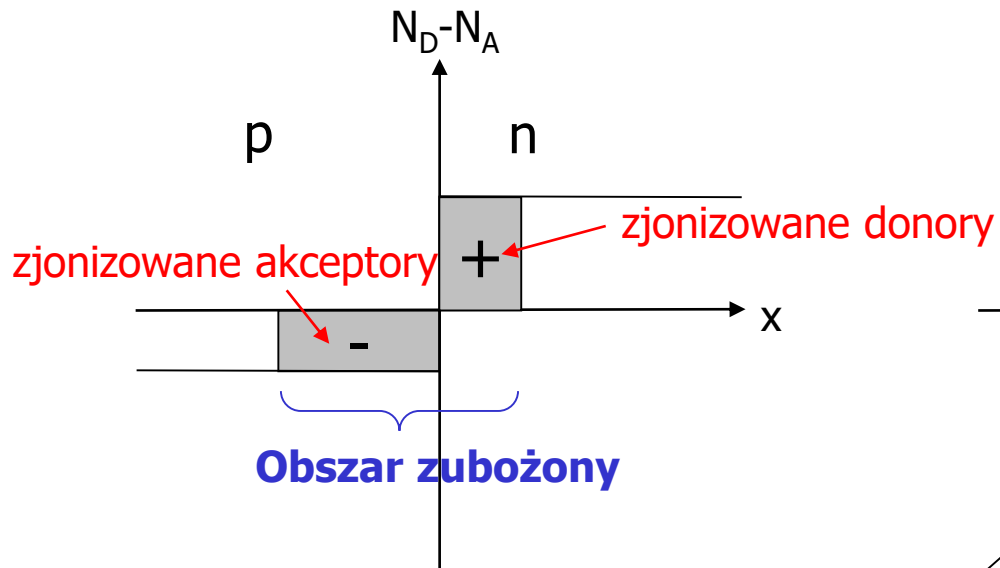
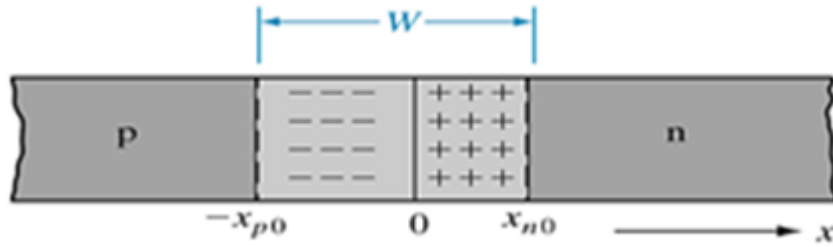


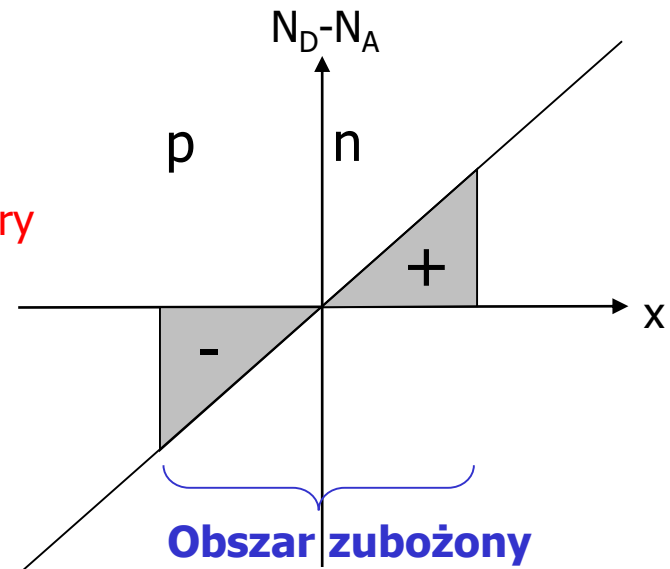
Wykład V

Złącze P-N

Złącze p-n skokowe i liniowe



skokowe



liniowe

Złącze p-n skokowe

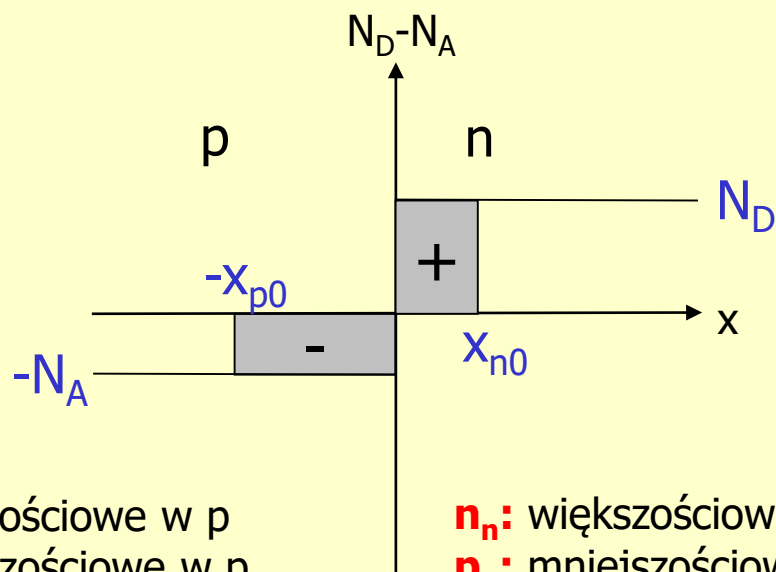
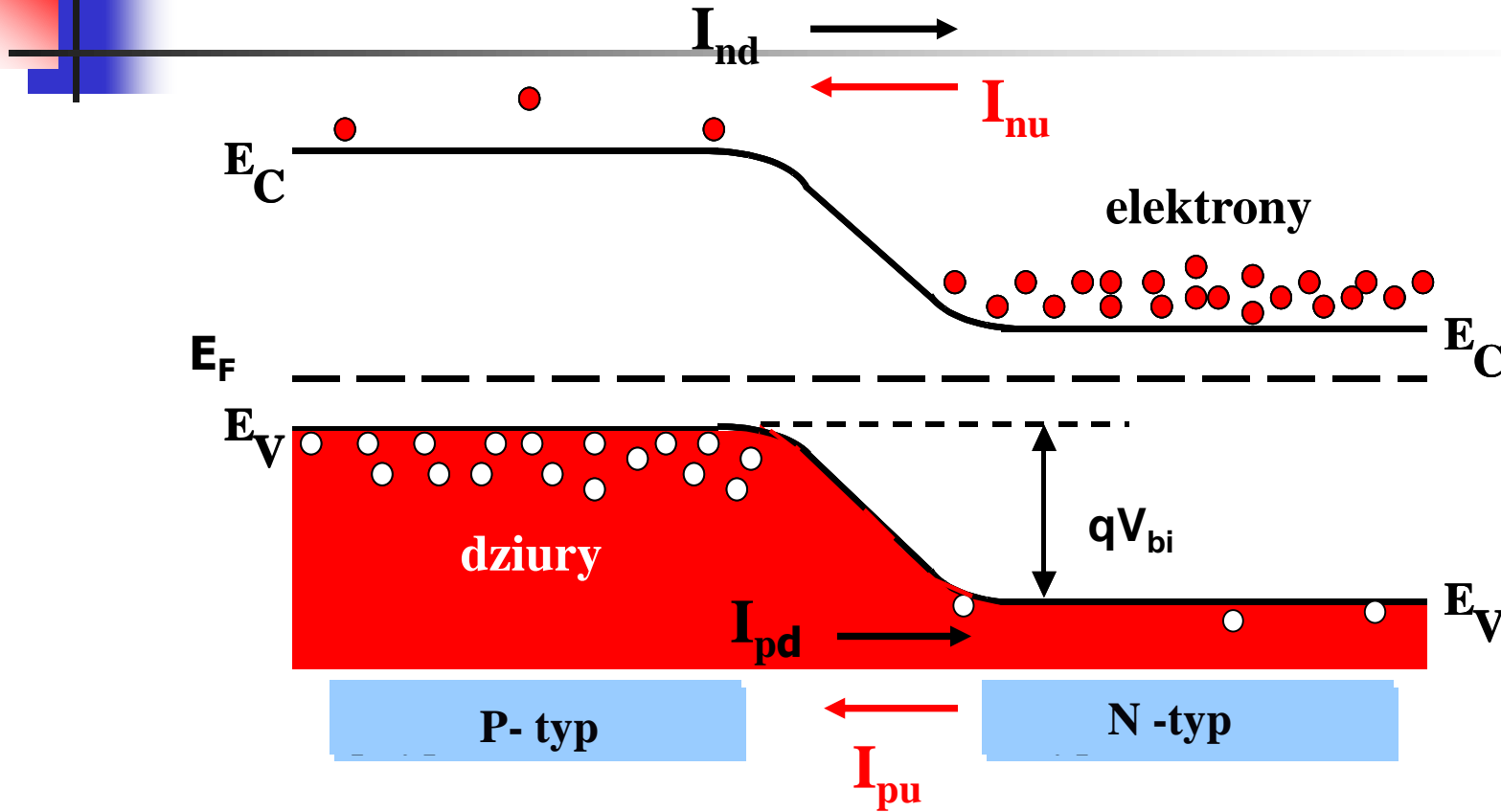


