

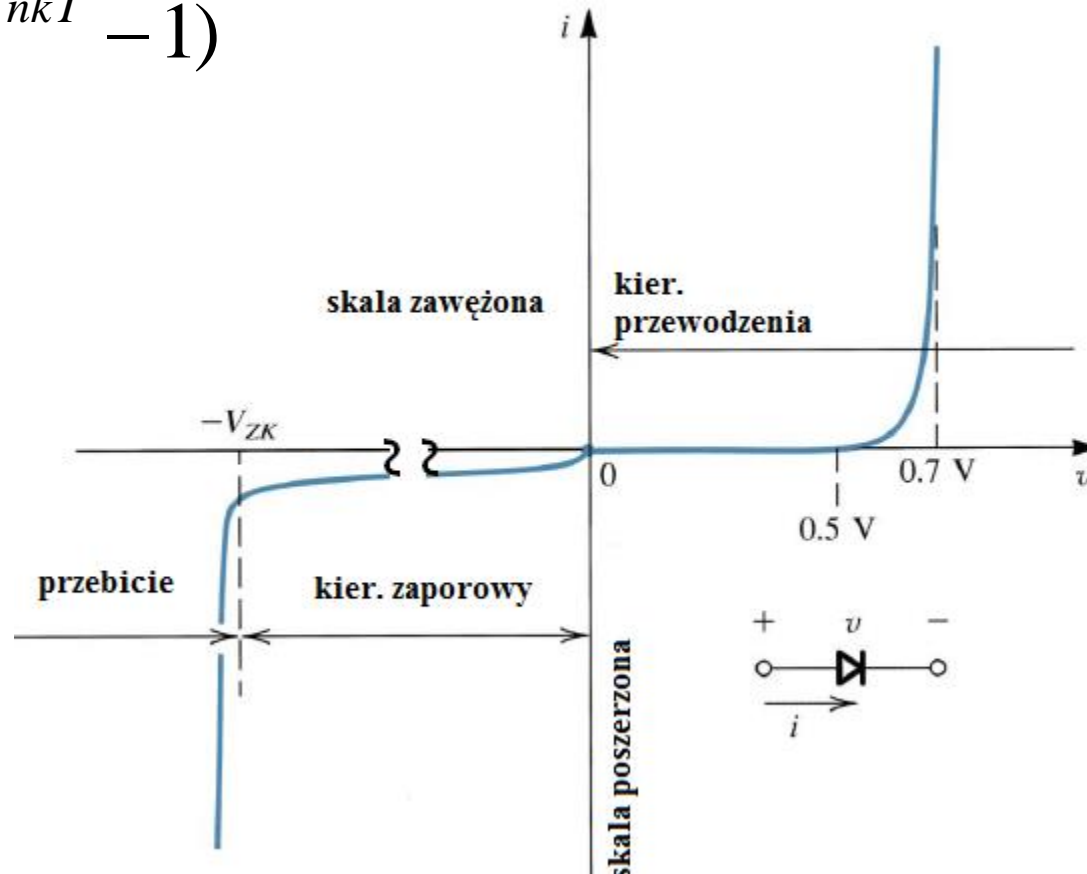
Wykład VI

Diody

Potencjał wbudowany

Równanie Shockley'a

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



I-V i potencjał wbudowany

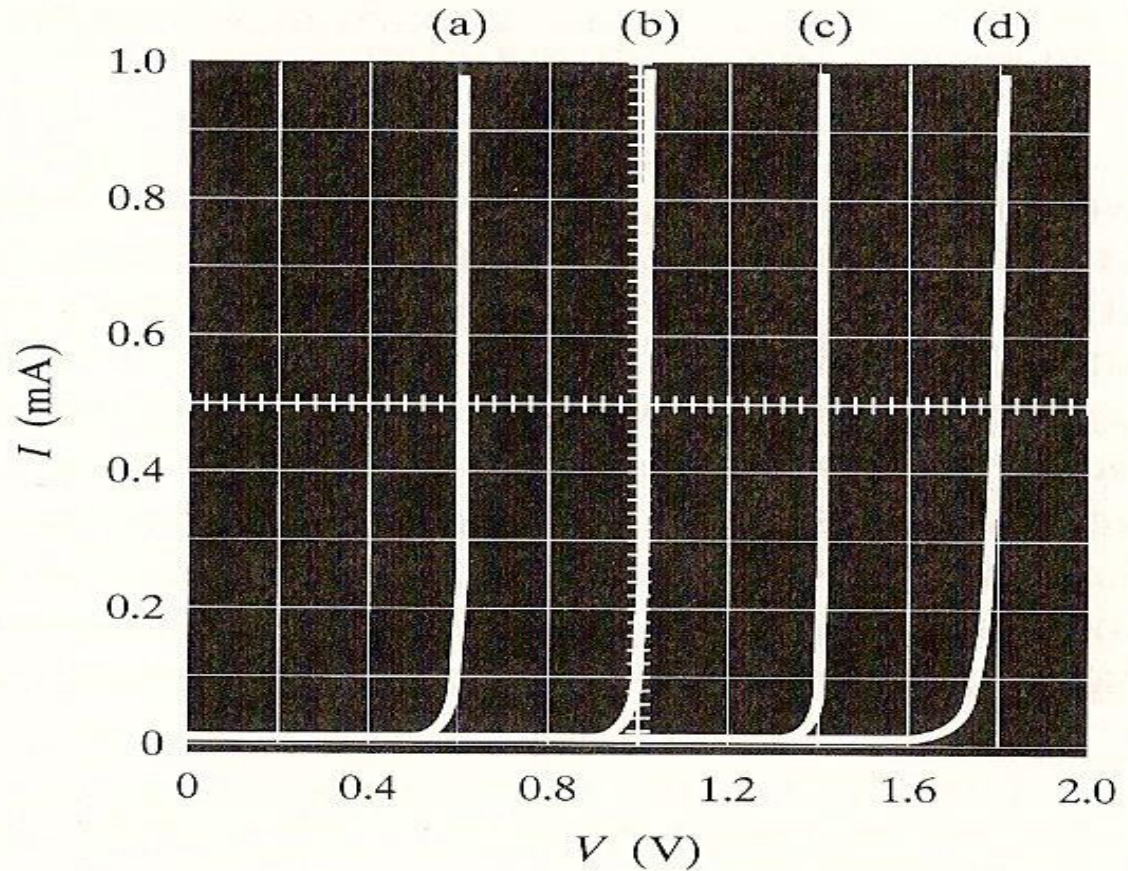
Temperatura 77K

a) Ge $E_g=0.7\text{eV}$

b) Si $E_g=1.14\text{eV}$

c) GaAs $E_g=1.5\text{eV}$

d) GaAsP $E_g=1.9\text{eV}$

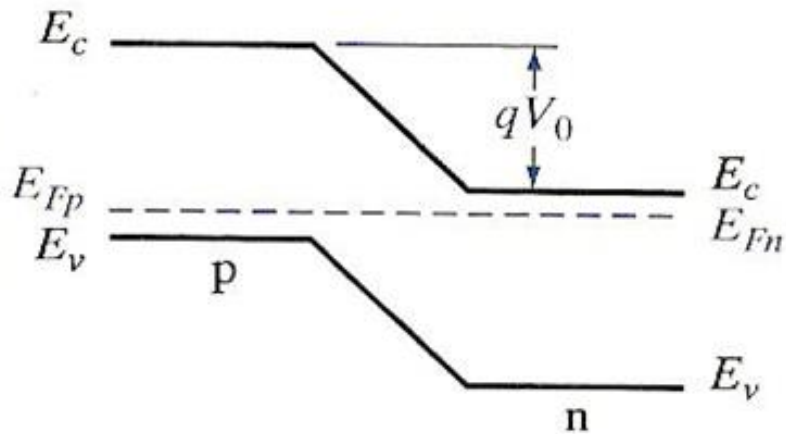


$$qV_0 \cong (0.5 - 0.7)E_g$$

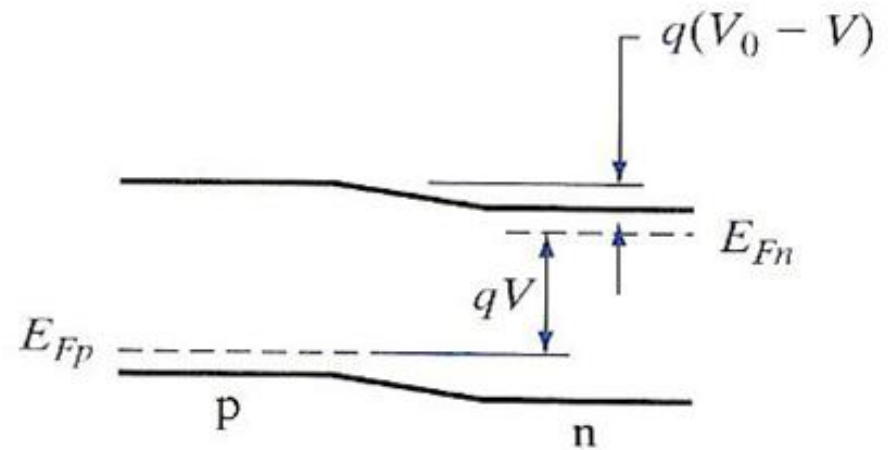
I-V i potencjał wbudowany

W złączach p-n zwykle

$$qV_0 < E_g$$



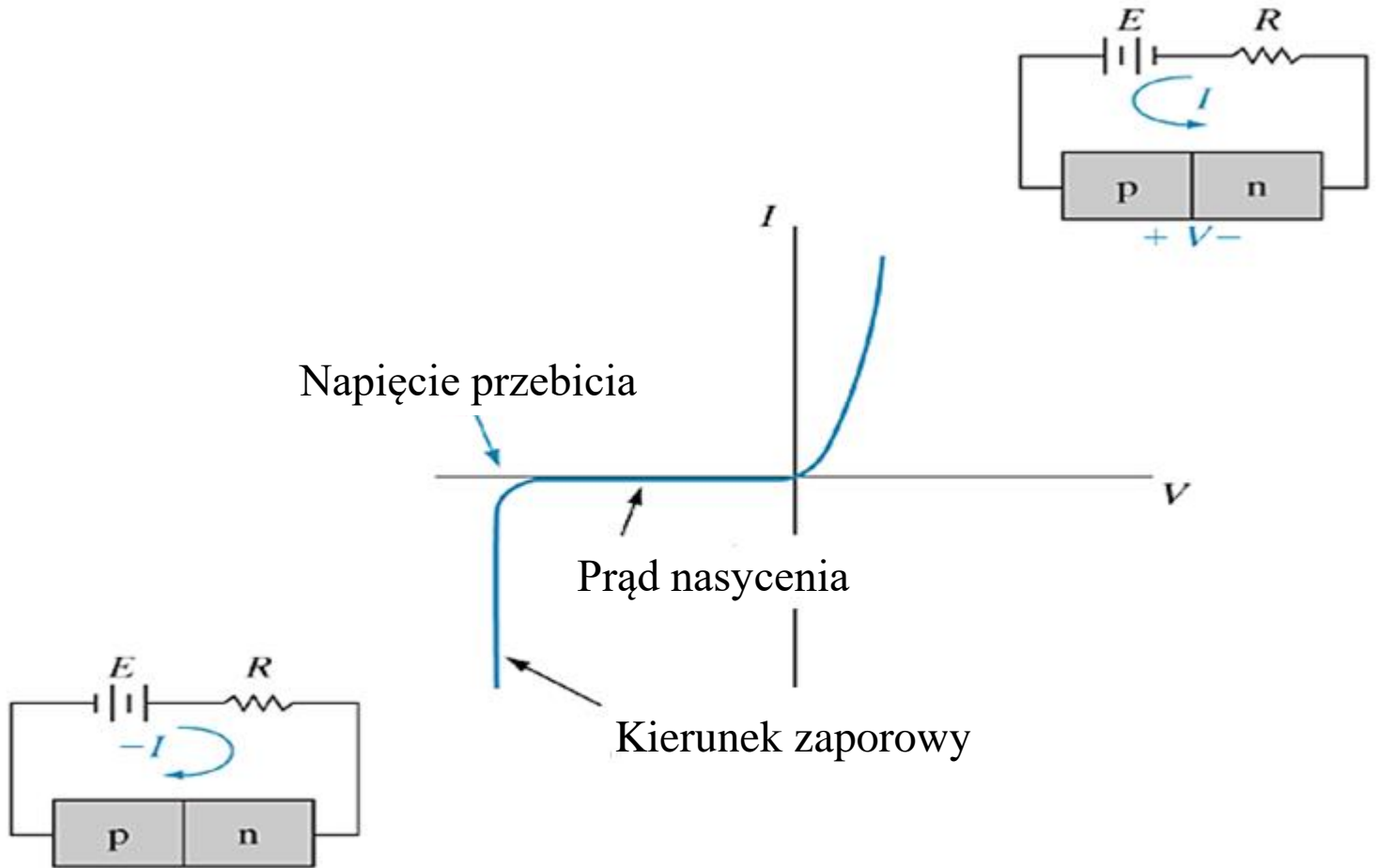
(a)



$$V = \frac{1}{q} (E_{Fn} - E_{Fp}) \approx V_0$$

(b)

Charakterystyka I-V, przebicie złącza



Przebicie złącza w kier. zaporowym

Trzy mechanizmy:

- **efekt termiczny (głównie w półprzewodnikach z wąską przerwą)**
