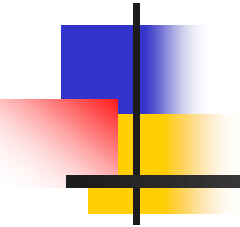
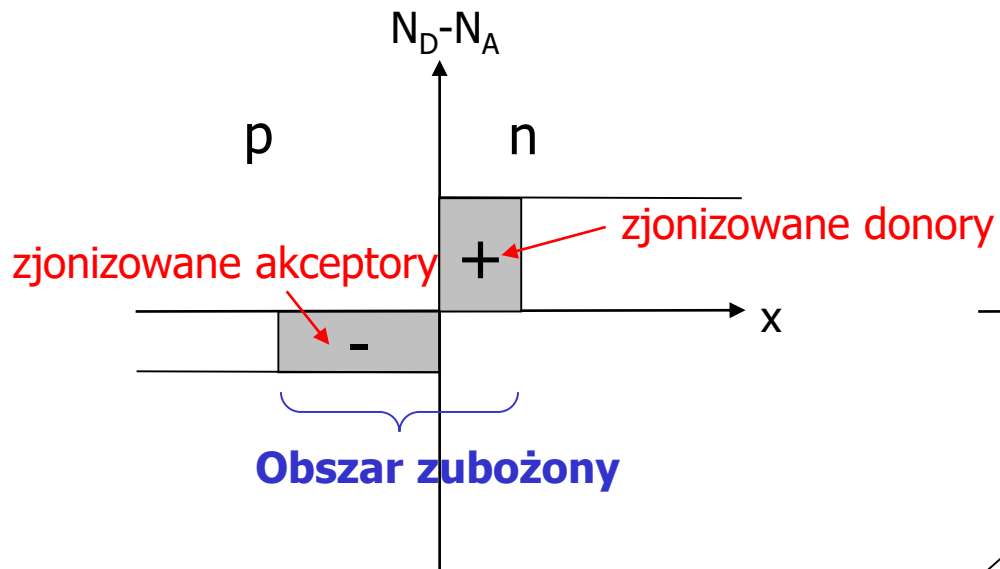
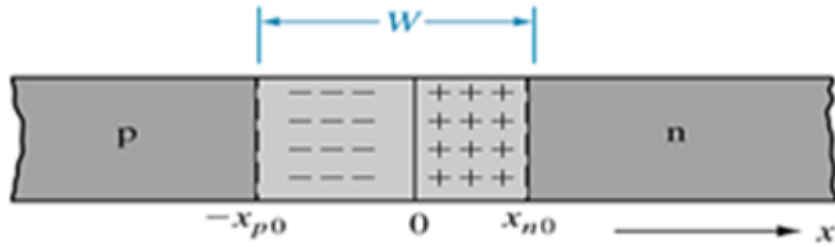