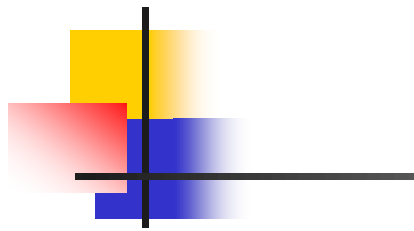
Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej



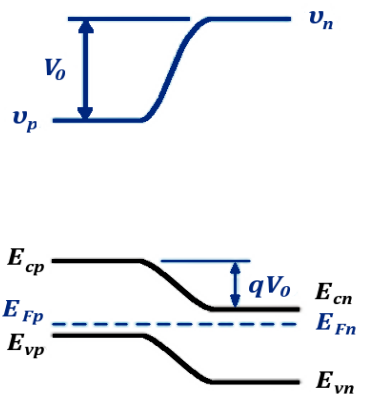
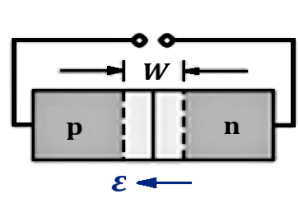
I_{nd} (I_{pd}) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

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

V_{bi} – potencjał wbudowany



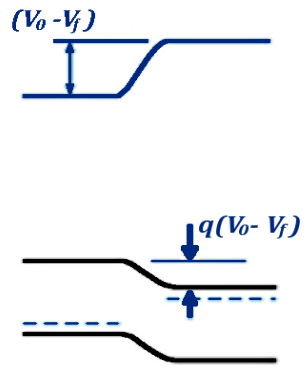
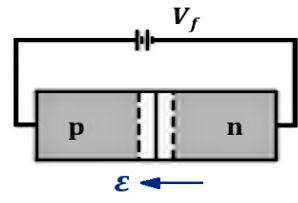
(a) Stan równowagi ($V=0$)



	Przeływ cząstek	Prąd
(1)	→	→
(2)	←	←
(3)	← - -	- - →
(4)	- - →	← - -

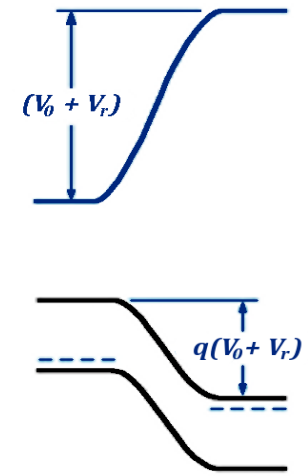
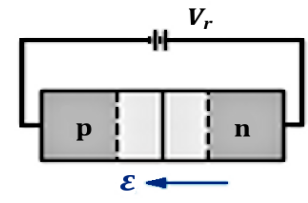
(1) Dyfuzja dziur
(2) Dryf dziur

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



	Przeływ cząstek	Prąd
(1)	→	→
(2)	←	←
(3)	← - -	- - →
(4)	- - →	← - -

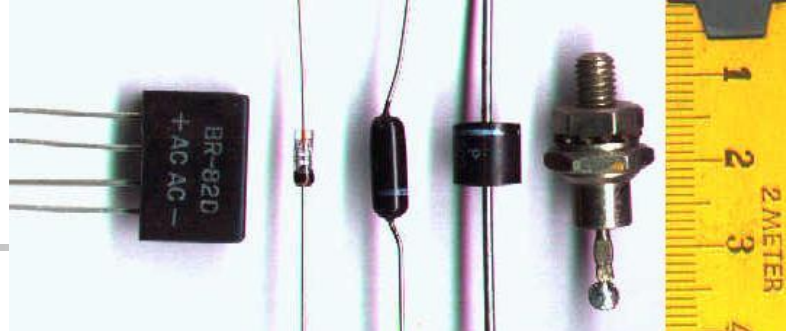
(c) Polaryzacja w kierunku zaporowym ($V = -V_r$)



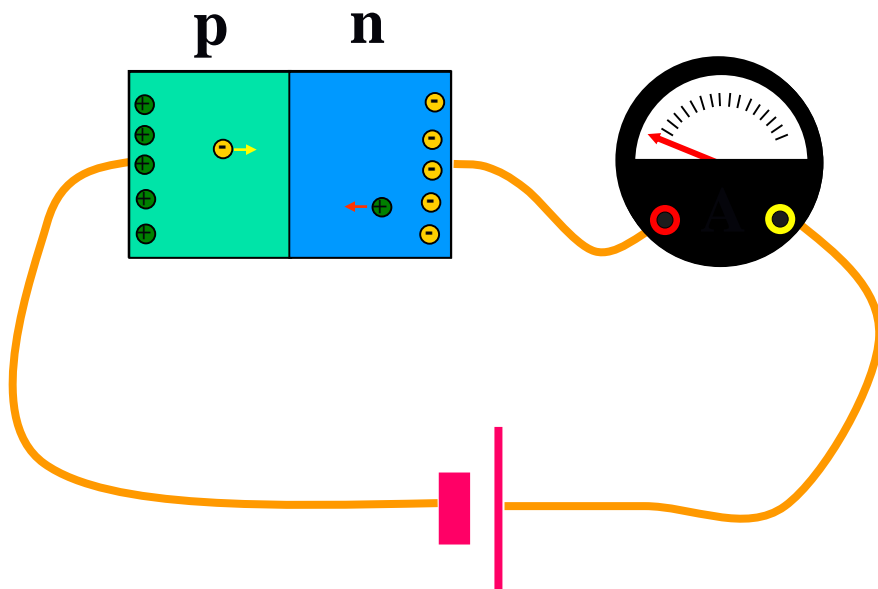
	Przeływ cząstek	Prąd
(1)	→	→
(2)	←	←
(3)	· ←	· →
(4)	· · →	← · ·

