

Podstawy Elektroniki

Prowadzący:

Prof. dr hab. Zbigniew Lisik

Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych
i Optoelektronicznych

pokój: 116

e-mail: zbigniew.lisik@p.lodz.pl

Program:

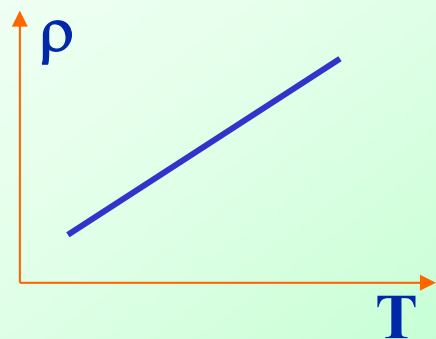
wykład - 15h

laboratorium - 15h

wizyta w laboratorium technologicznym - 4h

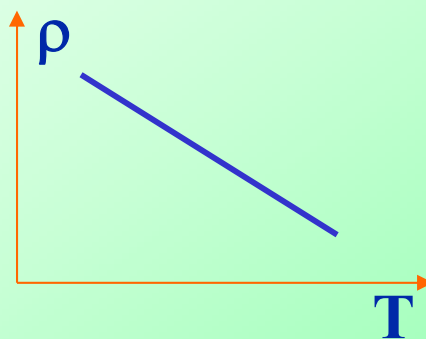
Materiały półprzewodnikowe

Metal



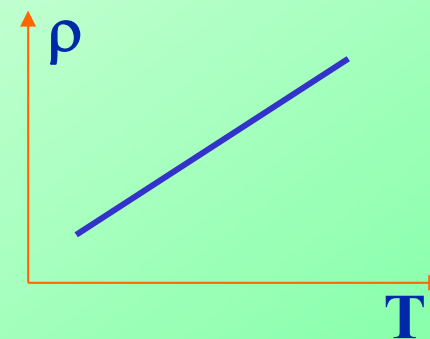
$\rho \downarrow \downarrow$

Półprzewodnik



$\rho \uparrow \downarrow$

Izolator



$\rho \uparrow \uparrow$

Materiały półprzewodnikowe

Podstawowe półprzewodniki:

Si - krzem

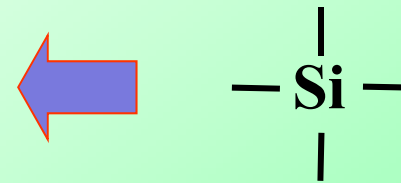
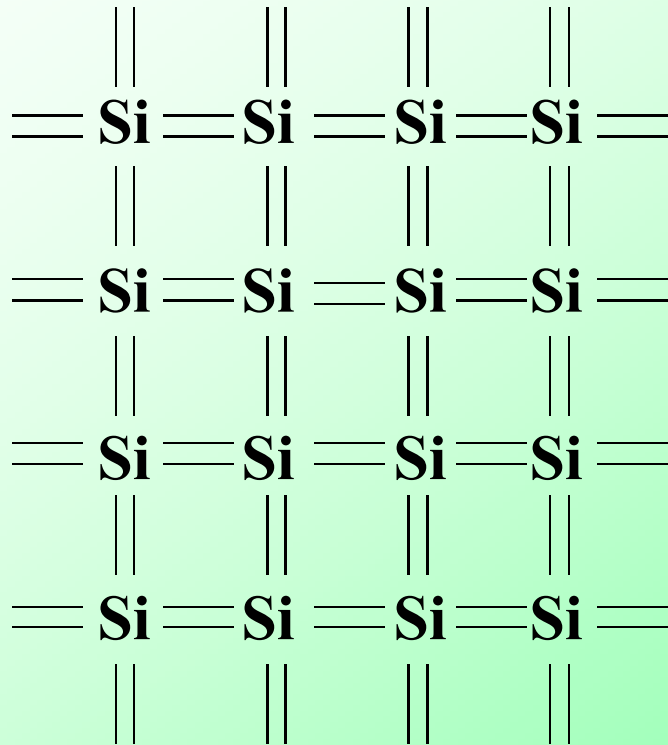
Ge - german

GaAs - arsenek galu

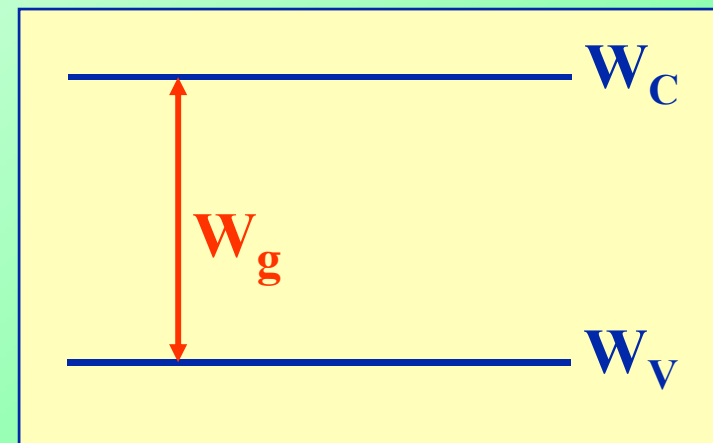
SiC - węglik krzemu

Ge-Si - krzemogerman

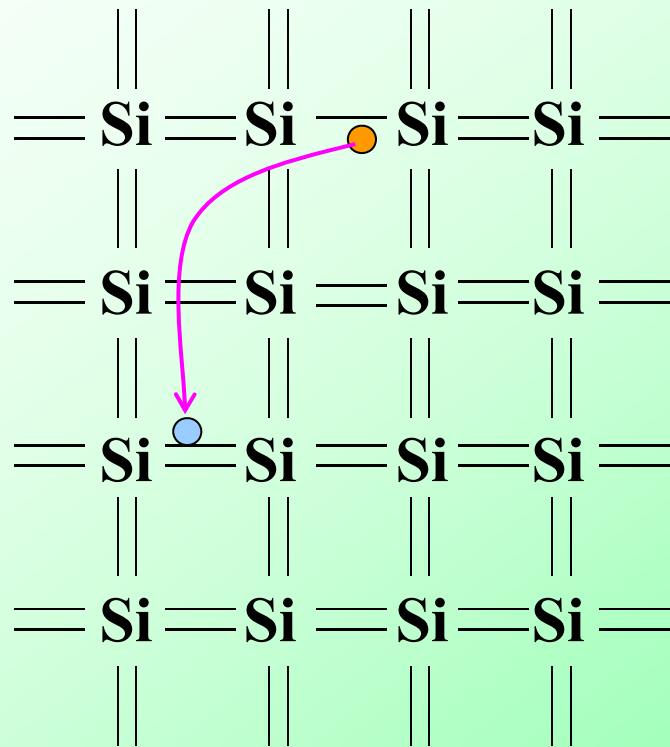
Krzem (T=0K)



Model pasmowy:

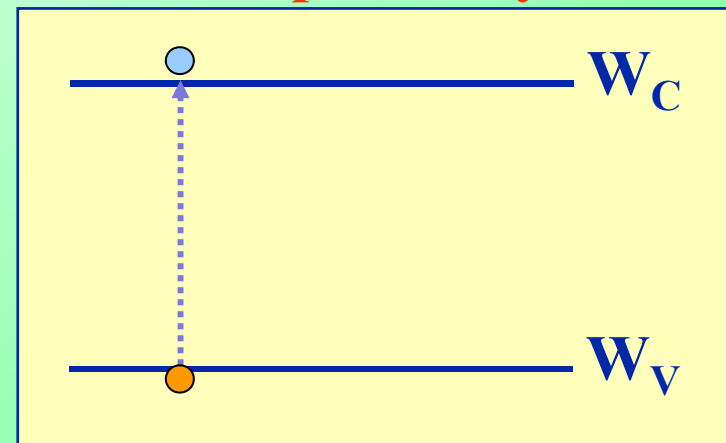


Krzem ($T > 0\text{K}$)

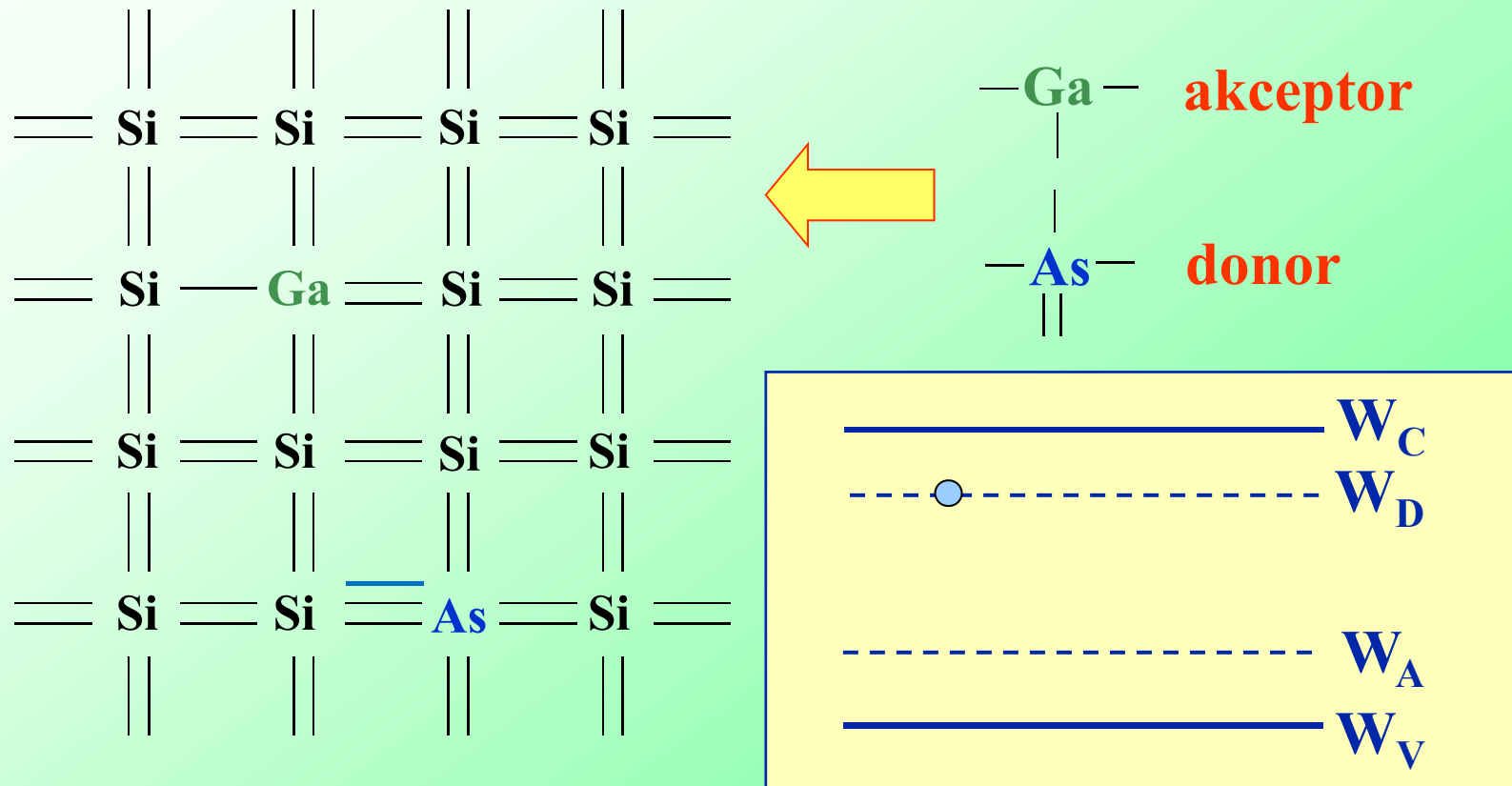


Generacja pary
dziura-elektron

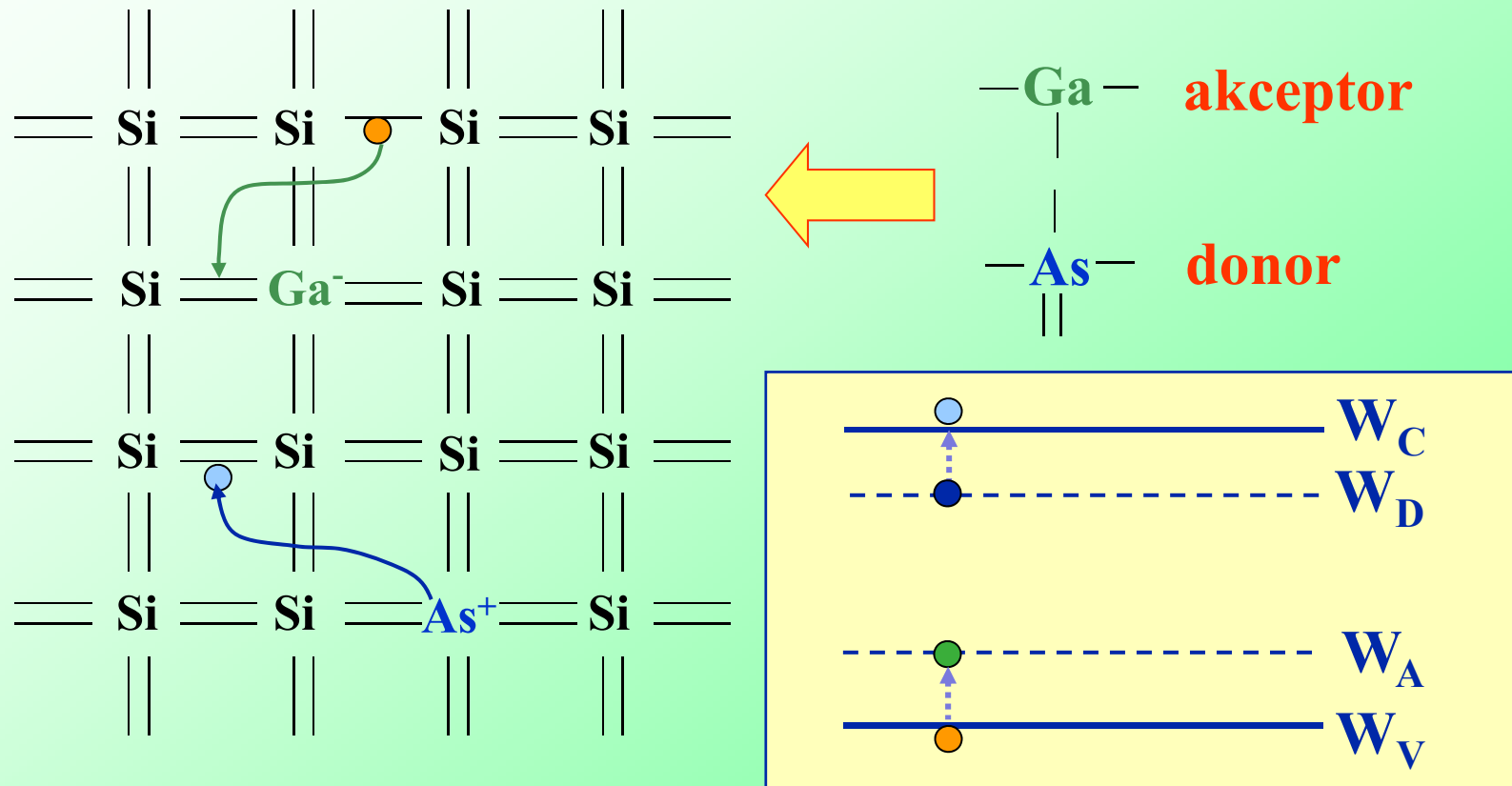
Model pasmowy:



