



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**

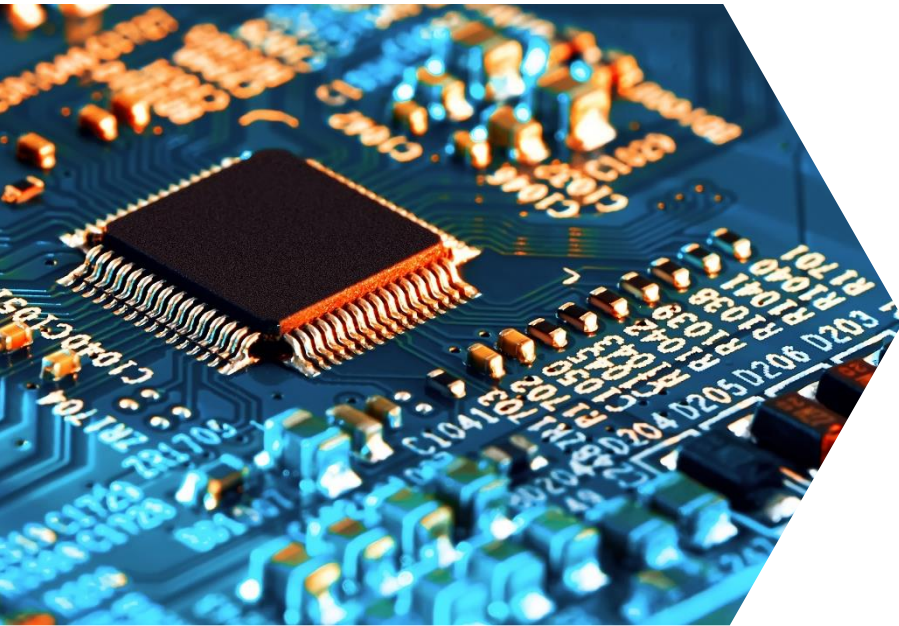
Wydział Telekomunikacji,
Informatyki i Elektrotechniki

Podstawy Elektroniki

Wykład 3

dr inż. Monika Kosowska

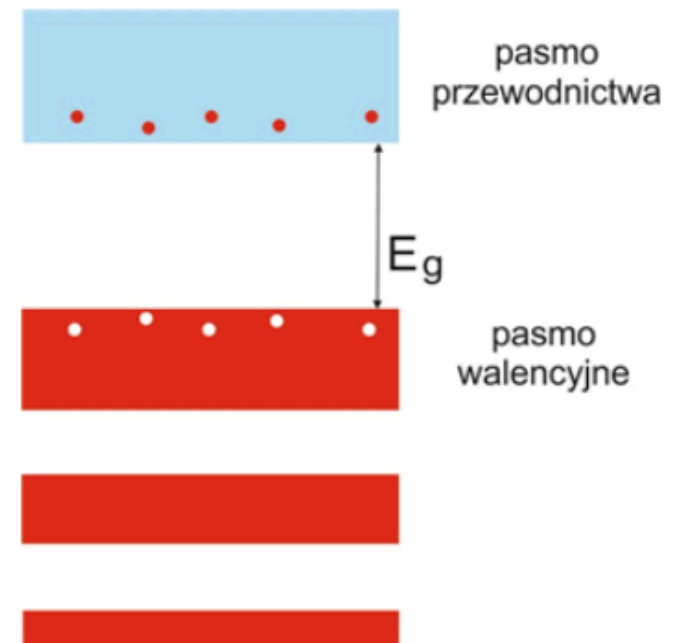




Półprzewodniki, złącze p-n, dioda półprzewodnikowa

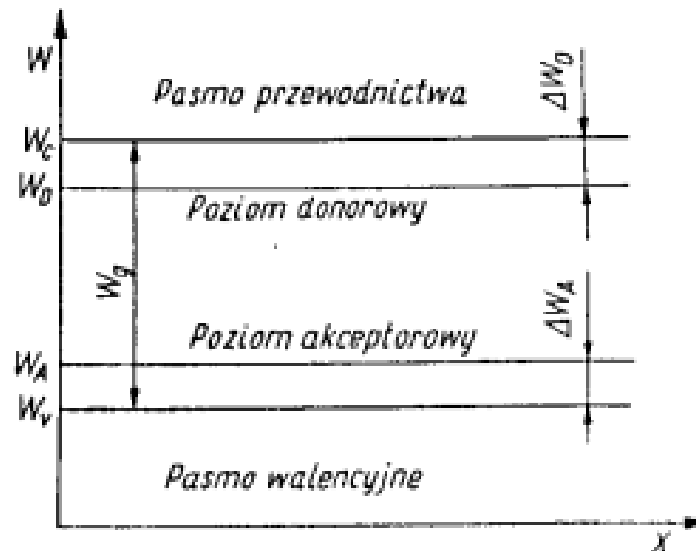
Półprzewodniki samoistne

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



Półprzewodniki domieszkowane

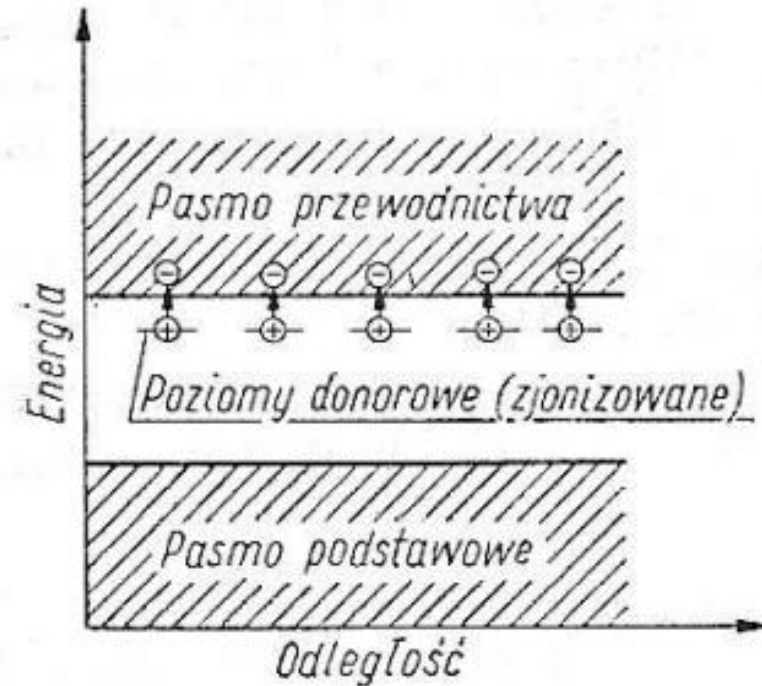
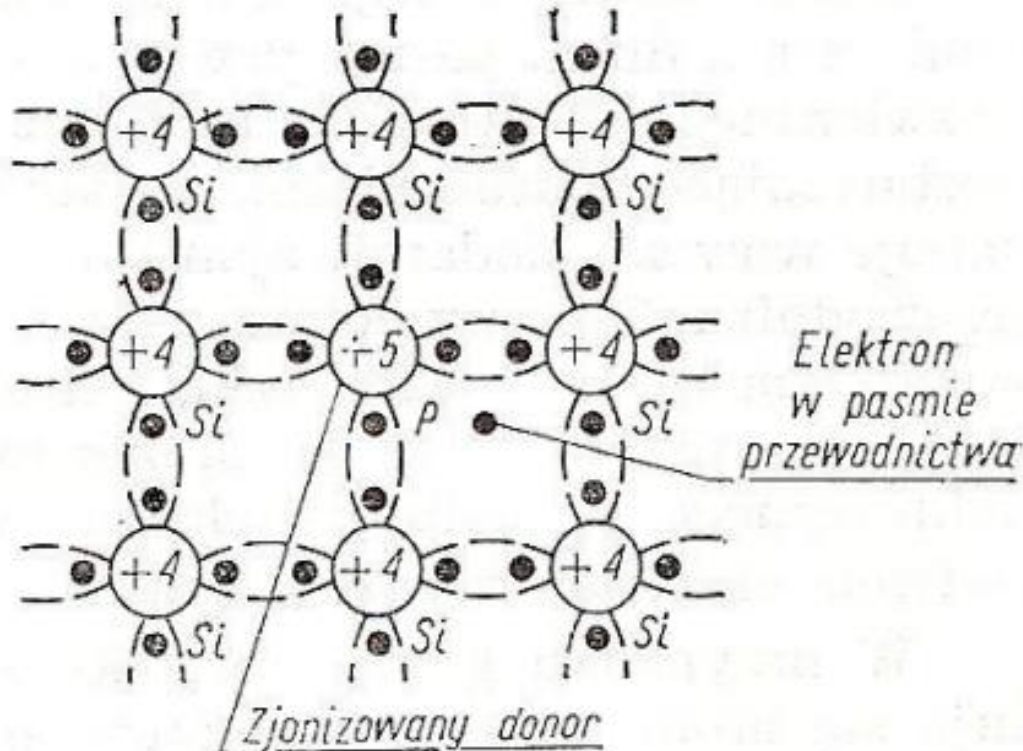
- Wprowadzenie domieszki: zakłócenie atomowe sieci krystalicznej – zwiększenie konduktywności.
- Podstawowe pierwiastki gr. IV: german i krzem domieszkuje się pierwiastkami z
 - gr. III: B – borem, Al – glinem, Ga – galem, In - indem
 - gr. V: P – fosforem, As – arsenem, Sb – antymonem, Bi - bizmutem



Półprzewodniki domieszkowane

- Typ n

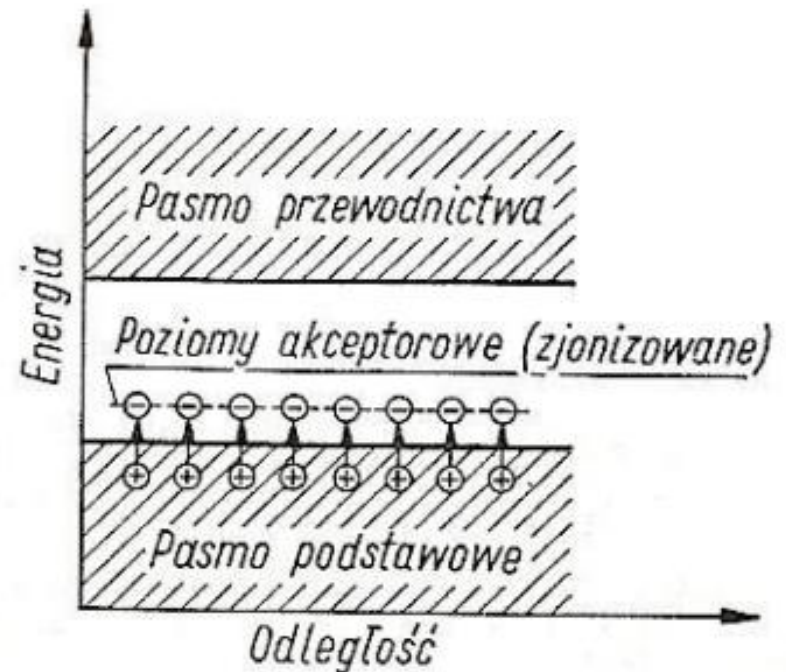
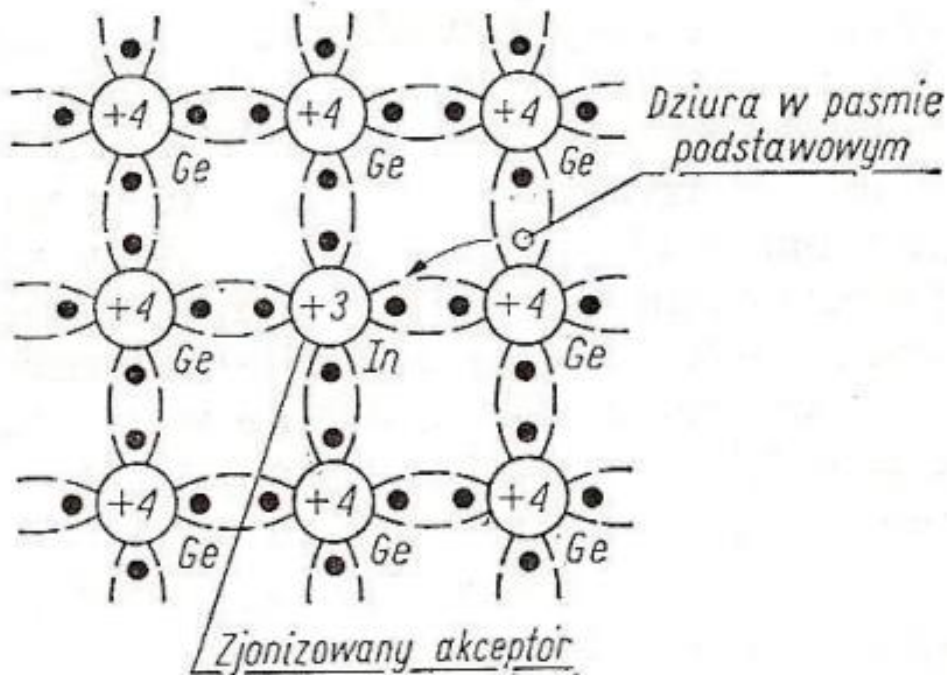
- donorowa (pierwiastkiem pięciowartościowym) – typ n
półprzewodnika



