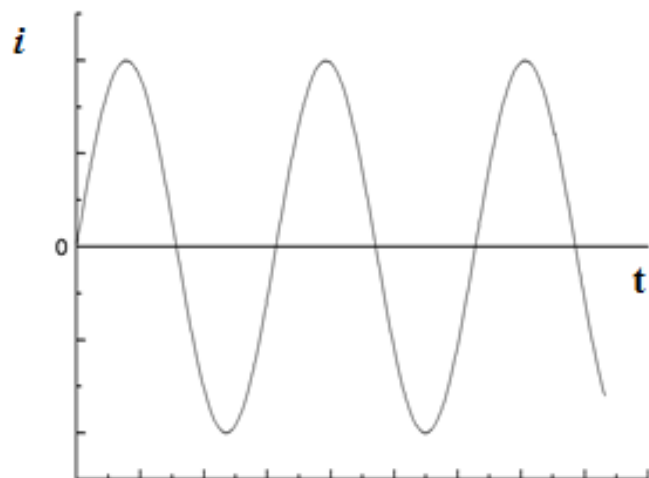


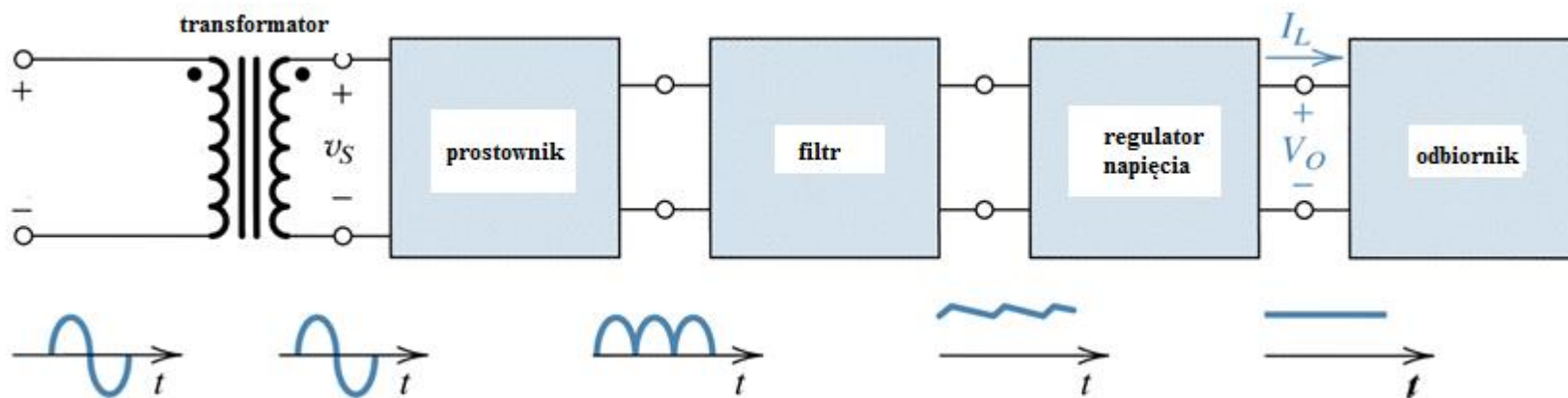
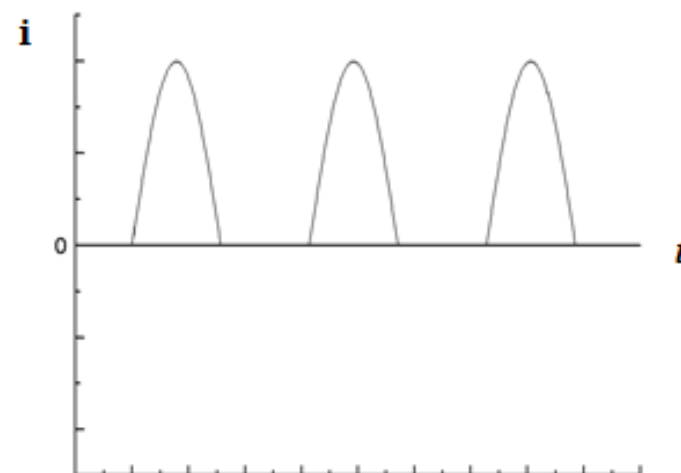
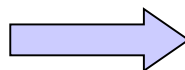
WYKŁAD 6