Krzem domieszkowany



Krzem domieszkowany



Koncentracja nośników

Bilans ładunku:

$$\begin{array}{l} n_d + N_a + n_T = p_T + N_d + p_a \\ \swarrow \quad \searrow \quad \quad \quad \downarrow \quad \swarrow \\ n_0 + N_A = p_0 + N_d \end{array}$$

n_0 - koncentracja równowagowa elektronów

p_0 - koncentracja równowagowa dziur

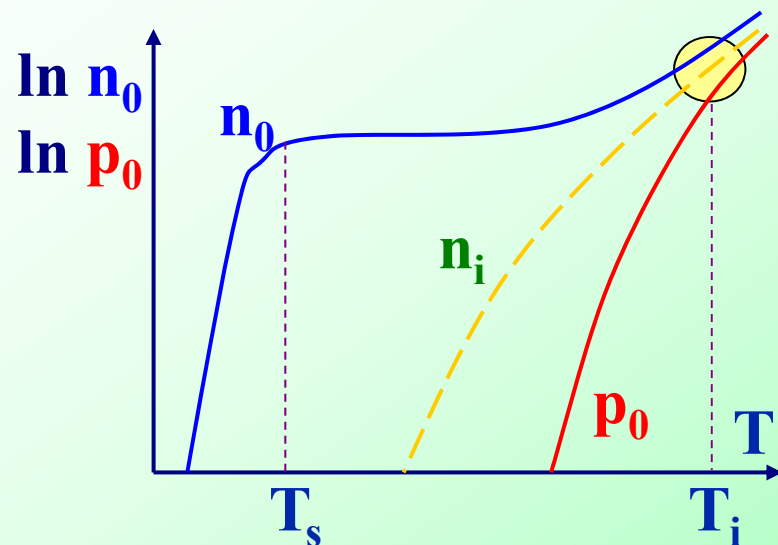
Typy półprzewodników:

$$N_a > N_d \Rightarrow p_{p0} > n_{p0} \quad \text{typ p}$$

$$N_a < N_d \Rightarrow p_{n0} < n_{n0} \quad \text{typ n}$$

$$N_a = N_d \Rightarrow p_0 = n_0 = n_i \quad \text{typ i}$$

Koncentracja nośników



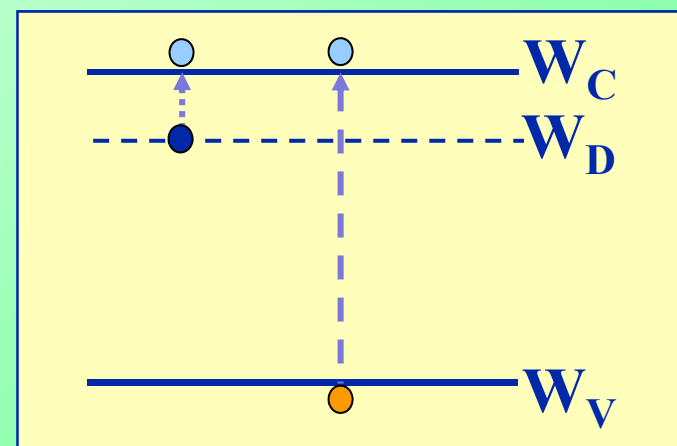
Typ n

$$n_0 = n_d + n_T$$

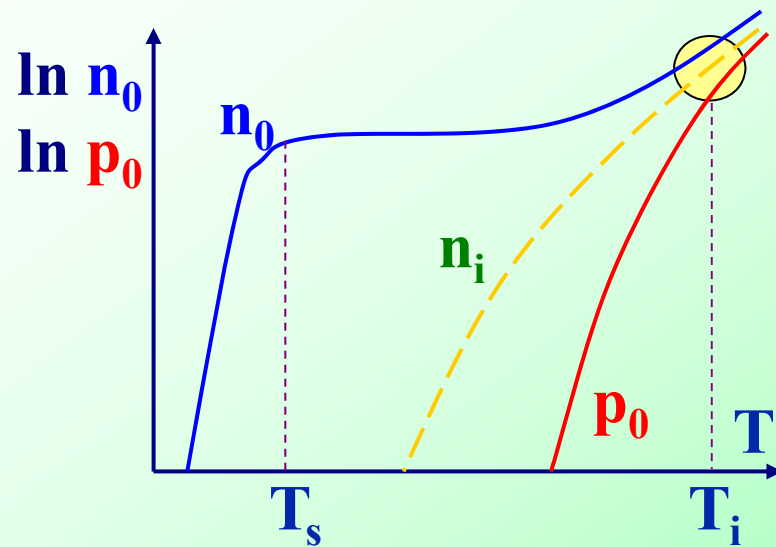
$$p_0 = n_T$$

T_s – temperatura wyczerpania stanów

T_i – temperatura przejścia w stan samoistny



Koncentracja nośników



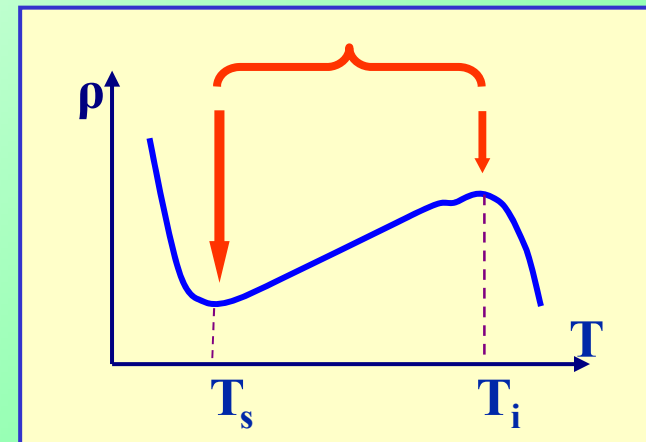
T_s – temperatura wyczerpania stanów

T_i – temperatura przejścia w stan samoistny

Typ n

$$n_0 = n_d + n_T$$

$$p_0 = n_T$$



$$\rho \sim (n_0 + p_0)$$

ρ – rezystywność

Koncentracja nośników

Koncentracje równowagowe:

$$n_0, p_0$$

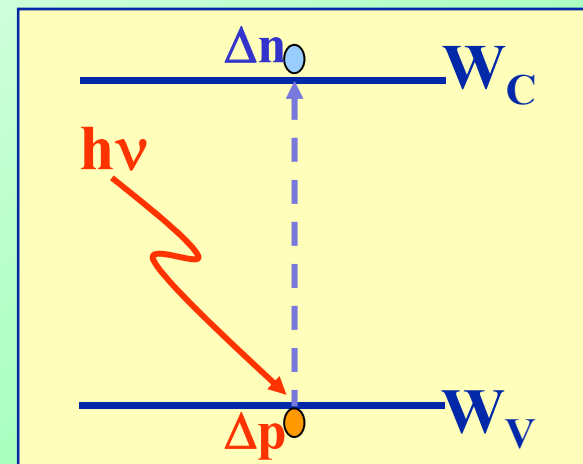
Koncentracje nierównowagowe:

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

Koncentracje nadmiarowe:

$$\Delta n, \Delta p$$



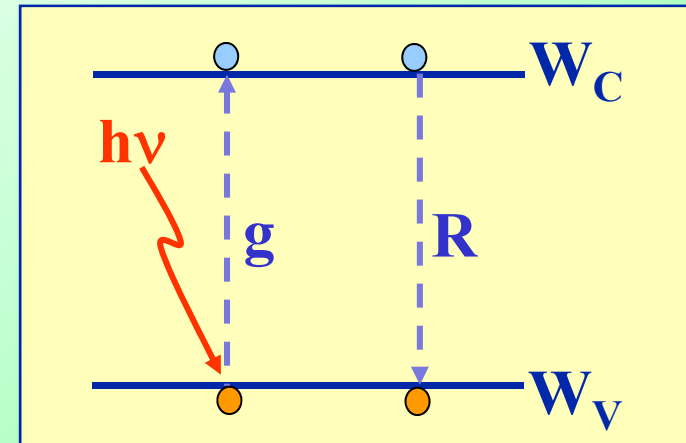
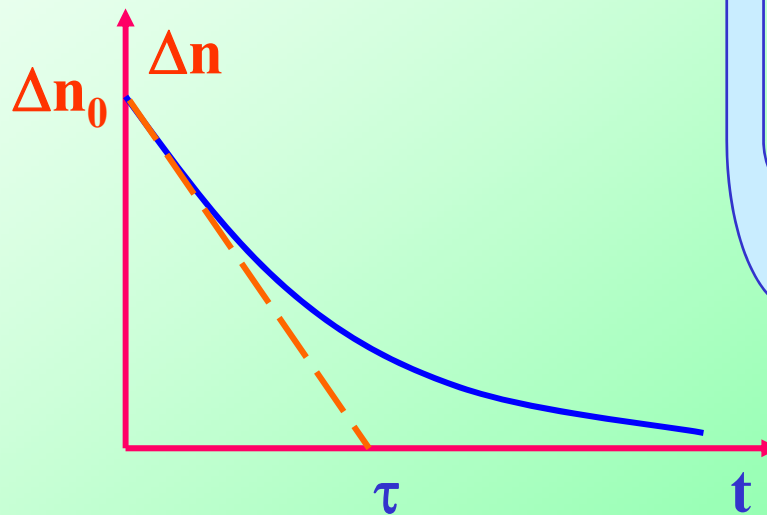
zwykle:

$$\Delta n = \Delta p$$

Rekombinacja

Szybkość rekombinacji:

$$R = -\frac{dn}{dt} = -\frac{d\Delta n}{dt} = \frac{\Delta n}{\tau}$$



$$n = n_0 + \Delta n$$

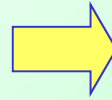
$$\Delta n = \Delta n_0 \exp(-t/\tau)$$

τ - czas życia

$$\Delta n(3\tau) = 0.05\Delta n_0$$

Prąd unoszenia

Ruch chaotyczny



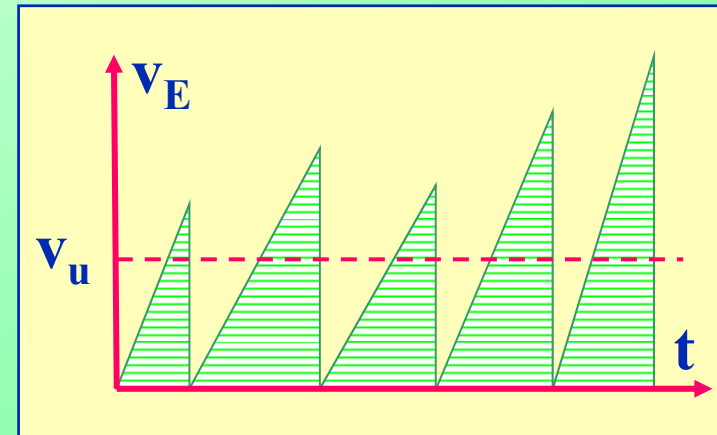
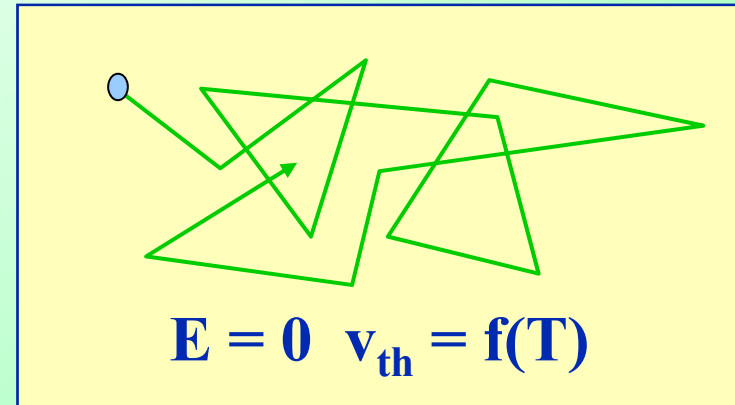
Pole elektryczne przyspiesza elektrony:

$$F = qE \Rightarrow a = F/m \Rightarrow v_E = at$$

$$v = v_{th} + v_E$$

Prędkość unoszenia:

$$v_u = \mu E \quad \mu - \text{ruchliwość}$$



Prąd unoszenia

elektrony

$$v_{ue} = \mu_n E$$

$$J_{ue} = qn v_{ue} = qn \mu_n E$$

dziury

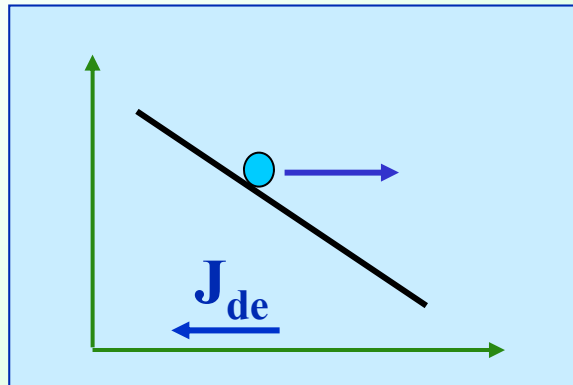
$$v_{uh} = \mu_p E$$

$$J_{uh} = qp v_{uh} = qp \mu_p E$$

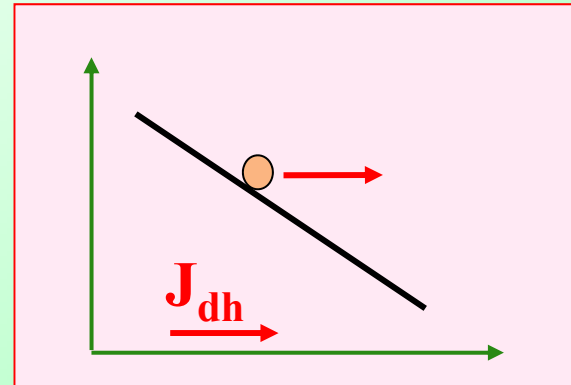
Prawo Ohma dla półprzewodnika:

$$J_u = J_{ue} + J_{uh} = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$$

Prąd dyfuzyjny



$$J_{de} = qD_n \text{grad } n$$



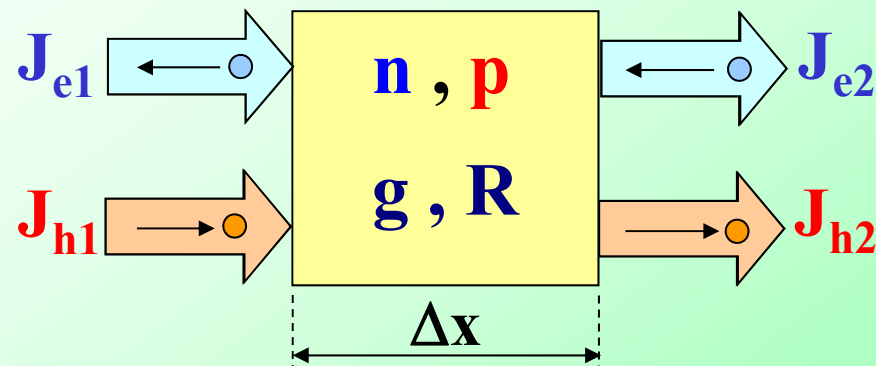
$$J_{dh} = -qD_p \text{grad } p$$

Równania transportu:

$$J_e = q(n\mu_n E + D_n \text{grad } n)$$

$$J_h = q(p\mu_p E - D_p \text{grad } p)$$

Równania ciągłości



1D

$$\frac{dn}{dt} = (g - R) + \frac{1}{q} \frac{dJ}{dx}$$

$$\frac{dp}{dt} = (g - R) - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx}$$

3D

$$\frac{\delta n}{\delta t} = g - R + \frac{1}{q} \operatorname{div} J_e$$

$$\frac{\delta p}{\delta t} = g - R - \frac{1}{q} \operatorname{div} J_h$$

Układ równań struktury półprzewodnikowej

Równania transportu:

$$\mathbf{J}_e = q(n\mu_n\mathbf{E} + D_n\text{grad } n)$$

$$\mathbf{J}_h = q(p\mu_p\mathbf{E} - D_p\text{grad } p)$$

Równania ciągłości:

$$\frac{\delta n}{\delta t} = g - R + \frac{1}{q} \text{div } \mathbf{J}_e$$

$$\frac{\delta p}{\delta t} = g - R - \frac{1}{q} \text{div } \mathbf{J}_h$$

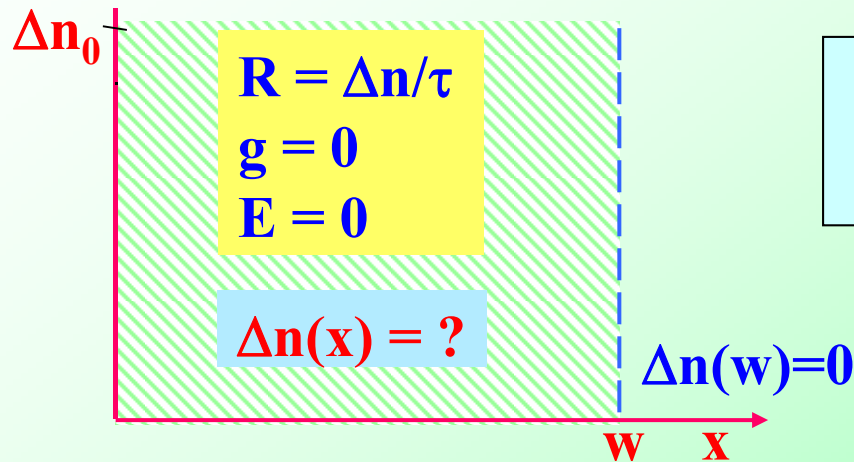
Równanie Poissona:

$$\text{div } \mathbf{E} = -\frac{4\pi}{\varepsilon} q(p - n + N_d - N_a)$$

Równanie Kirchhoffa:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_h$$

Wstrzykiwanie nośników



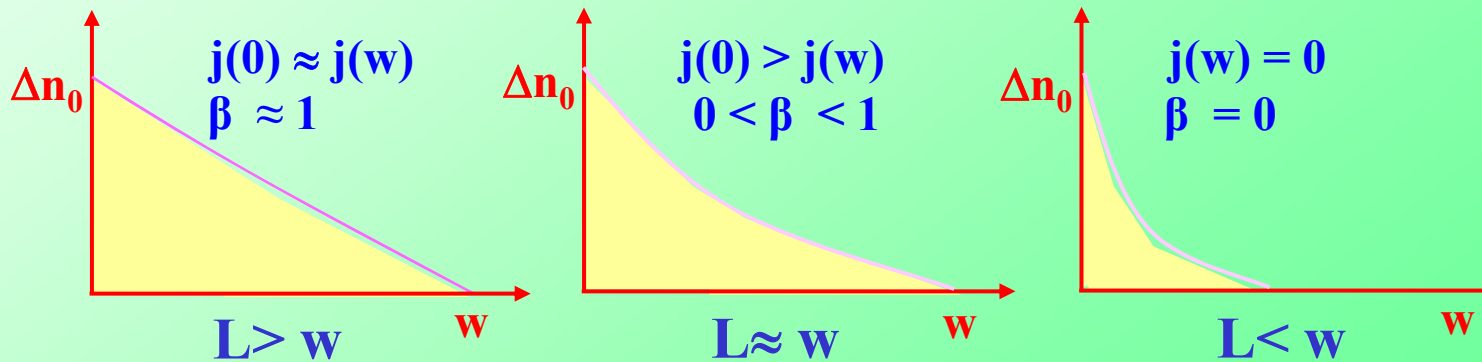
$$L^2 \frac{d^2(\Delta n)}{dx^2} = \Delta n$$

