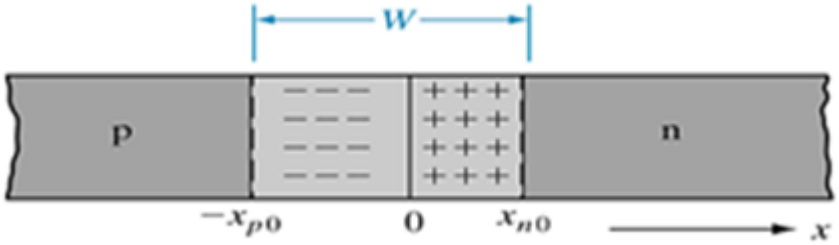
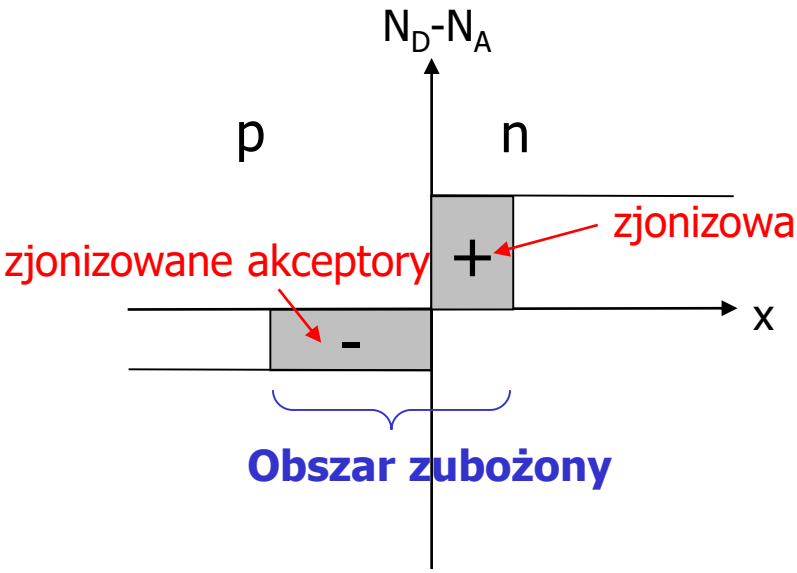
Wykład VIII

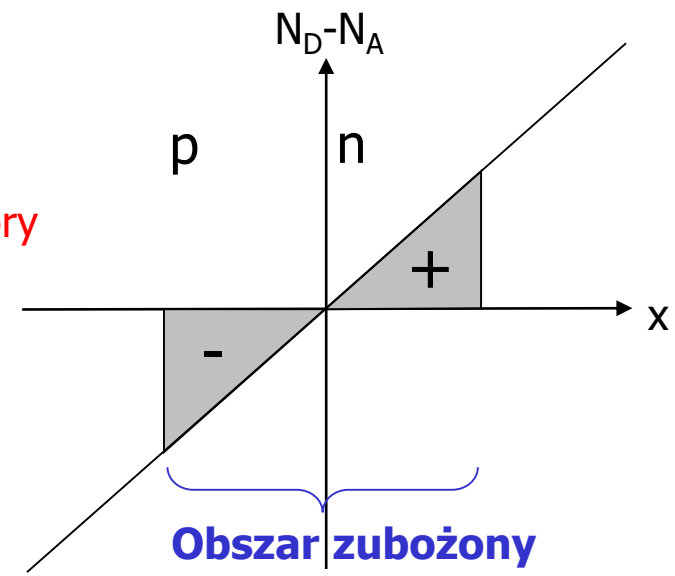
Złącze P-N

Złącze p-n skokowe i liniowe





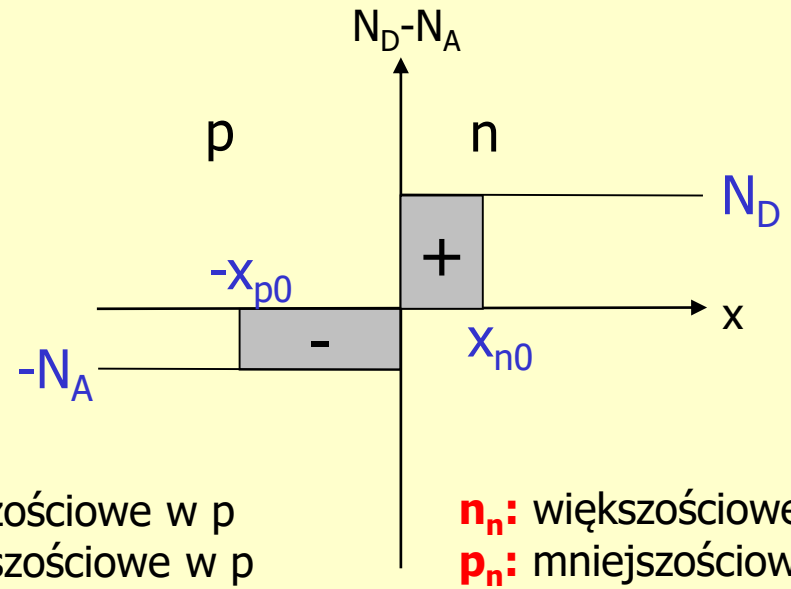
skokowe



liniowe

Złącze p-n skokowe

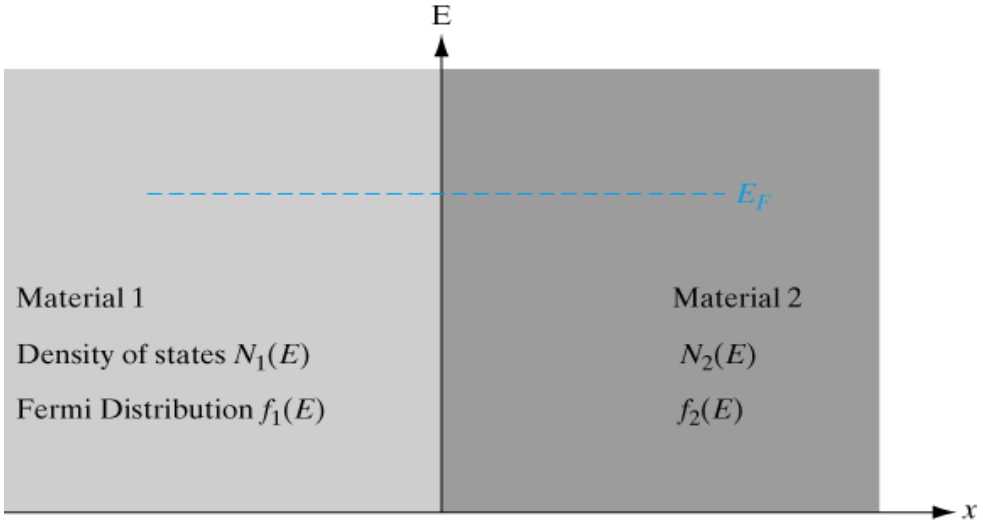
Warunek neutralności $qAx_{p0}N_a = qAx_{n0}N_d$



p_p: większościowe w p
n_p: mniejszościowe w p

n_n: większościowe w n
p_n: mniejszościowe w n

Złącze półprzewodnikowe



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

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

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 ~ 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