**Diody: prostownicza, lawinowa, Zenera
i Esakiego**

Złącze p-n (dioda półprzewodnikowa) – prostownik



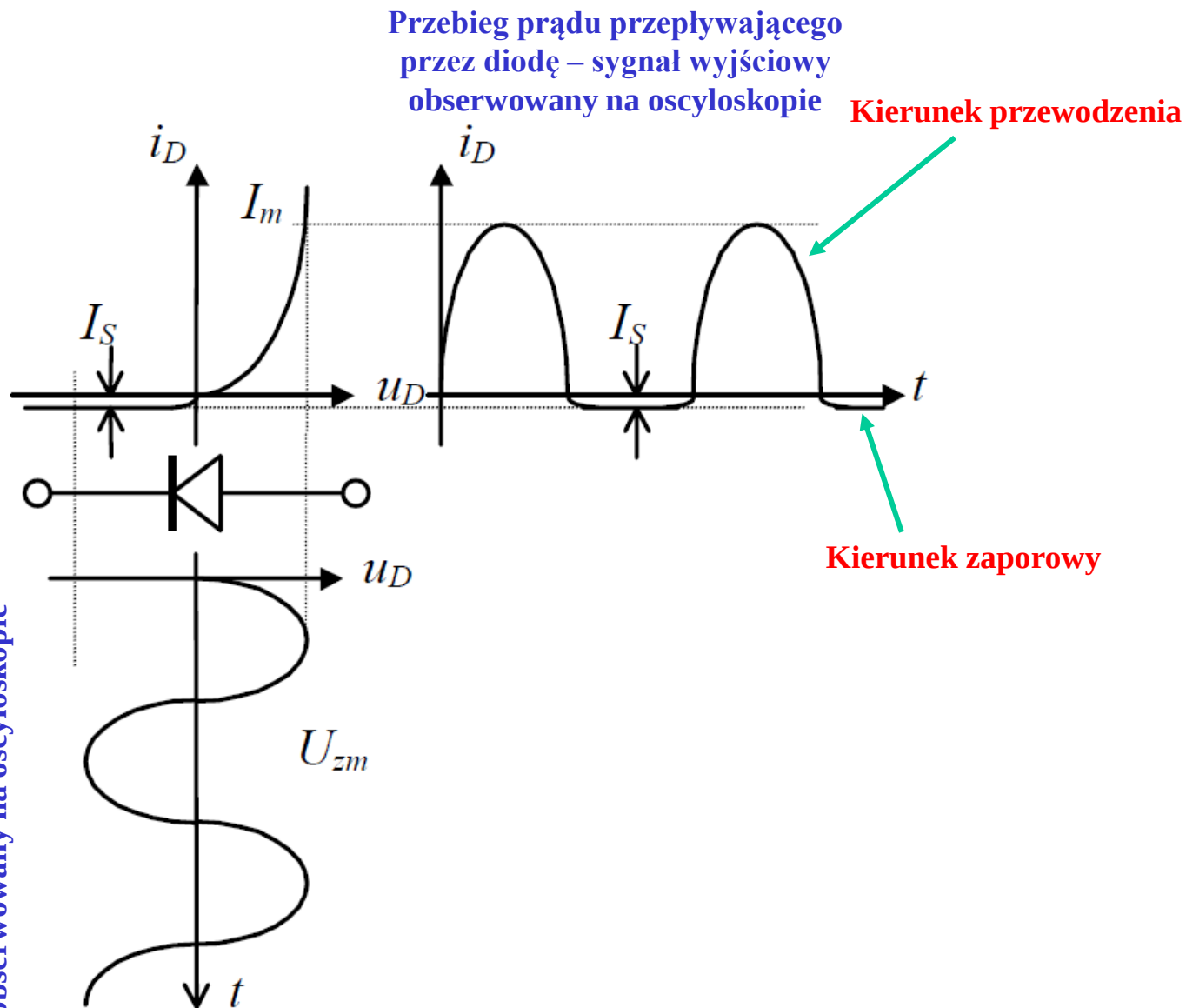
Złącze P-N



Schemat blokowy zasilacza.

Praca diody prostowniczej

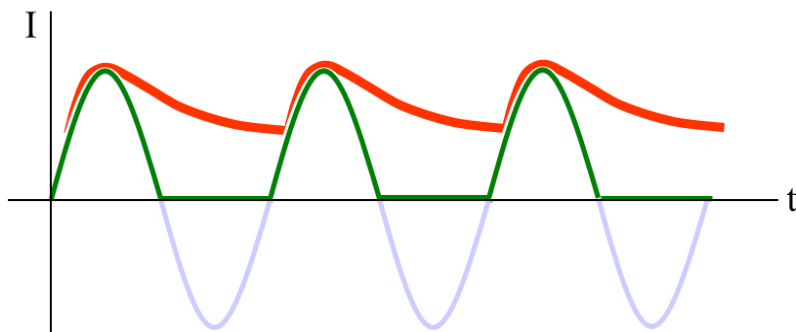
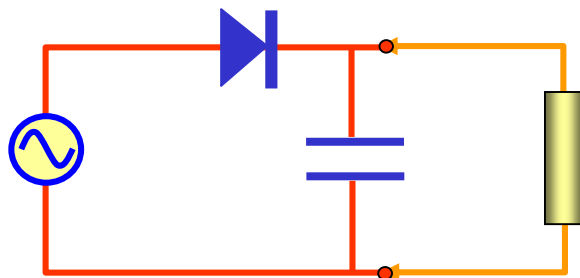
Przebieg napięcia podawanego
na diodę – sygnał wejściowy
obserwowany na oscyloskopie



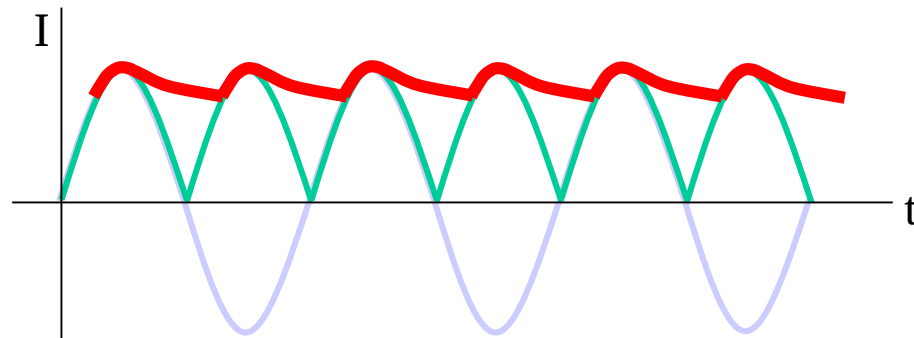
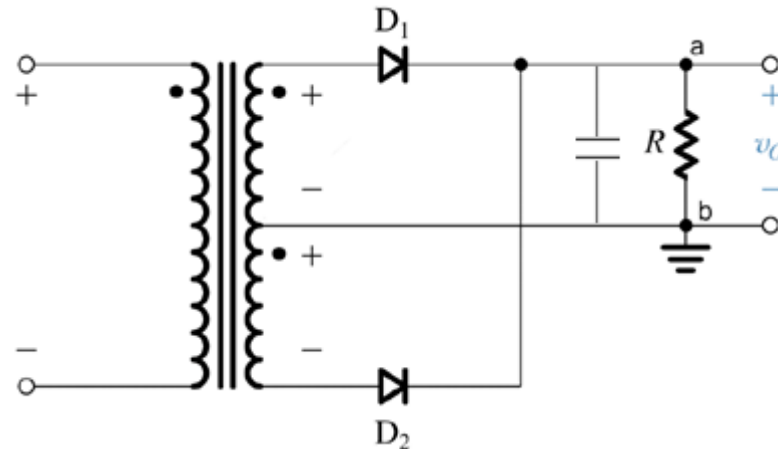
Złącze p-n (dioda półprzewodnikowa) – prostownik

- **Prostownik** – jest to układ, który zamienia prąd przemienny na prąd stały

➤ Prostownik jednopółwkowy



➤ Prostownik dwupółwkowy



Rys. Przebieg prądu przemiennego na wyjściu prostownika jednopółwkowego (lewa strona) i dwupółwkowego (prawa strona). Przebieg **bez kondensatora** (zielona krzywa) i **z kondensatorem** (czerwona krzywa). Niebieski przebieg sinusoidalny – prąd przemienny na wejściu prostownika.

