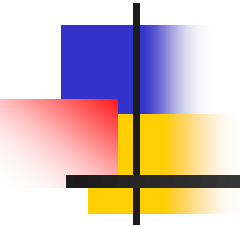


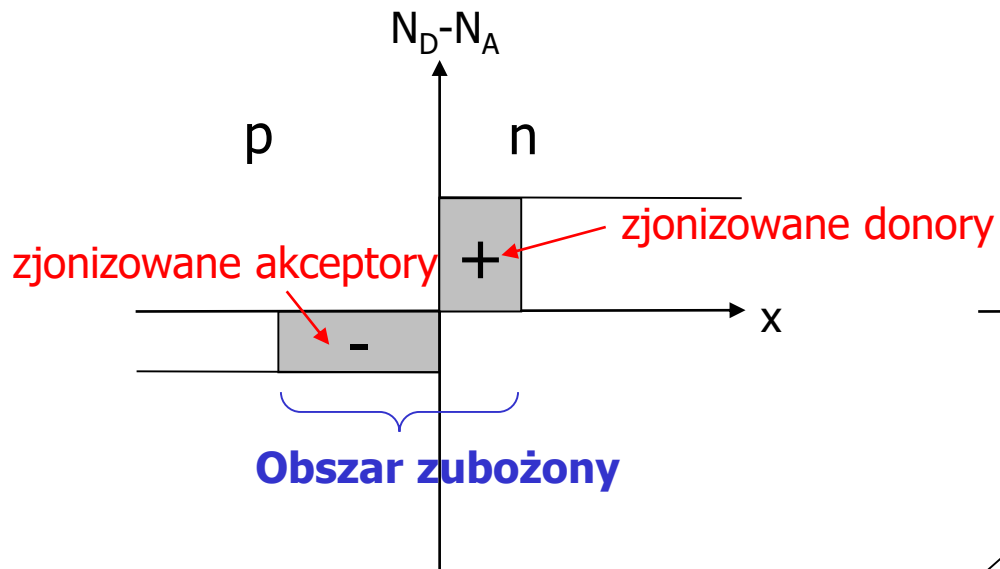
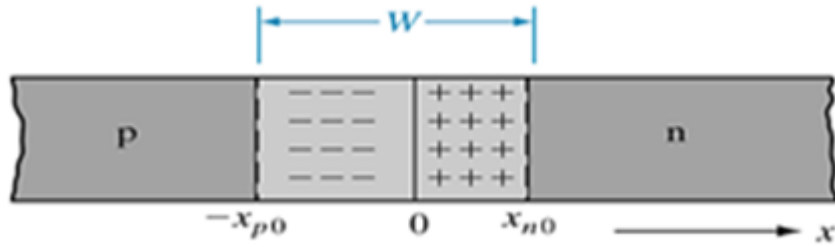
# Wykład IX