- **tunelowanie**
- **powielanie lawinowe**

Efekt termiczny

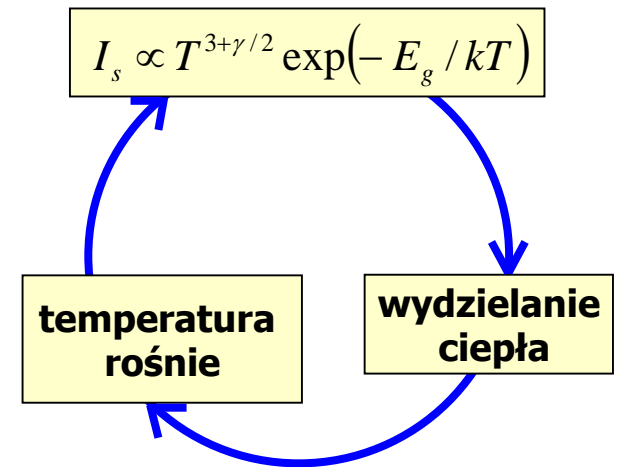
$$i = I_s (e^{qV/nkT} - 1)$$

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

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

$$n_{n0} \cdot p_{n0} \approx N_D p_{n0} = n_i^2 \propto T^3 \exp(-E_g / kT)$$

$$L = \sqrt{D\tau} \quad \text{oraz} \quad D_p / \tau_p \sim T^\gamma$$



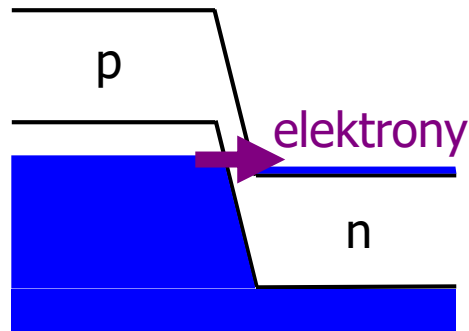
Pętla dodatniego sprzężenia zwrotnego



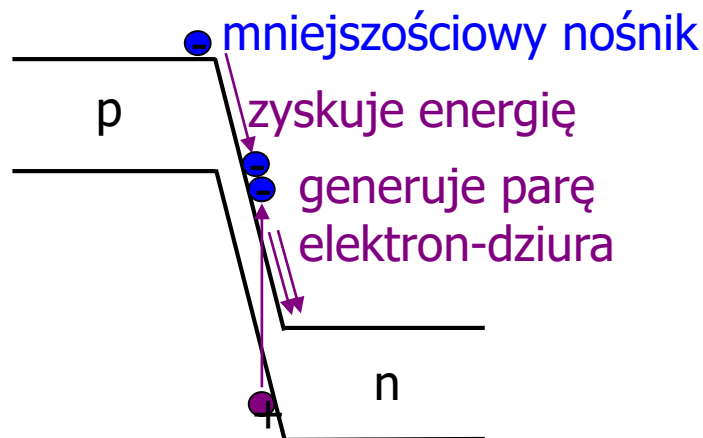
$$I_s \approx \frac{qAD_p p_{n0}}{L_p} = qA \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} \propto T^{\frac{\gamma}{2}} \cdot T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Przebicie złącza w kier. zaporowym

