



**POLITECHNIKA  
BYDGOSKA**

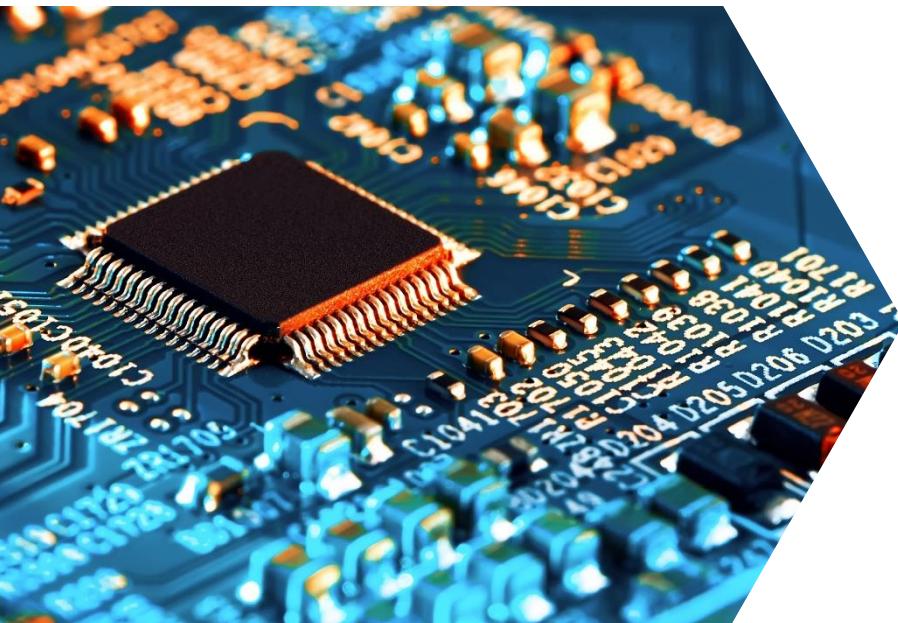
Wydział Telekomunikacji,  
Informatyki i Elektrotechniki

# Podstawy Elektroniki

## Wykład 3

dr inż. Monika Kosowska

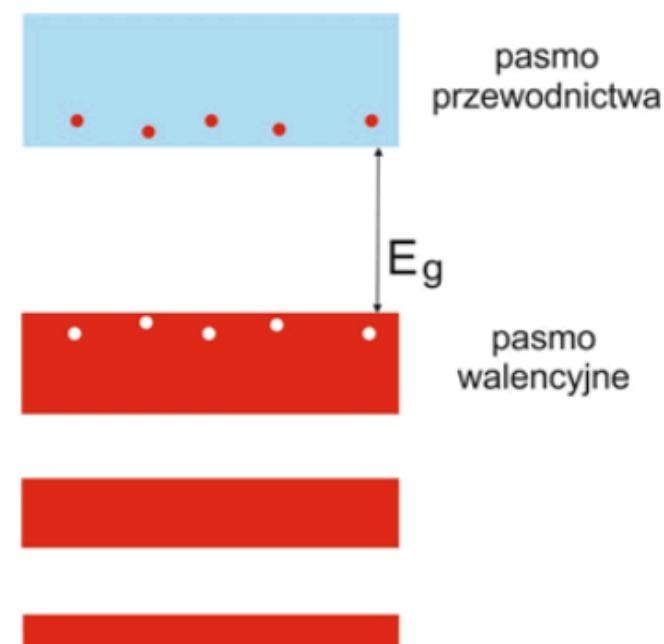




Półprzewodniki,  
złącze p-n, dioda  
półprzewodnikowa

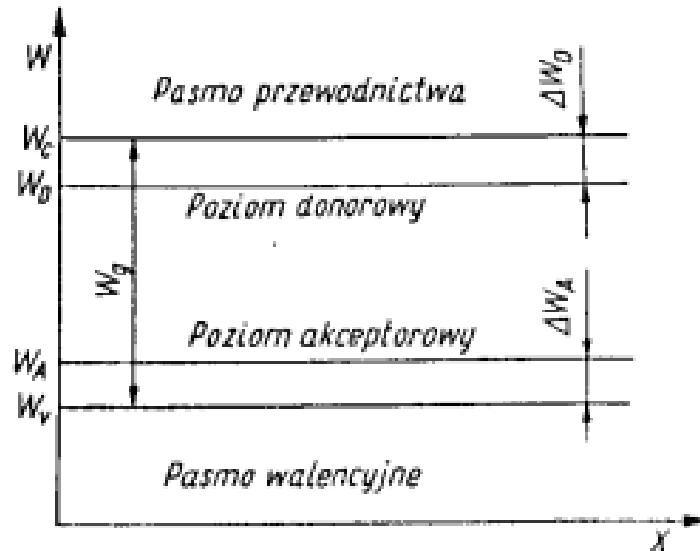
## Półprzewodniki samoistne

- Samoistne – niedomieszkowane
- Koncentracja elektronów = koncentracja dziur
- IV grupa układu okresowego:
  - węgiel
  - krzem
  - german
  - antymonek galu (GaSb)
  - arsenek galu (GaAs)



## Półprzewodniki domieszkowane

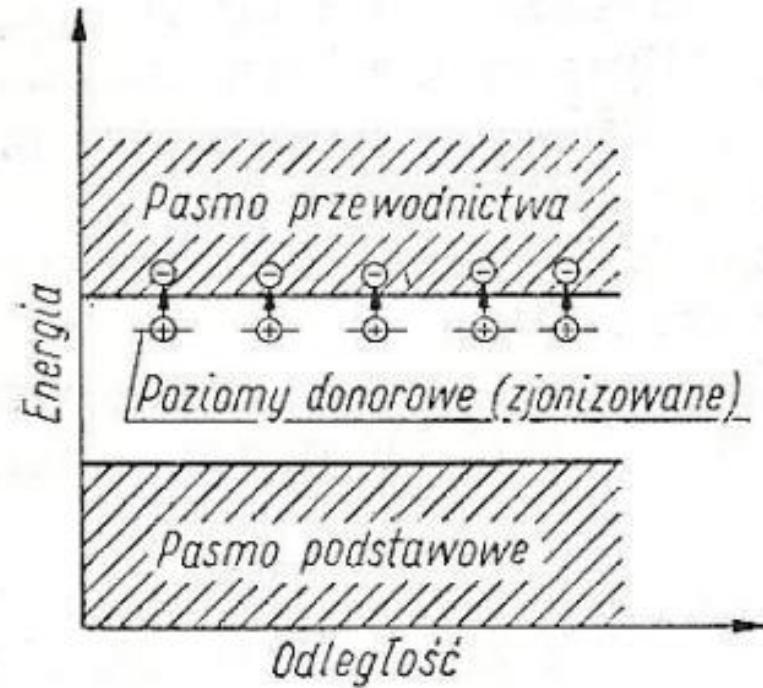
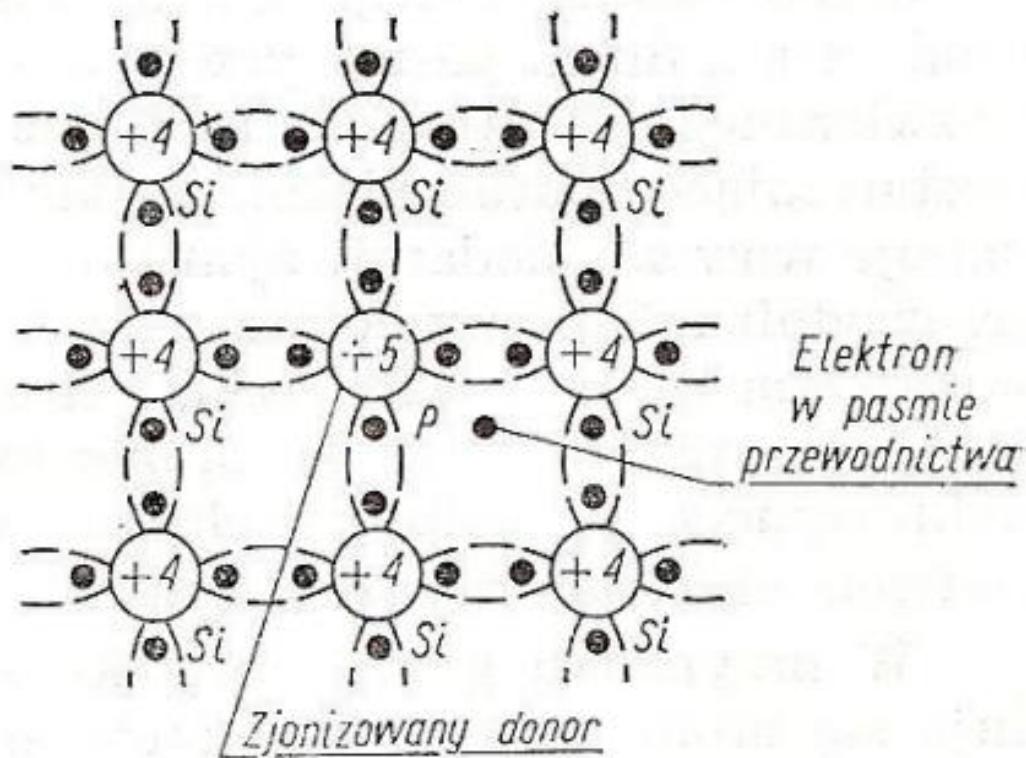
- Wprowadzenie domieszki: zakłócenie atomowe sieci krystalicznej – zwiększenie konduktywności.
- Podstawowe pierwiastki gr. IV: german i krzem domieszkuje się pierwiastkami z
  - gr. III: B – borem, Al – glinem, Ga – galem, In - indem
  - gr. V: P – fosforem, As – arsenem, Sb – antymonem, Bi - bizmutem



## Półprzewodniki domieszkowane

- Typ n

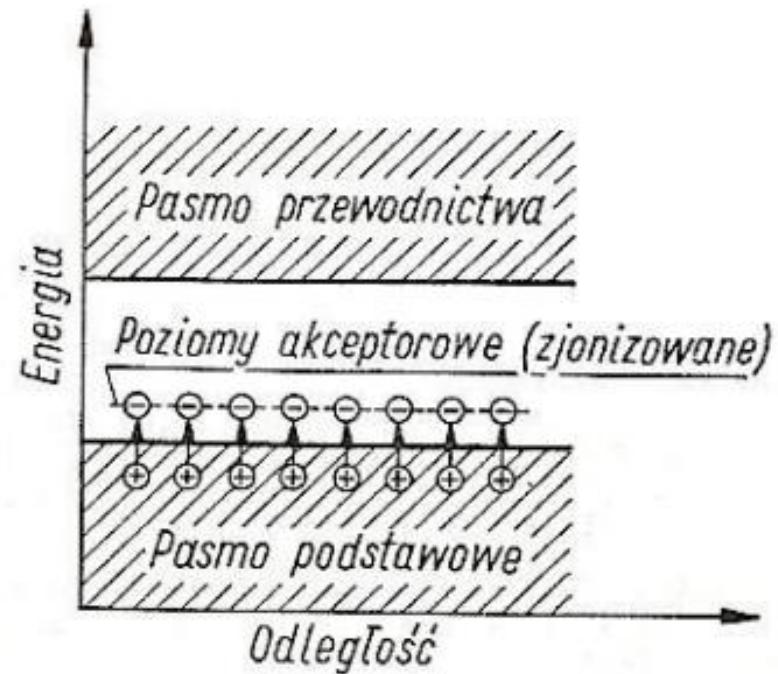
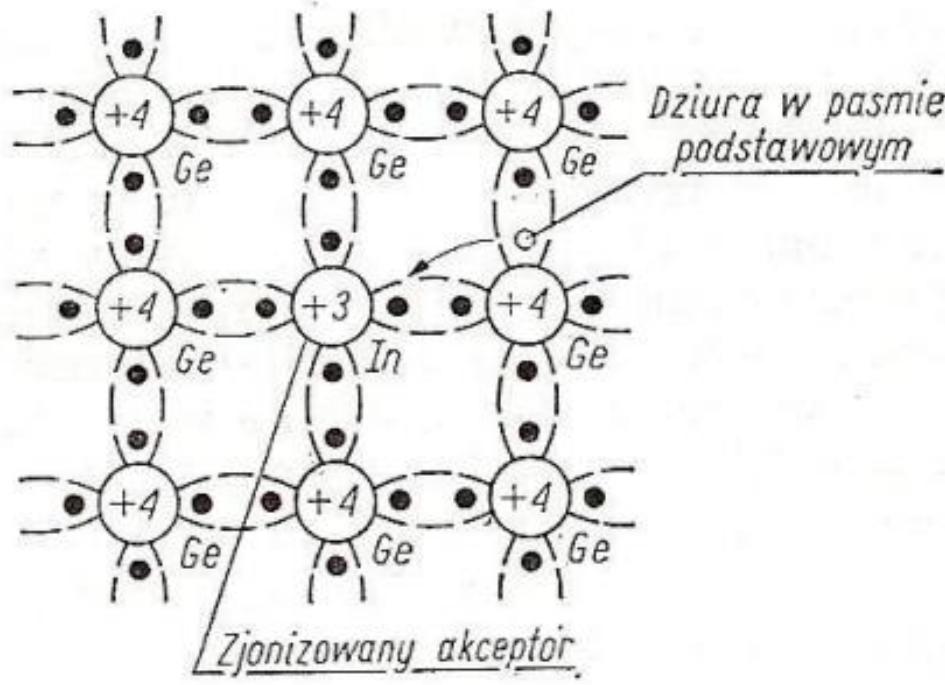
- donorowa (pierwiastkiem pięciowartościowym) – **typ n półprzewodnika**



## Półprzewodniki domieszkowane

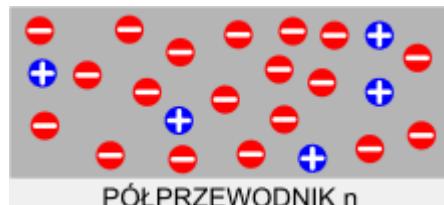
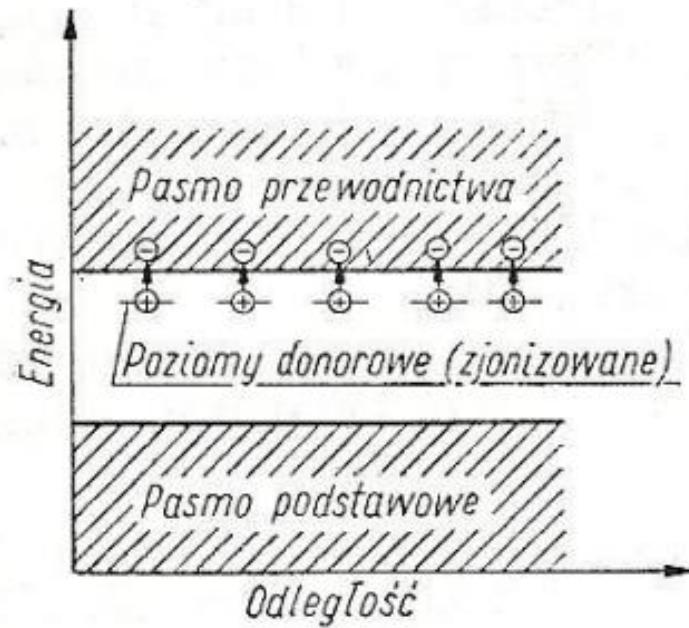
- Typ p