Półprzewodniki domieszkowane

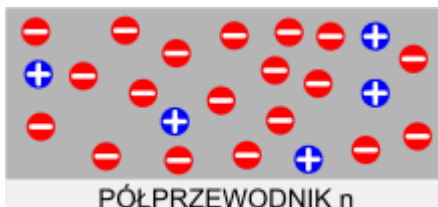
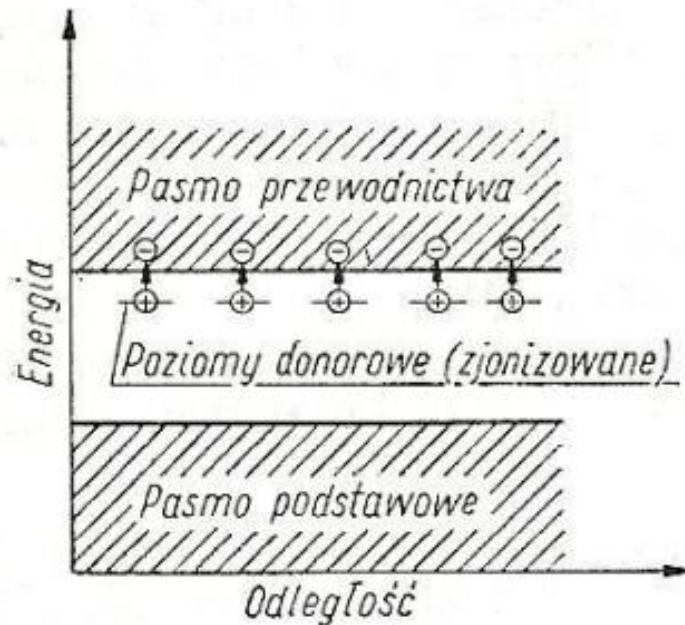
- Typ p

- akceptorowa (pierwiastkiem trójwartościowym) – typ p półprzewodnika

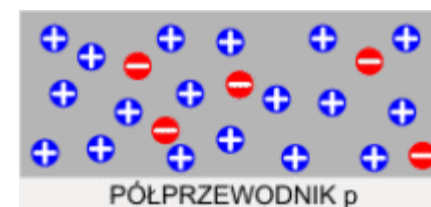
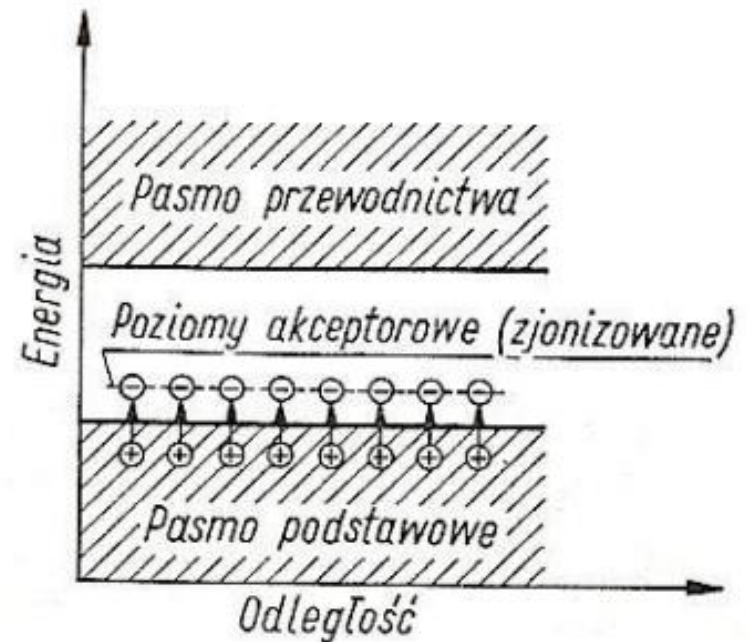


Półprzewodniki domieszkowane

■ Typ n

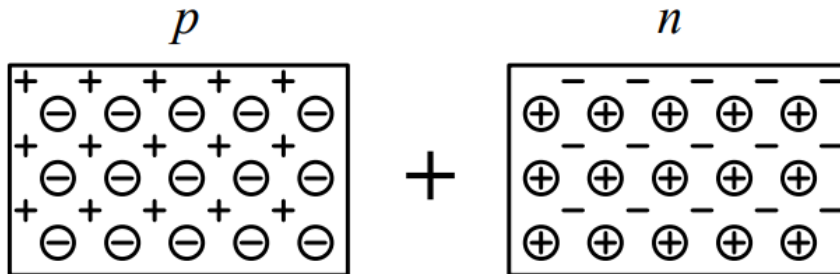


■ Typ p



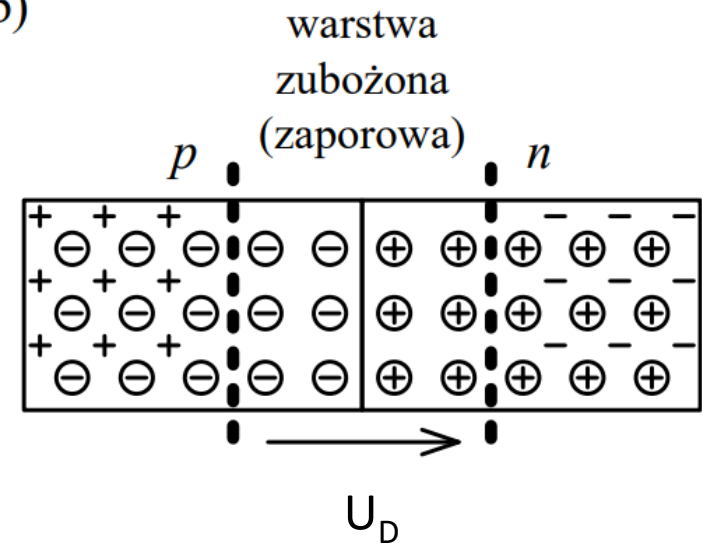
Złącze p-n

a)



=

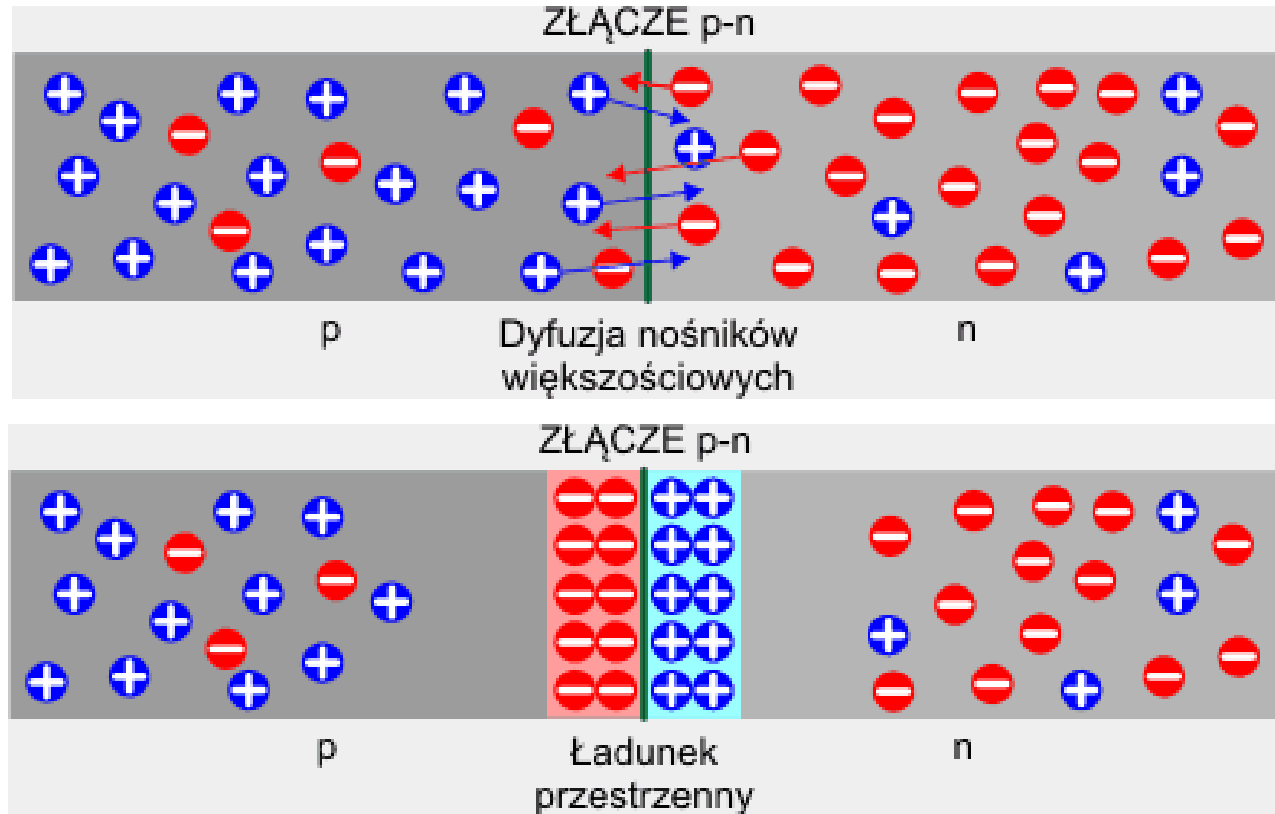
b)