(3) Dyfuzja elektronów
(4) Dryf elektronów

Złącze p-n dioda półprzewodnikowa



Charakterystyka I-V - nieliniowa

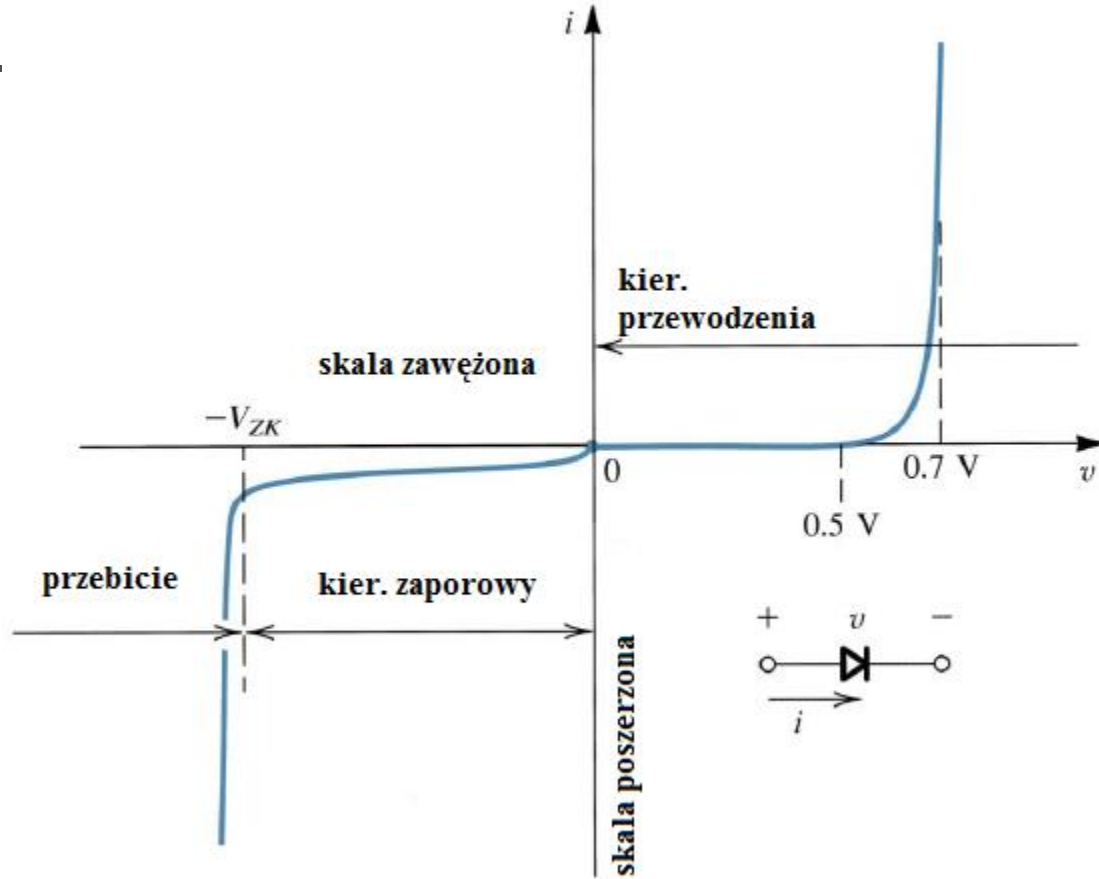


Polaryzacja
zaporowa

Polaryzacja w kier.
przewodzenia



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 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:

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

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

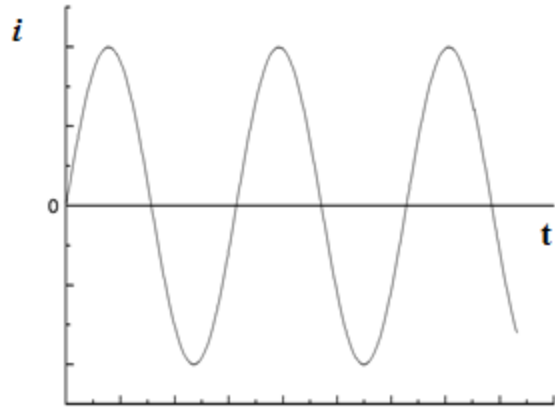
- $V < 0$

$$i \cong -I_s$$

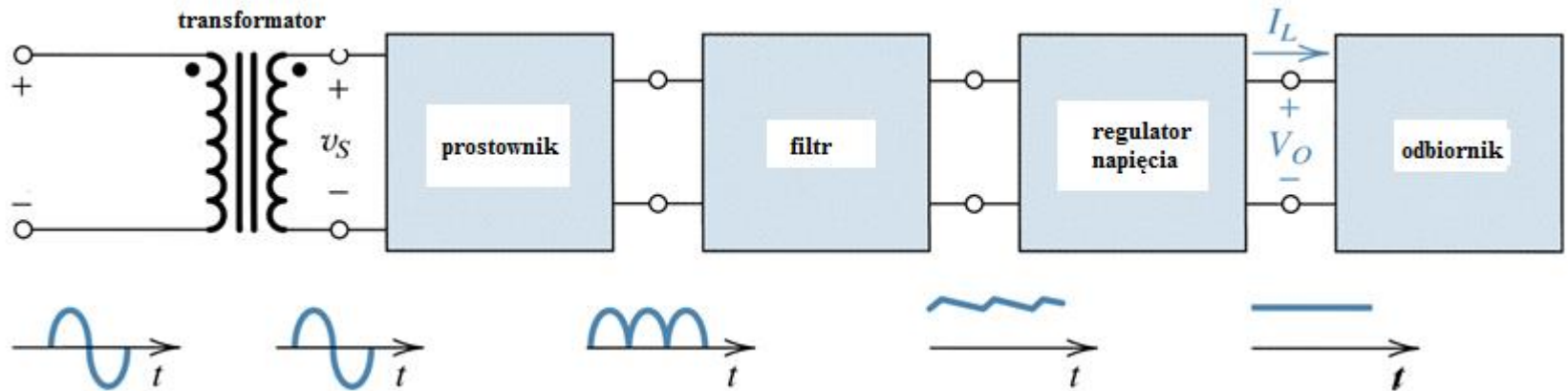
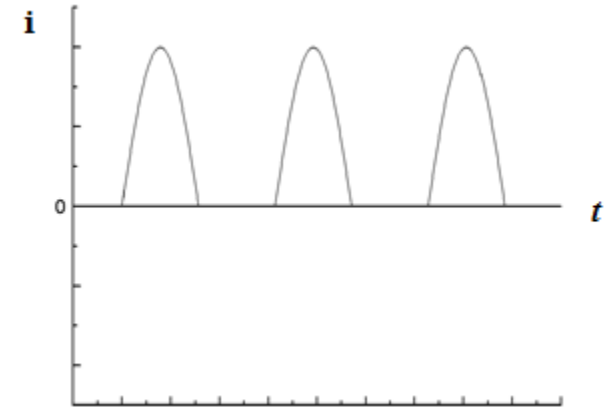
$V < 0$ i kilka razy większe niż kT / q