## Złącze P-N

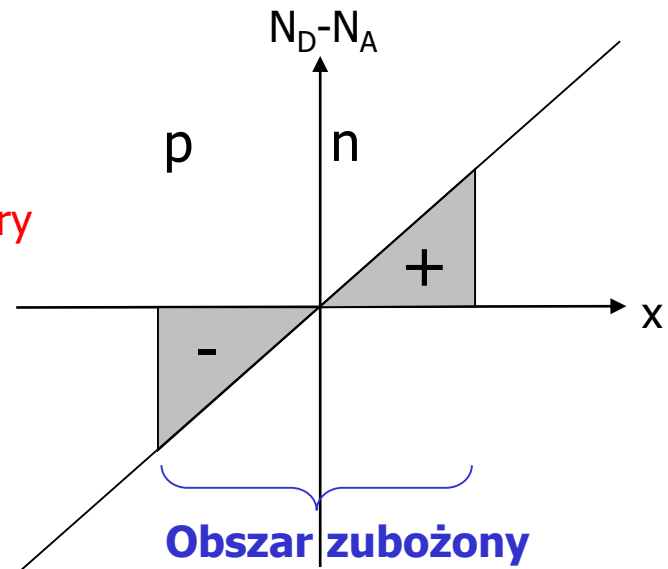
---



# Złącze p-n skokowe i liniowe



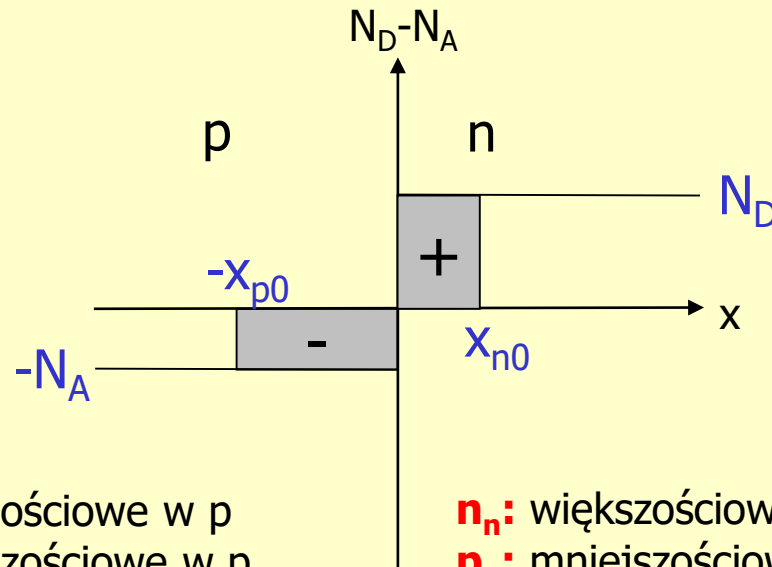
skokowe



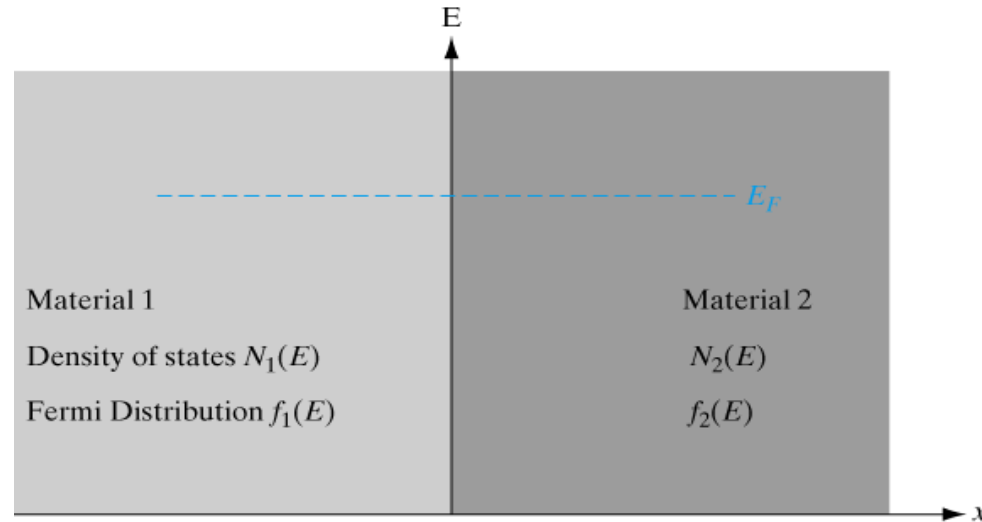
liniowe

# 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 :**

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

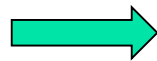
# Gradient Poziomu Fermiego na złączu

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

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

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

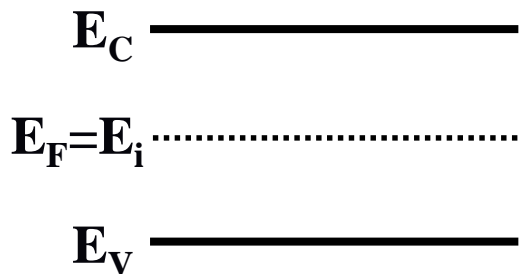
$$\longrightarrow \quad E_{F1} = E_{F2}$$



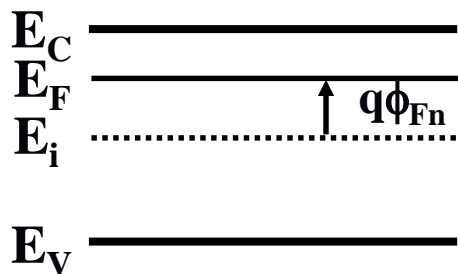
$$\frac{dE_F}{dx} = 0$$

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

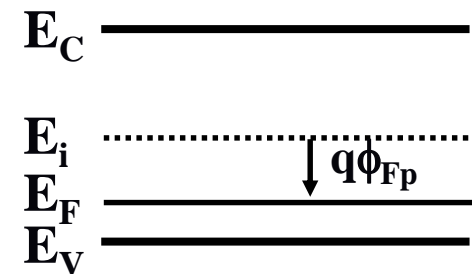
# Położenie poziomu Fermiego i koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku domieszkowym



samoistny



n-typu



p-typu

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

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

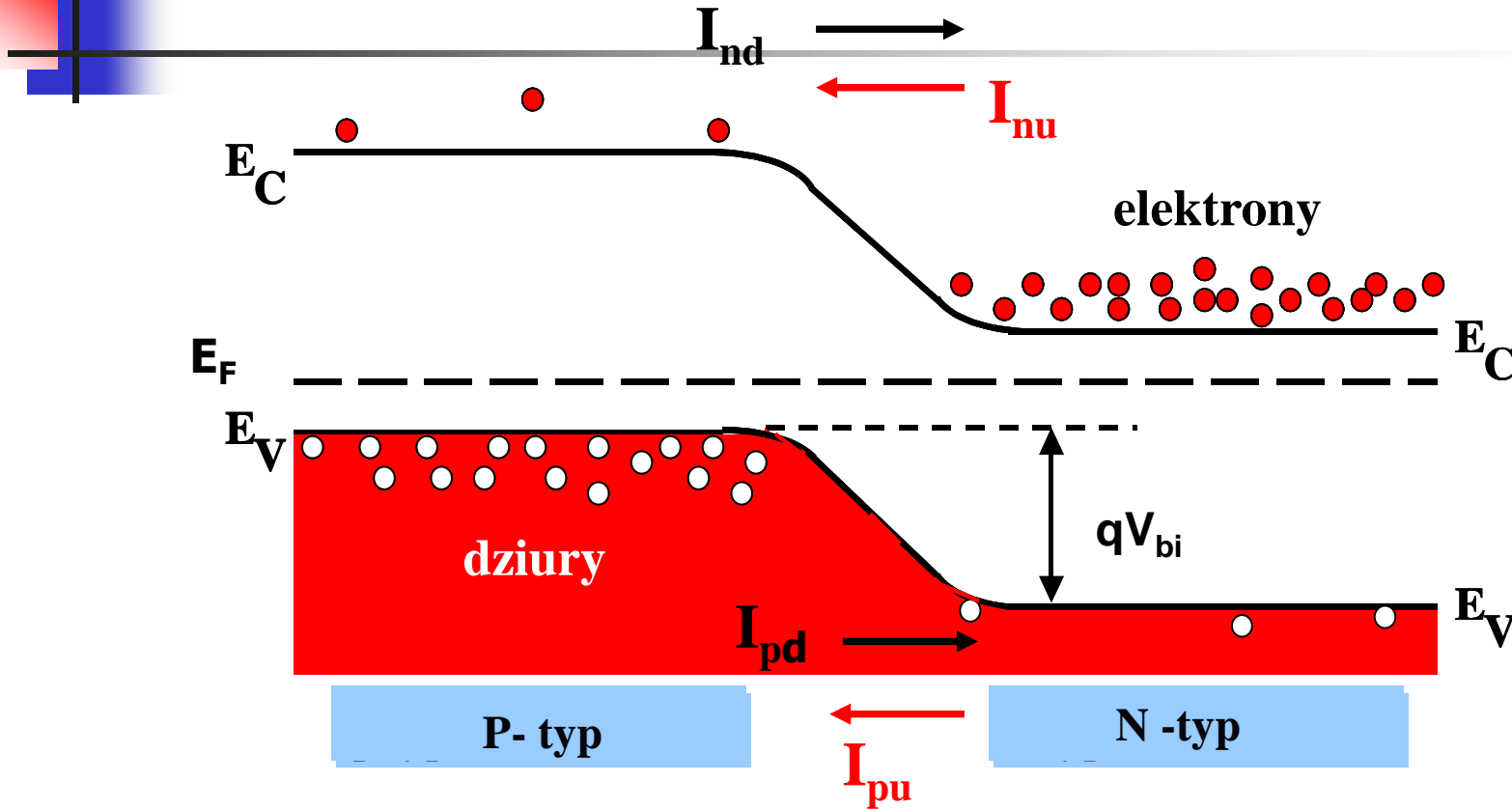
**p-typu: poziom Fermiego przesuwają się w dół**