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

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

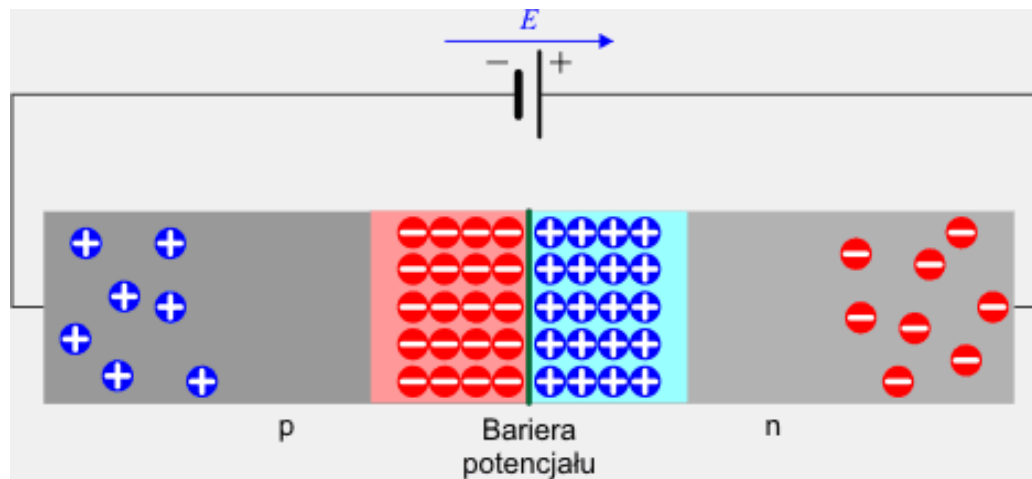
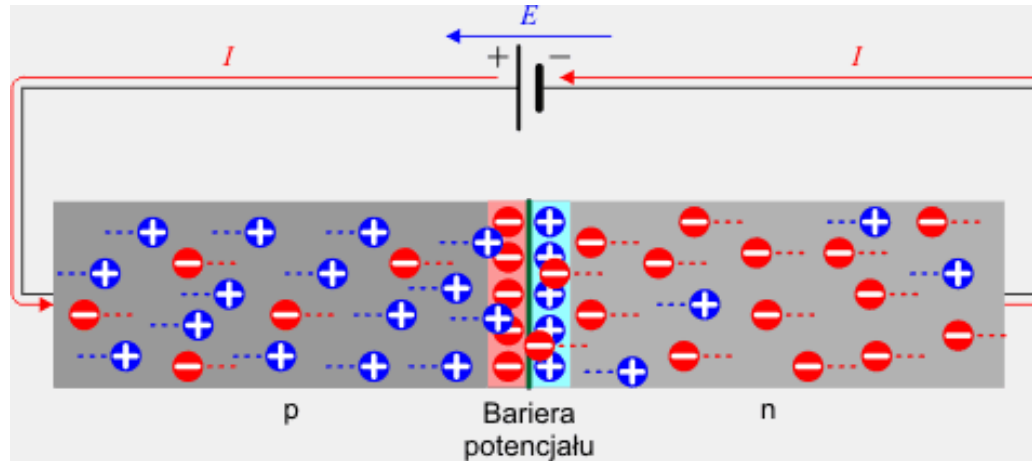
Złącze p-n



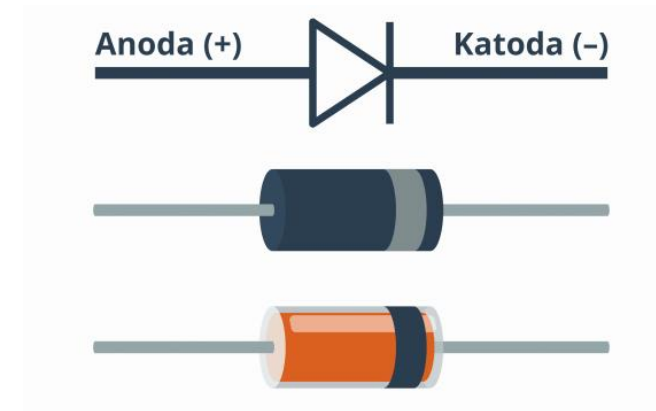
$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

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

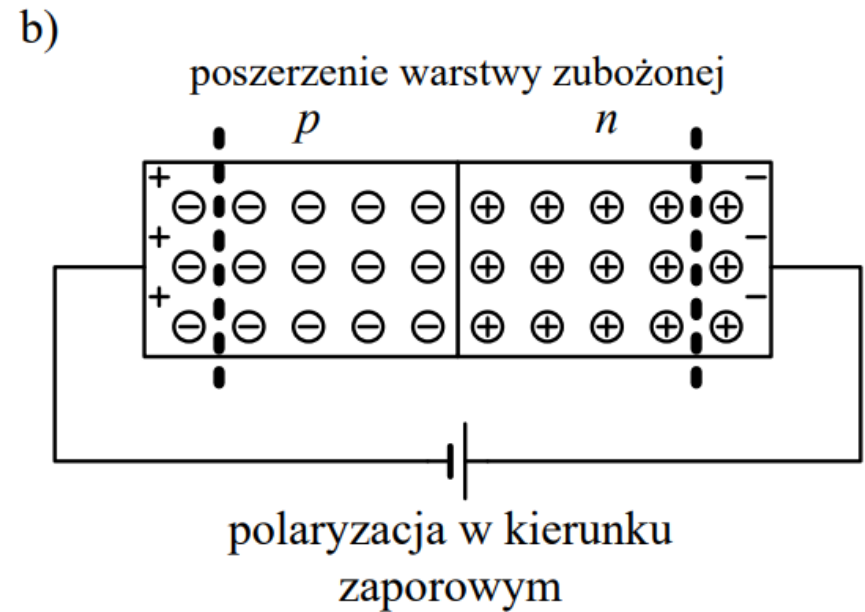
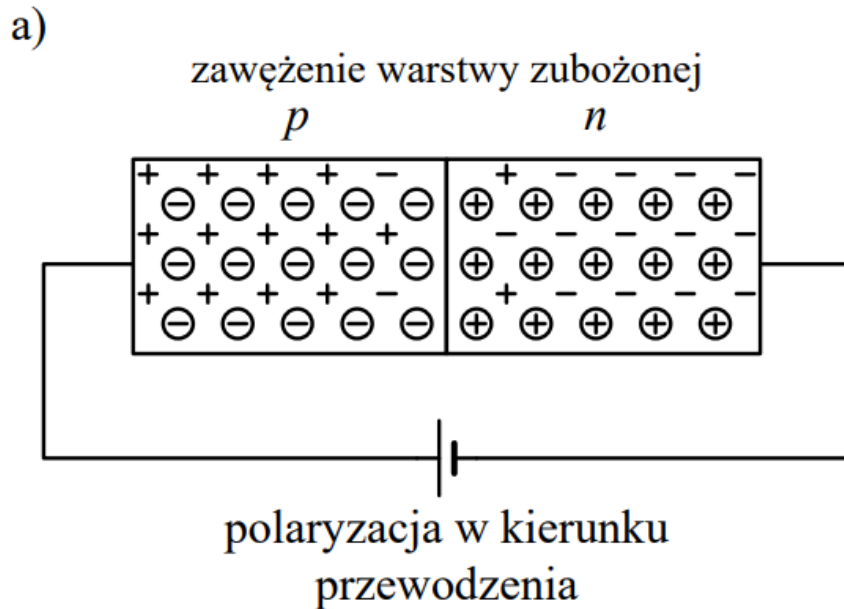
$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{c}} - 1 \right)$$

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

Przykładowe diody /zastosowanie:

- prostownicze
- stabilizacyjne
- impulsowe
- elektroluminescencyjne

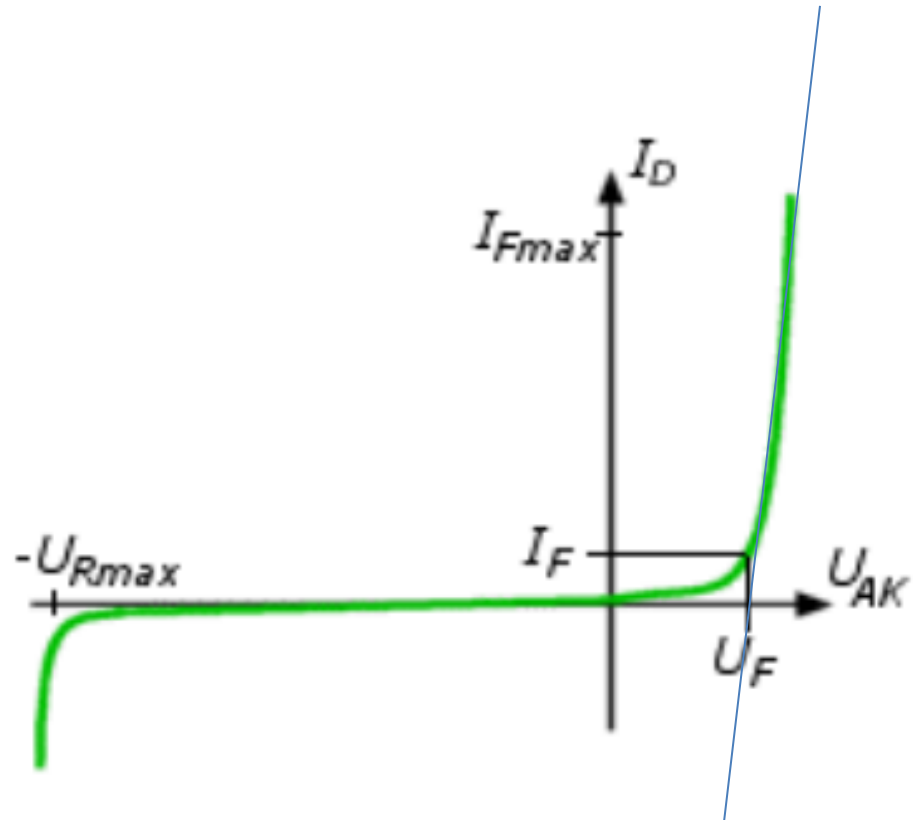
Dioda



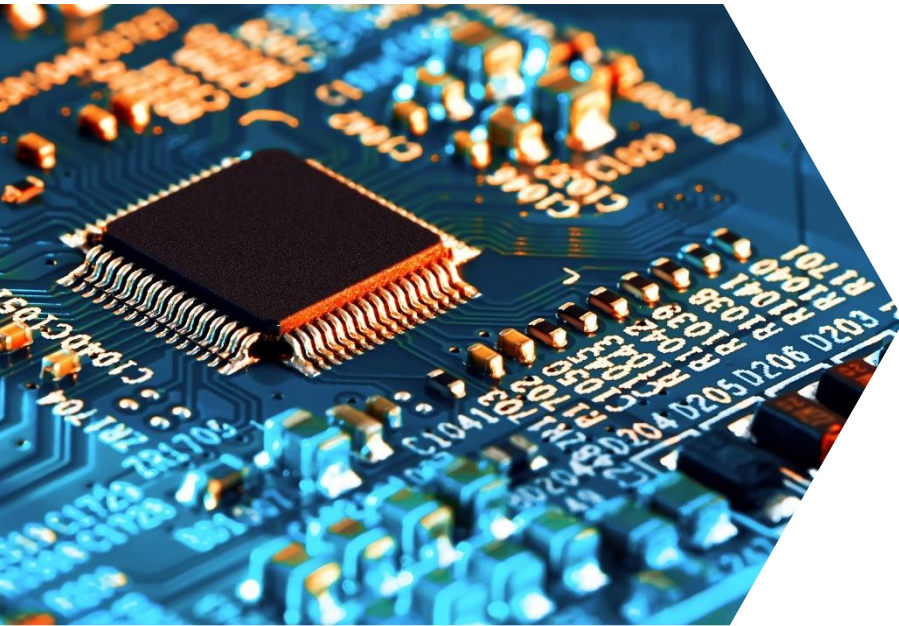
Dioda półprzewodnikowa

Parametry

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



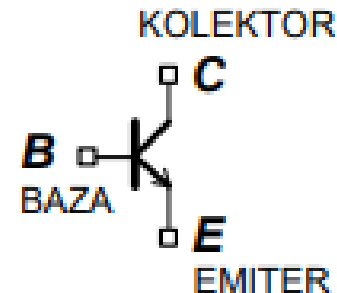
Charakterystyka prądowo – napięciowa.