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

Zastosowanie: prostownik

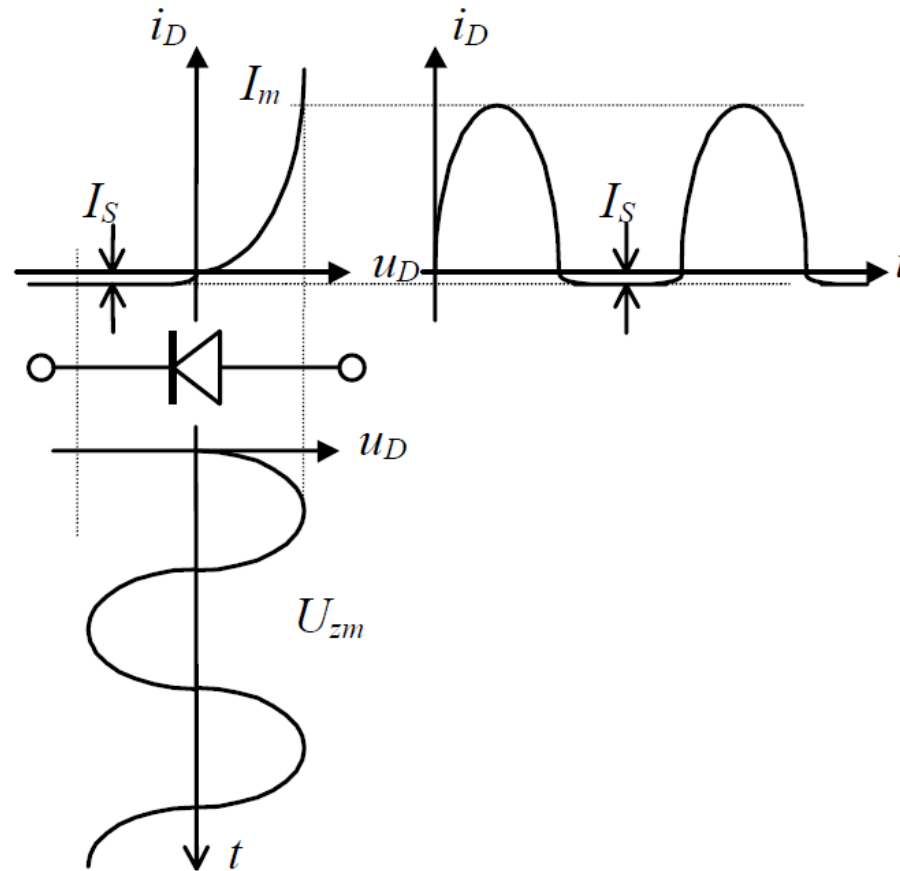


Złącze P-N



Schemat blokowy zasilacza .

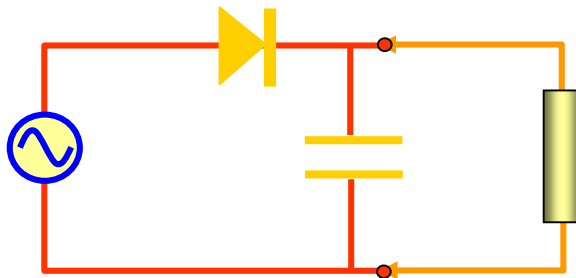
Praca diody prostowniczej



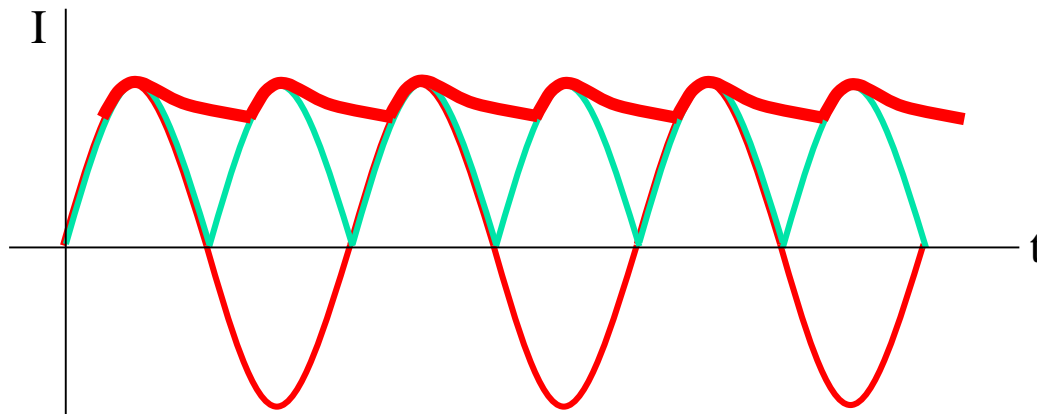
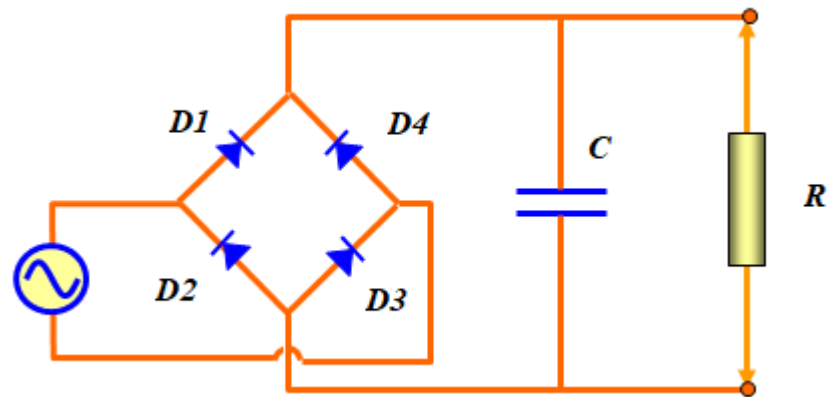
Prostownik