$L = (D\tau)^{0.5}$
 droga dyfuzji

$$\beta = j(w)/j(0)$$

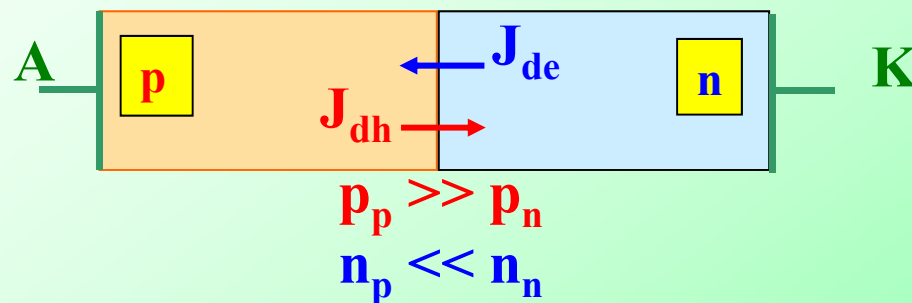
β – współczynnik transportu

$$j(x) = q D \text{grad}(\Delta n)$$

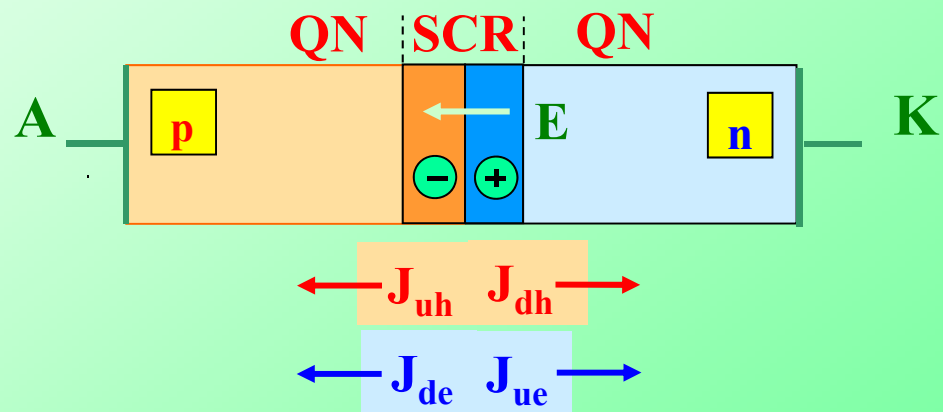


Złącze p-n

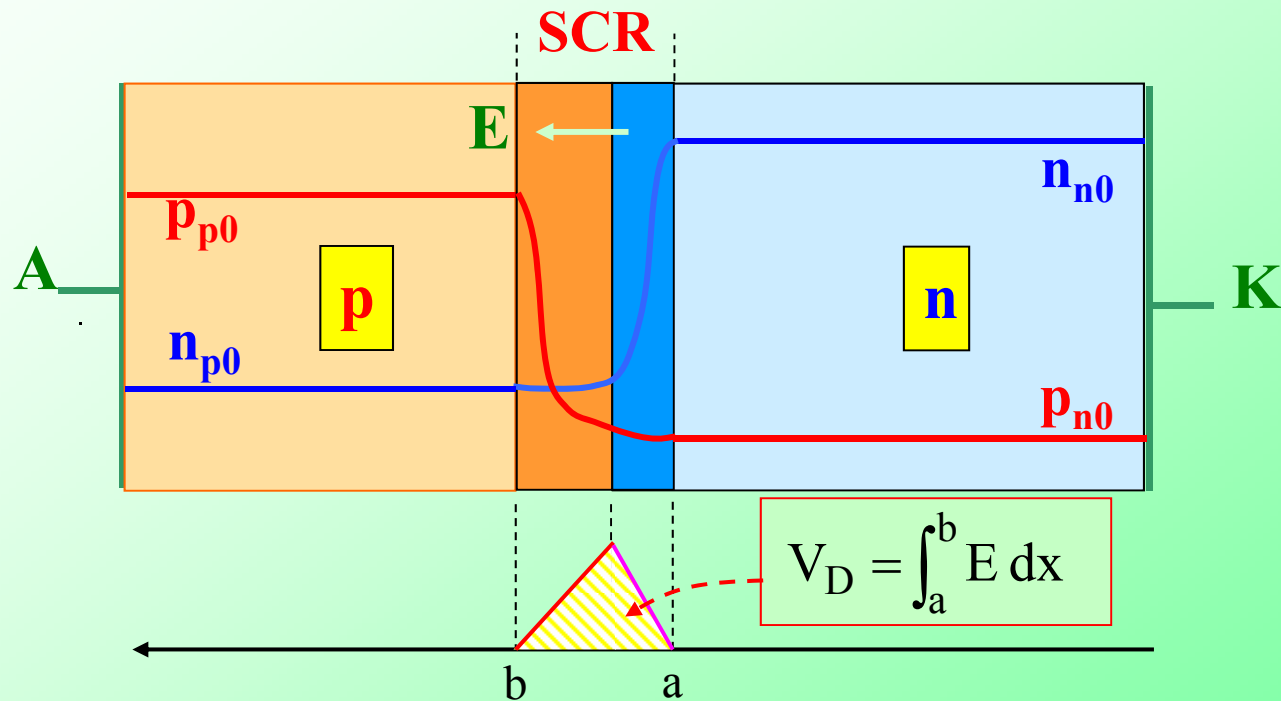
Bezpośrednio po „zetknięciu” dwóch półprzewodników



W stanie równowagi



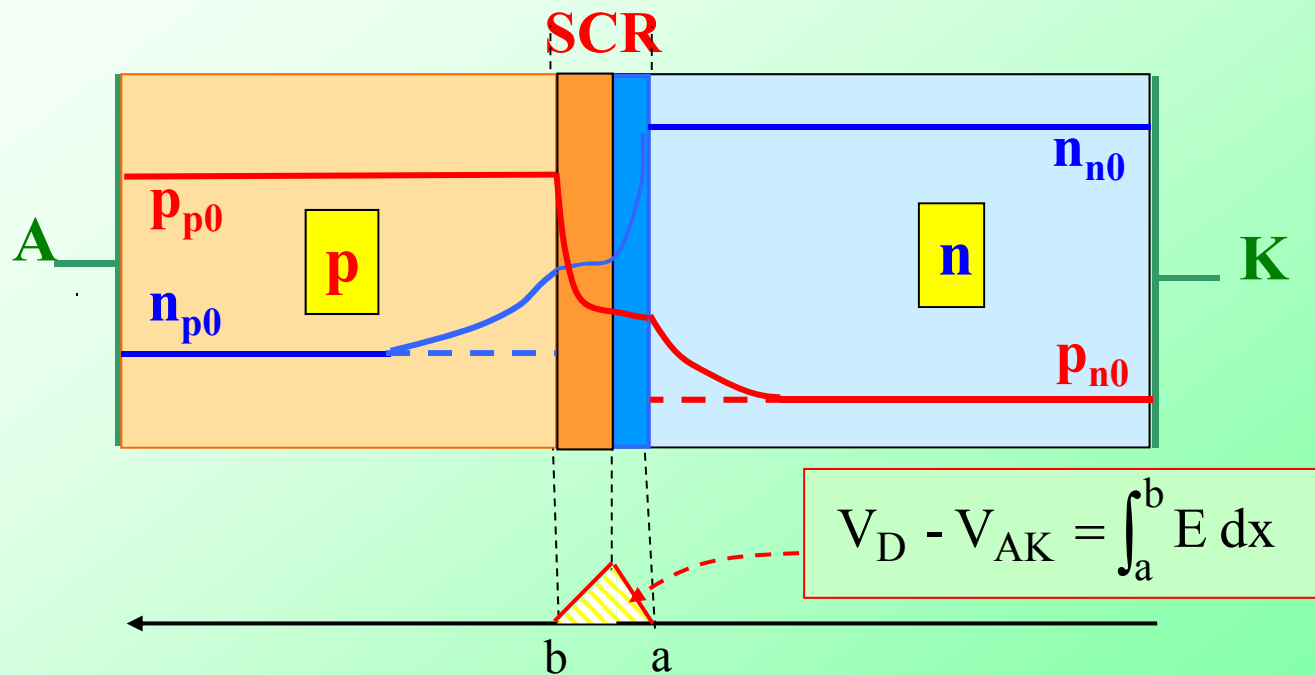
Złącze p-n w stanie równowagi



$$U_{AK} = 0 \quad I_D = 0$$

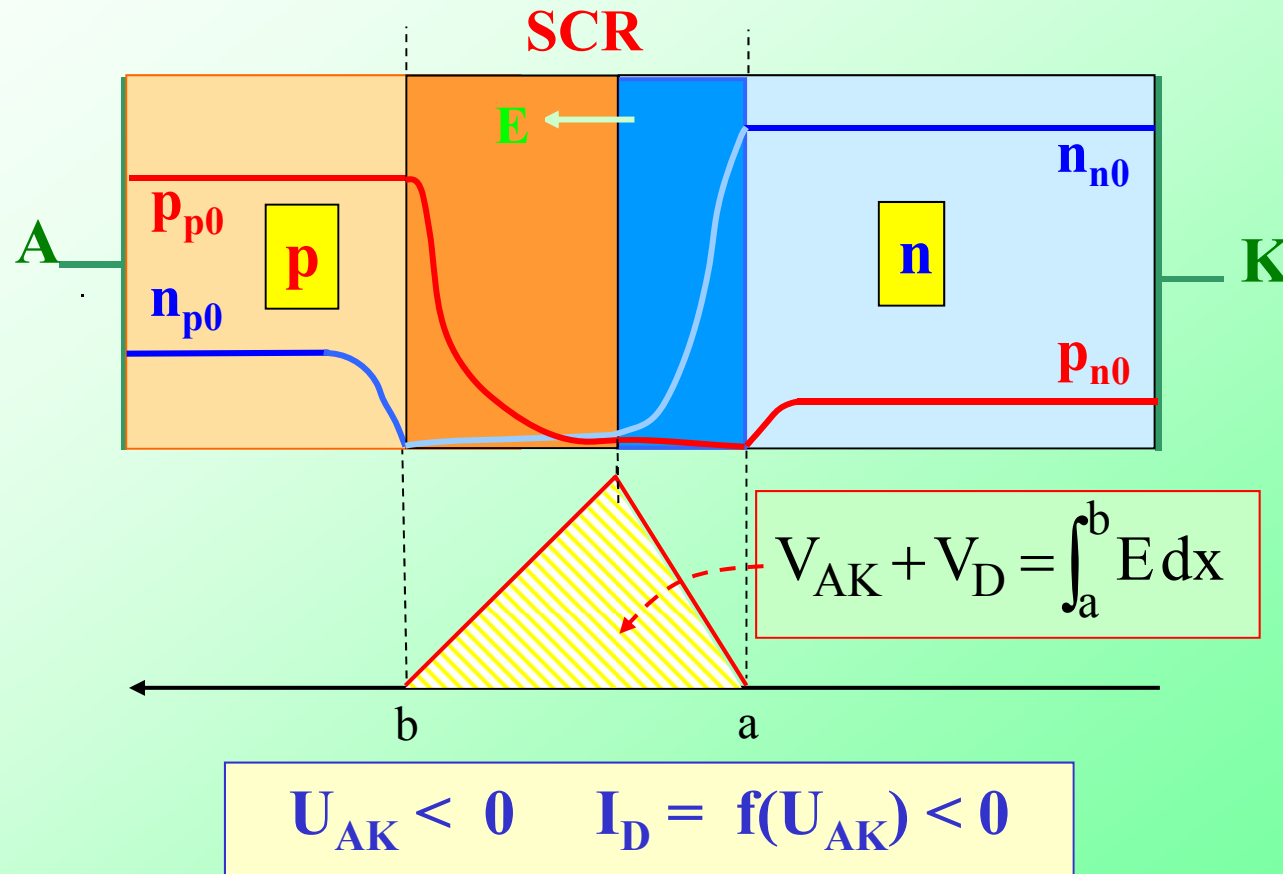
U_D - potencjał dyfuzyjny

Złącze p-n w stanie przewodzenia

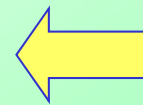
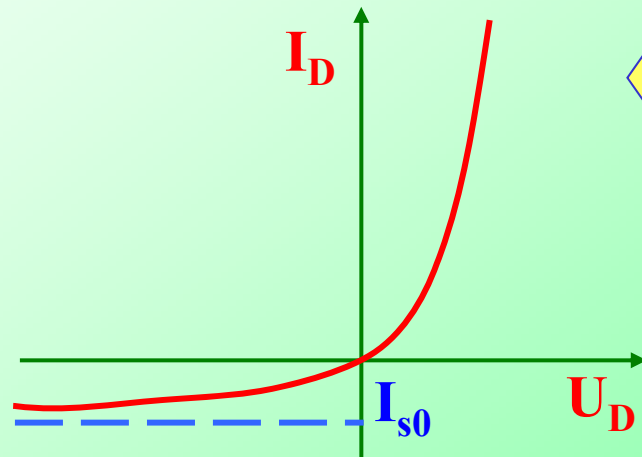
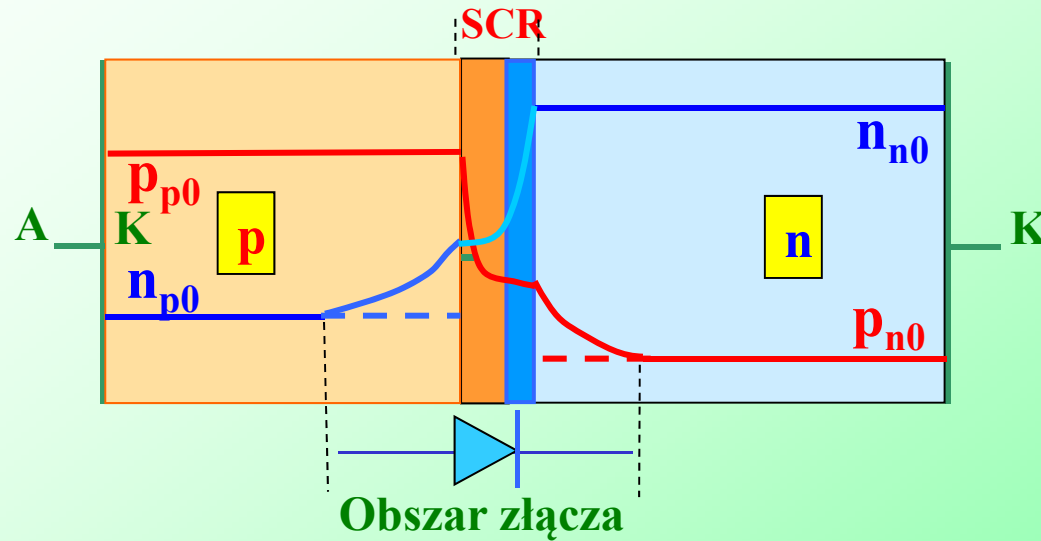


$$U_{AK} > 0 \quad I_D = f(U_{AK}) > 0$$

Złącze p-n w stanie blokowania



Dioda idealna

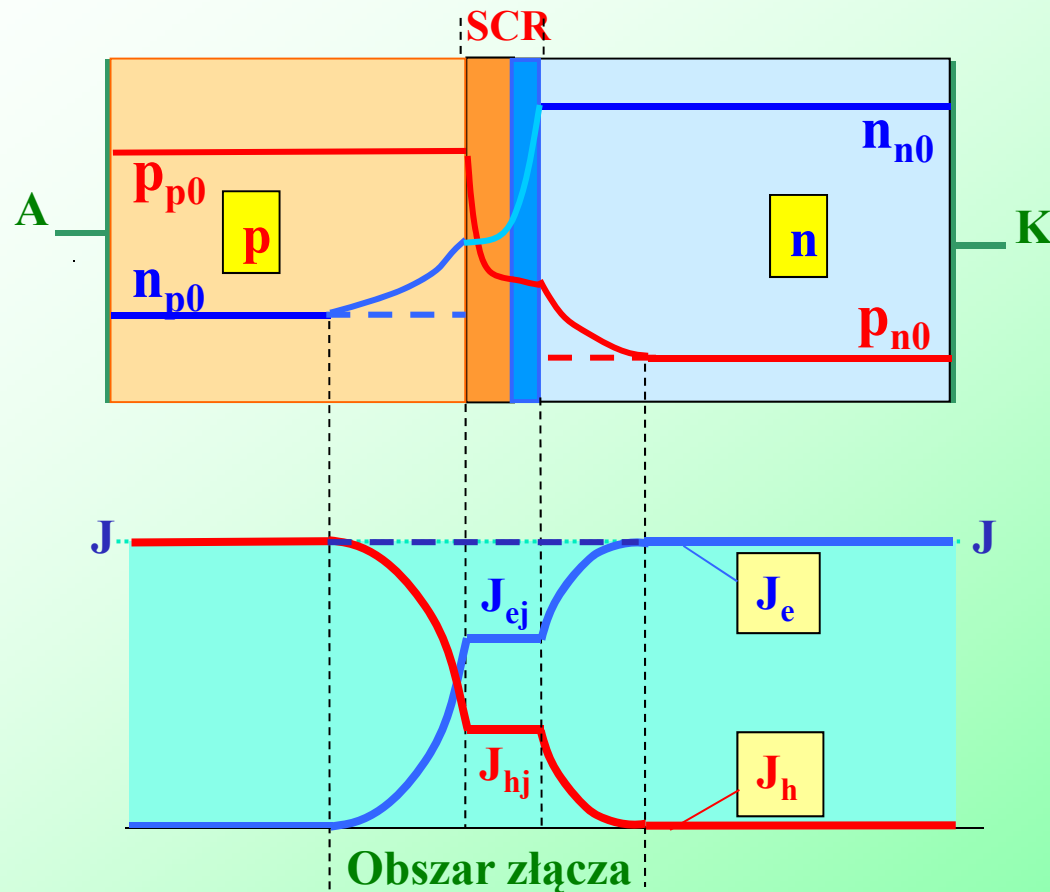


Charakterystyka diody idealnej

$$I_D = I_{s0} \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right)$$

I_{s0} – prąd nasycenia

Współczynnik wstrzykiwania



Współczynnik wstrzykiwania elektronów:

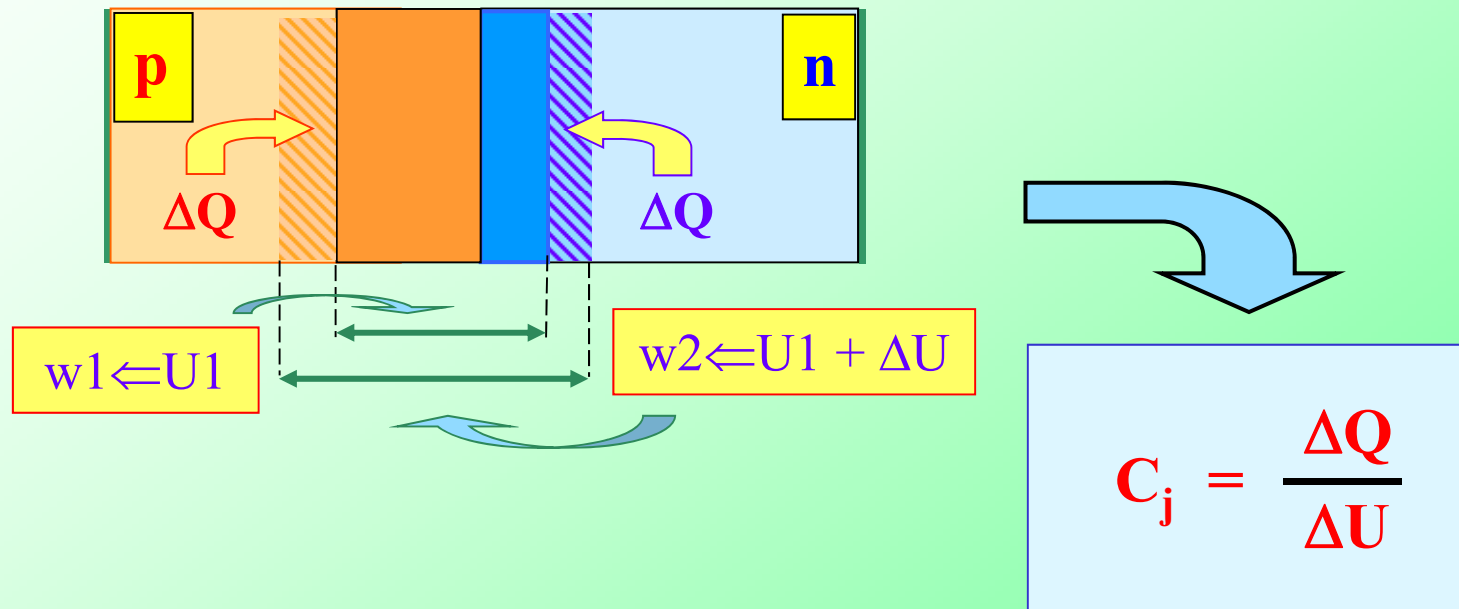
$$\gamma_{e \rightarrow p} = \frac{J_{ej}}{J}$$

Współczynnik wstrzykiwania dziur:

$$\gamma_{h \rightarrow n} = \frac{J_{hj}}{J}$$

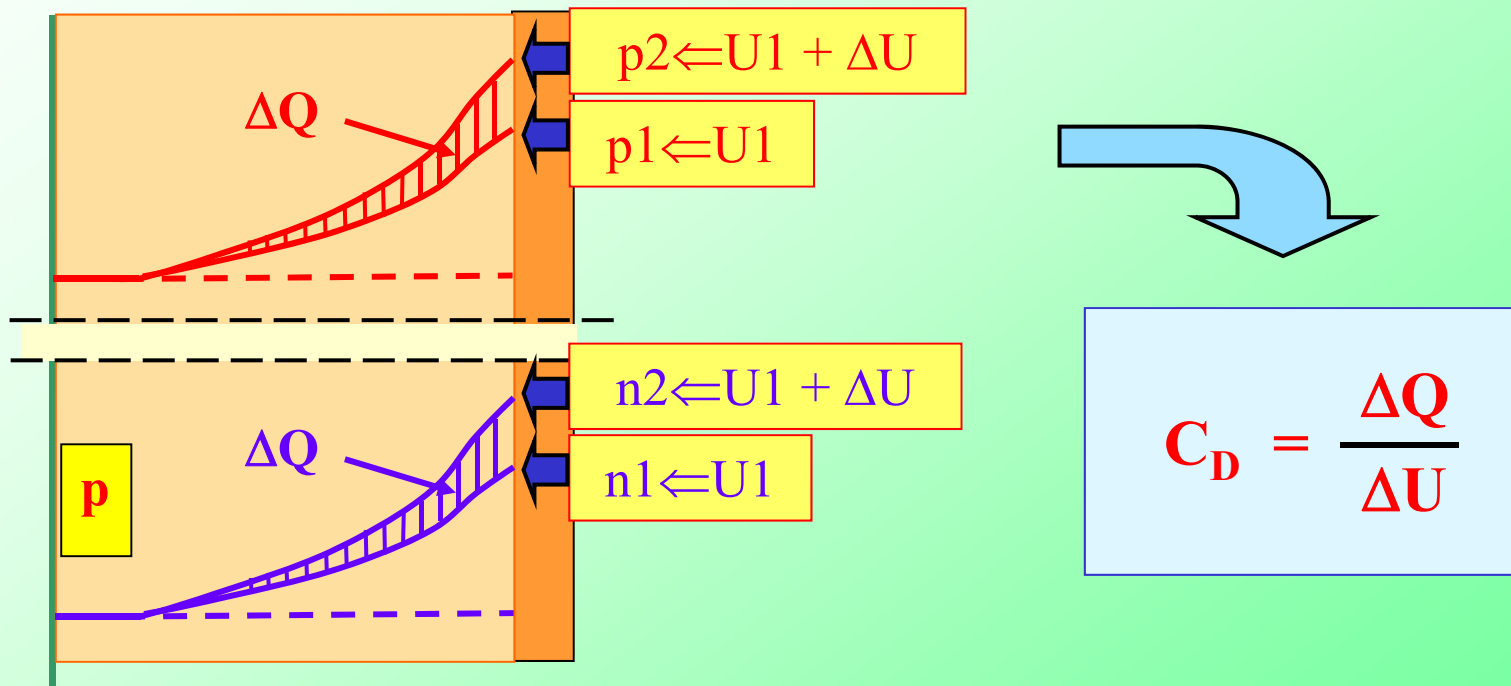
Pojemności w diodzie

Pojemność złączowa:

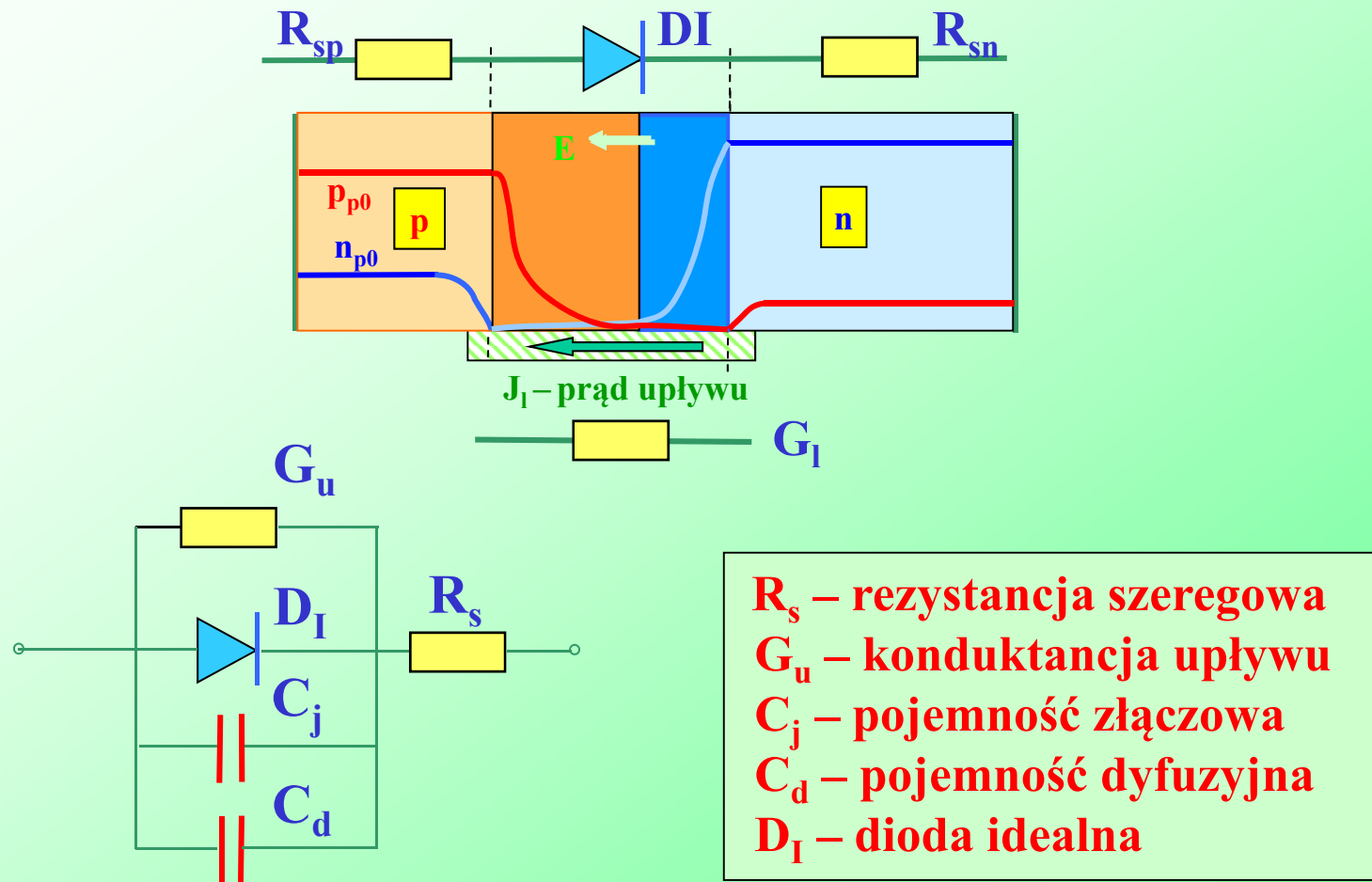


Pojemności w diodzie

Pojemność dyfuzyjna:

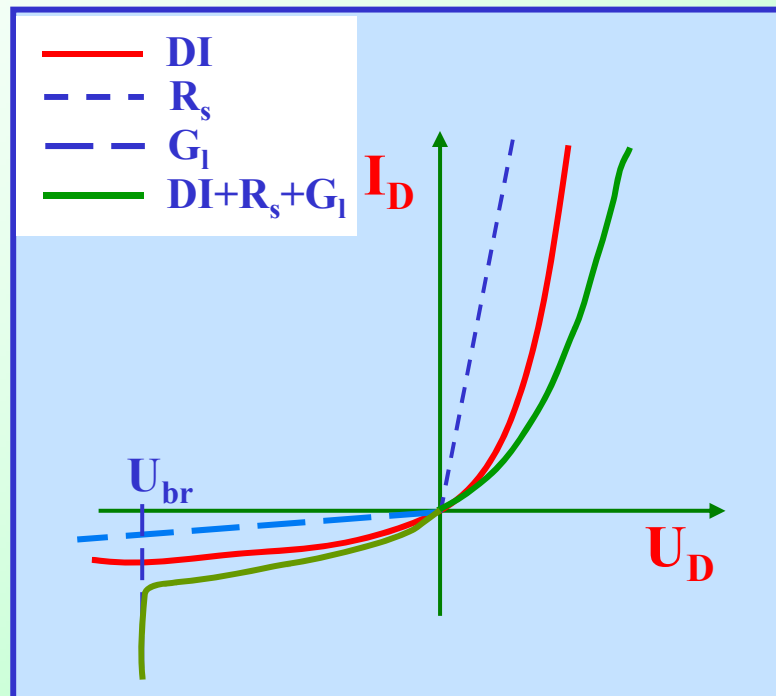


Dioda idealna a rzeczywista



Dioda idealna a rzeczywista

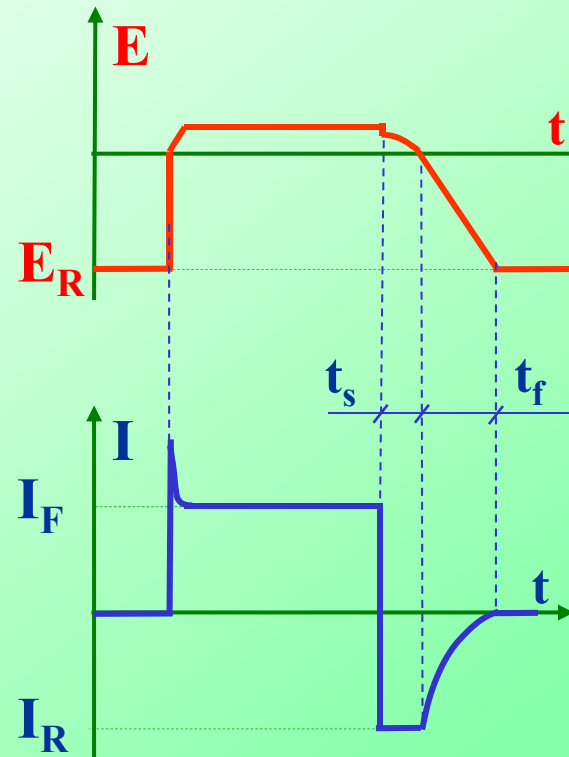
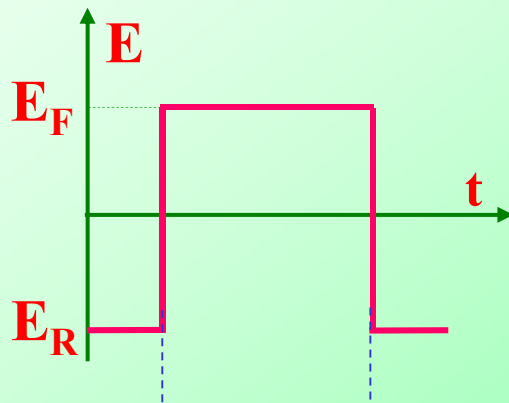
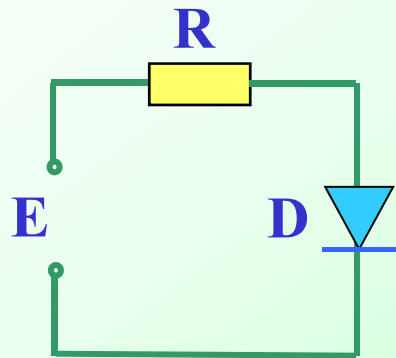
Napięcie przebicia:



Rodzaje przebić::

- lawinowe
- Zenera
- skrośne

Przełączanie diody



$$I_F = E_F/R$$

$$I_R = E_R/R$$

Przegląd diod

Standardowe

- Prostownicza (U_{br}, R_{on})
- Impulsowa (t_r, t_{rr})
- Zenera (U_{br})

Specjalne

- Varikap (C_j)
- Tunelowa (typu-S)
- Lawinowa (syg. wcz)
- p-i-n (sygn wcz)

Optoelektroniczne

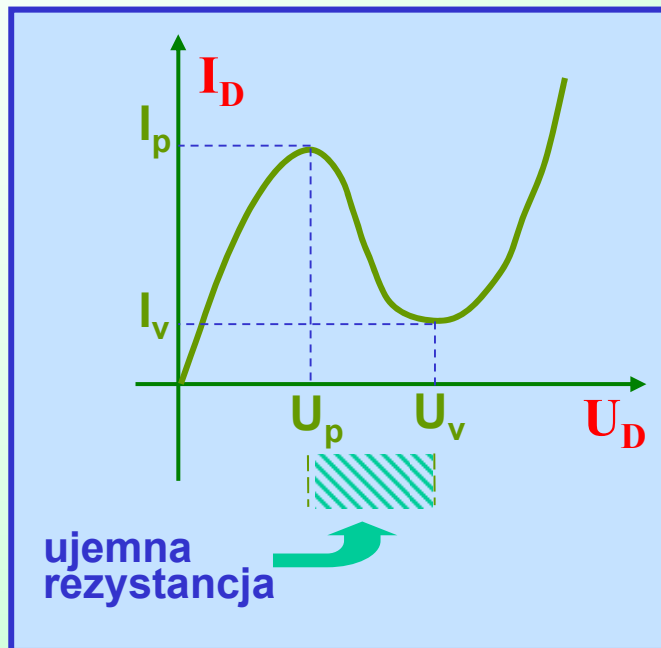
- LED (emisja)
- Laser (emisja)
- FD (detekcja)
- Ogniwo słoneczne