Tranzystor bipolarny

Tranzystor bipolarny

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



Zależności:

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

β – wzmacnienie 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

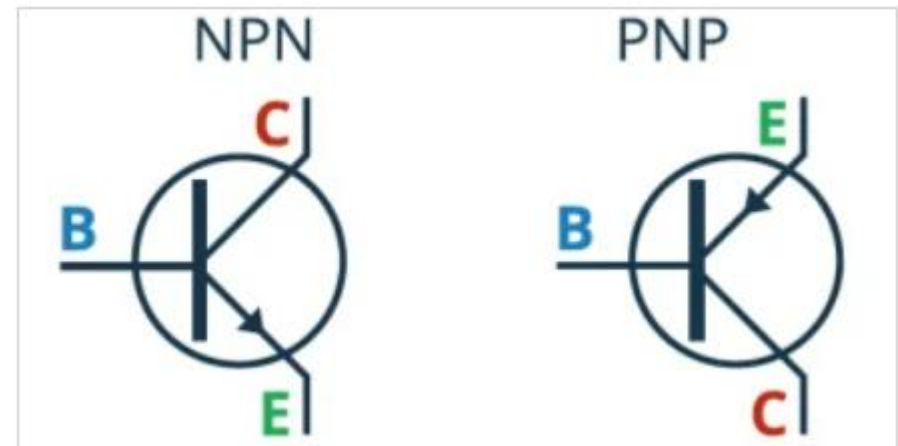
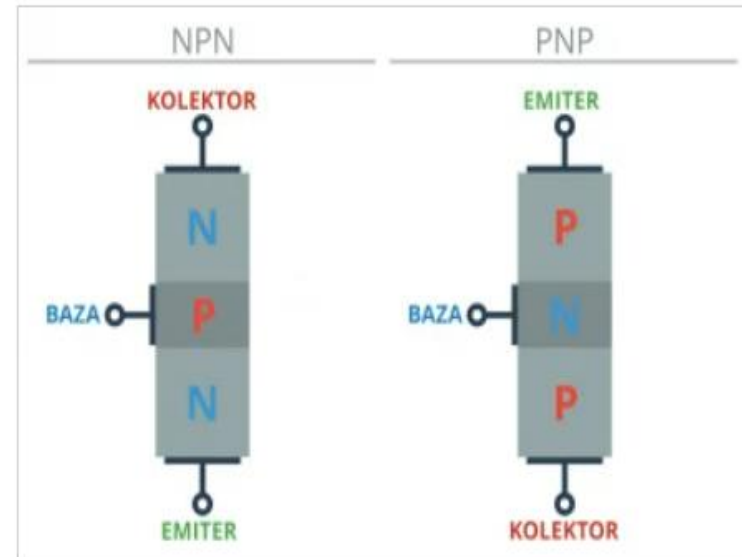
- Dwie wersje:
 - n-p-n (n – kolektor i emiter, p – baza)
 - p-n-p (p – kolektor i emiter, n – baza)
- złącze emiter-baza spolaryzowane w kierunku przewodzenia
- złącze baza-kolektor spolaryzowane w kierunku zaporowym

Dla NPN oznacza to:

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

Dla PNP oznacza to:

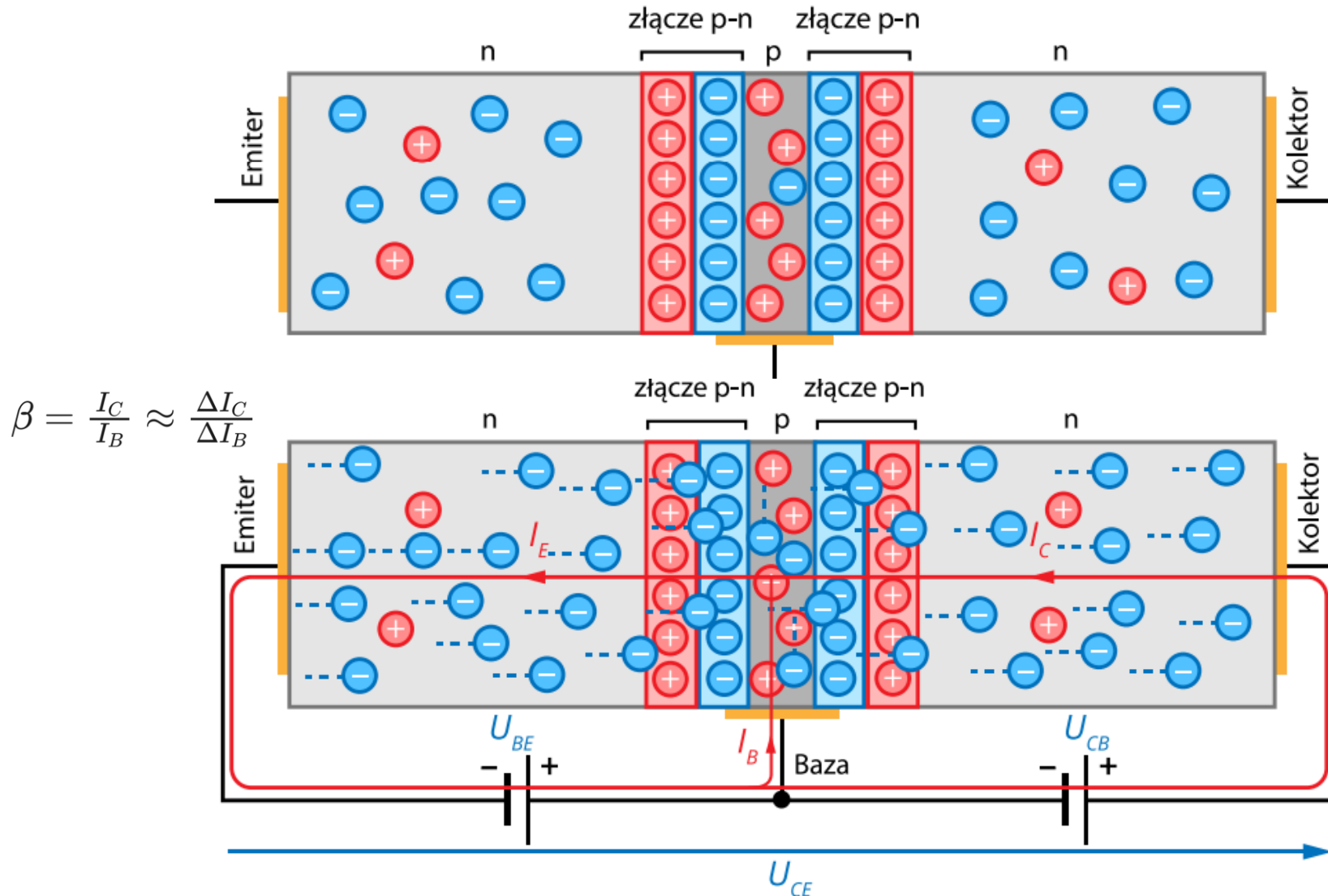
$$U_{EB} > 0 \text{ oraz } U_{CB} < 0 \quad (U_{BE} < 0, U_{CE} < 0)$$



Tranzystory bipolarne

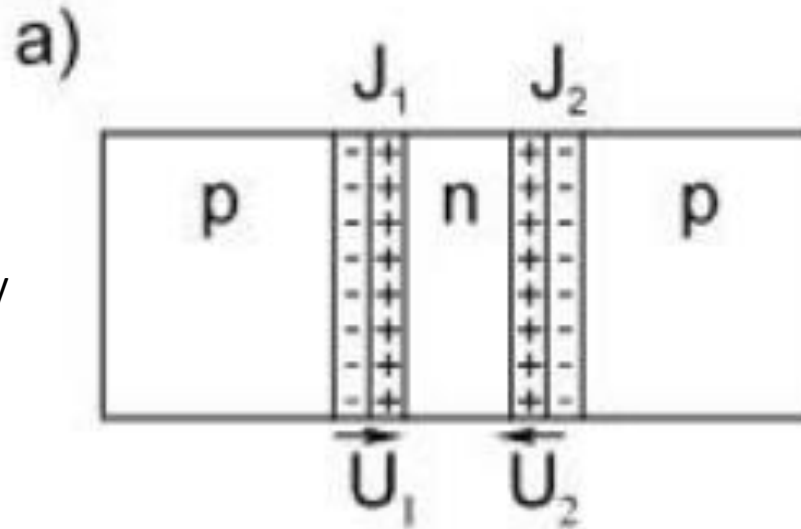
W stanie aktywnym:

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



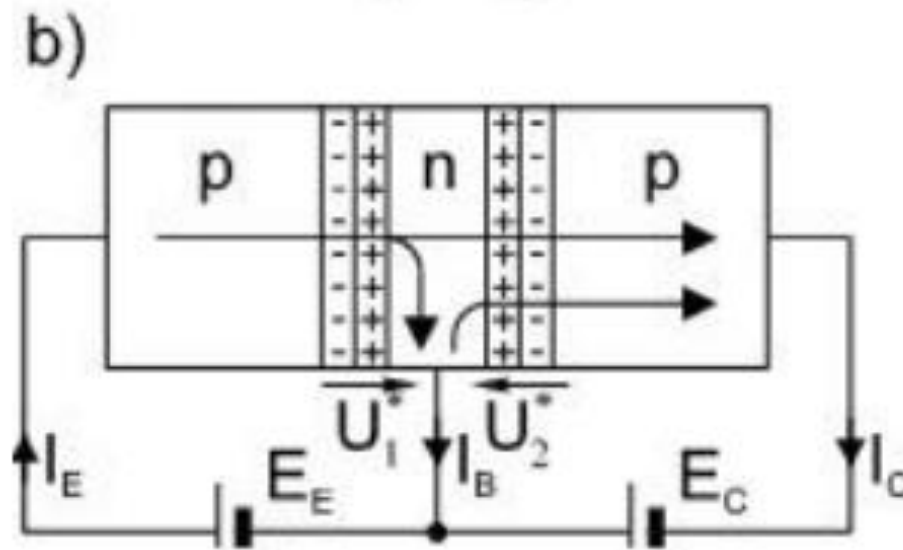
Zasada działania PNP

Tranzystor niespolaryzowany



$$U_1 = U_2$$

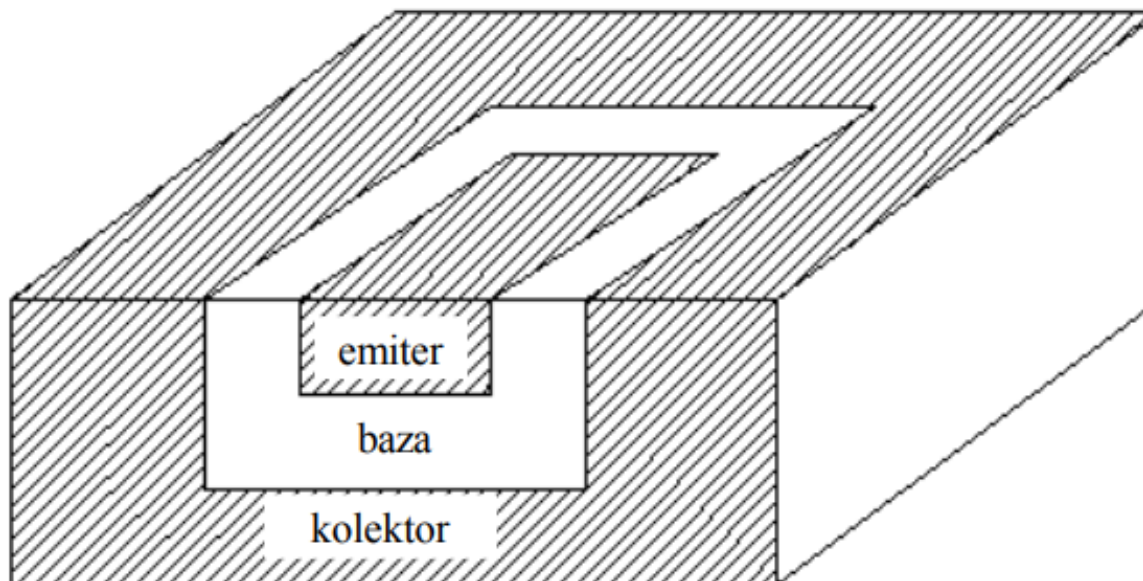
Tranzystor spolaryzowany



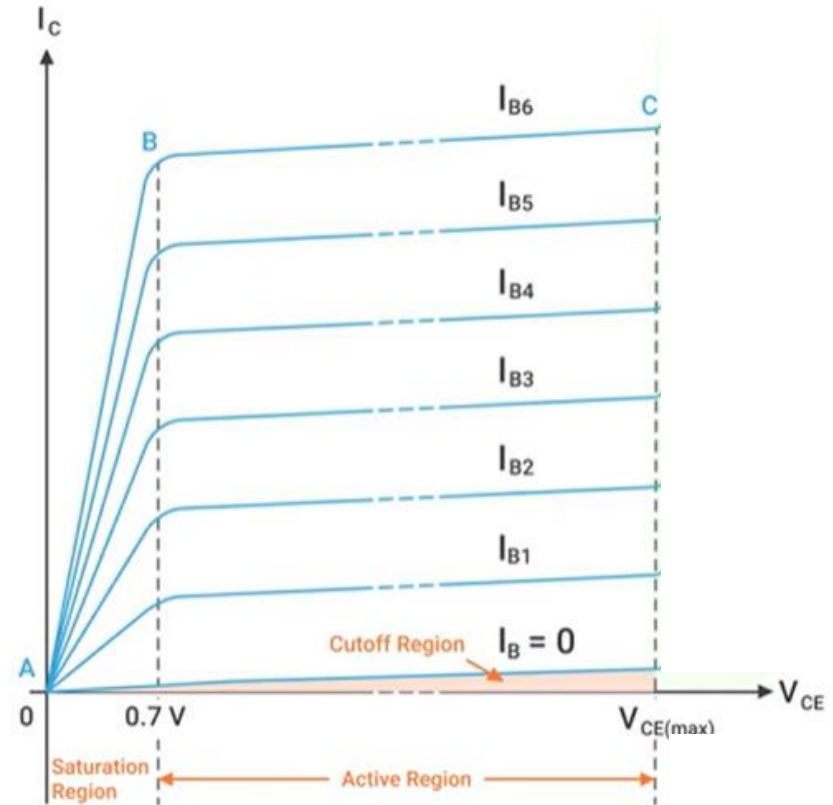
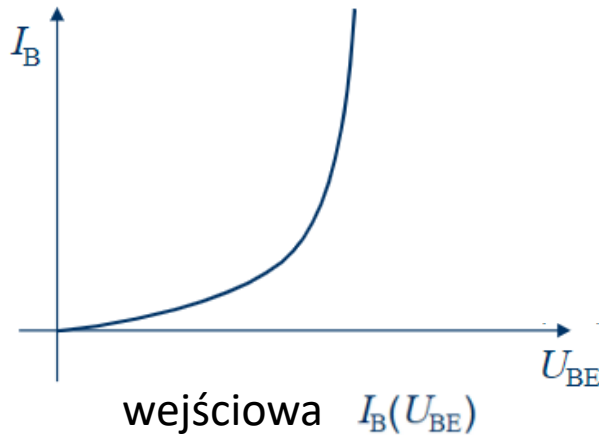
$$U_1^* < U_1$$

$$U_2^* > U_2$$

Budowa tranzystora



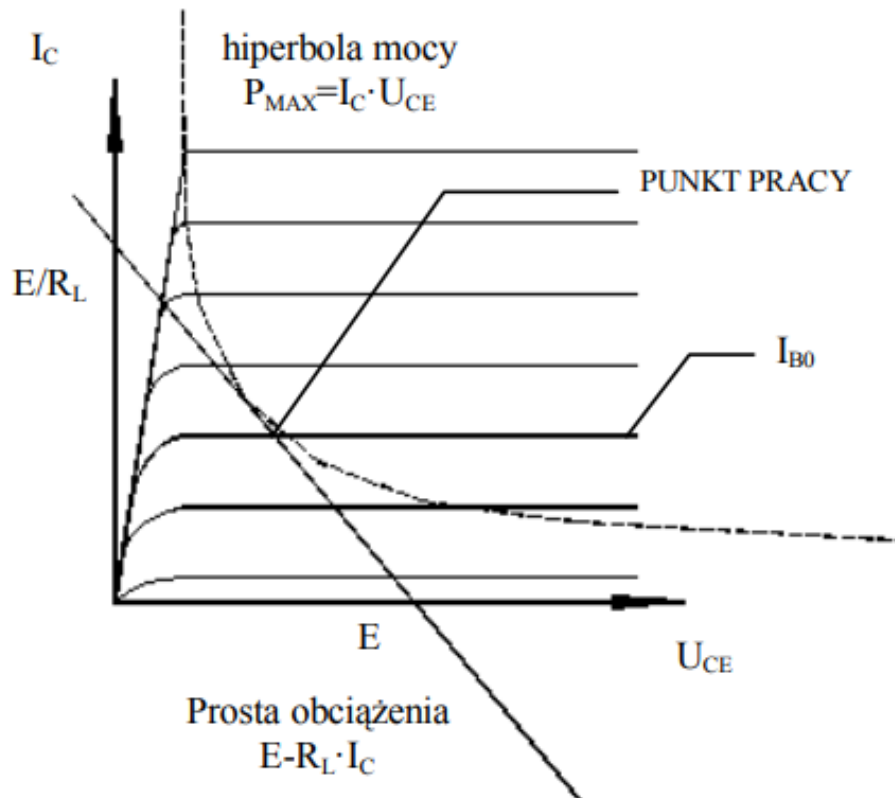
Charakterystyki



- Stan nasycenia, w którym prąd bazy jest na tyle duży, że obwód kolektora nie jest w stanie dostarczyć prądu β 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 β razy większy od prądu bazy.

Punkt pracy

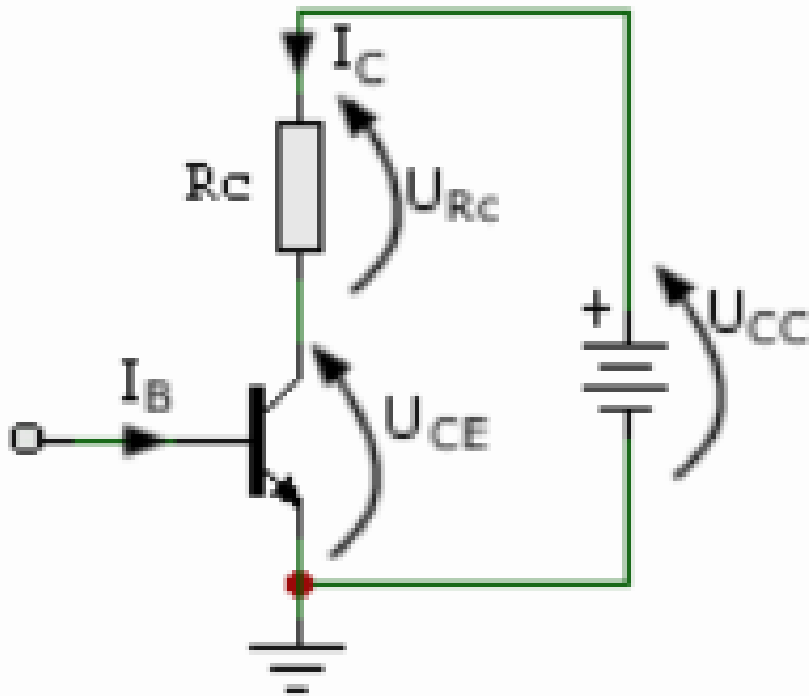
Optymalny punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu jest wyznaczony przez taki prąd kolektora, przy którym na kolektorze panuje napięcie równe połowie napięcia zasilania.



- ⇒ wielkość wzmocnienia
- ⇒ 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



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

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

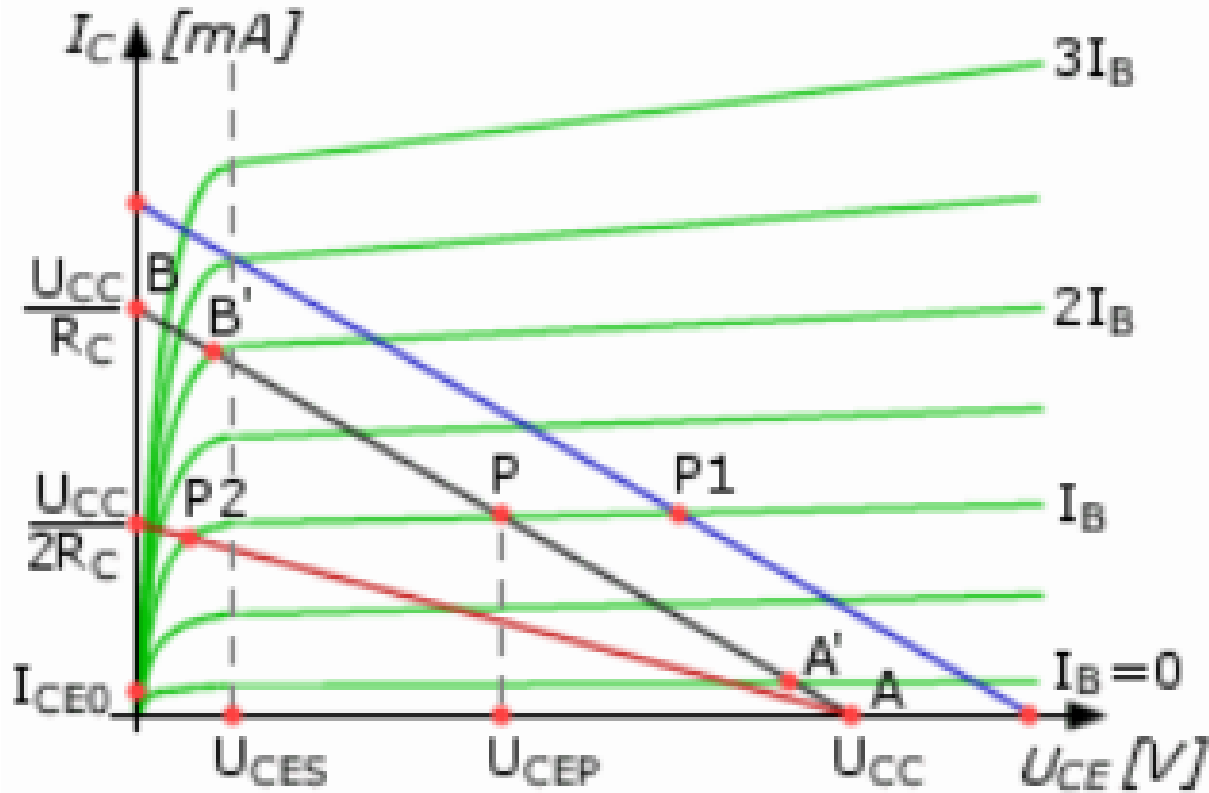
$$y \quad I_C = \frac{U_{CC}}{R_C} - \frac{U_{CE}}{R_C} \quad x$$