Jest to układ, który zamienia prąd przemienny na prąd stały

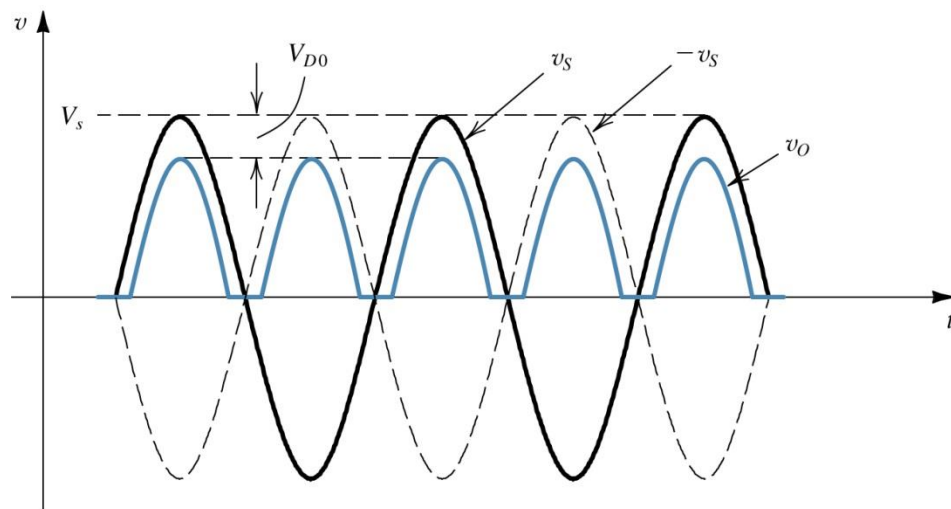
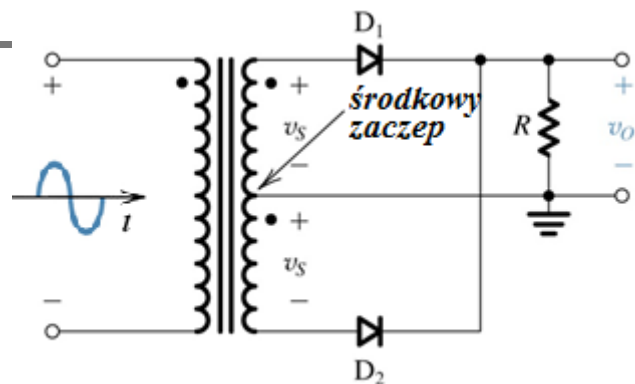
a) jednopółwkowy



b) dwupółwkowy Graetza



Prostownik dwupołówkowy



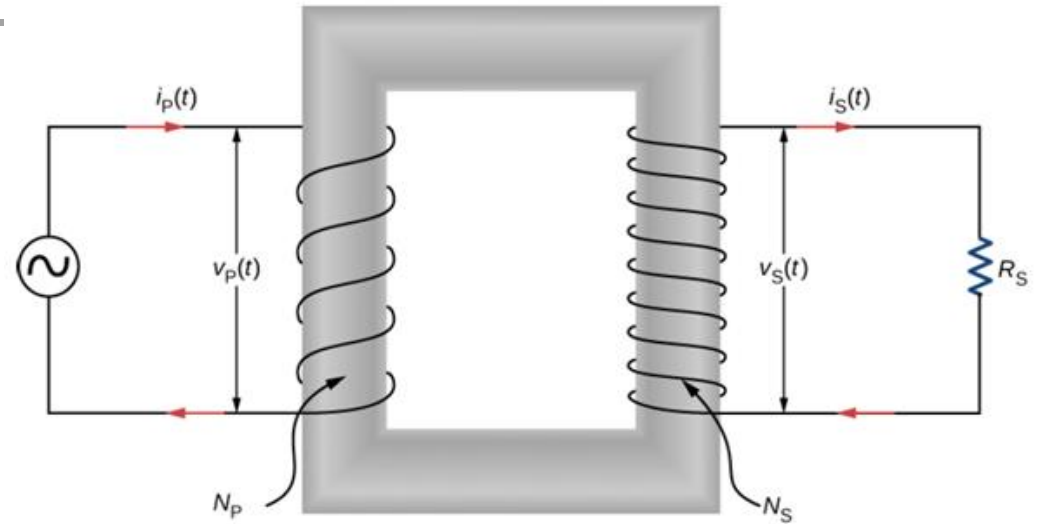
(c)

Przebiegi napięcia na wejściu i wyjściu prostownika

Transformator

Siła elektromotoryczna indukcji dla jednego zwoju cewki:

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$$



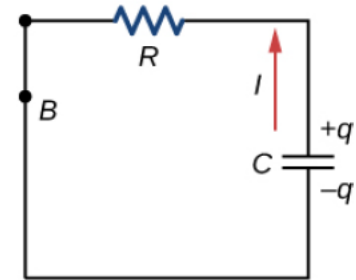
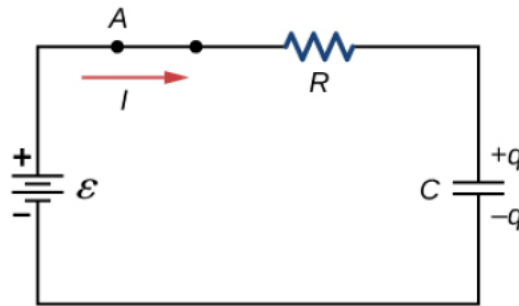
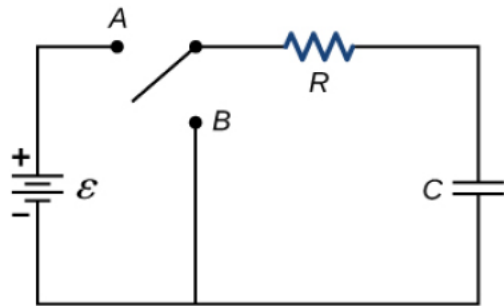
$$v_P(t) = -N_P \frac{d\Phi}{dt}$$

$$v_S(t) = -N_S \frac{d\Phi}{dt}$$

$$v_S(t) = \frac{N_S}{N_P} v_P(t)$$

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Kondensator



$$\varepsilon - V_R - V_c = 0,$$

$$\varepsilon - IR - \frac{q}{C} = 0,$$

$$\varepsilon - R \frac{dq}{dt} - \frac{q}{C} = 0.$$

$$\varepsilon - R \frac{dq}{dt} - \frac{q}{C} = 0,$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon C - q}{RC},$$

$$\int_0^q \frac{dq}{\varepsilon C - q} = \frac{1}{RC} \int_0^t dt.$$

$$u = \varepsilon C - q \quad du = -dq.$$

$$-\int_0^q \frac{du}{u} = \frac{1}{RC} \int_0^t dt,$$

$$\ln\left(\frac{\varepsilon C - q}{\varepsilon C}\right) = -\frac{1}{RC}t,$$

$$\frac{\varepsilon C - q}{\varepsilon C} = e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Kondensator

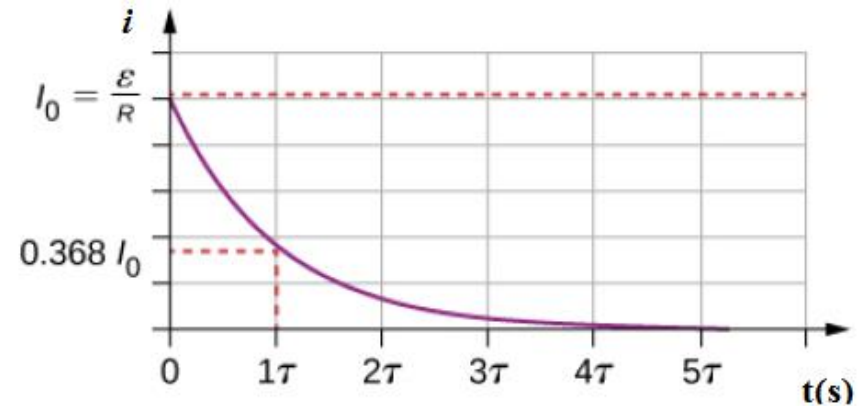
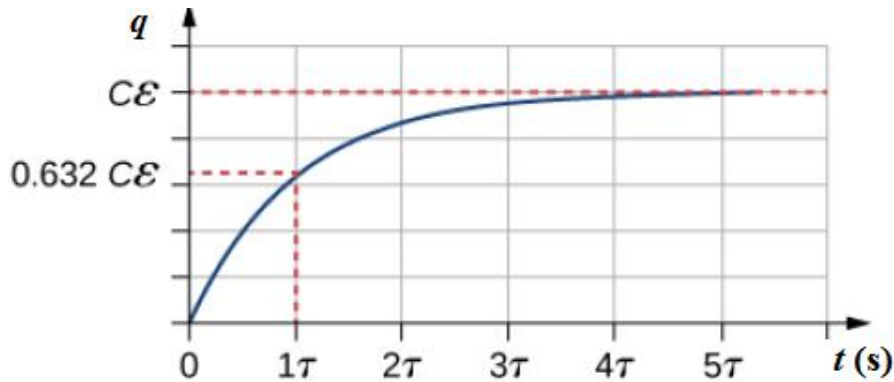
$$q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = Q \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \left[C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \right]$$