Wykład IX

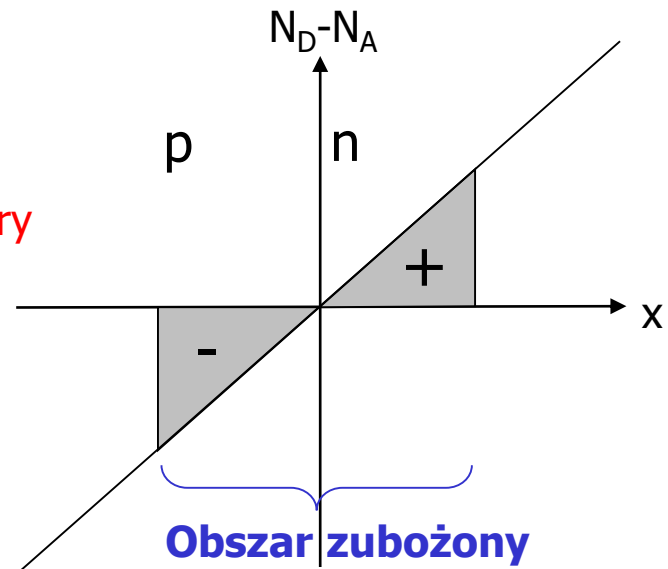
Złącze P-N



Złącze p-n skokowe i liniowe



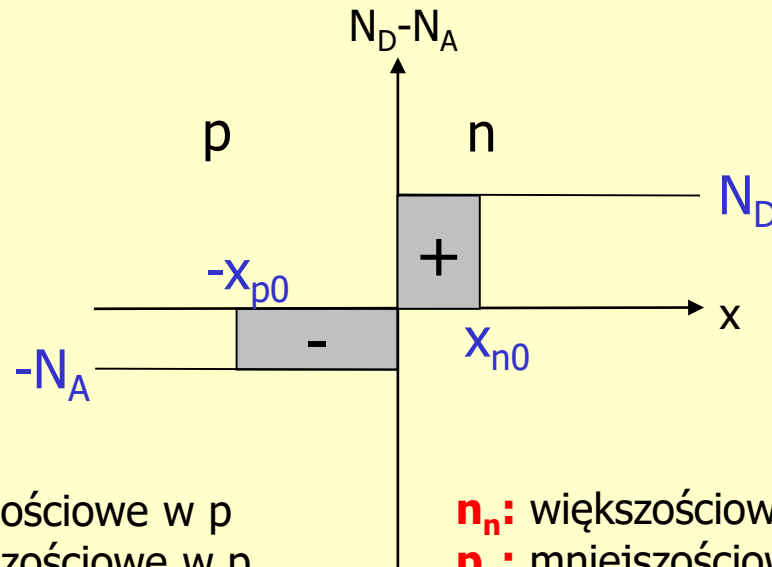
skokowe



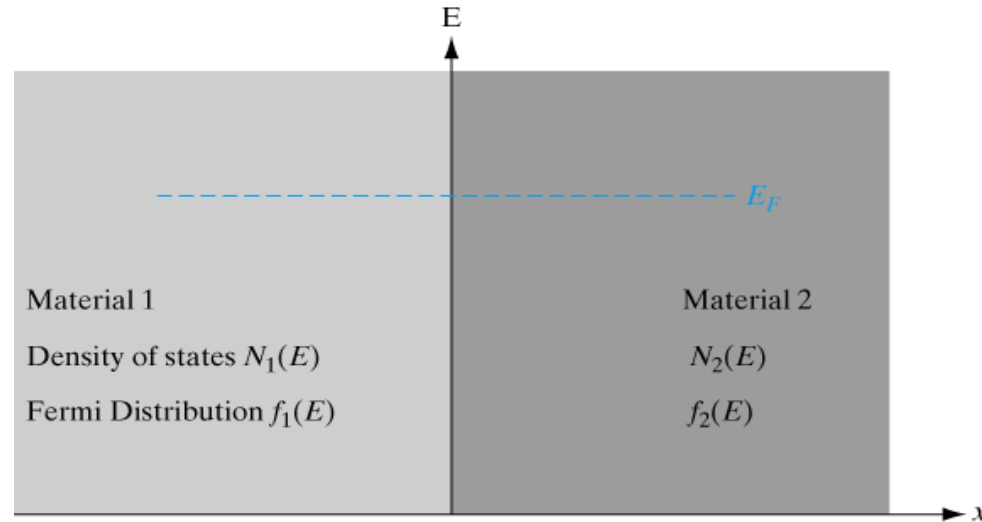
liniowe

Złącze p-n skokowe

Warunek neutralności $qAx_{p0}N_a = qAx_{n0}N_d$



Złącze półprzewodnikowe



Pokażemy, że w stanie równowagi gradient poziomu Fermiego jest równy zero!

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

Density of states – gęstość stanów



Gradient Poziomu Fermiego na złączu

Rozważmy stan o energii E : szybkość przejścia elektronów ze stanu 1 do stanu 2 jest \sim do liczby stanów zajętych o energii E w materiale 1 razy liczba stanów pustych o energii E w materiale 2

Szybkość przejścia z 1 do 2 : $\propto \{N_1(E)f_1(E)\} \times \{N_2(E)[1 - f_2(E)]\}$

Szybkość przejścia z 2 do 1 : $\propto \{N_2(E)f_2(E)\} \times \{N_1(E)[1 - f_1(E)]\}$

W stanie równowagi :

$$\{N_1(E)f_1(E)\} \times \{N_2(E)[1 - f_2(E)]\} = \{N_2(E)f_2(E)\} \times \{N_1(E)[1 - f_1(E)]\}$$

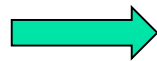
Gradient Poziomu Fermiego na złączu

$$N_1(E)f_1(E)N_2(E) - N_1(E)f_1(E)N_2(E)f_2(E) = N_2(E)f_2(E)N_1(E) - N_2(E)f_2(E)N_1(E)f_1(E)$$

$$N_1(E)f_1(E)N_2(E) = N_2(E)f_2(E)N_1(E) \quad \longrightarrow$$

$$f_1(E) = f_2(E) \quad \longrightarrow \quad f_1(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_{F1})/kT}} = f_2(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_{F2})/kT}}$$

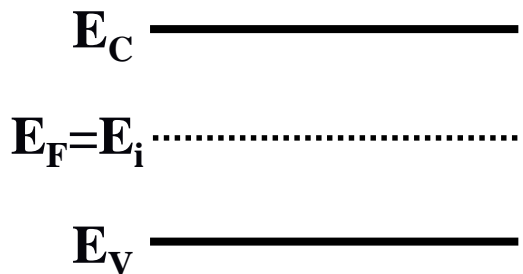
$$\longrightarrow \quad E_{F1} = E_{F2}$$



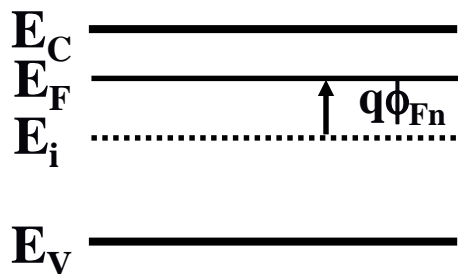
$$\boxed{\frac{dE_F}{dx} = 0}$$

A więc w stanie równowagi gradient poziomu Fermiego jest równy zeru!

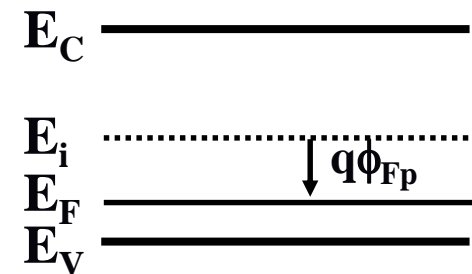
Położenie poziomu Fermiego i koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku domieszkowym