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

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

$$q\phi_F = E_F - E_i$$

# Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej

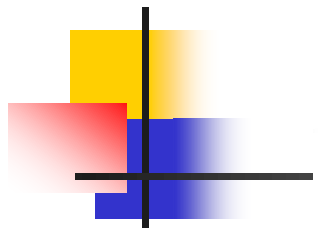


$I_{nd}$  ( $I_{pd}$ ) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

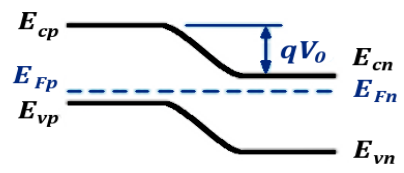
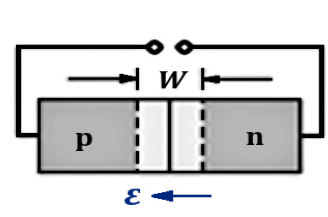
$I_{nu}$  ( $I_{pu}$ ) – prąd unoszenia elektronowy (dziurowy)

$V_{bi}$  – potencjał wbudowany

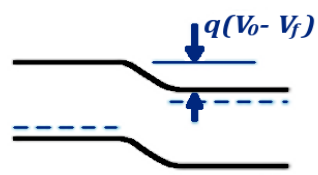
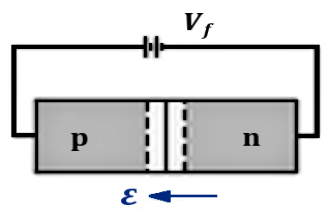




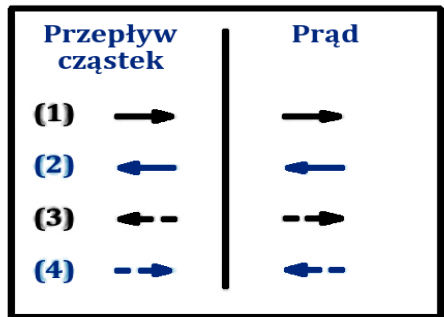
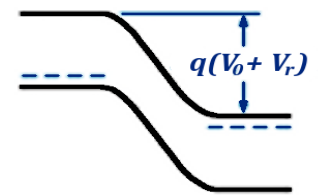
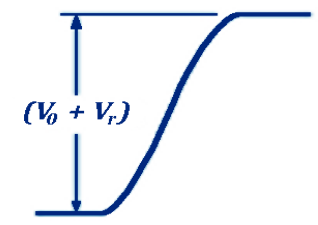
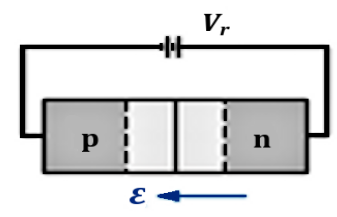
(a) Stan równowagi ( $V=0$ )



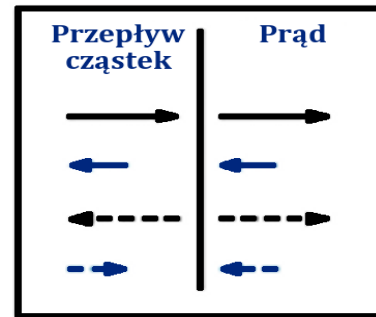
(b) Polaryzacja w kierunku przewodzenia ( $V=V_f$ )