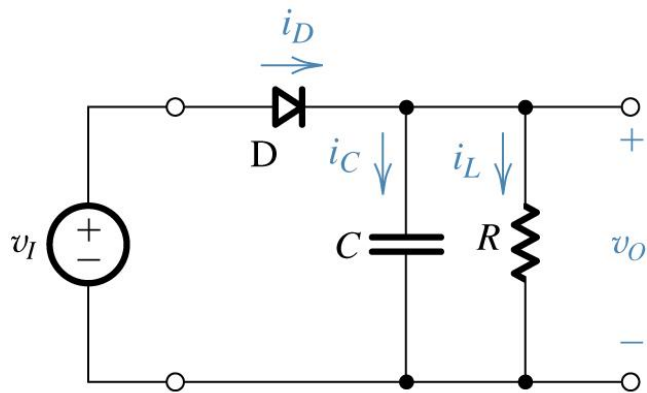
$$V_C(t) = \varepsilon \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}.$$

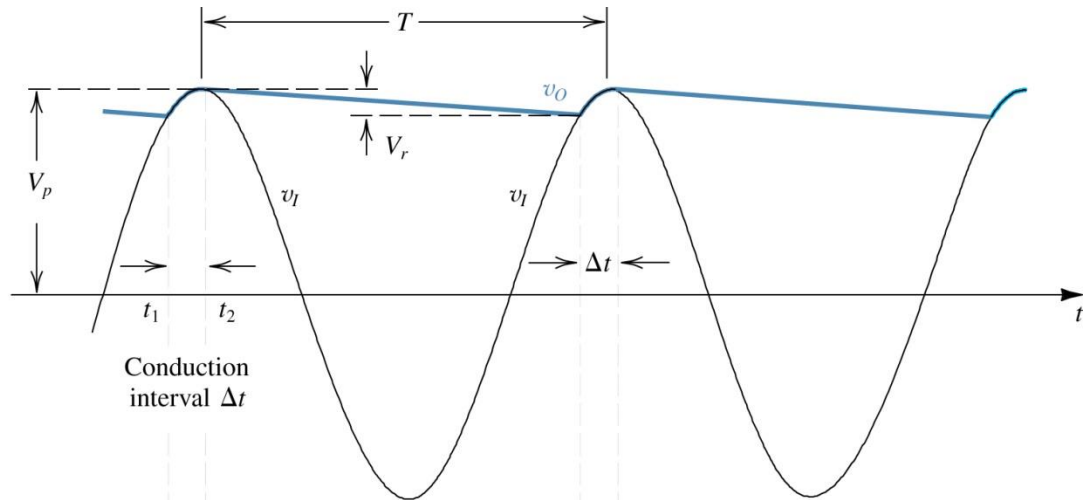
$\tau = RC$ – stała czasowa



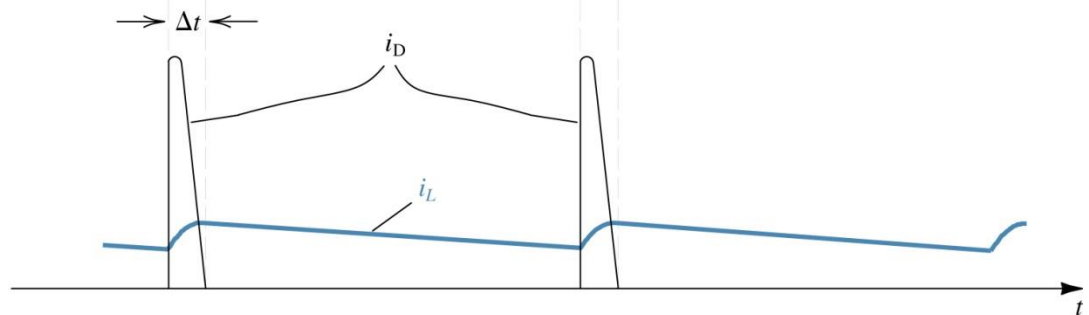
Wyglądanie przebiegów



(a)



(b)



(c)

Przebiegi napięcia i prądu dla prostownika jednopółwkowego z filtrem, dla $CR \gg T$, przy założeniu, że dioda jest idealna

Równanie Poissona

$\varepsilon(x)$ - natężenie pola elektrycznego

$V(x)$ - potencjał pola elektrycznego

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

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

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

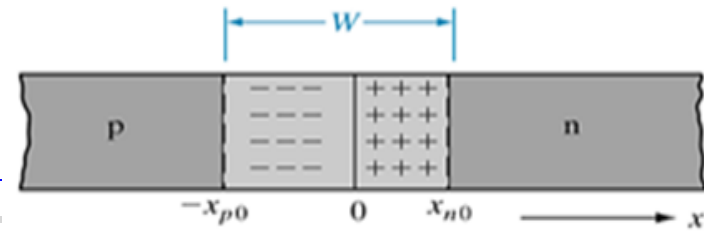
$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

W 1D

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

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

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*:

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

ε_s - stała dielektryczna półprzewodnika

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

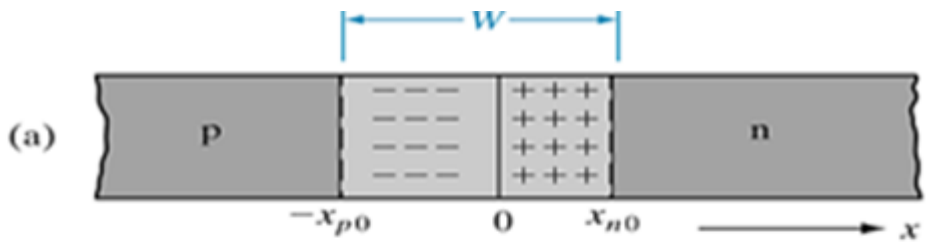
$$\frac{d\varepsilon(x)}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_s} N_d^+ = \frac{q}{\varepsilon_s} N_d \quad (0 < x < x_{n0})$$

