

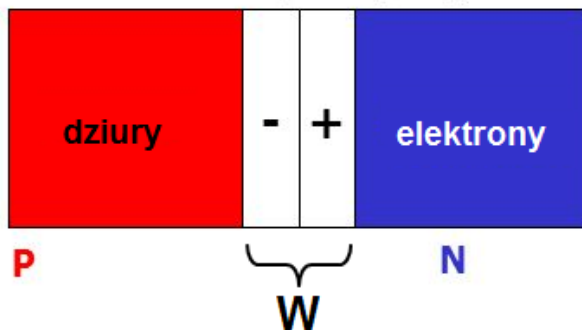
WYKŁAD 5

Spolaryzowane złącze p-n. Kwazi-poziomy Fermiego w złączu p-n spolaryzowanym w kierunku przewodzenia i zaporowym. Złącze p-n skokowe i liniowe. Charakterystyka prądowo-napięciowa idealnego i rzeczywistego złącza p-n.

Spolaryzowane złącze p - n

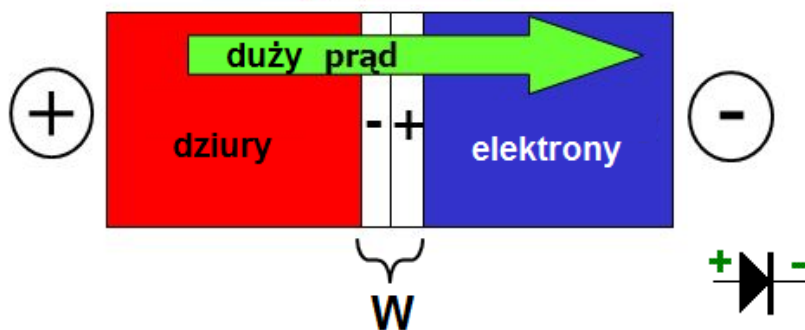
Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p - n (diody półprzewodnikowej)