- **Efekt tunelowy (dominuje w złączach Si, Ge gdy $V_{\text{przebicia}} < 4E_g/e$)**



- **Jonizacja zderzeniowa (dominuje gdy $V_{\text{przebicia}} > 6E_g/e$)**

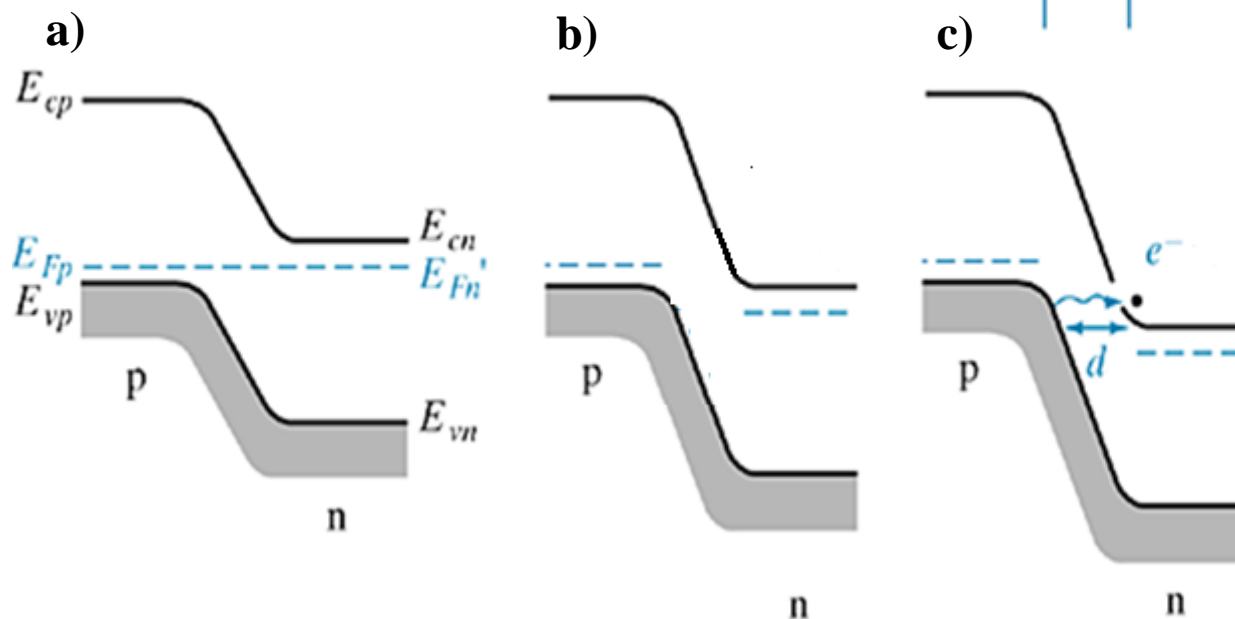


Dioda Zenera

Prawdopodobieństwo tunelowania

$$T = Ce^{-kW}$$

$$k = \sqrt{\frac{8\pi^2 m(U_0 - E)}{h^2}}$$



Efekt Zenera: (a) złącze p-n silnie domieszkowane w równowadze (b) spolaryzowane napięciem w kierunku zaporowym c) efekt tunelowy z p do n.

Dioda Zenera - charakterystyka I-V.

Współczynnik stabilizacji

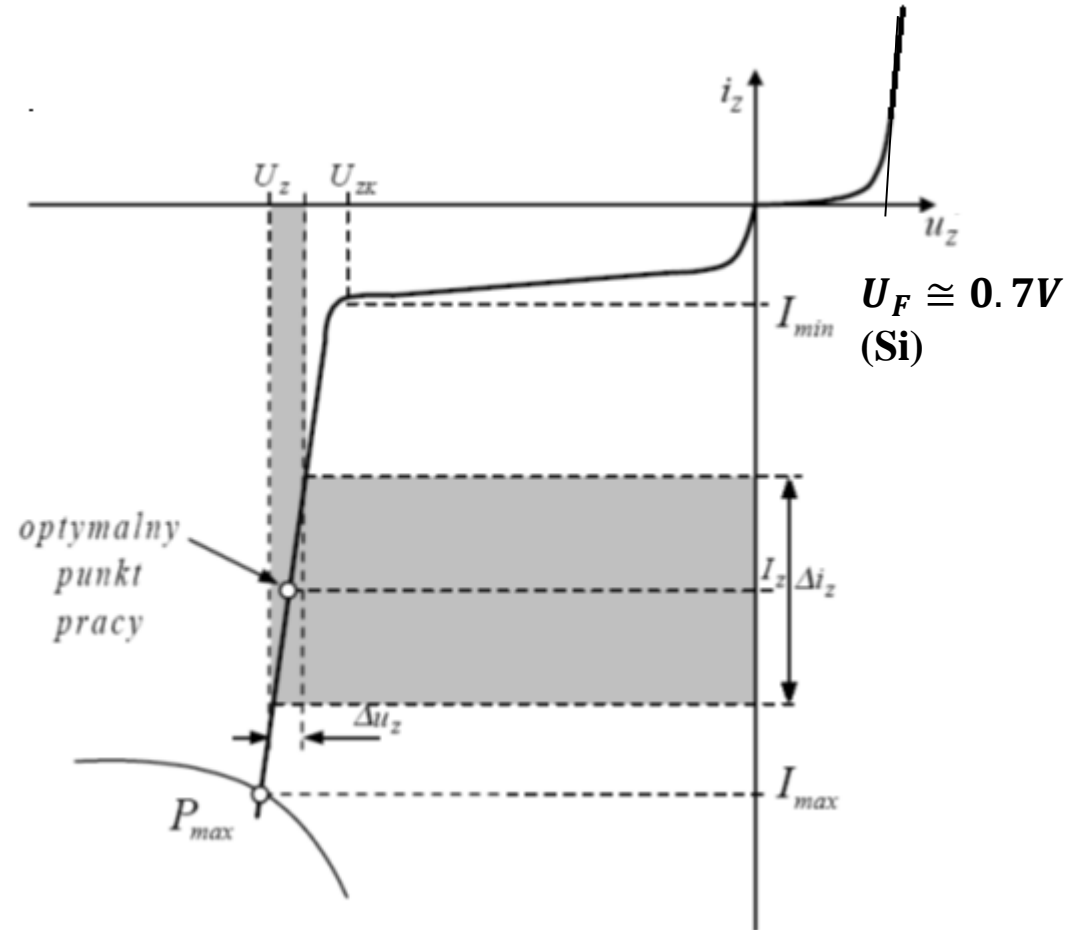
$$S = \frac{\frac{\Delta I_Z}{I_Z}}{\frac{\Delta U_Z}{U_Z}}$$

Rezystancja statyczna

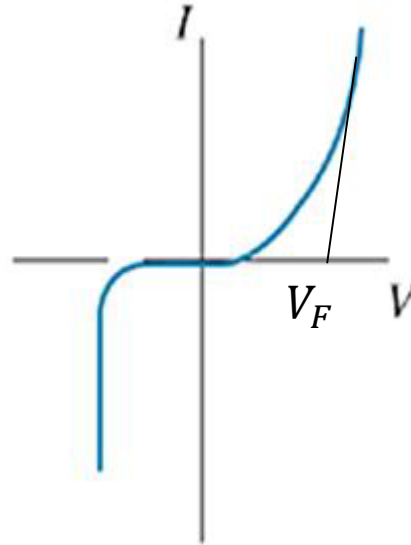
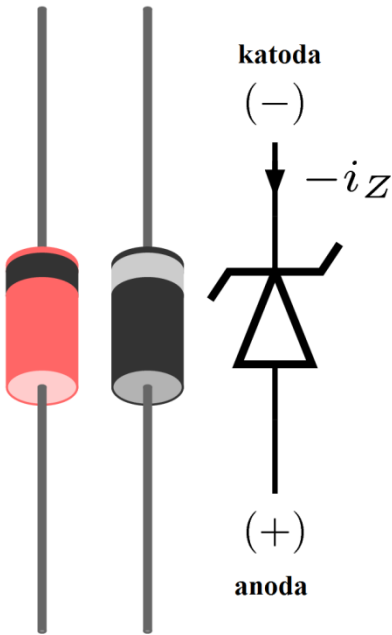
$$R_S = \frac{U_Z}{I_Z}$$