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

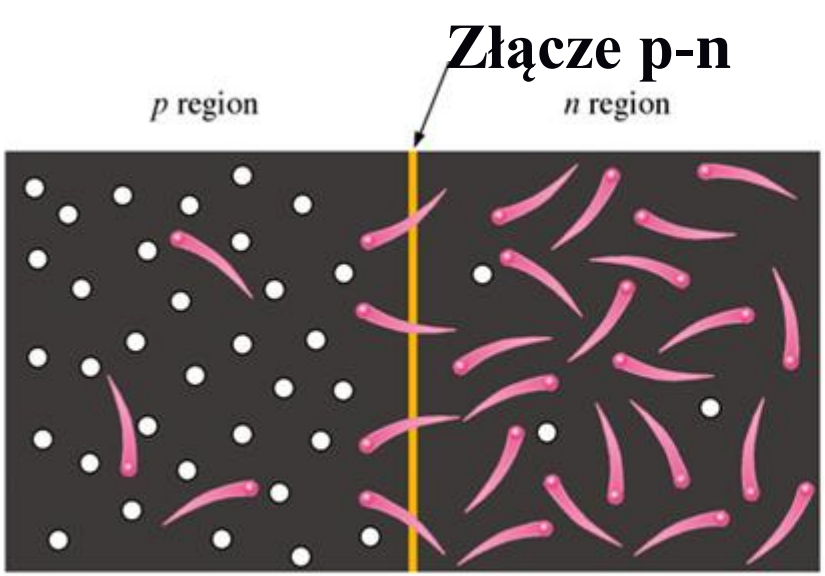
$$N_1(E)f_1(E)N_2(E)=N_2(E)f_2(E)N_1(E) \Rightarrow$$

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

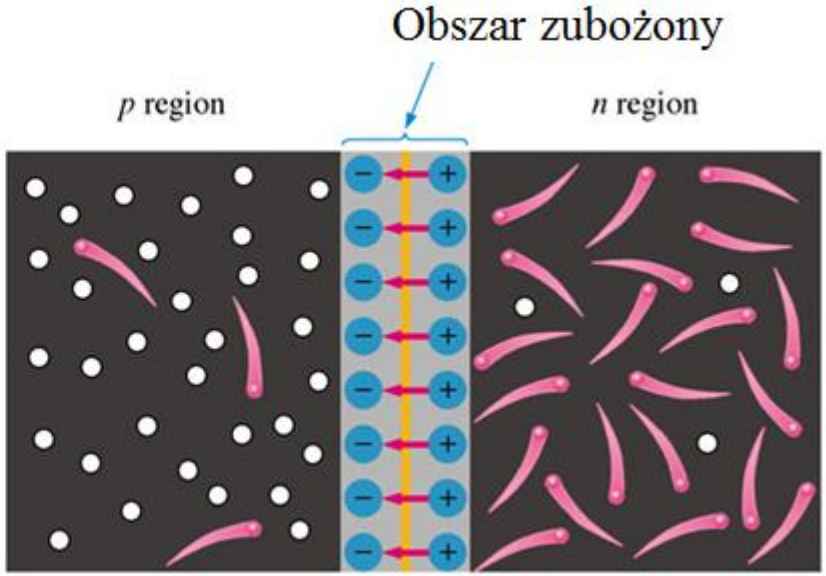
$$\Rightarrow E_{F1}=E_{F2} \Rightarrow \boxed{\frac{dE_F}{dx}=0}$$