- akceptorowa (pierwiastkiem trójwartościowym) – typ p półprzewodnika

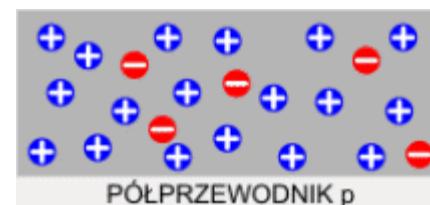
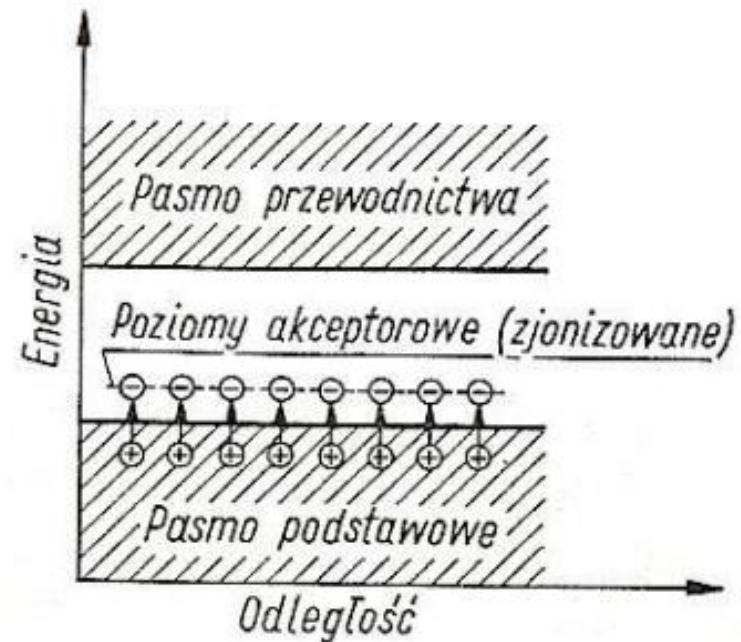


## Półprzewodniki domieszkowane

- Typ n

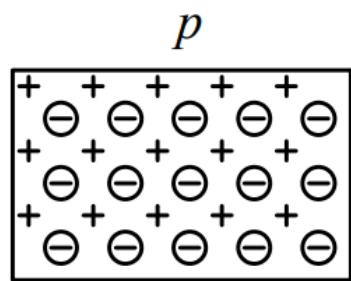


- Typ p

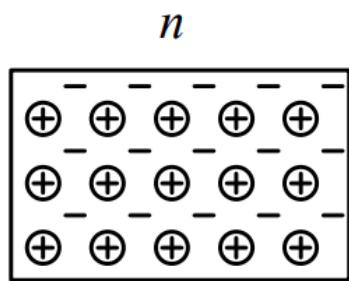


## Złącze p-n

a)

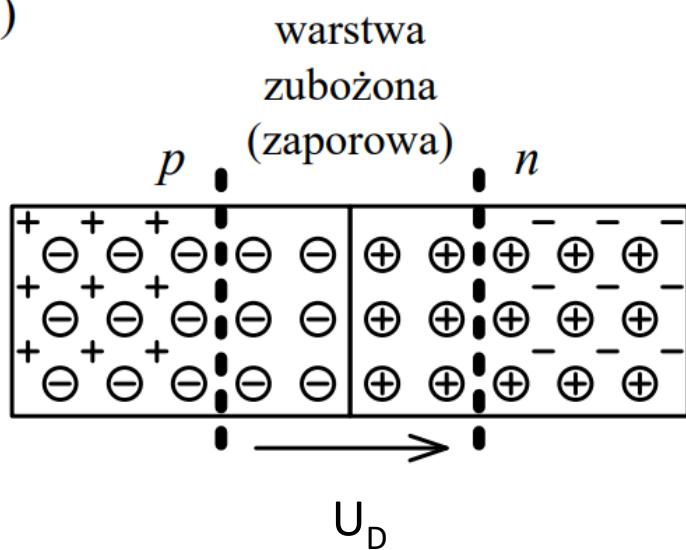


+



=

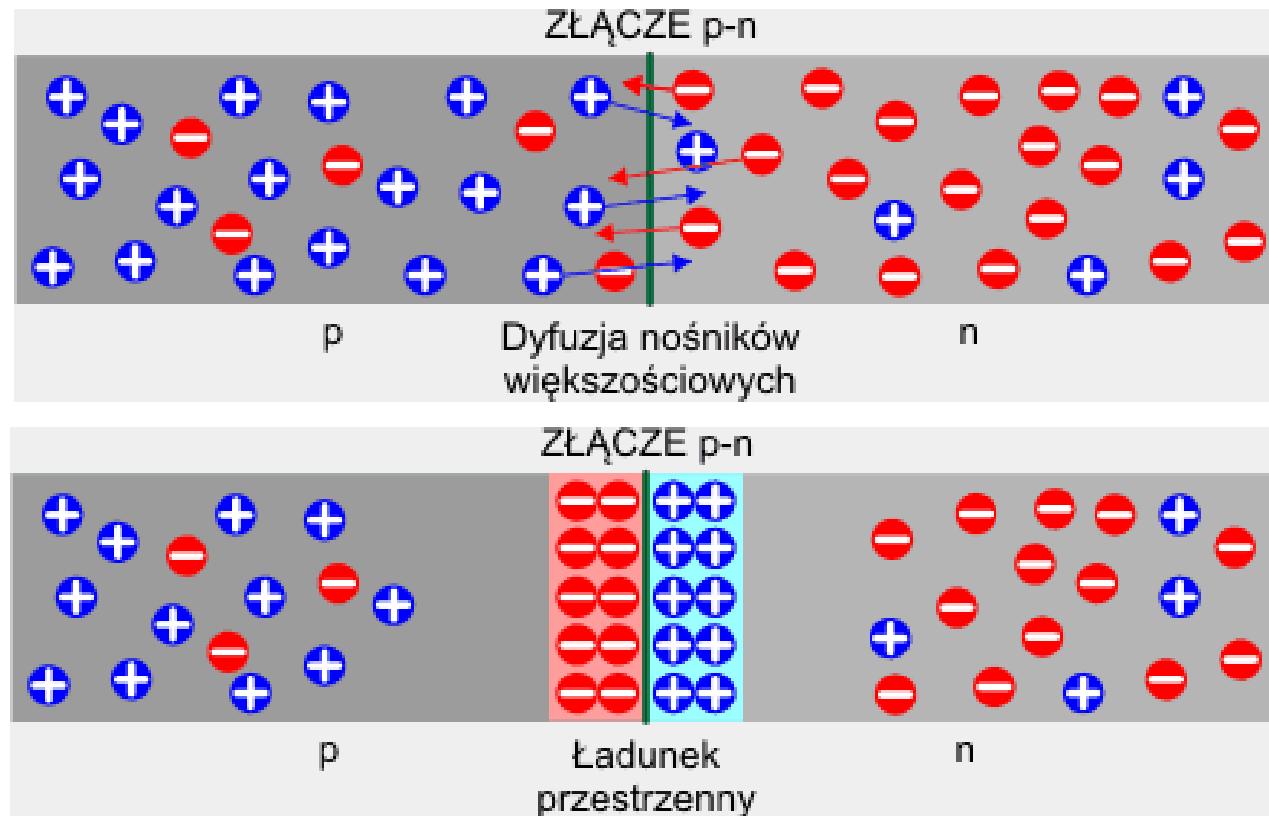
b)



$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

gdzie:  $q$  - ładunek elektronu,  $k$  - stała Boltzmana,  $T$  - temperatura,  $N_a$  - koncentracja akceptorów,  $N_d$  - koncentracja donorów,  $n_i$  - koncentracja samoistna półprzewodnika.

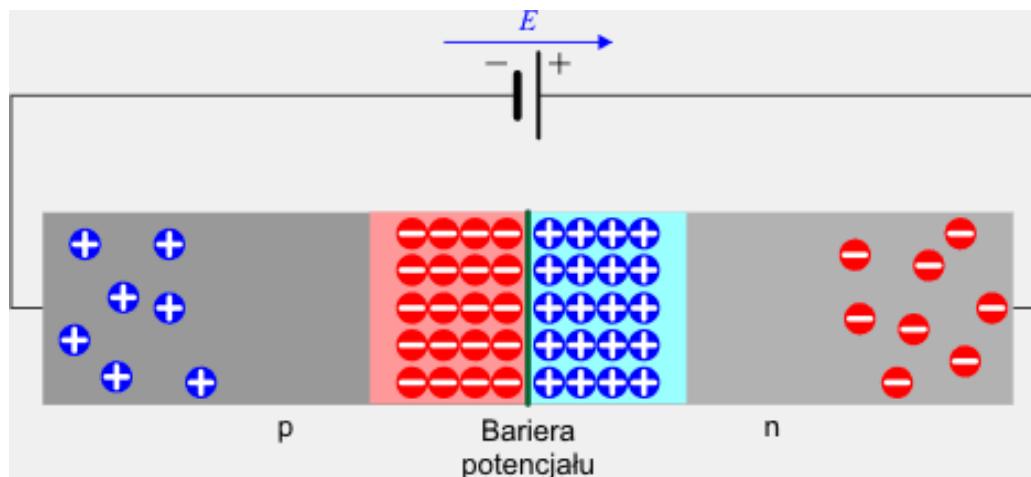
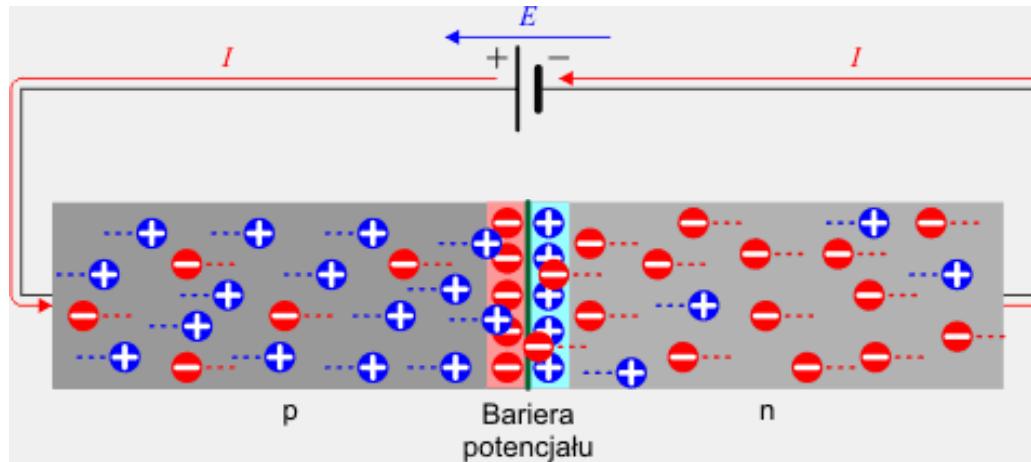
# Złącze p-n

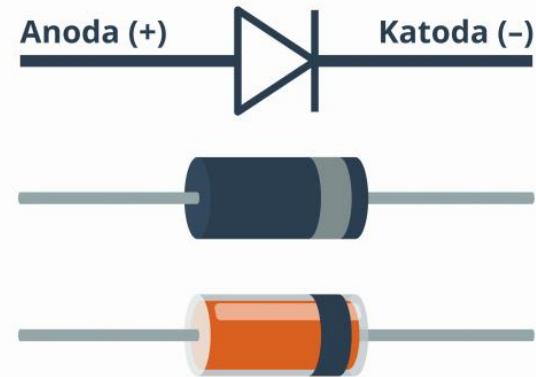


$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

gdzie:  $q$  - ładunek elektronu,  $k$  - stała Boltzmana,  $T$  - temperatura,  $N_a$  - koncentracja akceptorów,  $N_d$  - koncentracja donorów,  $n_i$  - koncentracja samoistna półprzewodnika.

## Złącze p-n





## Dioda półprzewodnikowa

Równanie Shockleya

$$I = I_S \cdot \left( e^{\frac{U_D}{c}} - 1 \right)$$

$I_S$  - prąd nasycenia złącza,  $c$  – stała charakterystyczna dla konkretnej diody i temperatury pracy

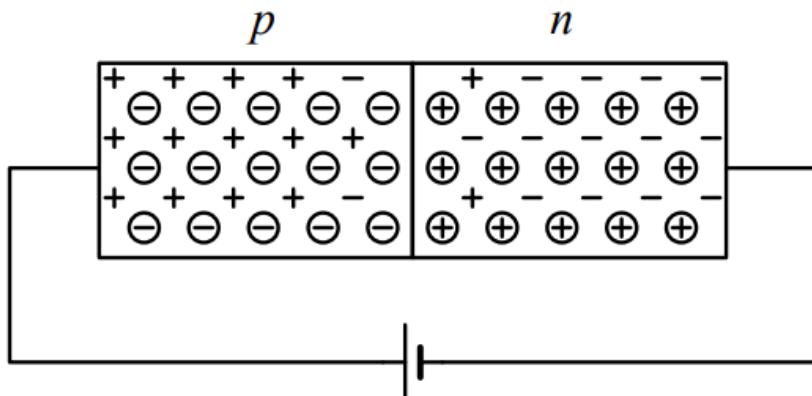
Przykładowe diody /zastosowanie:

- prostownicze
- stabilizacyjne
- impulsowe
- elektroluminesencyjne

## Dioda

a)

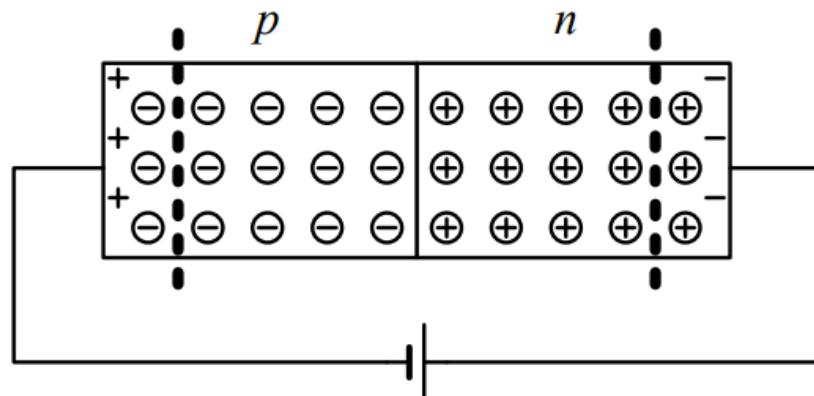
zawężenie warstwy zubożonej



polaryzacja w kierunku  
przewodzenia

b)