$$y = -ax + b$$

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

Punkt pracy

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



Dla $I_C = 0$

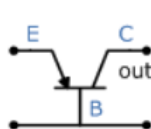
$$0 = -U_{CE}/R_C + U_{CC}/R_C$$

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

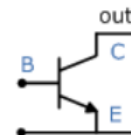
Dla $U_{CE} = 0$

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

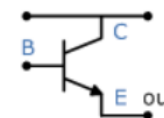
Układy pracy



Układ ze wspólną
bazą
OB

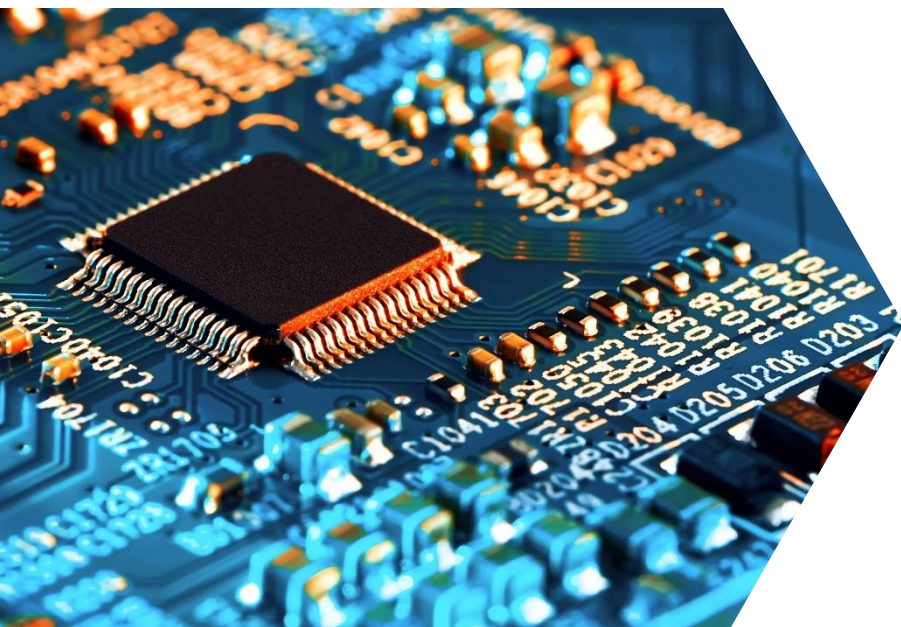


Układ ze wspólnym
emiterem
OE



Układ ze wspólnym
kolektorem
OC

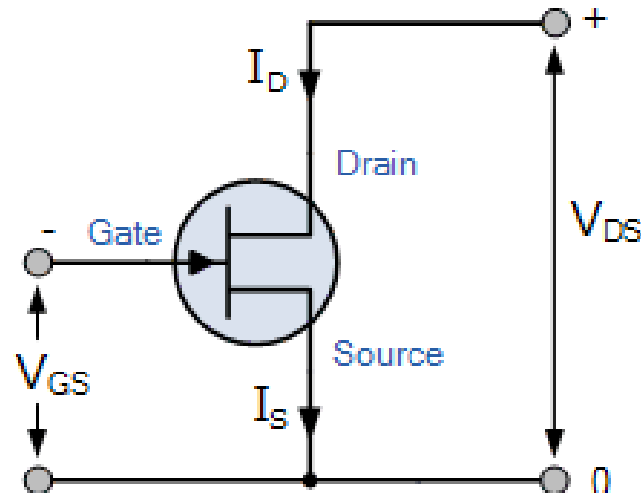
Polłączenie Parametr	OB	OE	OC
Rezystancja wejściowa	mala (kilkadziesiąt omów)	średnia (kilkaset omów)	bardzo duża (kilkaset kiloomów)
Rezystancja wyjściowa	bardzo duża (kilkaset kiloomów)	duża (kilkadziesiąt kiloomów)	mala (kilkadziesiąt omów)
Wzmocnienie prądowe (przenoszenie prądowe)	nieduże od jedności	kilka do kilkuset	kilka do kilkuset
Wzmocnienie napięciowe	kilkaset do kilku tysięcy	kilkaset do kilku tysięcy	nieduże 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



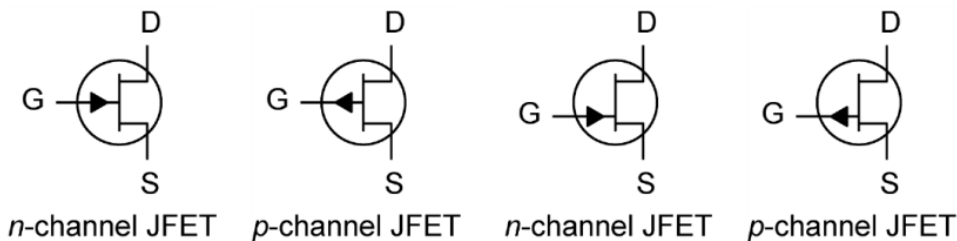
Tranzystor JFET

Tranzystor polowy złączowy JFET

- Junction Field Effect Transistor



oznaczenia



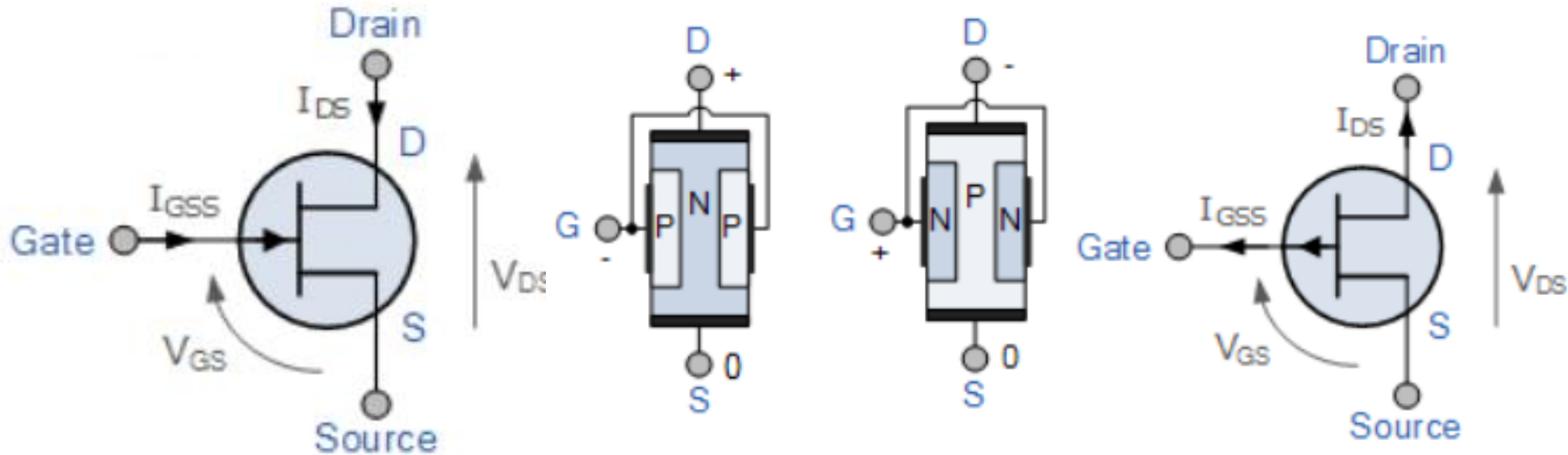
Tranzystor bipolarny (BJT)	Tranzystor polowy (FET)
Emiter - (E) >> Źródło - (S)	
Baza - (B) >> Bramka - (G)	
Kolektor - (C) >> Dren - (D)	

Parametry:

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



Tranzystor JFET



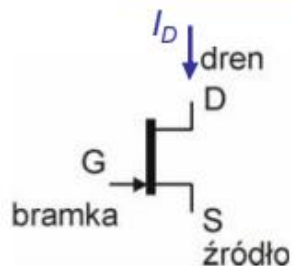
- JFET z kanałem typu n

$$V_{Tn} < 0$$

Typowa polaryzacja

$$V_{GS} < 0$$

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



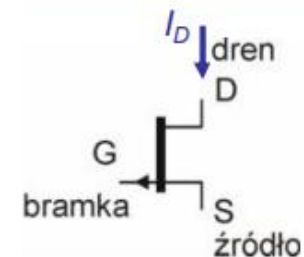
- JFET z kanałem typu p

$$V_{Tp} > 0$$

Typowa polaryzacja

$$V_{GS} > 0$$

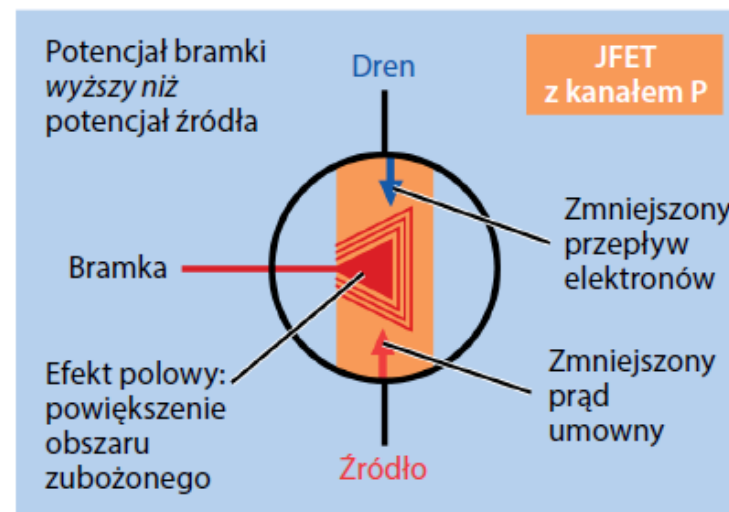
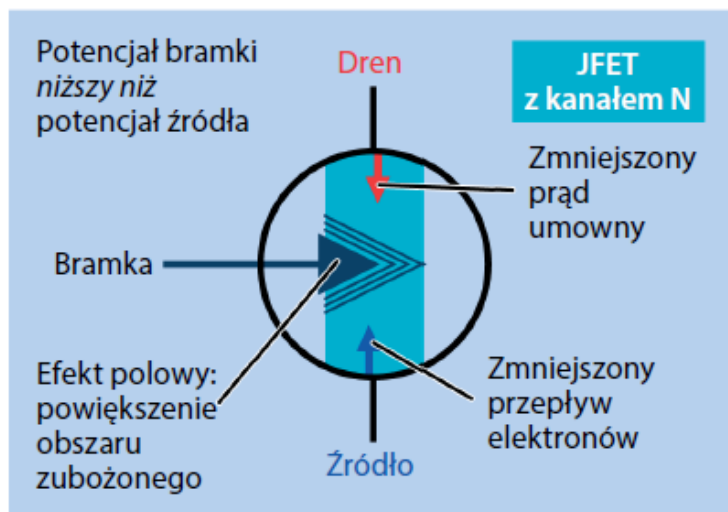
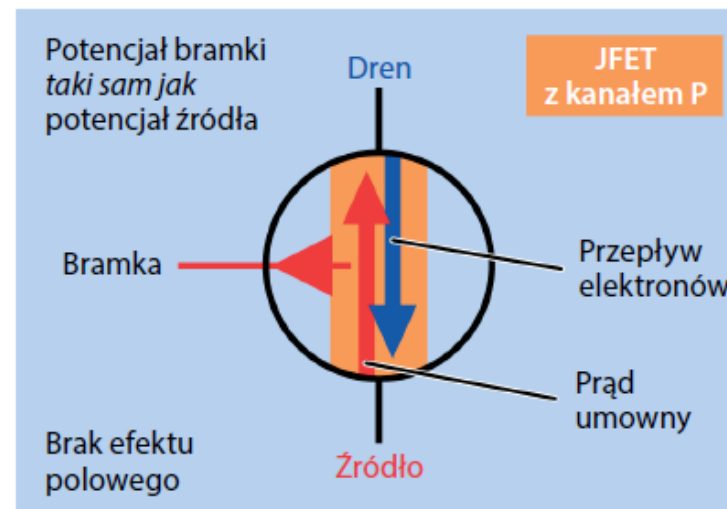
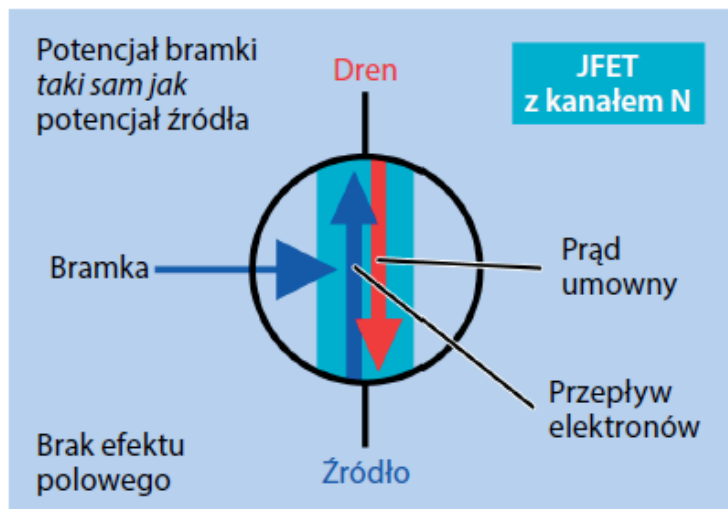
$$V_{DS} < V_{GS} - V_{Tp} < 0 \text{ V}$$