Rezystancja dynamiczna

$$R_D = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$



Stabilizator na diodzie Zenera

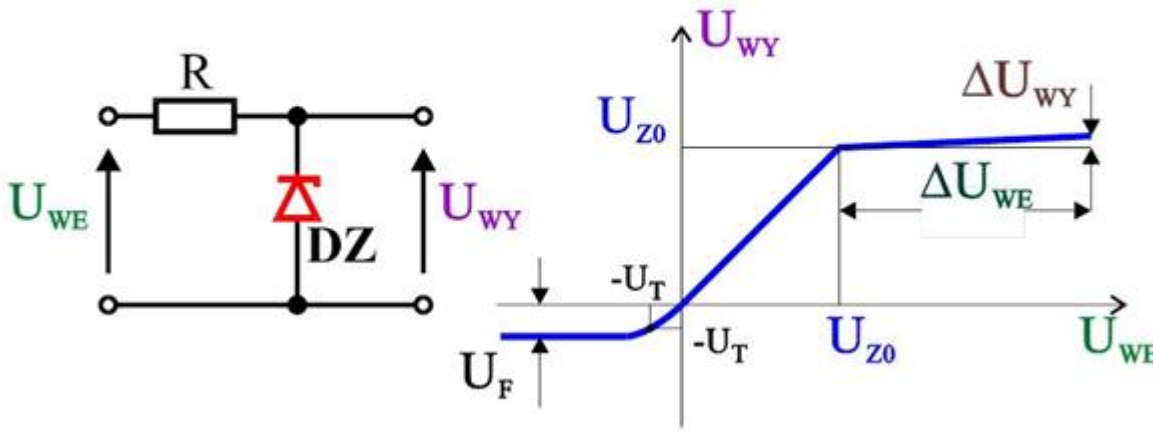


Dla diody Si

$$V_F \cong 0.65V$$

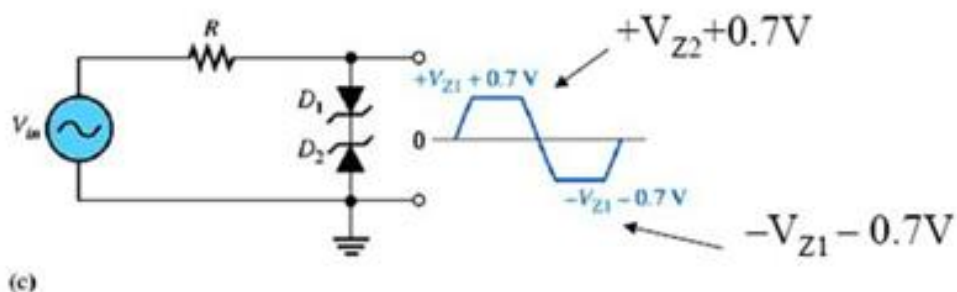
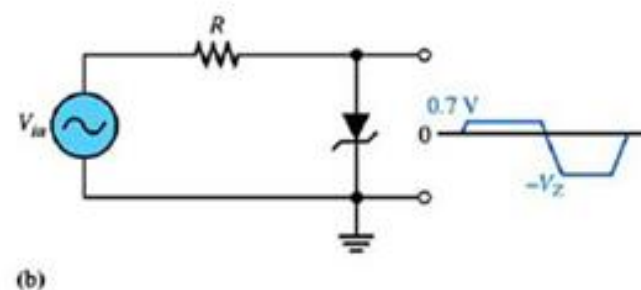
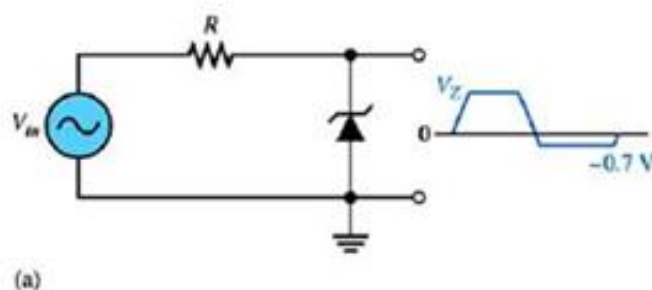
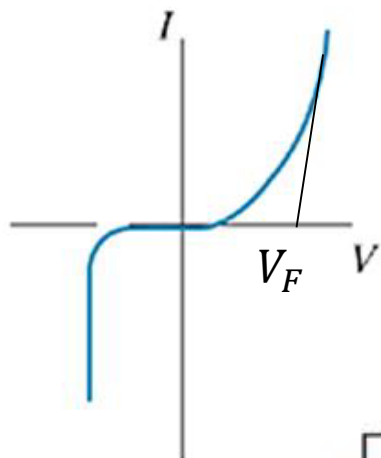
Dla diody Ge

$$V_F \cong 0.3V$$



$$U_{WY} = \Delta I \cdot R_D$$

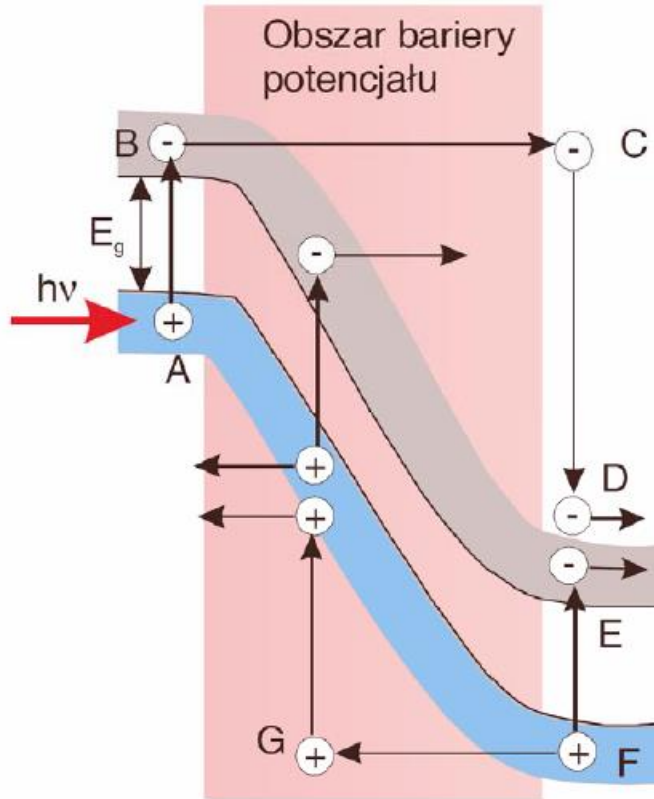
Dioda Zenera jako ogranicznik napięcia



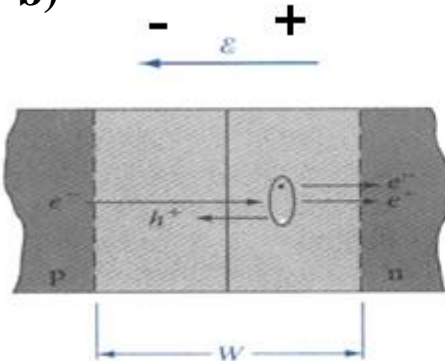
Przebieg lawinowy

Fotodioda lawinowa

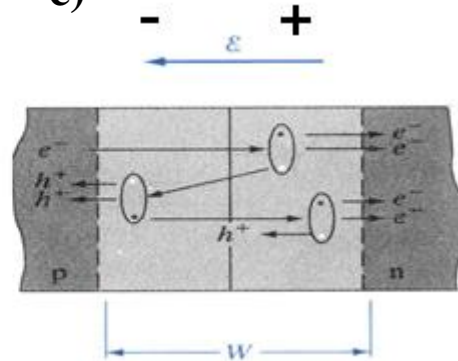
a)



b)



c)



Występuje dla złączy słabiej domieszkowanych

Pary elektron – dziura powstają w wyniku jonizacji zderzeniowej w silnym polu elektrycznym :

(a) Diagram pasmowy złącza spolaryzowanego w kierunku zaporowym; elektron zyskuje energię kinetyczną w silnym polu elektrycznym i wytwarza parę elektron – dziura w procesie jonizacji zderzeniowej;

(b) Pojedyncze zderzenie

(c) Powielanie jonizacji zderzeniowej.