poszerzenie warstwy zubożonej



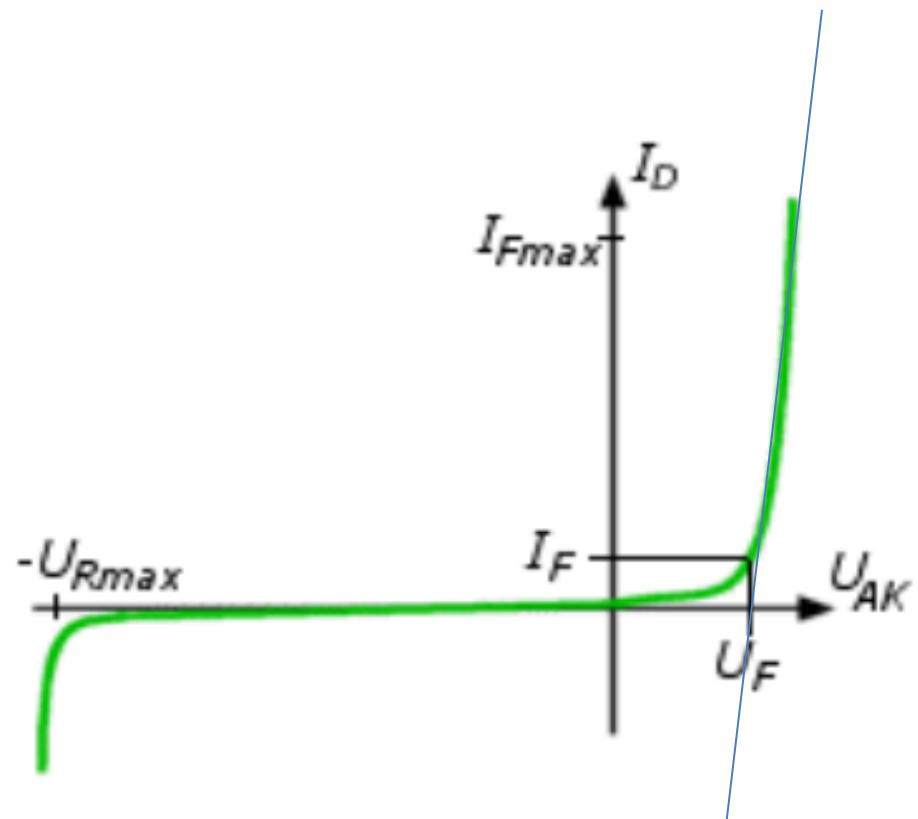
polaryzacja w kierunku  
zaporowym



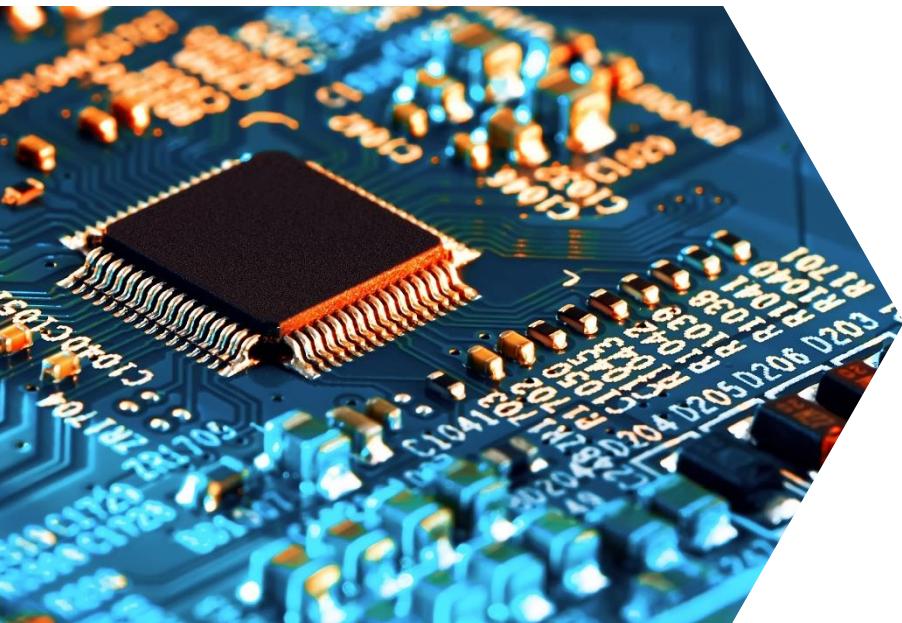
## Dioda półprzewodnikowa

### Parametry

- Maksymalne napięcie wsteczne
- Maksymalny prąd przewodzenia
- Maksymalna moc strat
- Napięcie przewodzenia



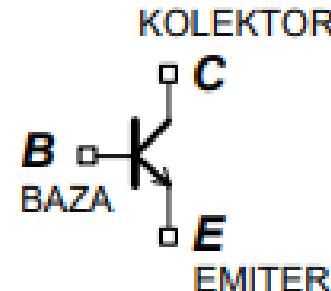
Charakterystyka prądowo – napięciowa.



# Tranzystor bipolarny

## Tranzystor bipolarny

- Element czynny o trzech końcówkach:
  - B – baza
  - C – kolektor
  - E – emiter



Zależności:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$\beta$  – wzmocnienie prądowe  
 $I_C$  – prąd kolektora  
 $I_B$  – prąd bazy

$$I_C = \beta * I_B$$

$$I_E = I_B + I_C$$

- Wzmocnienie prądowe
- Maksymalne napięcie kolektor-emiter  $U_{CE}$
- Maksymalny prąd kolektora  $I_{cmax}$
- Maksymalna moc tracona  $P_{TOT}$
- Częstotliwość graniczna



## Tranzystor bipolarny

- Dwie wersje:
  - n-p-n (n – kolektor i emiter, p – baza)
  - p-n-p (p – kolektor i emiter, n – baza)

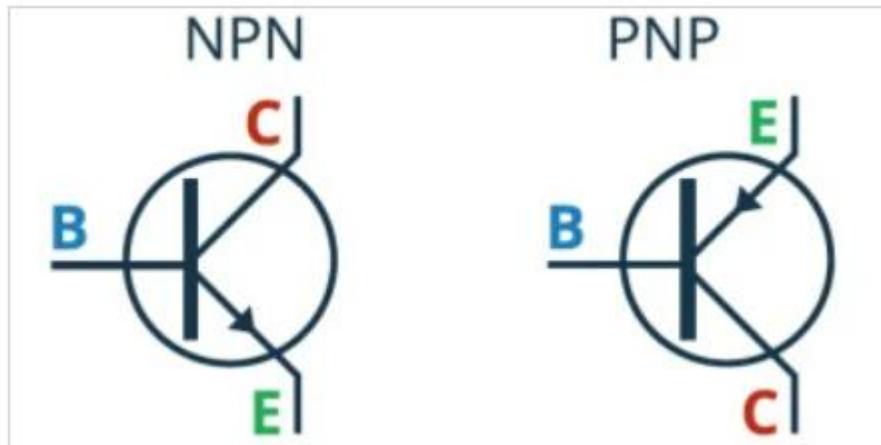
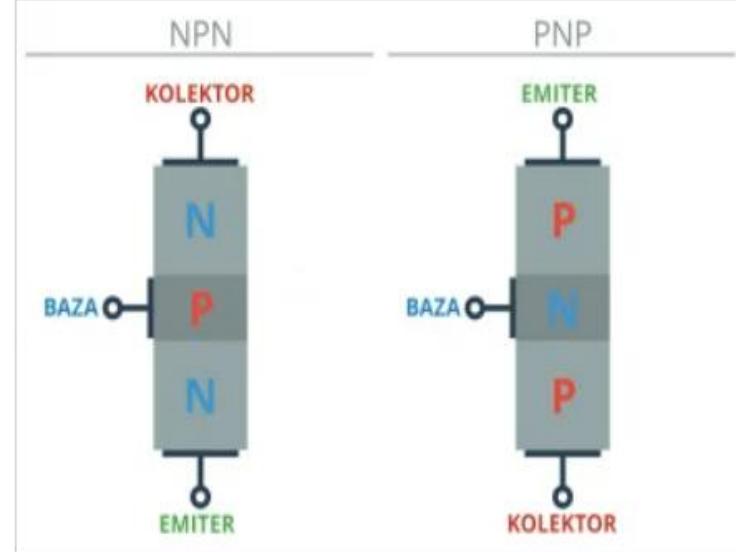
- złącze emiter-baza spolaryzowane w kierunku przewodzenia
- złącze baza-kolektor spolaryzowane w kierunku zaporowym

Dla NPN oznacza to:

$$U_{EB} < 0 \text{ oraz } U_{CB} > 0 \quad (U_{BE} > 0, U_{CE} > 0)$$

Dla PNP oznacza to:

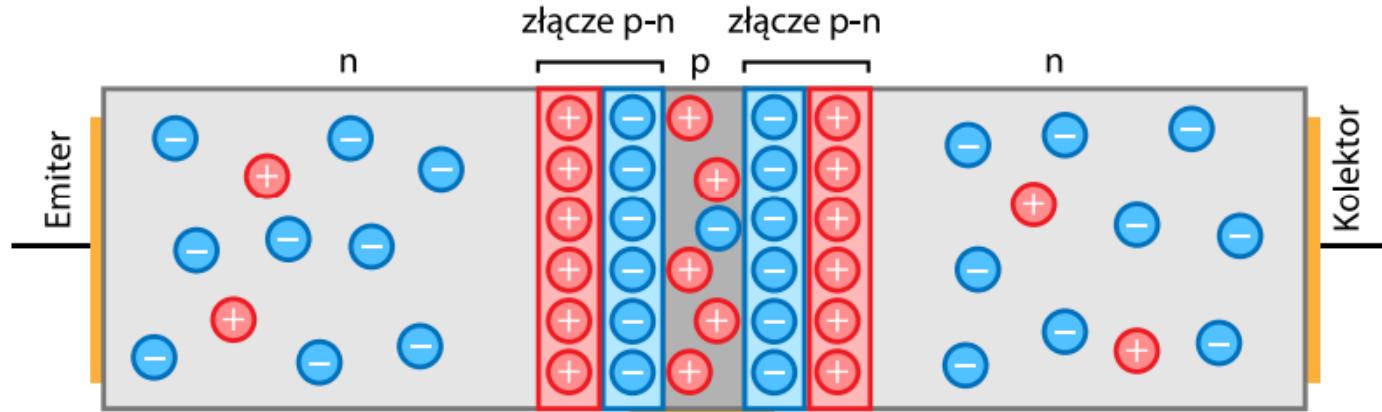
$$U_{EB} > 0 \text{ oraz } U_{CB} < 0 \quad (U_{BE} < 0, U_{CE} < 0)$$



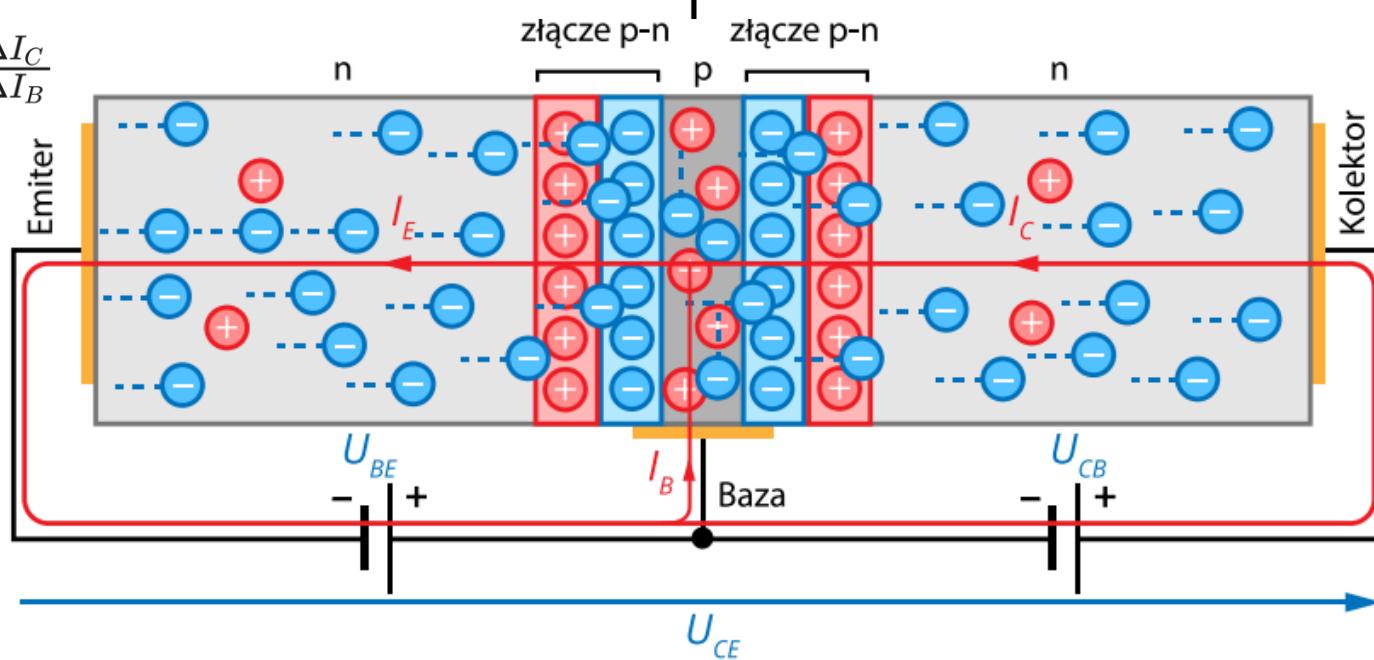
## Tranzystory bipolarne

W stanie aktywnym:

- złącze emiter-baza spolaryzowane w kierunku przewodzenia,
- złącze baza-kolektor spolaryzowane w kierunku zaporowym.

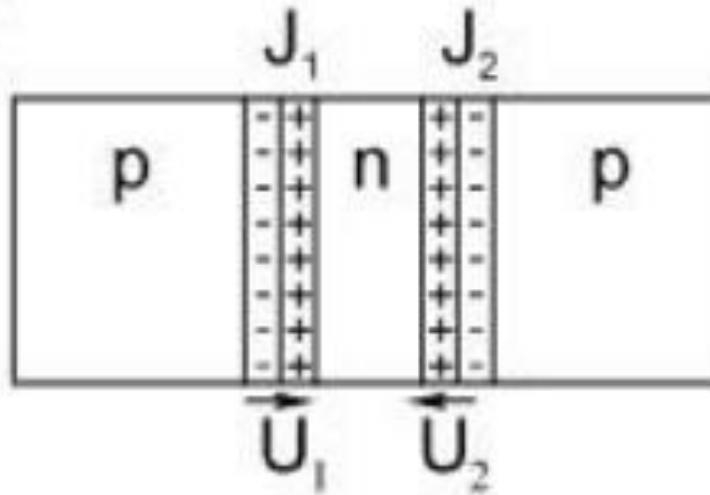


$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$



## Zasada działania PNP

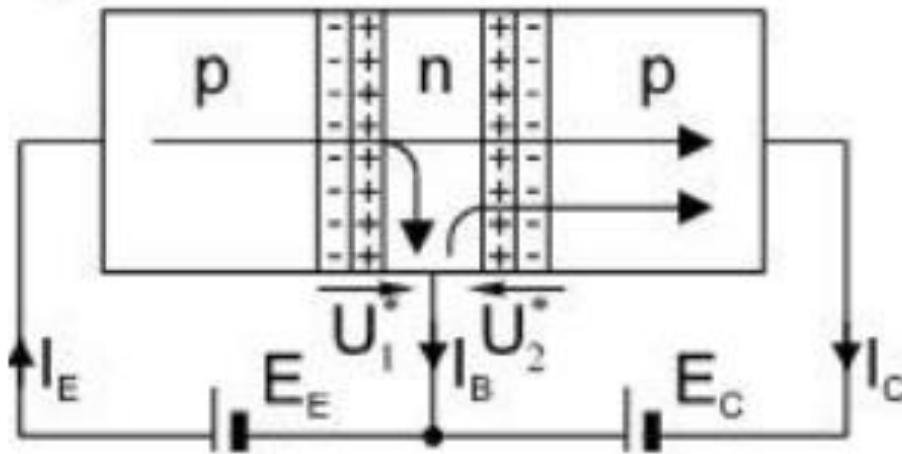
a)



Tranzystor niespolaryzowany

$$U_1 = U_2$$

b)