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

Złącze p-n

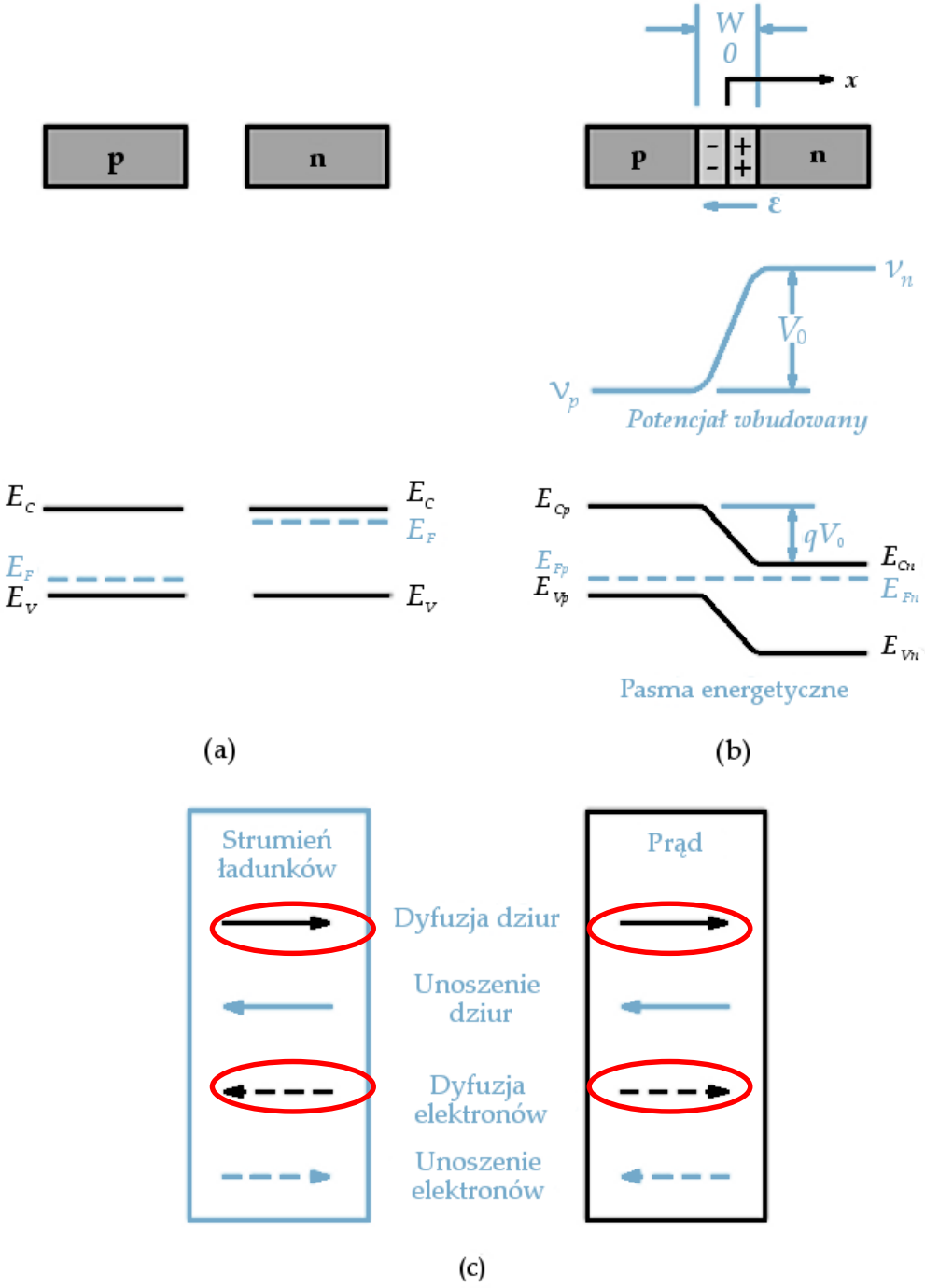


Tworzy się złącze p-n



Złącze po utworzeniu

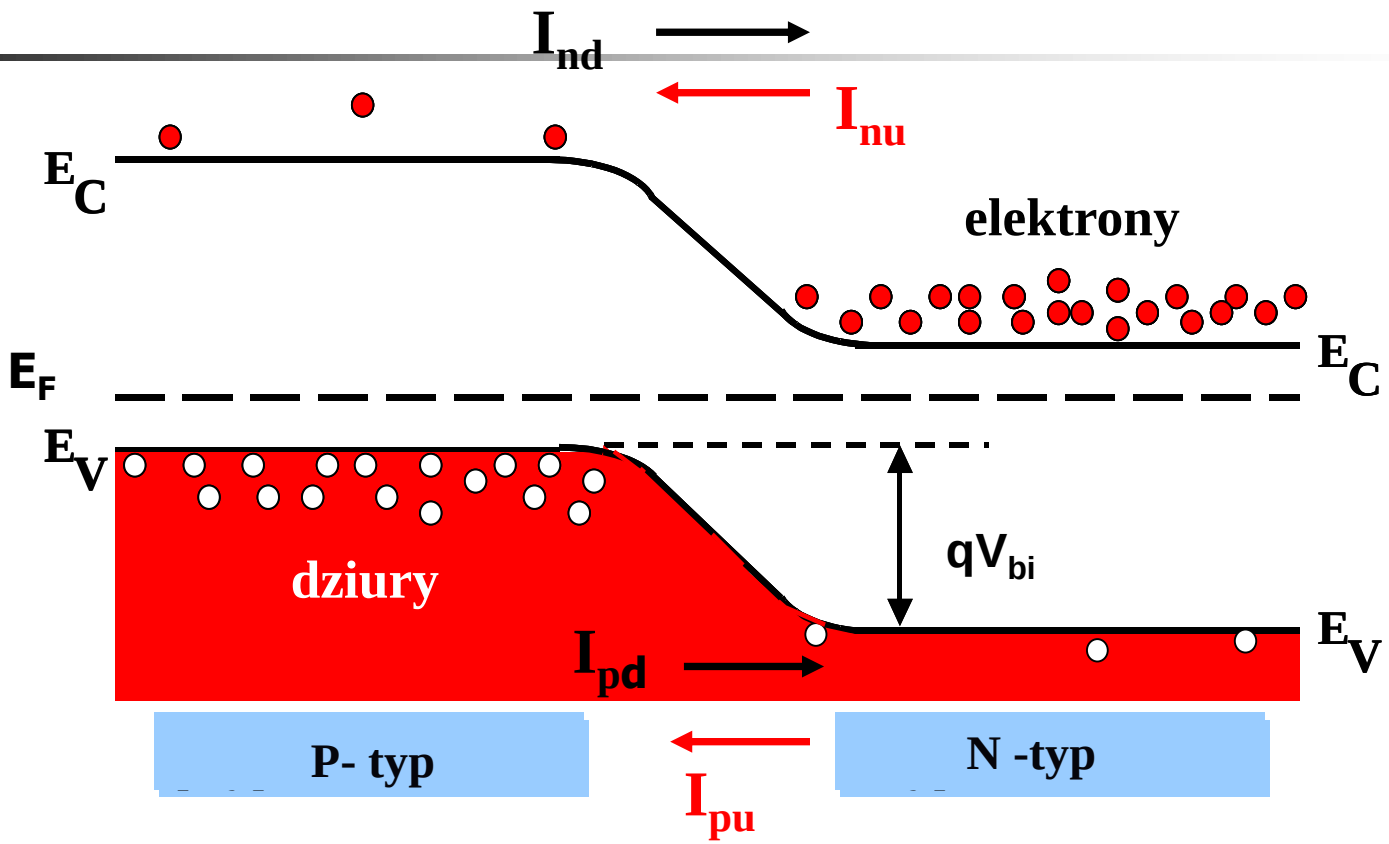
Tworzenie się złącza p-n - diagram pasmowy złącza



W stanie równowagi gradient poziomu Fermiego jest równy zeru!

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

Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej

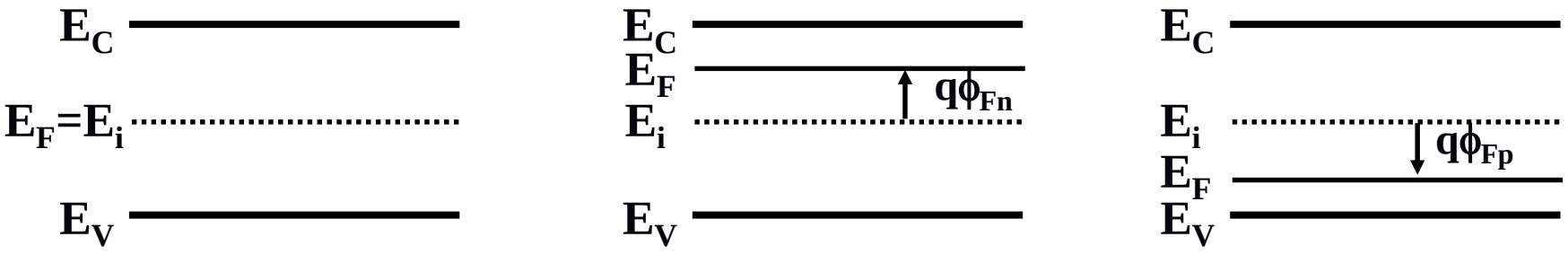


I_{nd} (I_{pd}) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

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

V_{bi} – potencjał wbudowany

Położenie poziomu Fermiego i koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku domieszkowym



samoistny **n-typu** **p-typu**

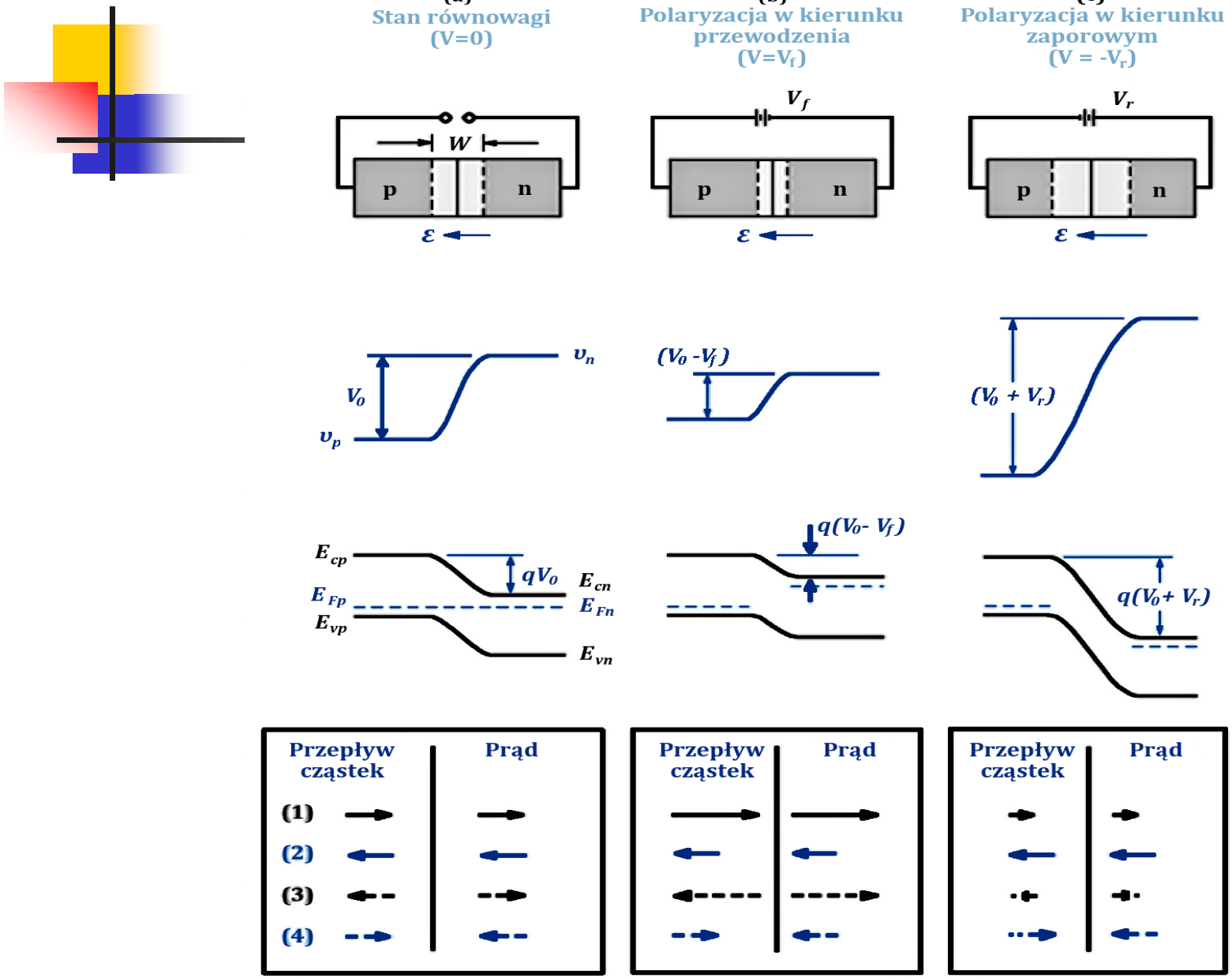
Wpływ domieszkowania na poziom Fermiego E_F