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

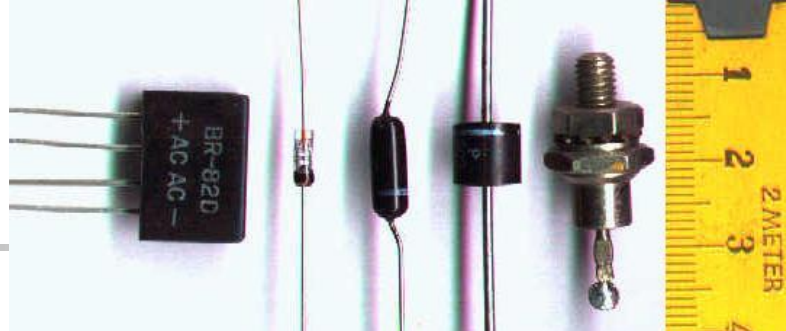


(1) Dyfuzja dziur  
(2) Dryf dziur

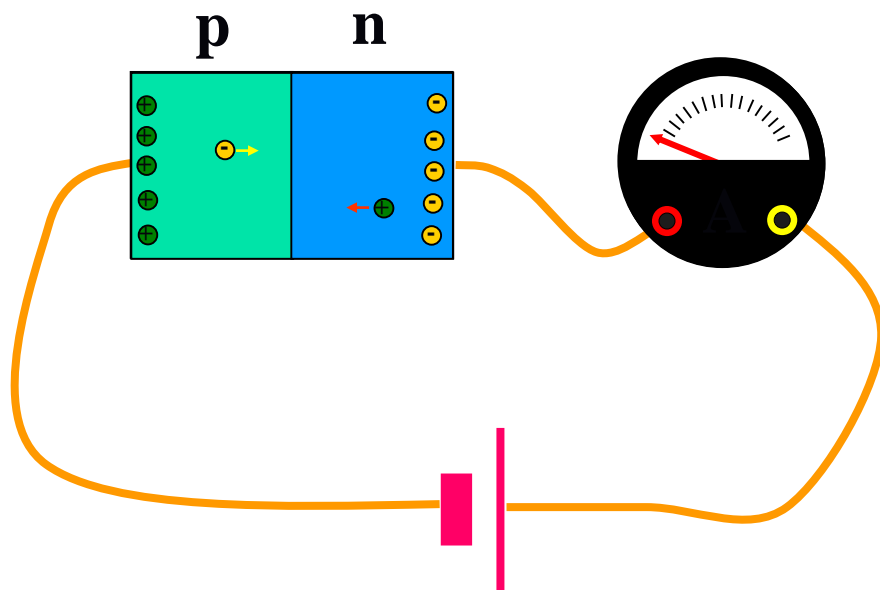
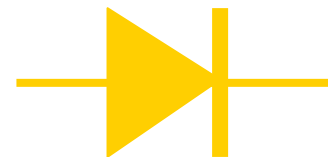