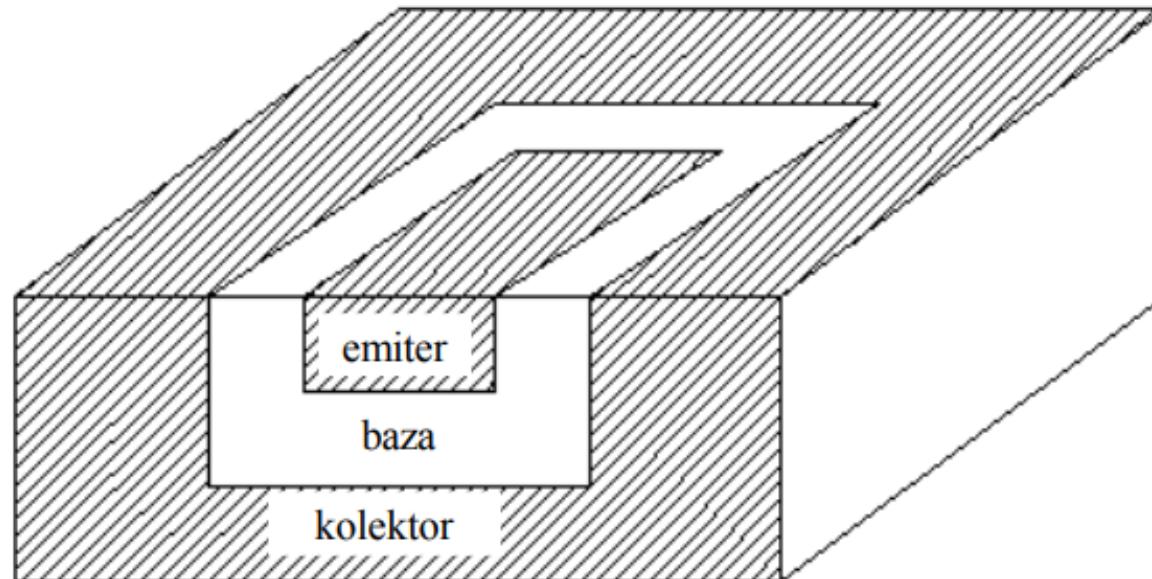


Tranzystor spolaryzowany

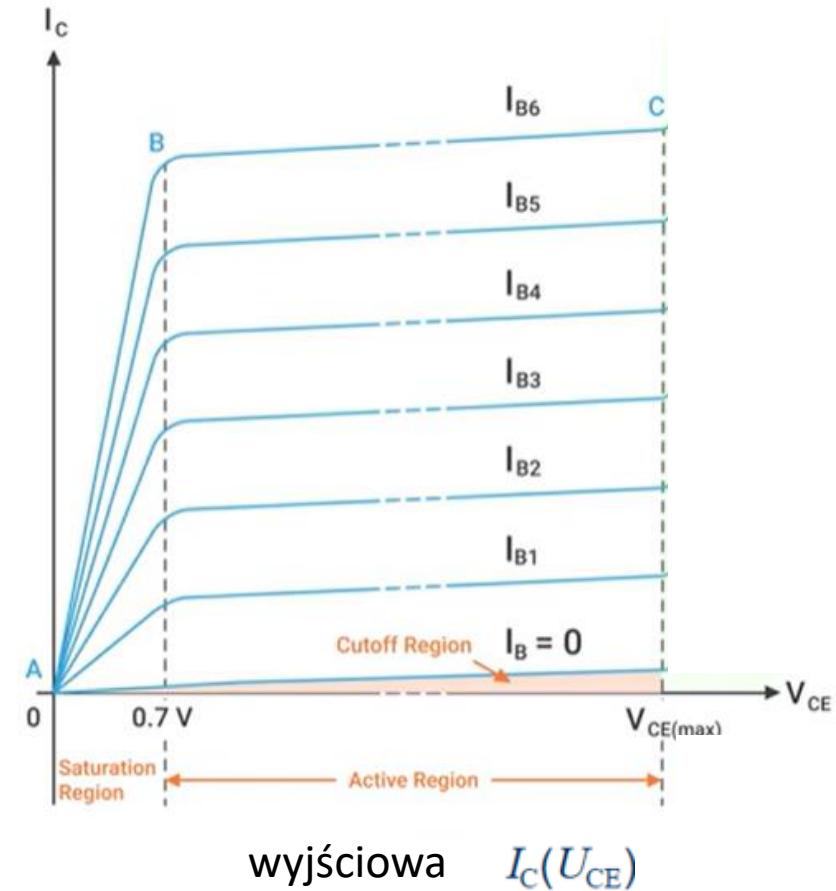
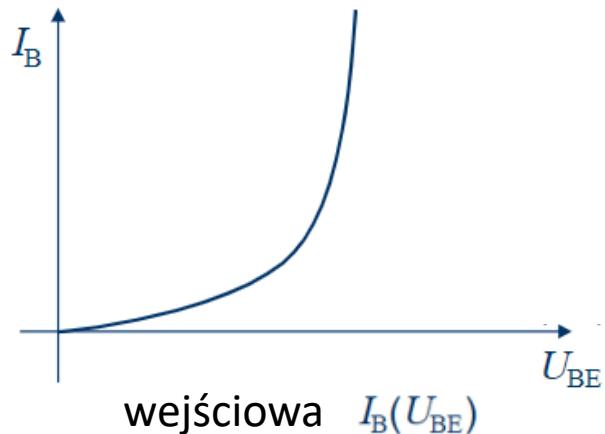
$$U_1^* < U_1$$

$$U_2^* > U_2$$

## Budowa tranzystora



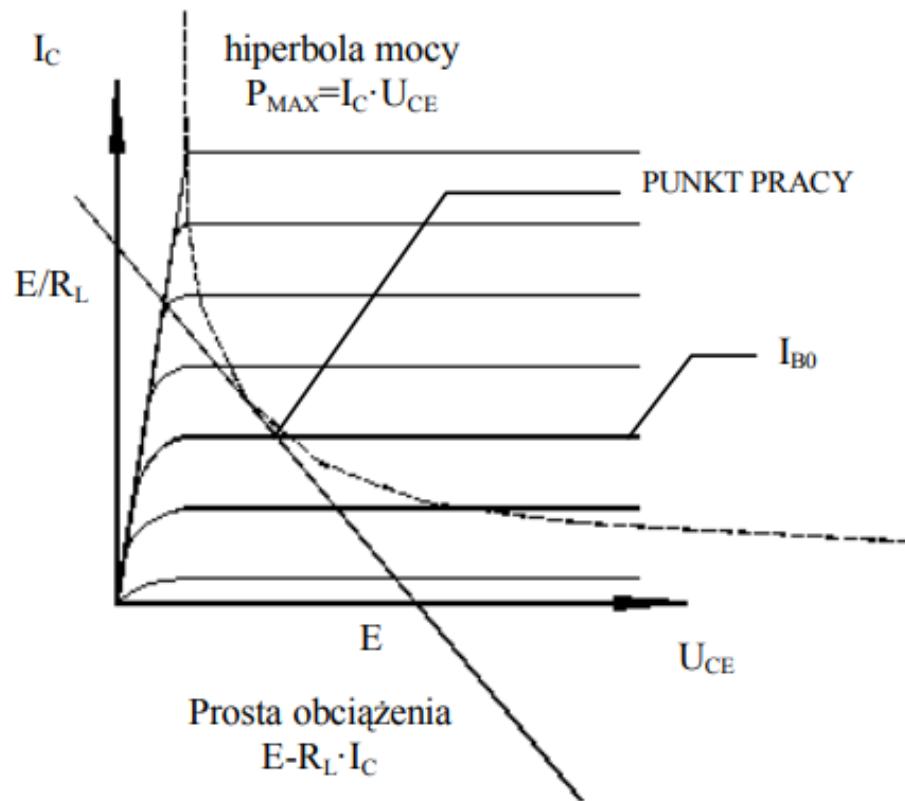
## Charakterystyki



- Stan nasycenia, w którym prąd bazy jest na tyle duży, że obwód kolektora nie jest w stanie dostarczyć prądu  $\beta$  razy większego.
- Stan zatkania (lub odcięcia), w którym złącze baza-emiter nie jest spolaryzowane lub jest spolaryzowane zaporowo.
- Stan aktywny, w którym prąd kolektora jest  $\beta$  razy większy od prądu bazy.

## Punkt pracy

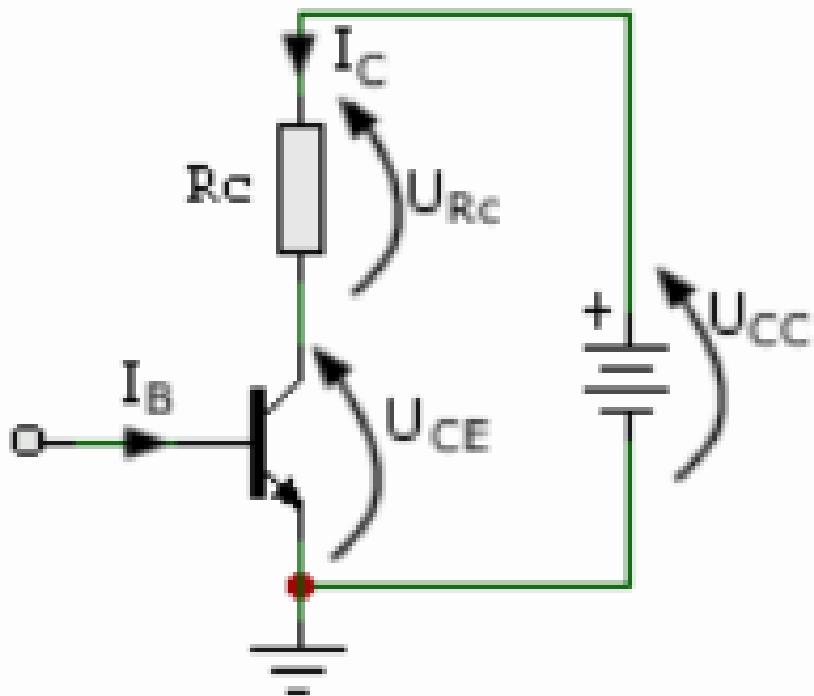
Optymalny punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu jest wyznaczony przez taki prąd kolektora, przy którym na kolektorze panuje napięcie równe połowie napięcia zasilania.



- ⇒ wielkość wzmacnienia
- ⇒ ograniczenia mocy wydzielanej w tranzystorach
- ⇒ poziomy napięć i prądów wyjściowych układu
- ⇒ ograniczenia częstotliwościowe (pasmo pracy)
- ⇒ zniekształcenia nieliniowe
- ⇒ poziom szumów
- ⇒ poziom impedancji wejściowej i wyjściowej
- ⇒ warunki zasilania

## Punkt pracy

Z NPK i Prawa Ohma



$$U_{CC} = U_{RC} + U_{CE}$$

$$U_{CC} = I_C \cdot R_C + U_{CE}$$

y      x

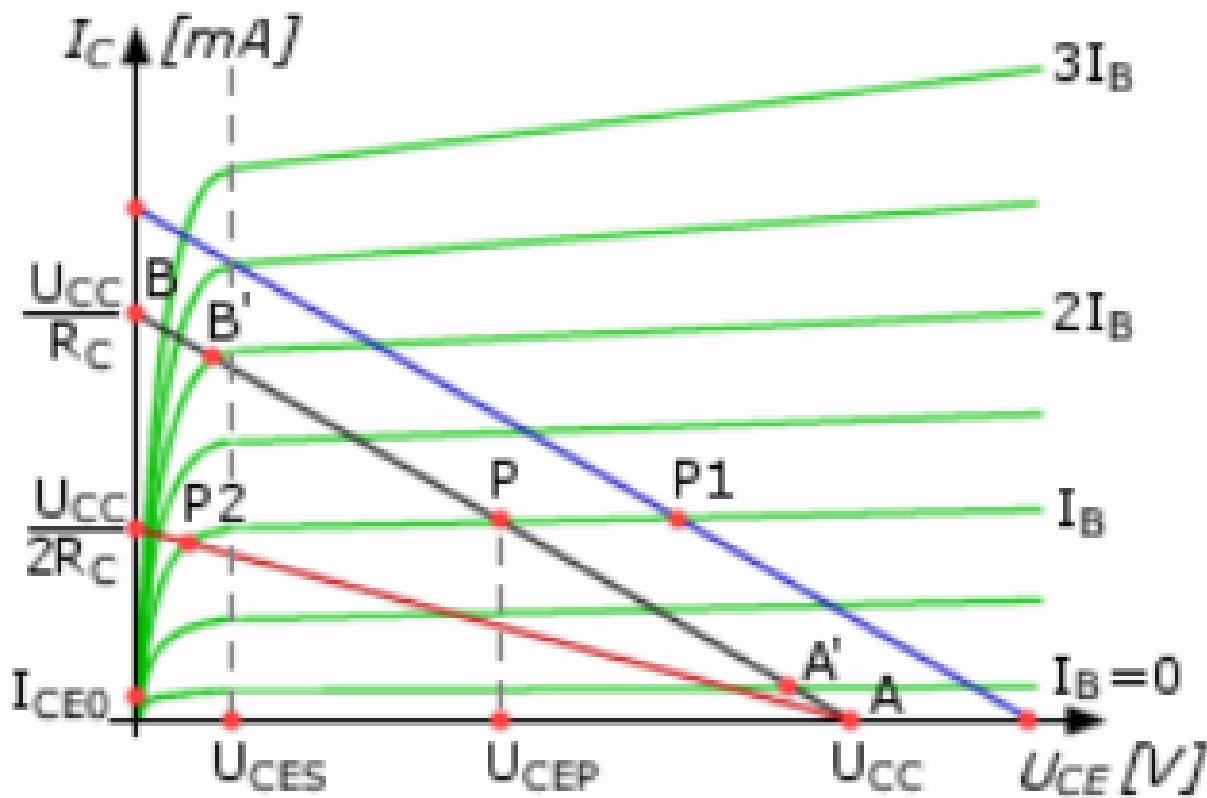
$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_C} - \frac{U_{CE}}{R_C}$$

$$y = -ax + b$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} \cdot U_{CE} + \frac{U_{CC}}{R_C}$$

## Punkt pracy

$$I_C = -\frac{1}{R_C} \cdot U_{CE} + \frac{U_{CC}}{R_C}$$



Dla  $I_c = 0$

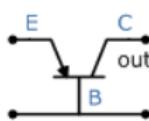
$$0 = -U_{CE}/R_C + U_{CC}/R_C$$

$$U_{CE} = U_{CC}$$

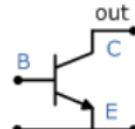
Dla  $U_{CE} = 0$

$$I_C = U_{CC}/R_C$$

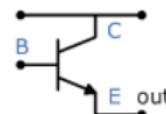
## Układy pracy



Układ ze wspólną  
bazą  
OB

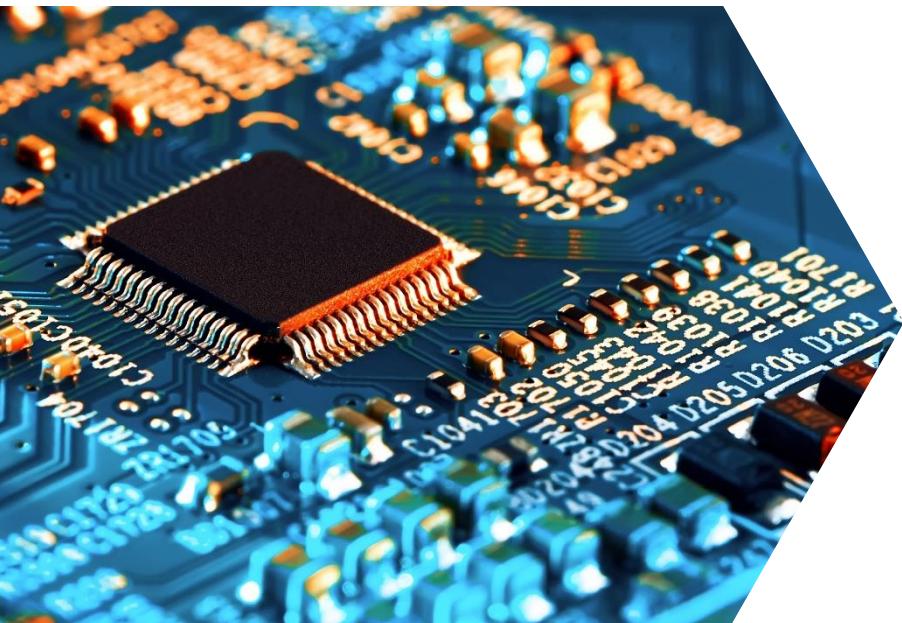


Układ ze wspólnym  
emiterem  
OE



Układ ze wspólnym  
kolektorem  
OC

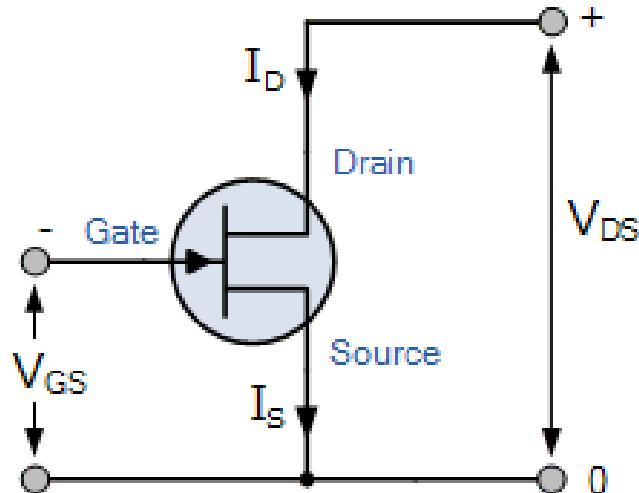
Parametr \ Połączenie	OB	OE	OC
Rezystancja wejściowa	mała (kilkadziesiąt omów)	średnia (kilkaset omów)	bardzo duża (kilkaset kiloomów)
Rezystancja wyjściowa	bardzo duża (kilkaset kiloomów)	duża (kilkadziesiąt kiloomów)	mała (kilkadziesiąt omów)
Wzmocnienie prądowe (przenoszenie prądowe)	nieco mniejsze od jedności	kilka do kilkuset	kilka do kilkuset
Wzmocnienie napięciowe	kilkaset do kilku tysięcy	kilkaset do kilku tysięcy	nieco mniejsze od jedności
Wzmocnienie mocy	kilka tysięcy	kilka do kilkudziesięciu tysięcy	kilkadziesiąt tysięcy
Napięcie sygnału wejściowego i wyjściowego przy małych częstotliwościach	w fazie	odwrócone o 180°	w fazie



