

Wykład 3 a

Złącze p-n



Półprzewodnik w polu elektrycznym

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

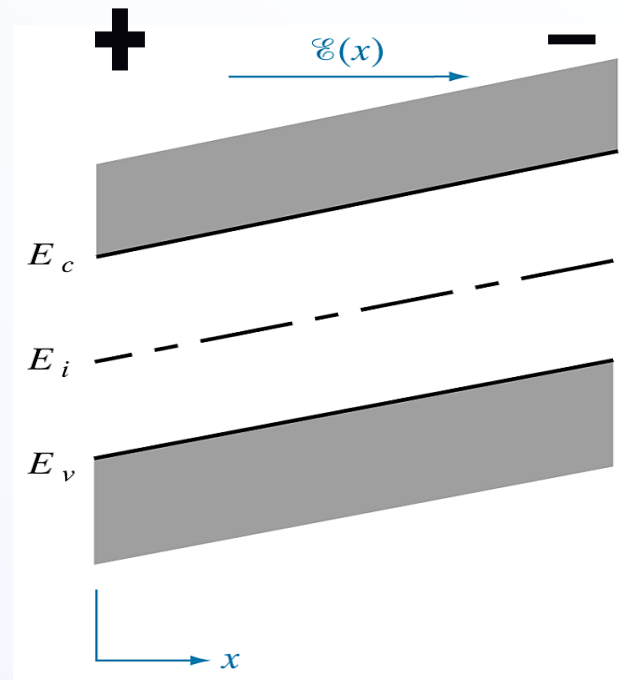
$$-e\varepsilon(x) = -(-e)\frac{dV}{dx}$$

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

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

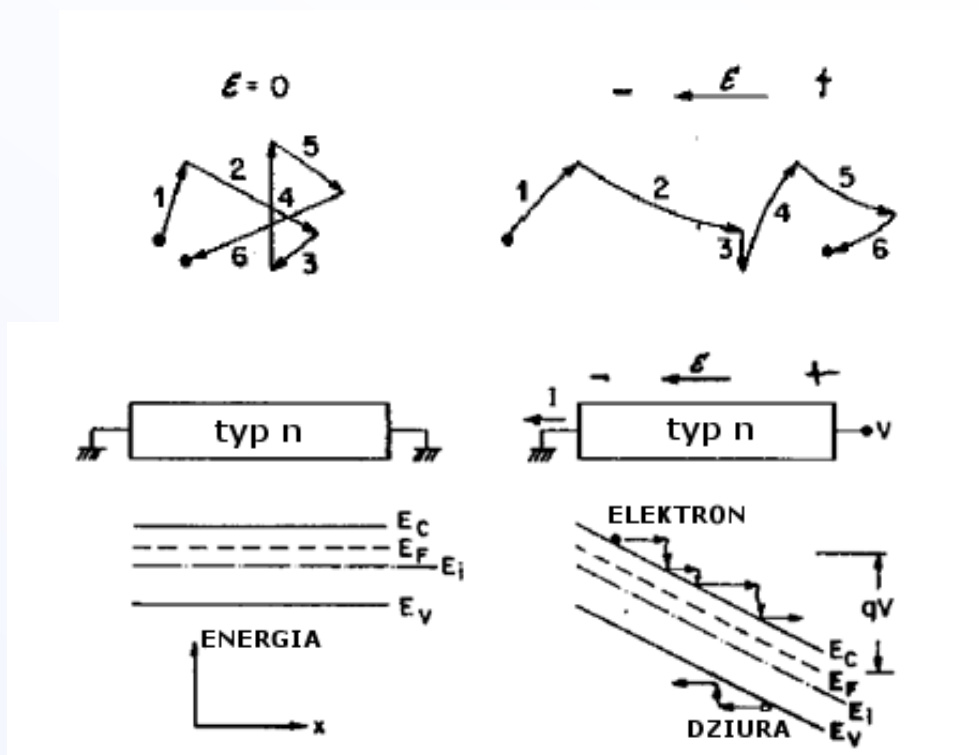
$$V = -cx \rightarrow$$

$$E_p = cex$$



Gęstość prądu unoszenia

Prąd unoszenia:
wynika z obecności
pola elektrycznego



$$J_x = \sigma \varepsilon_x$$

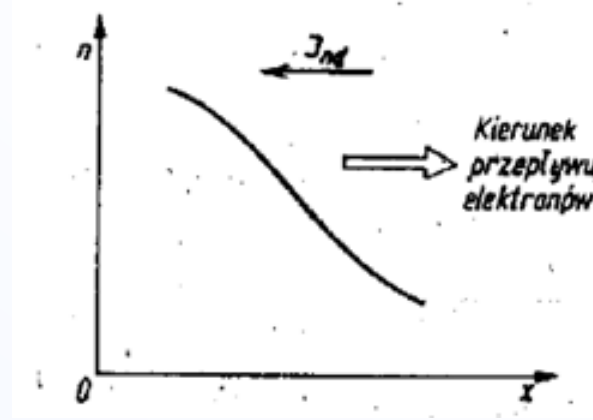
$$J_x = qn \mu_n \varepsilon_x$$

Całkowity prąd unoszenia elektronowy i dziurowy:

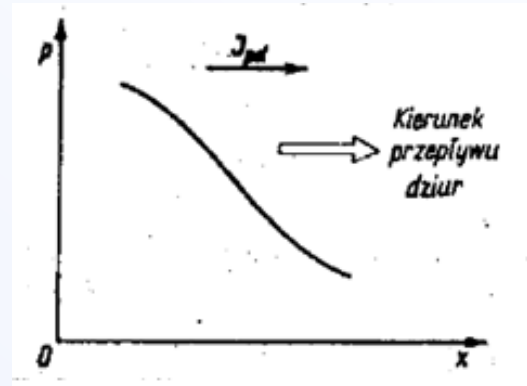
$$J_x = qn \mu_n \varepsilon_x + qp \mu_p \varepsilon_x = q(n \mu_n + p \mu_p) \varepsilon_x = \sigma \varepsilon_x$$

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

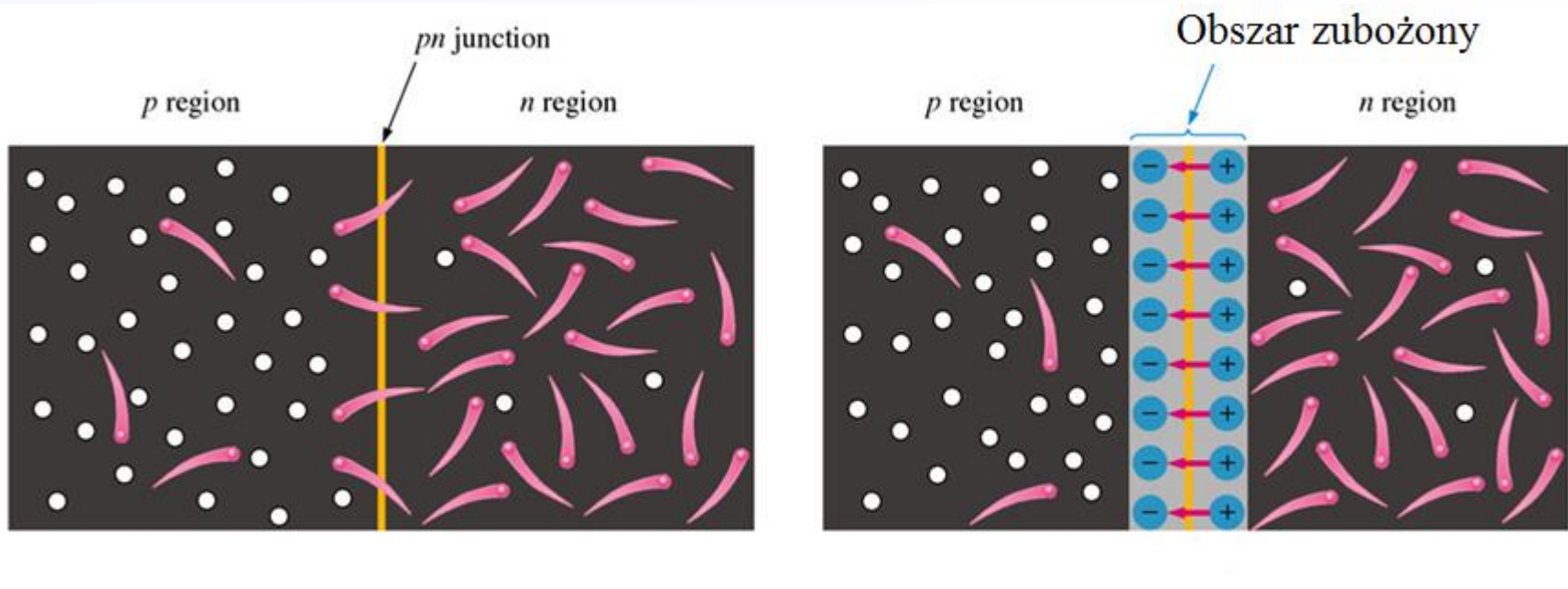
Całkowity prąd jest sumą prądu dyfuzyjnego (elektronowego i dziurowego) i prądu unoszenia (elektronowego i dziurowego) :

