PÓŁPRZEWODNIKI W ELEKTRONICE

Powszechnie uważa się, że współczesna elektronika jest elektroniką półprzewodnikową.

Półprzewodniki

Półprzewodniki to ciała stałe nieorganiczne lub organiczne o przewodnictwie elektrycznym typu elektronowego i przewodności elektrycznej większej od przewodności dielektryków i mniejszej od przewodności metali.

Krzem (Si)

Krzem jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych pierwiastków w skorupie ziemskiej. Otrzymuje się go przemysłowo przez redukcję krzemionki (SiO_2) węglem w piecu elektrycznym. Krzem czysty (99,9%) poddaje się następnie oczyszczaniu strefowemu. W wyniku wielokrotnego oczyszczania strefowego uzyskuje się surowiec półprzewodnikowy o czystości rzędu 99,999%. Tak oczyszczony krzem poddaje się precyzyjnemu domieszkowaniu i krystalizacji w celu uzyskania materiału wyjściowego o pożądanej w procesie produkcji przyrządów PP strukturze i rezystywności.

Krzem (Si)

Rezystywność krzemu może mieć wartość w przedziale od 300 kΩcm do 0,001 Ωcm. W normalnych warunkach fizycznych ma on: skośną przerwę energetyczną o szerokości 1,12 eV, wytrzymałość na przebicie 300 kV/cm, względną stałą dielektryczną 11,9; ruchliwość elektronów rzędu 1000 cm^2/Vs, ruchliwość dziur - 400 cm^2/Vs, koncentrację samoistną nośników ładunku $1{,}5 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}.

Krzem jest pierwiastkiem IV grupy układu okresowego; liczba atomowa 14, czterowartościowy, średnica atomu 2,35Å, krystalizuje w układzie regularnym typu diamentu o stałej sieciowej 5,43Å, ma ok. $5 \cdot 10^{22}$ atomów/cm^3 i moduł Younga 10890kG/mm^2.

Arsenek galu (GaAs)

Arsenek galu jest stosowany przede wszystkim na diody elektroluminescencyjne, lasery, i przyrządy mikrofalowe. Umożliwia on uzyskanie jeszcze mniejszego prądu nasycenia i wyższej maksymalnej dopuszczalnej temperatury złącza p-n niż krzem.

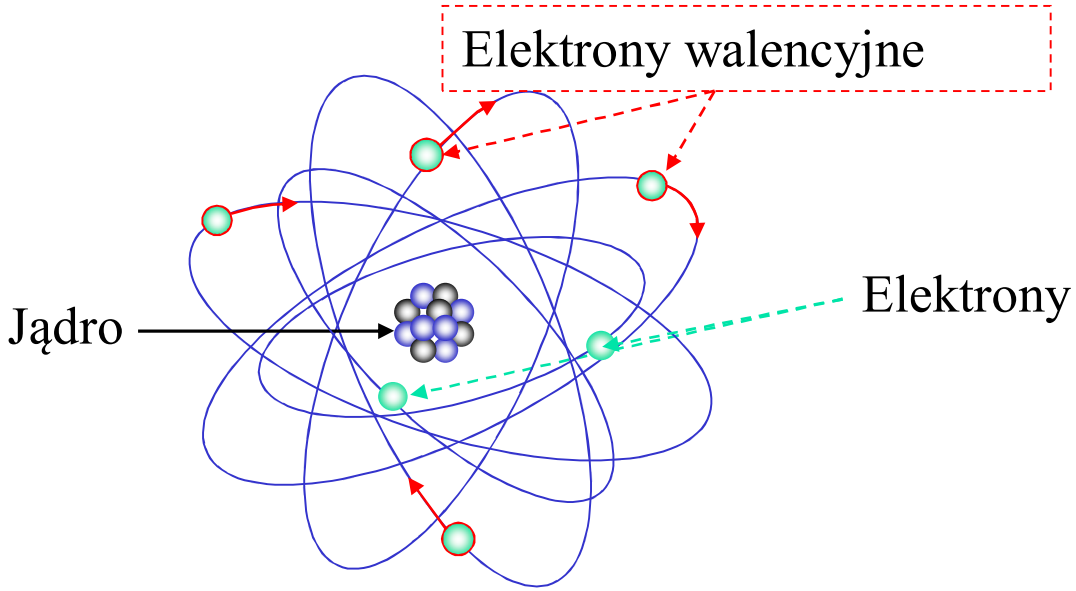
W normalnych warunkach fizycznych ma on:

1. prostą przerwę energetyczną o szerokości 1,43 eV,
2. wytrzymałość na przebicie 350 kV/cm,
3. względną stałą dielektryczną 12,9;
4. ruchliwość elektronów 6 razy większą niż w krzemie.

Inne, częściej stosowane półprzewodniki

- GaP, GaN, InAs, InP, InSb, CdS, PbTe, tlenki: Cu, Ni, Mn, Fe i ich mieszaniny, SiC, AlGaAs, GaAsP, SiGe.
- Bada się możliwości stosowania półprzewodników organicznych, np. pentacenu.
- Są próby stosowania jako półprzewodnika diamentu.

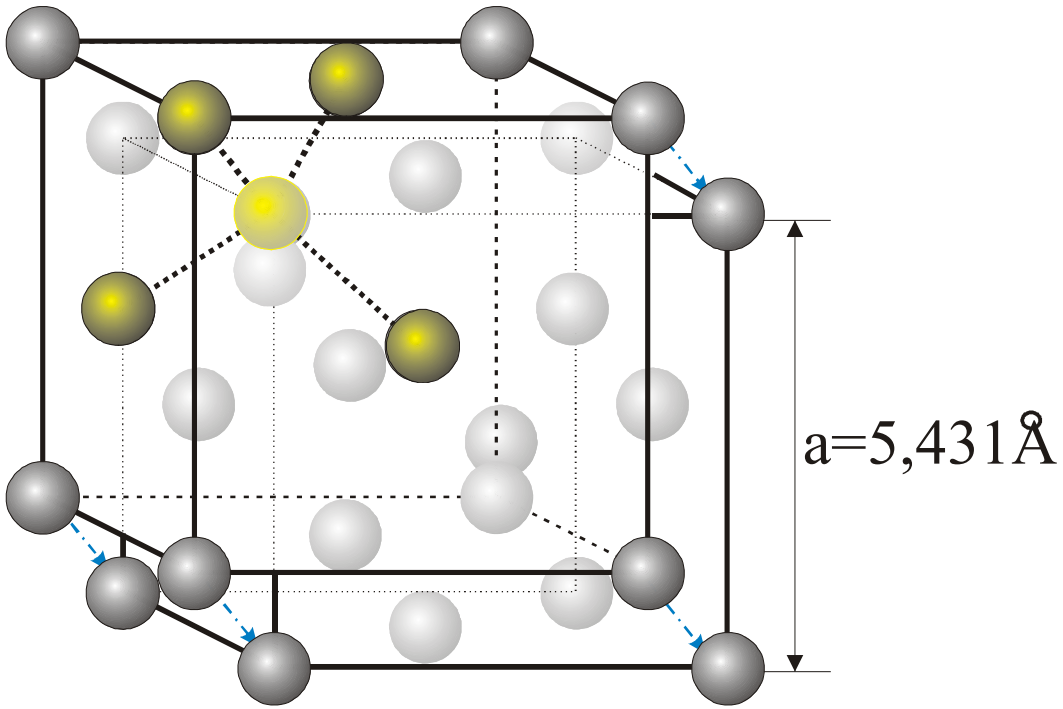
Elektrony w atomie



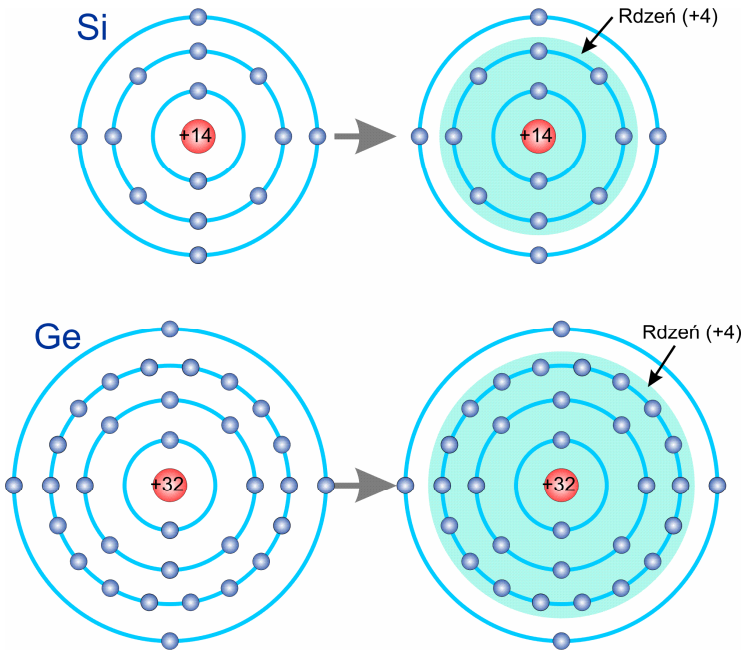
Półprzewodnik samoistny

- to półprzewodnik o doskonałej sieci krystalicznej.

i-Si

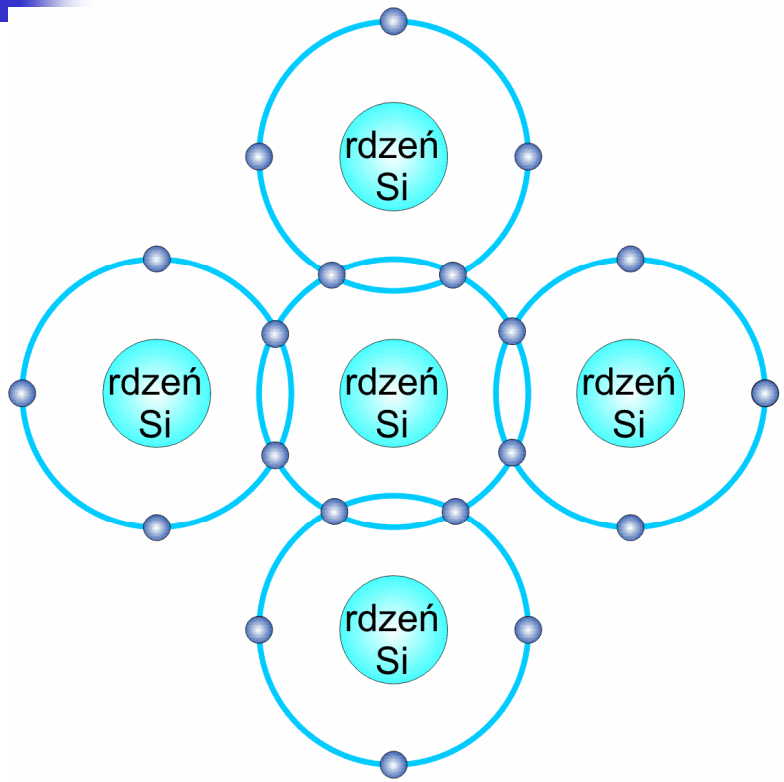


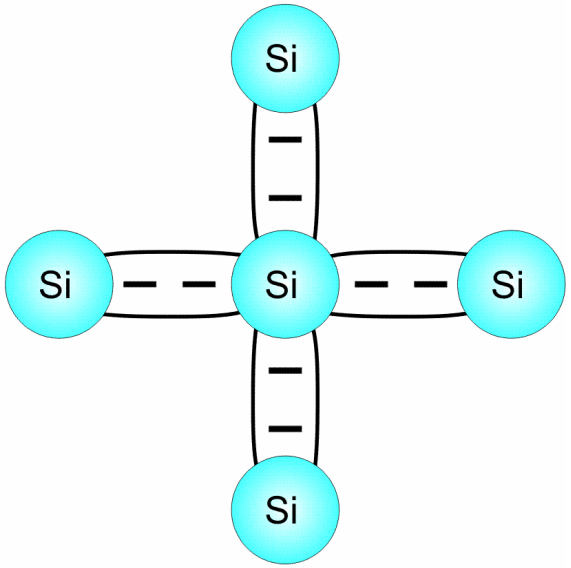
Atomy i rdzenie atomowe Si oraz Ge



- Si oraz Ge należą do grupy IV układu okresowego pierwiastków. Mają po 4 zewnętrzne elektrony.
- Tylko zewnętrzne elektrony uczestniczą w tworzeniu wiązań kowalencyjnych.
- Pozostałe elektrony i jądra można traktować w przybliżeniu jako rdzeń atomowy o ładunku +4q.

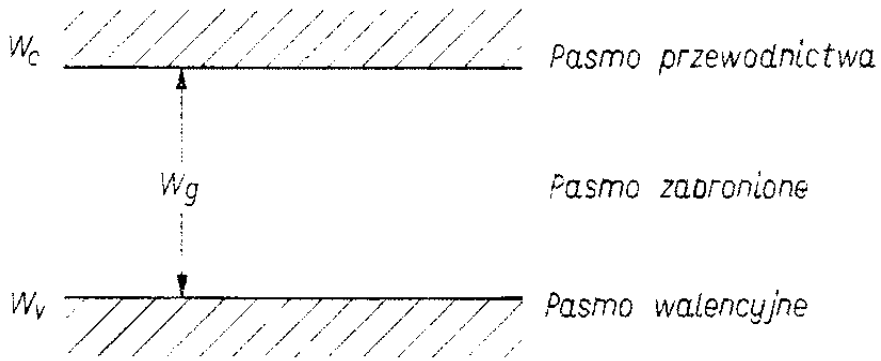
Wiązania kowalencyjne w krysztale Si





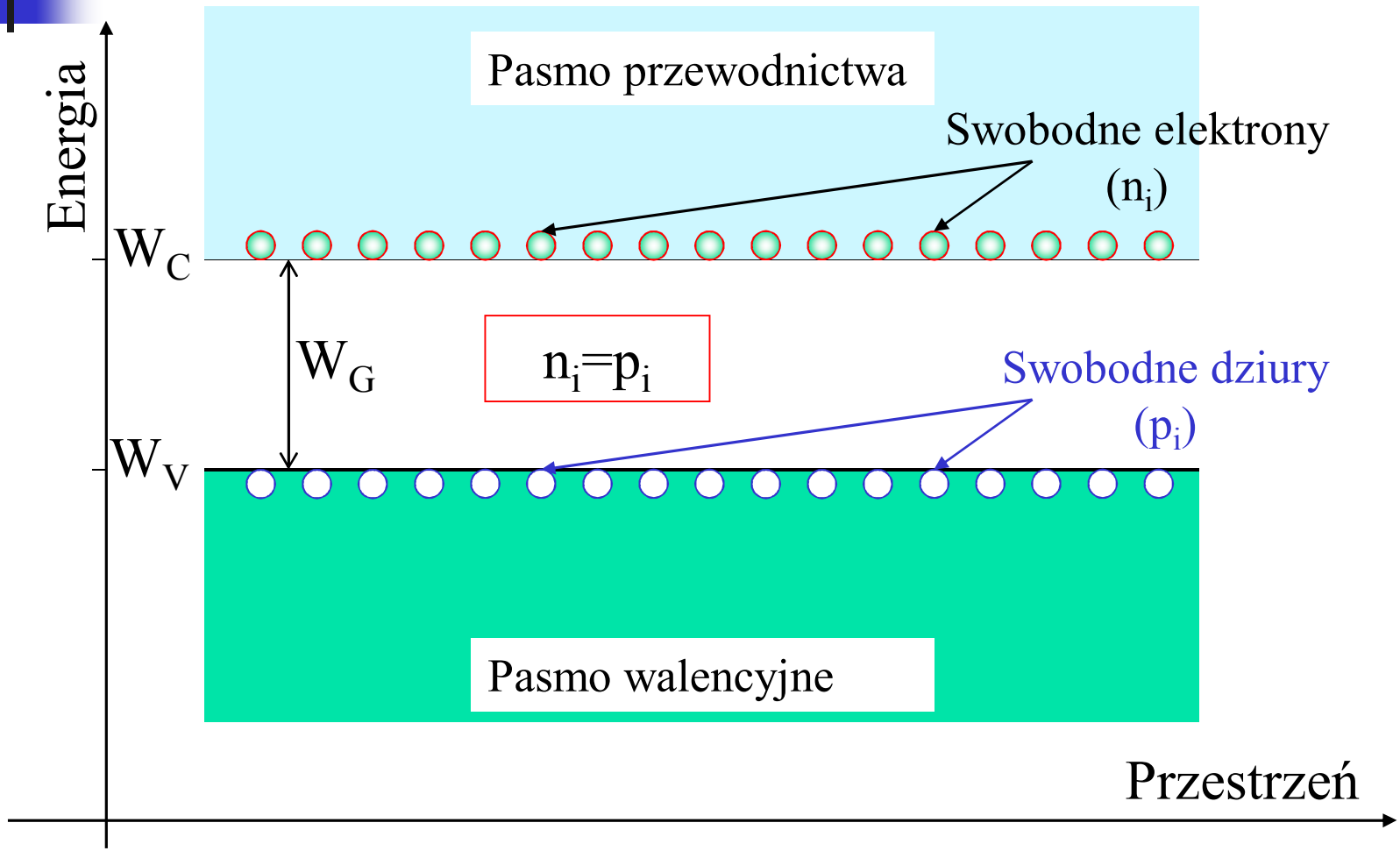
Atom Si w sieci krystalicznej dzieli się swoimi 4 elektronami walencyjnymi z 4 otaczającymi go atomami, tworząc wiązanie kowalencyjne.