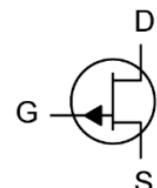
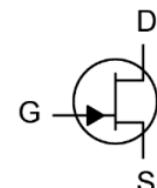
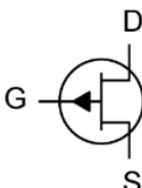
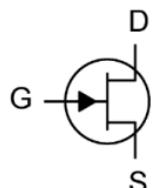
# Tranzystor JFET

## Tranzystor polowy złączowy JFET

- Junction Field Effect Transistor



oznaczenia



*n*-channel JFET

*p*-channel JFET

*n*-channel JFET

*p*-channel JFET

Tranzystor bipolarny (BJT)

Tranzystor polowy (FET)

Emiter - (E) >> Źródło - (S)

Baza - (B) >> Bramka - (G)

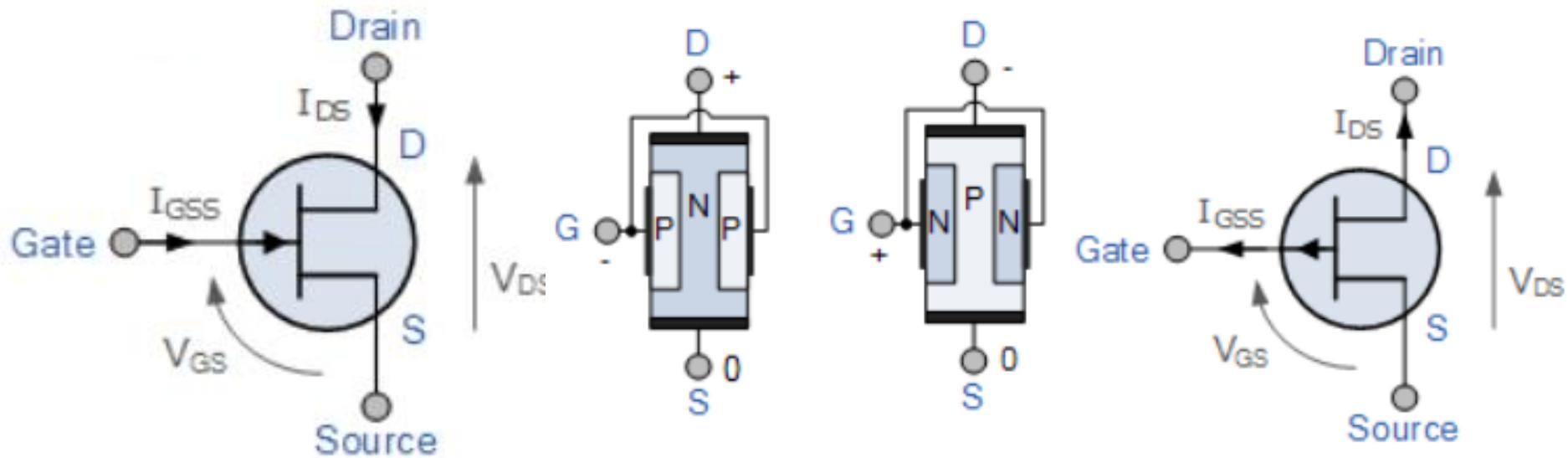
Kolektor - (C) >> Dren - (D)

Parametry:

- napięcie odcięcia
- napięcie progowe
- prąd nasycenia
- prąd wyłączenia
- dopuszczalny prąd drenu i bramki
- maksymalne napięcie dren-źródło
- maksymalna moc strat



## Tranzystor JFET



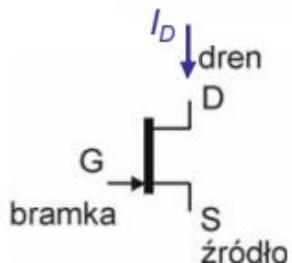
- JFET z kanałem typu n

$$V_{Tn} < 0$$

Typowa polaryzacja

$$V_{GS} < 0$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{Tn} > 0 \text{ V}$$



Przeciwe znaki  
napięcia progowego,  
prądów i napięć!



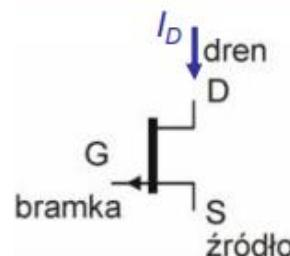
- JFET z kanałem typu p

$$V_{Tp} > 0$$

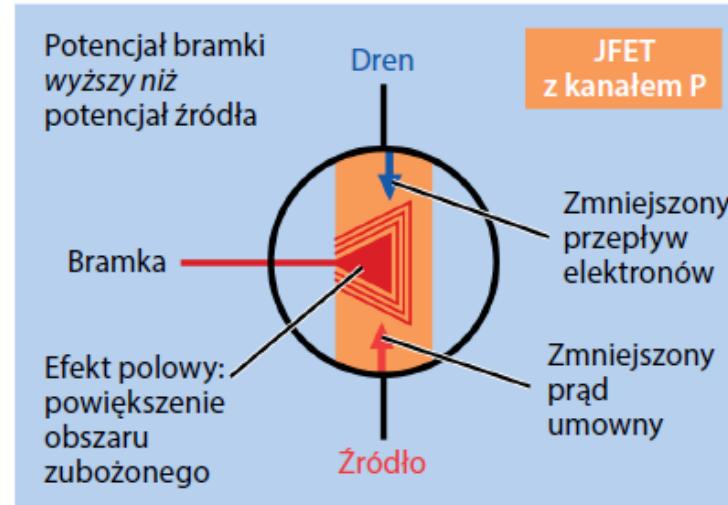
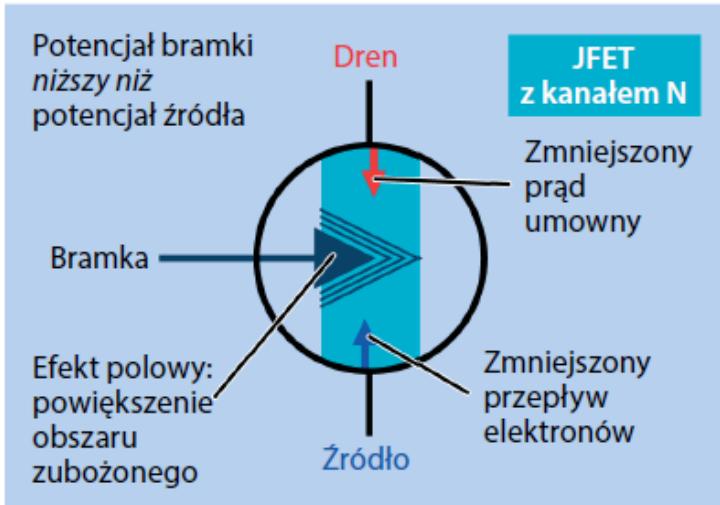
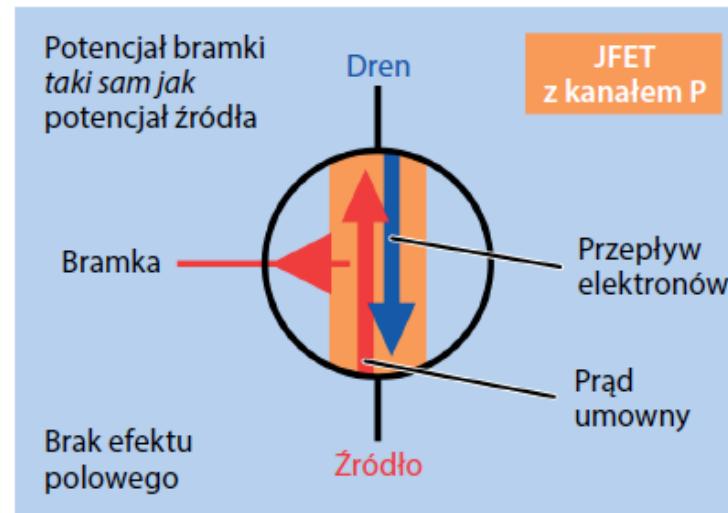
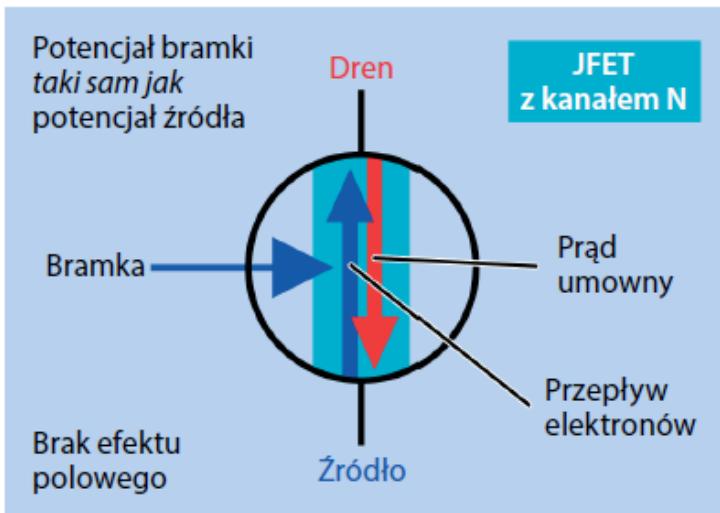
Typowa polaryzacja

$$V_{GS} > 0$$

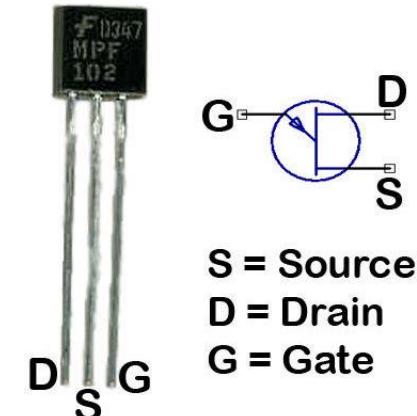
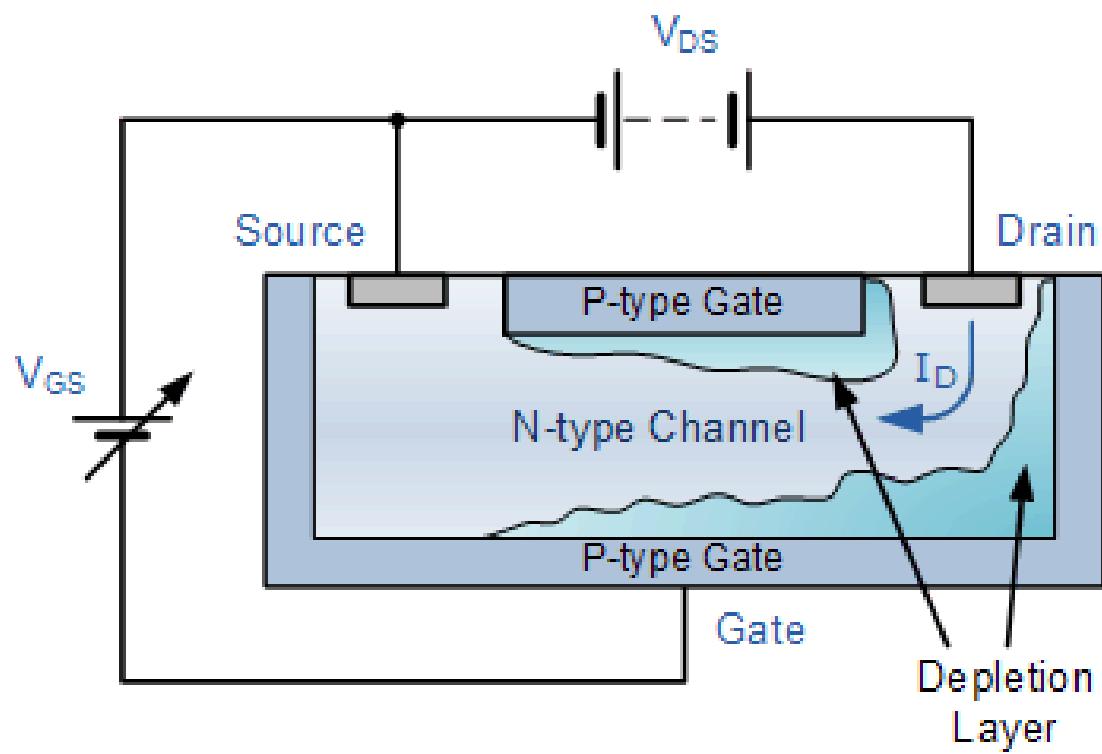
$$V_{DS} < V_{GS} - V_{Tn} < 0 \text{ V}$$