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

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

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

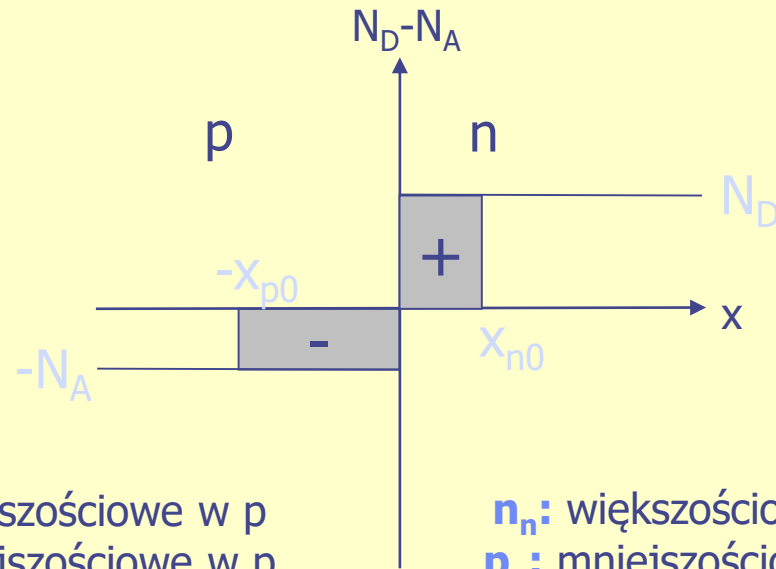
Złącze p-n



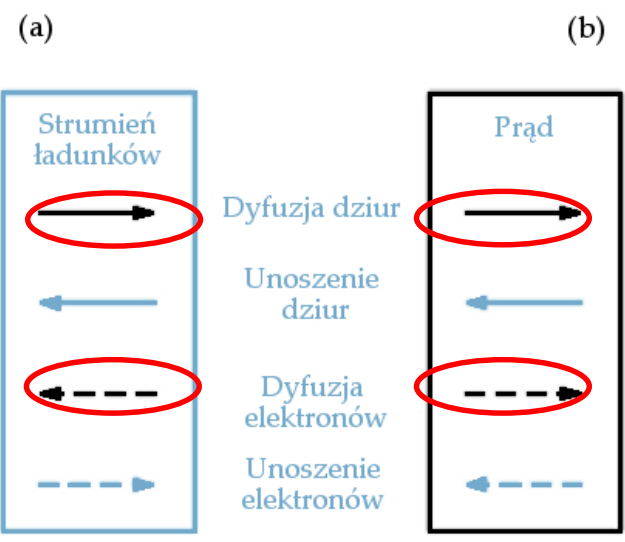
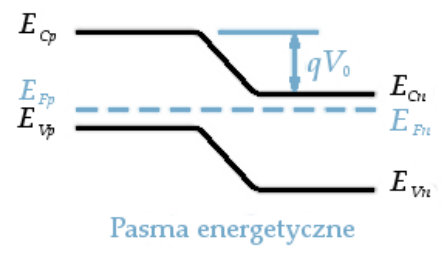
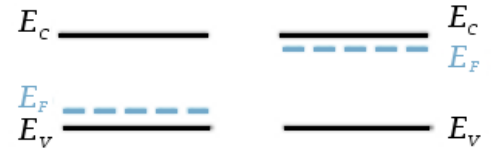
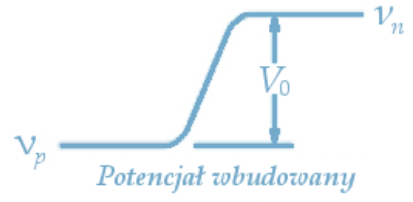
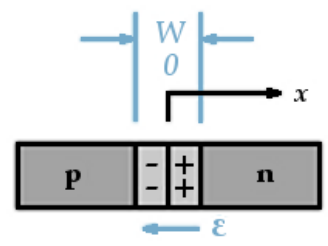
Tworzy się złącze p-n