Bez polaryzacji

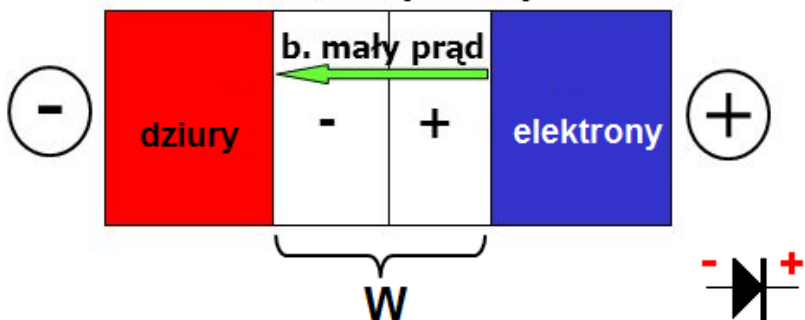


A – anoda
K – katoda

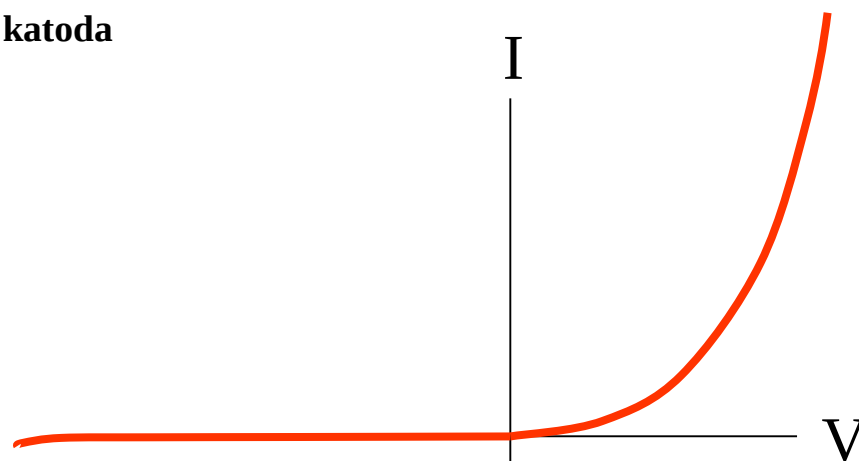
kier. przewodzenia



kier. zaporowy



Polaryzacja w kier. przewodzenia



Polaryzacja w kier. zaporowym

W – szerokość obszaru zubożonego

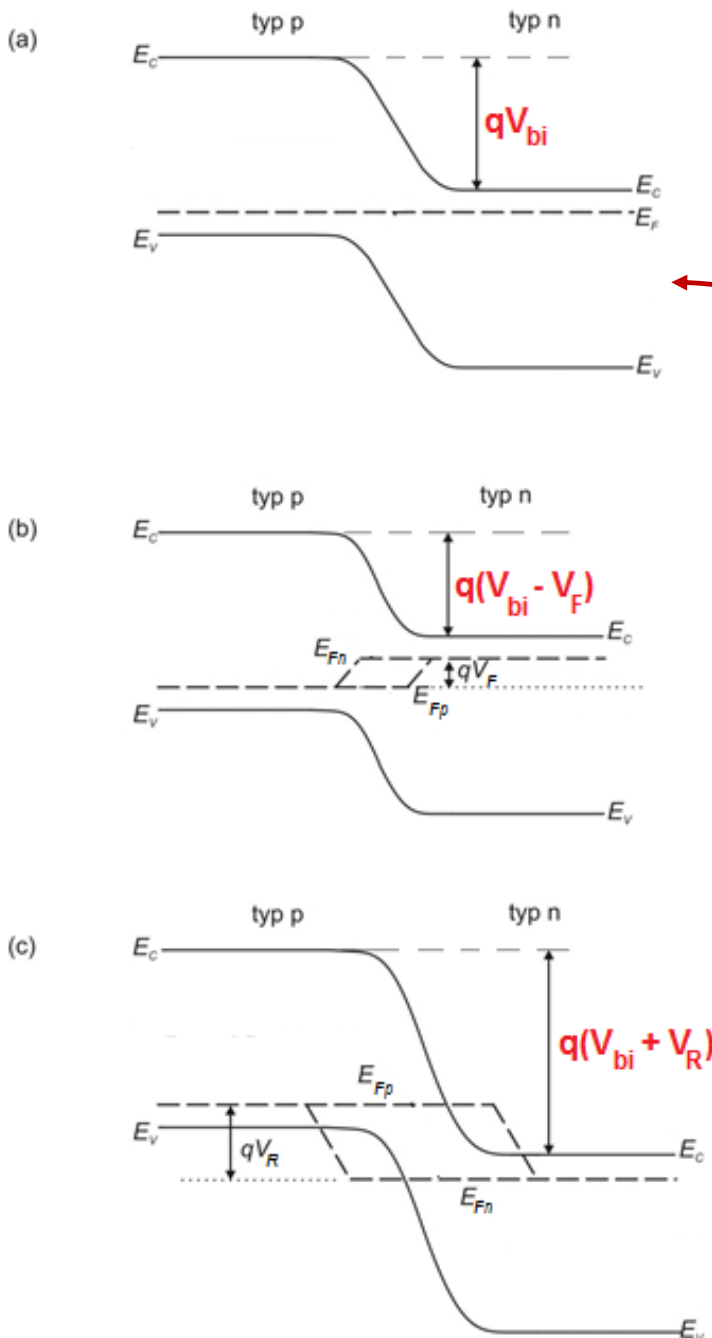
Spolaryzowane złącze $p-n$ – c.d.

Rys. Diagramy pasmowe złącza $p-n$:

(a) niespolaryzowanego,

(b) spolaryzowanego w kierunku przewodzenia,

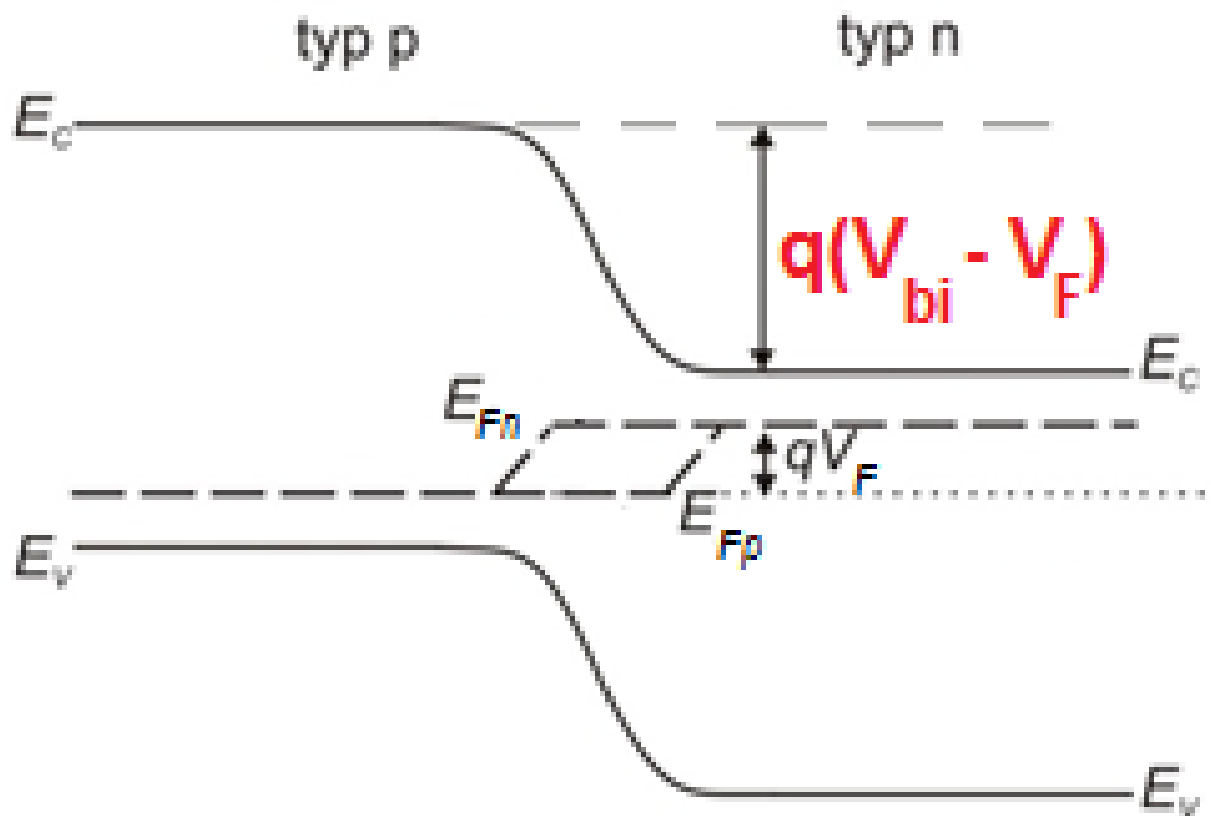
(c) spolaryzowanego w kierunku zaporowym.



W niespolaryzowanym złączu $p-n$ (Rys. (a)) prądy dyfuzyjne są równoważone przez prądy unoszenia i przez złącze nie płynie prąd. W przypadku polaryzacji o napięciu V_F w kierunku przewodzenia, zewnętrzne pole elektryczne jest skierowane przeciwnie do wbudowanego pola elektrycznego E wytworzonego w złączu $p-n$ (Rys. (b)). Wypadkowe pole elektryczne zmniejsza się co powoduje, że bariera potencjału obniża się i jest równa $q(V_{bi} - V_F)$. Szerokość obszaru zubożonego (W) jest mniejsza niż w przypadku niespolaryzowanego złącza $p-n$ (por. z rysunkiem na poprzednim slajdzie). Obniżenie bariery potencjału przyczynia się do zwiększenia prawdopodobieństwa przejścia nośników większościowych, co z kolei wpływa na **zwiększenie prądów dyfuzji elektronów i dziur**. Prądy unoszenia nośników mniejszościowych nie ulegają zmianie. Podczas polaryzacji złącza napięciem V_R w kierunku zaporowym (Rys. (c)), zewnętrzne pole elektryczne jest skierowane w tym samym kierunku co wbudowane pole E w złączu. Wypadkowe pole elektryczne zwiększa się powodując wzrost bariery potencjału do wartości $q(V_{bi} + V_R)$. Zwiększa się również szerokość obszaru zubożonego. Wzrost bariery potencjału zmniejsza prawdopodobieństwo przejścia nośników większościowych, czyli **zmniejsza wartość prądów dyfuzji elektronów i dziur**. Prądy unoszenia pozostają takie same.