samoistny



n-typu



p-typu

Wpływ domieszkowania na poziom Fermiego E_F

n-typu: poziom Fermiego przesuwają się do góry

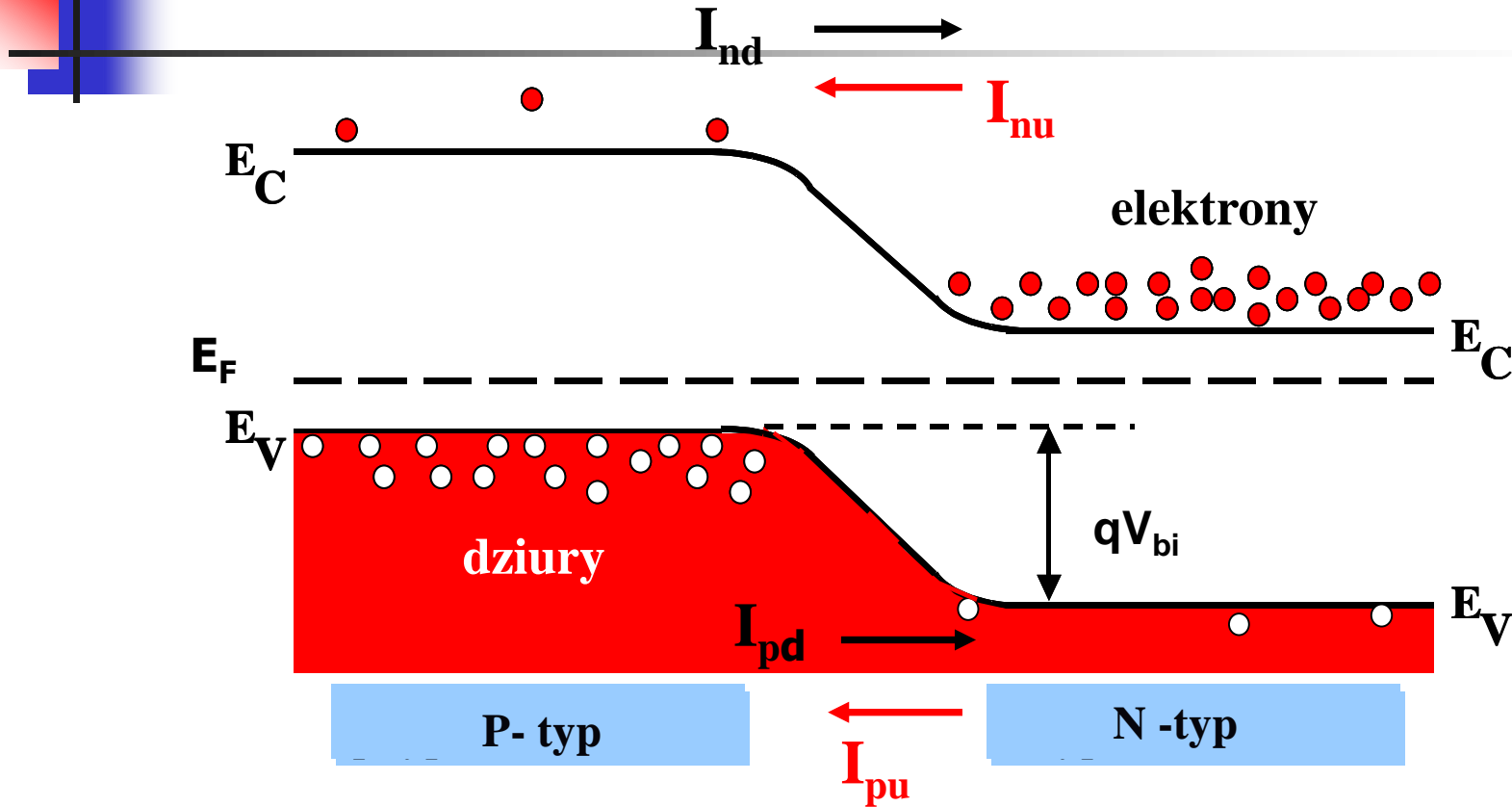
p-typu: poziom Fermiego przesuwają się w dół

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

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

$$q\phi_F = E_F - E_i$$

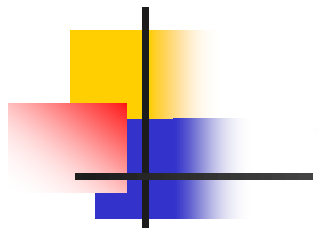
Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej



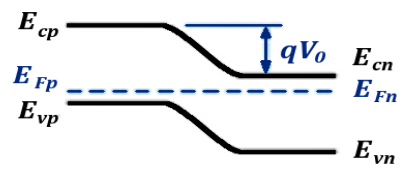
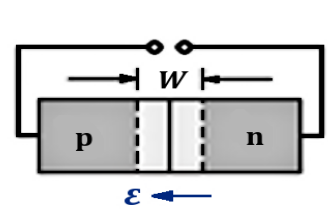
I_{nd} (I_{pd}) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

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

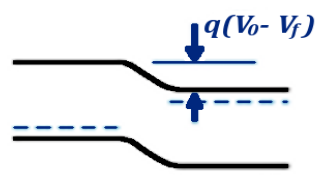
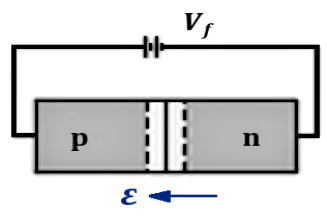
V_{bi} – potencjał wbudowany



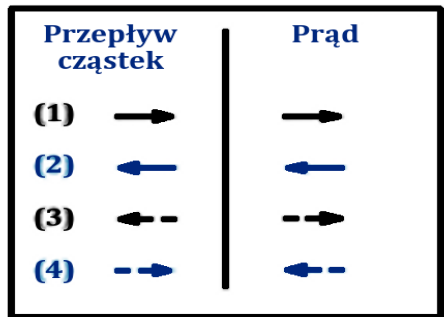
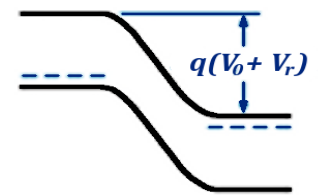
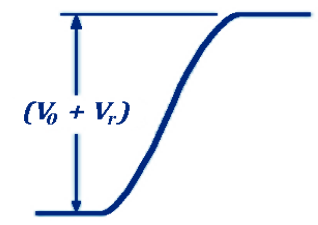
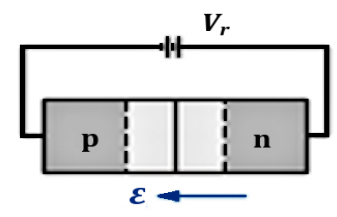
(a) Stan równowagi ($V=0$)



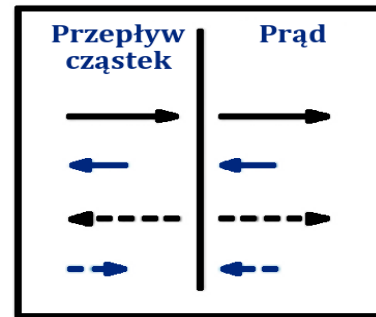
(b) Polaryzacja w kierunku przewodzenia ($V=V_f$)



(c) Polaryzacja w kierunku zaporowym ($V = -V_r$)