(3) Dyfuzja elektronów  
(4) Dryf elektronów

# Złącze p-n dioda półprzewodnikowa

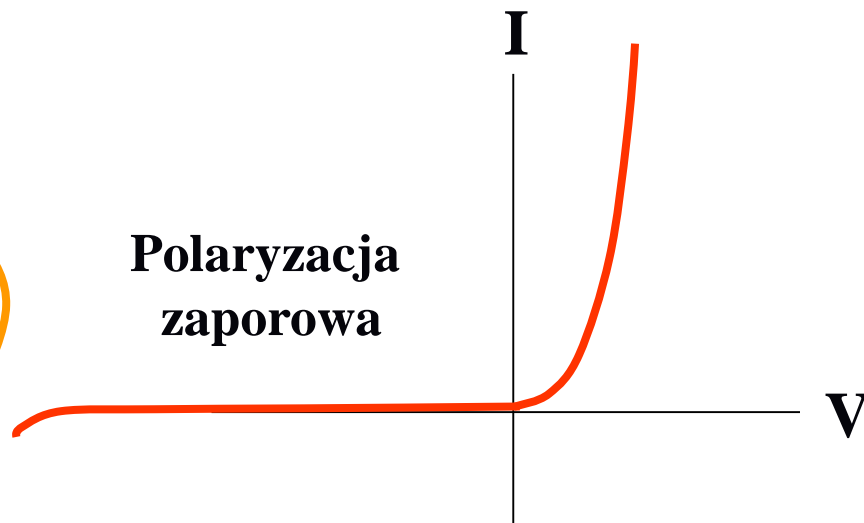


Charakterystyka I-V - nieliniowa

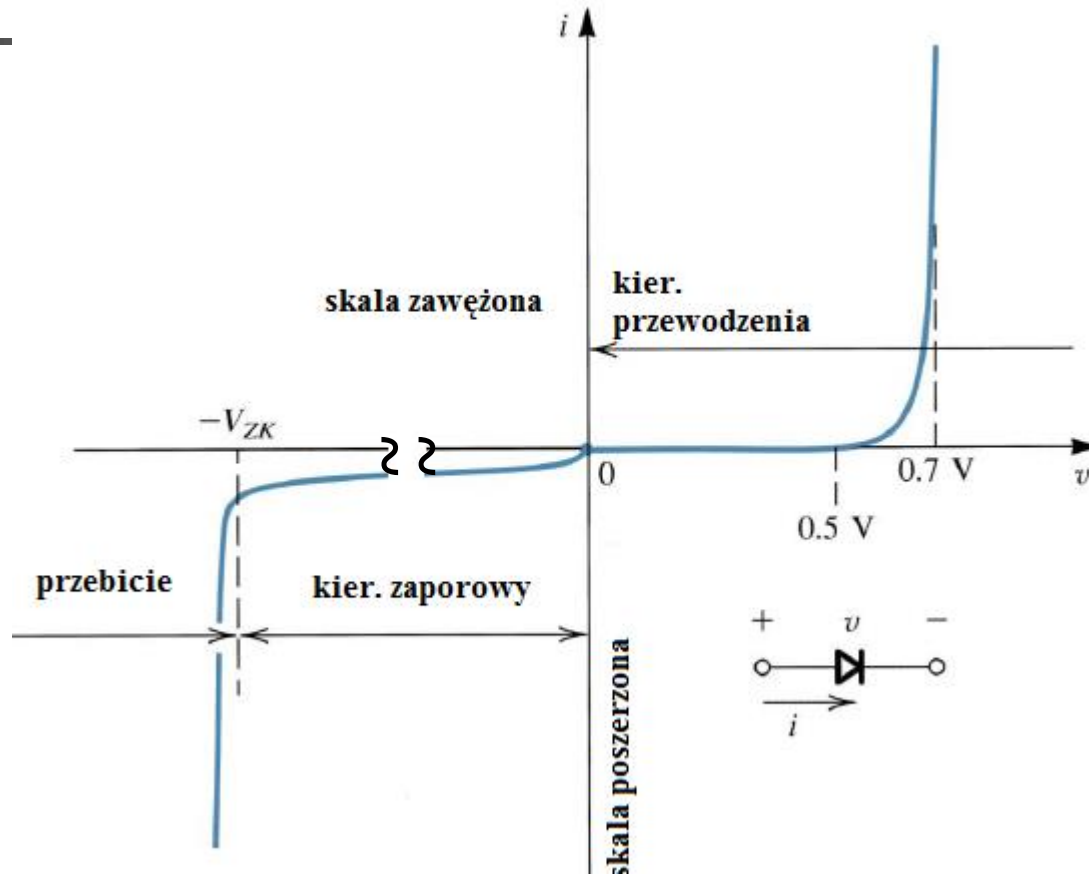


Polaryzacja w kier.  
przewodzenia

Polaryzacja  
zaporowa



# 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

---

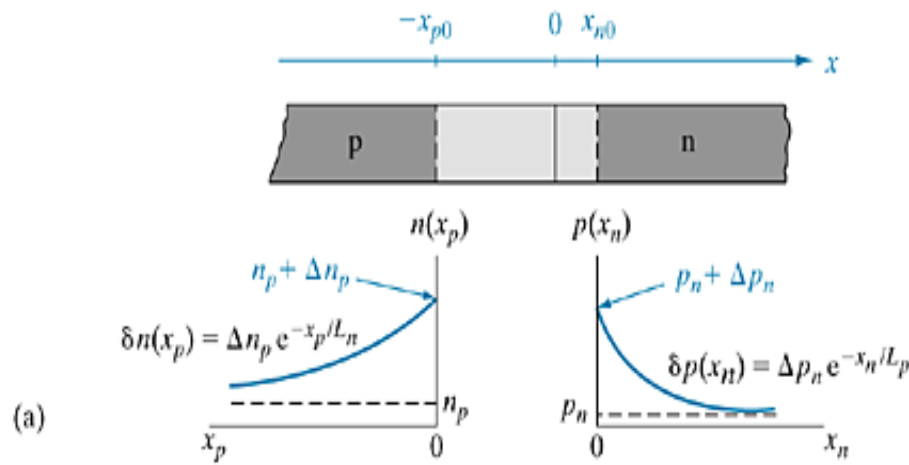
- $V < 0$

$$i \cong -I_s$$

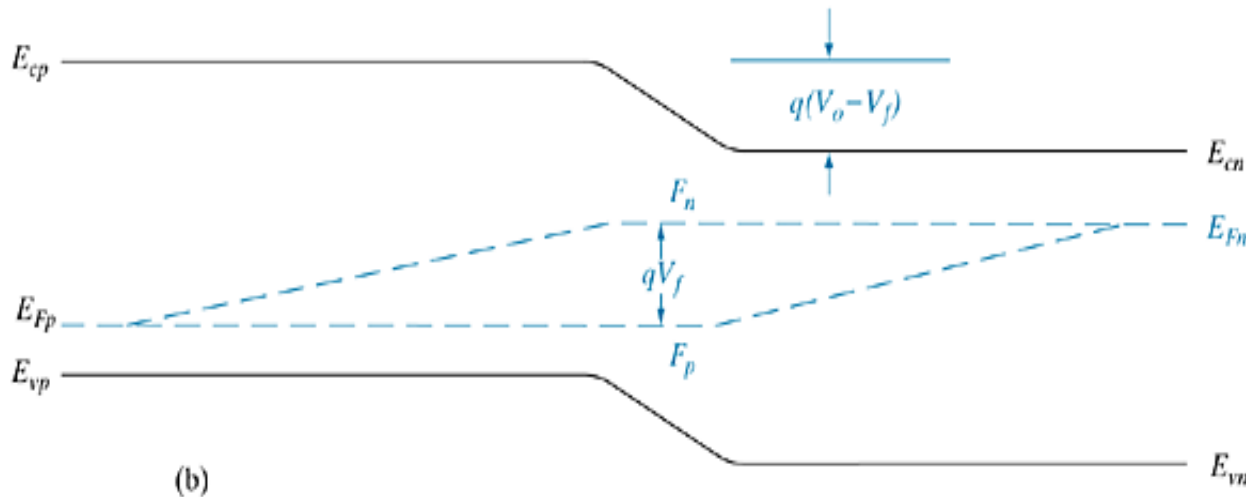
$V < 0$  i kilka razy większe niż  $kT / q$

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

# Kwazi-poziomy Fermiego. Złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia



(a)

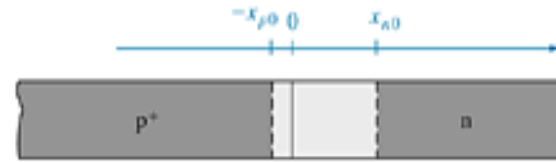


(b)