Złącze po utworzeniu

Złącze p-n skokowe



Tworzenie się złącza p-n - diagram pasmowy złącza

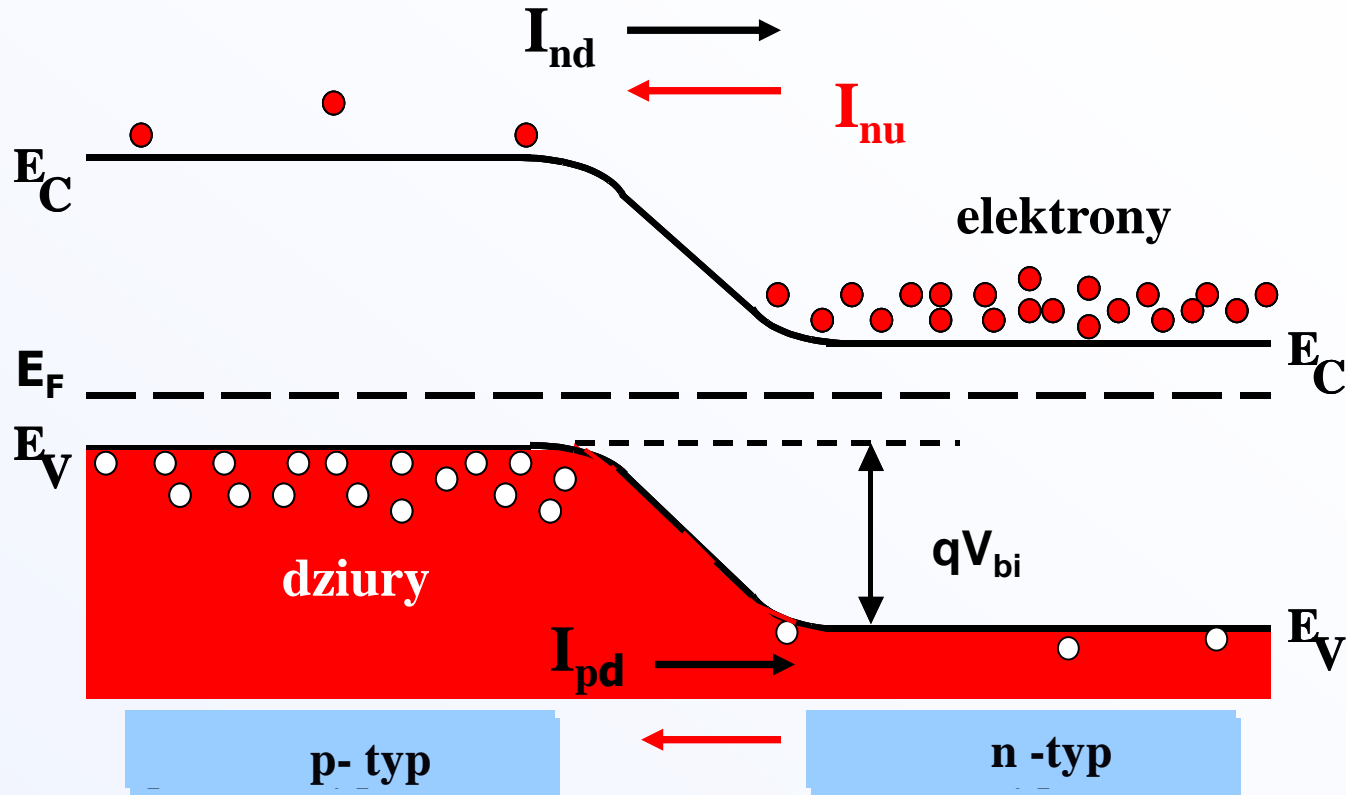


(c)

W stanie równowagi gradient poziomu Fermiego jest równy zeru!

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

Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej

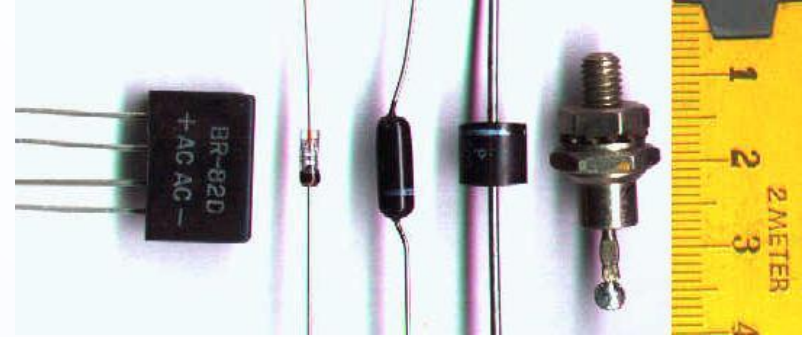


I_{nd} (I_{pd}) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

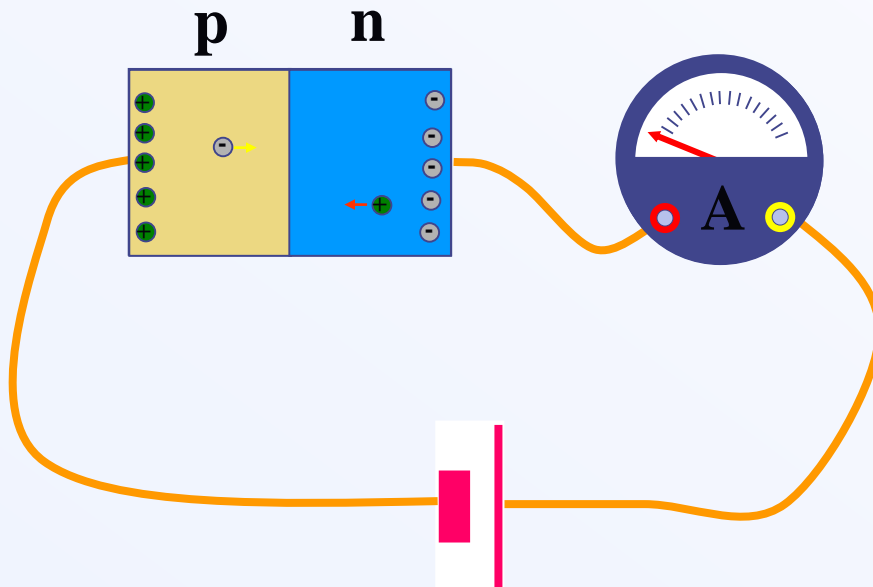
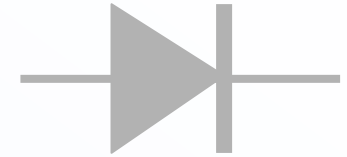
I_{nu} (I_{pu}) – prąd unoszenia elektronowy (dziurowy)