Inne diody:

- Schottky'ego – wykorzystująca własności nieliniowego kontaktu metal-półprzewodnik (t_r, t_{rr})
- Gunna – wykorzystuje zależność ruchliwości od pola elektrycznego występującą w pewnych materiałach jak np. GaAs (charakterystyka I-V typu S)

Przeгляд diod

Charakterystyka V-I typu S:



U_p – napięcie szczytowe

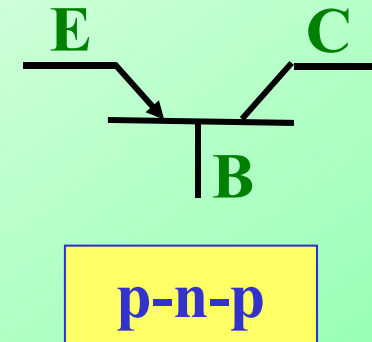
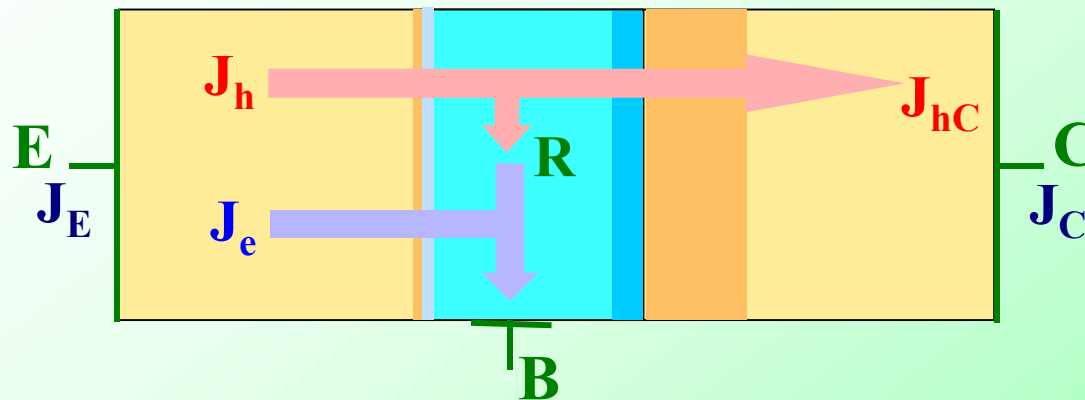
I_p – prąd szczytowy

U_v – napięcie dolinowe

I_v – prąd dolinowy

\Re - ujemna rezystancja

Tranzystor bipolarny



$$J_C = J_{hC} = \beta J_h = \gamma\beta J_E = \alpha J_E$$

Typowe warunki pracy:

U_{BE} - przewodzenie

U_{BC} - blokowanie

Współczynnik
wzmocnienia J_C/J_E

$$\alpha = \gamma\beta$$

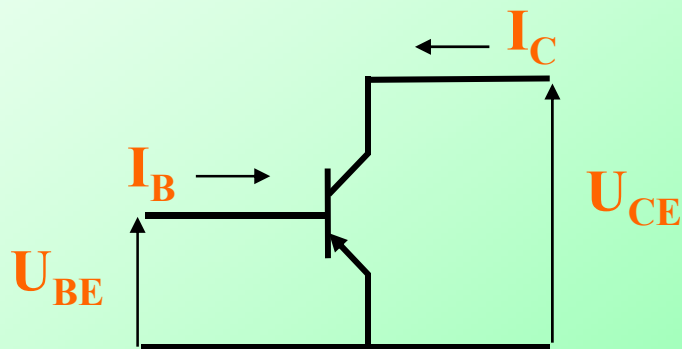


Tranzystor bipolarny jako czwórnik



$$U_2 = h_{11}I_1 + h_{12}U_1$$
$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_1$$

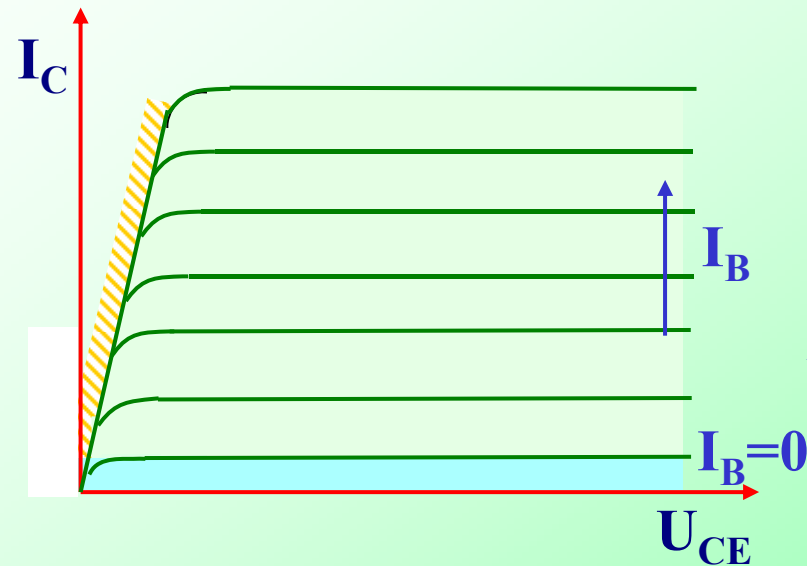
Układ wspólnego emitera OE



Współczynnik wzmacnienia I_C/I_B

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Tranzystor bipolarny w układzie OE



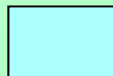
Charakterystyka
wyjściowa



Obszar nasycenia

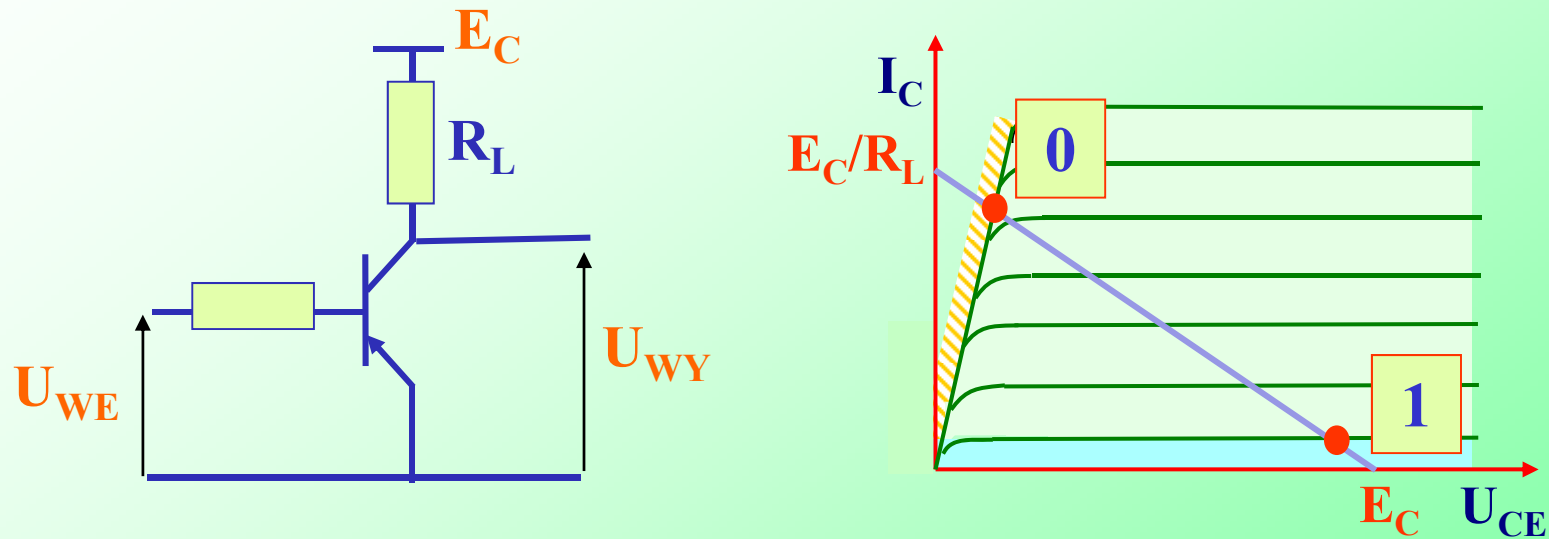


Obszar aktywny



Obszar odcięcia

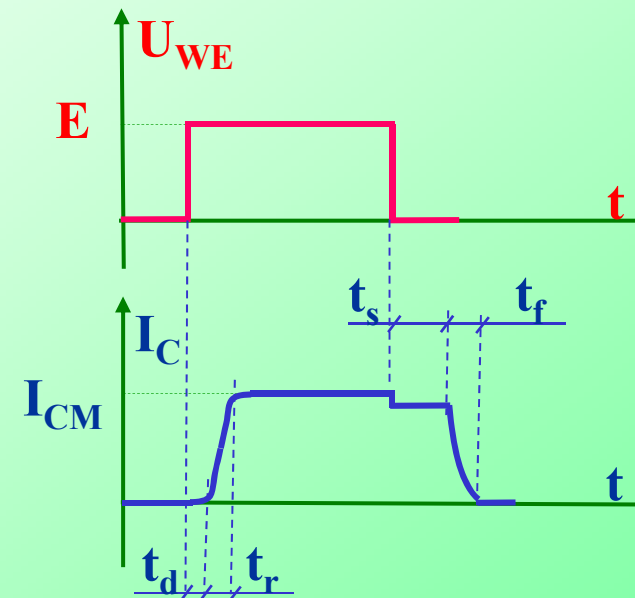
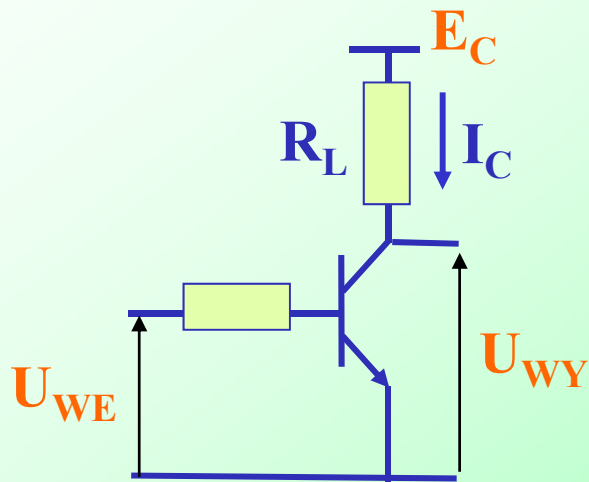
Tranzystor bipolarny jako inwerter



Wejście		Wyjście	
stan "0"	$U_{WE} \approx 0 \text{ V}$	$U_{WY} \approx E_C$	stan "1"
stan "1"	$U_{WE} \approx E_C$	$U_{WY} \approx 0 \text{ V}$	stan "0"

Tranzystor bipolarny jako inwerter

Przełączanie tranzystora:



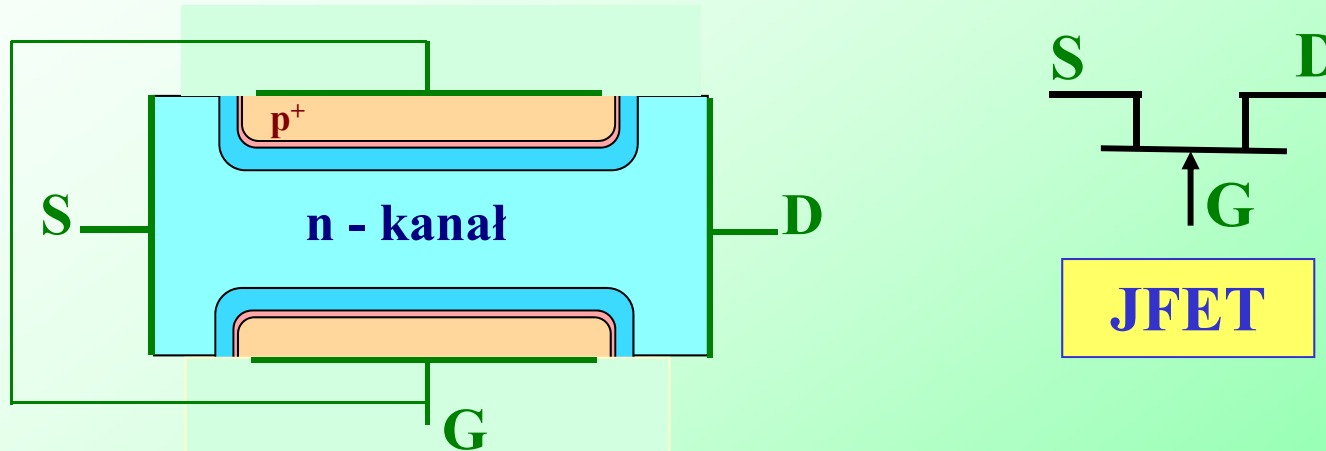
t_d – czas opóźnienia

t_r – czas narastania

t_s – czas magazynowania

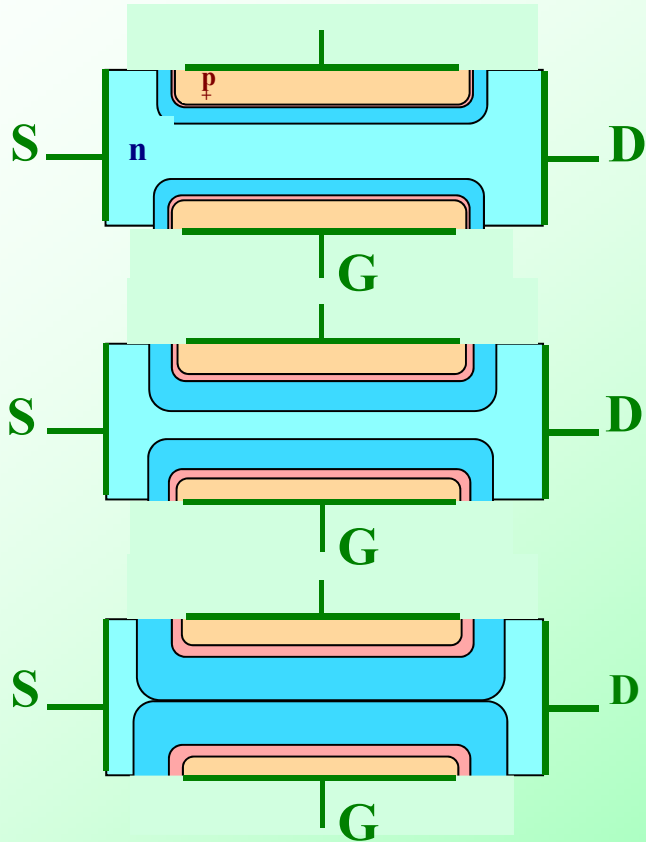
t_f – czas opadania

Tranzystor polowy



- Prąd płynie od źródła do drenu
- Złącze bramka-kanał jest spolaryzowane wstecznie
- Nie ma wstrzykiwania nośników
- Prąd przenoszą tylko nośniki większościowe
- Regulacja szerokości kanału napięciem bramka-kanał

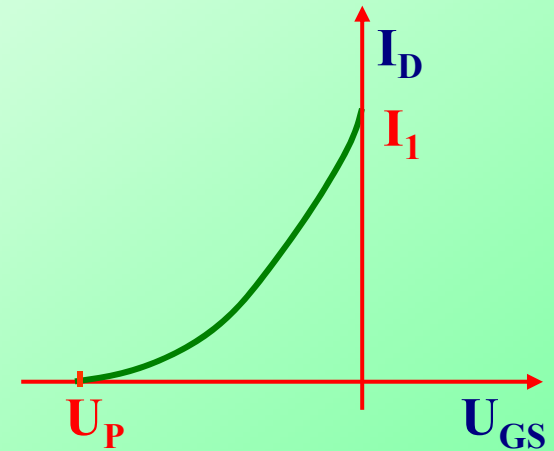
Charakterystyka przejściowa



$U_{GS} = 0$
 $U_{DS} - \text{male}$
 $I_D(U_D) = I_1$

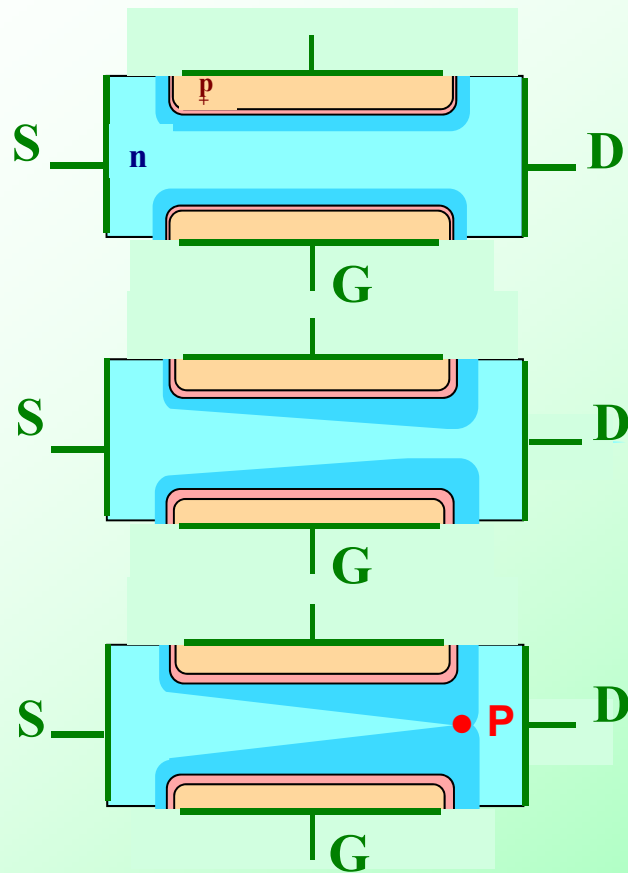
$0 < U_{GS} < U_p$
 $U_{DS} - \text{male}$
 $I_D(U_D) < I_1$