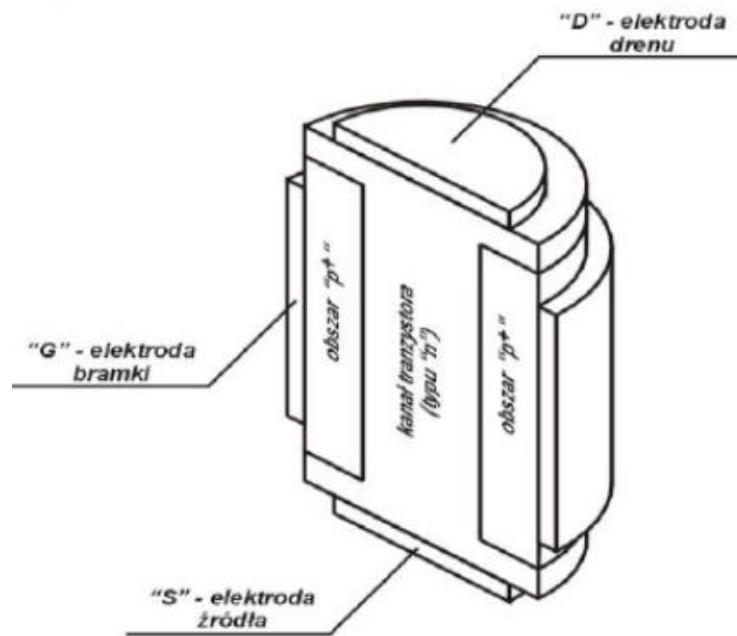
## Tranzystor JFET



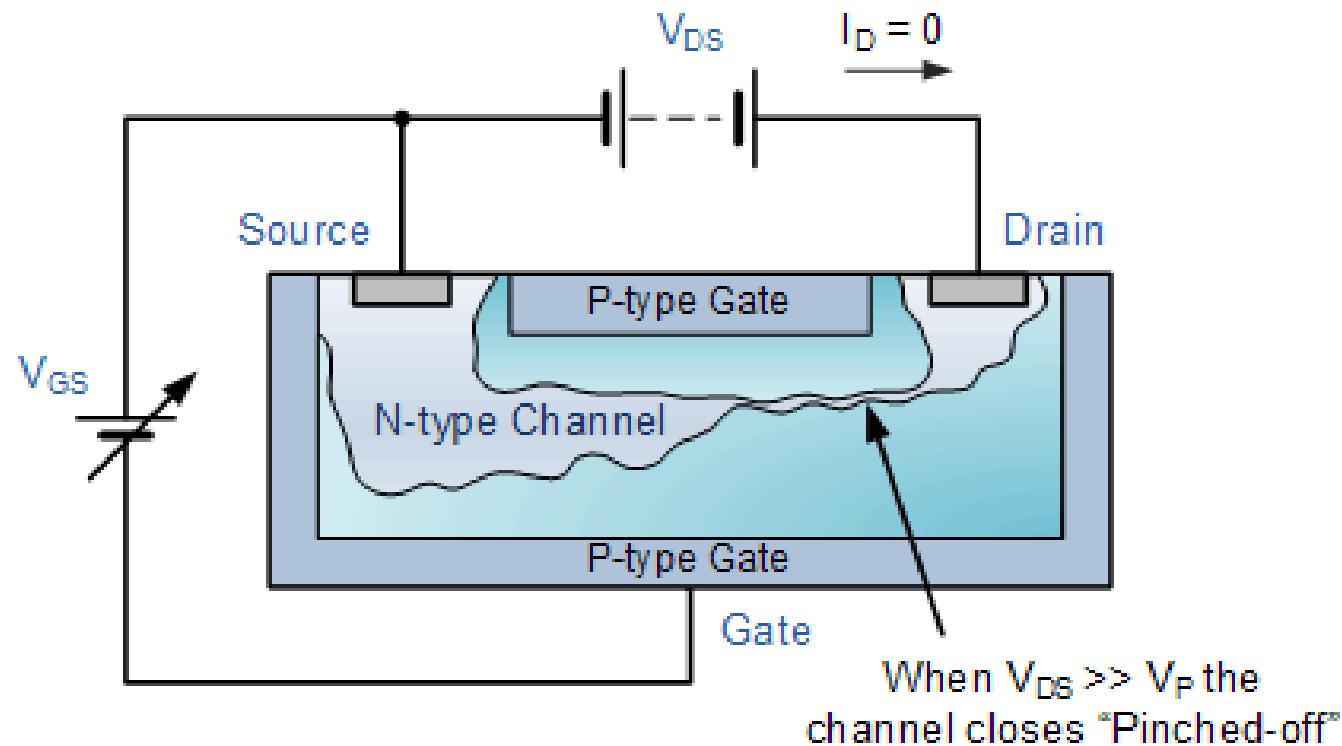
## Tranzystor JFET z kanałem N



**S = Source**  
**D = Drain**  
**G = Gate**

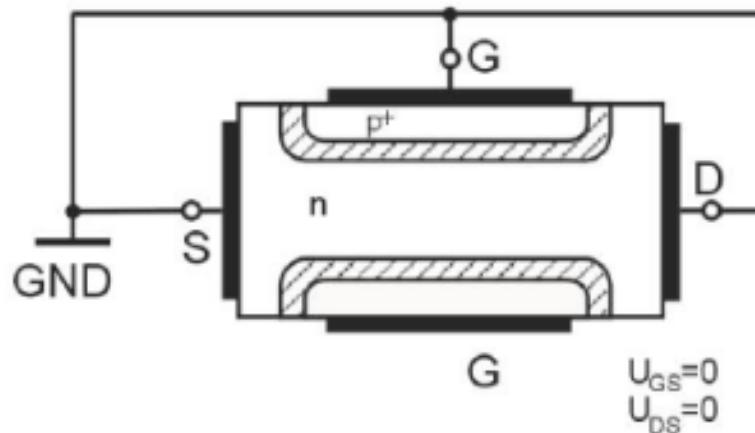


## Tranzystor JFET z kanałem N

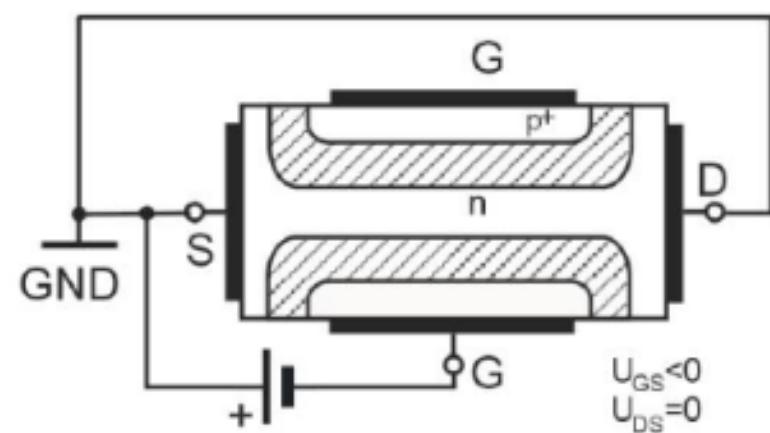


## Tranzystor JFET

a.)



b.)

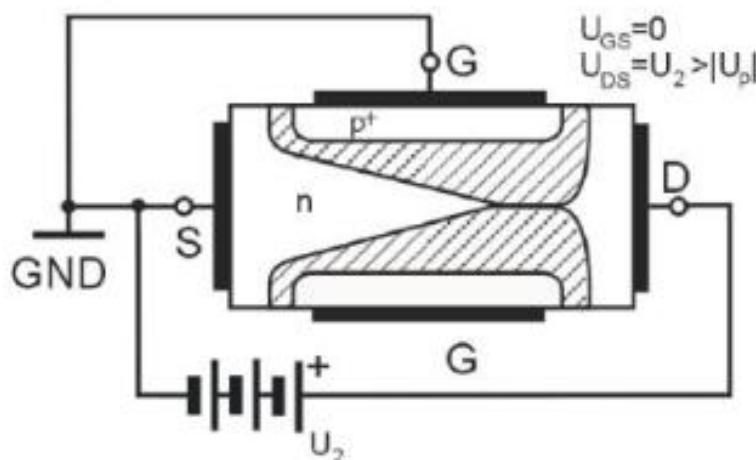
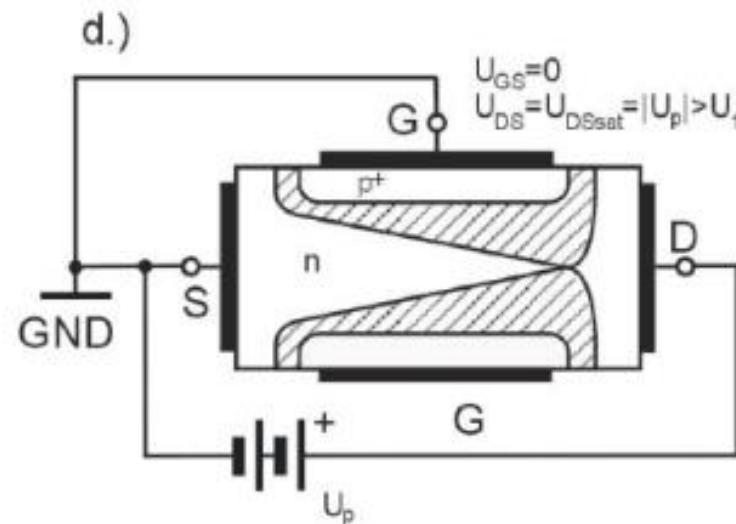
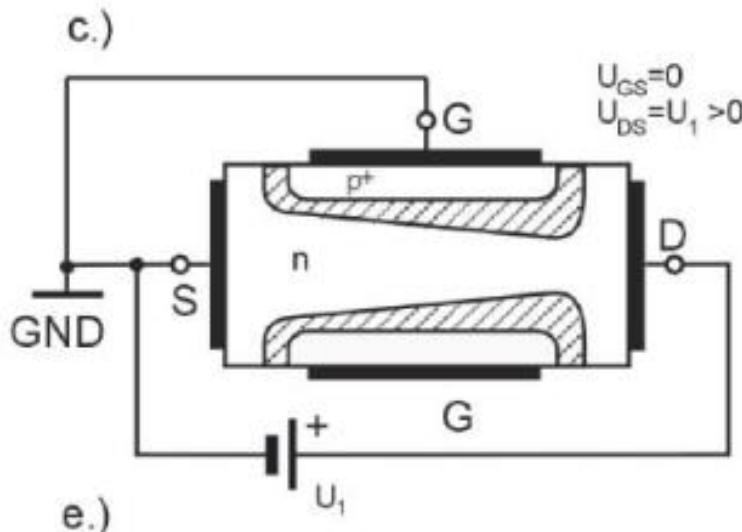


- obszar zubożony na granicy złącza (inaczej: o. ładunku przestrzennego lub o. bariery potencjału lub o. zaporowy)



- GrouND (ziemia, masa); potencjal zerowy odniesienia, względem niego określa się napięcia w układzie

## Tranzystor JFET



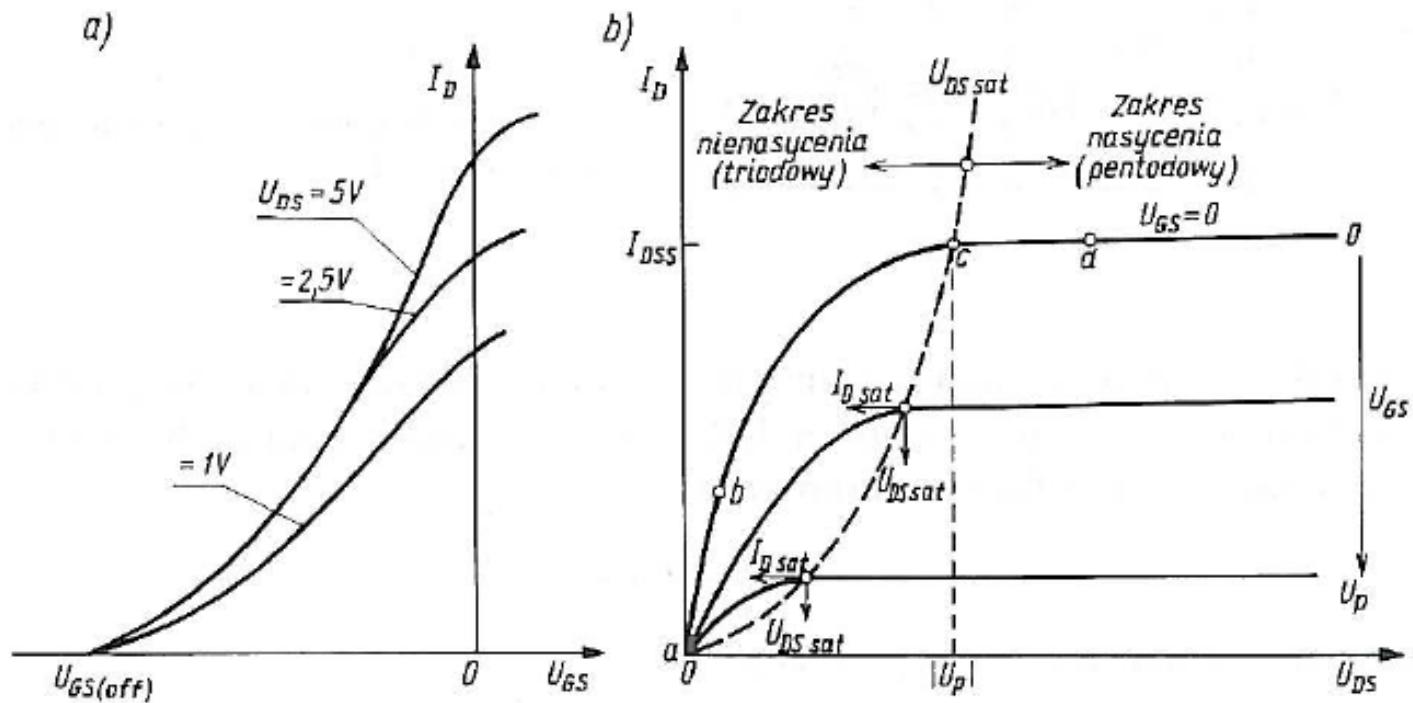
- obszar zubożony na granicy złącza (inaczej: o. ładunku przestrzennego lub o. barierы потенциала lub o. zaporowy)



GND

- GrouND (ziemia, masa); potencjal zerowy odniesienia, względem niego określa się napięcia w układzie

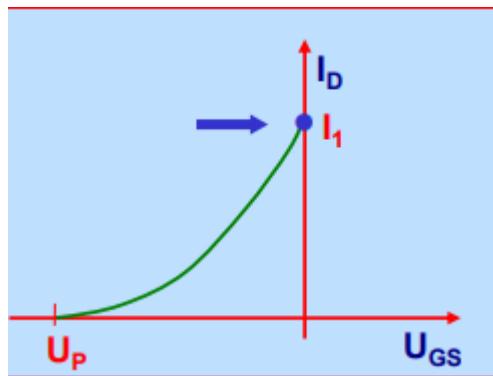
## Charakterystyki tranzystora JFET – kanał typu n



a) przejściowa, zależność prądu drenu  $I_D$  od napięcia bramka-źródło  $U_{GS}$ , przy stałym napięciu dren-źródło  $U_{DS}$

b) wyjściowa, zależność prądu drenu  $I_D$  od napięcia dren-źródło  $U_{DS}$ , przy stałym napięciu bramka-źródło  $U_{GS}$

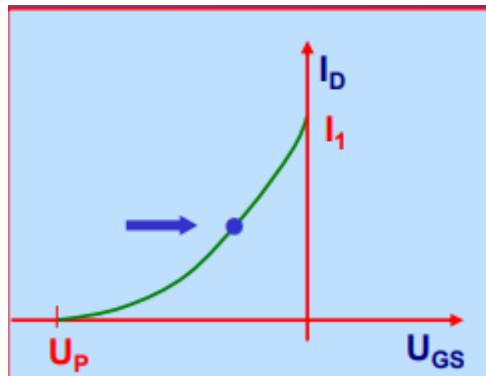
## Charakterystyki przejściowe tranzystora JFET