Kondensator

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

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

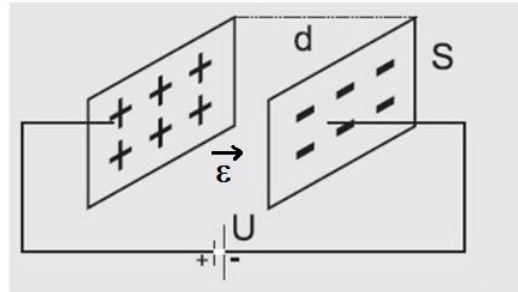
$$V_C(t) = \varepsilon \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

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

ε – natężenie pola elektrycznego

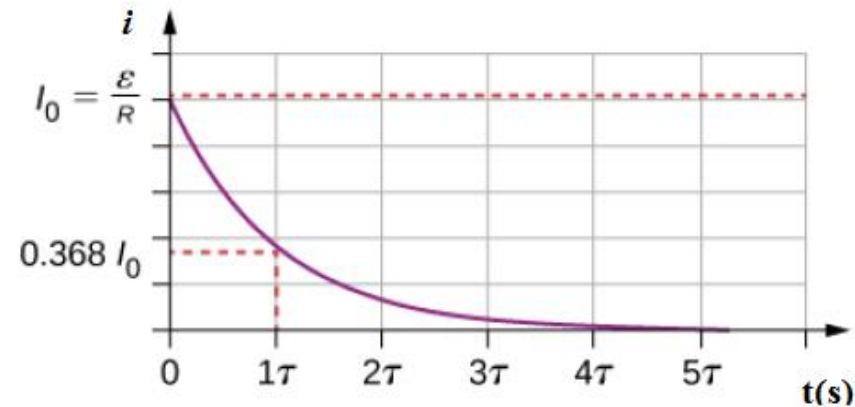
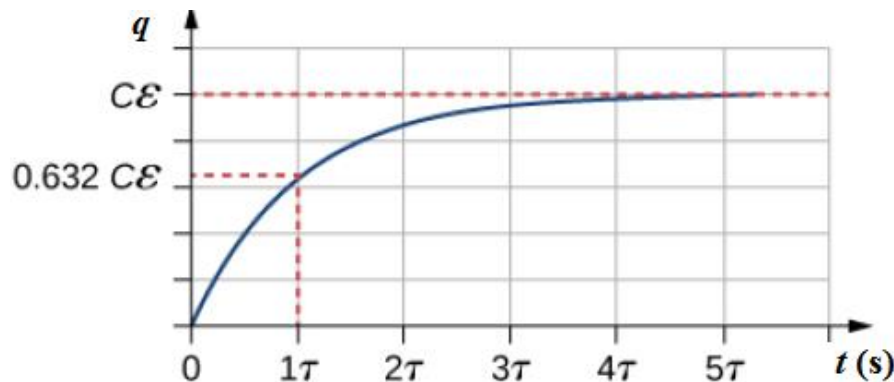
$\tau = RC$ – stała czasowa

V_C – różnica potencjałów
(napięcie mierzone między okładkami kondensatora)

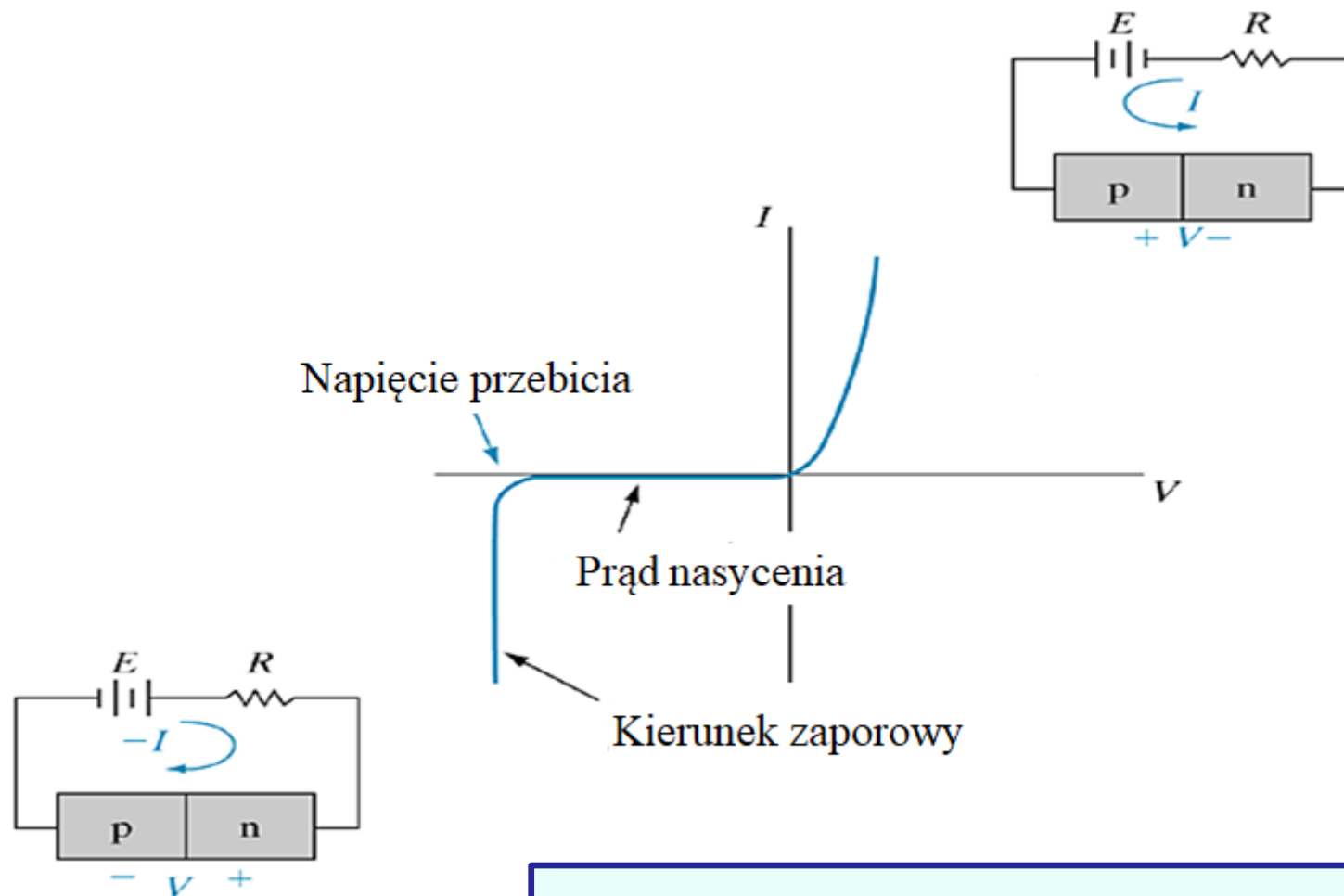


C – pojemność kondensatora

I – natężenie prądu (związane z ładunkiem q zgromadzonym między okładkami kondensatora)