Energetyczny model pasmowy półprzewodnika



- W półprzewodniku, w wyniku oddziaływania rdzeni atomowych, dochodzi do utworzenia pasma przewodnictwa.
- Jest ono oddzielone przerwą energetyczną od pasma walencyjnego.
- Elektrony pasma walencyjnego i niższych nie mogą poruszać się swobodnie po krysztale.

Model pasmowy półprzewodnika samoistnego



Półprzewodnik samoistny – kreacja e-h

W idealnym krysztale półprzewodnika, bez defektów – również bez domieszek, w temperaturze zera bezwzględnego pasmo walencyjne powinno być pozbawione dziur, a w paśmie przewodnictwa nie powinno być elektronów

Dla $T > 0$ K termiczne drgania atomów prowadzą do zerwania niektórych wiązań i generacji par elektron-dziura o koncentracji odpowiednio $n_i = p_i$.

Elektrony w paśmie przewodnictwa i dziury w paśmie walencyjnym mogą przewodzić prąd elektryczny.

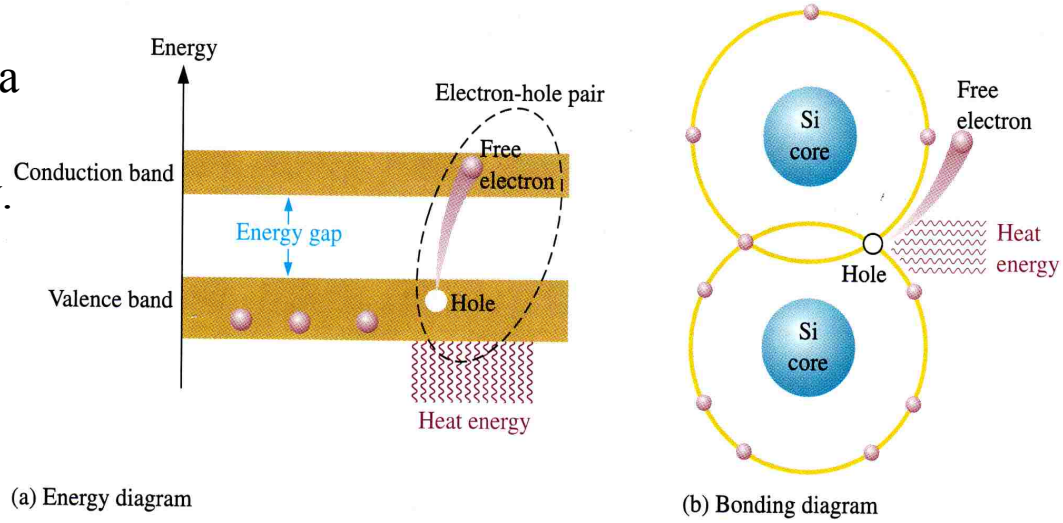
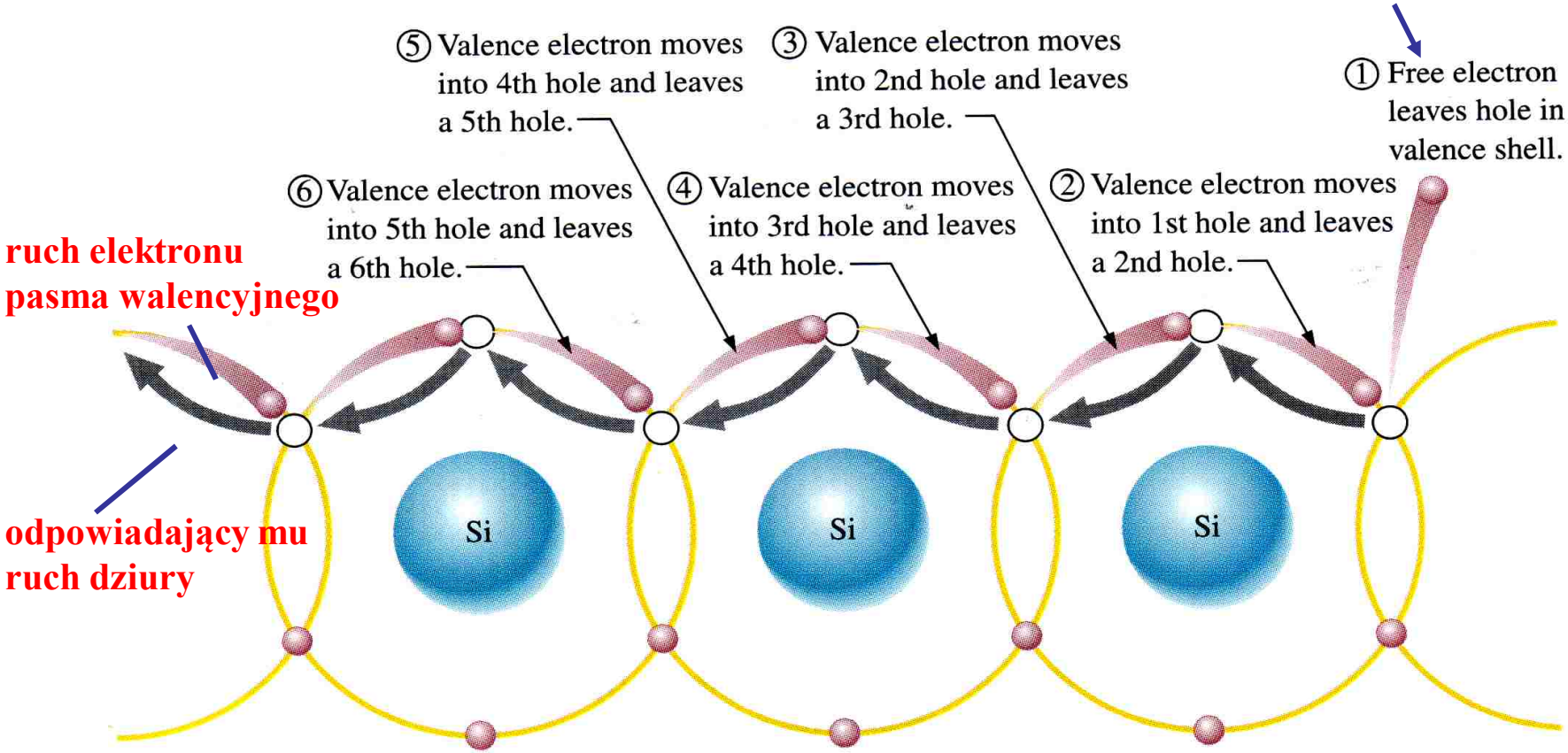


FIGURE 1–11
Creation of an electron-hole pair in an excited silicon atom. An electron in the conduction band is a free electron.

Ruch dziury w paśmie walencyjnym

T.Floyd, Electronic Devices,
Prentice-Hall, 1999

„Oswobodzenie" elektronu – przejście do pasma przewodnictwa zostawia dziurę w paśmie walencyjnym



ruch elektronu pasma walencyjnego

odpowiadający mu ruch dziury

Bariera energetyczna pomiędzy dziurą, a elektronami walencyjnymi sąsiednich atomów Si jest niewielka.

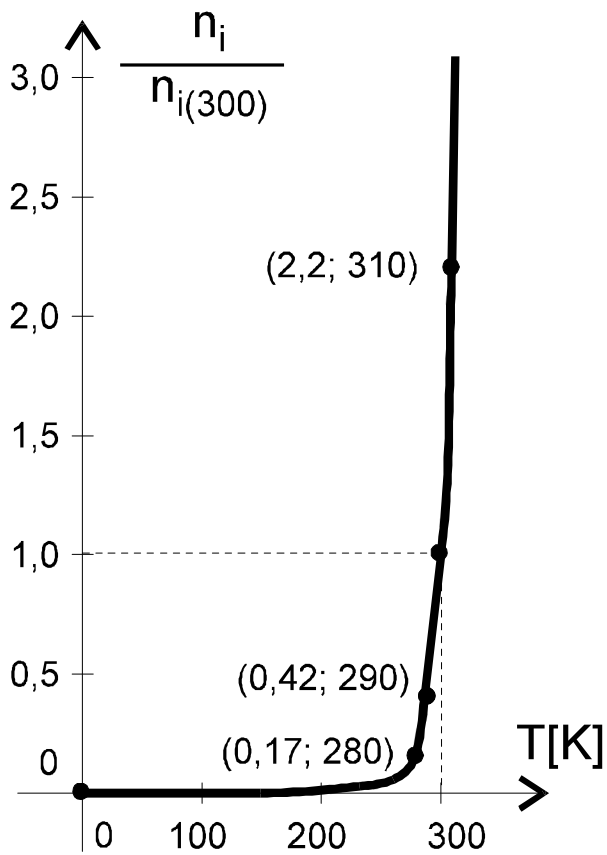
Termiczne drgania atomów w sieci krystalicznej wystarczają do jej pokonania i prowadzą do przemieszczania się dziury swobodnie po krysztale w paśmie walencyjnym.

Koncentracja samoistna (n_i)

$$n_i \approx N \exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right)$$

$$n_{i|Si,T=300K} \approx 1{,}5 \cdot 10^{10}\,cm^{-3}$$

15 milionów swobodnych elektronów i tyleż samo swobodnych dziur w objętości 1mm^3!



Półprzewodniki domieszkowane

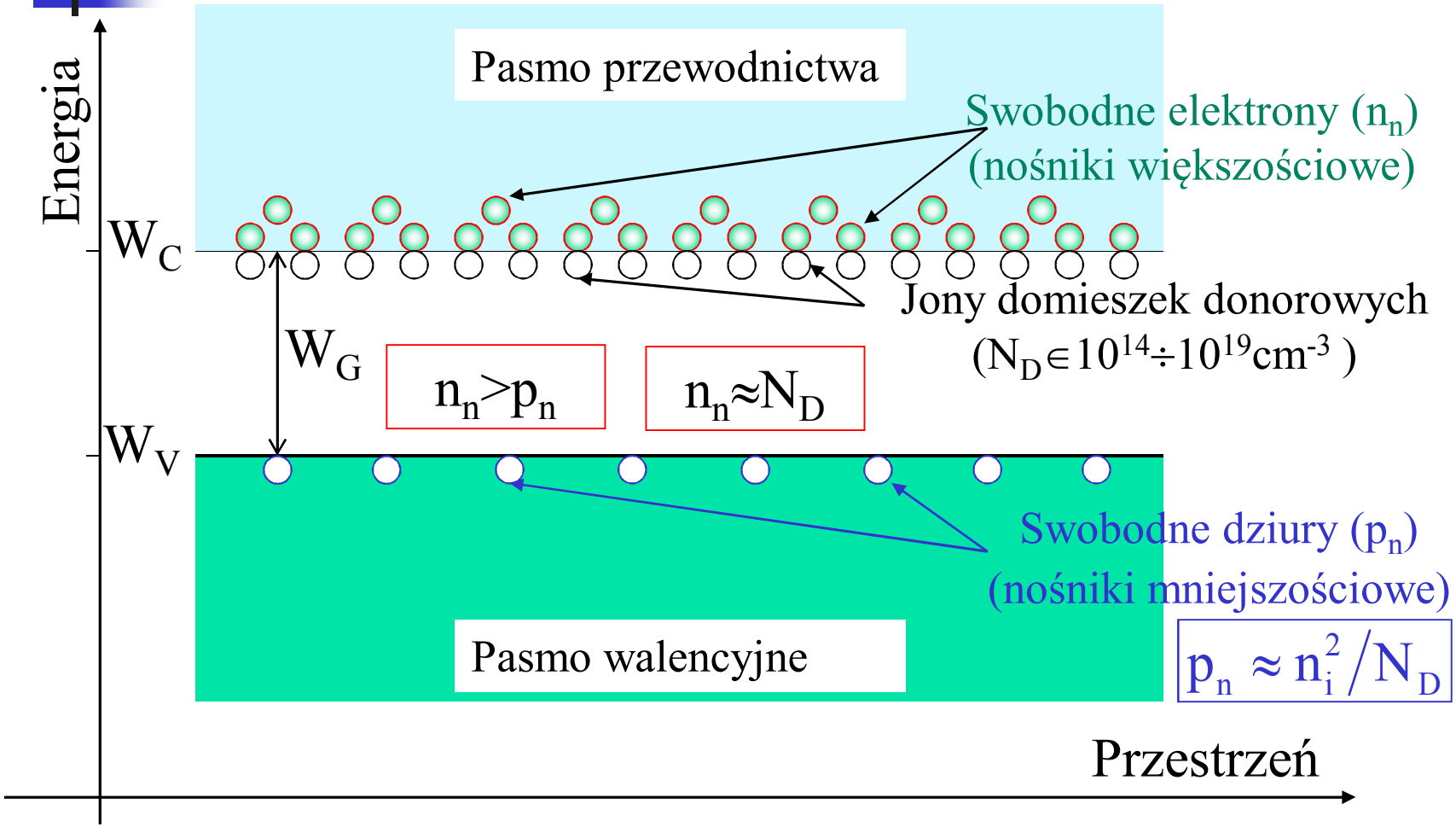
i-Si + (P lub As lub Sb)→n-Si → krzem donorowy

Pierwiastki piątej grupy układu okresowego

i-Si+(B lub Al lub Ga)→p-Si →krzem akceptorowy

Pierwiastki trzeciej grupy układu okresowego

Model pasmowy jednorodnego półprzewodnika donorowego

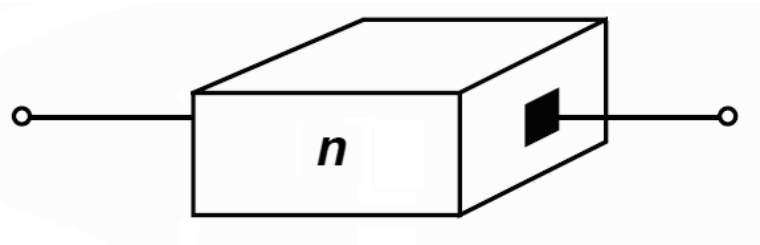


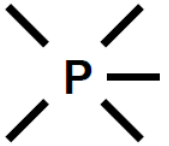
Półprzewodnik donorowy (n)

Domieszka donorowa – obce atomy o większej wartościowości.

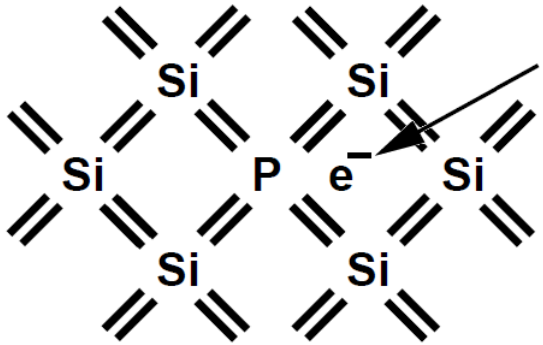
Liczba elektronów swobodnych jest równa liczbie atomów domieszki.