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

- (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

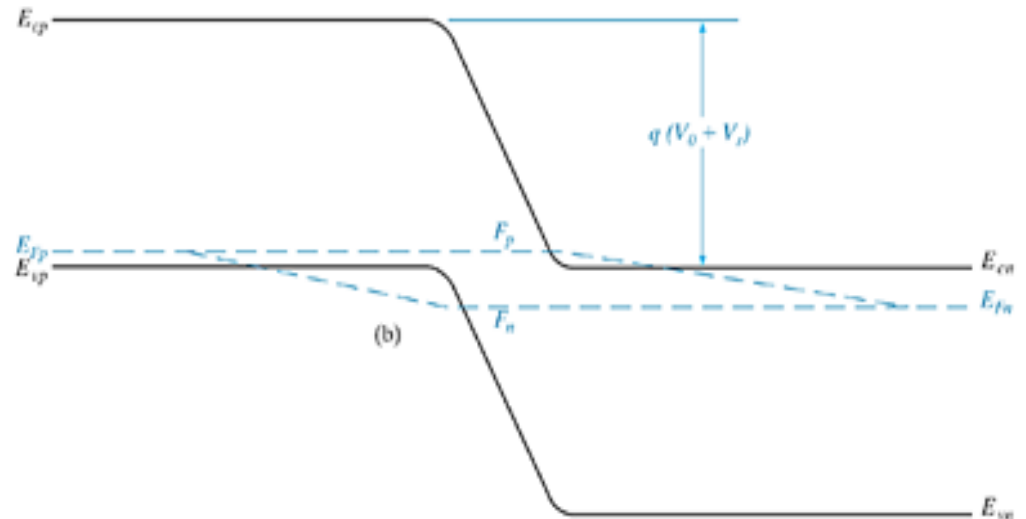
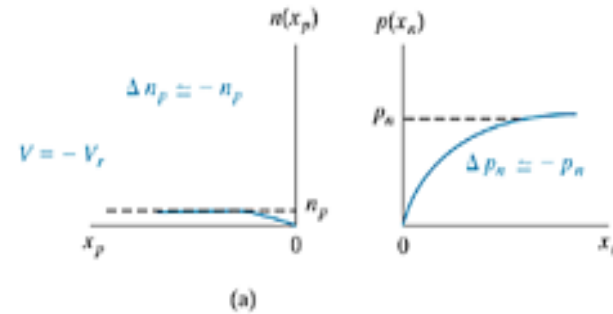
# Polaryzacja zaporowa



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

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

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

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

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

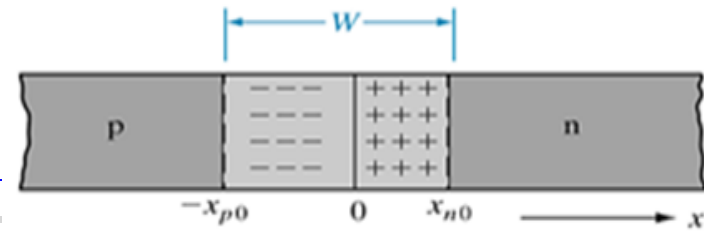
**W 1D**

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

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



# Ładunek przestrzenny w złączu p-n



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

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

$$\frac{d\varepsilon(x)}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_s} (p - n + N_d^+ - N_a^-)$$

$\varepsilon_s$  - stała dielektryczna półprzewodnika

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

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

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

Uwaga: w tych równaniach powinno być jeszcze  $\varepsilon_0$  obok  $\varepsilon_s$

# Ładunek

## przestrzenny

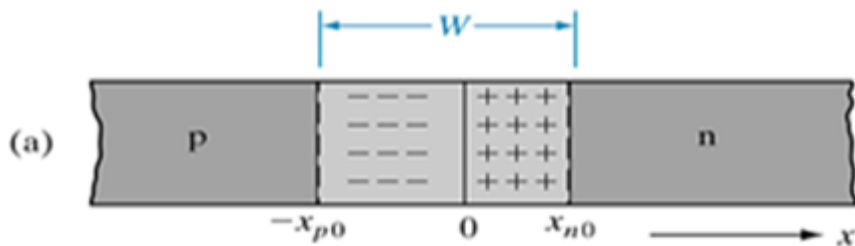
### w złączu p-n

Ładunek przestrzenny i pole elektryczne dla złącza p-n w którym  $N_d > N_a$ :

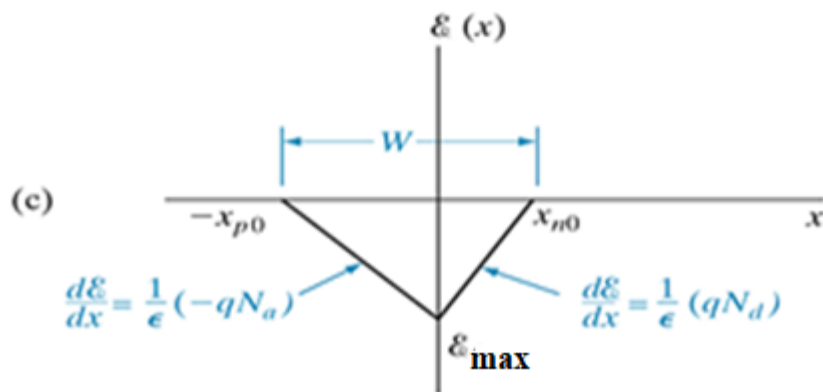
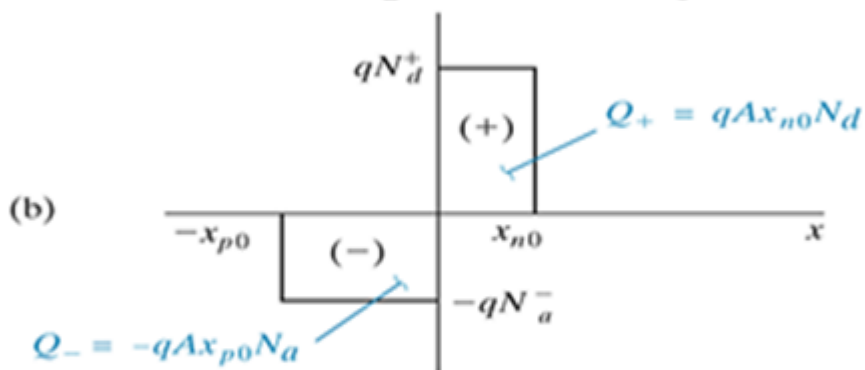
(a) złącze w  $x = 0$ ,

(b) ładunek przestrzenny w złączu przy założeniu, że nośniki swobodne są zaniedbane,

(c) rozkład pola elektrycznego.