$$U_{GS} = 0$$

**U<sub>DS</sub> – male**

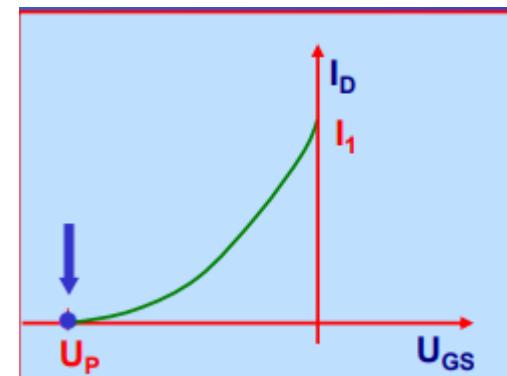
$$I_D = I_L$$



$$U_p < U_{GS} < 0$$

**U<sub>DS</sub> – male**

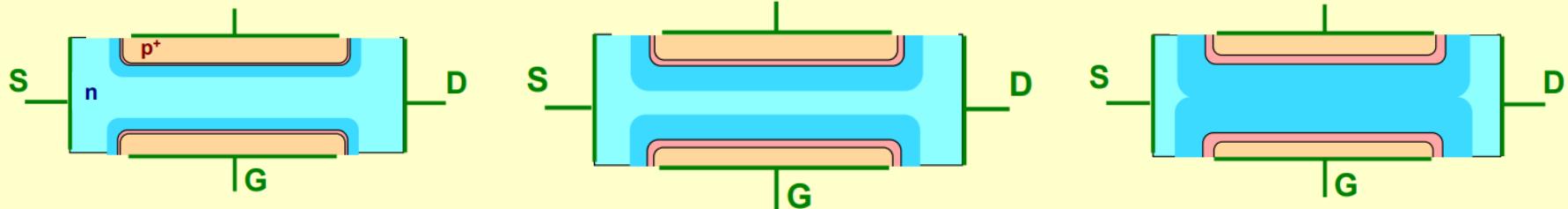
$$I_D < I_L$$



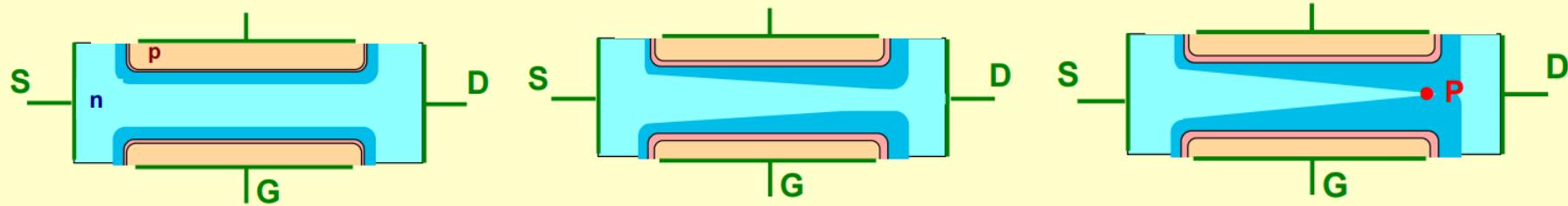
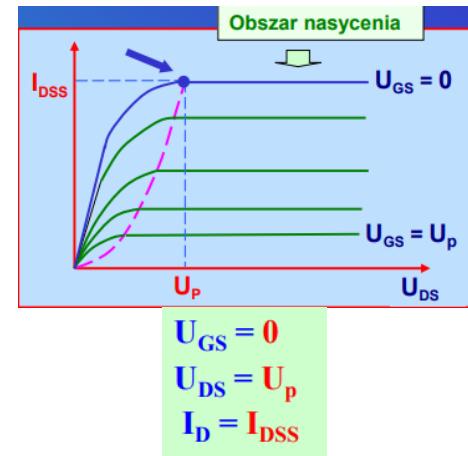
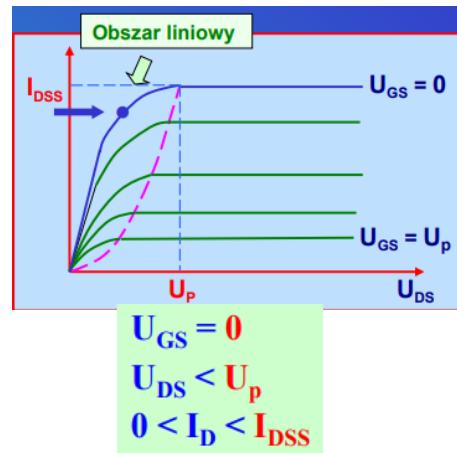
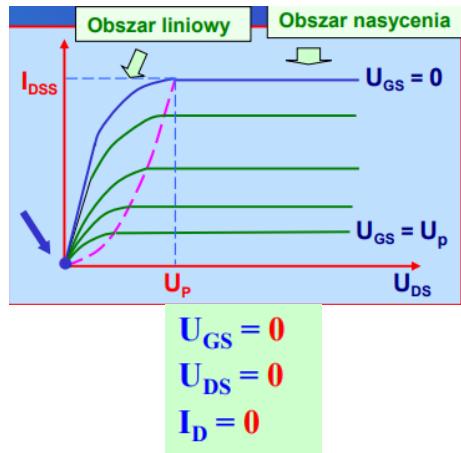
$$U_{GS} = U_p$$

**U<sub>DS</sub> – male**

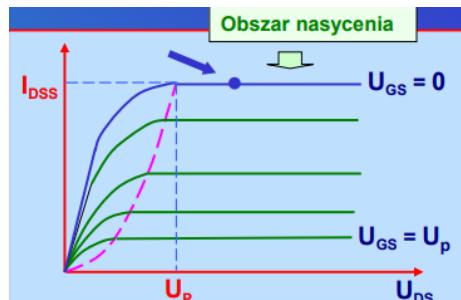
$$I_D = 0$$



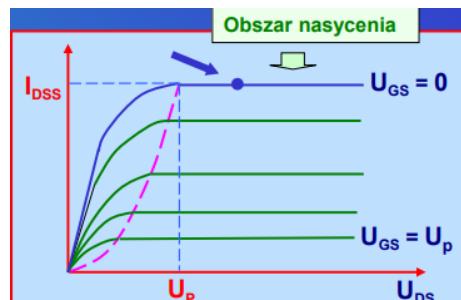
## Charakterystyki wyjściowe



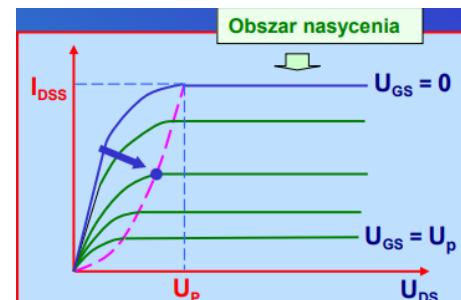
## Charakterystyki wyjściowe



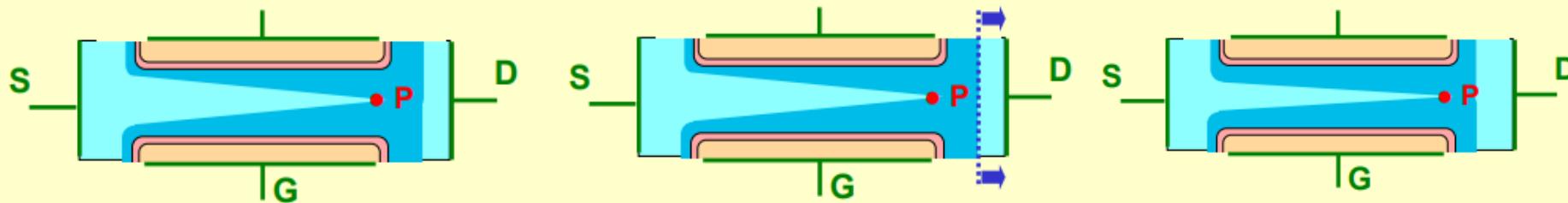
$$\begin{aligned} U_{GS} &= 0 \\ U_{DS} &= U_p \\ I_D &= I_{DSS} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} U_{GS} &= 0 \\ U_{DS} &= U_p \\ I_D &= I_{DSS} \end{aligned}$$



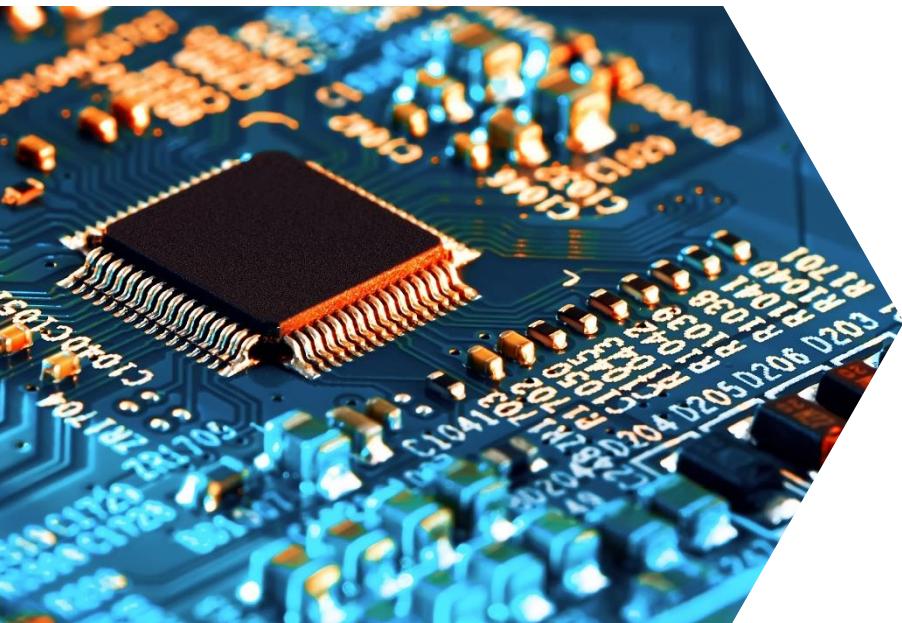
$$\begin{aligned} U_{GS} &< 0 \\ U_{DS} &= U_p \\ I_D &< I_{DSS} \end{aligned}$$



$$U_p = U_{GS} + U_{DS}$$

- tranzystory bipolarne są elementami normalnie wyłączonymi, sterowanymi prądowo – w przypadku braku prądu bazy nie płynie prąd kolektora lub emitera
- tranzystory JFET są elementami normalnie włączonymi, sterowane są napięciowo - przy braku napięcia sterującego przez kanał płynie maksymalny prąd

	Tranzystor bipolarny NPN	JFET z kanałem N
Rodzaj wzmocnienia	Prądowe	Napięciowe
Polaryzacja robocza	Dodatnia	Ujemna
Stan przy braku polaryzacji	Nieprzewodzenie	Przewodzenie
Stan przy polaryzacji roboczej	Lepsze przewodnictwo	Gorsze przewodnictwo



# Tranzystor MOSFET

## Tranzystor polowy z izolowaną bramką (MOSFET)

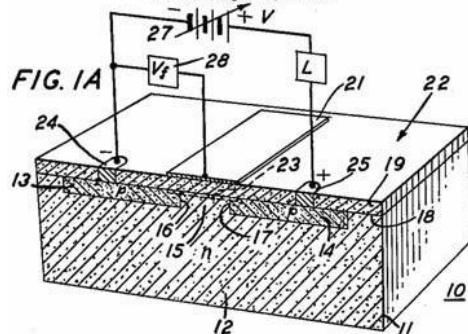
# *Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*



Mohamed Atalla i Dawon Kahng

## **Fragment patentu z 1960 r.**

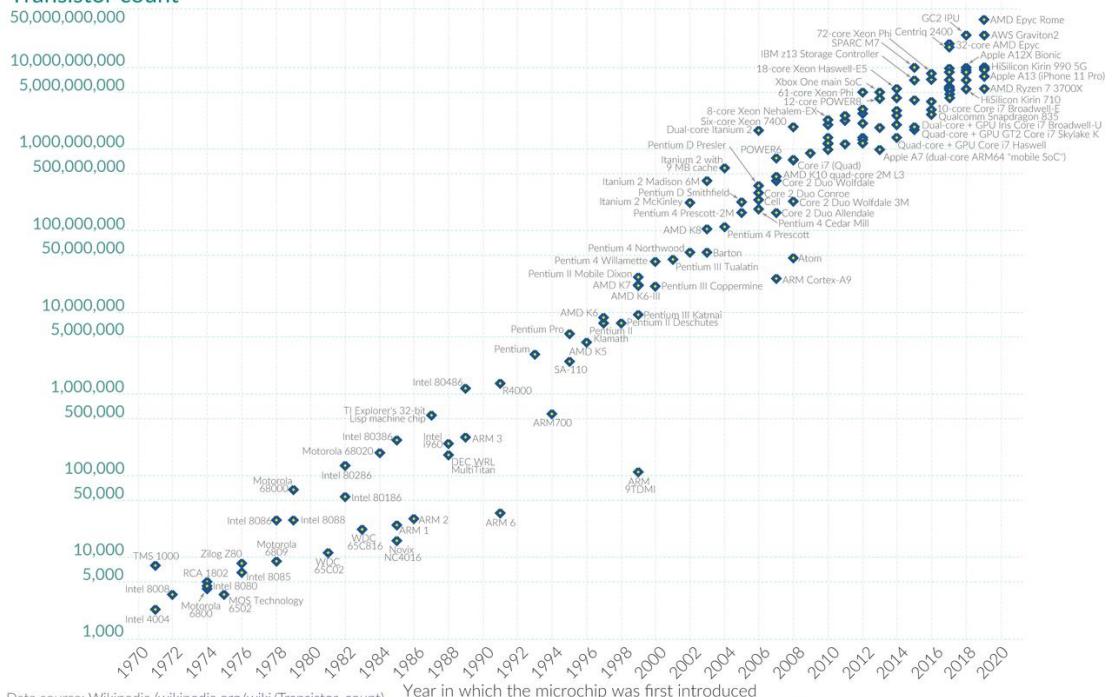
Aug. 27, 1963 DAWON KAHNG 3,102,230  
ELECTRIC FIELD CONTROLLED SEMICONDUCTOR DEVICE  
Filed May 31, 1960



**Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years**

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

## Transistor count

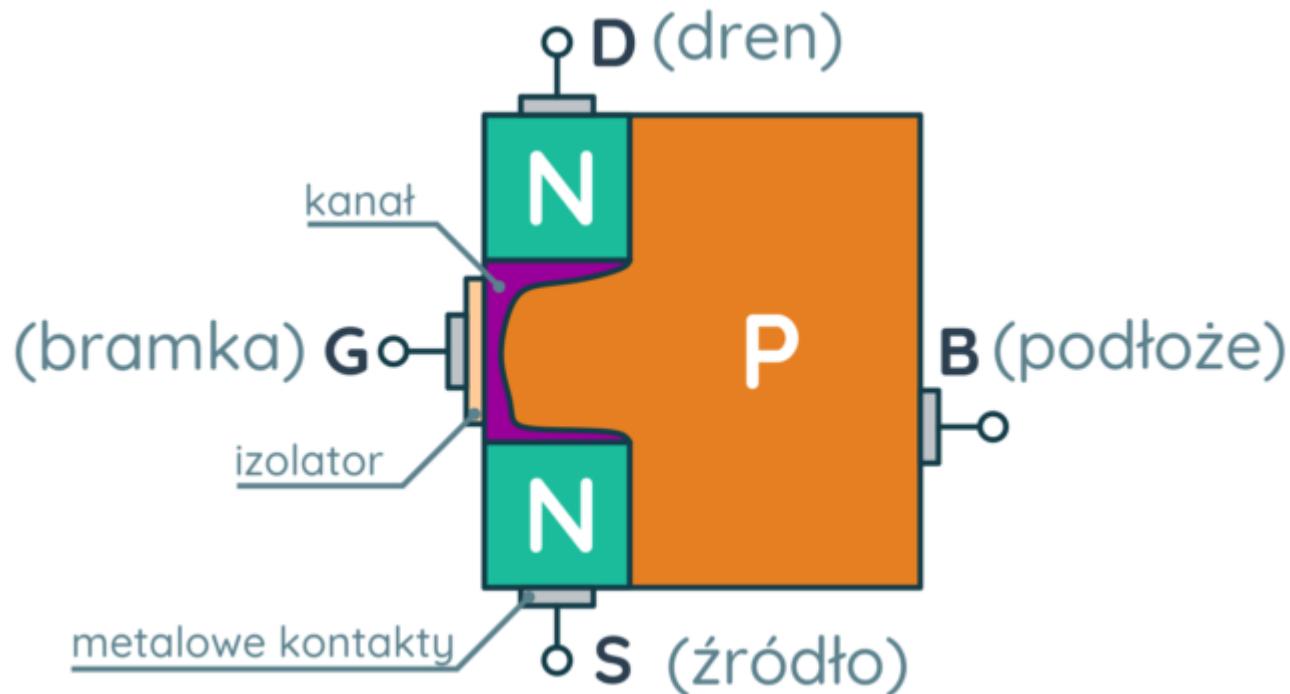


Data source: Wikipedia ([wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Transistor_count&oldid=1000000000))

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems

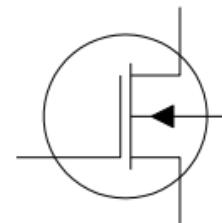
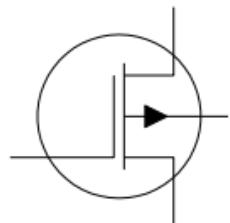
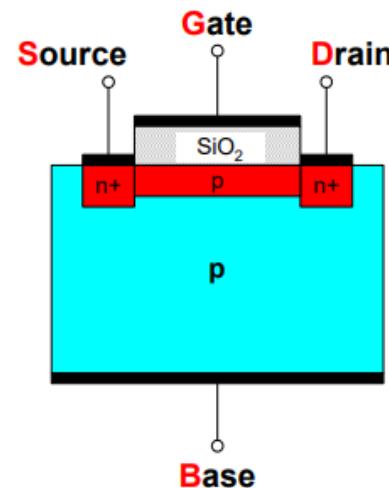
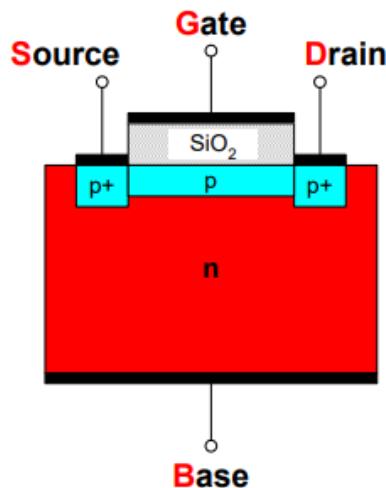
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