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

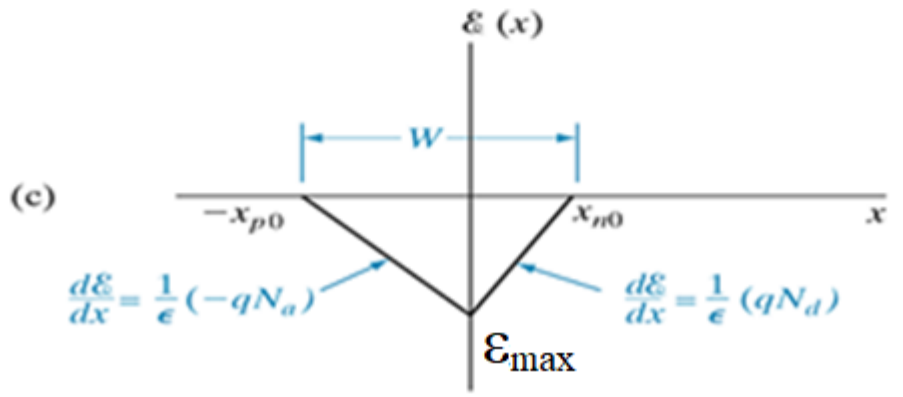
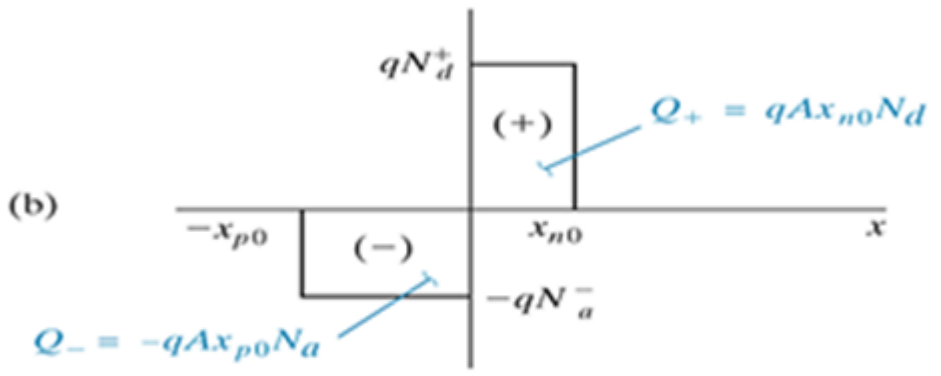


Ładunek przestrzenny w złączu p-n

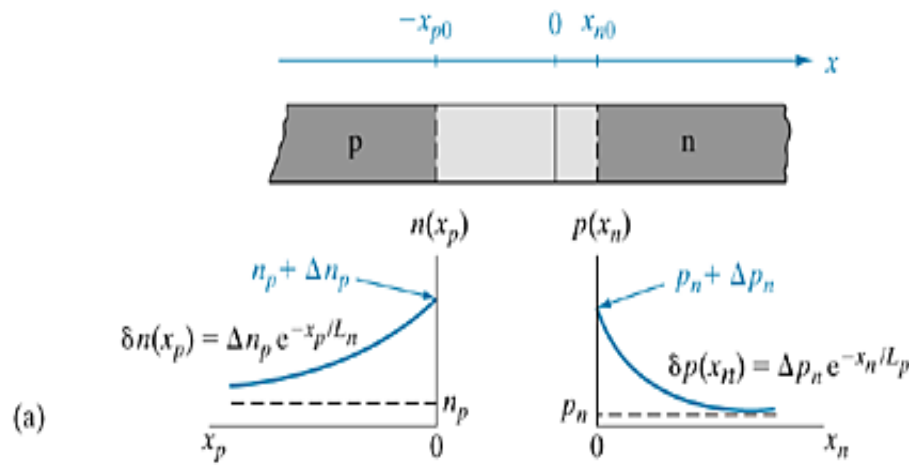
Ładunek przestrzenny i pole elektryczne dla złącza p-n w którym $N_d > N_a$: (a) złącze w $x=0$, b) ładunek przestrzenny w złączu przy założeniu, że nośniki swobodne są zaniedbane; (c) rozkład pola elektrycznego.