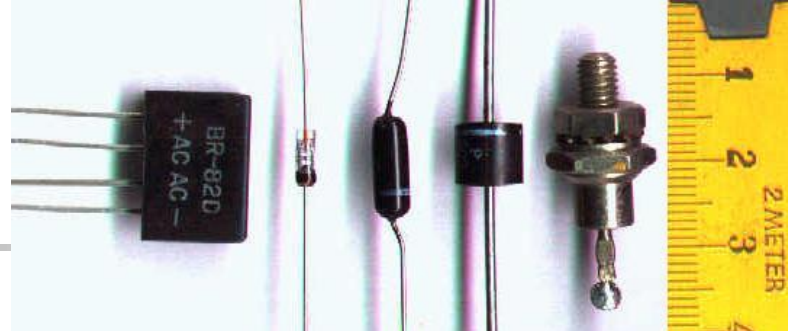


(1) Dyfuzja dziur
(2) Dryf dziur

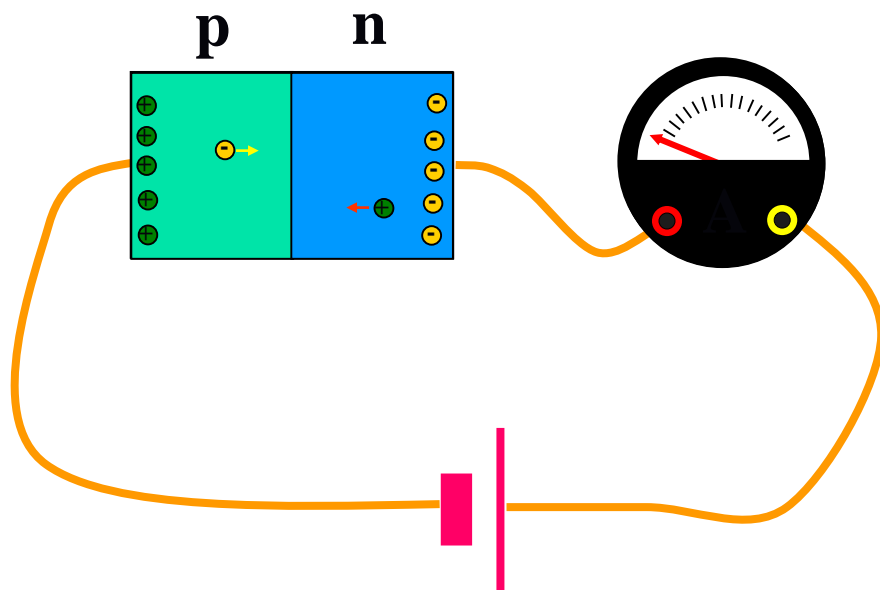
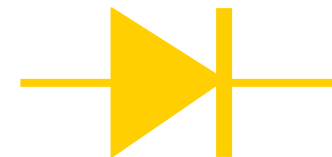


(3) Dyfuzja elektronów
(4) Dryf elektronów

Złącze p-n dioda półprzewodnikowa



Charakterystyka I-V - nieliniowa

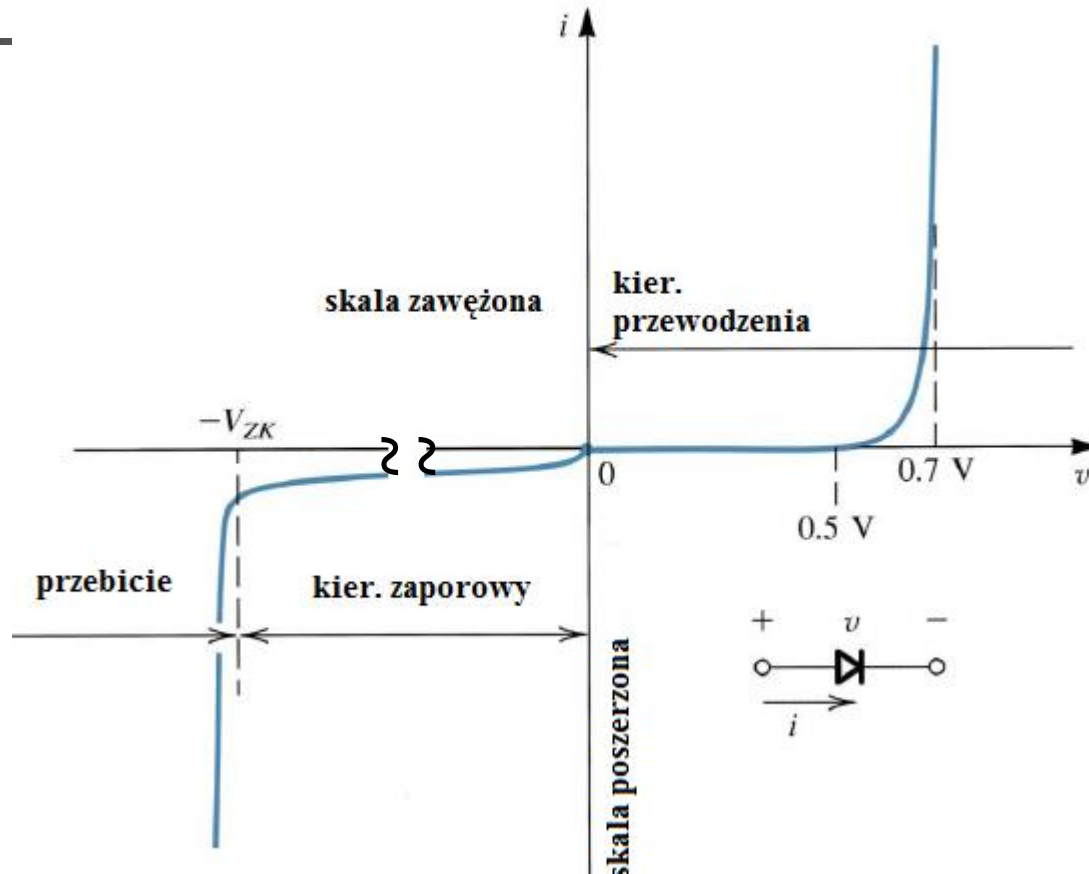


Polaryzacja
zaporowa

Polaryzacja w kier.
przewodzenia



Równanie Shockley'a



$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$

$$I_0 = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right)$$



Kierunek przewodzenia

- $V > 0$ $i = I_s (e^{qV/nkT} - 1)$

k- stała Boltzmannna $1.38 \times 10^{-23} \text{ J / s}$

T- temperatura w K=273+ C

q - ład. elektronu $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$1 < n < 2$, zależne od materiału;