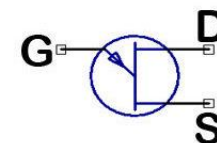
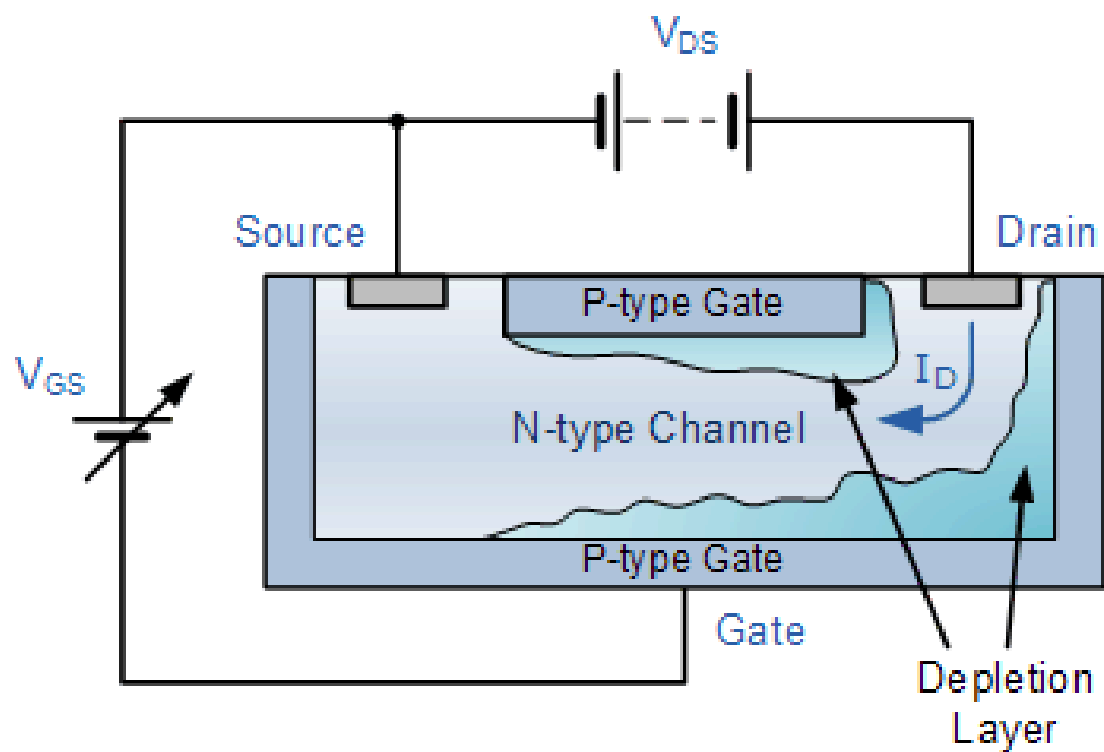
Przeciwnie znaki
napięcia progowego,
prądów i napięć!