Powielanie lawinowe

P : prawdopodobieństwo jonizacji zderzeniowej z siecią

n_{in} : liczba elektronów przechodzących ze strony p złącza

$$n_{\text{out}} = n_{\text{in}} (1 + p + p^2 + p^3 + \dots)$$

Współczynnik powielania (M_n) :

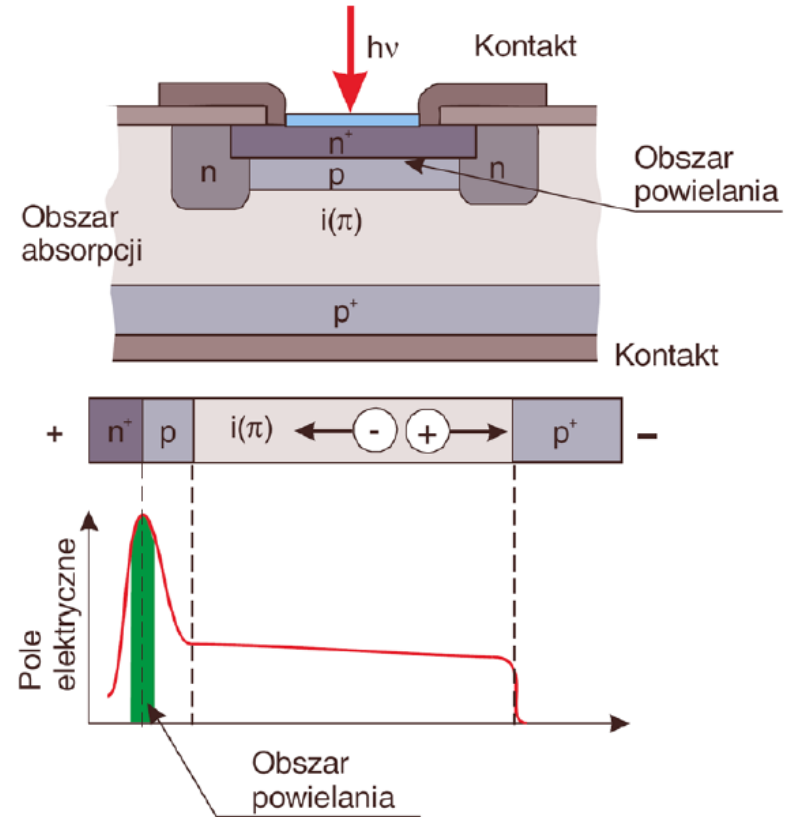
$$M_n = \frac{n_{\text{out}}}{n_{\text{in}}} = 1 + p + p^2 + p^3 + \dots = \frac{1}{1 - p}$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_{\text{przebiecia}}} \right)^n}$$

zwykle

n = 3 ~ 6

Dioda i fotodioda lawinowa



Fotodioda lawinowa (Avalanche Photodiode)



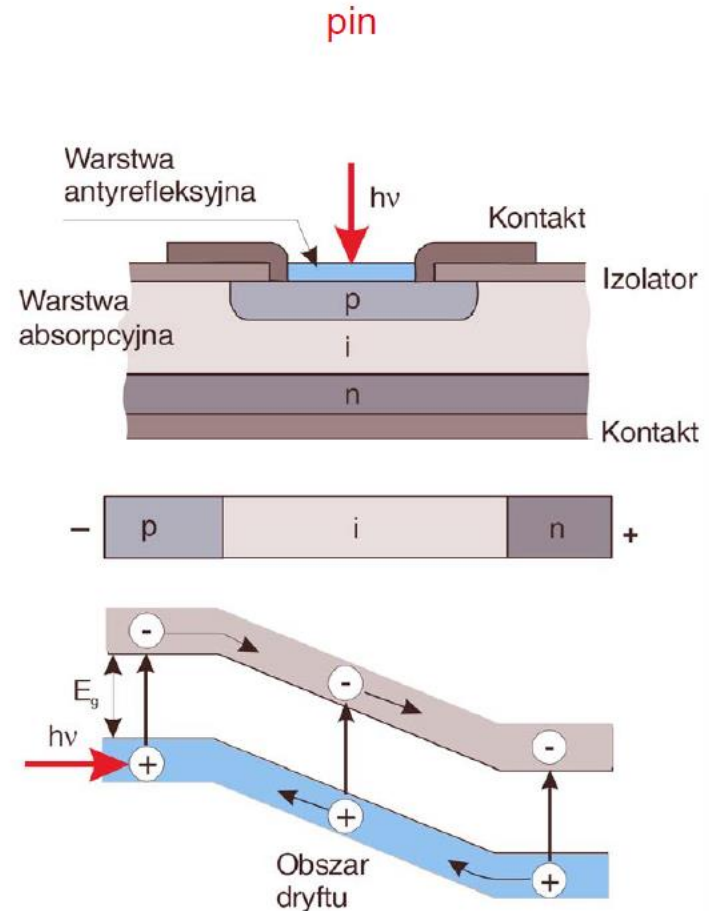
Licznik pojedynczych fotonów (Single Photon Counter)

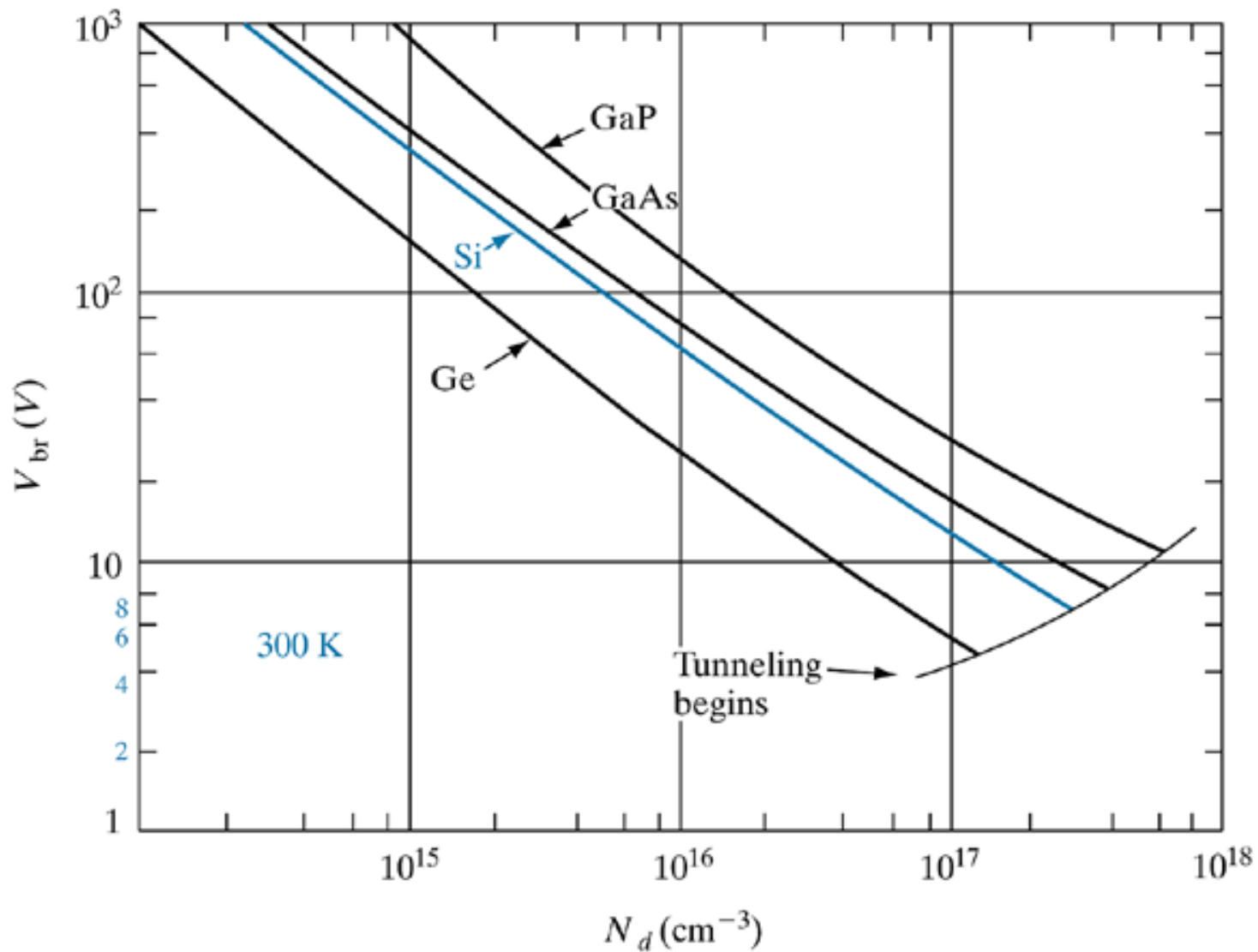
Dioda i fotodioda p-i-n

- **Obszary p i n silnie domieszkowane (kontakty omowe)**
- **Szeroki obszar zubożony W, mała pojemność**