Przykład: Dioda z $n=1$; dla 0.7V prąd 1mA. Znajdź I_s

Rozwiązanie:

$$i = I_s e^{qV/nkT} \Rightarrow I_s = i e^{-qV/nkT}$$

Dla $n=1$: $I_s = 10^{-3} e^{-700/25} = 6.9 \times 10^{-16} \text{ A} \cong 10^{-15} \text{ A}$

Dla $n=2$: $I_s = 10^{-3} e^{-700/50} = 8.3 \times 10^{-10} \text{ A} \cong 10^{-9} \text{ A}$



Kierunek zaporowy

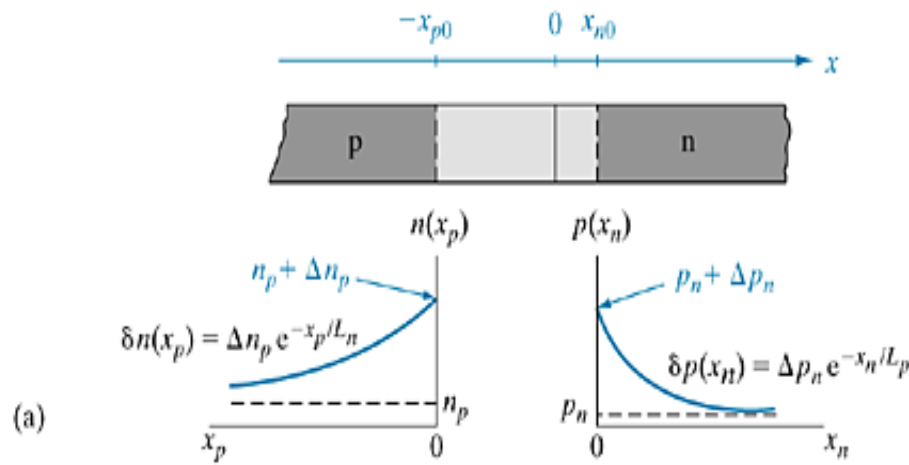
- $V < 0$

$$i \cong -I_s$$

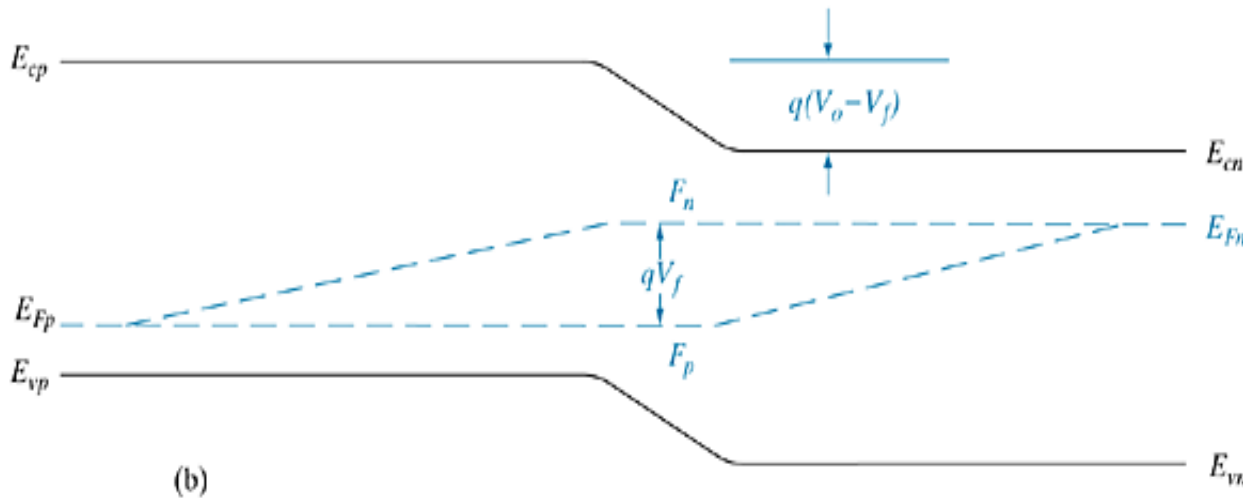
$V < 0$ i kilka razy większe niż kT / q

- Prąd w kier. zaporowym jest stały (prąd nasycenia) I_s

Kwazi-poziomy Fermiego. Złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

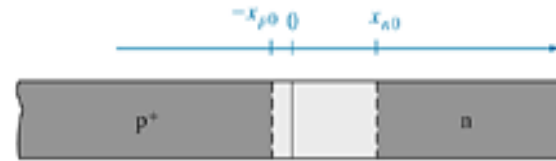


$$pn = n_i^2 e^{(F_n - F_p)/kT} = n_i^2 e^{qV/kT}$$



- (a) Rozkład nośników mniejszościowych po obydwu stronach złącza spolaryzowanego w kierunku przewodzenia. Odległości x_n i x_p mierzone są od krawędzi obszaru zubożonego
- (b) położenie kwazi-poziomów Fermiego