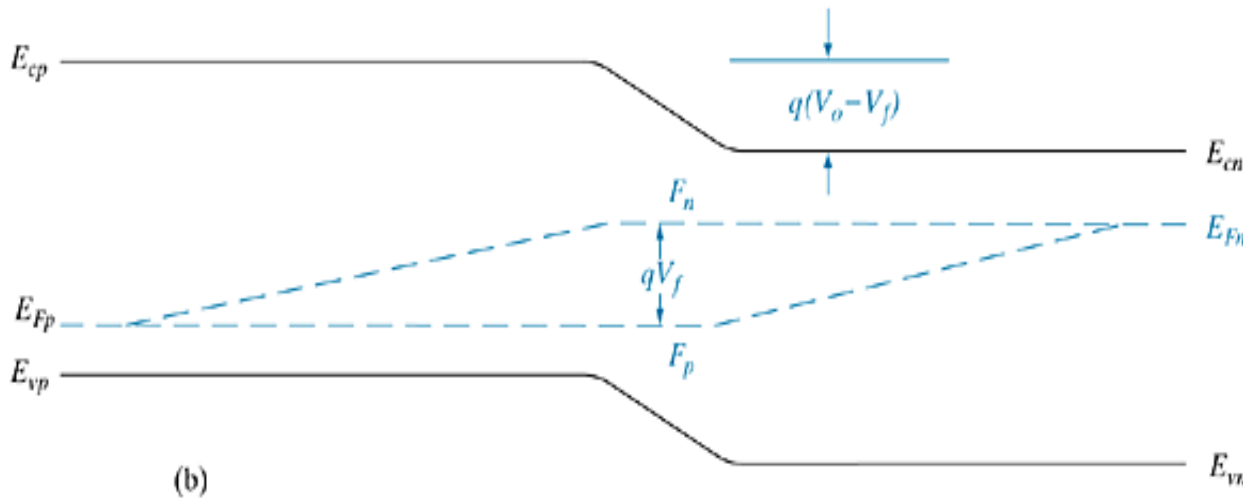
ładunek przestrzenny



Kwazi-poziomy Fermiego. Złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

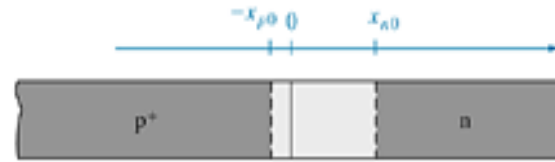


$$pn = n_i^2 e^{(F_n - F_p)/kT} = n_i^2 e^{qV/kT}$$



- (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

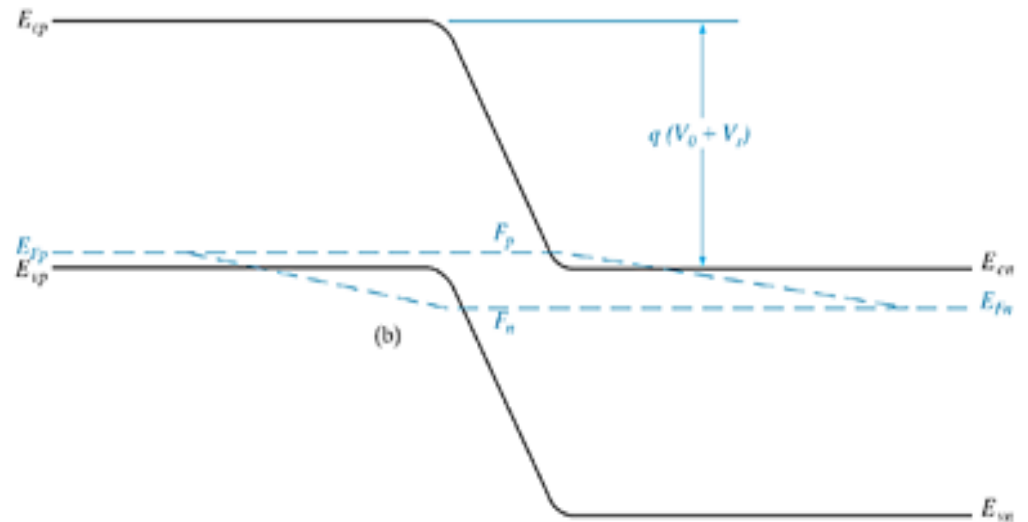
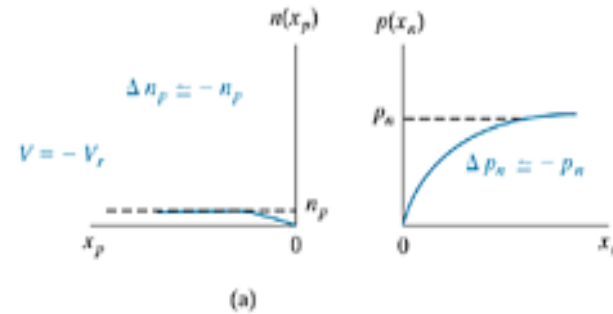
Polaryzacja zaporowa



Dla polaryzacji zaporowej

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

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





Czy równanie Shockley'a jest spełnione ?

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

Powody:

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

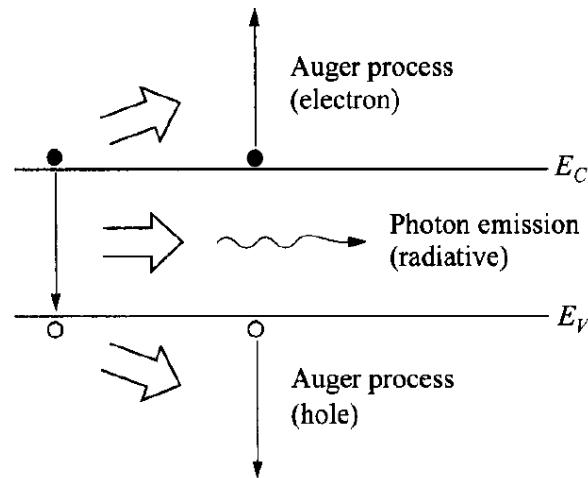
$$I = I_s (e^{qV / nkT} - 1)$$

n - współczynnik idealności

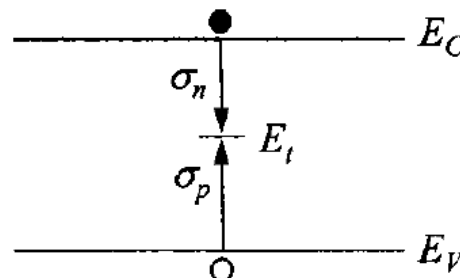
Rekombinacje: bezpośrednia, Augera i SRH

$$n_n p_n \gg n_i^2$$

- Półprzewodnik z prostą przerwą wzbronioną



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



Prąd dyfuzyjny

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

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

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

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

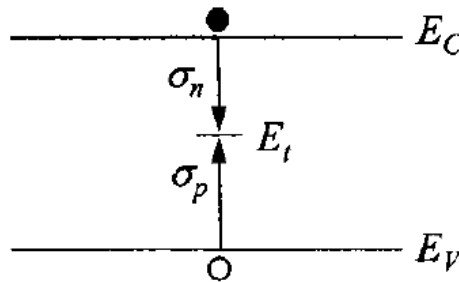


$$I_s \approx \frac{qAD_p p_{n0}}{L_p} = qA \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} \propto T^{\frac{\gamma}{2}} \cdot T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Kier. przewodzenia - prąd rekombinacji

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

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



$$n_n p_n \gg n_i^2$$

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

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

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

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

Złącze p-n - kier. zaporowy - prąd generacji

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

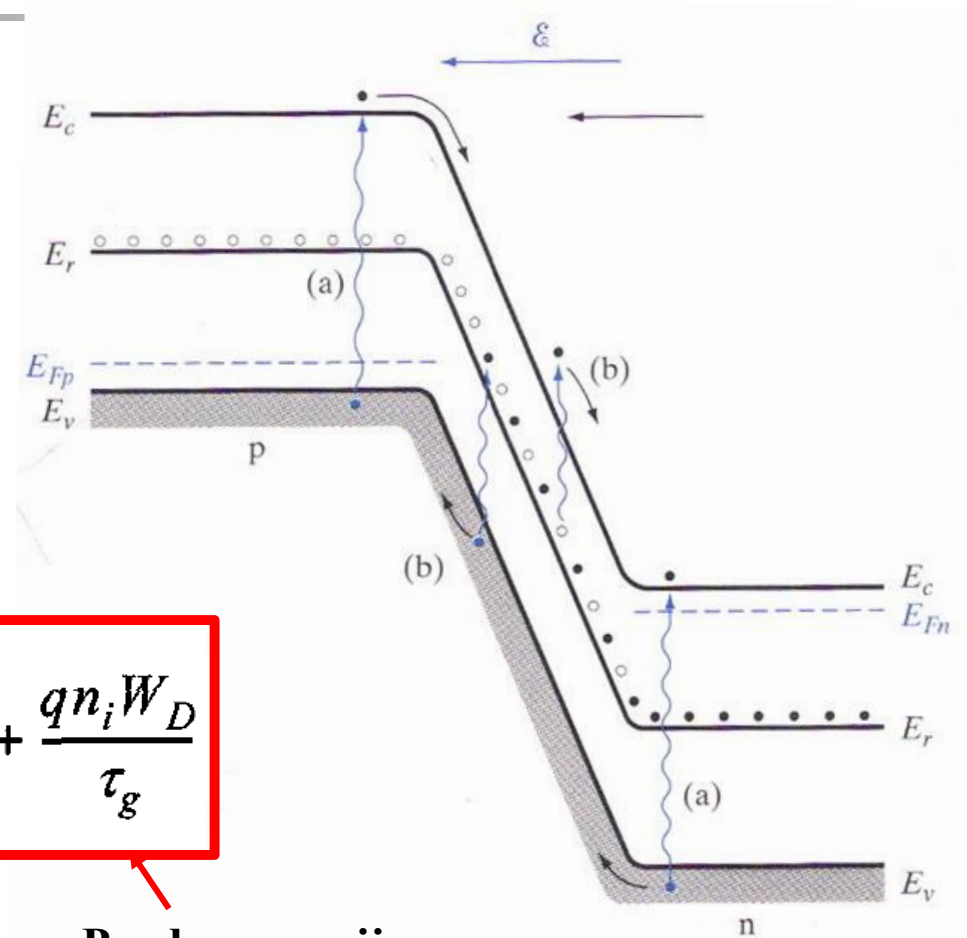
$$j_{gen} \approx \frac{qn_i W_d}{\tau_g} \propto \sqrt{V_{bi} - V}$$

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