Charakterystyka I-V, przebicie złącza



Trzy mechanizmy odpowiedzialne za przebicie w złączu p-n:

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

Efekt termiczny

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

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

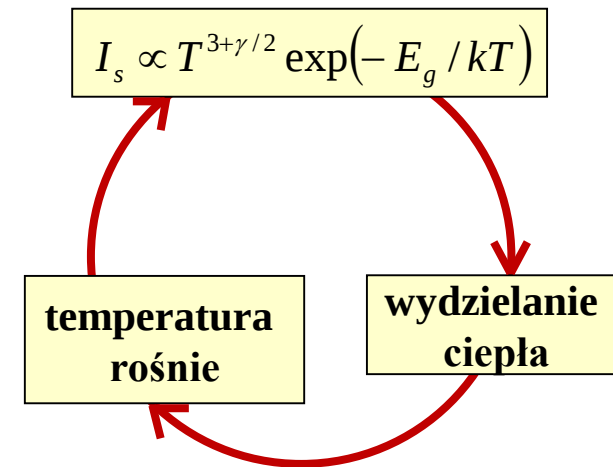
dla jednostronnego: p^+n ($p_{n0} \gg n_{p0}$):

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



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

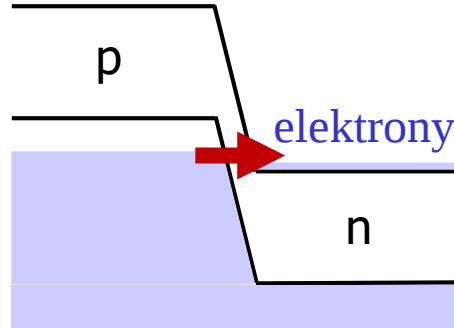
Uwzględniając, że: $D_p / \tau_p \sim T^\gamma$



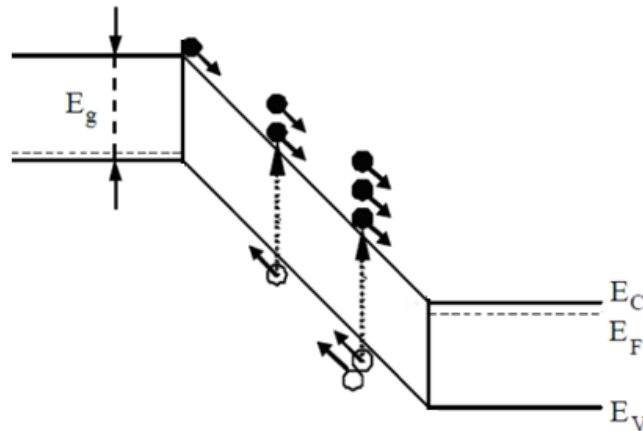
Pętla dodatniego sprzężenia zwrotnego

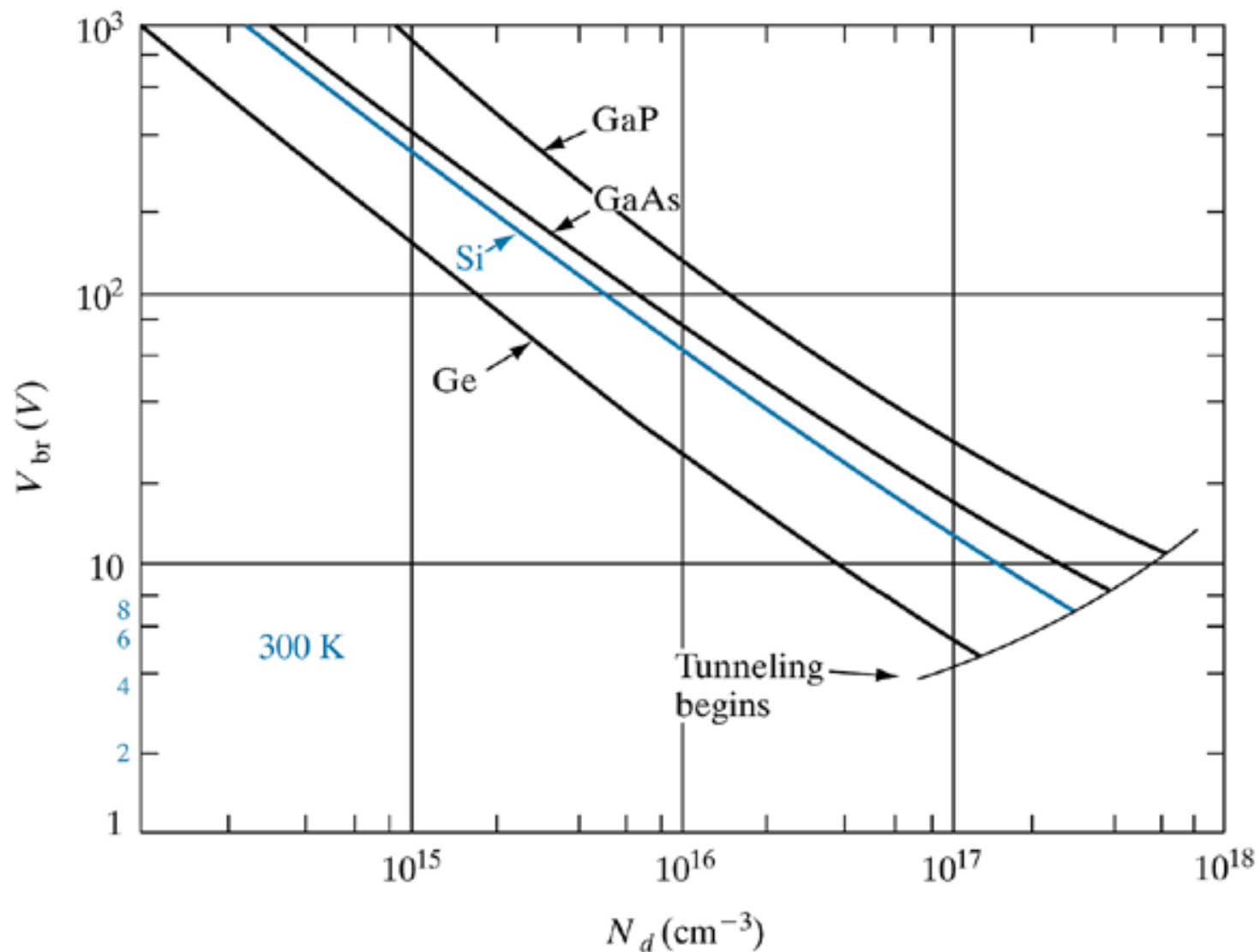
Przebicie złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym