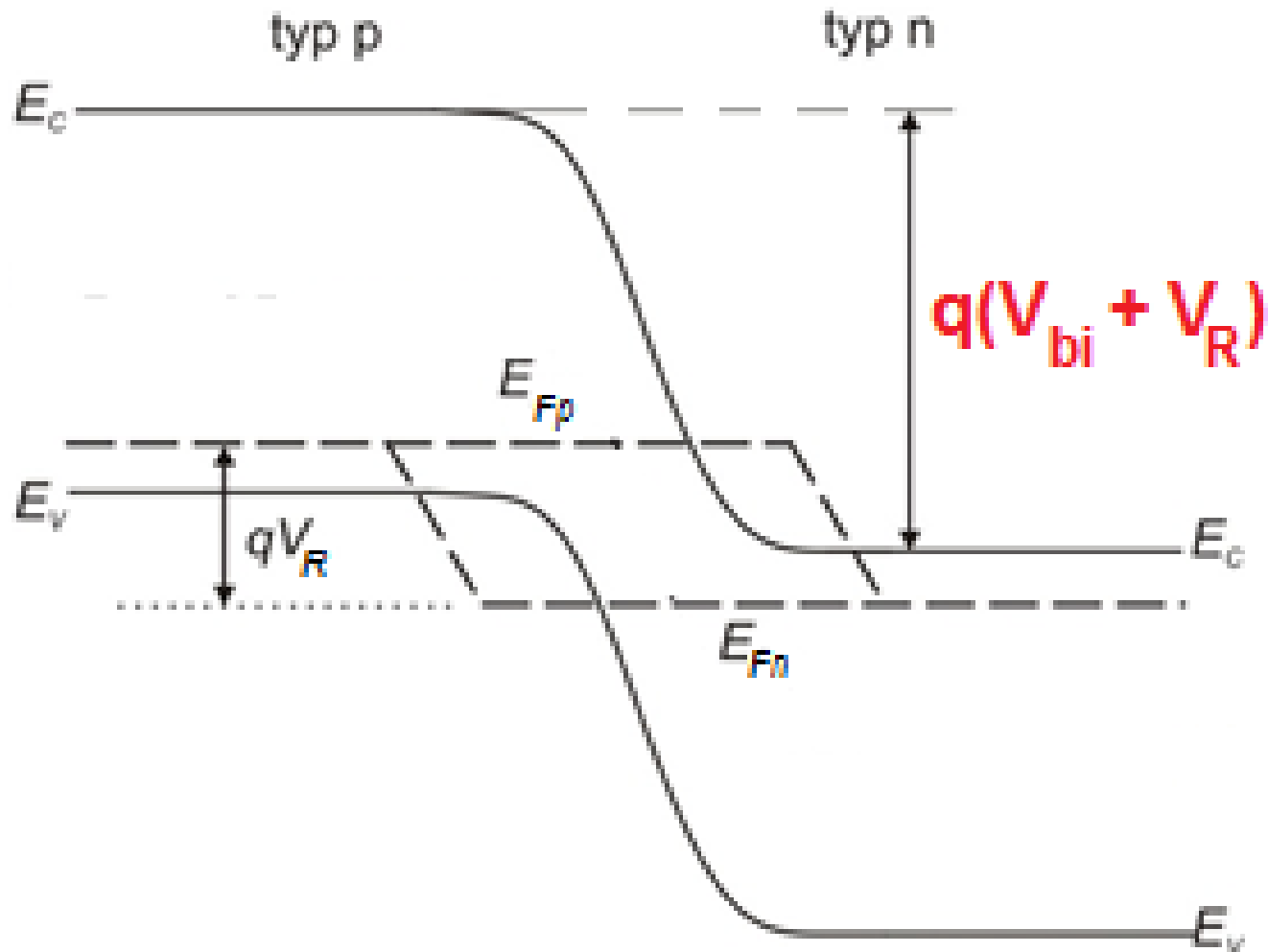
Kwazi-poziomy Fermiego.

Złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

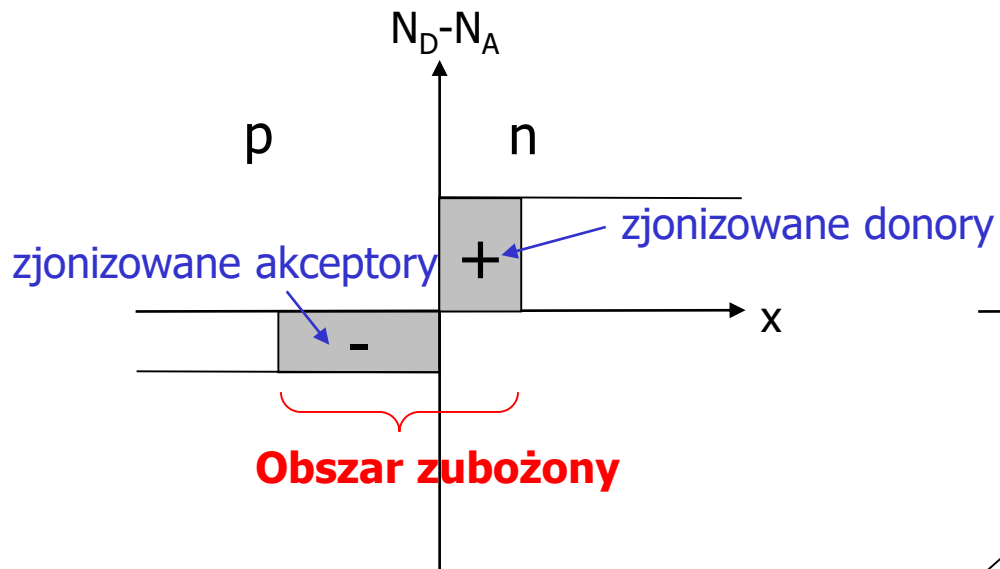
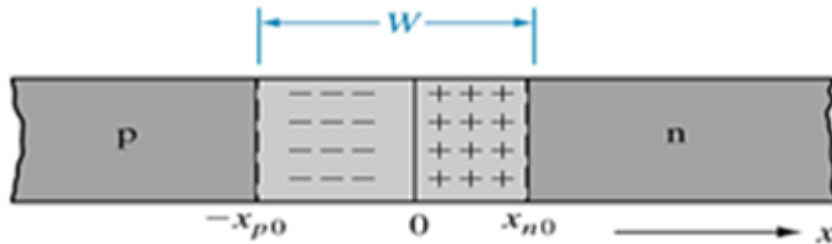


Kwazi-poziomy Fermiego.

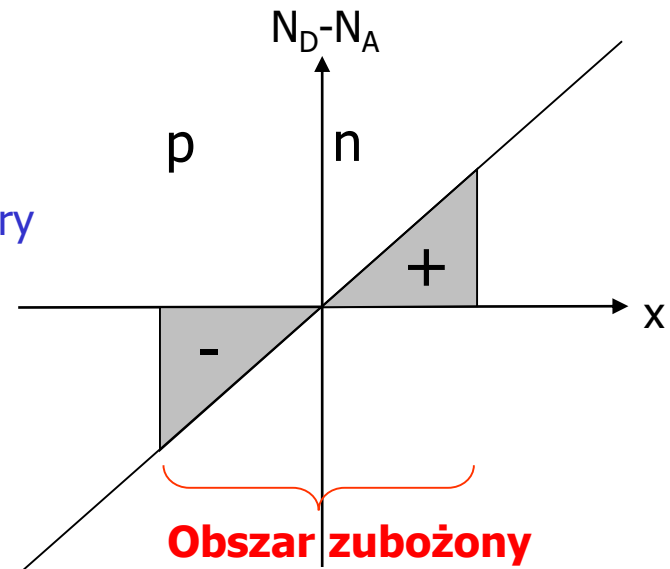
Złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym



Złącze p-n skokowe i liniowe

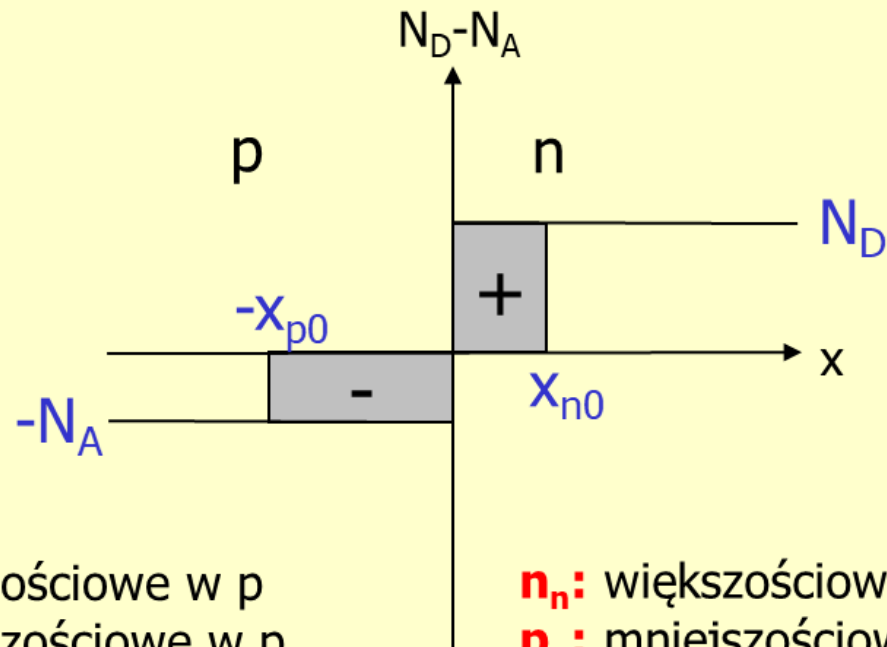


skokowe



liniowe

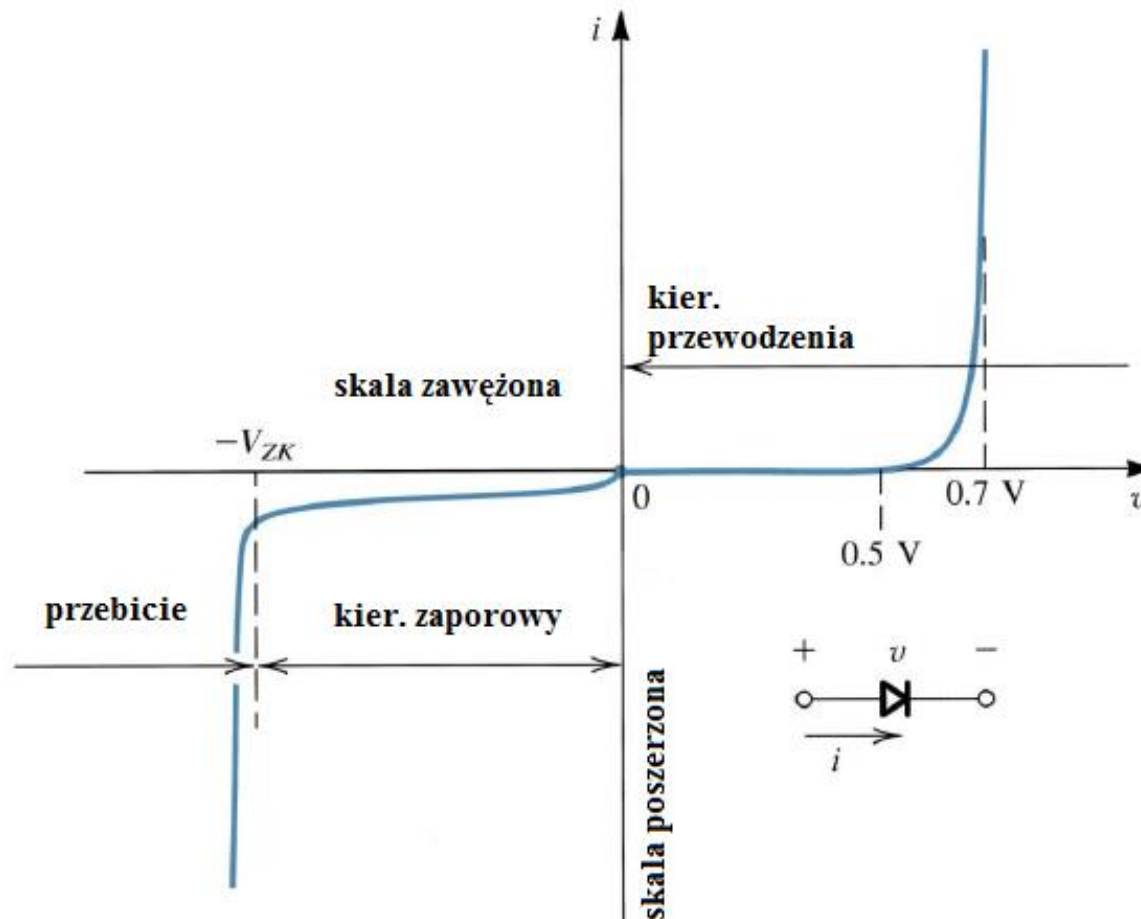
Złącze p-n skokowe



p_p : większościowe w p
 n_p : mniejszościowe w p

n_n : większościowe w n
 p_n : mniejszościowe w n

Charakterystyka prądowo-napięciowa (I-V) idealnego złącza p-n



Równanie Shockley'a

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

n – współczynnik idealności, $n=1$

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

I_s – prąd nasycenia

Charakterystyka I-V złącza p-n spolaryzowanego w kierunku 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 $n=2$: $I_s = 10^{-3} e^{-700/50} = 8.3 \times 10^{-10} \text{ A} \cong 10^{-9} \text{ A}$

Charakterystyka I-V złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym

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

- $V < 0$

$$I \cong -I_s$$

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

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

Czy równanie Shockley'a jest spełnione ?