Powstaje półprzewodnik typu n (negative).



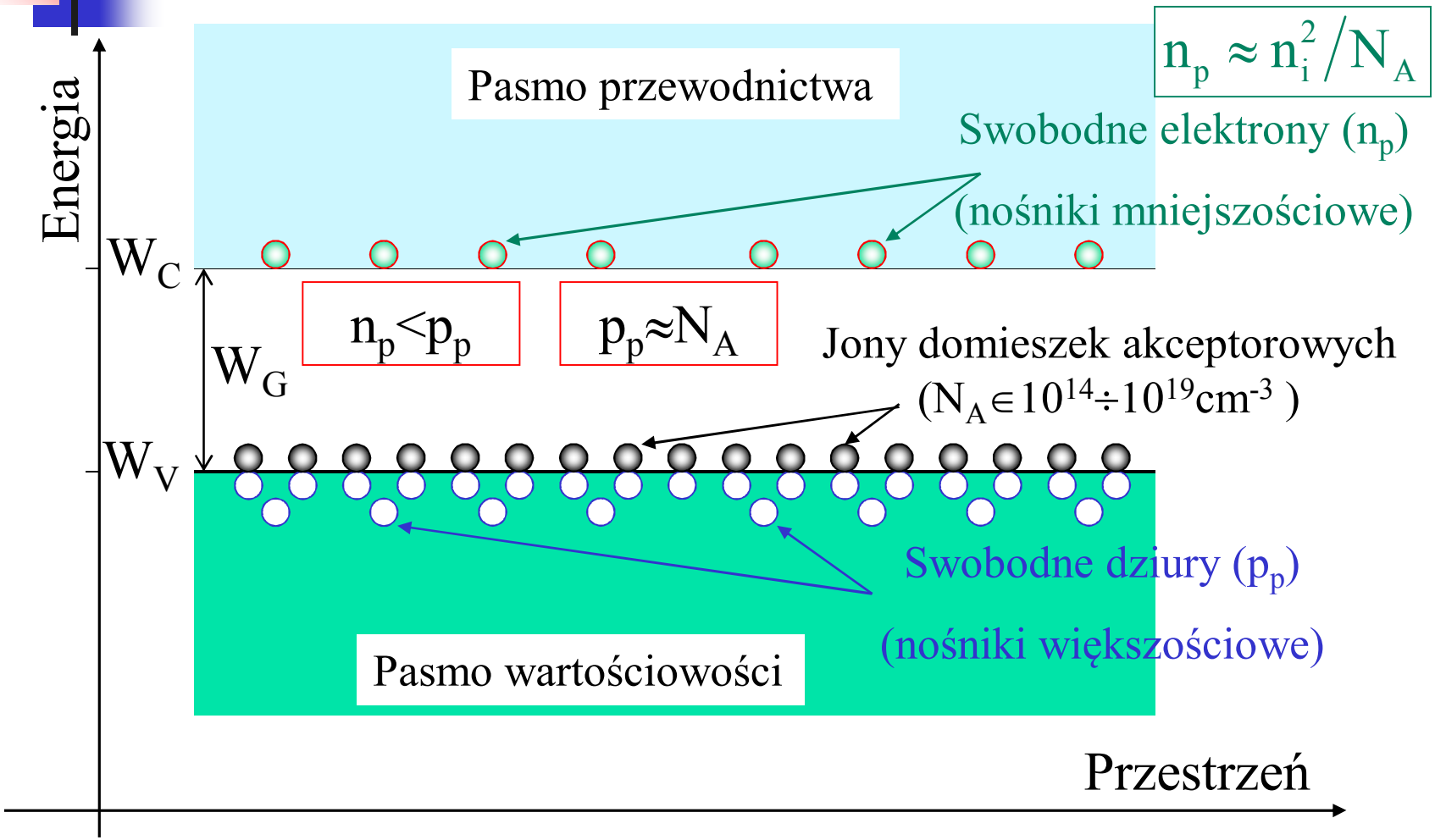


5 elektronów walencyjnych



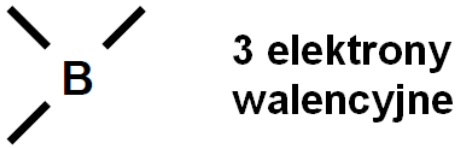
Elektron swobodny już w T>0K

Model pasmowy jednorodnego półprzewodnika akceptorowego



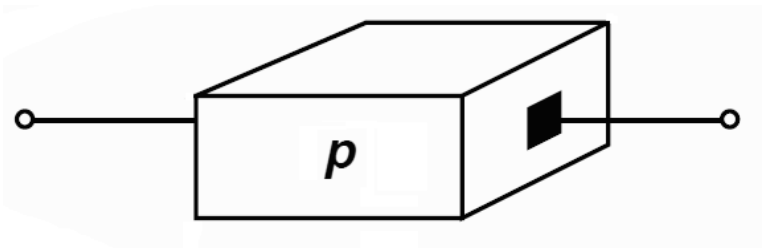
Półprzewodnik akceptorowy (p)

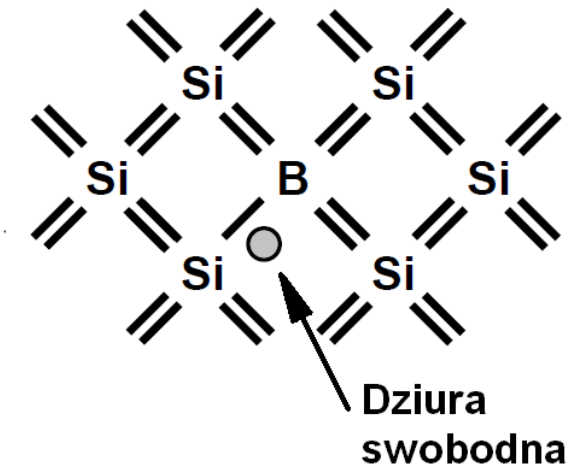
Domieszka akceptorowa – obce atomy o mniejszej wartościowości.



Liczba dziur „swobodnych” jest równa liczbie atomów domieszki.

Powstaje półprzewodnik typu p (positive).





Diody

- prostownicze, - stabilizacyjne (Zenera), fotodiody, - elektroluminescencyjne,
- - pojemnościowe (warikapy)

Diody - klasyfikacje

Rodzaj złącza

- diody p-n
- diody p-i-n
- diody m-s (Schottky'ego)
- diody heterozłączowe

Przeznaczenie

- ogólnego przeznaczenia
- prostownicze
- stabilizacyjne (Zenera)
- pojemnościowe (warikapy)
- przełączające
- optoelektroniczne
- mikrofalowe

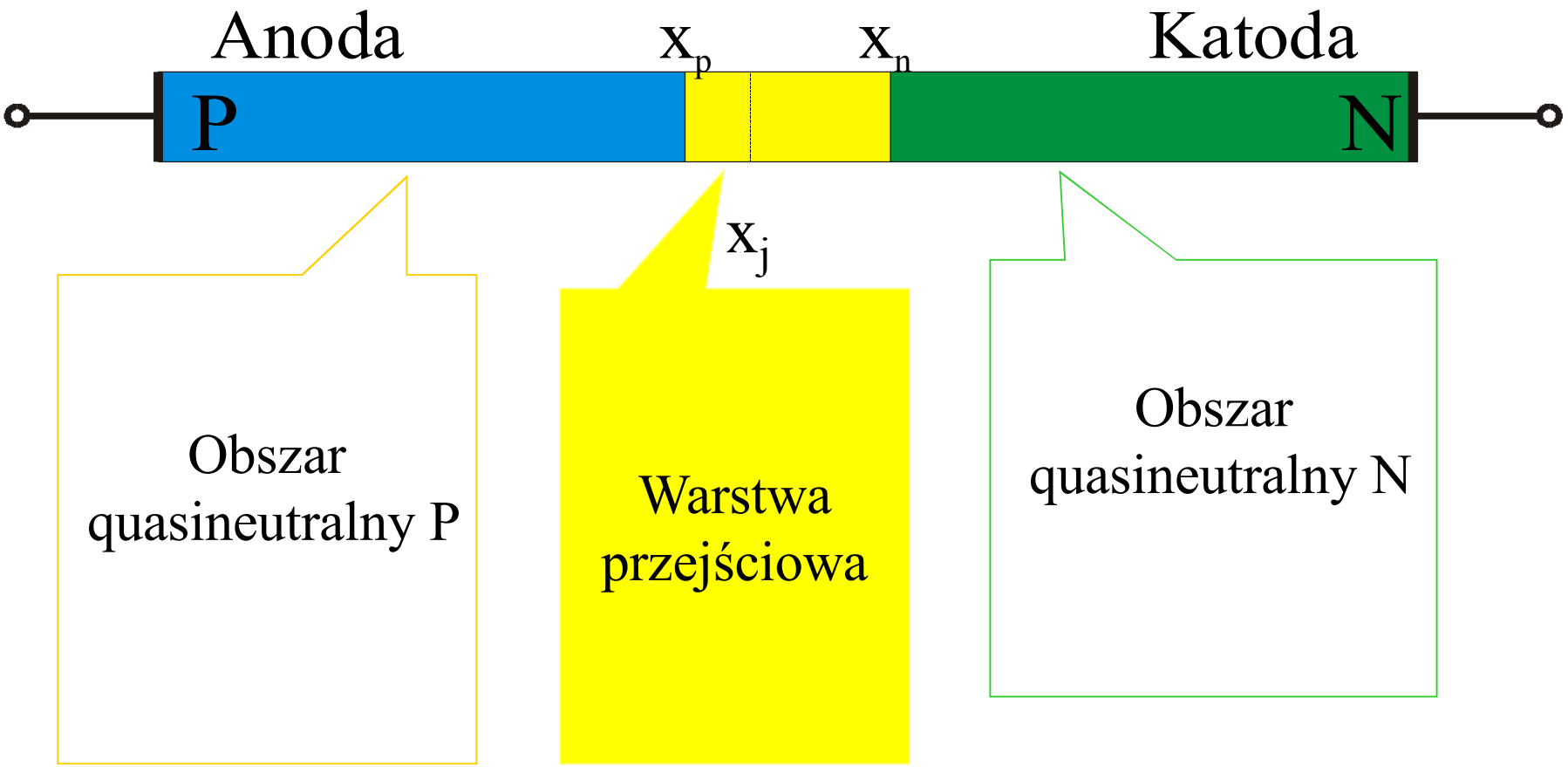
Prostujące złącza półprzewodnikowe

Złącze P-N

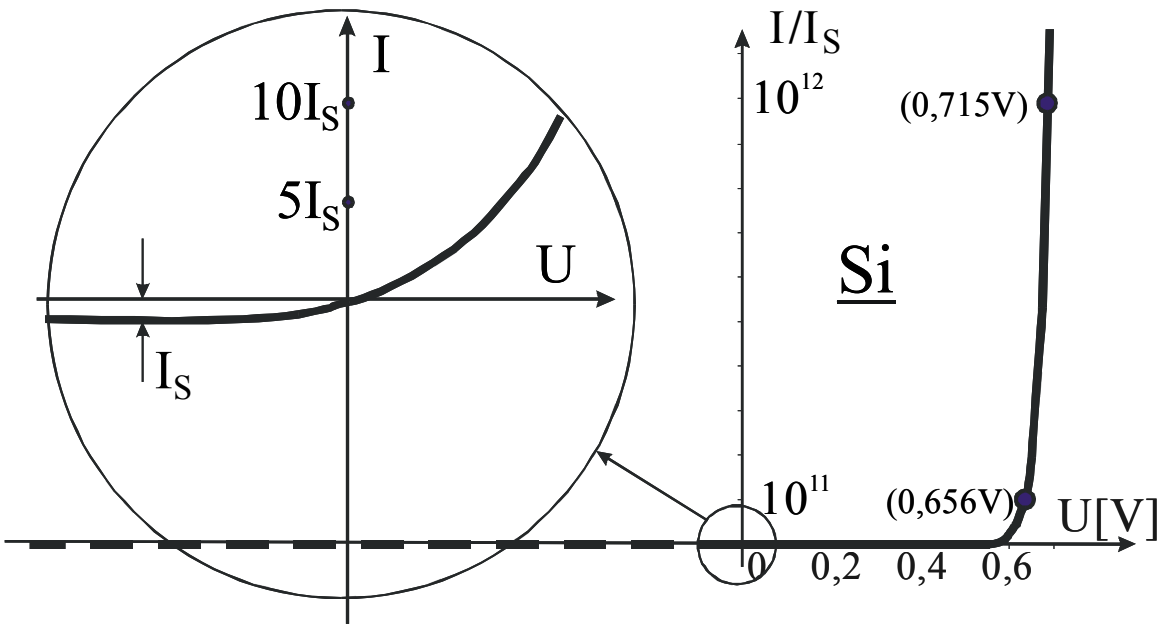
Złącze M-S

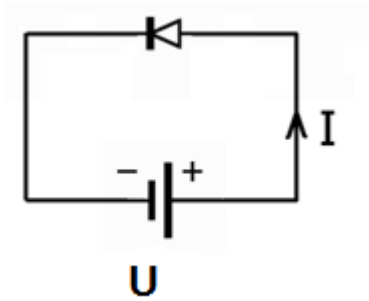
Złącze Schottky'ego

Model idealnego złącza PN



Charakterystyka prądowo-napięciowa idealnego złącza PN



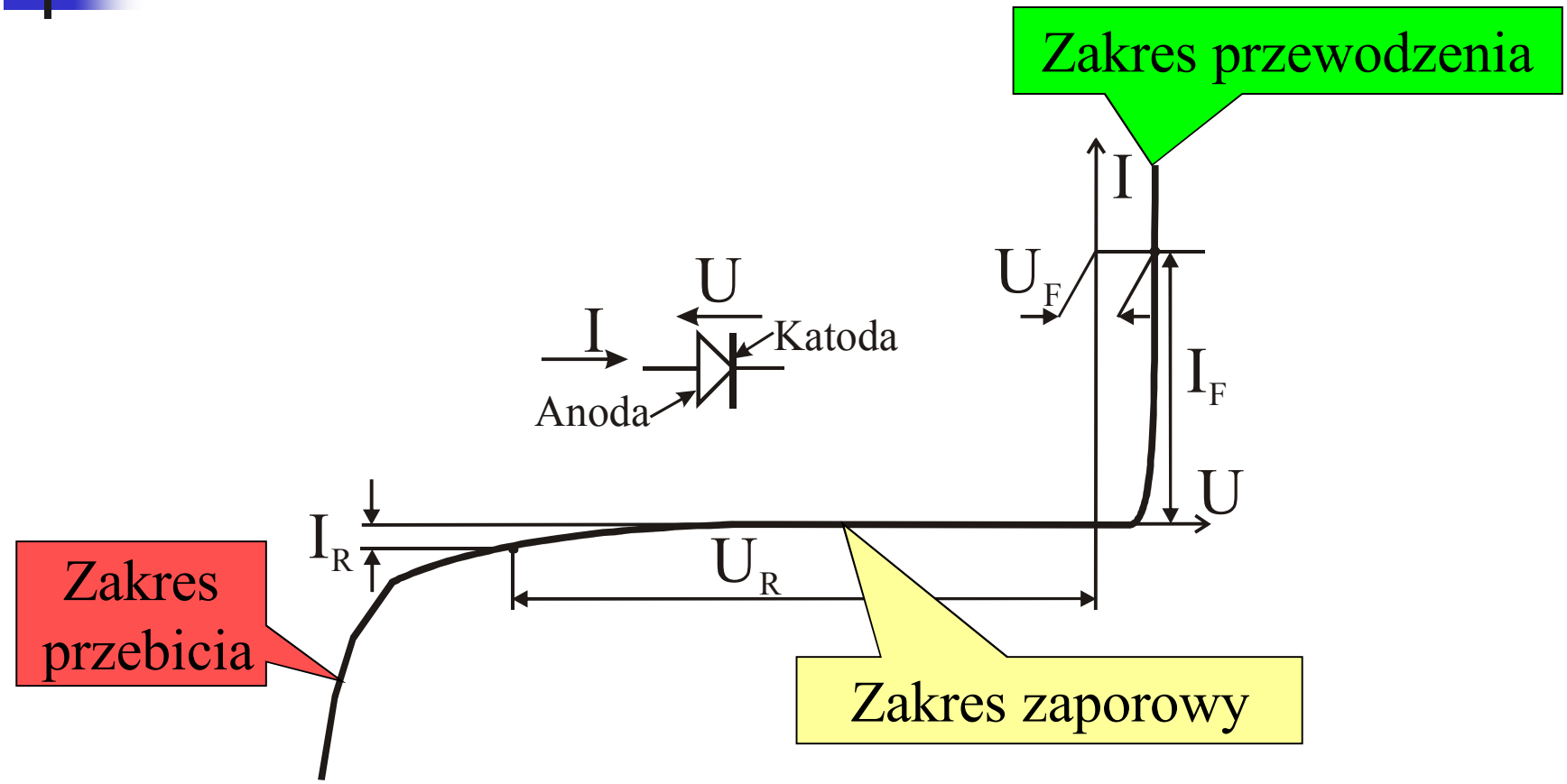


I_S – prąd nasycenia (nA)