- **n-typu: poziom Fermiego przesuwa się do góry**
- **p-typu: poziom Fermiego przesuwa się w dół**

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

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

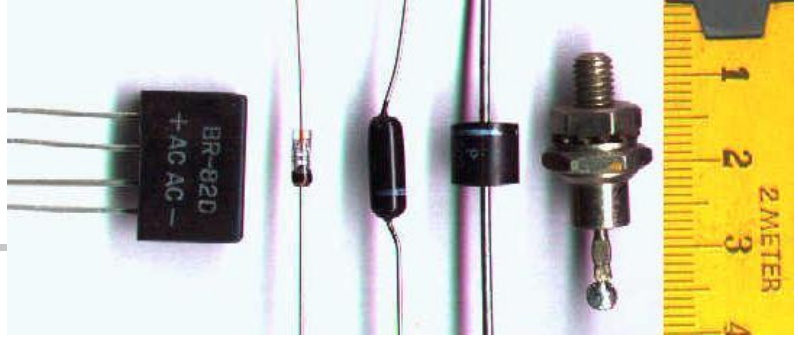
$$q\phi_F = E_F - E_i$$



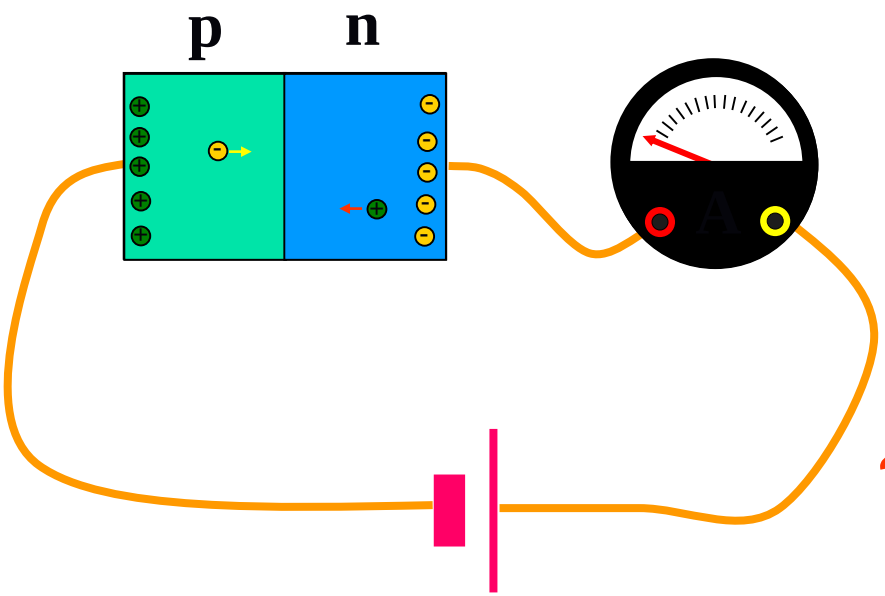
(1) Dyfuzja dziur
(2) Dryf dziur

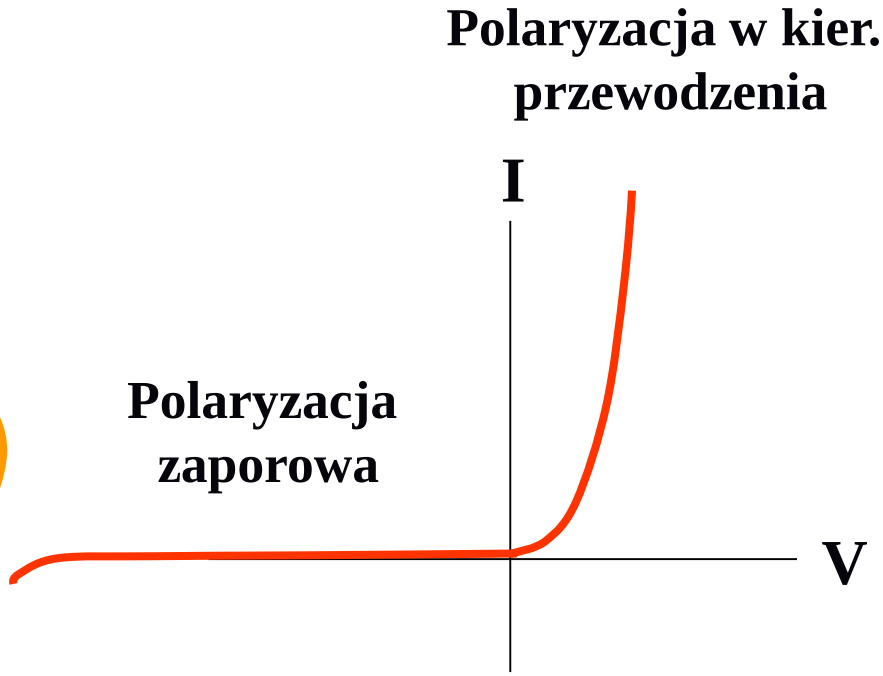
(3) Dyfuzja elektronów
(4) Dryf elektronów

Złącze p-n
dioda półprzewodnikowa

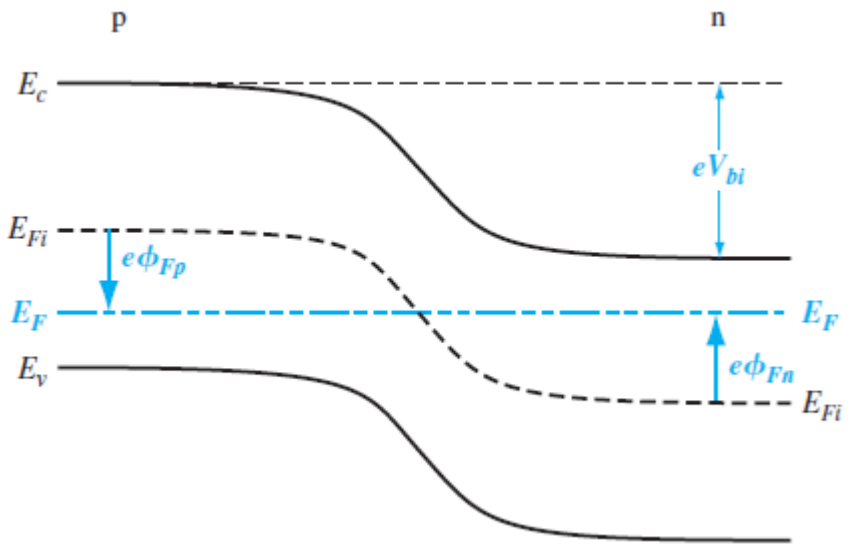


Charakterystyka I-V - nieliniowa





Potencjał wbudowany V_{bi} w złączu p-n



$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}|$$

$$n_0 = N_c \exp\left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right] \qquad n_0 = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right]$$