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

Powody:

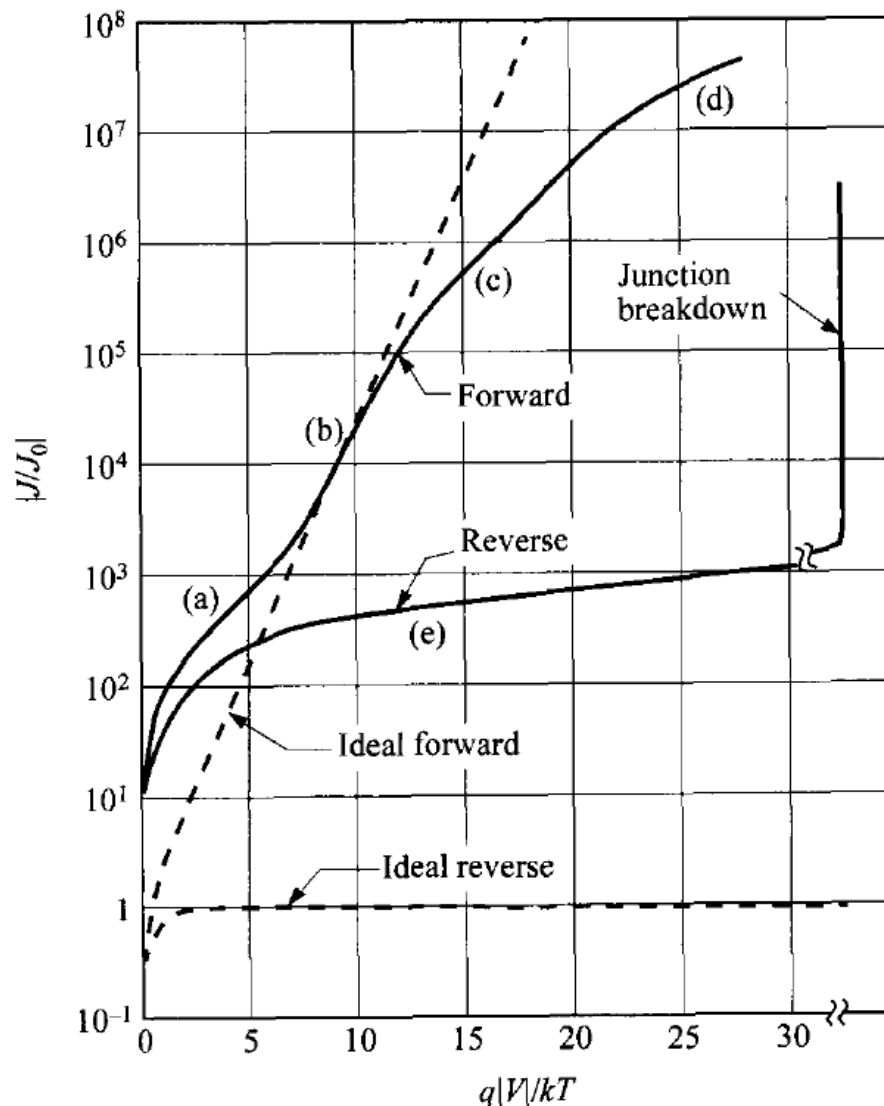
- ◆ generacja/rekombinacja nośników w obszarze zubożonym
- ◆ powierzchniowe “prądy” upływu
- ◆ oporność szeregową