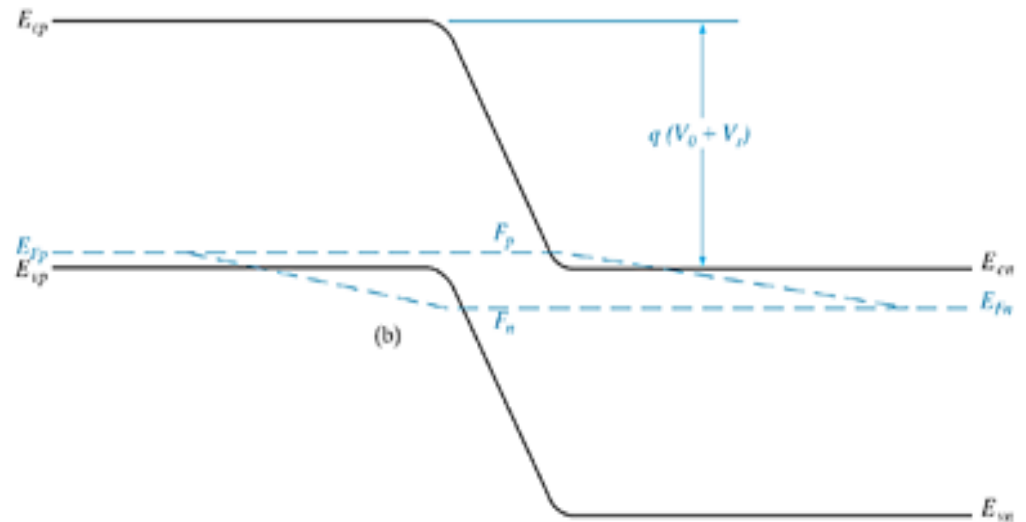
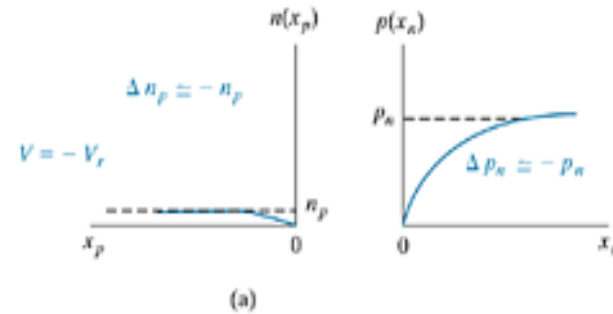
Polaryzacja zaporowa



Dla polaryzacji

zaporowej $V = -V_r$ ($V_r \gg kT/q$):

$$I = -qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) = -I_0$$





Równanie Poissona

$\varepsilon(x)$ - natężenie pola elektrycznego

$V(x)$ - potencjał pola elektrycznego

$$\operatorname{div} \vec{\varepsilon} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

$$\vec{\varepsilon} = -\operatorname{grad} V$$

$$-\operatorname{div} \operatorname{grad} V = -\Delta V$$

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

W 1D

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

$$-\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{d\varepsilon(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

Równanie Poissona dla złącza p-n

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{dE(x)}{dx} \quad N_a x_p = N_d x_n$$

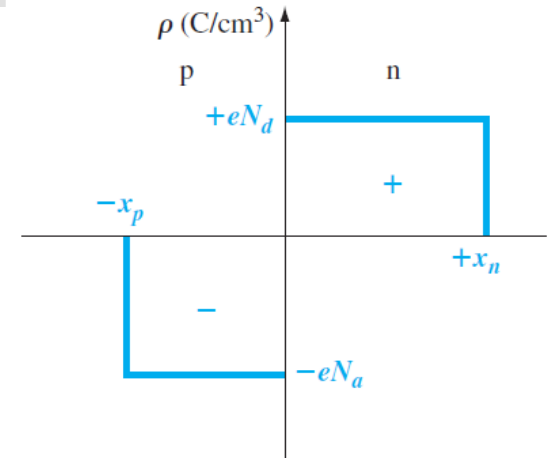
Równanie Poissona dla strony p:

$$\rho(x) = -eN_a \quad -x_p < x < 0$$

$$E = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = -\int \frac{eN_a}{\epsilon_s} dx = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} x + C_1$$

Pole elektryczne jest równe zeru dla $x < -x_p$ $E = 0$ at $x = -x_p$.

$$E = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0$$



Równanie Poissona dla złącza p-n

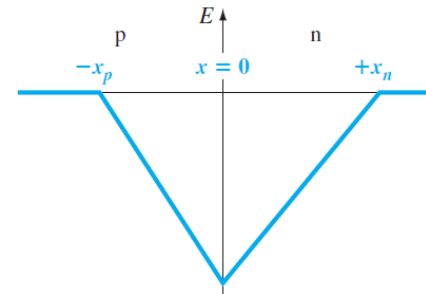
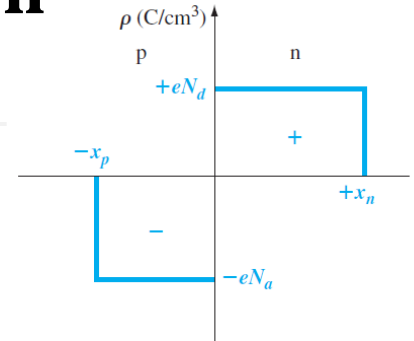
Równanie Poissona dla strony n:

$$\rho(x) = eN_d \quad 0 < x < x_n \quad E = \int \frac{(eN_d)}{\epsilon_s} dx = \frac{eN_d}{\epsilon_s} x + C_2$$

$$E = 0 \quad \text{dla} \quad x = x_n \quad \rightarrow$$

$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$E_{\max} = \frac{-eN_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{-eN_a x_p}{\epsilon_s}$$



Potencjał po stronie p:

$$\phi(x) = - \int E(x) dx = \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) dx$$

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} + x_p \cdot x \right) + C'_1$$

$$\text{Dla} \quad x = -x_p. \quad \phi(x_p) = 0 \quad \rightarrow$$

$$C'_1 = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2$$

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 \quad (-x_p \leq x \leq 0)$$

Równanie Poissona dla złącza p-n

Potencjał po stronie n:

$$\phi(x) = \int \frac{eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) dx$$

$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + C'_2$$

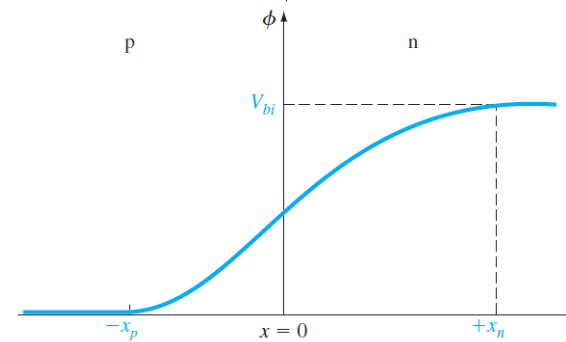
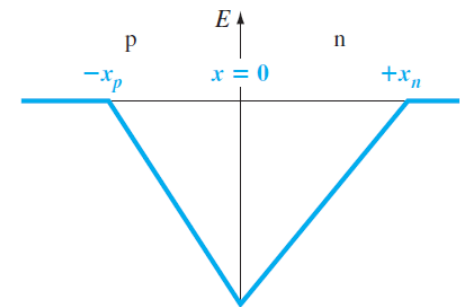
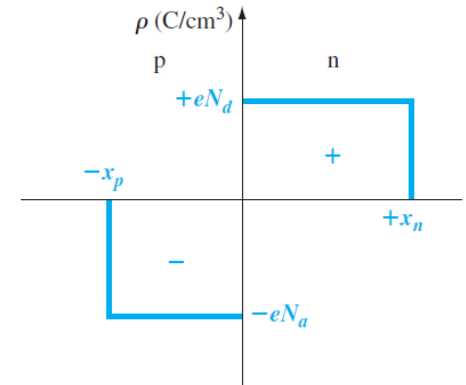
Dla $x = 0$ potencjał musi być ciągły. Stąd:

$$C'_2 = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2$$



$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (0 \leq x \leq x_n)$$

$$V_{bi} = |\phi(x = x_n)| = \frac{e}{2\epsilon_s} (N_d x_n^2 + N_a x_p^2)$$



Szerokość obszaru zubożonego

$$x_p = \frac{N_d x_n}{N_a} \quad \text{podstawiamy do równania} \quad V_{bi} = |\phi(x = x_n)| = \frac{e}{2\epsilon_s} (N_d x_n^2 + N_a x_p^2)$$



$$x_n = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

lub

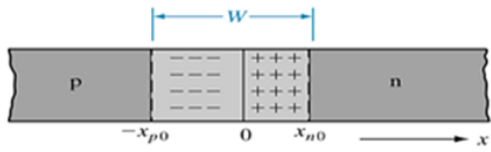
$$x_p = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_d}{N_a} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

$$W = x_n + x_p$$

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad \sqrt{z} + \frac{1}{\sqrt{z}} = \frac{z + 1}{\sqrt{z}}$$

Po spolaryzowaniu złącza w kierunku zaporowym:

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2}$$



Pojemność obszaru zubożonego



$$W = \left[\frac{2 \epsilon_s V_0}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}$$

Symbol diody pojemnościowej

Po spolaryzowaniu diody:

$$W = \left[\frac{2 \epsilon_s (V_0 - V)}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}$$

$$|Q| = qAx_{no}N_d \quad C = \left| \frac{dQ}{dV} \right|$$

$$C_j = \epsilon_s A \left[\frac{q}{2 \epsilon_s (V_0 - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2}$$

Pojemność obszaru zubożonego

$$C_j = \epsilon_s A \left[\frac{q}{2 \epsilon_s (V_0 - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2}$$

$$\epsilon_s = \epsilon_0 \cdot \epsilon_s$$

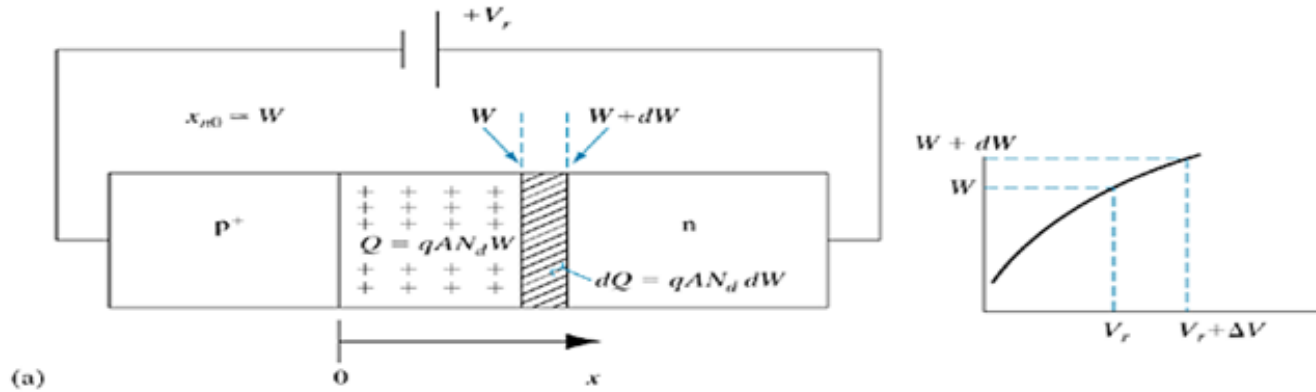
Dla złącza p^+n ($N_a \gg N_d$)

$$C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon_0\epsilon_s N_d}{(V_0 - V)} \right]^{1/2}$$

Dla polaryzacji zaporowej:

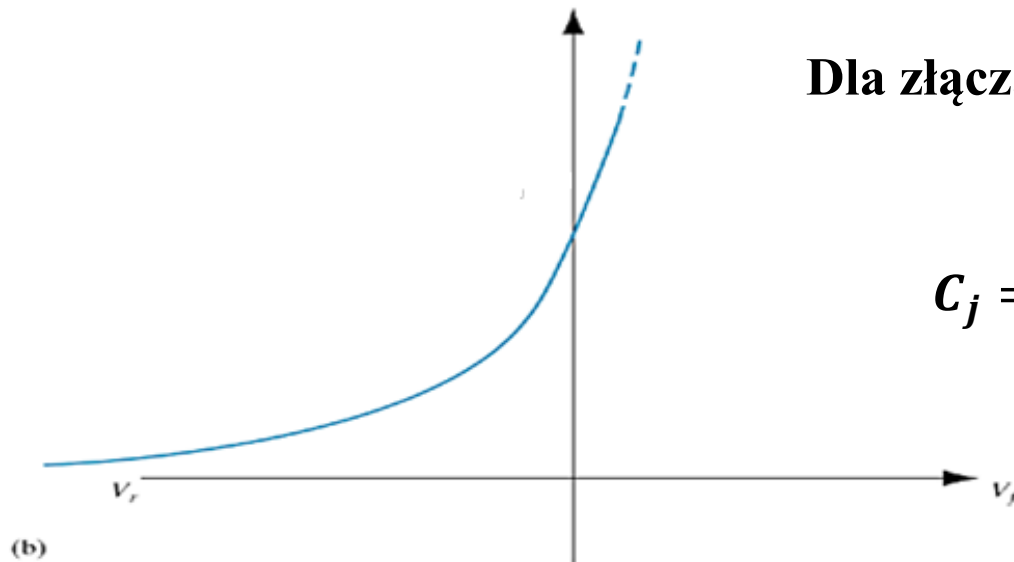
$$C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon_0\epsilon_s N_d}{(V_0 + V)} \right]^{1/2}$$