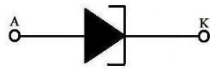
$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{W}$$

- **Krótką stała czasowa, b. szybka dioda**
- **Pracuje jako element przełączający**
- **Odporna na duże napięcia**



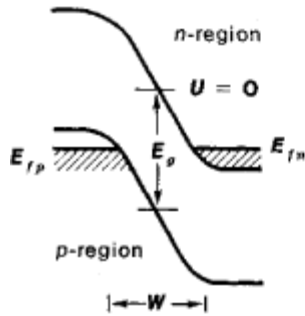


Napięcie przebicia dla złączy skokowych p⁺-n w funkcji koncentracji donorów dla Si, Ge, GaAs i GaP

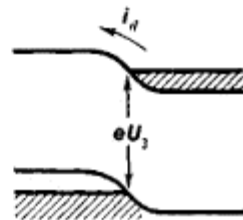
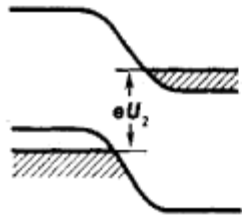
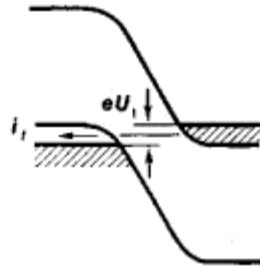


Dioda tunelowa Esakiego

$V=0$

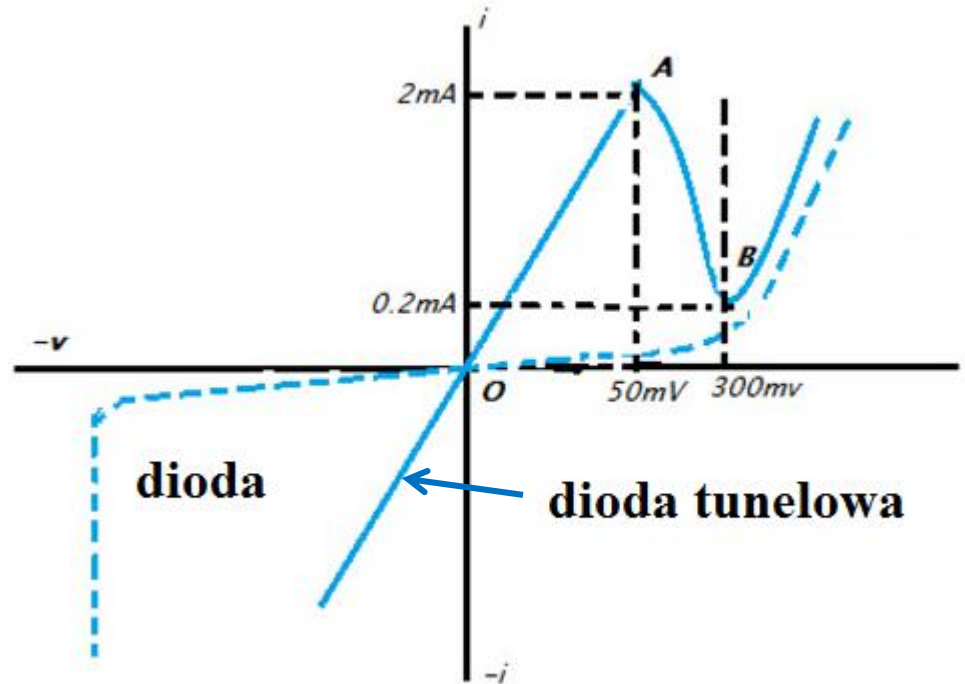


$V=V_A$



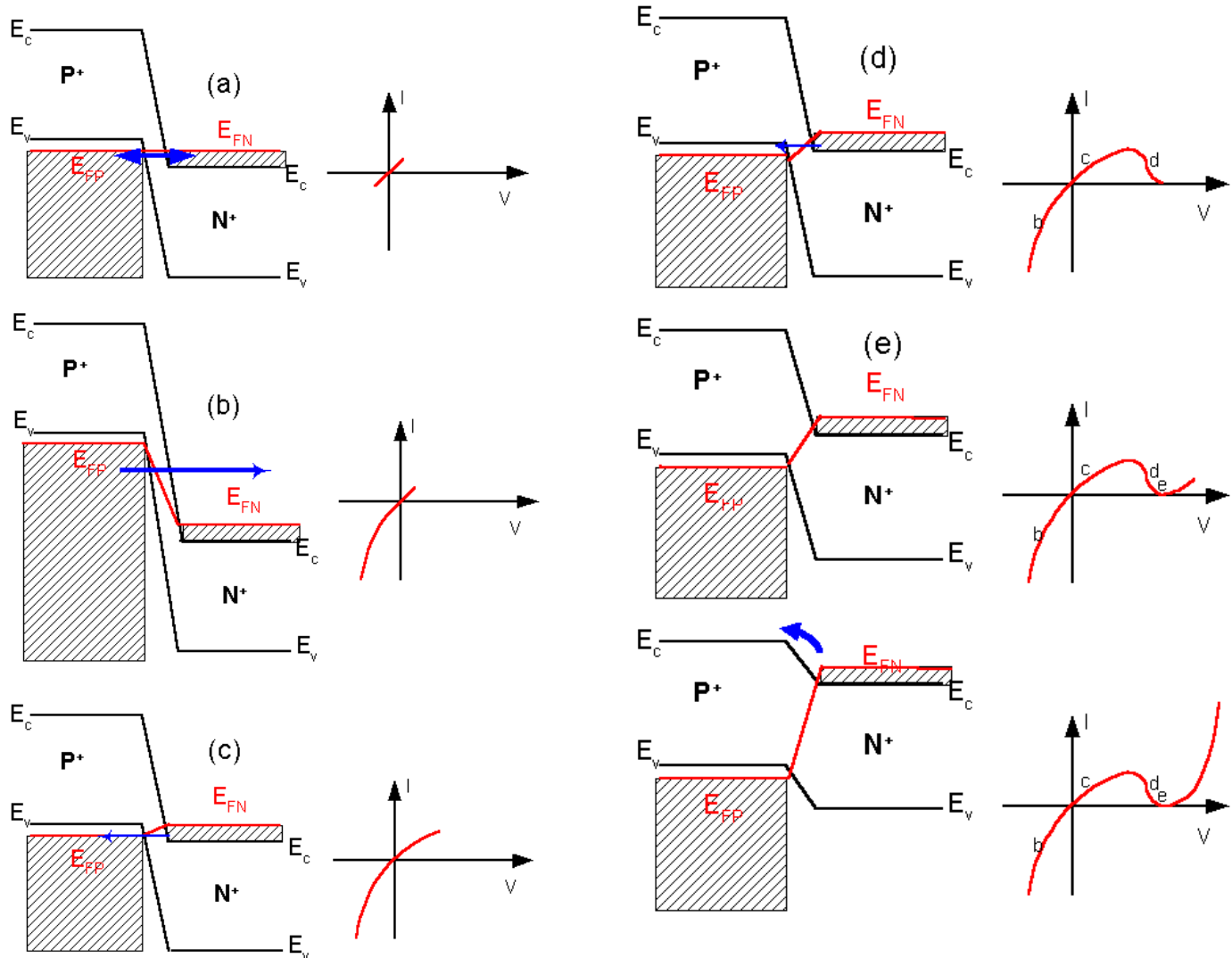
$V_A < V < V_B$

$V=V_B$



B. szybka dioda mikrofalowa – efekt tunelowy jest b. szybki
Zastosowanie – generatory (obszar ujemnej rezystancji różniczkowej).