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

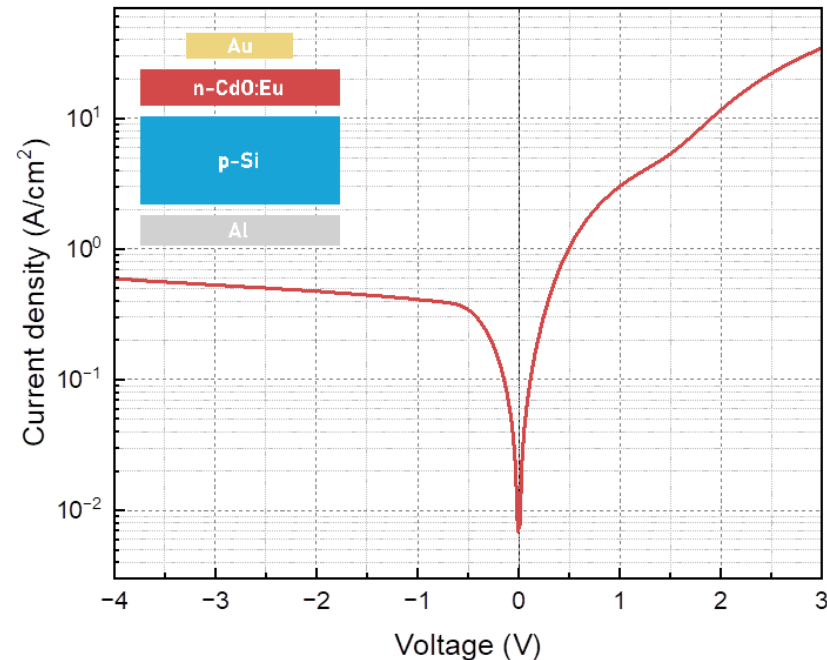
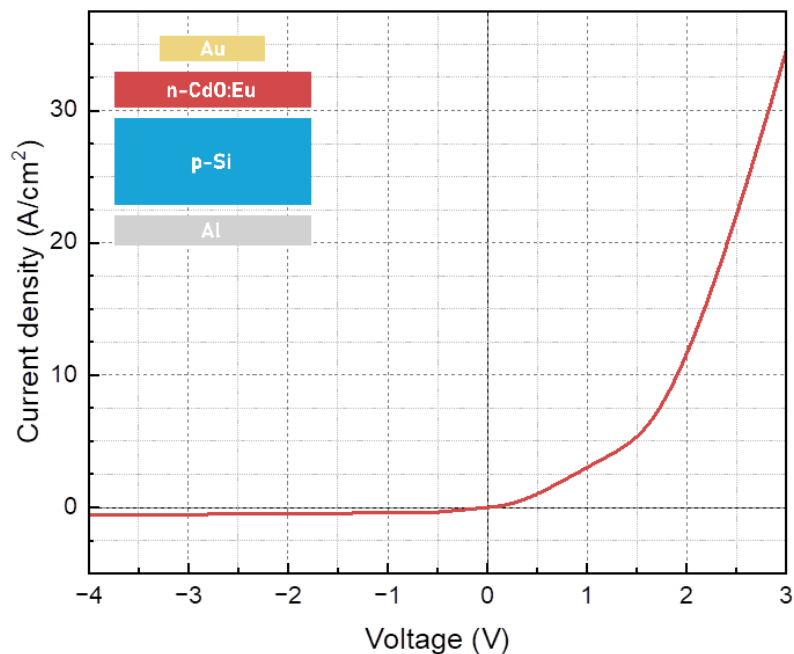
UWAGA!! $n \neq 1$

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



Charakterystyka I-V w rzeczywistym złączu p-n



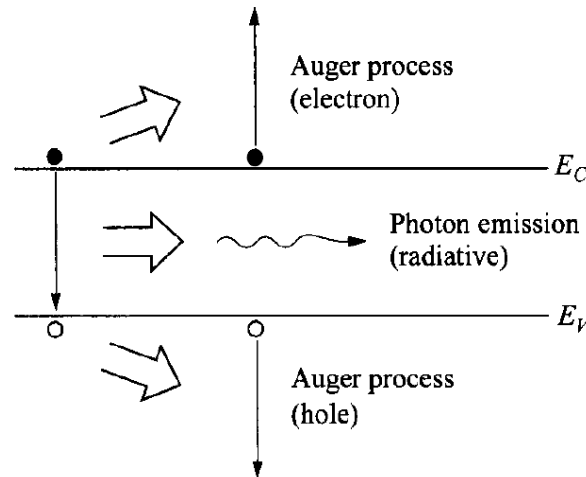
Równanie Shockley'a

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

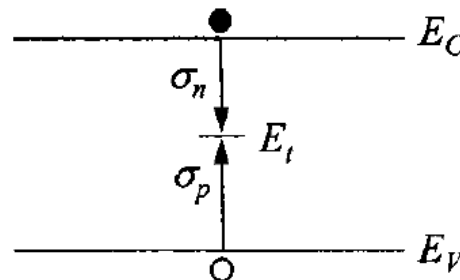
n – współczynnik idealności, $1 < n < 2$, zależne od materiału;

Rekombinacje: bezpośrednia, Augera i SRH

- Półprzewodnik z prostą przerwą wzbronioną



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



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

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

Kierunek przewodzenia - prąd rekombinacji

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

dla jednostronnego: p^+n ($p_{n0} \gg n_{p0}$):

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

Prąd dyfuzyjny

Prąd rekombinacji

$$n_i^2 \propto T^3 \exp(-E_g / kT)$$

$$n_i \propto T^{3/2} \exp(-E_g / 2kT)$$

Kierunek zaporowy - prąd generacji

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

$$j_{gen} \approx \frac{qn_i W_D}{\tau_g}$$

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