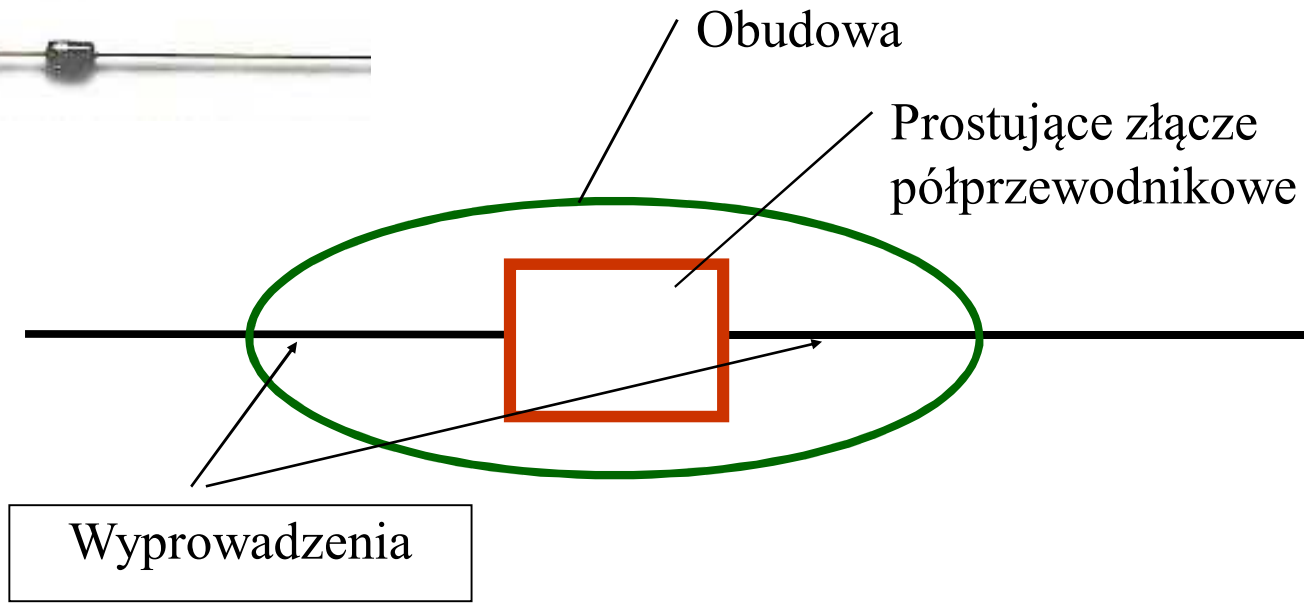
V_T – potencjał elektrotermiczny $V_T = kT/q$
≈ 26 mV dla $T = 300$ K

$$I(U) \approx I_S\left(\exp\left(\frac{U}{V_T}\right)-1\right)$$

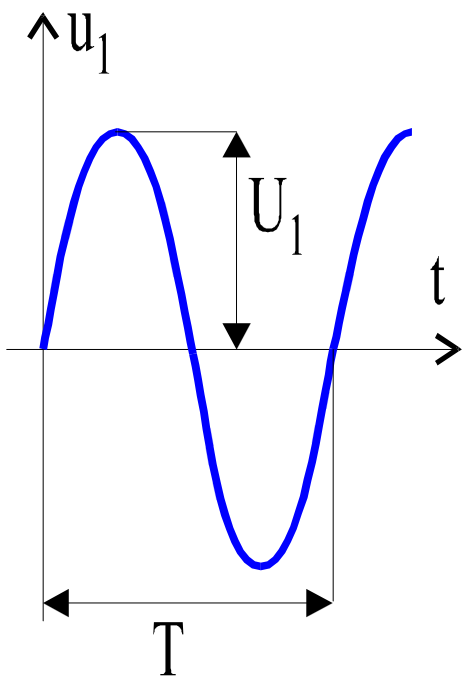
Charakterystyka rzeczywistego złącza PN

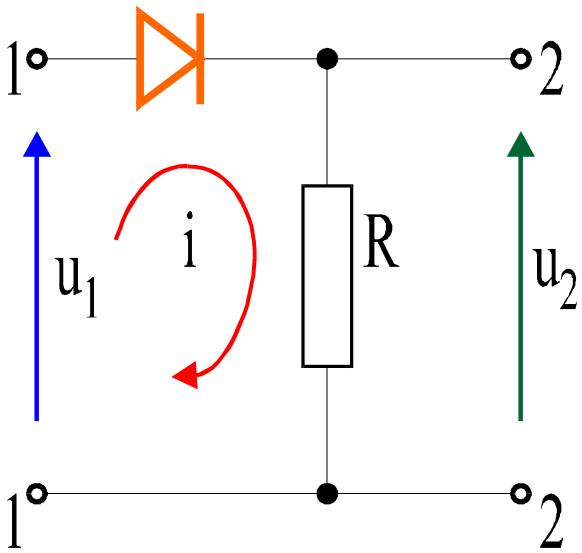


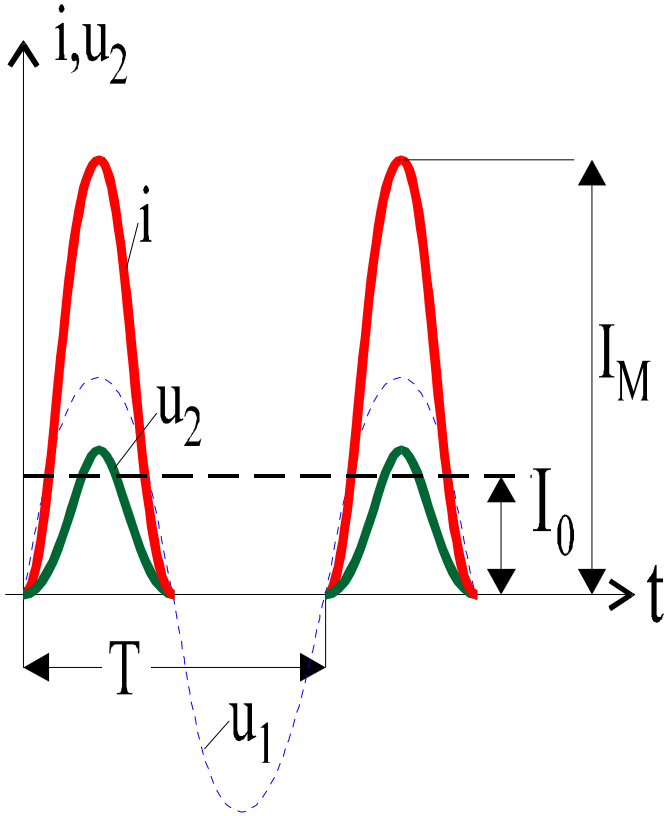
Schemat budowy diody



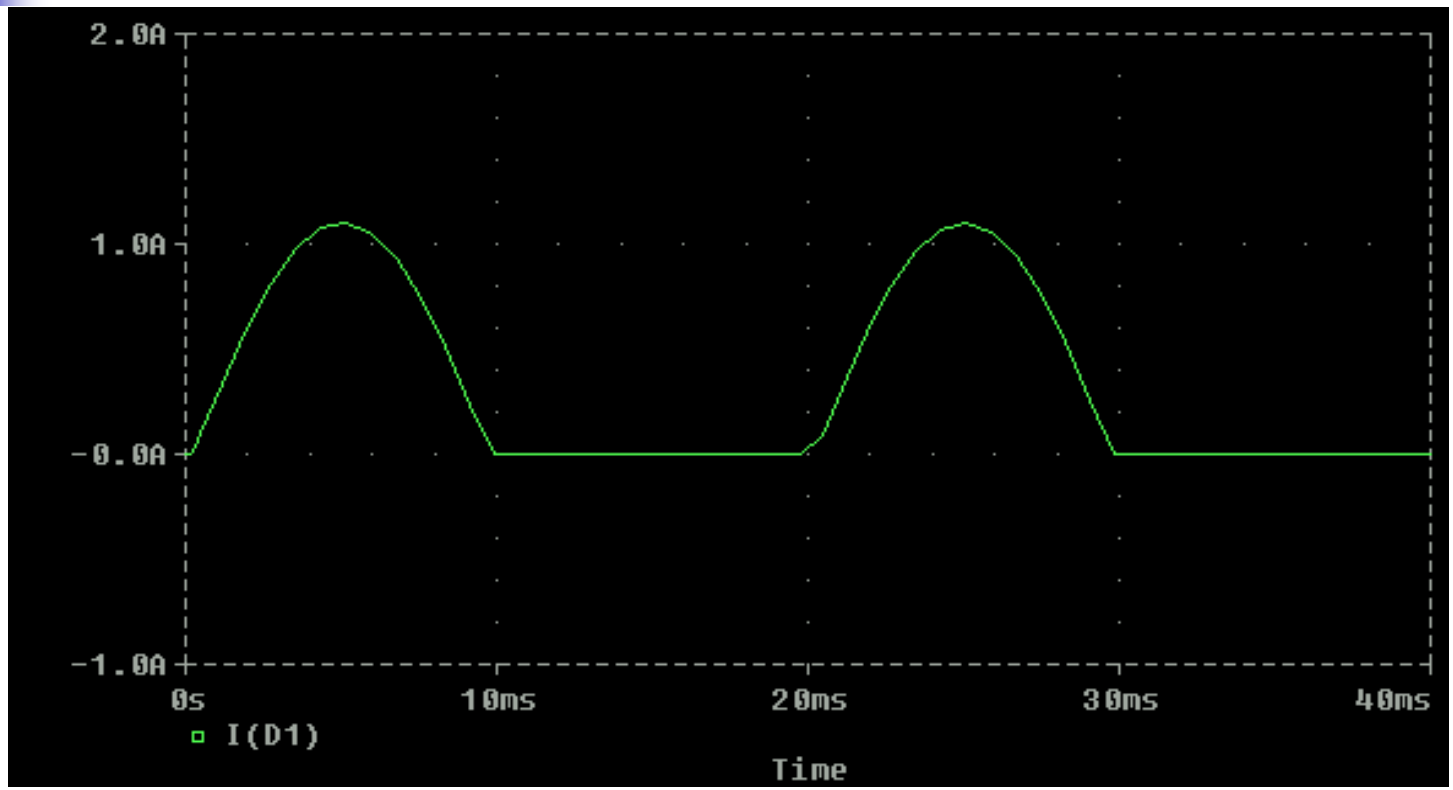
Diody prostownicze
Prostownik jednopołówkowy





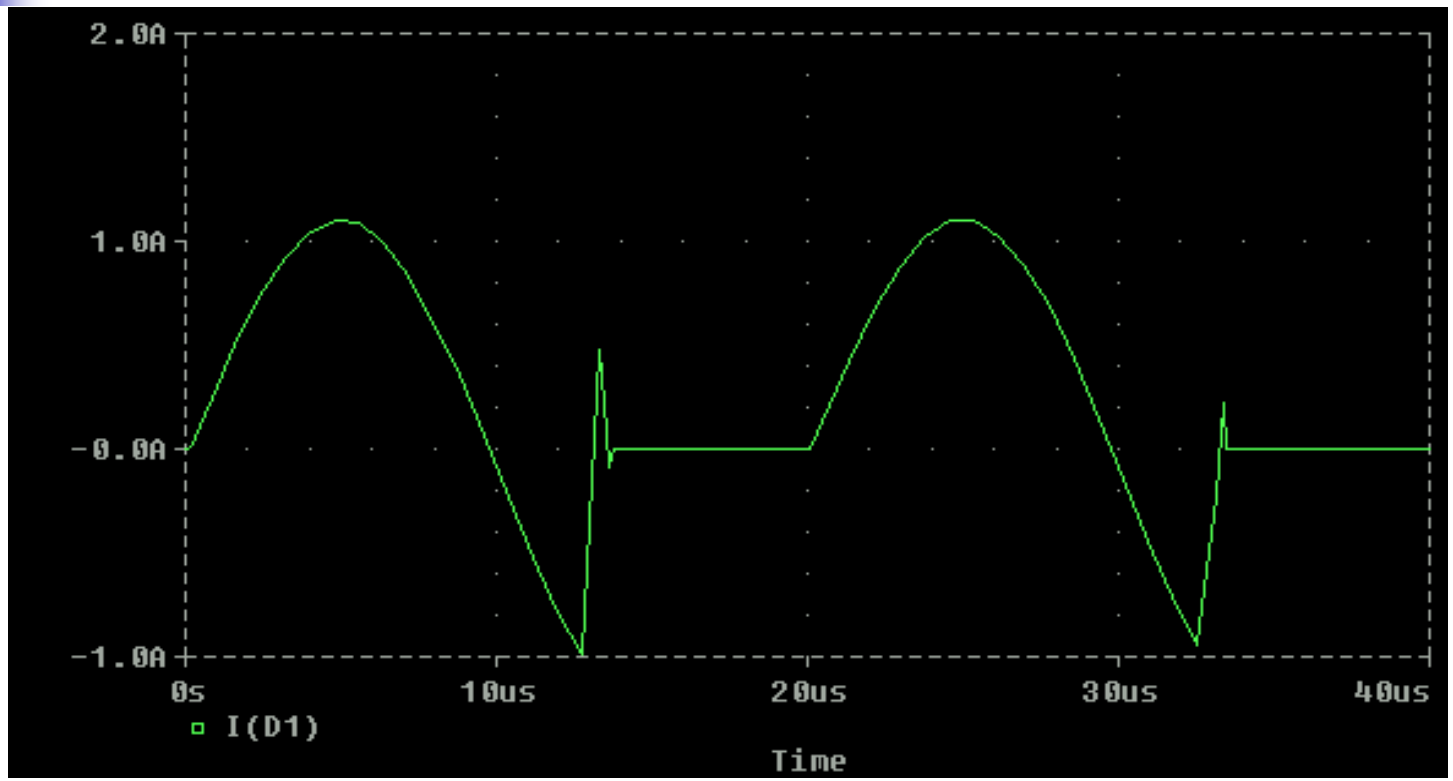


Diody prostownicze
Prostownik jednopołówkowy



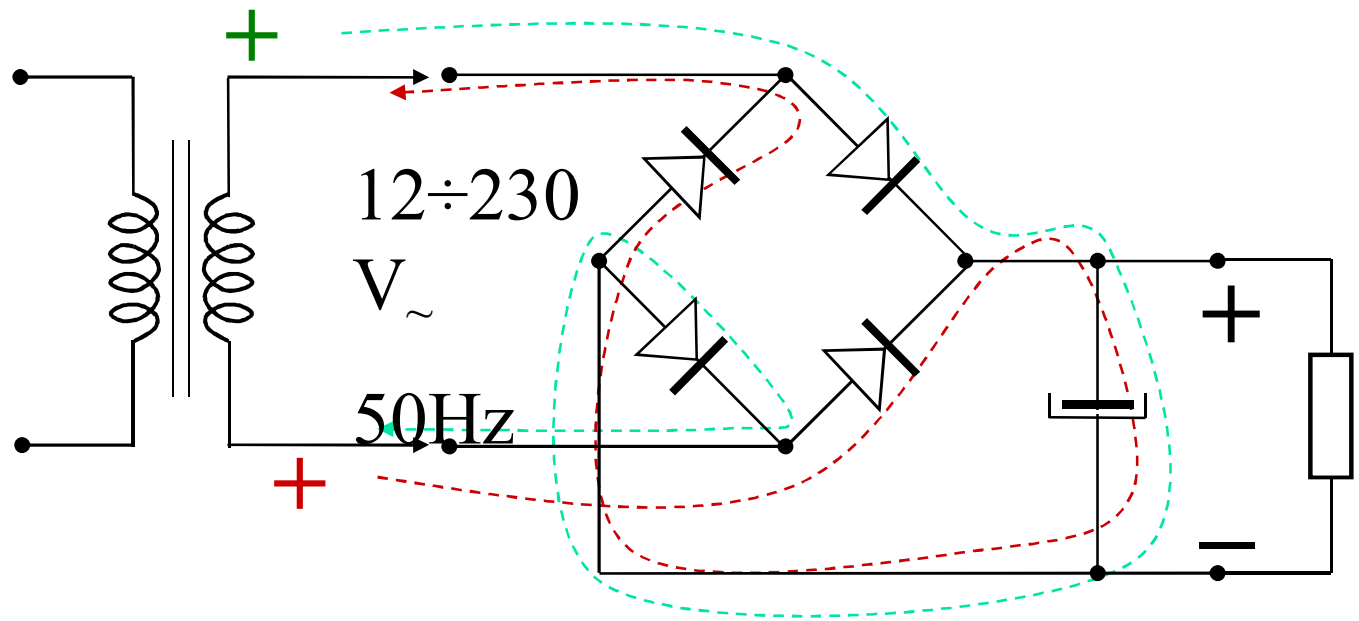
Efekt prostowania jest częściowo zależny od częstotliwości napięcia prostowanego **U_1=12V, 50Hz R=10Ω, dioda 1N4002**