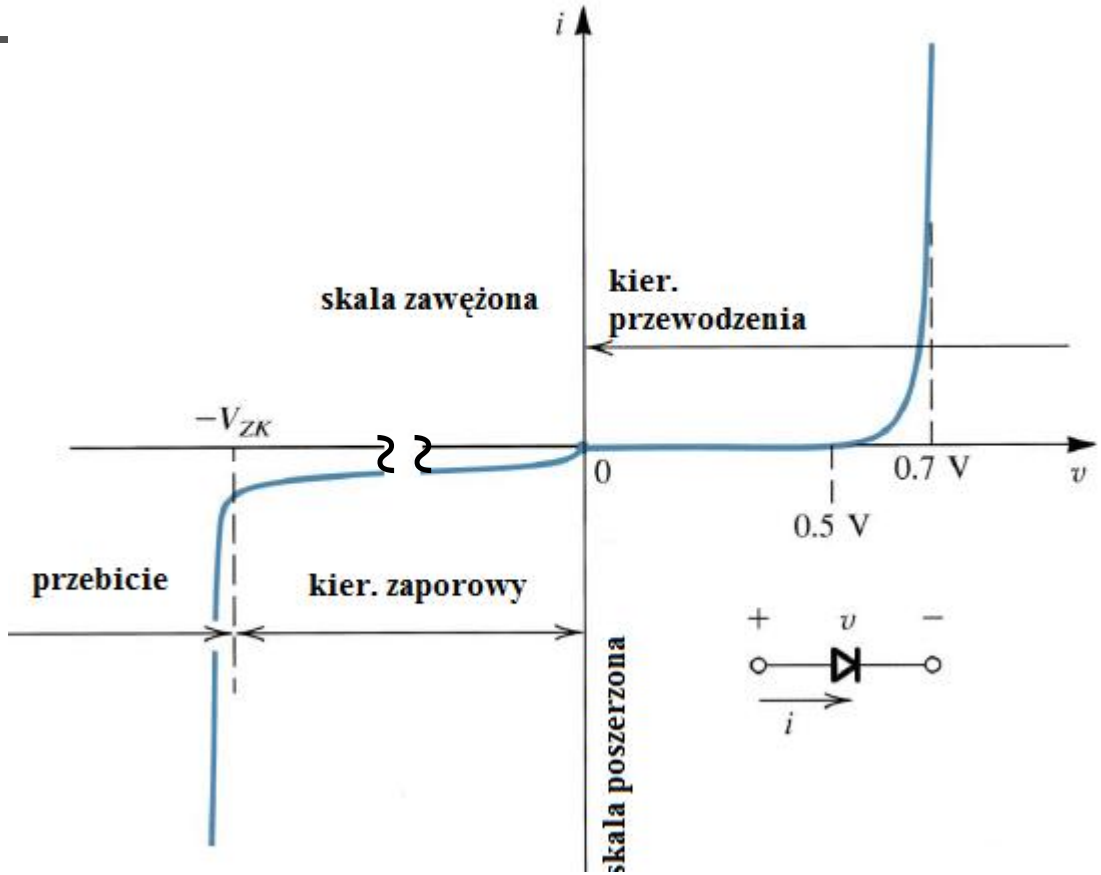
$$e\phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F \qquad n_0 = n_i \exp\left[\frac{-(e\phi_{Fn})}{kT}\right] \qquad n_0 = N_d \qquad \phi_{Fn} = \frac{-kT}{e}\ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right)$$

$$p_0 = N_a = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right] \qquad e\phi_{Fp} = E_{Fi} - E_F \qquad \phi_{Fp} = +\frac{kT}{e}\ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}|$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) = V_t \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

Równanie Shockley'a



$$I = I_s(e^{qV/kT} - 1) \qquad I_s = qA\left(\frac{D_p}{L_p}p_n + \frac{D_n}{L_n}n_p\right)$$

Prąd jest suma prądu rekombinacji i prądu generacji.

Kierunek przewodzenia

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

k- stała Boltzmanna $1.38x10^{-23} J/s$

T- temperatura w K=273+ C

q - ład. elektronu $1.6x10^{-19} C$

1<n<2, zależne od materiału;

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

Rozwiązanie:

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

Dla n=1: $I_S = 10^{-3} e^{-700/25} = 6.9x10^{-16} A \cong 10^{-15} A$

Dla n=2: $I_S = 10^{-3} e^{-700/50} = 8.3x10^{-10} A \cong 10^{-9} A$

Kierunek zaporowy

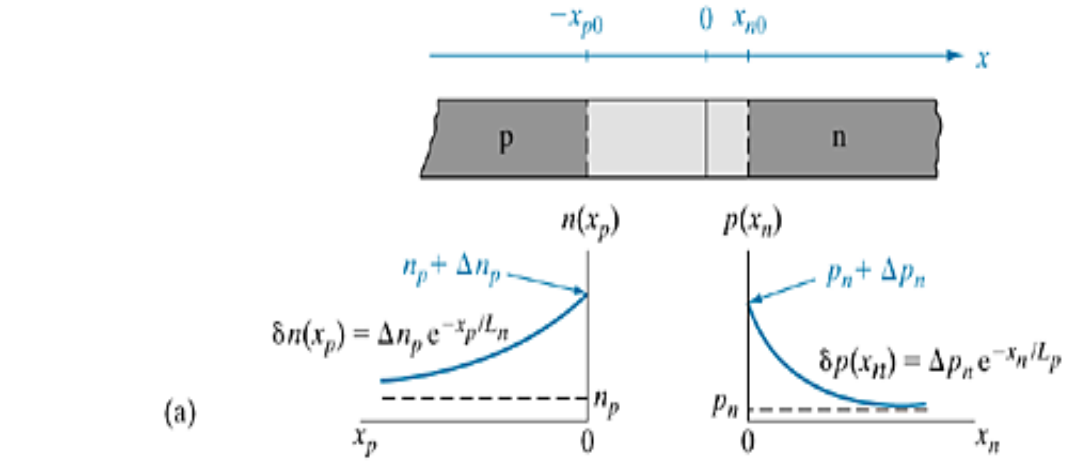
- $V < 0$

$$i \cong -I_s$$

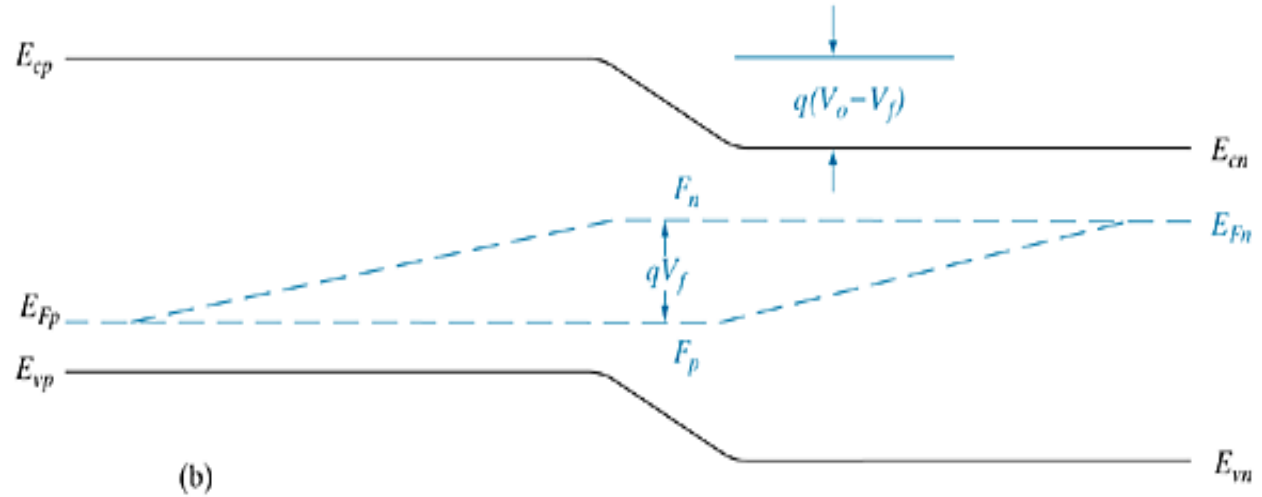
V<0 i kilka razy większe niż kT / q

- 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

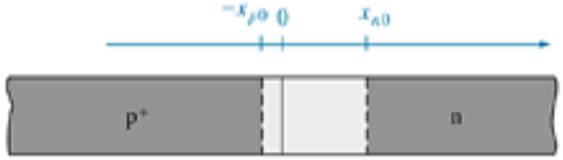
(b) położenie kwazi –poziomów Fermiego

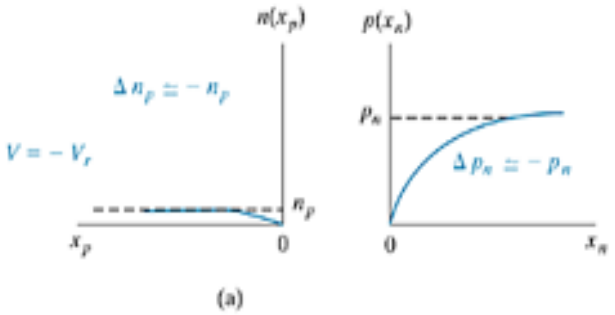
Polaryzacja zaporowa

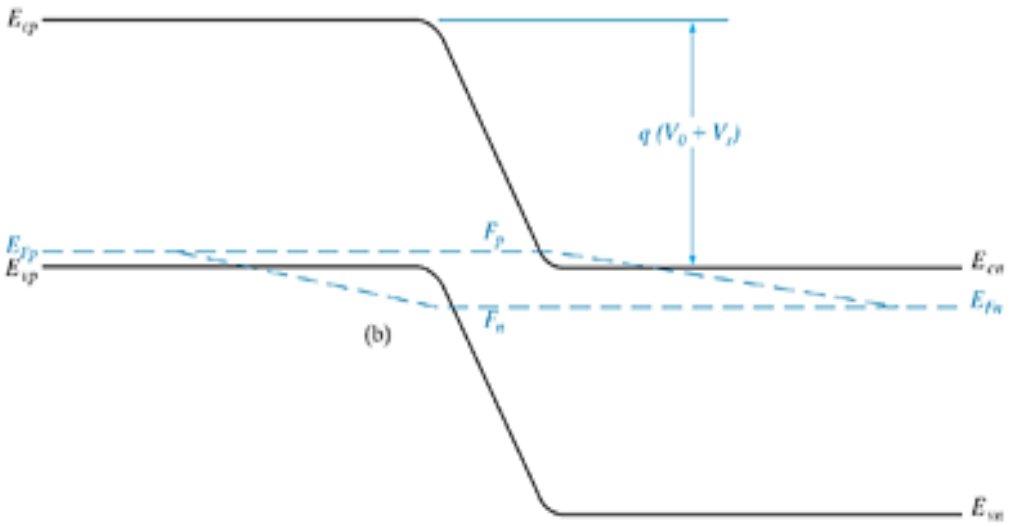
Dla polaryzacji

zaporowej V = -V_r (V_r >> kT/q) :

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







Równanie Poissona

$\varepsilon(x)$ - natężenie pola elektrycznego

$V(x)$ - potencjał pola elektrycznego

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

$$\vec{\varepsilon} = -gradV$$

$$-divgradV = -\Delta V$$

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

W 1D

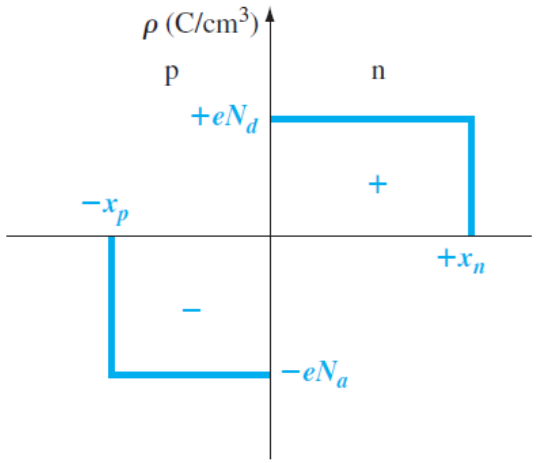
$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

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

Równanie Poissona dla złącza p-n

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{d\mathrm{E}(x)}{dx}$$

$$N_a x_p = N_d x_n$$



Równanie Poissona dla strony p:

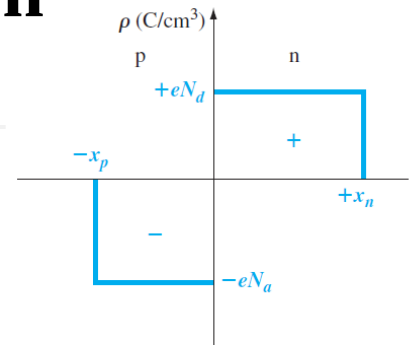
$$\rho(x) = -eN_a \qquad -x_p < x < 0$$

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

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

$$\mathrm{E} = \frac{-eN_a}{\epsilon_s}(x + x_p) \qquad -x_p \le x \le 0$$

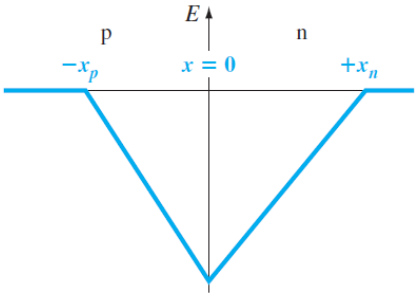
Równanie Poissona dla złącza p-n



Równanie Poissona dla strony n:

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

$\mathrm{E} = 0$ **dla** $x = x_n$ ⇒



$$\mathrm{E} = \frac{-eN_d}{\epsilon_s}(x_n - x) \qquad 0 \le x \le x_n$$

$$\mathrm{E}_{\max} = \frac{-eN_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{-eN_a x_p}{\epsilon_s}$$

Potencjał po stronie p: $\phi(x) = -\int \mathrm{E}(x)dx = \int \frac{eN_a}{\epsilon_s}(x + x_p)dx$

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{\epsilon_s}\left(\frac{x^2}{2} + x_p \cdot x\right) + C_1' \qquad \textbf{Dla} \quad x = -x_p. \quad \boldsymbol{\phi(x_p) = 0} \Rightarrow$$

$$C_1' = \frac{eN_a}{2\epsilon_s}x_p^2 \qquad \phi(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon_s}(x + x_p)^2 \qquad (-x_p \le x \le 0)$$