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



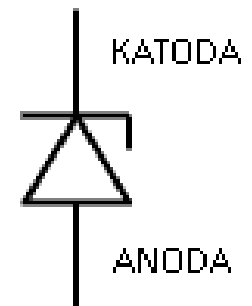
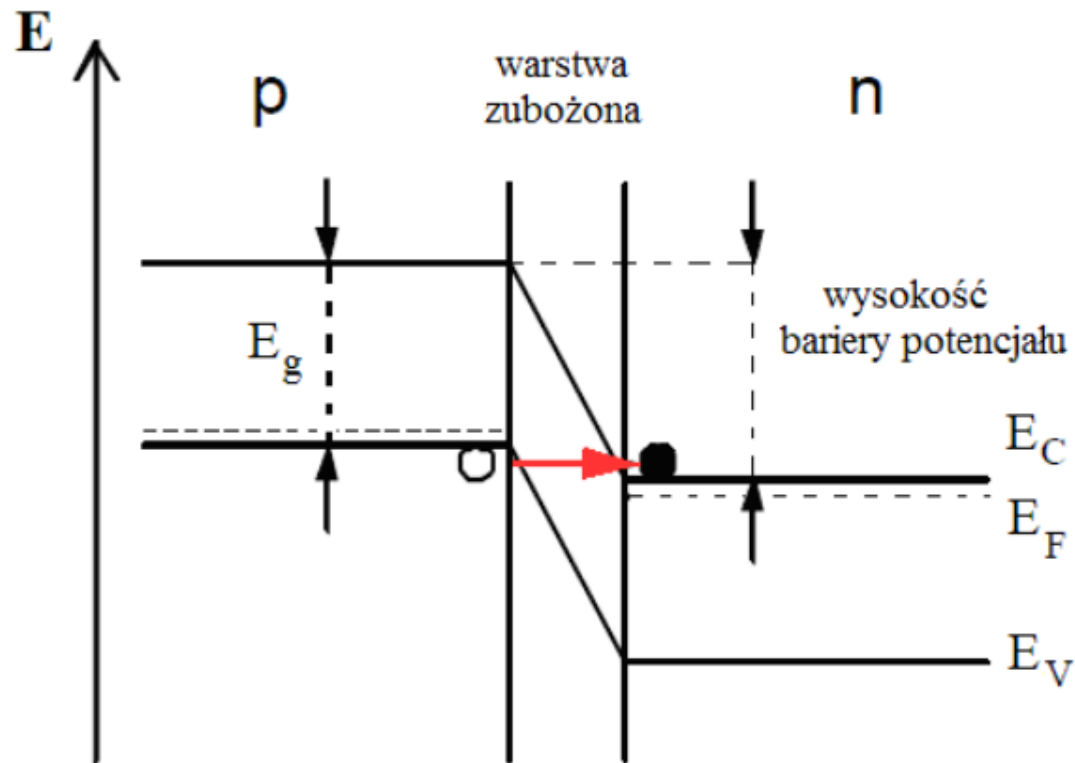
- Powielanie lawinowe (inaczej jonizacja zderzeniowa)** (dominuje gdy $V_{\text{przebicia}} > 6E_g/e$)





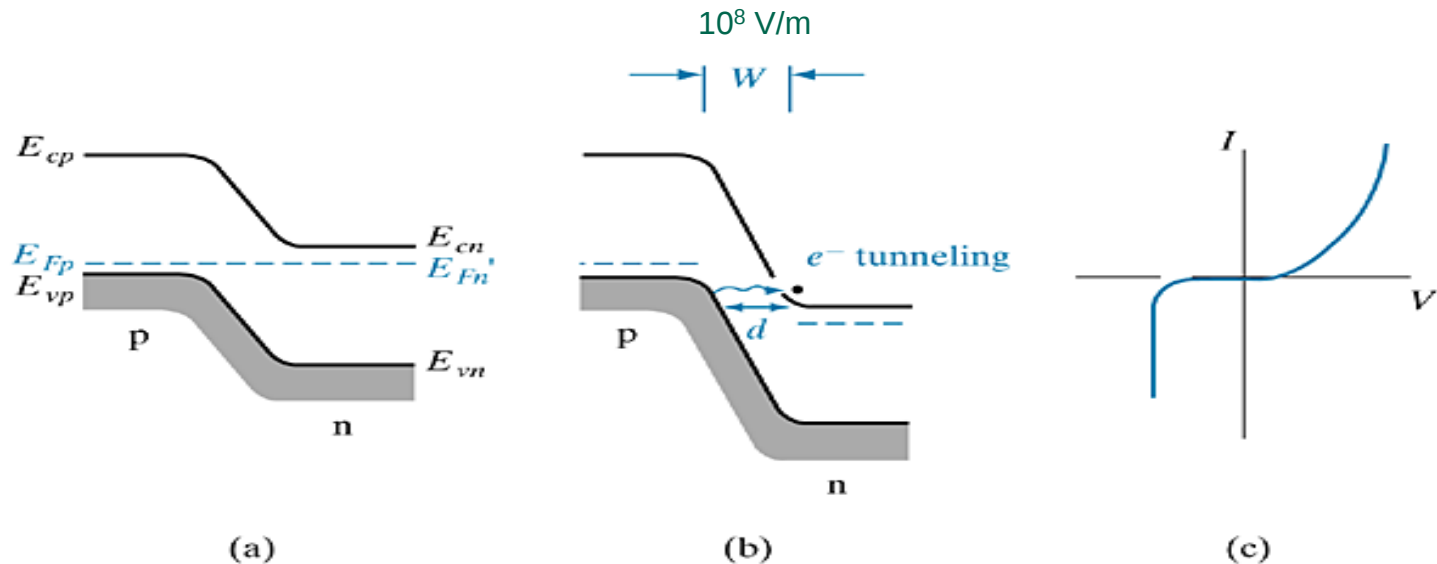
Napięcie przebicia dla złączy skokowych p⁺-n w funkcji koncentracji donorów dla Si, Ge, GaAs i GaP

Dioda Zenera



Efekt Zenera: (a) złącze p-n silnie domieszkowane w równowadze; (b) spolaryzowane napięciem w kierunku zaporowym c) efekt tunelowy: przejście elektronu z pasma walencyjnego po stronie półprzewodnika typu p do pasma przewodnictwa po stronie półprzewodnika typu n **bez zmiany energii.**

Dioda Zenera



(a) Silnie domieszkowane złącze w stanie równowagi; (b) złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym : tunelowanie elektronów z p do n; (c) charakterystyka I - V .