V_{bi} – potencjał wbudowany

Złącze p-n dioda półprzewodnikowa



Charakterystyka I-V - nieliniowa

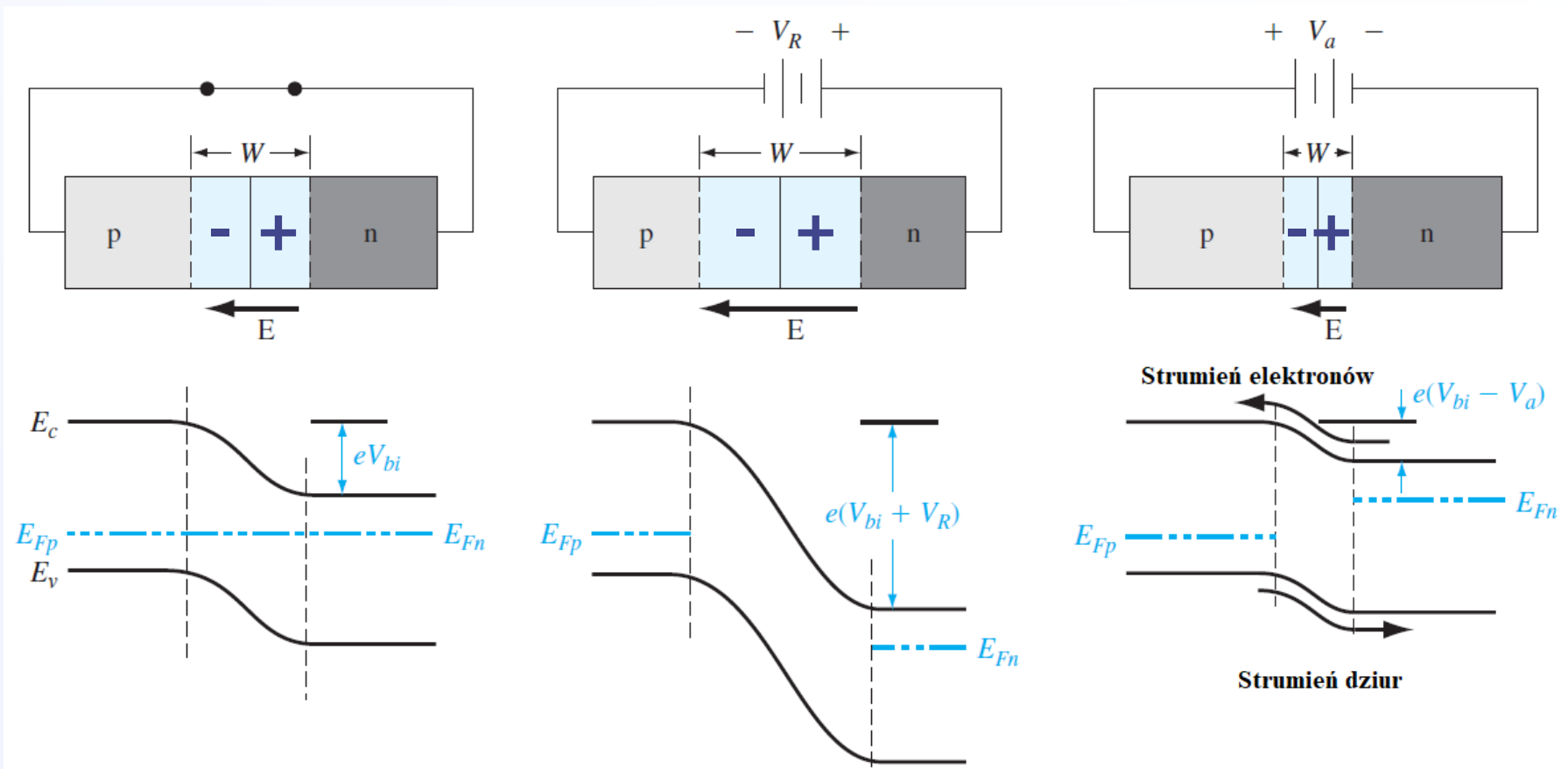


Polaryzacja w kier.
przewodzenia

Polaryzacja
zaporowa



Polaryzacja złącza p-n



bez polaryzacji

polaryzacja zaporowa

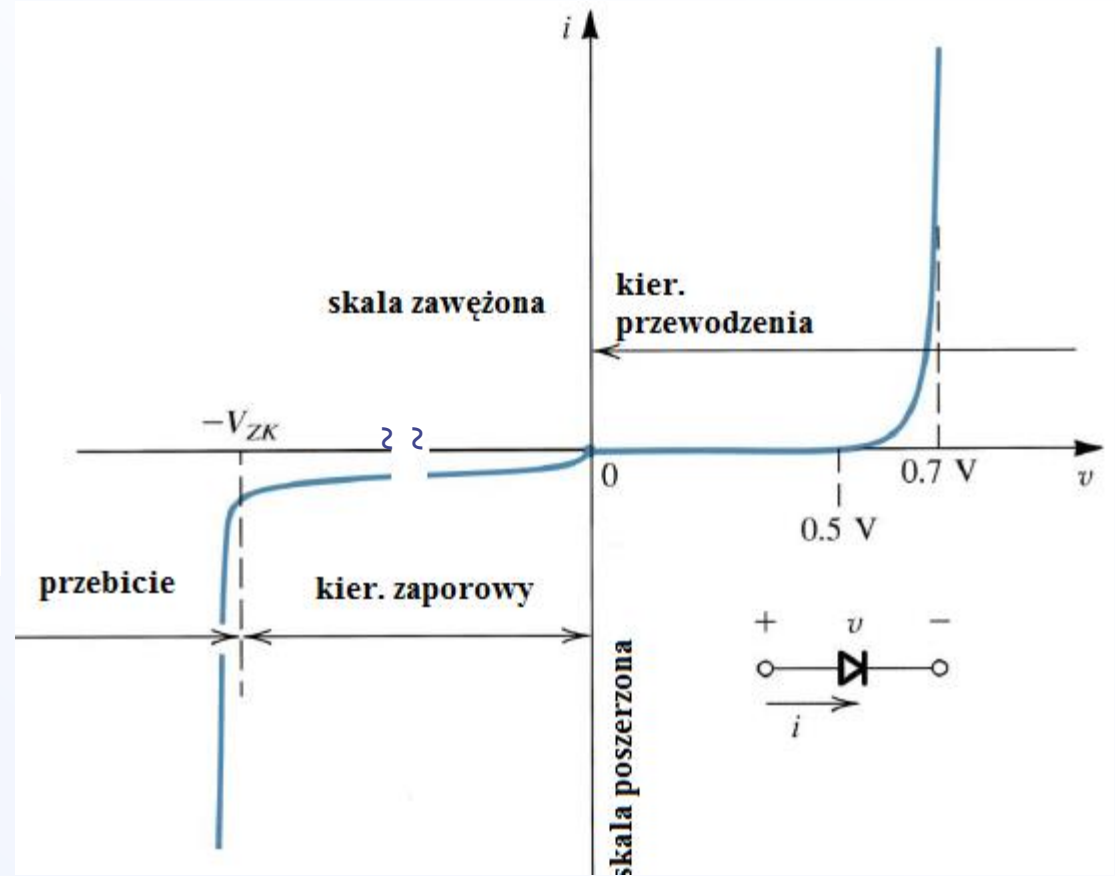
polaryzacja przewodzenie

Potencjał wbudowany

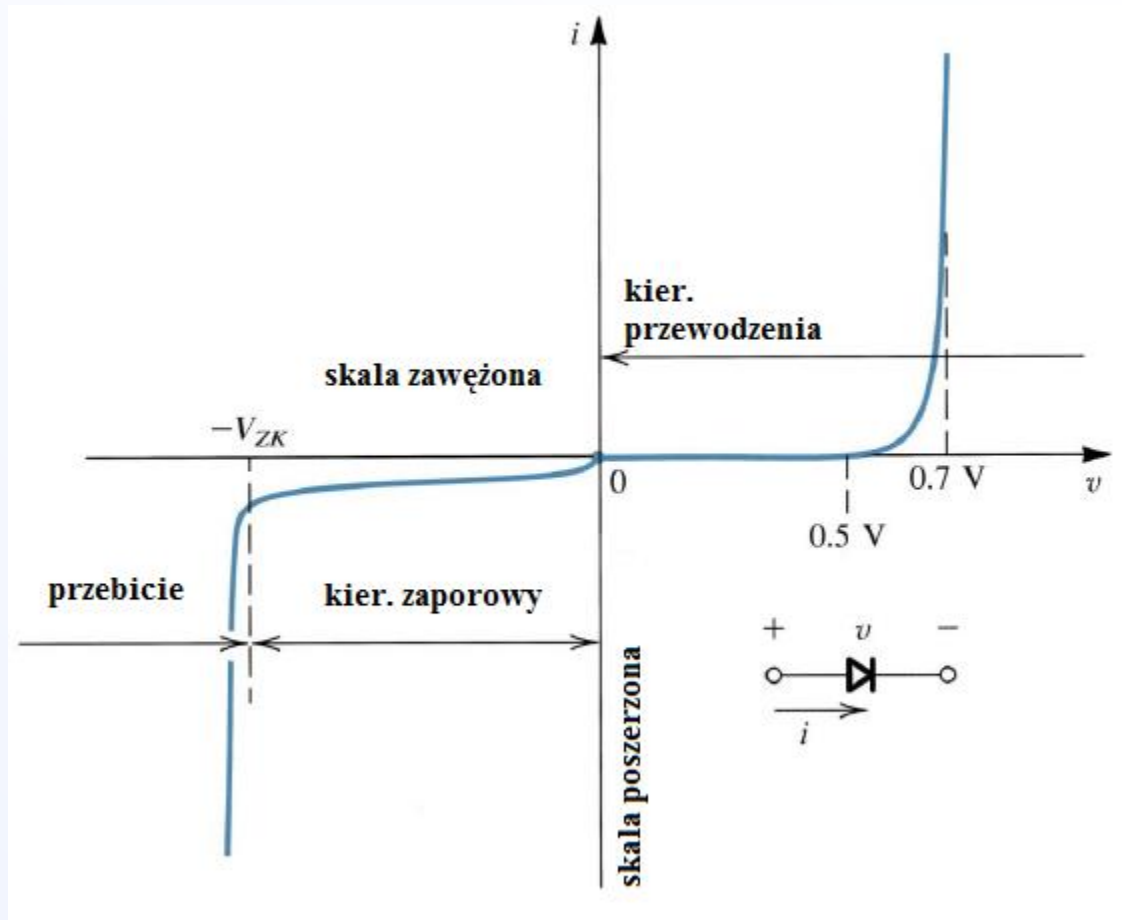
Równanie Shockley'a

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

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



Równanie Shockley'a



$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

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

Kierunek przewodzenia