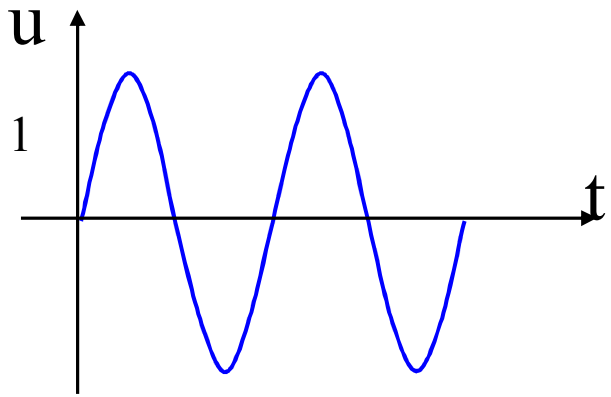
Diody prostownicze
Prostownik jednopołówkowy

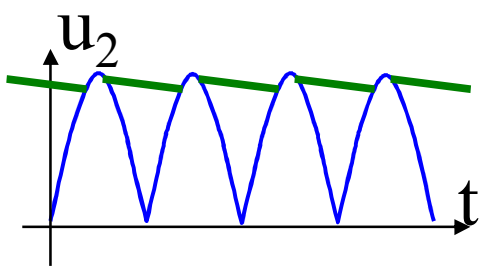


Efekt prostowania jest częściowo zależny od częstotliwości napięcia prostowanego **U_1=12V, 50kHz R=10Ω, dioda 1N4002**

Diody prostownicze
Prostownik mostkowy



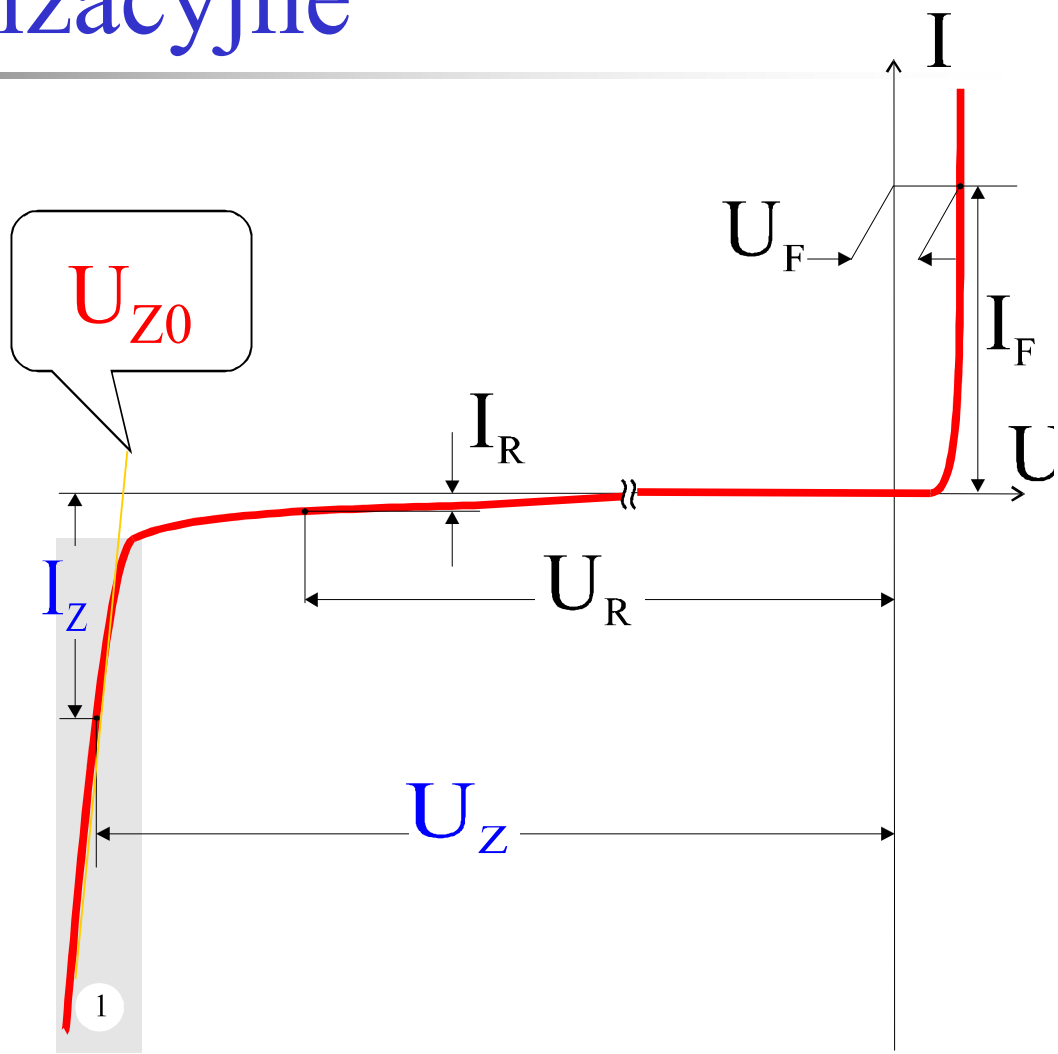




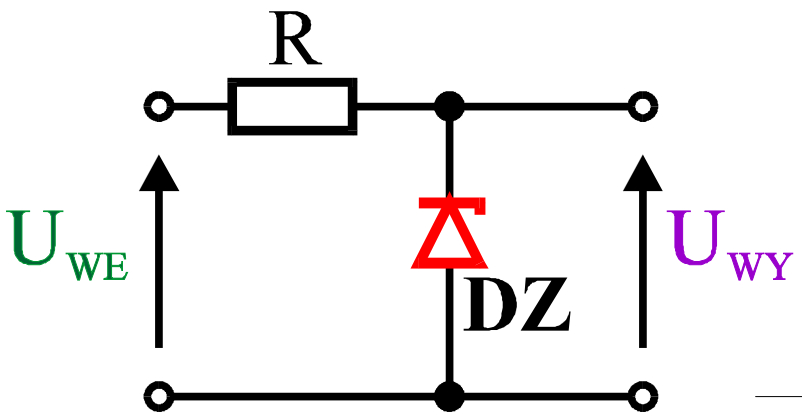
Diody stabilizacyjne

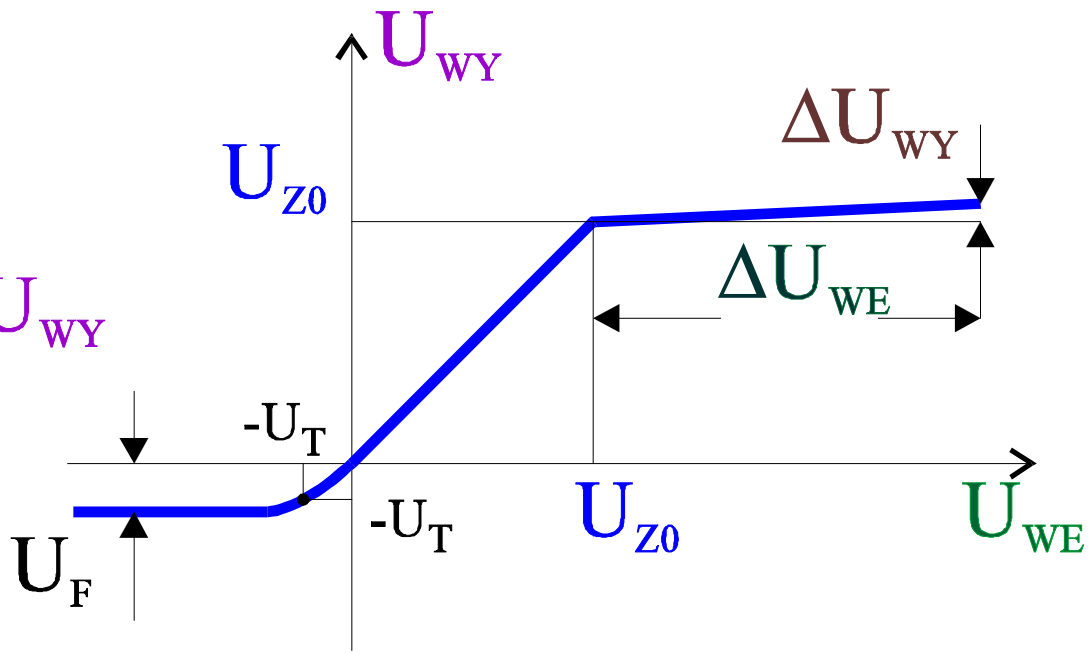
$$r_Z = \frac{\partial U}{\partial I}\Big|_{I=-I_Z}$$

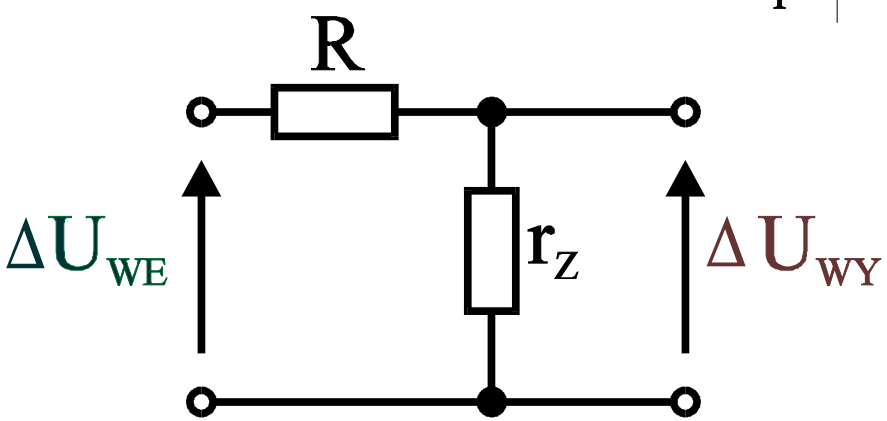
$$P_{max} = U_Z \cdot I_{Zmax}$$



Elementarny stabilizator napięcia



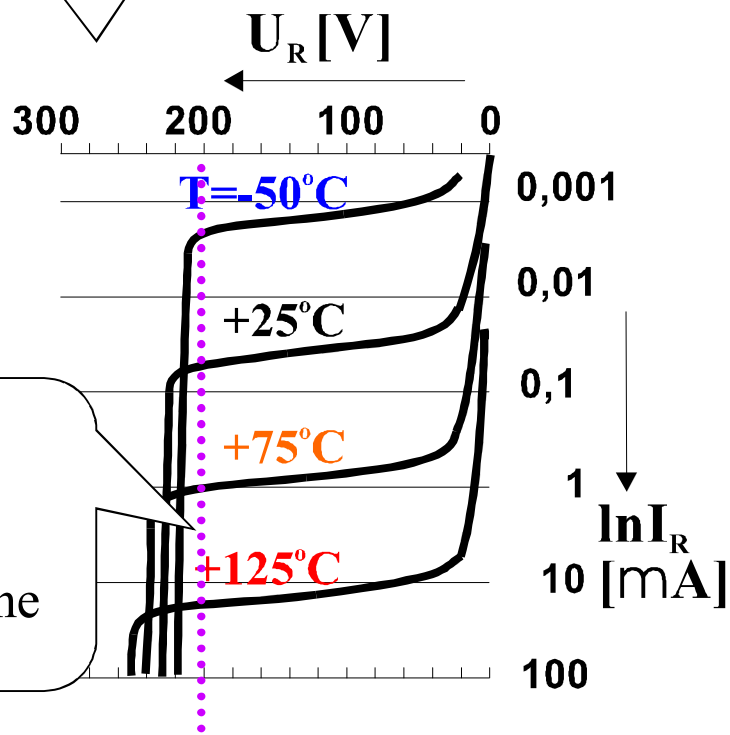




$$\Delta U_{WY} = \Delta U_{WE} \cdot \frac{r_Z}{r_Z + R}$$

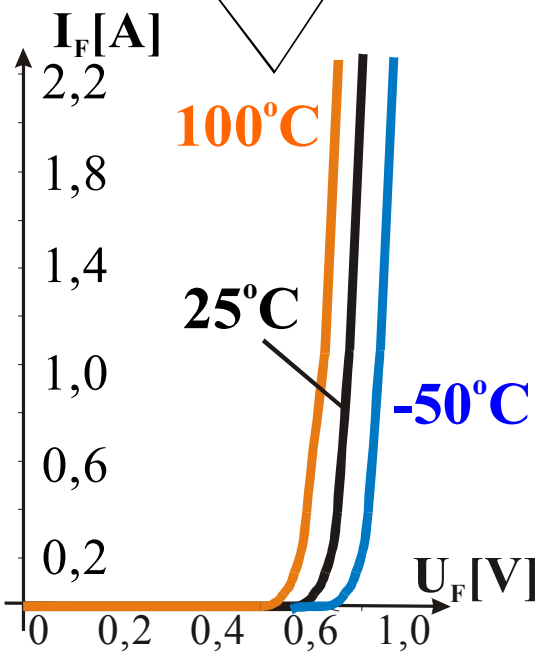
Wpływ temperatury na przewodzenie złącza PN