W silnie domieszkowanym złączu p-n szerokość obszaru ładunku przestrzennego jest niewielka. Jeśli napięcie polaryzacji wstecznej takiego złącza będzie większe od napięcia Zenera (napięcia przy którym następuje gwałtowny wzrost prądu na skutek jonizacji atomów w obszarze zubożonym), to krawędź pasma walencyjnego obszaru typu p znajdzie się wyżej niż krawędź pasma przewodnictwa obszaru typu n. Dlatego jeśli elektron znajdujący się w paśmie walencyjnym w obszarze typu p przejdzie przez obszar ładunku przestrzennego do obszaru typu n, to bez zmiany energii stanie się tam swobodnym nośnikiem – elektronem znajdującym się w paśmie przewodzenia półprzewodnika typu n. Takie przejście nazywane jest przejściem tunelowym.

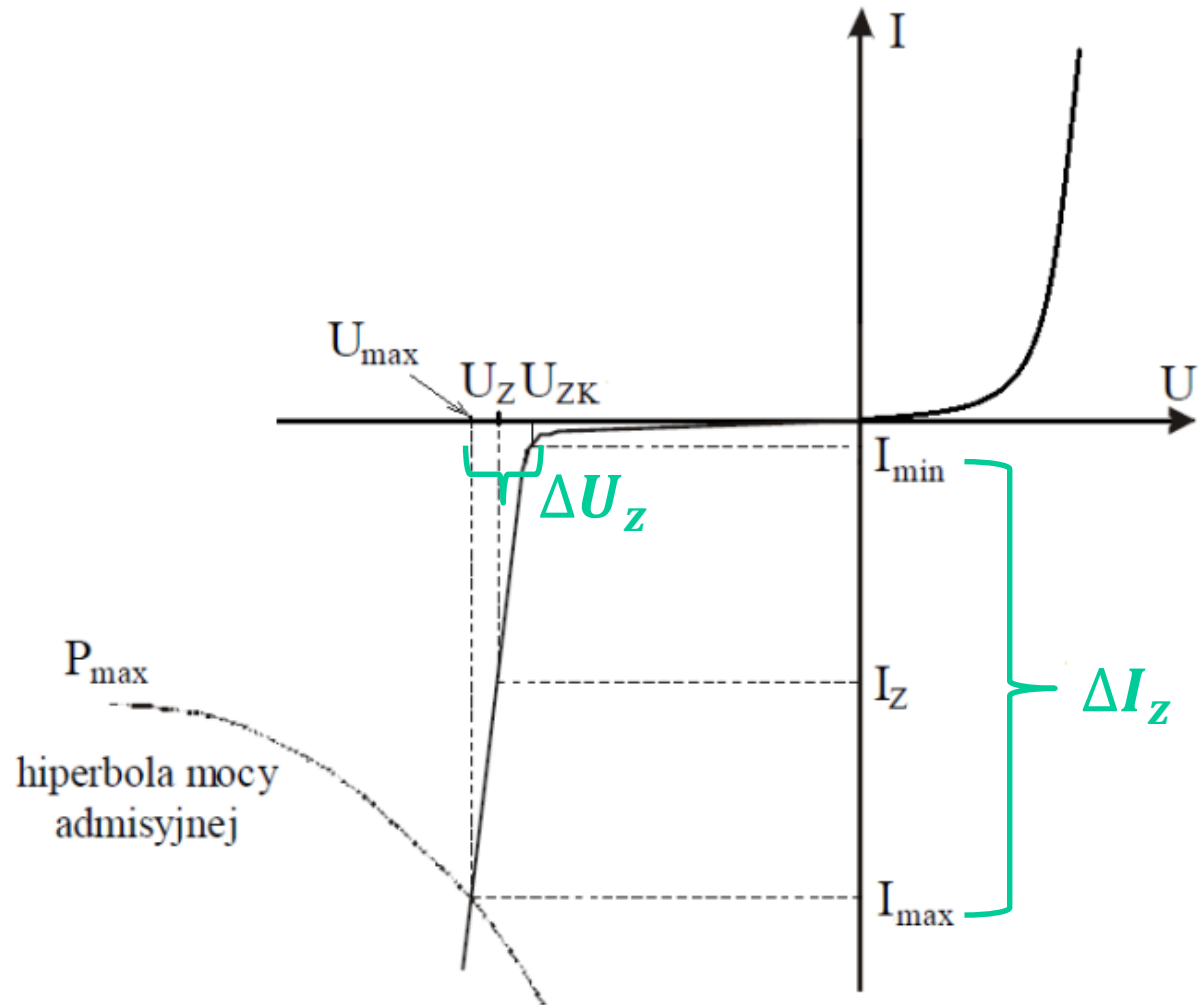
Dioda Zenera - charakterystyka I-V

**Rezystancja
Statyczna:**

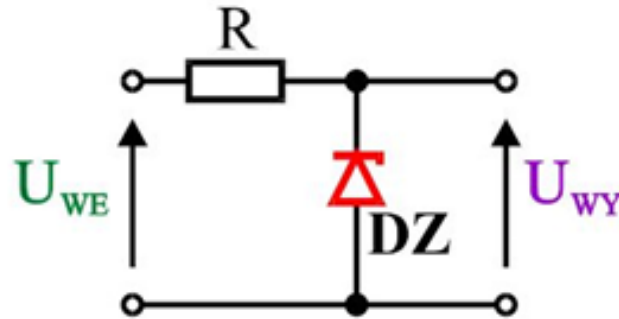
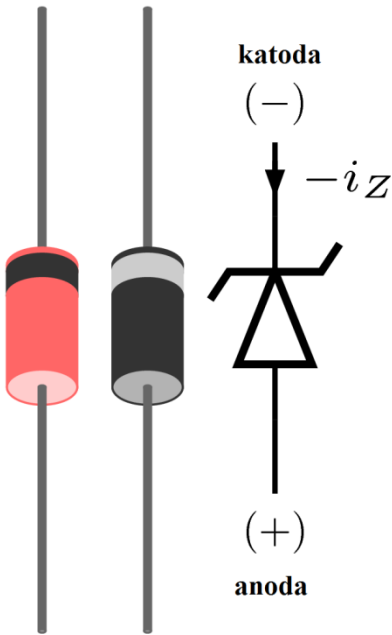
$$R_s = \frac{U_z}{I_z}$$