- $V > 0$

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

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

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:

$$I = I_s (e^{qV/nkT} - 1) \Rightarrow I_s = I e^{-qV/nkT}$$

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

Równanie Poissona

$\varepsilon(x)$ - natężenie pola elektrycznego

$V(x)$ - potencjał pola elektrycznego

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

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

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

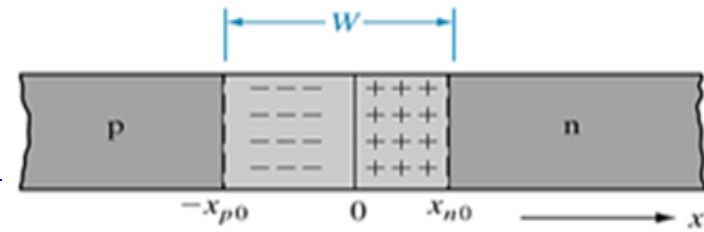
$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

W 1D

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

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

Ładunek przestrzenny w złączu p-n



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

Obliczymy pole elektryczne w obszarze W korzystając z równania *Poissona*:

$$\frac{d\varepsilon(x)}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_s} (p - n + N_d^+ - N_a^-)$$

ε_s - stała dielektryczna półprzewodnika

Założymy, że wszystkie domieszki są zjonizowane i zaniedbamy nośniki swobodne w obszarze złącza p-n:

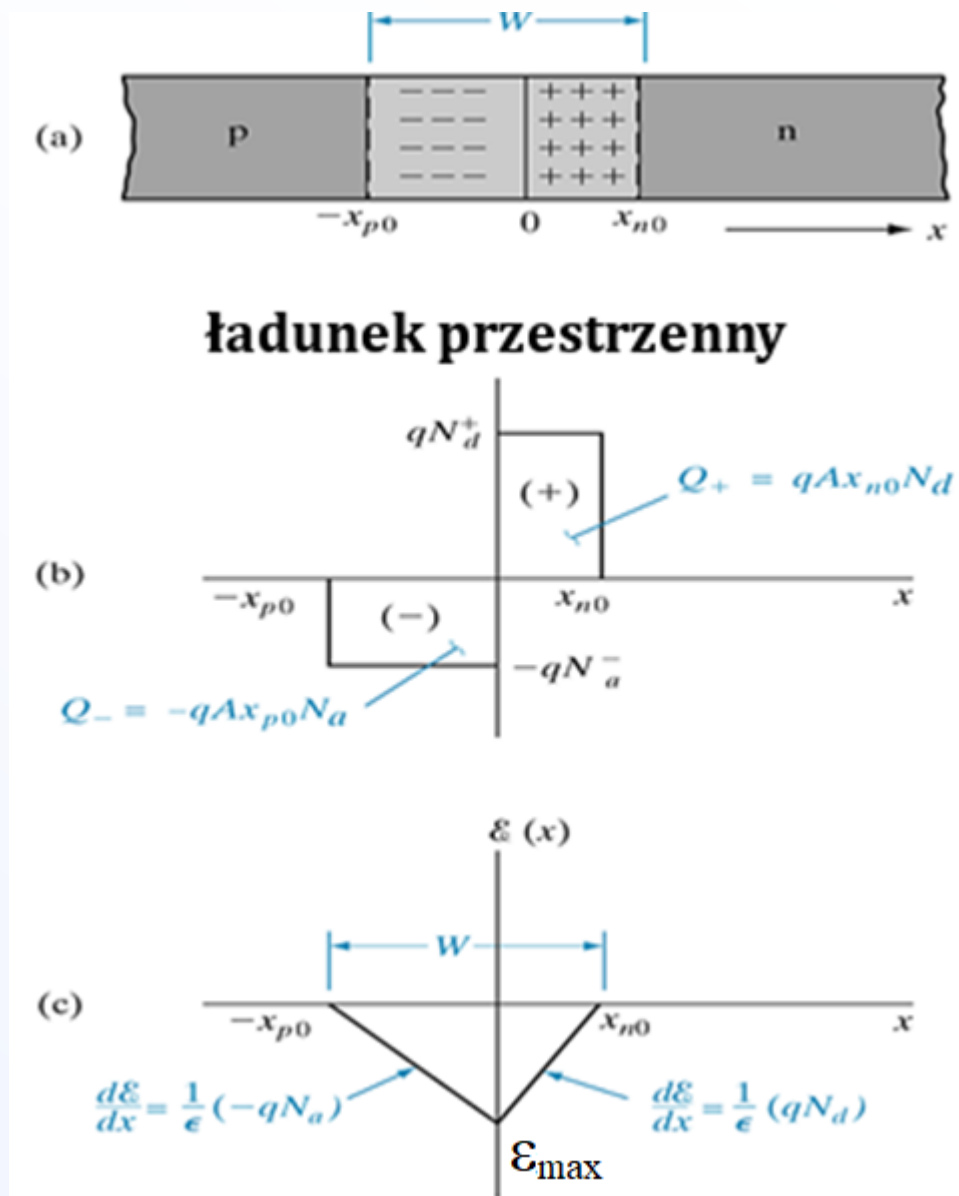
$$\frac{d\varepsilon(x)}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_s} N_d^+ = \frac{q}{\varepsilon_s} N_d \quad (0 < x < x_{n0})$$