Równanie Poissona dla złącza p-n

Potencjał po stronie n: $\phi(x) = \int \frac{eN_d}{\epsilon_s}(x_n - x)dx$

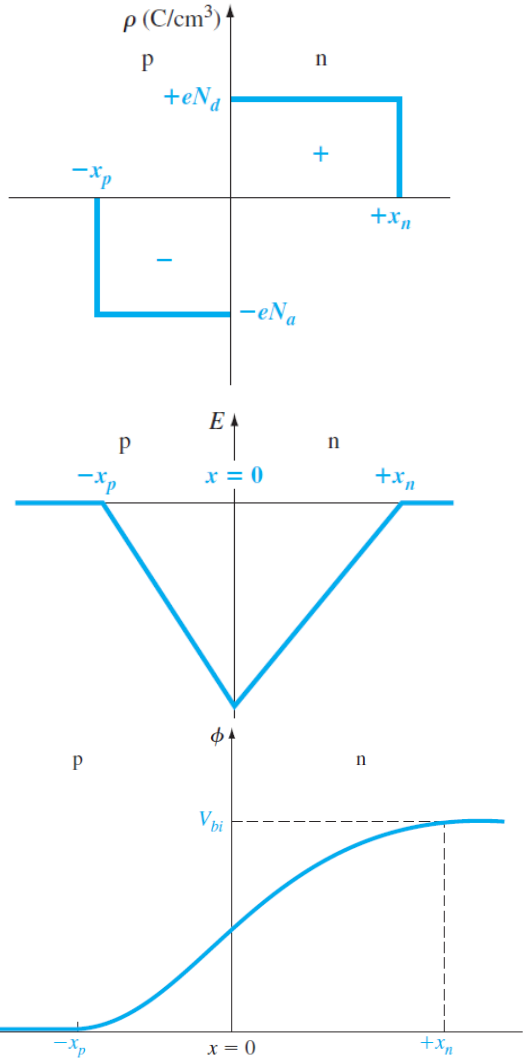
$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s}\left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2}\right) + C_2'$$

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

$$C_2' = \frac{eN_a}{2\epsilon_s}x_p^2$$

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

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



Szerokość obszaru zubożonego

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

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

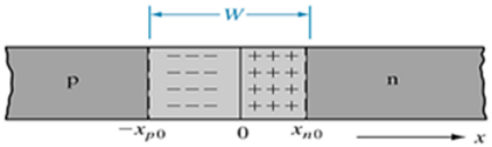
lub $$x_p = \left\{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e}\left[\frac{N_d}{N_a}\right]\left[\frac{1}{N_a + N_d}\right]\right\}^{1/2}$$

$$W = x_n + x_p \qquad x_p = \frac{N_d x_n}{N_a} \quad \rightarrow \quad W = x_n \frac{N_D + N_A}{N_A}$$

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

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 złącza p-n

$$|Q| = qAx_nN_d$$

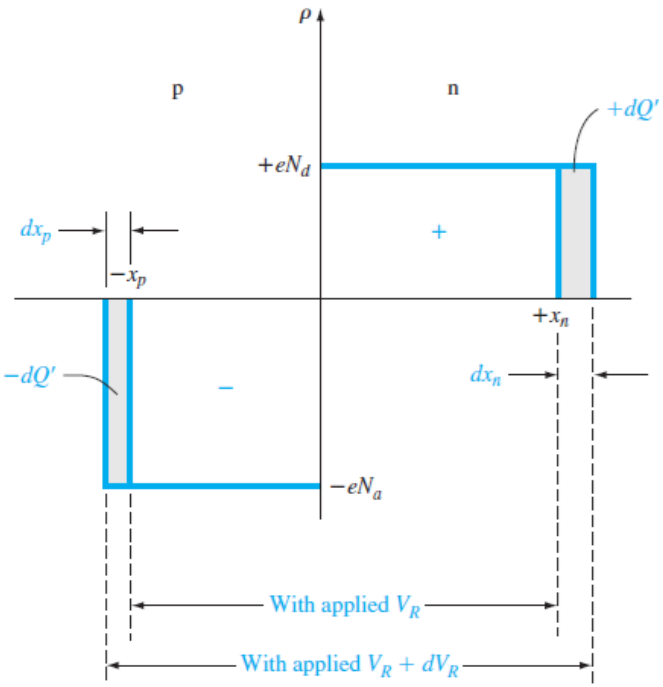
$$x_n = \left\{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e}\left[\frac{N_a}{N_d}\right]\left[\frac{1}{N_a + N_d}\right]\right\}^{1/2}$$

Po spolaryzowaniu diody w kierunku zaporowym:

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

$$dQ = eN_d\,dx_n = eN_a\,dx_p$$

$$C = \left|\frac{dQ}{dV_R}\right| \qquad C = \epsilon_s A\left[\frac{e}{2\,\epsilon_s\,(V_{bi} + V_R)}\,\frac{N_a N_d}{N_a + N_d}\right]^{1/2}$$



Pojemność złącza p-n = pojemność obszaru zubożonego

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

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

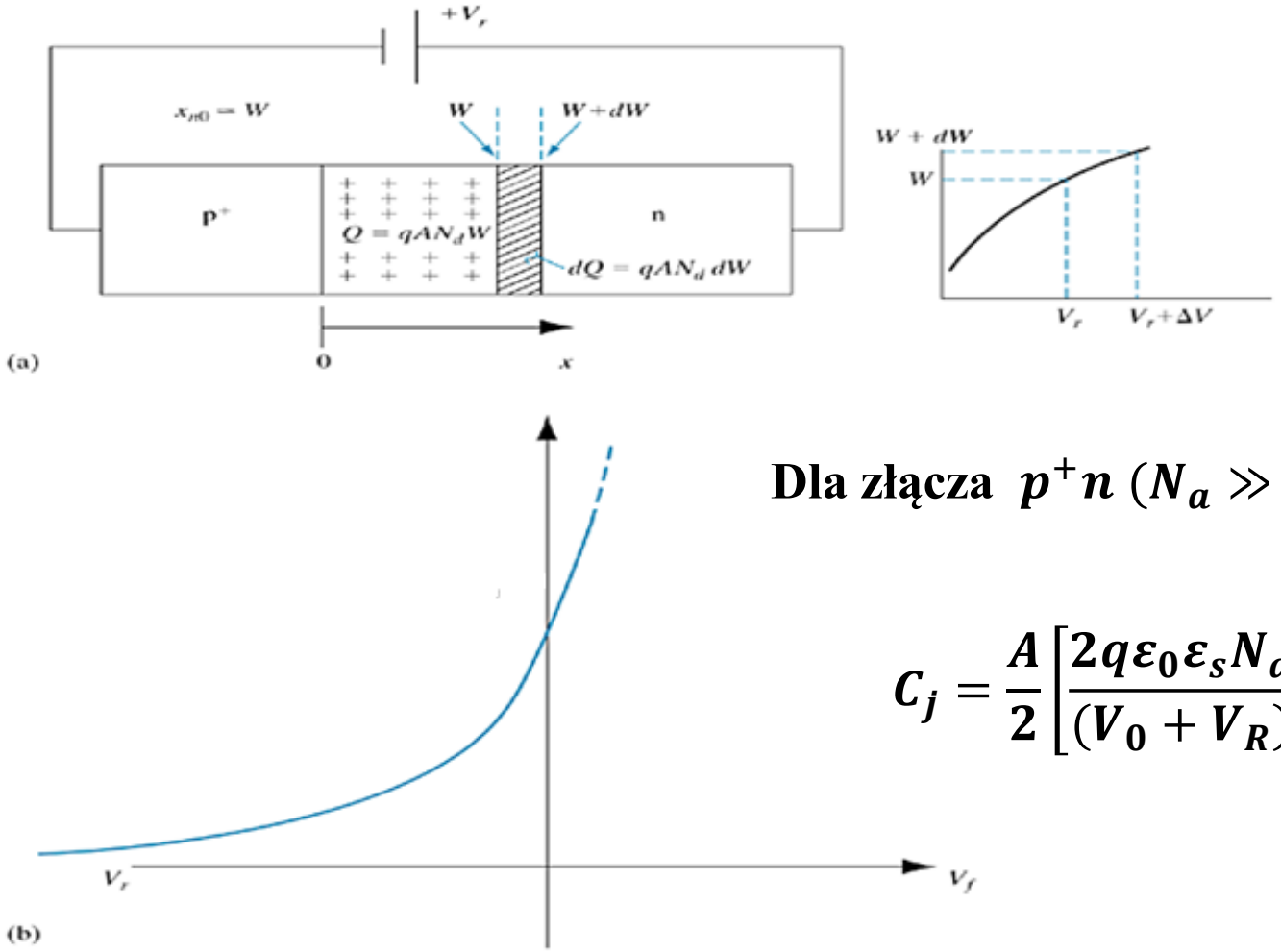
Dla złącza $p^+ n$ $(N_a \gg N_d)$

$$C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2e\varepsilon_0 \varepsilon_s N_d}{(V_0 - V)} \right]^{1/2}$$