**Rezystancja
dynamiczna:**

$$R_D = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$$



Stabilizator na diodzie Zenera



$$U_{WE} > U_Z$$

$$U_{WY} \approx U_Z$$

Współczynnik stabilizacji:

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

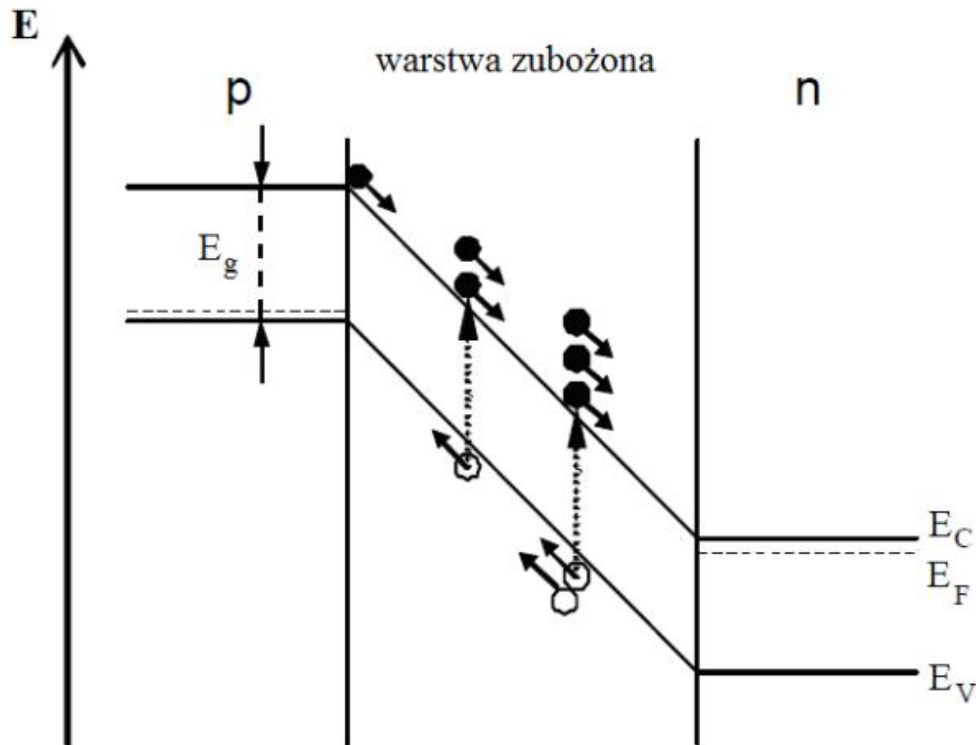
Im współczynnik S ma mniejszą wartość tym lepsza jest stabilizacja układu $\rightarrow S = 0.02 \div 0.05$

Dioda lawinowa

Współczynnik powielania (M) :

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

Zwykle: $n = 3 \sim 6$



Powielanie lawinowe

Jeśli napięcie polaryzujące jest odpowiednio duże (a więc obszar zubożony szeroki), to nośniki przechodzące przez obszar zubożony uzyskują dużą energię. Zderzając się z węzłami sieci krystalicznej (z atomami) przekazują im część swojej energii, co powoduje przejście elektronów do pasma przewodnictwa, a co za tym idzie również "utworzenie" dziur - innymi słowy ma miejsce **ionizacja**. Pojawiają się w ten sposób nowe nośniki, które również są przyspieszane, zderzają się z węzłami sieci, itd. Proces ten nabiera charakteru lawinowego i nazywany jest przebiegiem lawinowym.

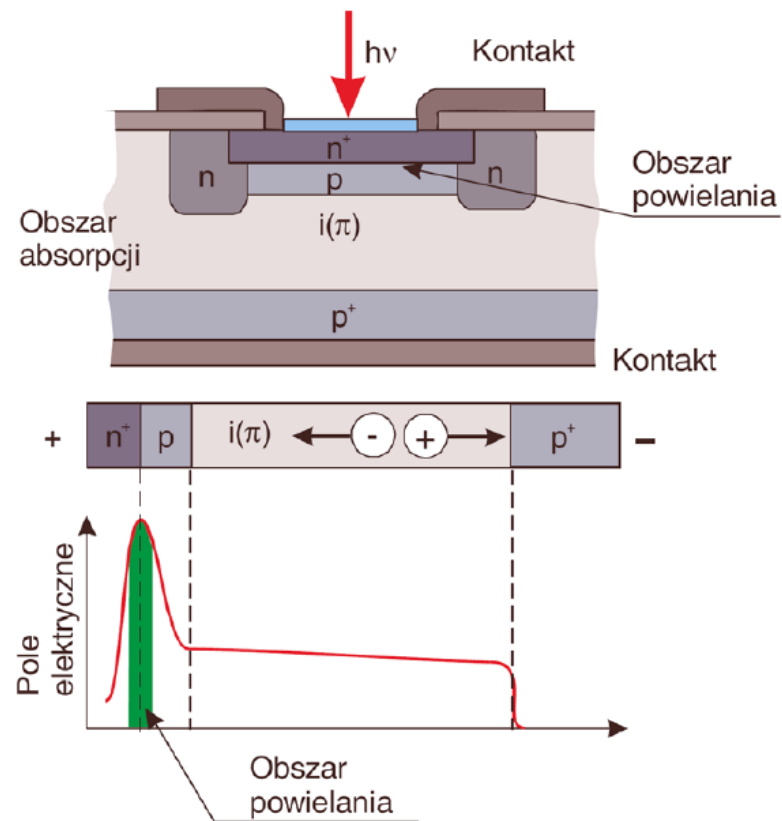
Dioda i fotodioda lawinowa



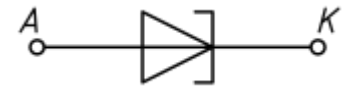
Fotodioda lawinowa (Avalanche Photodiode)