$U_{GS} = U_p$
 $U_{DS} - \text{male}$
 $I_D(U_D) = 0$



U_P - napięcie
 odcięcia

Charakterystyka wyjściowa JFET



$$U_{GS} = 0$$

$$U_{DS} = 0$$

$$I_D = 0$$

$$U_{GS} = 0$$

$$U_{DS} < U_p$$

$$0 < I_D < I_{DSS}$$

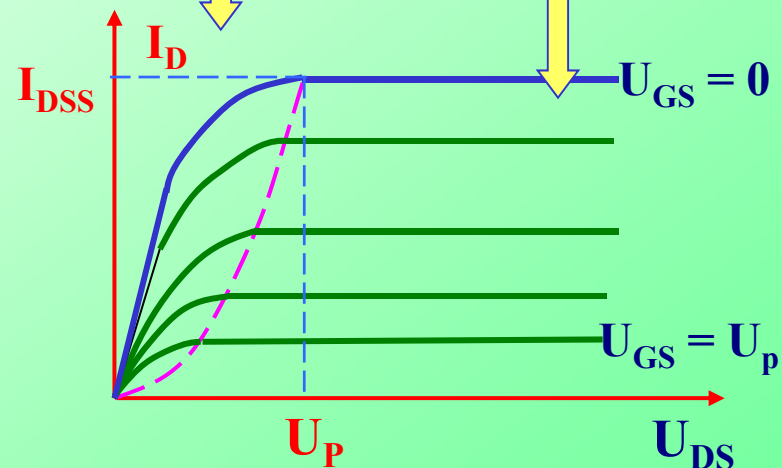
$$U_{GS} = 0$$

$$U_{DS} = U_p$$

$$I_D = I_{DSS}$$

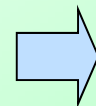
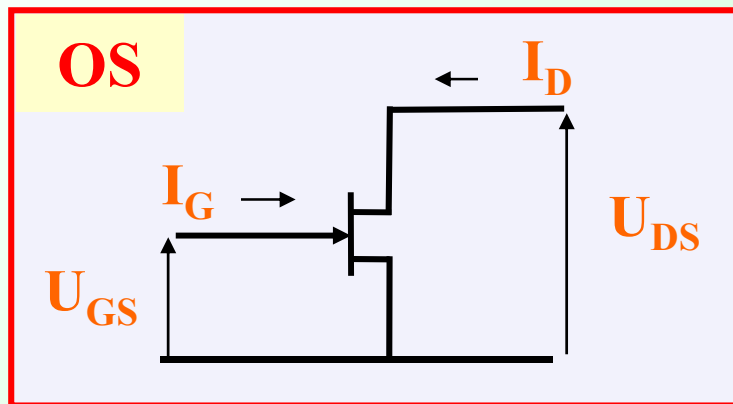
Obszar liniowy

Obszar nasycenia



I_{DSS} - prąd nasycenia drenu

Tranzystor JFET – układ OS

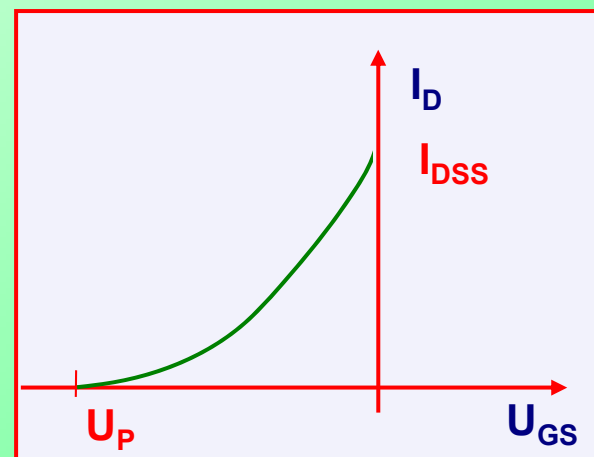


$$I_G = y_{11s}U_{GS} + y_{12s}U_{DS}$$

$$I_C = y_{21s}U_{GS} + y_{22s}U_{DS}$$

Transkonduktancja

$$g_m = \left. \frac{\delta I_D}{\delta U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{const}}$$



Struktura MIS

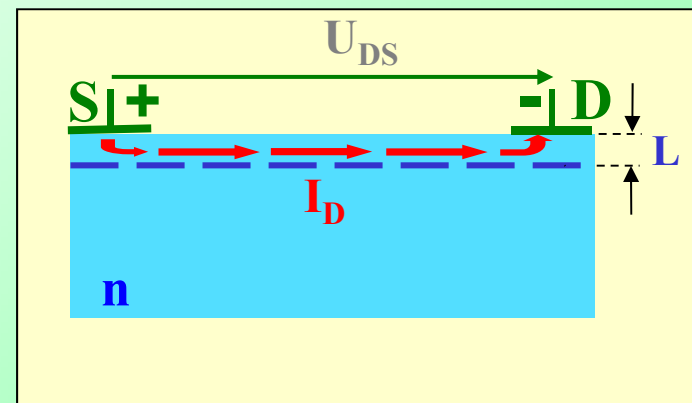
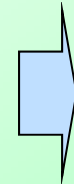
zasada działania

Jeżeli do kontaktów **S** i **D** zostanie przyłożone napięcie U_{DS} popłynie pomiędzy nimi prąd I_D :

$$I_D = U_{DS}/R_{DS}$$

gdzie R_{DS} rezystancja pomiędzy kontaktami **D** i **S** warstwy o grubości **L**

$$R_{DS} \sim L/n$$



Struktura MIS

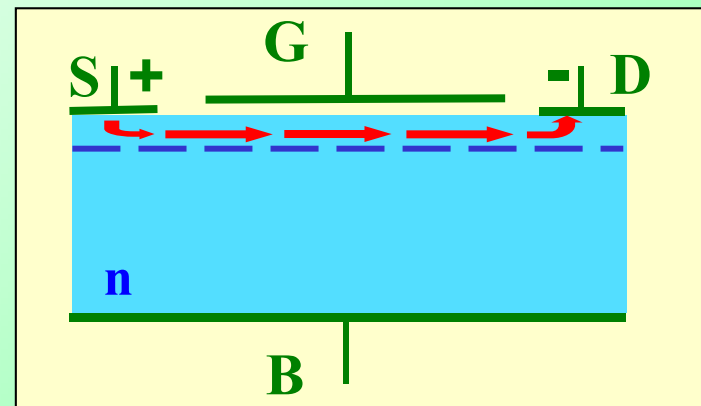
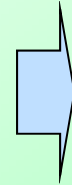
zasada działania

Jeżeli do kontaktów **S** i **D** zostanie przyłożone napięcie U_{DS} popłynie pomiędzy nimi prąd I_D :

$$I_D = U_{DS}/R_{DS}$$

gdzie R_{DS} rezystancja pomiędzy kontaktami **D** i **S** warstwy o grubości **L**

$$R_{DS} \sim L/n$$

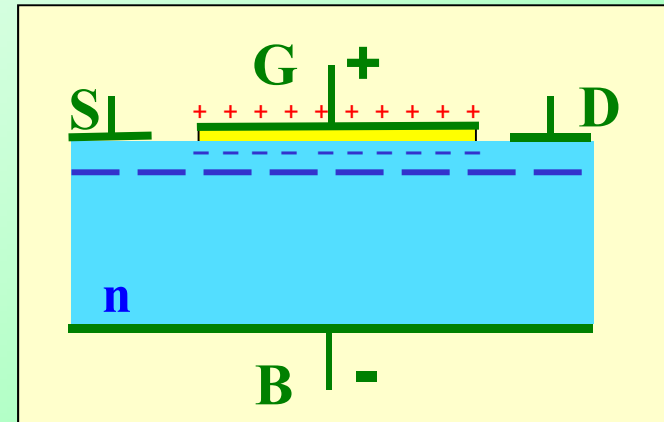
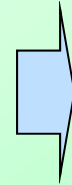


Struktura MIS

zasada działania

Jeżeli napięcie $U_{GB} > 0$ jest przyłożone do kondensatora C_{GB} , na okładkach zgromadzi się ładunek Q_G – dodatni na G i ujemny na górnej powierzchni struktury półprzewodnikowej.

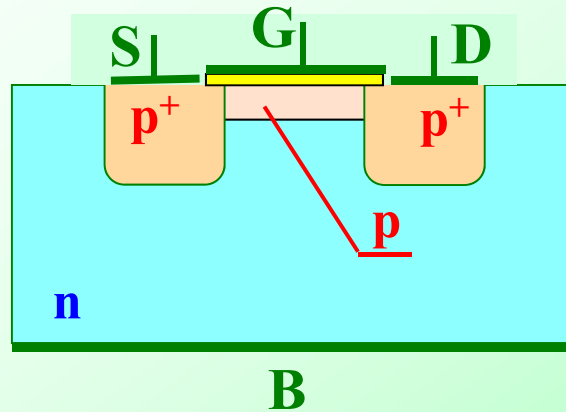
$$Q_G = U_{GB} C_{GB}$$



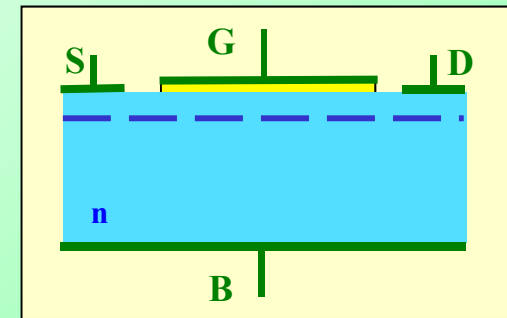
Dielektryk np. SiO₂

W warstwie przewodzącej prąd koncentracja elektronów rośnie prowadząc do zmniejszenia się rezystancji R_{DS} , czemu towarzyszy wzrost prądu I_D przy niezmienionej wartości napięcia U_{DS} .