Dla polaryzacji zaporowej:

$$C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2e\varepsilon_0 \varepsilon_s N_d}{(V_0 + V_R)} \right]^{1/2}$$

Pojemność obszaru zubożonego



Dla złącza p^+n $(N_a \gg N_d)$

$$C_j = \frac{A}{2}\left[\frac{2q\varepsilon_0\varepsilon_s N_d}{(V_0 + V_R)}\right]^{1/2}$$

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 szeregowa

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

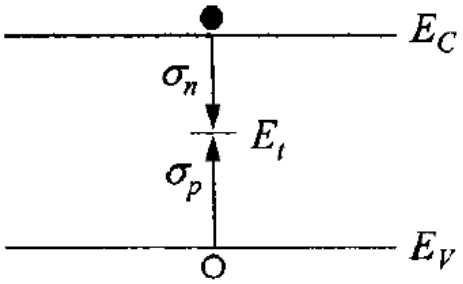
n - współczynnik idealności

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

Rekombinacja z udziałem poziomów pułapkowych

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

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



$$n_n p_n >> n_i^2$$

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

Całkowity prąd dla złącza p+-n:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

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

Prąd rekombincji (wstrzykiwania) w obszarze neutralnym

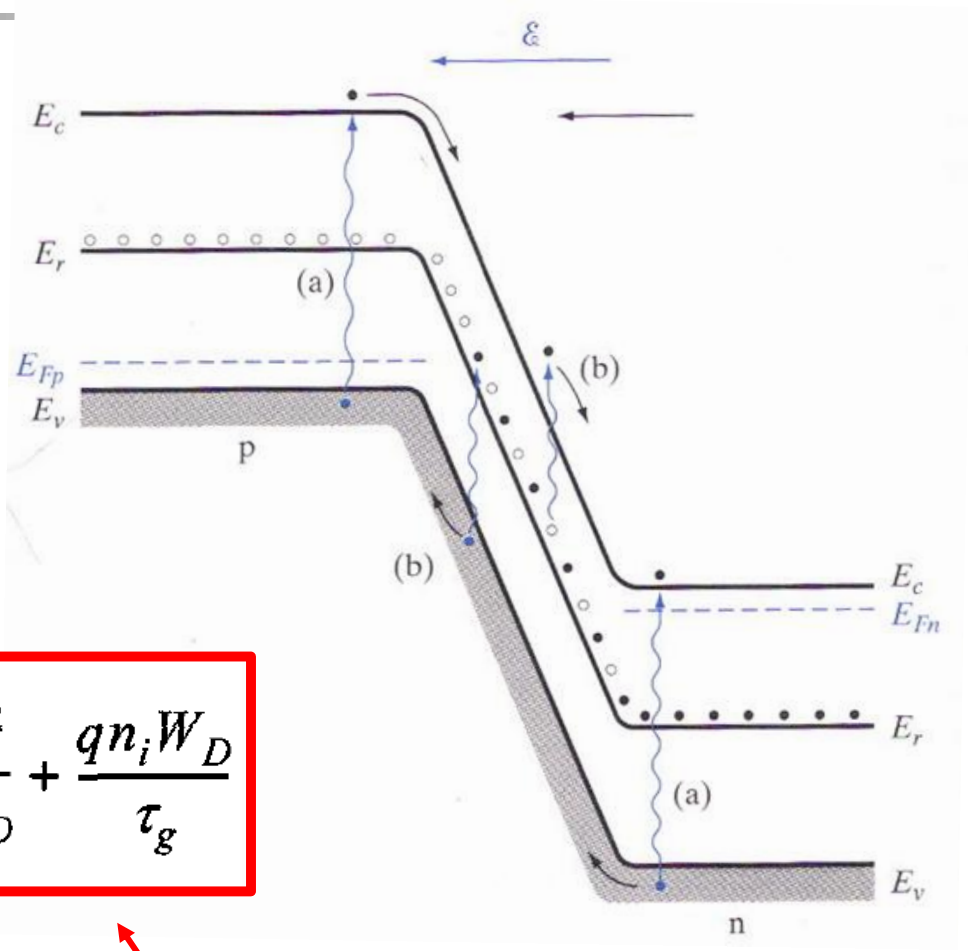
Prąd rekombinacji w obszarze zubożonym

Złącze p-n - kier. zaporowy - prąd generacji

$$n_n p_n \ll n_i^2$$

$$p \ll n_i \qquad n \ll n_i$$

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



Całkowity prąd:

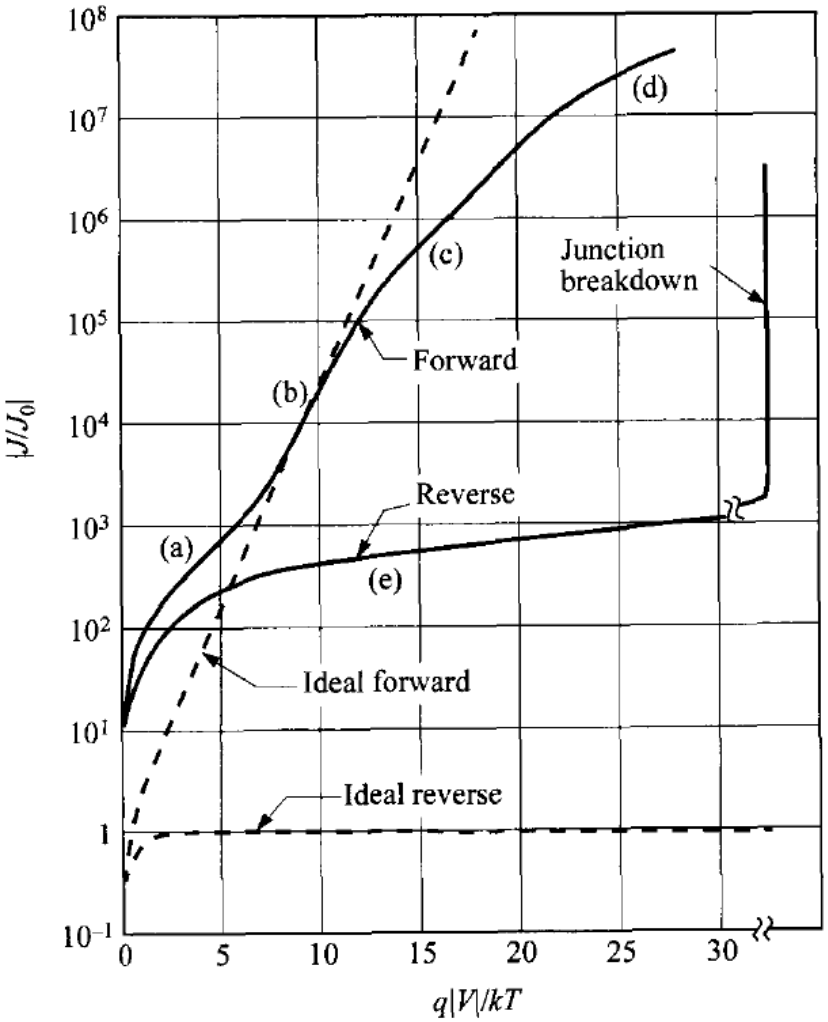
$$J_R = q\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\frac{n_i^2}{N_D} + \frac{q n_i W_D}{\tau_g}$$

Prąd generacji termicznej 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



S.M.Sze „Physics of Semiconductor Devices”, ed. J.Wiley and Sons (2007)