Licznik pojedynczych fotonów (Single Photon Counter)

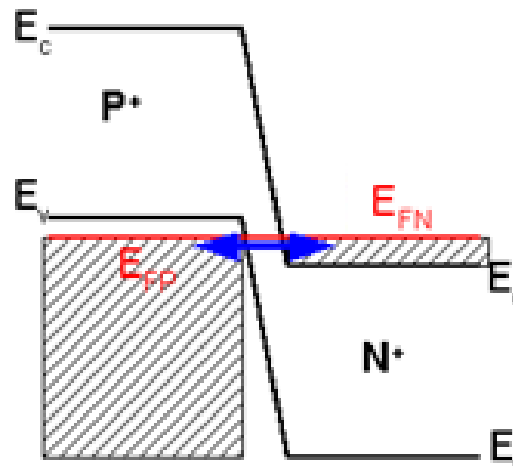


Dioda tunelowa Esakiego



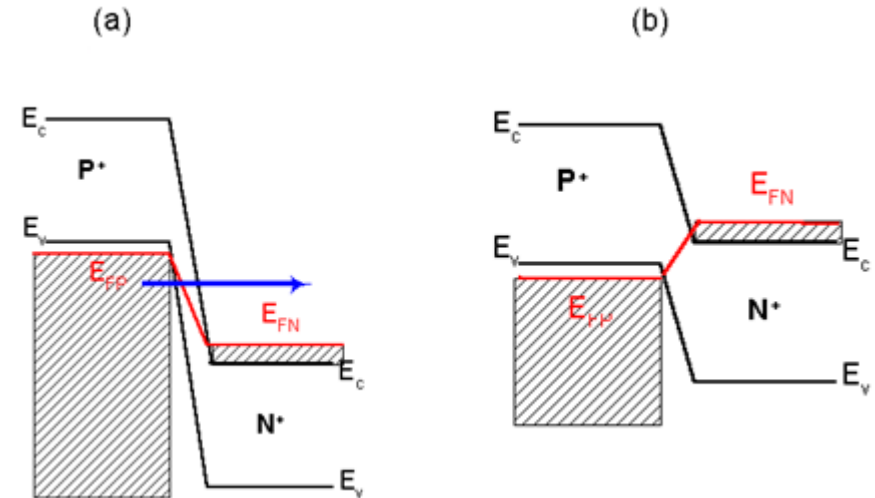
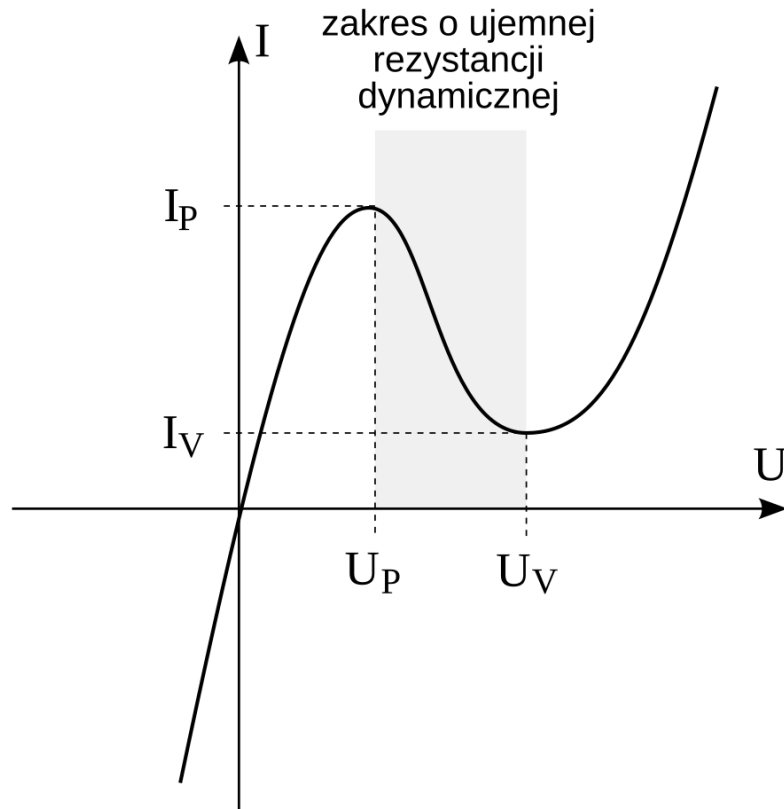
Jest to dioda półprzewodnikowa charakteryzująca się:

- niewielką grubością warstwy zubożonej w złączu p-n,
- bardzo wysoką koncentracją domieszek po obu stronach złącza (półprzewodniki domieszkowane silnie na p^+ i n^+)
- ujemną wartością rezystancji dynamicznej dla pewnego zakresu napięcia polaryzującego diodę w kierunku przewodzenia.



Schemat struktury pasmowej diody Esakiego w stanie równowagi termodynamicznej. W wyniku silnego domieszkowania kwazi-poziomy Fermiego znajdują się w pasmie walencyjnym (E_{FP}) oraz przewodnictwa (E_{FN}).

Dioda tunelowa Esakiego



Schemat struktury pasmowej diody Esakiego przy polaryzacji w kierunku zaporowym (a) - efekt tunelowy oraz spolaryzowanej w kierunku przewodzenia (b).

Przy wzroście **napięcia w kierunku przewodzenia**, natężenie prądu diody wzrasta dużo szybciej niż w przypadku typowej diody półprzewodnikowej. Dalszy wzrost napięcia w kierunku przewodzenia będzie powodować pogorszenie warunków pracy diody i po przekroczeniu napięcia szczytowego U_P natężenie prądu diody (prądu w kierunku przewodzenia) będzie malało, zaś po przekroczeniu tzw. „punktu doliny” U_V prąd diody z powrotem zacznie wzrastać. W związku z tym w zakresie $U_P \div U_V$ dioda tunelowa ma ujemną wartość **rezystancji różniczkowej**.

W diodzie tunelowej przy **polaryzacji zaporowej** płynie prąd wsteczny, który bardzo szybko rośnie - tutaj zjawisko tunelowania odgrywa istotną rolę.