$$\frac{d\varepsilon(x)}{dx} = -\frac{q}{\varepsilon_s} N_a^- = -\frac{q}{\varepsilon_s} N_a \quad (-x_{p0} < x < 0)$$

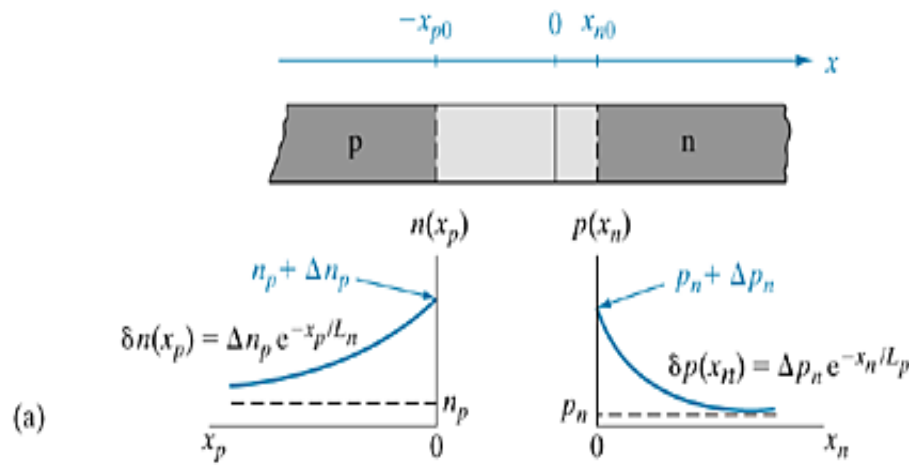
Ładunek przestrzenny

w złączu p-n

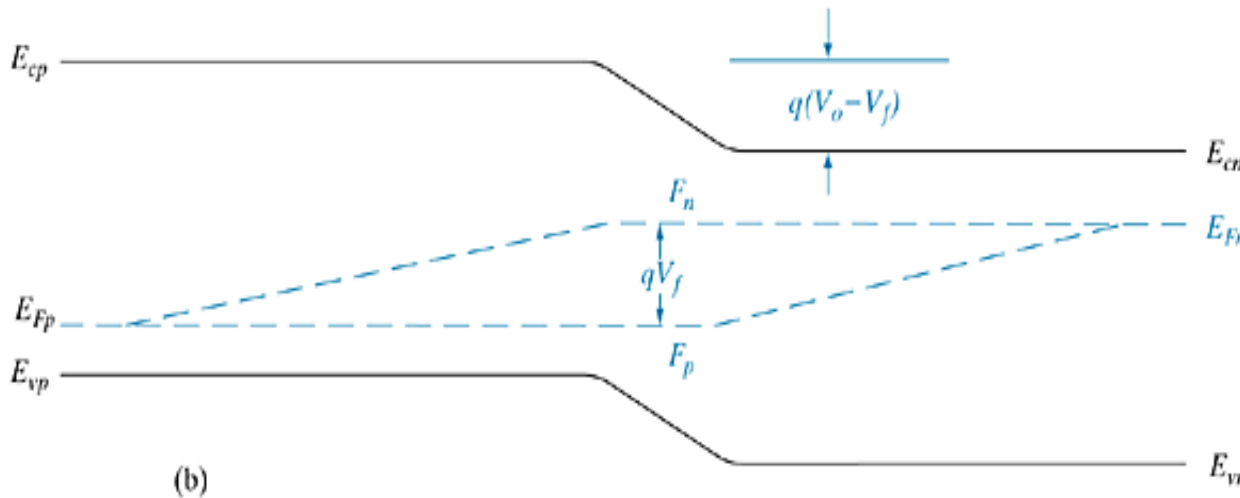
Ładunek przestrzenny i pole elektryczne dla złącza p-n w którym $N_d > N_a$: (a) złącze w $x=0$, b) ładunek przestrzenny w złączu przy założeniu, że nośniki swobodne są zaniedbane; (c) rozkład pola elektrycznego.



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

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

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

