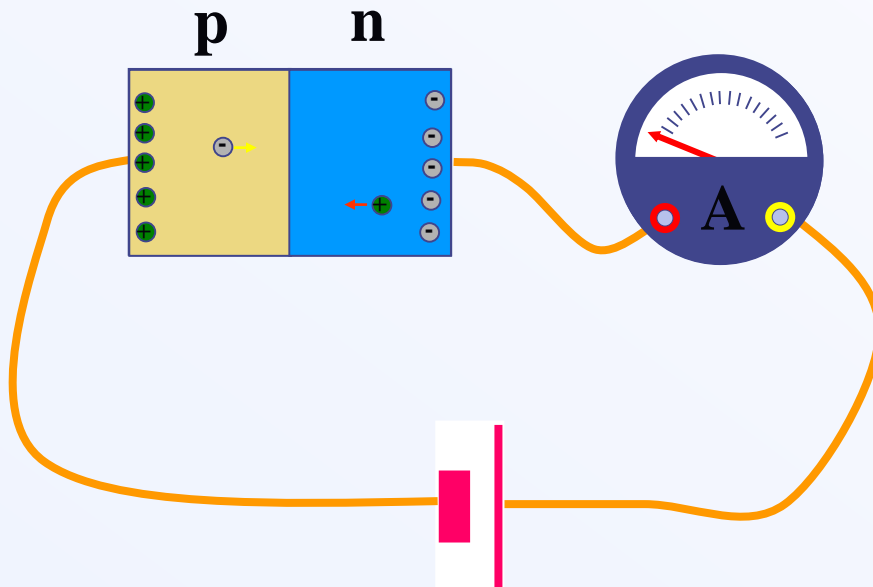
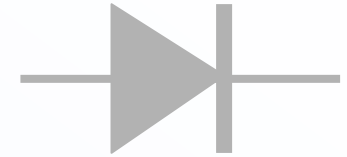
$V_{bi}$  – potencjał wbudowany



# Złącze p-n dioda półprzewodnikowa



Charakterystyka I-V - nieliniowa



Polaryzacja w kier.  
przewodzenia

Polaryzacja  
zaporowa