### ładunek przestrzenny



# Ładunek przestrzenny w złączu p-n

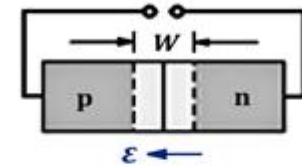
Maksymalne natężenie pola elektr.  $\epsilon_{\max}$

Stan równowagi  
( $V=0$ )

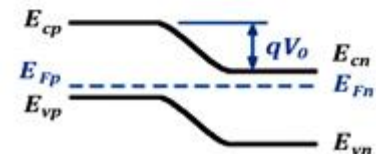
$$\int_{\epsilon_{\max}}^0 d\epsilon = \frac{q}{\epsilon_s} N_d \int_0^{x_{n0}} dx \quad (0 < x < x_{n0})$$

$$\int_0^{\epsilon_{\max}} d\epsilon = -\frac{q}{\epsilon_s} N_a \int_{-x_{p0}}^0 dx \quad (-x_{p0} < x < 0)$$

$$\epsilon_{\max} = -\frac{q}{\epsilon_s} N_d x_{n0} = -\frac{q}{\epsilon_s} N_a x_{p0} \quad \epsilon(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$$



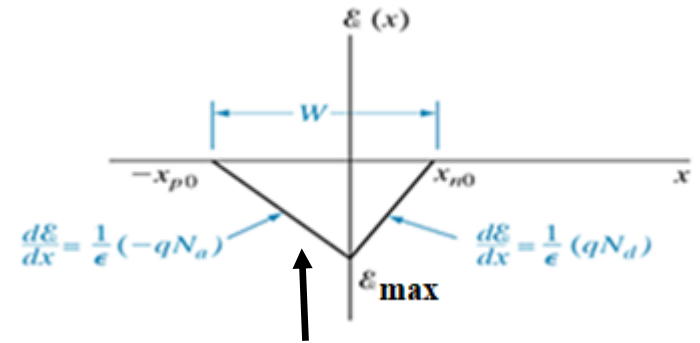
$$\epsilon_s = \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \quad \int_{V_p}^{V_n} dV(x) = -\int_{-x_{p0}}^{x_{n0}} \epsilon(x) dx$$



zakładając, że  $V_0 = V_n - V_p = V_n$ ,  $V_p = 0$

$$-V_0 = \int_{-x_{p0}}^{x_{n0}} \epsilon(x) dx$$

# Potencjał wbudowany i szerokość obszaru zubożonego



pole pod wykresem  $\varepsilon(x)$

$$V_0 = -\frac{1}{2} \varepsilon_{\max} W = \frac{1}{2} \frac{q}{\varepsilon_s} N_d x_{n0} W$$

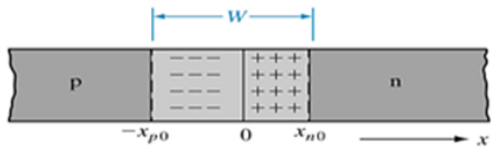
Ale  $x_{p0} N_a = x_{n0} N_d$  i  $W = x_{p0} + x_{n0}$  ➔

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

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s$$

gdzie  $\varepsilon_0$  - przenikalność próżni,  $\varepsilon_s$  przenikalność względna półprzewodnika

W układzie SI



# 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

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

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

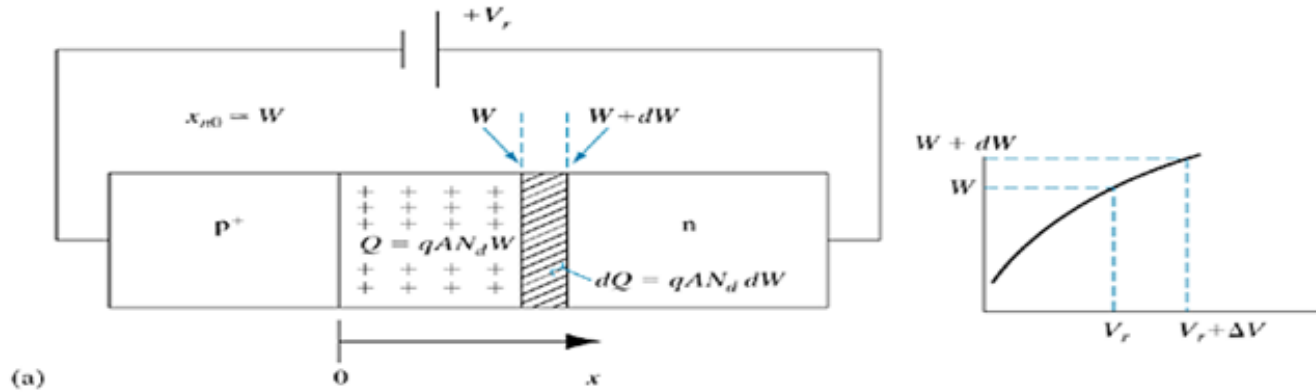
Dla złącza  $p^+n$  ( $N_a \gg N_d$ )

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

Dla polaryzacji zaporowej:

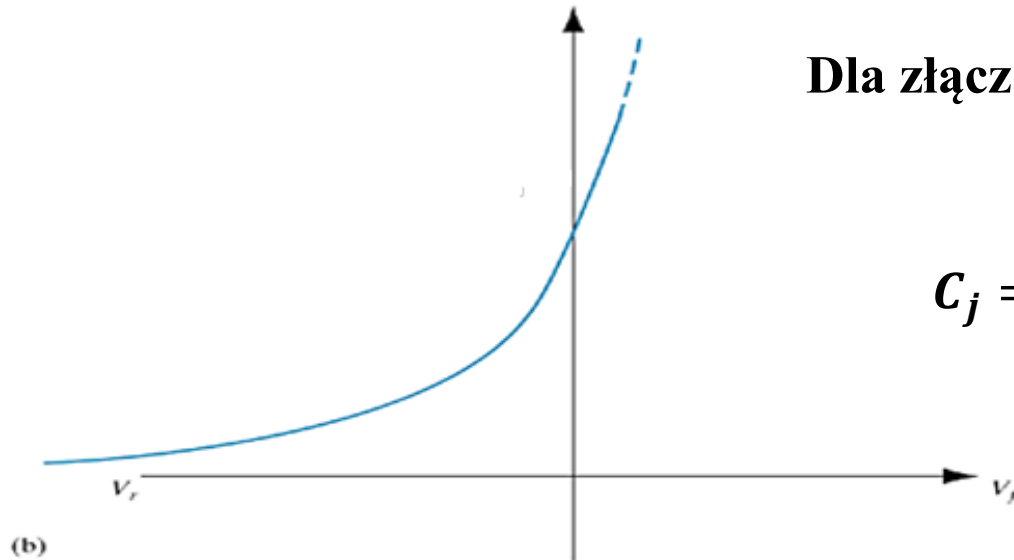
$$C_j = \frac{A}{2} \left[ \frac{2q\epsilon_0\epsilon_s N_d}{(V_0 + V)} \right]^{1/2}$$

# 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

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

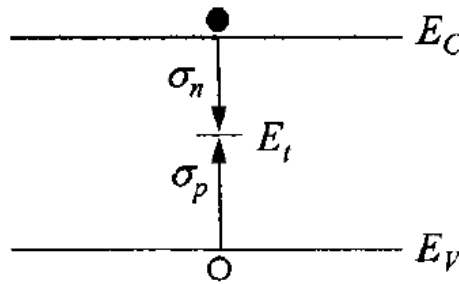
n - współczynnik idealności



# 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:

$$J_F = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{kT n_i}{\tau_p \mathcal{E}_0}} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

Prąd dyfuzyjny

Prąd rekombinacji

# Złącze p-n - kier. zaporowy - prąd generacji

$$n_n p_n \ll n_i^2$$

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

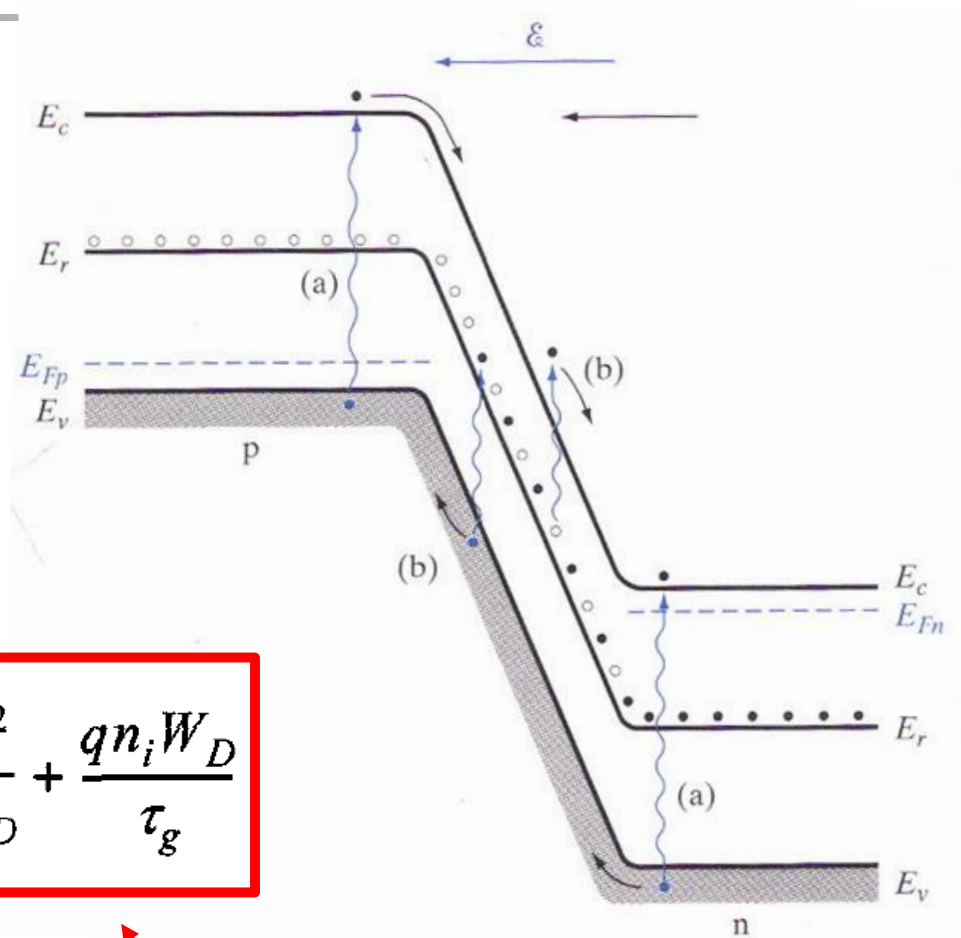
$$j_{gen} \approx \frac{qn_i W_d}{\tau_g} \propto \sqrt{V_{bi} - V}$$

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