Pojemność obszaru zubożonego



Dla złącza p^+n ($N_a \gg N_d$)

$$C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon_0\epsilon_s N_d}{(V_0 - V)} \right]^{1/2}$$



Pojemność obszaru zubożonego: (a) złącze p^+n – zaznaczono zmianę krawędzi obszaru zubożonego po stronie n przy zmianie polaryzacji zaporowej. Struktura przypomina kondensator płaski; (b) zależność C-V. Zaniedbano x_{p0} w silnie domieszkowanym obszarze p^+ .



Czy równanie Shockley'a jest spełnione ?

Dobrze opisuje I-V dla złączy p-n w Ge,
Gorzej dla złączy p-n w Si i GaAs.

Powody:

- ◆ generacja/rekombinacja nośników w obszarze zubożonym
- ◆ powierzchniowe “prądy” upływu
- ◆ oporność szeregową

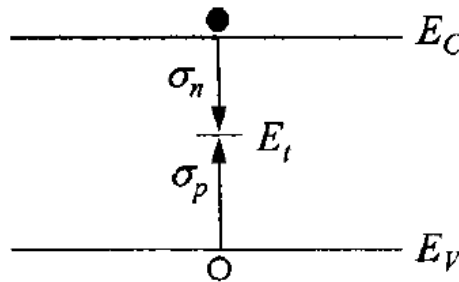
$$I = I_0 (e^{qV/nkT} - 1)$$

n - współczynnik idealności

Rekombinacja z udziałem poziomów pułapkowych

$$C_n = \sigma_n v_{th}$$

$$C_p = \sigma_p v_{th}$$



$$n_n p_n \gg n_i^2$$

- Półprzewodnik ze skośną przerwą wzbronioną, rekombinacja Shockley'a-Reada (W7)

Całkowity prąd dla złącza p+-n:

$$J_F = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{kT n_i}{\tau_p \epsilon_0}} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

Prąd dyfuzyjny

Prąd rekombinacji

Złącze p-n - kier. zaporowy - prąd generacji

$$n_n p_n \ll n_i^2$$

$$p \ll n_i \quad n \ll n_i$$

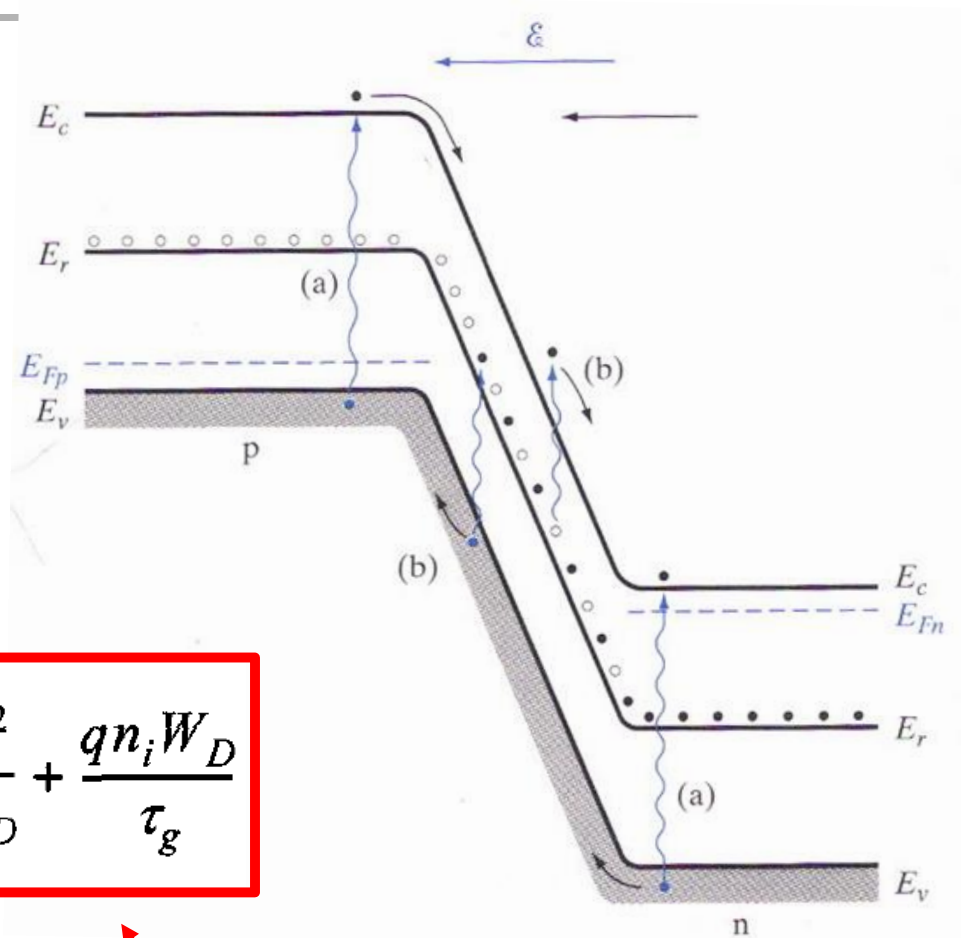
$$J_{gen} \approx \frac{qn_i W_d}{\tau_g} \propto \sqrt{V_{bi} - V}$$

Całkowity prąd:

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \frac{qn_i W_D}{\tau_g}$$

Prąd dyfuzyjny
w obszarze neutralnym

Prąd generacji
w obszarze zubożonym



Charakterystyka I-V w rzeczywistym złączu p-n

- (a) prąd rekombinacji,
- (b) prąd dyfuzyjny,
- (c) prąd przy dużym napięciu w kier. przewodzenia („high injection”)
- (d) wpływ rezystancji szeregowej,
- (e) Prąd upływu