Charakterystyki wsteczne



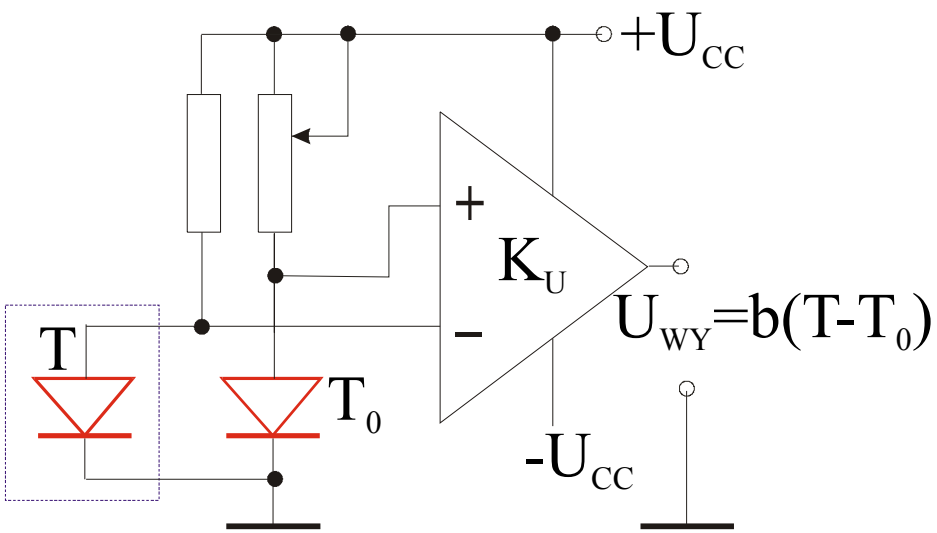
Maksymalne dopuszczalne napięcie wsteczne

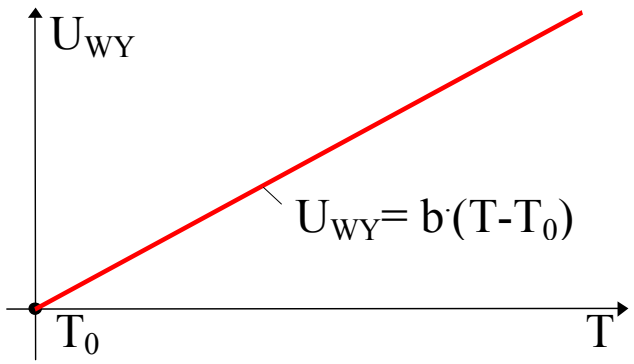
Charakterystyki przewodzenia



$$\left.\frac{\partial U}{\partial T}\right|_{I=const} \approx -2mV/K$$

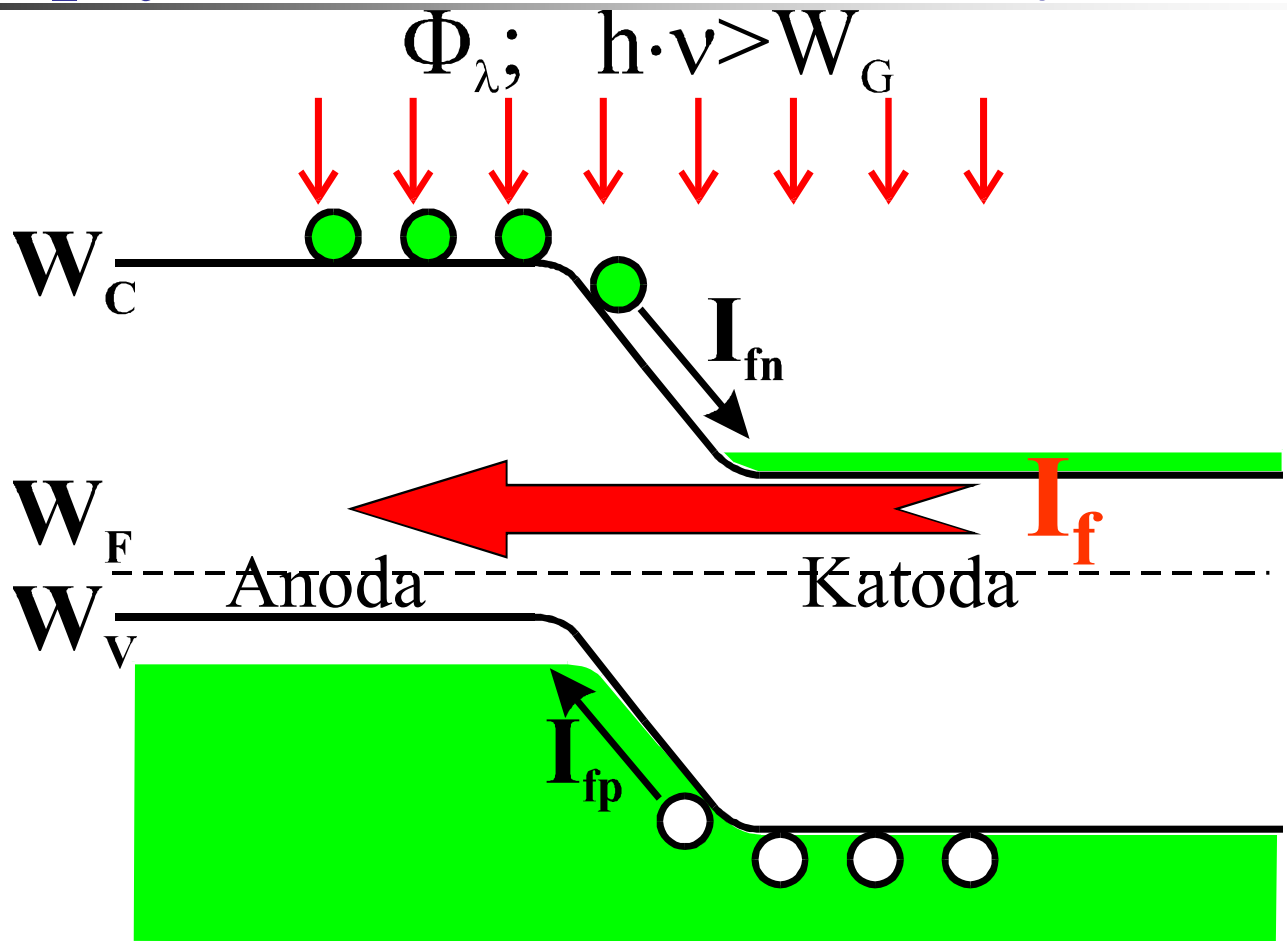
Termometr diodowy



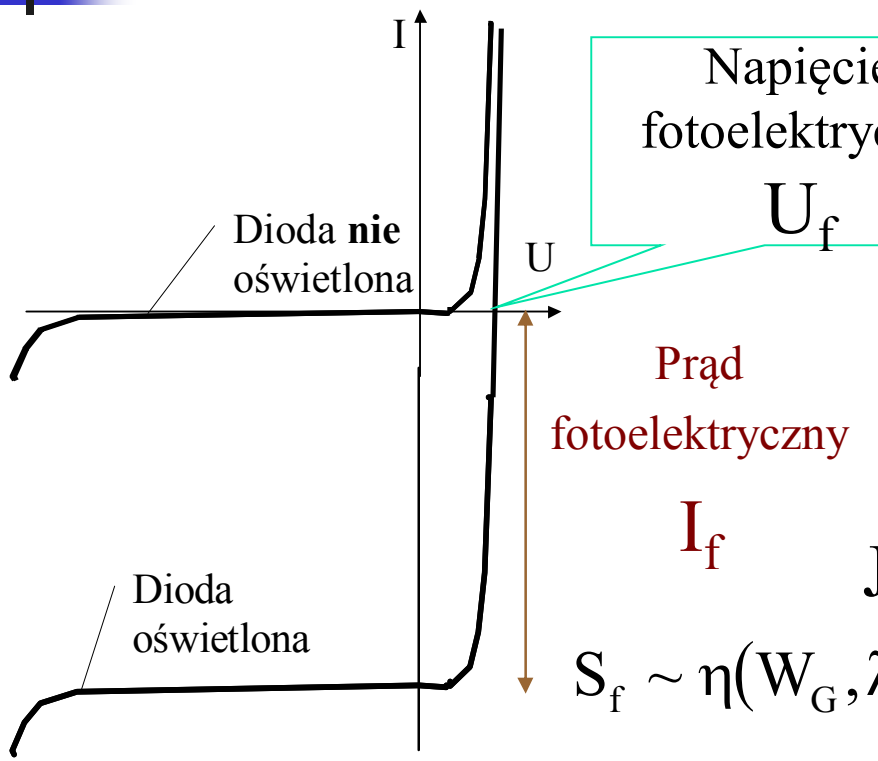


$$b = |k_{TUF}| K_U; \quad k_{TUF} \approx -2\,\mathrm{mV/^oC}$$

Wpływ oświetlenia na złącze PN



Charakterystyki I(U) fotodiody



$$I = I_S\left(\exp\frac{U}{V_T} - 1\right) - I_f$$

$$I(U) = I_{Dzw}(U) - I_f$$

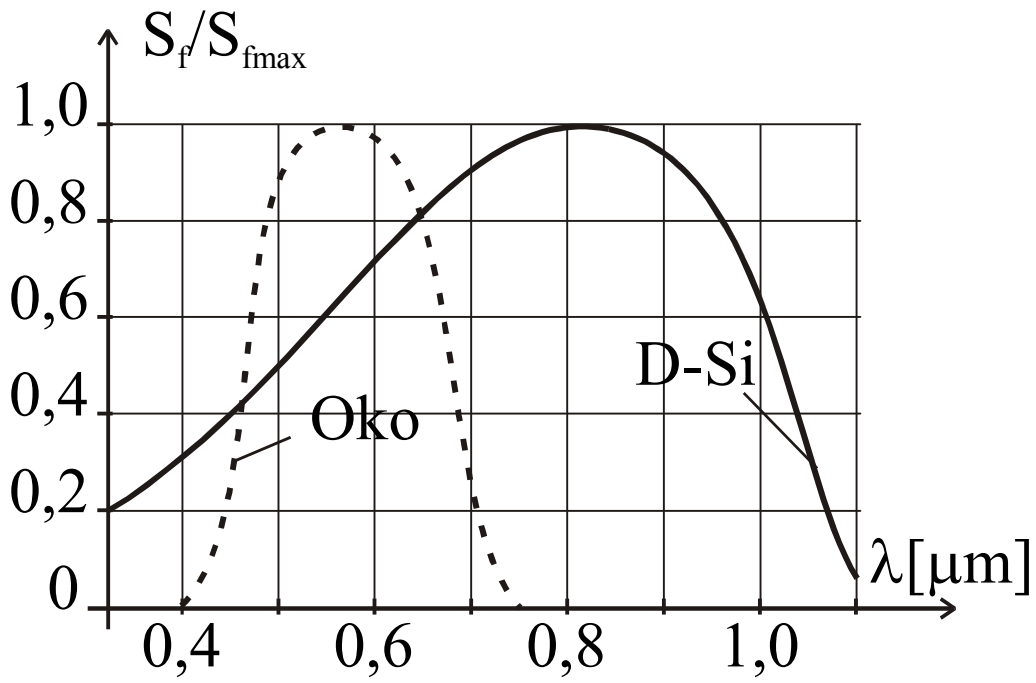
$$\boxed{I_f = S_f \cdot J_f}$$

J_f – natężenie promieniowania

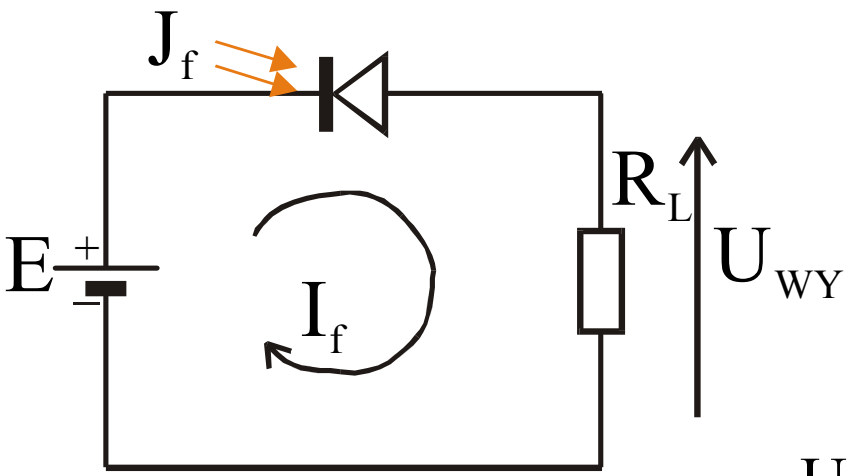
$$S_f \sim \eta(W_G,\lambda)\cdot\gamma(wyk,\lambda)\cdot e^{-\gamma x_j}\left[1 - R(wyk,\lambda)\right]$$

η - wydajność kwantowa fotonów, γ,R - współczynniki pochłaniania i odbicia promieniowania, x_j - głębokość złącza.

Charakterystyka widmowa fotodiody



Układ pracy fotodiody jako nieliniowego „fotorezystora”

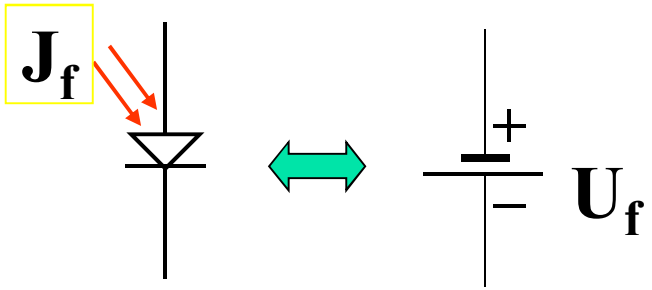


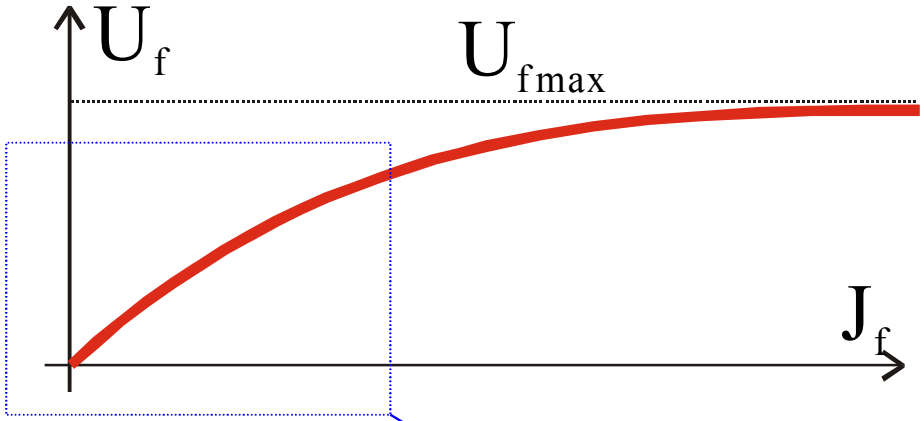
$$U_{WY} = R_L I_f = R_L S_f J_f$$

$$U_{WY} \in 0 \div E$$

Fotodioda jako ogniwo fotoelektryczne

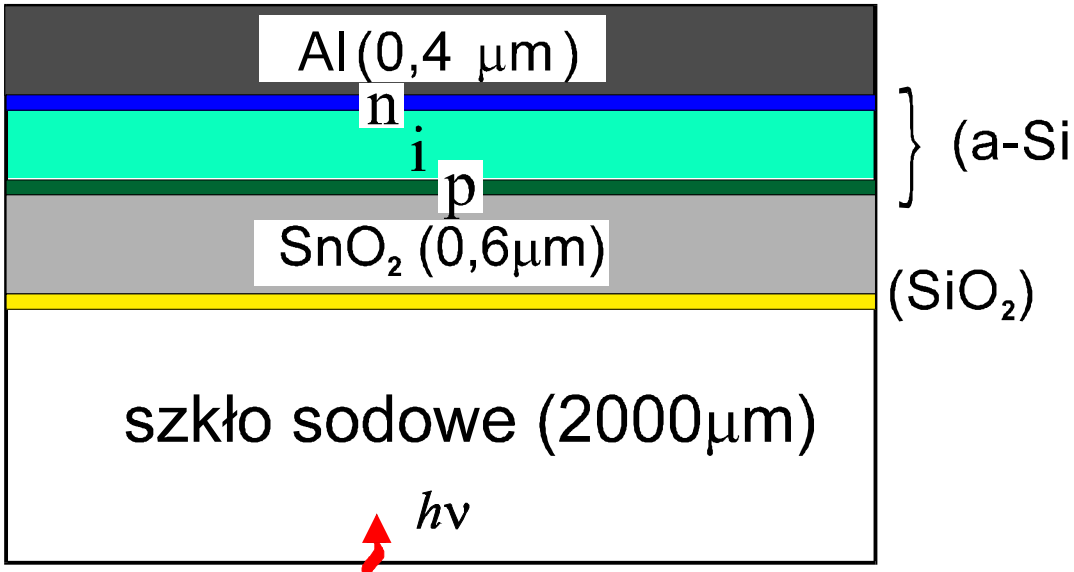
$$U_f = V_T \ln \frac{I_S + I_f}{I_S} \approx V_T \ln \frac{I_f}{I_S}$$