## MOSFET - *Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*



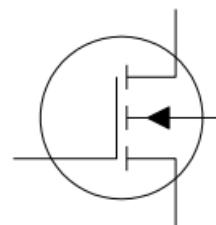
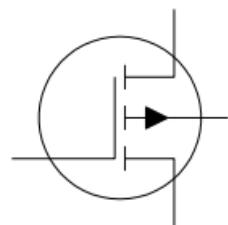
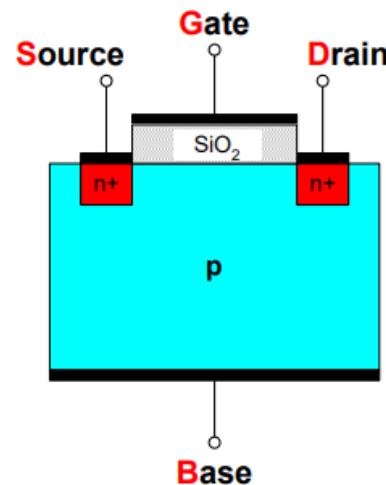
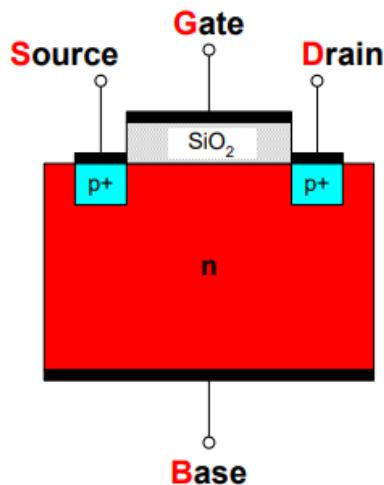
## Tranzystor MOSFET

- Z kanałem zubożanym (kanał wbudowany)
- Normalnie włączone

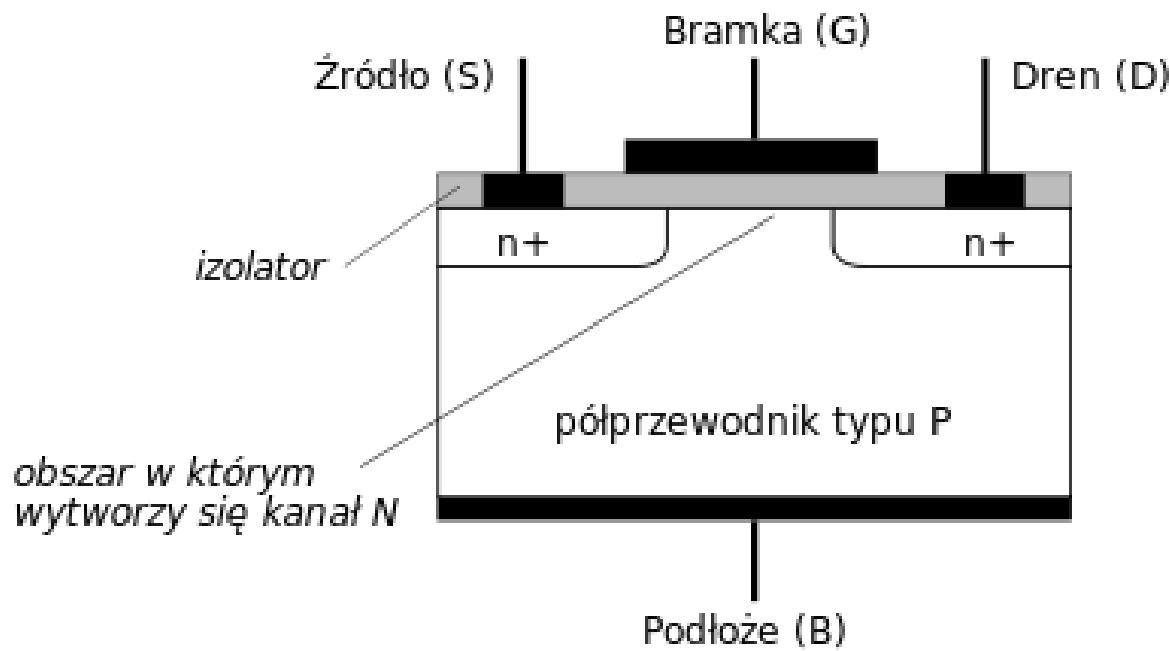


## Tranzystor MOSFET

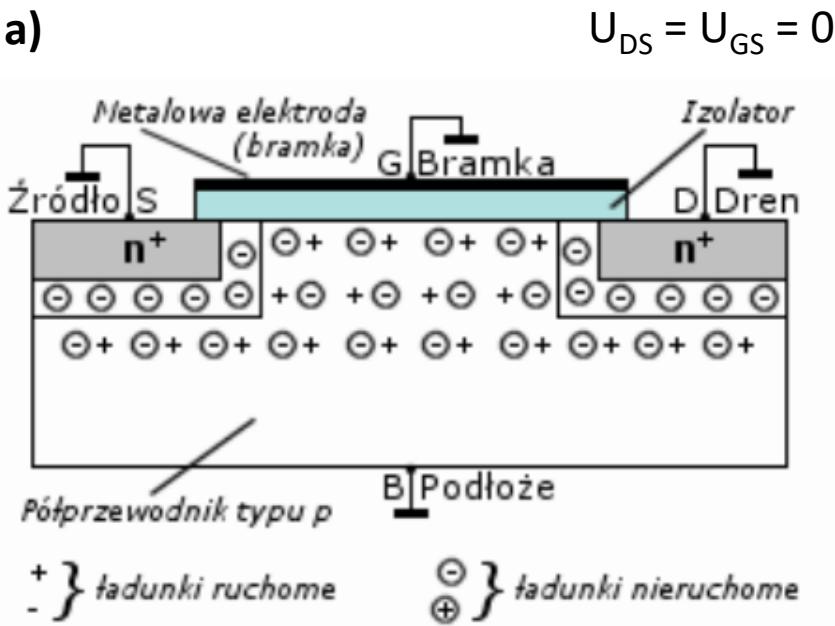
- Z kanałem wzbogacanym (kanał indukowany)
- Normalnie wyłączone



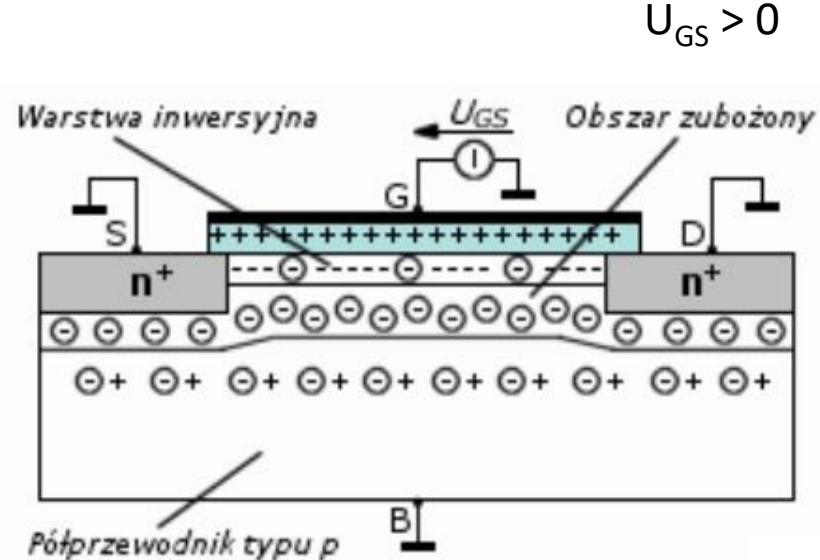
## Tranzystor MOSFET - budowa



a)

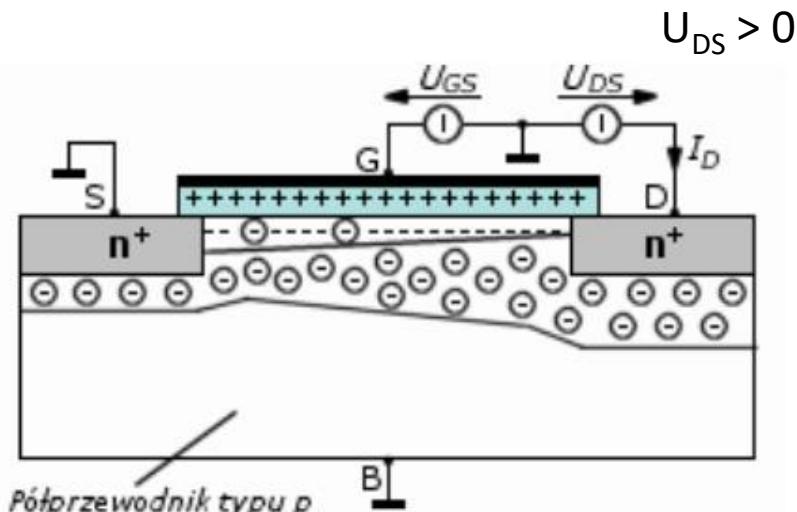


b)

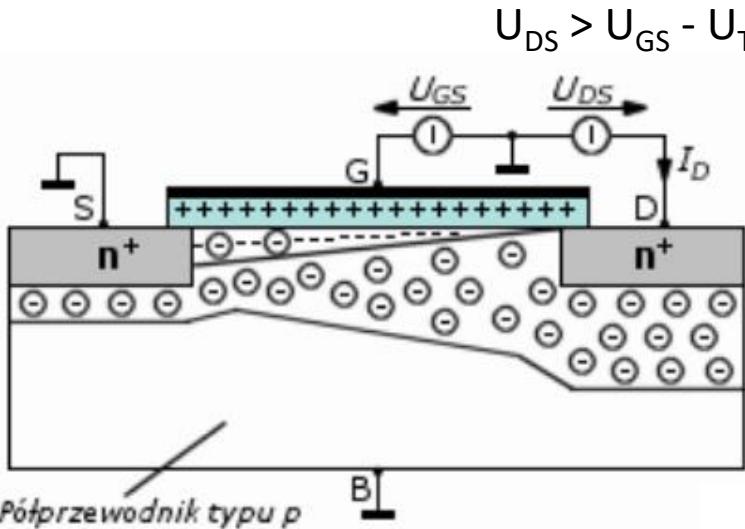


Wartość napięcia bramki  $U_{GS}$ , przy którym kanał zostanie utworzony nazywa się napięciem progowym  $U_T$

c)

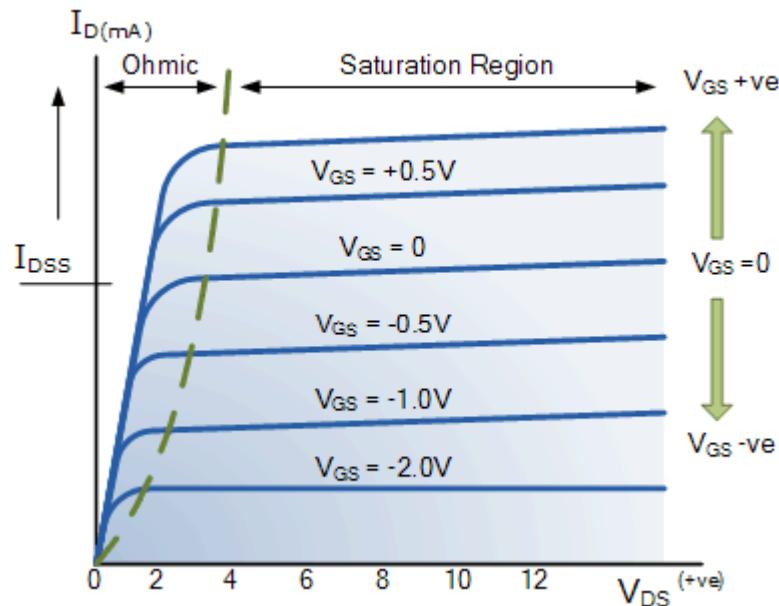


d)



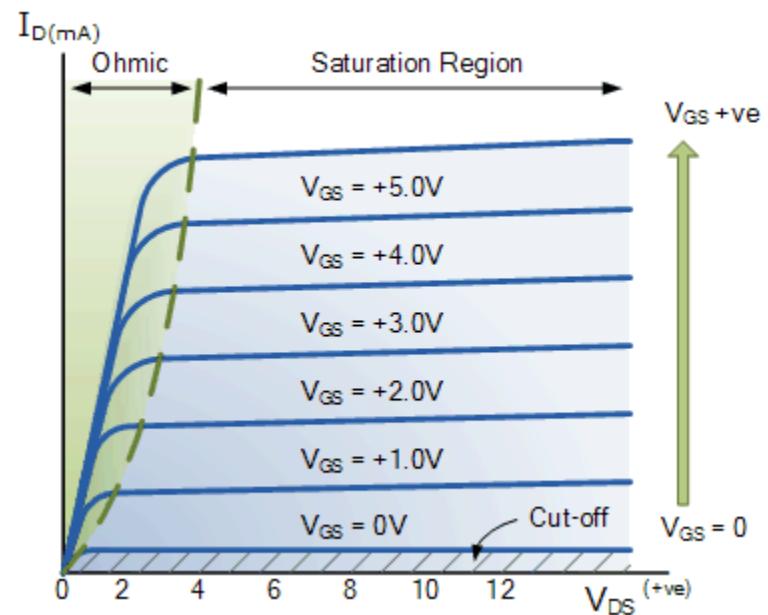
## Zakresy pracy

- Zakres nienasycenia (liniowy, triodowy)
- Zakres nasycenia (pentodowy)



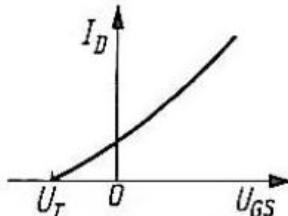
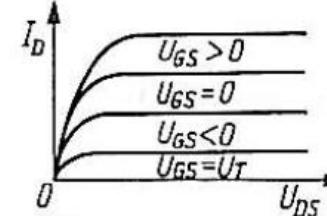
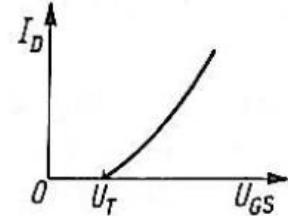
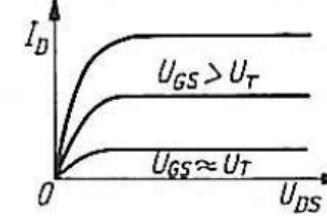
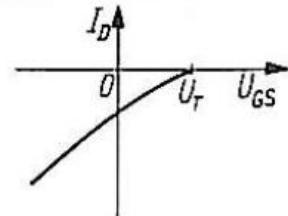
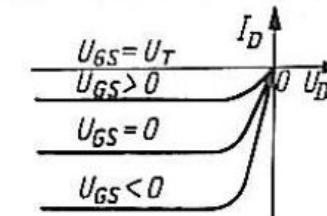
Z kanałem zubożonym

Tranzystor MOSFET n-kanałowy



Z kanałem wzbogaconym

## Tranzystor MOSFET

Rodzaj tranzystora MIS	Symbol graficzny	Charakterystyka przejściowa	Charakterystyka wyjściowa
Kanał zubożany typu N			
Kanał wzbogacany typu N			
Kanał zubożany typu P			
Kanał wzbogacany typu P		