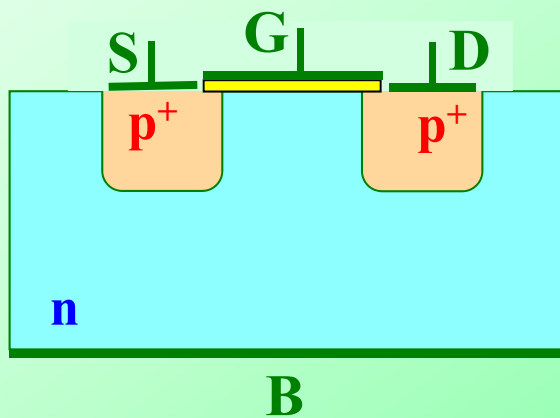
Tranzystor polowy MOSFET



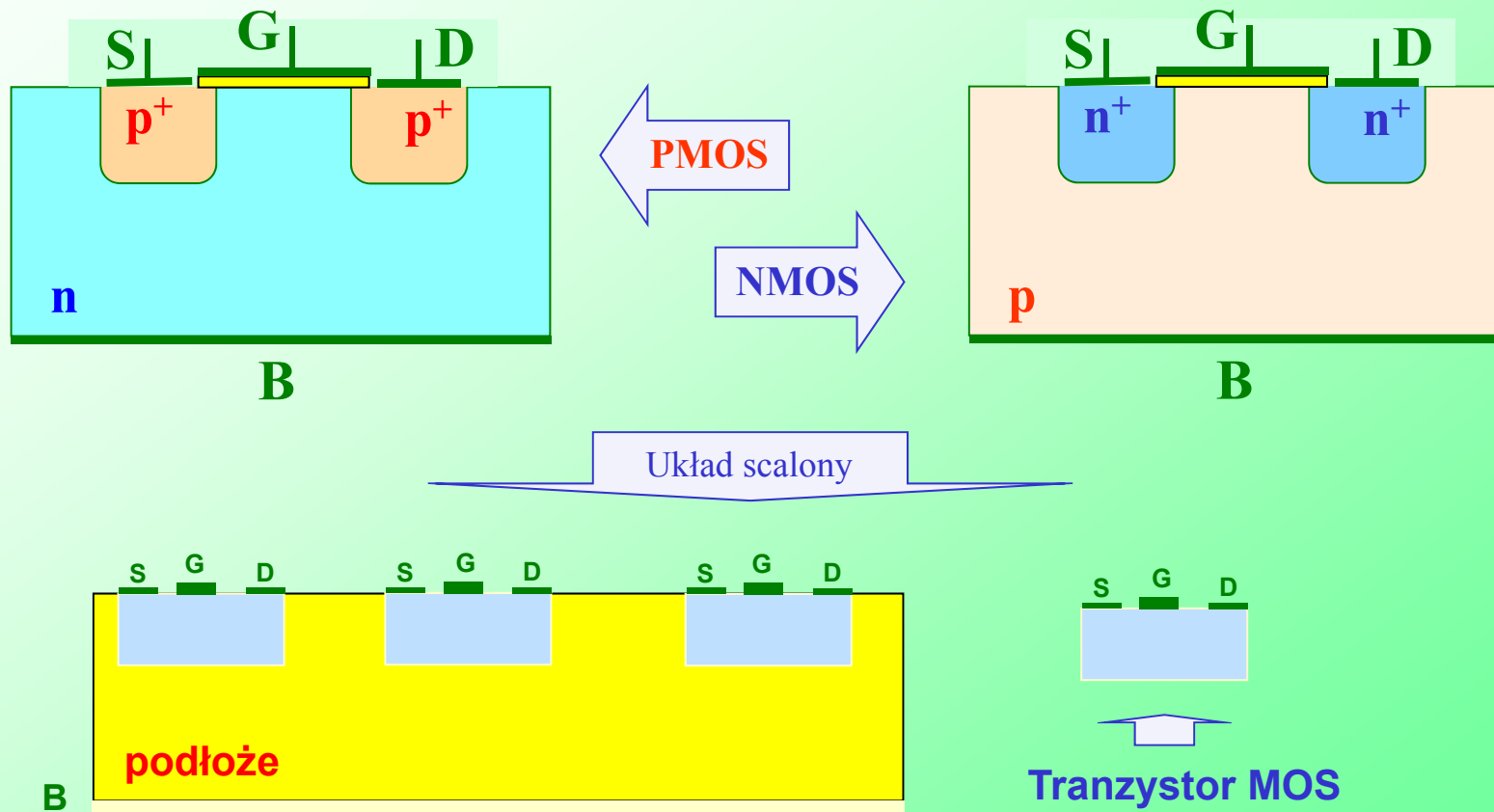
Tranzystor z kanałem wbudowanym



Tranzystor z kanałem zaindukowanym

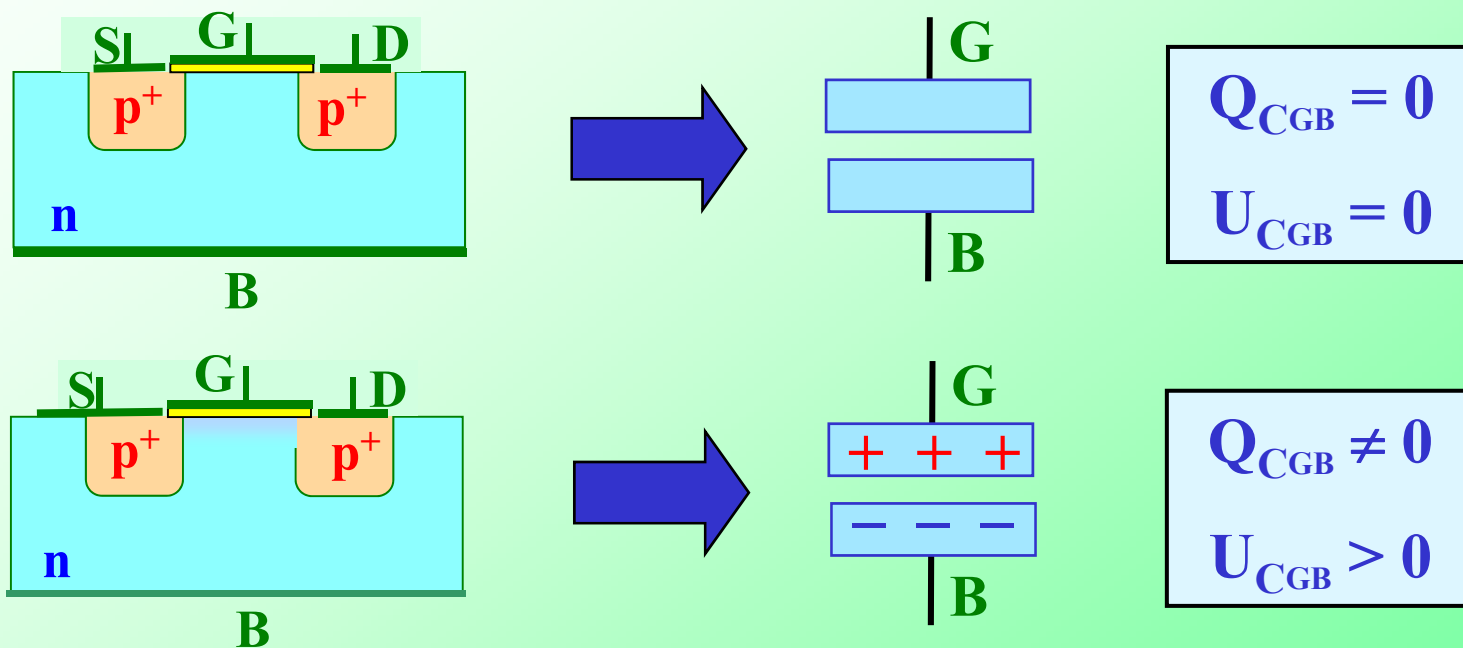


Tranzystor polowy MOSFET



Tranzystor polowy MOSFET

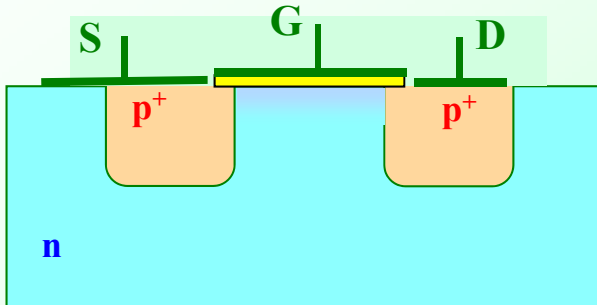
zasada działania



$$Q_{CGB} = Q_{wbudowane} + Q_{dostarczone}$$

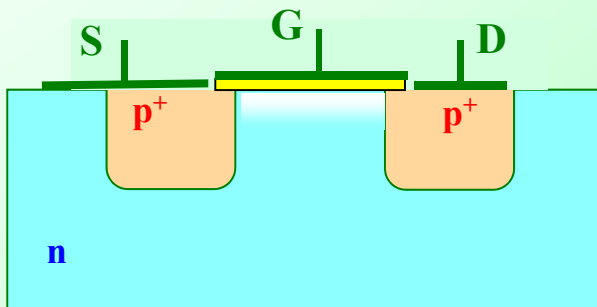
$$U_{CGB} = U_{Cwbudowane} + U_{GB}$$

Tranzystor z kanałem indukowanym



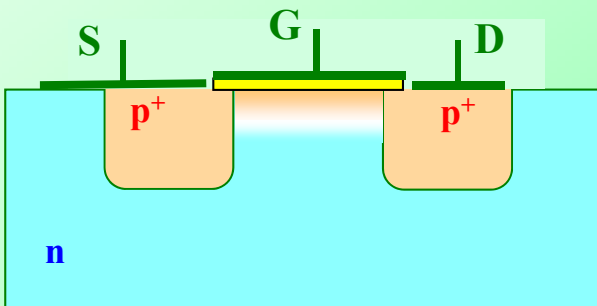
$$U_{GS} = 0$$

- koncentracja n przy powierzchni większa (stany powierzchniowe),
- nie ma prądu drenu



$$U_{GS} = U_T \text{ (napięcie progowe)}$$

- stan samoistny przy powierzchni ($n_0 = p_0$),
- nie ma prądu drenu

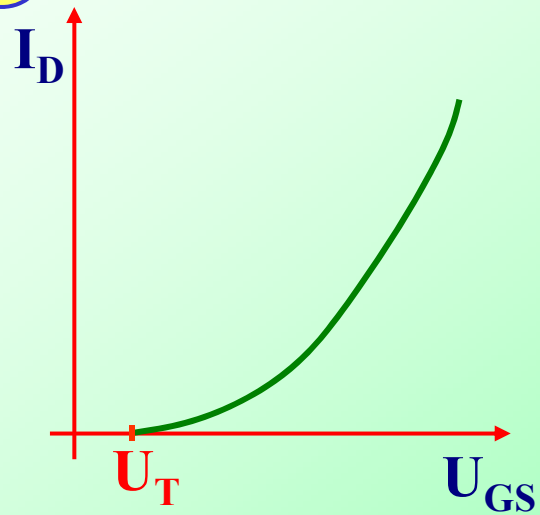
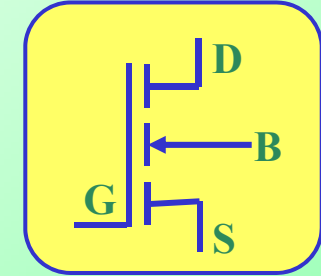
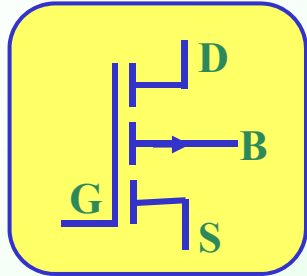


$$U_{GS} > U_T$$

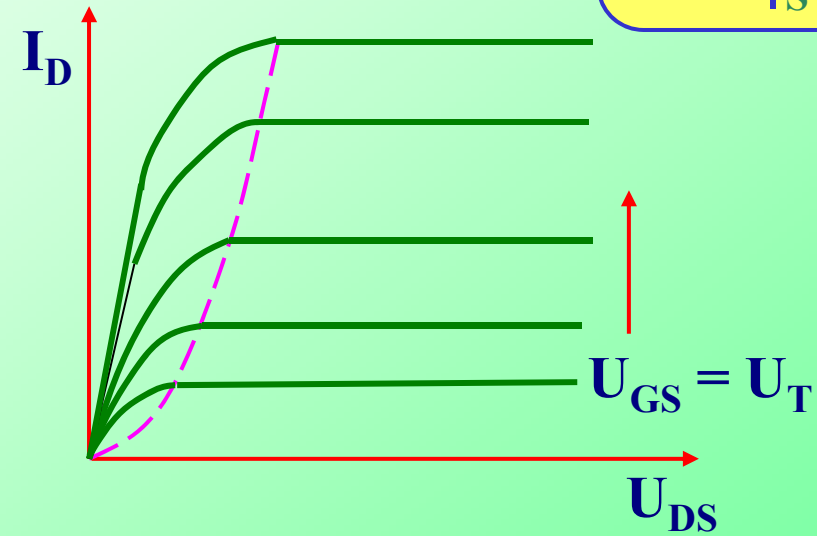
- przy powierzchni warstwa inwersyjna typu p tworzy kanał
- prąd drenu zaczyna płynąć

Tranzystor z kanałem indukowanym

normalnie nieprzewodzący



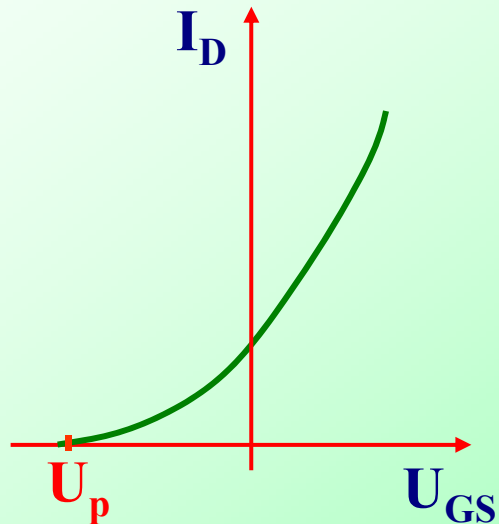
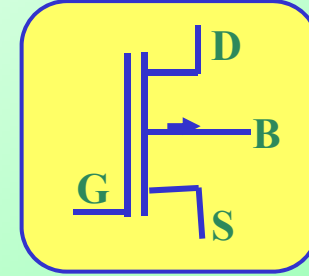
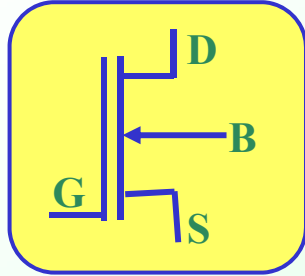
Charakterystyka przejściowa



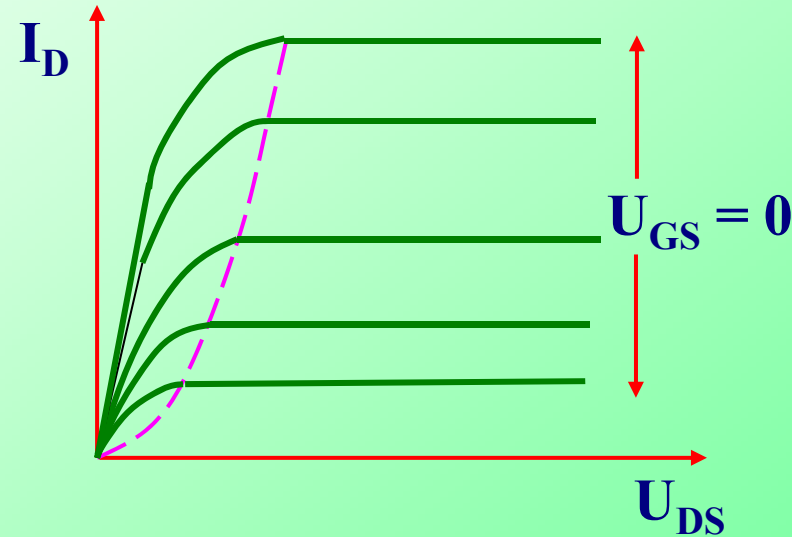
Charakterystyka wyjściowa

Tranzystor z kanałem indukowanym

normalnie przewodzący



Charakterystyka przejściowa



Charakterystyka wyjściowa

Układy scalone

Układ scalony - przyrząd półprzewodnikowy zawierający w jednej strukturze półprzewodnikowej cały obwód elektryczny z:

- przyrządami półprzewodnikowymi (diody, tranzystory)
- elementami biernymi (rezystory, kondensatory)
- połączeniami międzyelementowe (tzw. layout z Al lub Cu)

1958 - pierwszy układ scalony w Bell Lab. (Kilby)

Układy scalone - podziały

Bipolarne - podstawowy element tranzystor bipolarny

Unipolarne - podstawowy element tranzystor polowy MOS

Analogowe - sygnały wejściowe i wyjściowe ciągłe

Cyfrowe - sygnały wejściowe i wyjściowe dyskretne (logiczne "0" i "1")

Cyfrowe IC - podziały

Technologie Bipolarne:

TTL - Transistor-Transistor Logic

ECL - Emiter Coupled Logic

I²L - Integrated Injection Logic

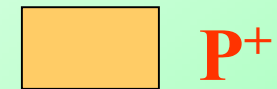
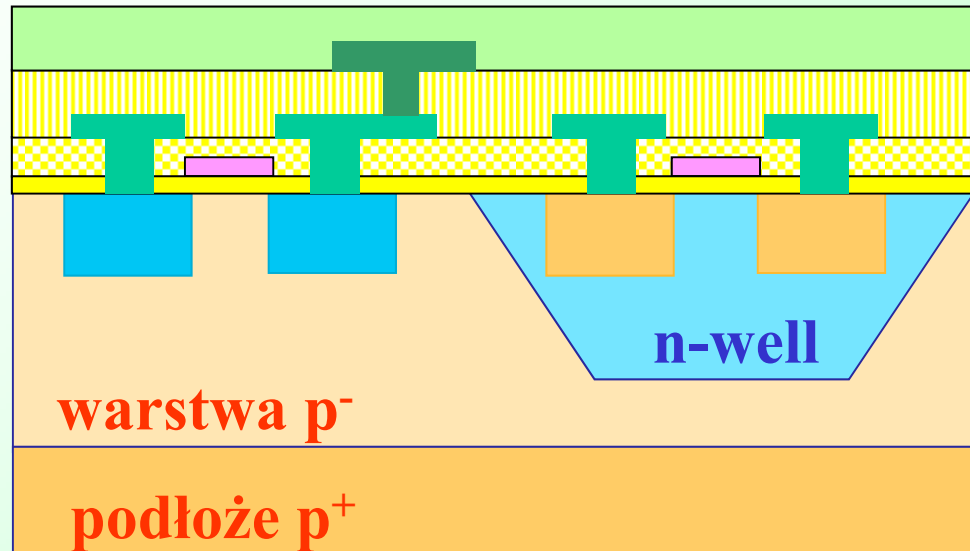
Technologie Unipolarne:

NMOS - tylko tranzystory z kanałem typu n

PMOS - tylko tranzystory z kanałem typu p

CMOS - Complementary MOS, oba typy

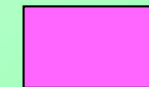
Technologia CMOS



P⁺



n⁺



polikrzem



tlenek podbramkowy



tlenek izolacyjny I



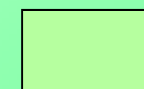
tlenek izolacyjny II



metalizacja I

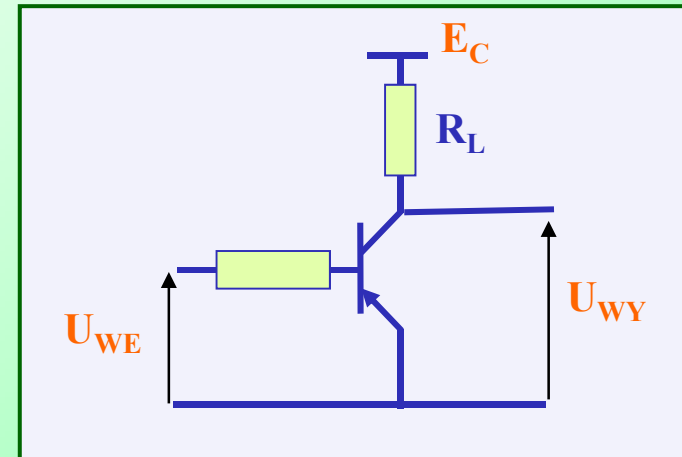
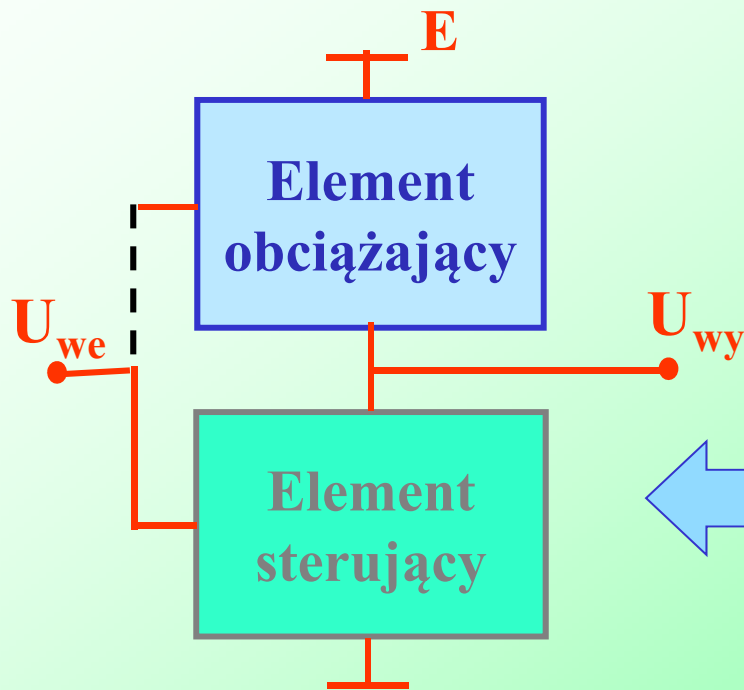