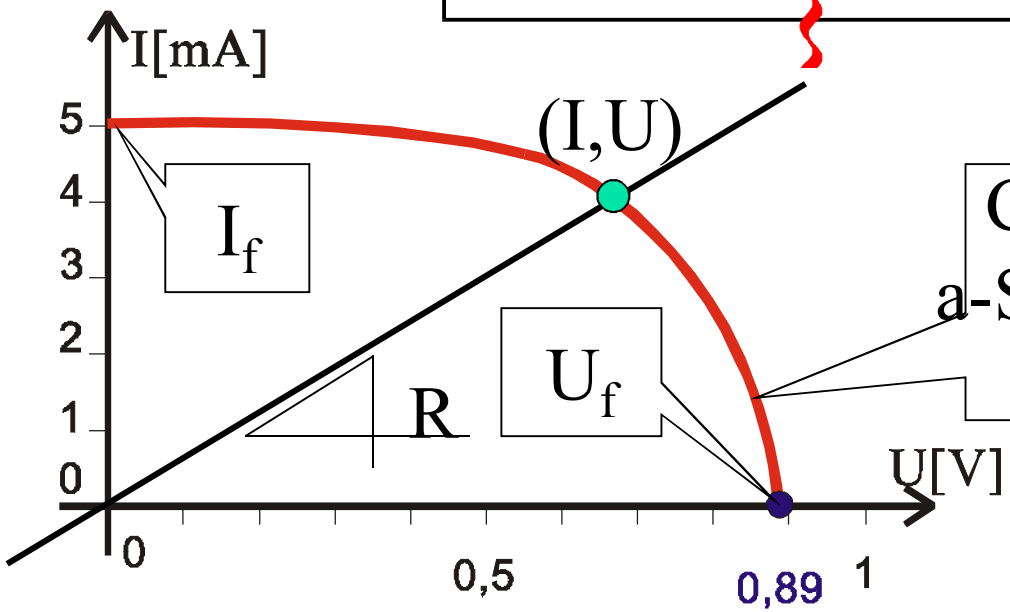




$$U_{f\,max} = V_j$$

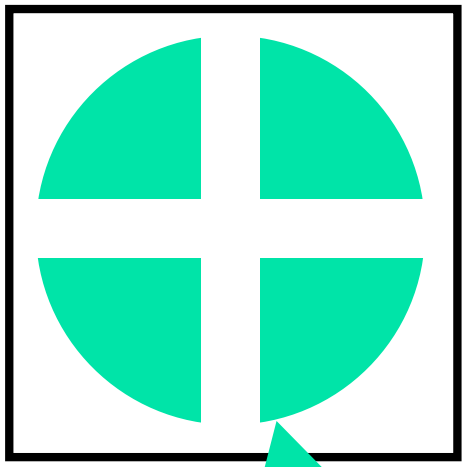
$$U_f \sim \ln \frac{I_f}{I_S} \sim \ln \frac{S_f J_f}{I_S}$$



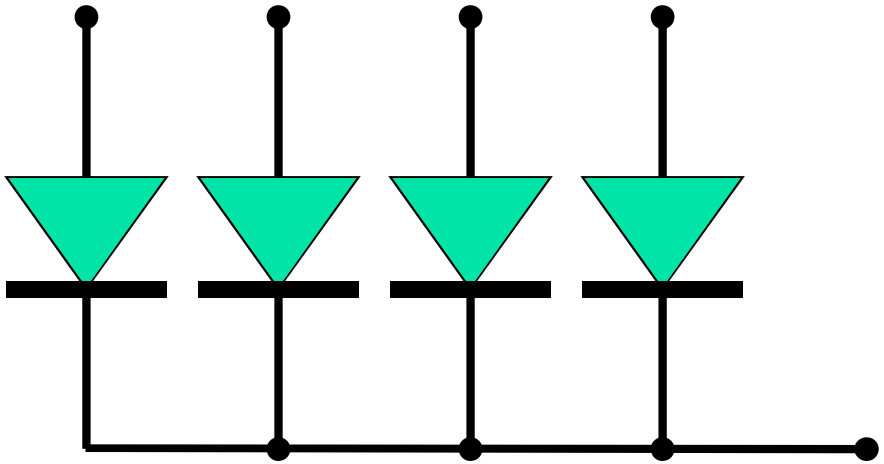


Charakterystyka ogniwa a-Si o powierzchni 0,25cm^2 przy oświetleniu 1**sun**

Fotodioda kwadrantowa

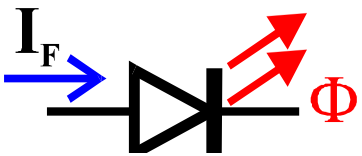


Powierzchnia światłoczuła



Stosuje się do detekcji położenia plamki świetlnej.

Diody elektroluminescencyjne



$\Phi \sim I_F$

GaAs - promieniowanie podczerwone,

$GaAs_{1-x}P_x$ na GaAs - światło czerwone lub bursztynowe,

$GaAs_{1-x}P_x$ na GaP - światło czerwone lub pomarańczowe,

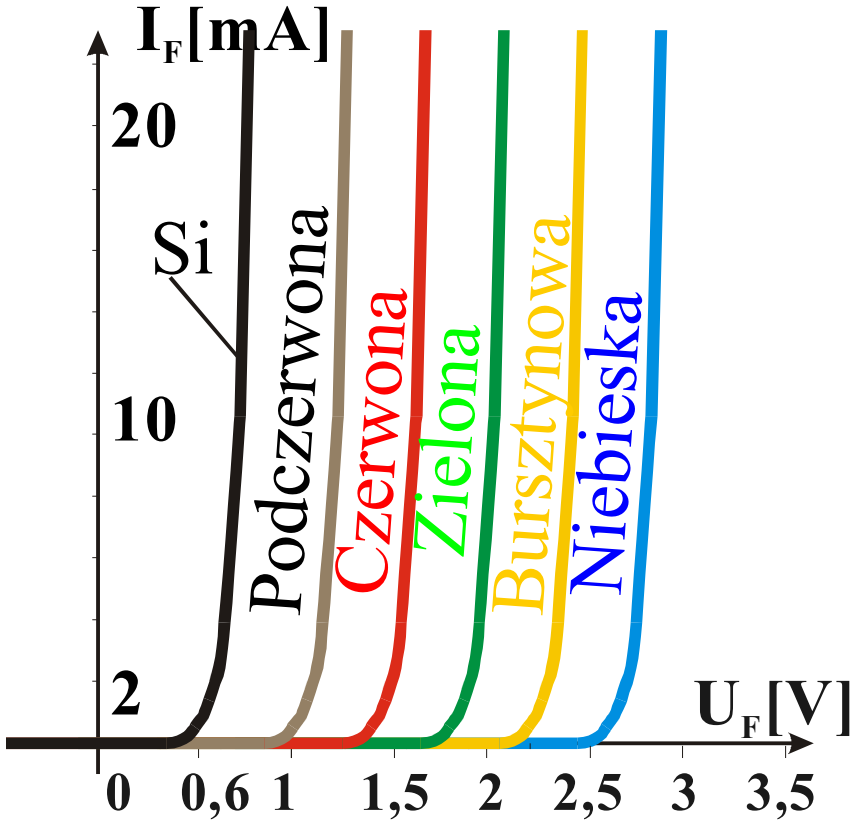
GaP - światło zielone lub czerwone lub żółte,

SiC, GaN - światło niebieskie,

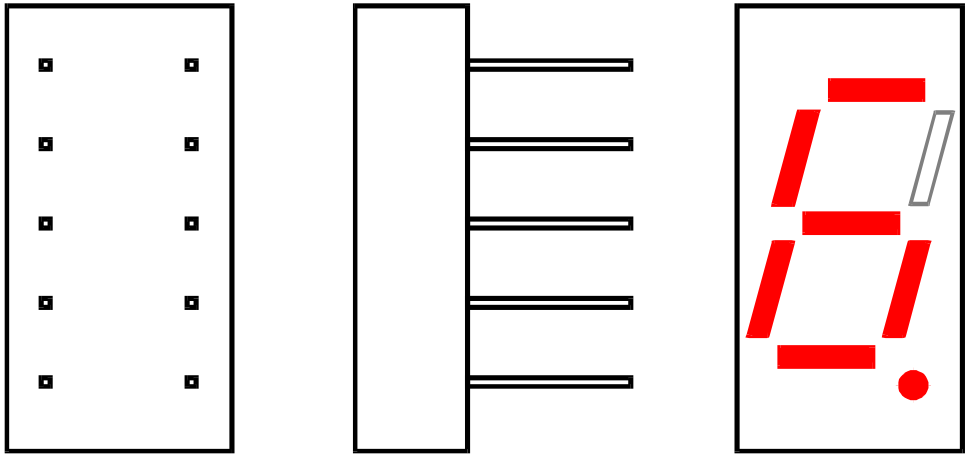
InGaN - światło zielone lub niebieskie,

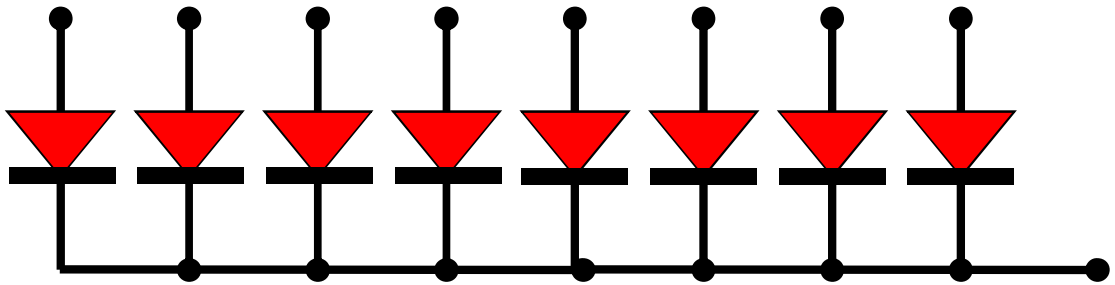
GaN pokryte warstwą fluoryzującego fosforu - światło białe.

Charakterystyki I(U)

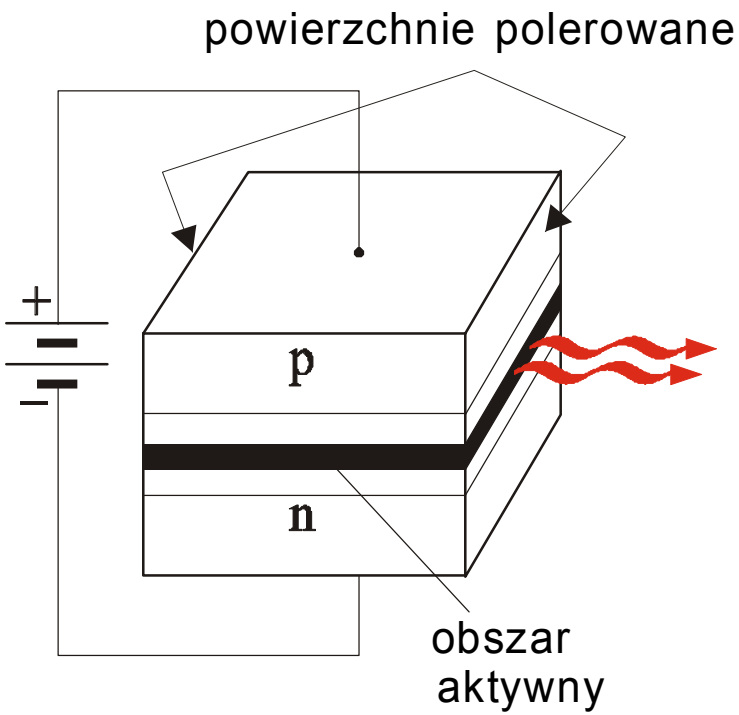


Wskaźnik α-numeryczny 7 segmentowy z kropką





Laser półprzewodnikowy (krawędziowy)



Pojemność barierowa złącza PN

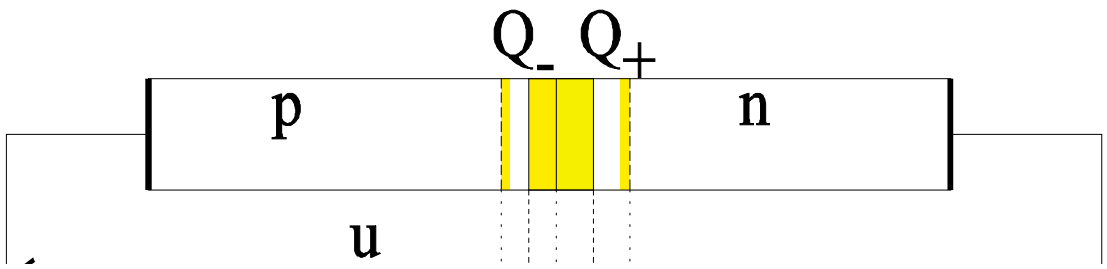
$$x_n - x_p = d$$

$$d \sim \sqrt{(V_j - u)}$$

$$\Delta Q_+ = -\Delta Q_- = \Delta Q_b$$

$$C_j = \frac{dQ_b}{du}$$

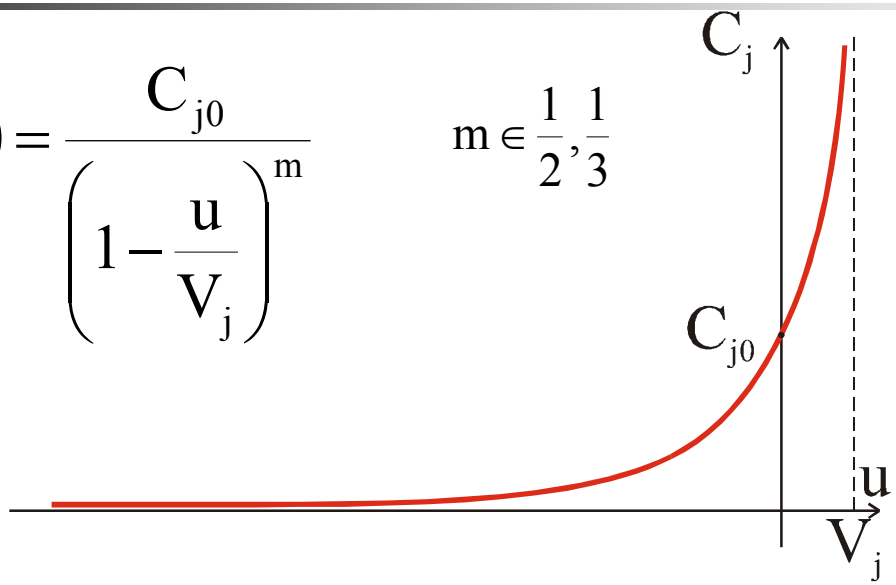
$$C_j = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot S}{d(u)}$$