Dioda tunelowa Esakiego



Równanie Poissona

$\varepsilon(x)$ - natężenie pola elektrycznego

$V(x)$ - potencjał pola elektrycznego

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

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

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

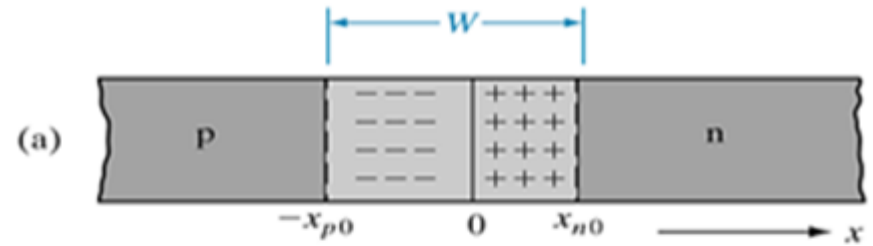
$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

W 1D

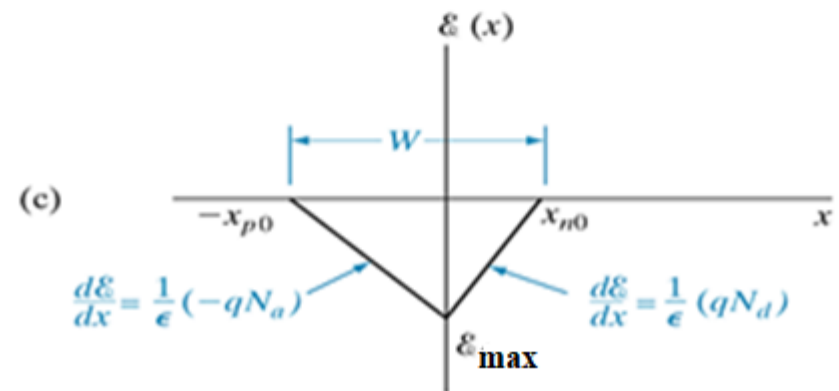
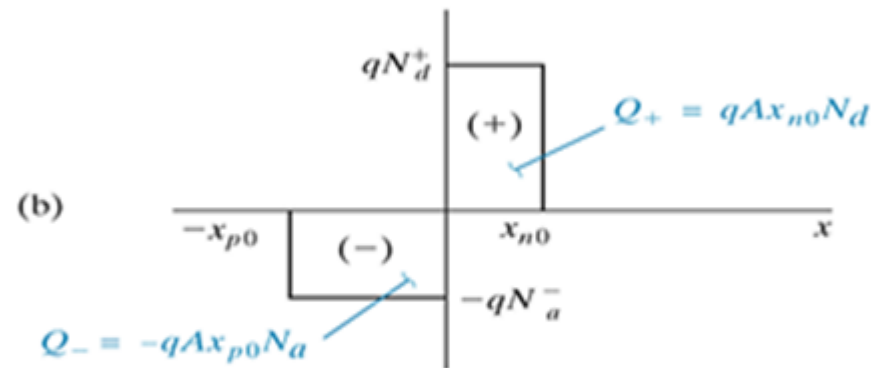
$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

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

Ładunek przestrzenny w złączu p-n



ładunek przestrzenny



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 w złączu p-n

Maksymalne natężenie pola elektr. \mathcal{E}_{\max}

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

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

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

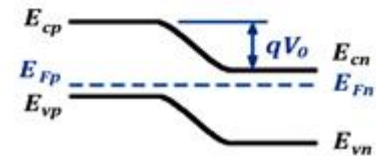
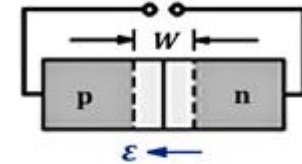
Uwaga: w tych równaniach powinno być jeszcze ϵ_0 obok ϵ_s

$$\int_{V_p}^{V_n} dV(x) = -\int_{-x_{p0}}^{x_{n0}} \mathcal{E}(x) dx$$

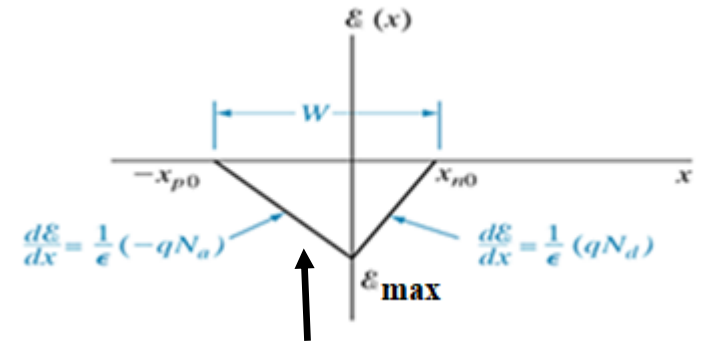
zakładając, że $V_0 = V_n - V_p = V_n$, $V_p = 0$

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

Stan równowagi
($V=0$)



Potencjał wbudowany i szerokość obszaru zubożonego



pole pod wykresem $\varepsilon(x)$

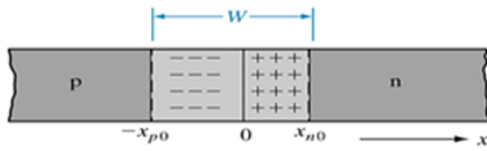
$$V_0 = -\frac{1}{2} \varepsilon_{\max} W = \frac{1}{2} \frac{q}{\varepsilon_s} N_d x_{n0} W$$

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

W układzie SI

$$W = \left[\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_0}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}$$

gdzie ε_0 - przenikalność próżni, $\varepsilon = \varepsilon_s$ przenikalność względna półprzewodnika



Pojemność obszaru zubożonego

$$W = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0 V_0}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}$$



Symbol
diody
pojemnościowej

Uwaga: tu ϵ_0 - przenikalność próżni, $\epsilon = \epsilon_s$
przenikalność względna półprzewodnika

Po spolaryzowaniu diody:

$$W = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0 (V_0 - V)}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}$$

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

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

Pojemność obszaru zubożonego

$$C_j = \varepsilon \varepsilon_0 A \left[\frac{q}{2 \varepsilon \varepsilon_0 (V_0 - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2}$$

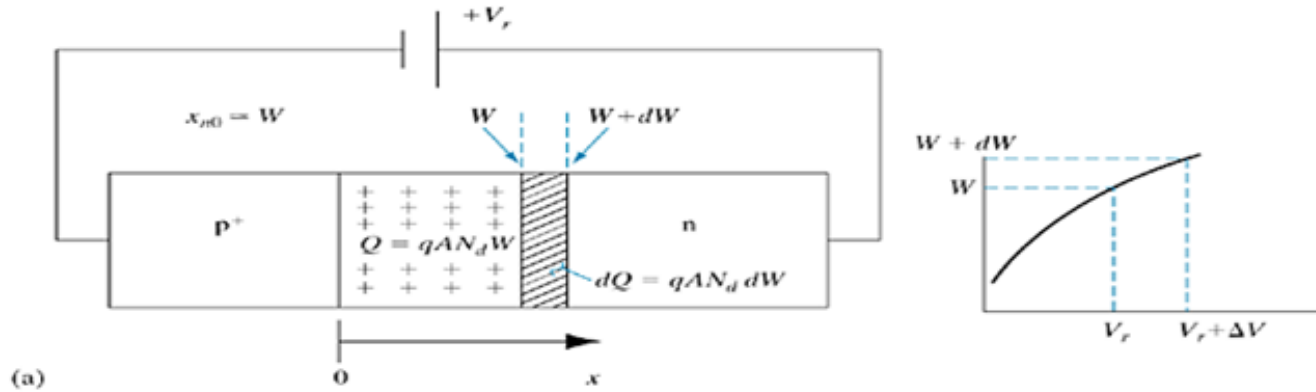
Dla złącza p^+n ($N_a \gg N_d$)

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

Dla polaryzacji zaporowej:

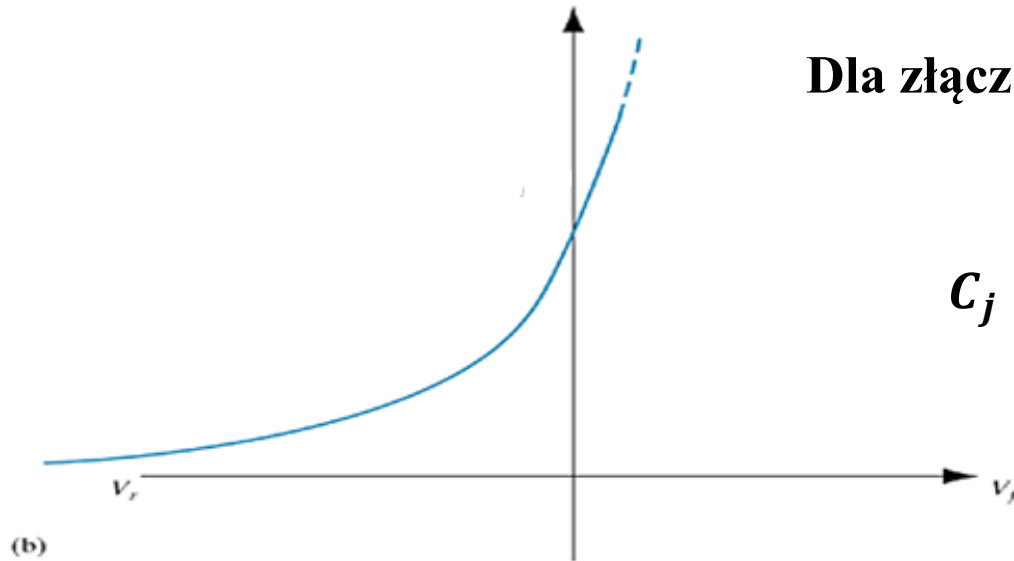
$$C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\varepsilon_0\varepsilon N_d}{(V_0 + V)} \right]^{1/2}$$

Pojemność obszaru zubożonego



Dla złącza p^+n ($N_a \gg N_d$)

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



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^+ .

Pojemność dyfuzyjna

Dyfuzyjna (związana z ładunkiem nośników mniejszościowych) – przy polaryzacji w kier. przewodzenia:

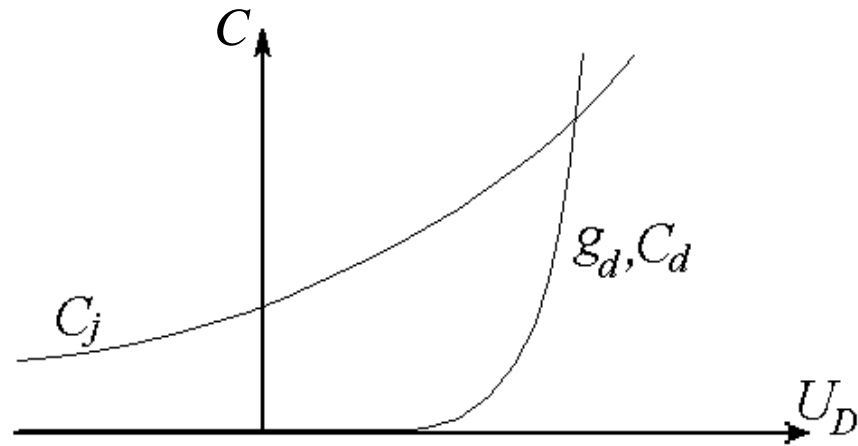
$$Q_D = \tau \cdot i(V) = \tau \cdot I_S \cdot \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right)$$

$$g_d = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V, I_o} = \frac{qI_S}{kT} \cdot \exp \frac{qV}{kT} = q \frac{I_o + I_S}{kT}$$

$$r_d = \frac{1}{g_d}; \quad C_d = \left. \frac{dQ}{dV} \right|_{V, I_o} = \tau \cdot g_d$$

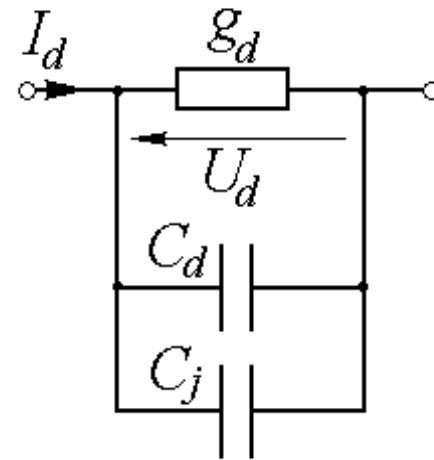
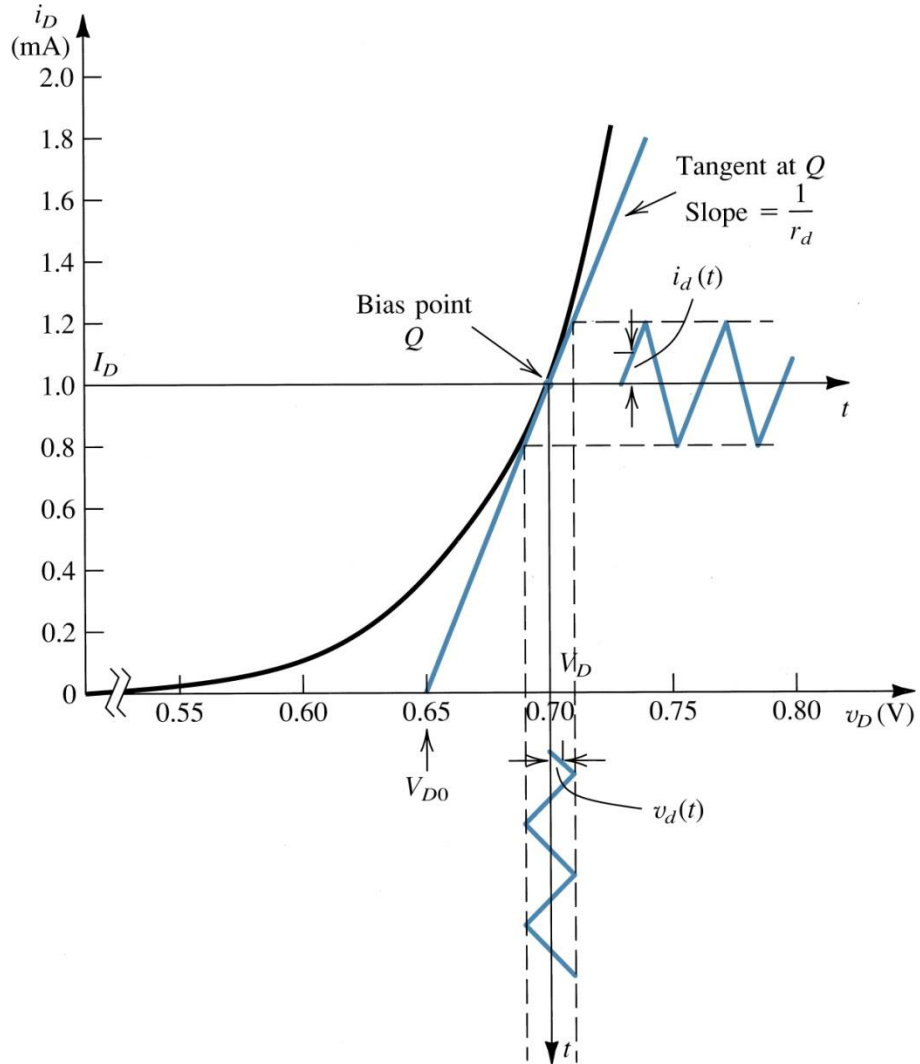
$$C_j = \left. \frac{dQ_j}{dV} \right|_V = \frac{K}{2\sqrt{V_0 - V}} = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V}{V_0}}}$$

Pojemność złącza p-n



Złącze p-n

Model małosygnalowy



(b)

Równanie Poissona

$$\mathbf{\epsilon}(x) = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = - \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} dx = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} x + C_1 \quad -x_p \leq x \leq 0$$

$$\mathbf{\epsilon} = 0 \text{ dla } x = -x_p. \quad \mathbf{\epsilon}(x) = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0$$

$$\mathbf{\epsilon}(x) = \int \frac{(eN_d)}{\epsilon_s} dx = \frac{eN_d}{\epsilon_s} x + C_2 \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$\mathbf{\epsilon} = 0 \text{ dla } x = x_n. \quad \mathbf{\epsilon}(x) = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$V(x) = - \int \mathbf{\epsilon}(x) dx = \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) dx \quad -x_p \leq x \leq 0$$

$$V(x) = \frac{eN_a}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} + x_p \cdot x \right) + C'_1 \quad \text{niech } V(0)=0$$

$$C'_1 = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad V(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 \quad (-x_p \leq x \leq 0)$$

Równanie Poissona

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

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

Potencjał jest funkcją ciągłą, więc $V(0)$ musi być takie samo dla obydwu stron, stąd

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

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

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

Równanie Poissona

$$x_p = \frac{N_d x_n}{N_a} \qquad W = x_n + x_p$$

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

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