metalizacja II



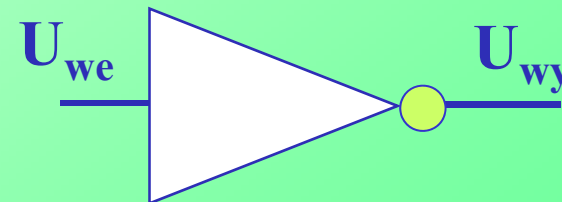
pasywacja

Układy logiczne - Inwerter

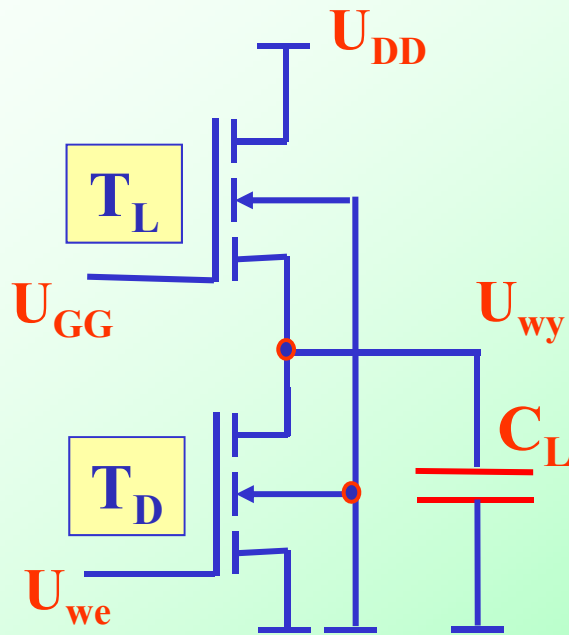


Schemat blokowy

Symbol

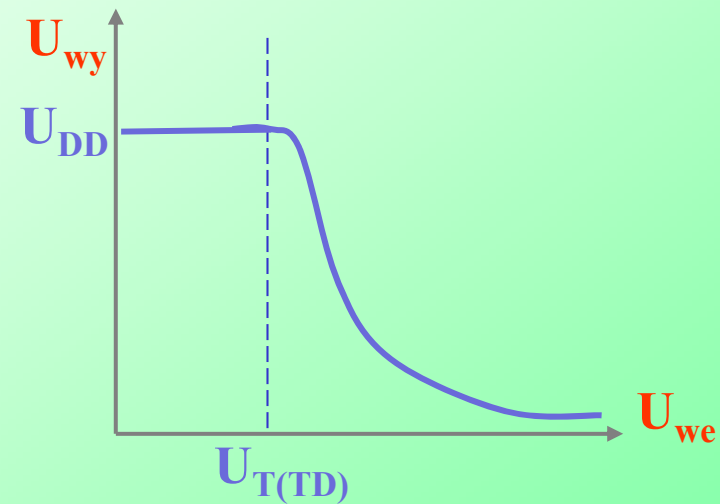


Inwertery - bramka NMOS



zwykle: $U_{GG} = U_{DD}$

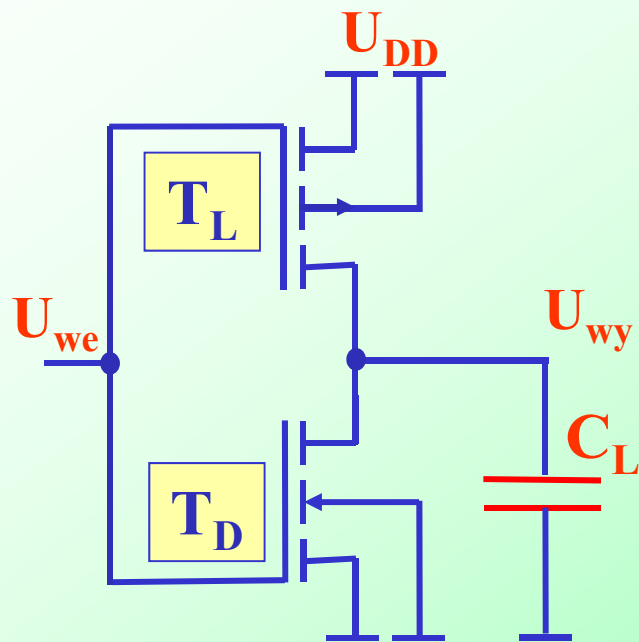
Charakterystyka przejściowa



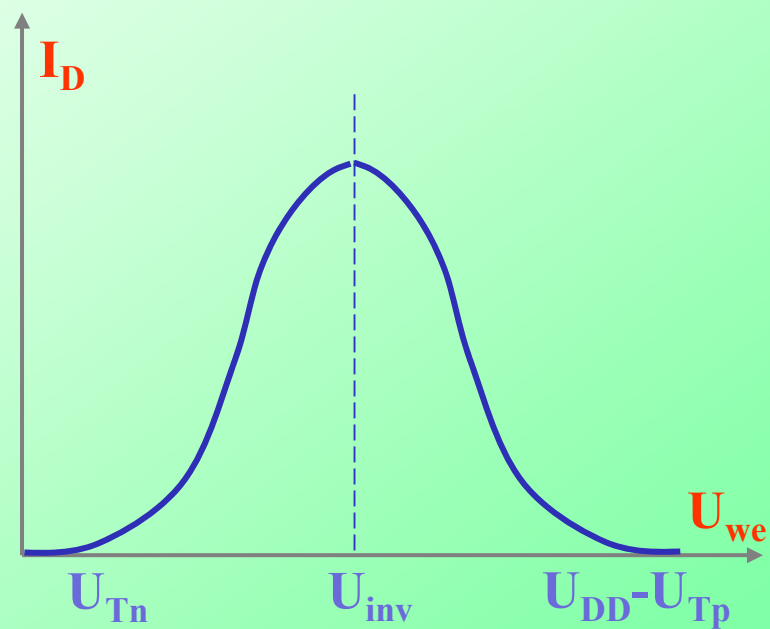
C_L - pojemność obciążenia (kolejne bramki oraz doprowadzenia)

Dla logicznego $W_{wy} = "0"$ płynie stały prąd obciążenia

Inwertery - bramka CMOS



Charakterystyka prądowa

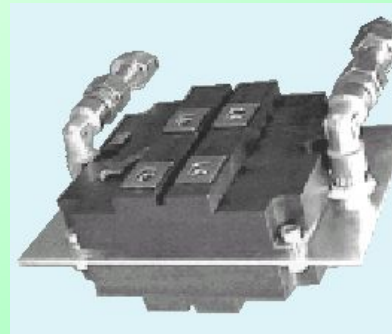


Prąd płynie tylko przy przełączaniu

Przyrządy mocy - przegląd

Podstawowe cechy :

- główne zastosowania – klucze w obwodach DC i AC
- duże wymiary
- wymagają chłodzenia
- duża jednostkowa cena

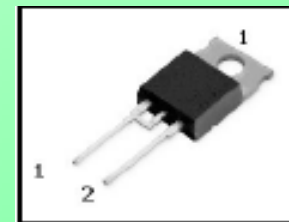
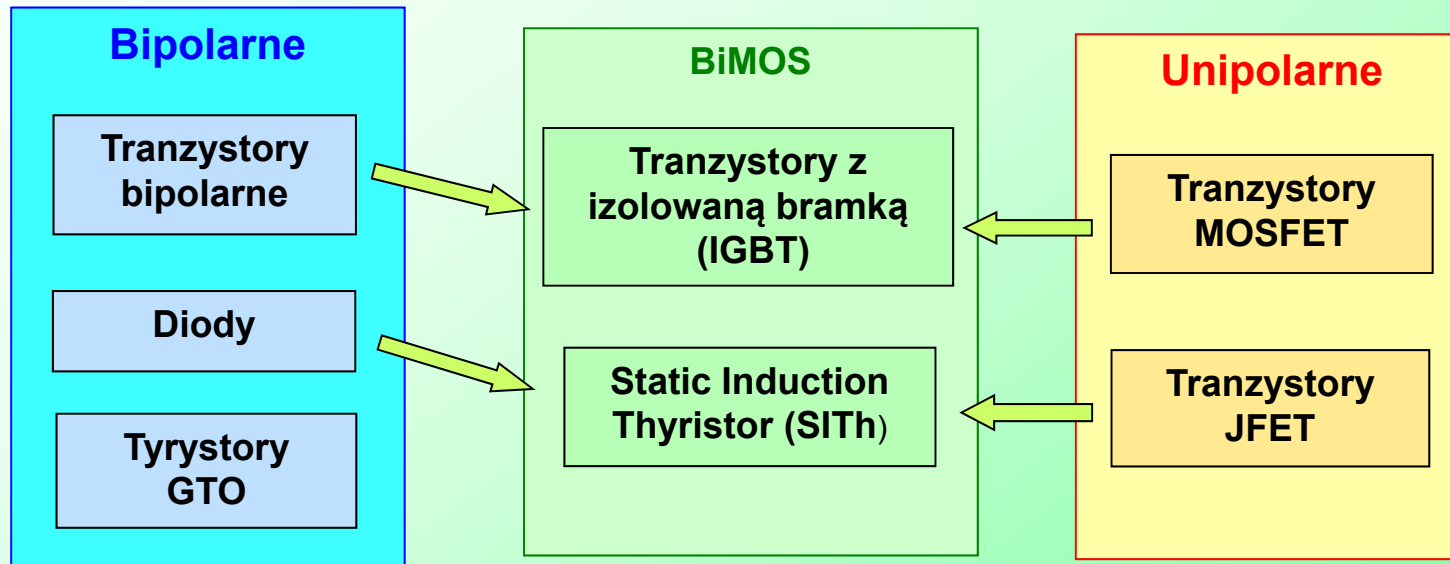


Przyrządy mocy - przegląd

Podstawowe wymagania :

- duży prąd przewodzenia : typowo 40 - 1000 A, **max. 6 kA**
- duże napięcie blokowania : typowo 300V - 2kV, **max. 10 kV**
- duża częstotliwość przełączania : *dla bipolarnych > 10 kHz*
dla unipolarnych > 100kHz
- małe straty mocy ($U_{on}I_{on}$) w stanie przewodzenia
- proste sterowanie

Przyrządy mocy - przegląd



Przyrządy mocy - tyrystor

zasada działania

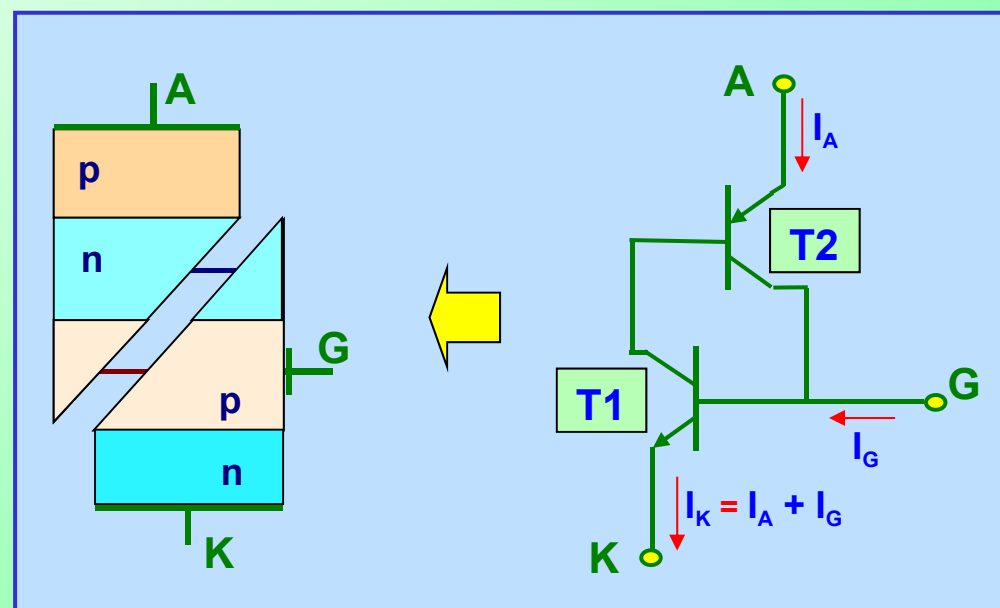
Jest to przyrząd 3-złączowy pochodzący od znanego układu dwu-tranzystorowego, tzw. łącznika TT:

- struktura n-p-n-p
- cztery warstwy
- trzy złącza
- trzy elektrody:

A – anoda

K – katoda

G – bramka

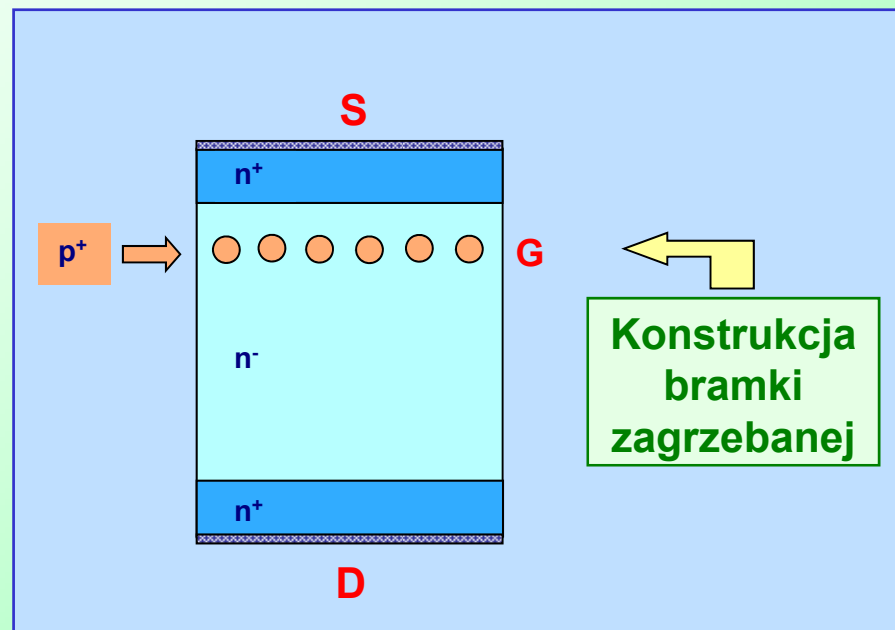


Przyrządy mocy - SIT

zasada działania

Wywodzący się z idei JFET

- **Static Induction Transistor SIT** (*unipolarny*)



Konstrukcja
bramki
zagrzebanej

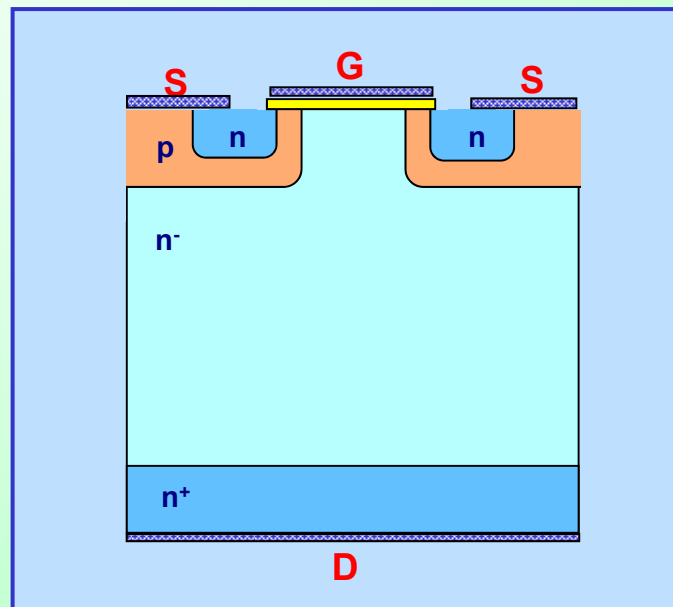
Konstrukcja SIT
jest wzorowana
na idei lampy
elektronowej
„triody”

Przyrządy mocy - VDMOS

zasada działania

Wywodzący się z idei MOSFET

- **Vertical Double Diffusion VDMOS** (*unipolarny*)



Pojedyncza komórka
przyrząd składa się z tysięcy takich komórek

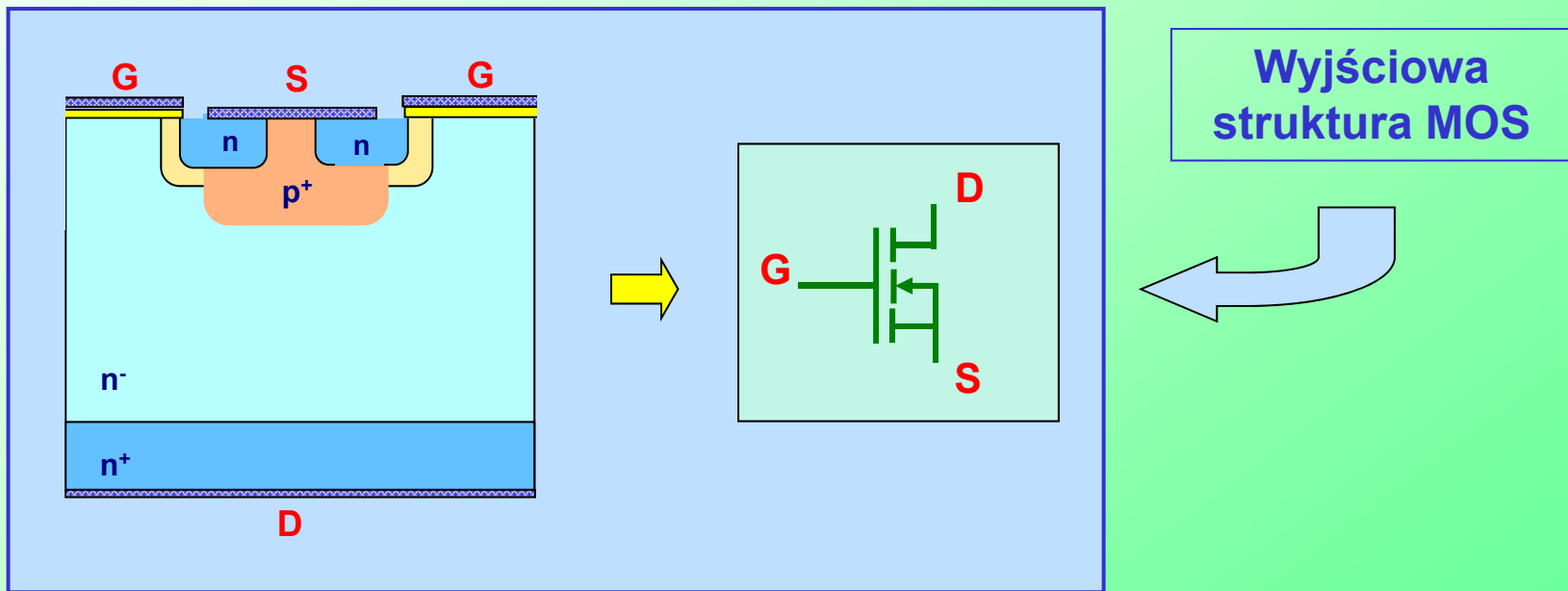
Identyczność komórek MOS jest uzyskiwana dzięki jednorodności procesu podwójnej dyfuzji (jedna maska dla wysp n i p)

Przyrządy mocy - IGBT

zasada działania

Wywodzący się z idei MOSFET

- **Integrated Gate Bipolar Transistor IGBT** (*Bi-MOS*)



Przyrządy mocy - IGBT

zasada działania

Wywodzący się z idei MOSFET

- **Integrated Gate Bipolar Transistor IGBT** (*Bi-MOS*)