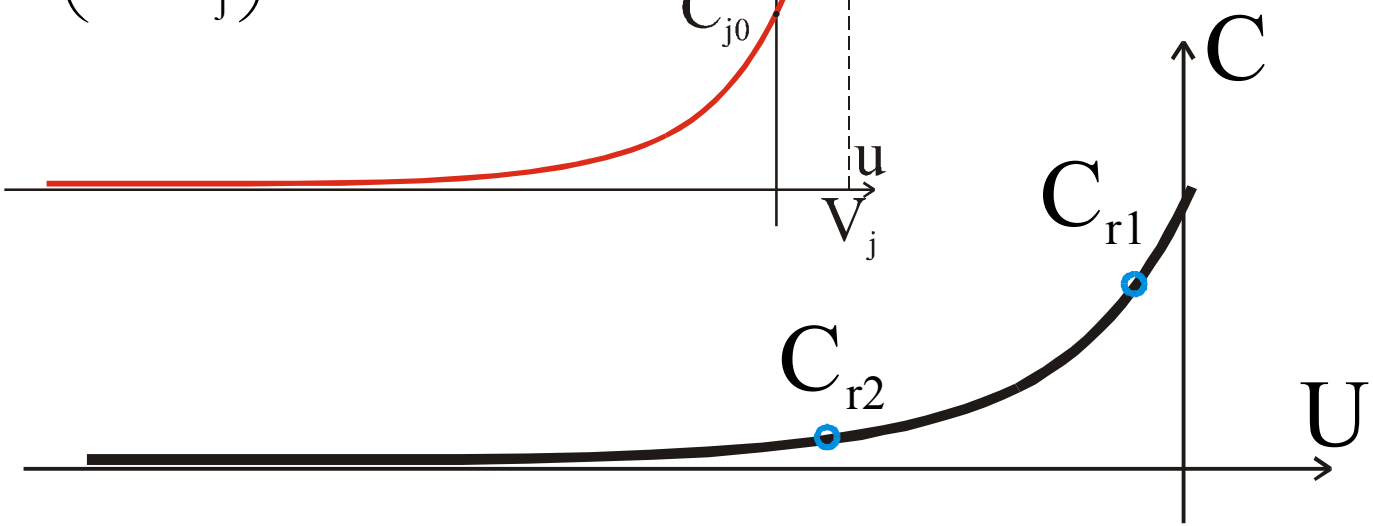


Diody pojemnościowe

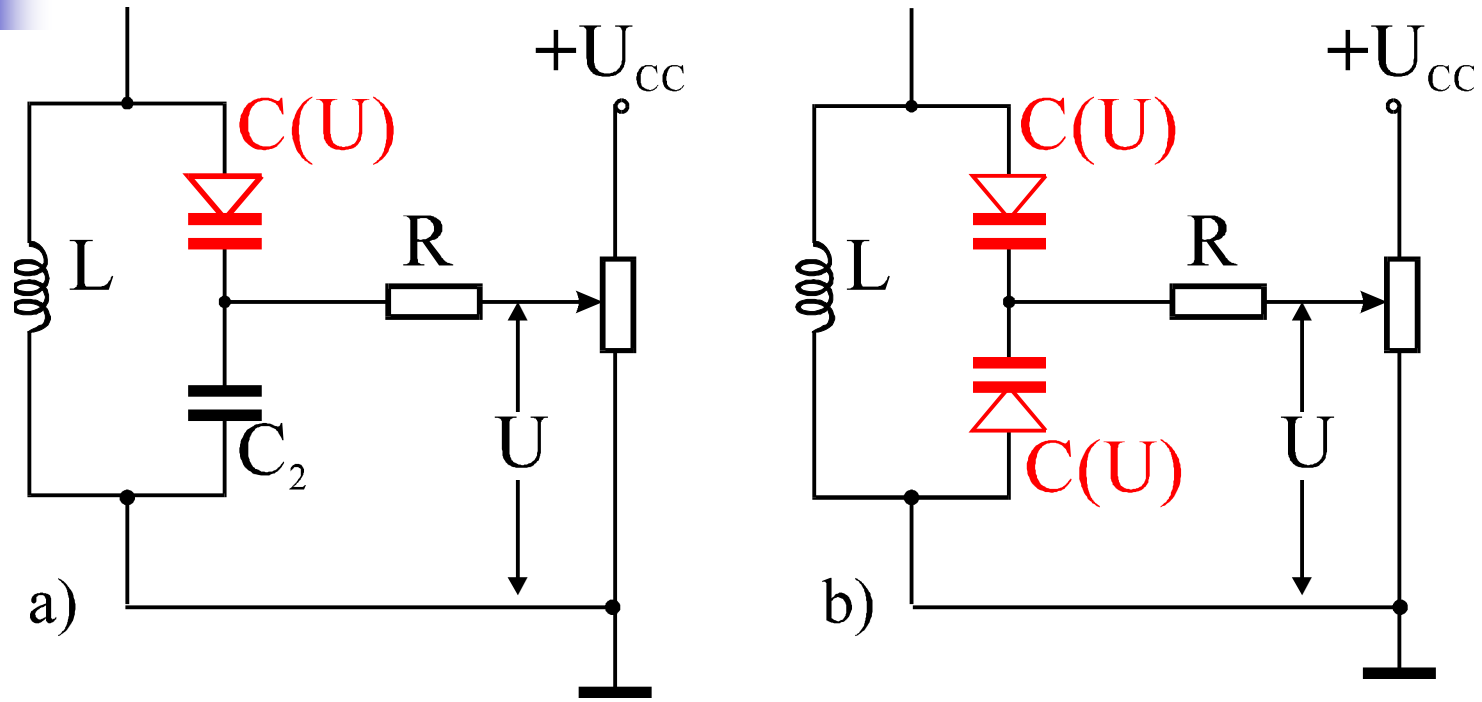
$$C_j(u) = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{u}{V_j}\right)^m}$$

$$m \in \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$$





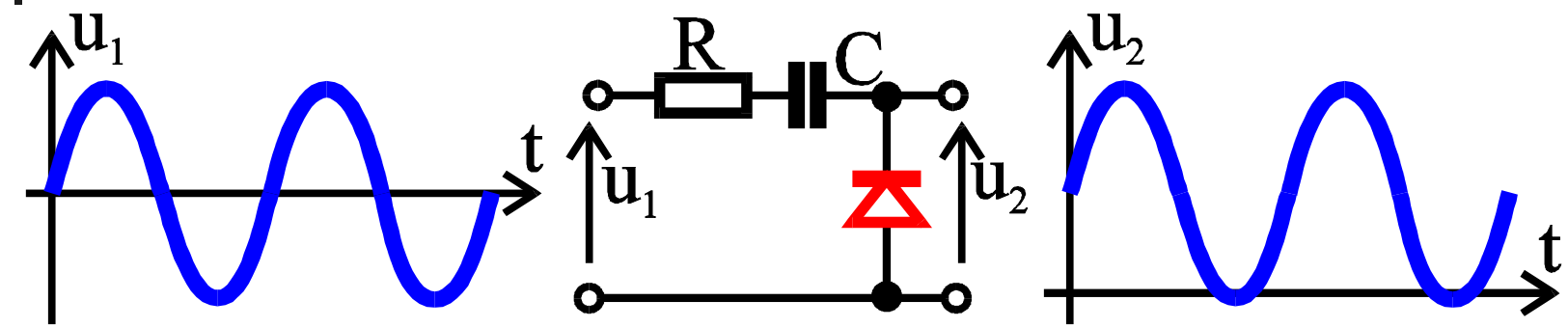
Obwody rezonansowe przestrajane diodą pojemnościową



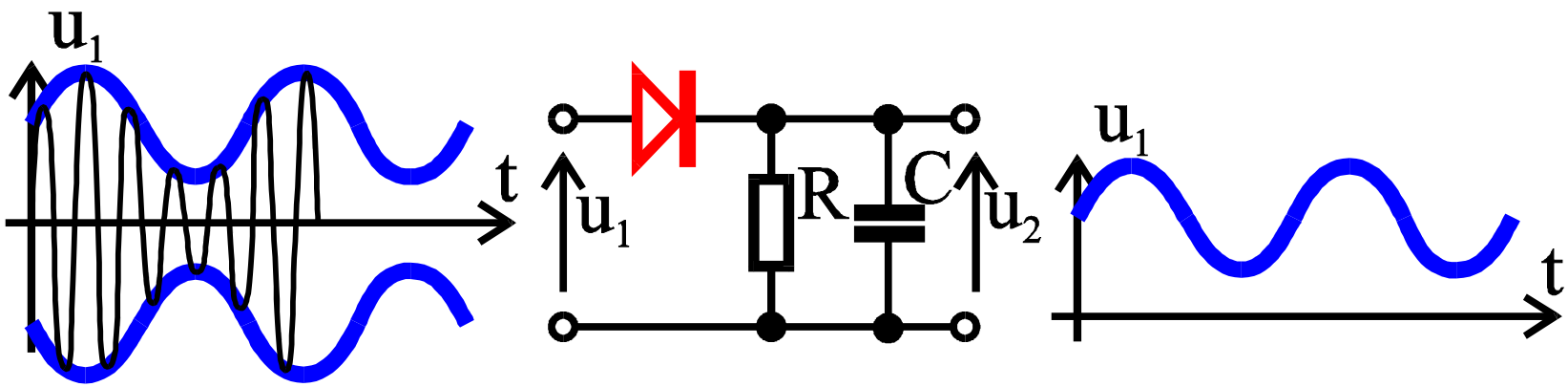
$$f_a \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C(U)}}$$

$$f_b = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot \frac{1}{2} C(U)}}$$

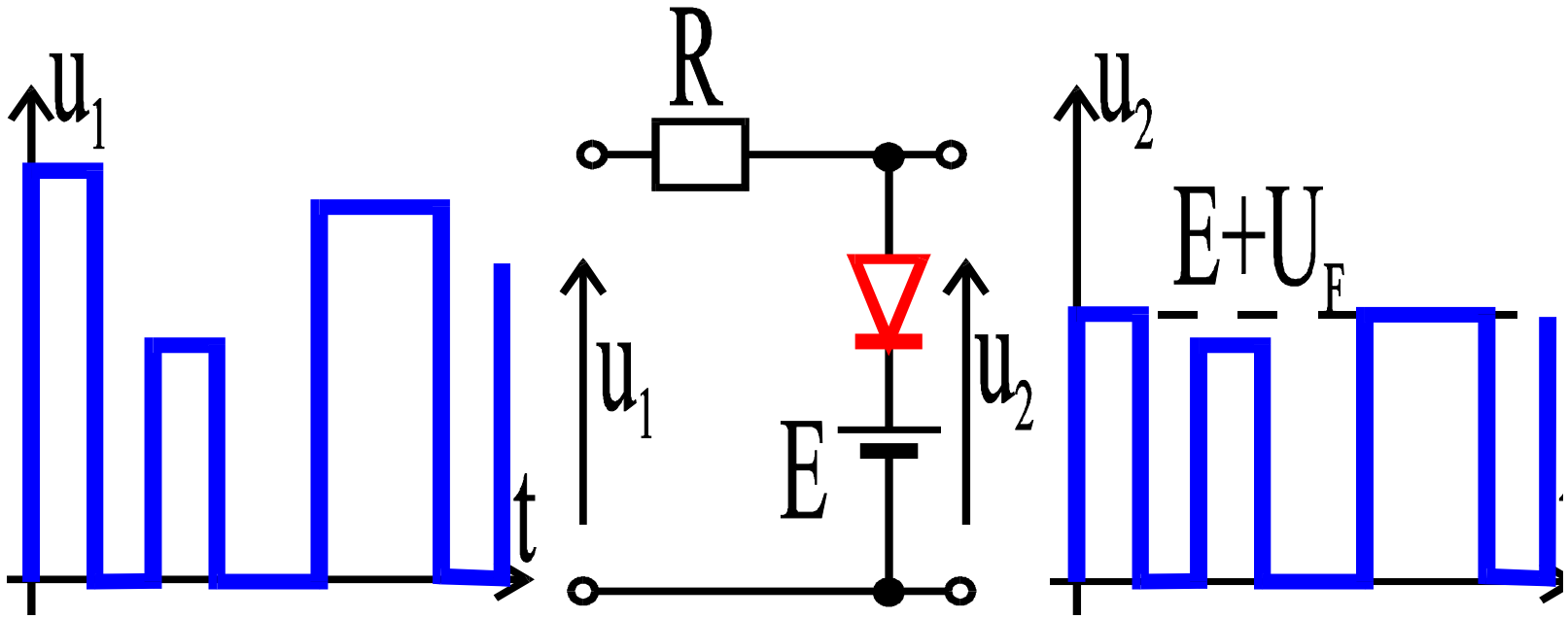
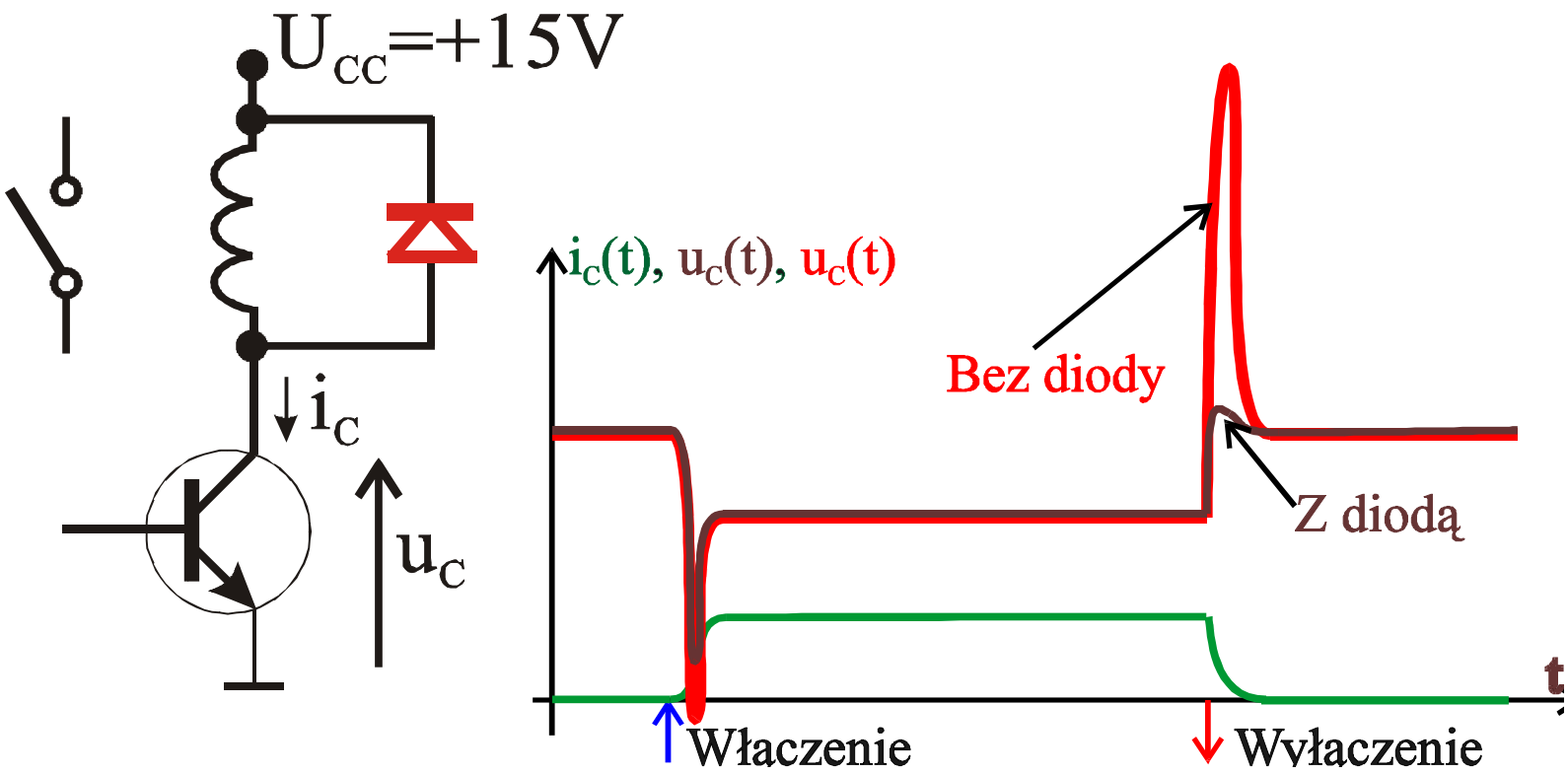
Układ przylegania



Detektor szczytowy



Ogranicznik poziomu



Układ wygaszania przepięcia induktora