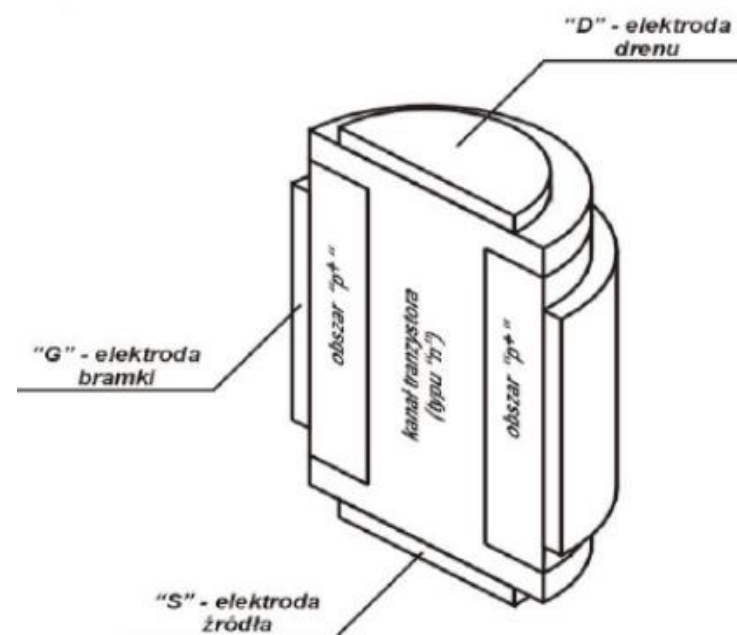
Tranzystor JFET



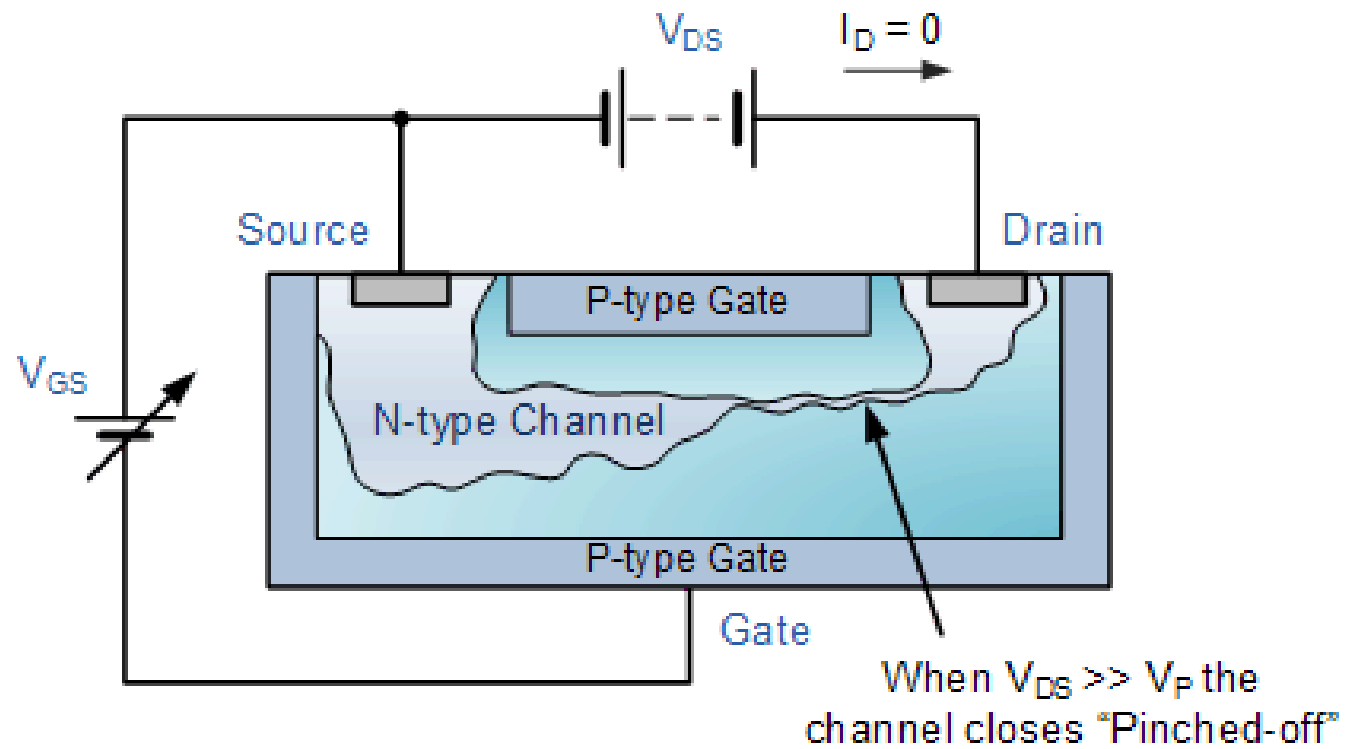
Tranzystor JFET z kanałem N



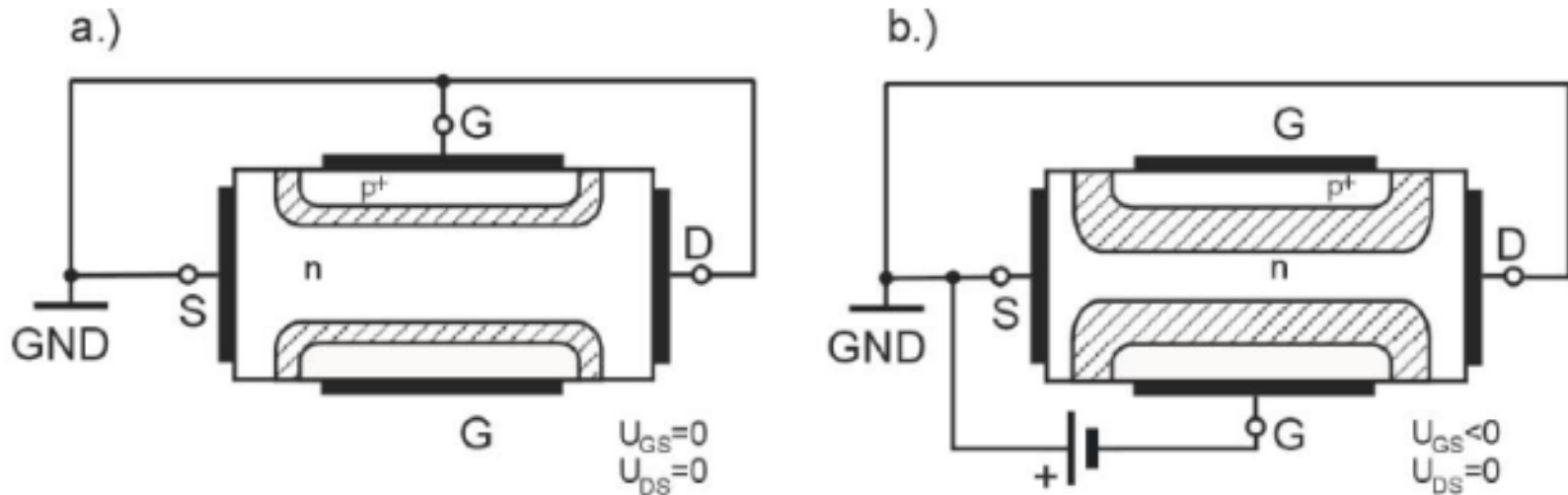
S = Source
D = Drain
G = Gate



Tranzystor JFET z kanałem N



Tranzystor JFET

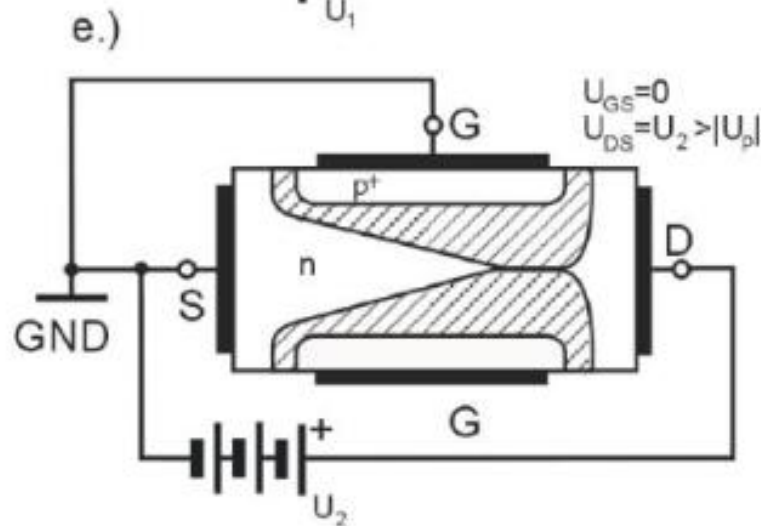
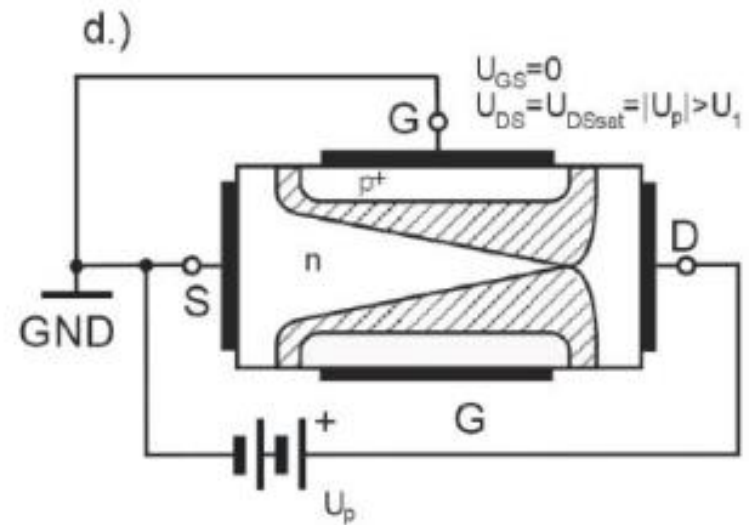
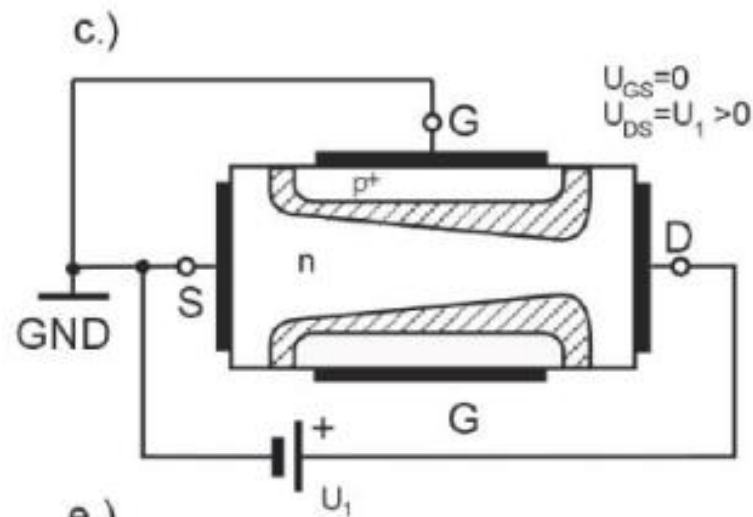



- obszar zubożony na granicy złącza
(inaczej: o. ładunku przestrzennego
lub o. bariery potencjału
lub o. zaporowy)




- **Ground** (ziemia, masa); potencjał
zerowy odniesienia, względem niego
określa się napięcia w układzie

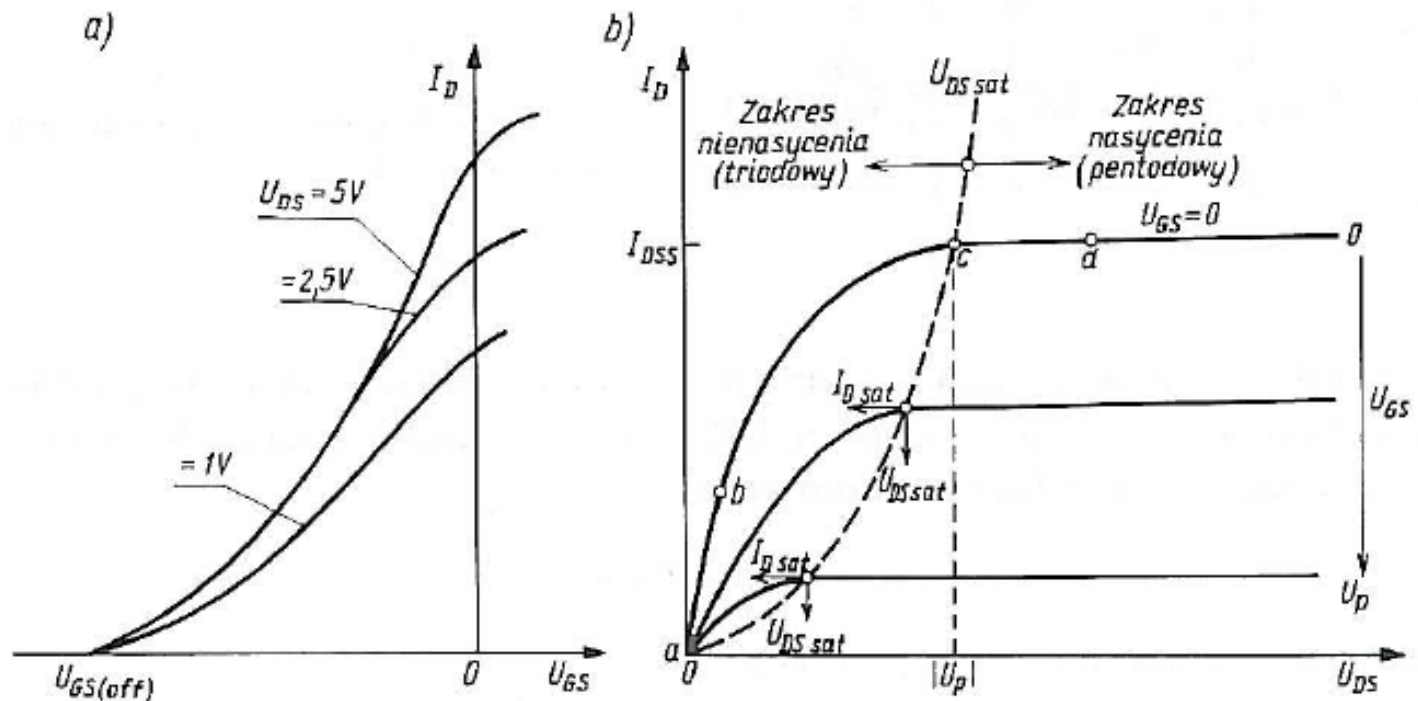
Tranzystor JFET



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

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

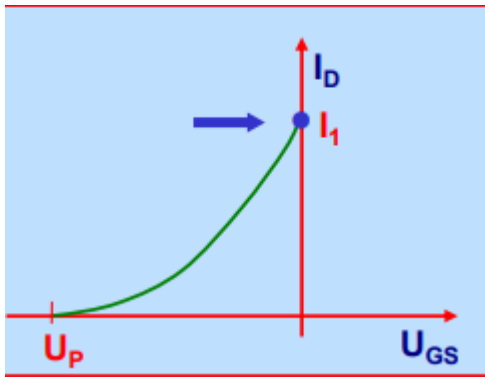
Charakterystyki tranzystora JFET – kanał typu n



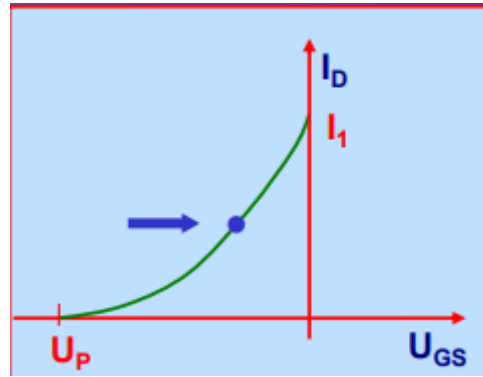
a) przejściowa, zależność prądu drenu I_D od napięcia bramka-źródło U_{GS} , przy stałym napięciu dren-źródło U_{DS}

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

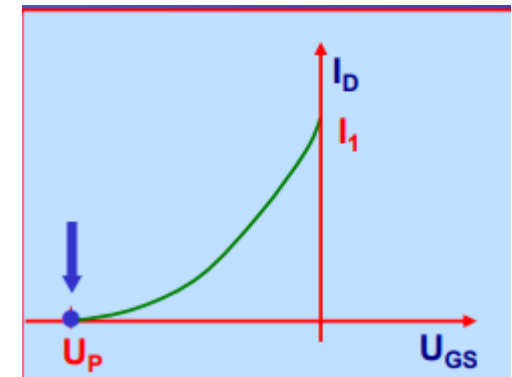
Charakterystyki przejściowe tranzystora JFET



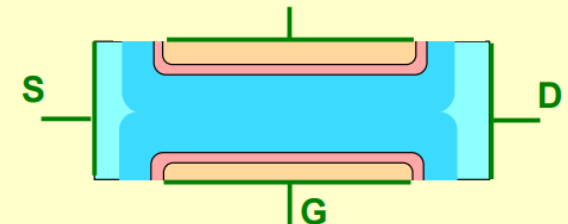
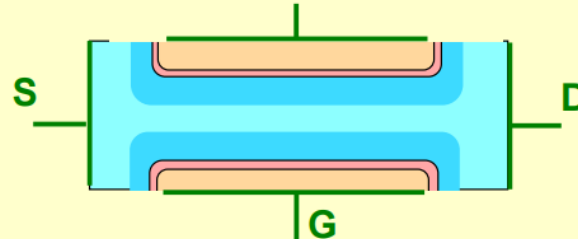
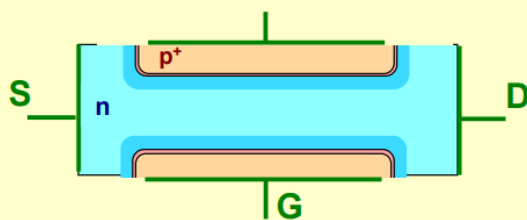
$$\begin{aligned} U_{GS} &= 0 \\ U_{DS} &\text{ - male} \\ I_D &= I_1 \end{aligned}$$



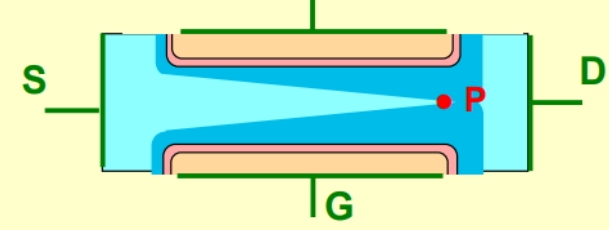
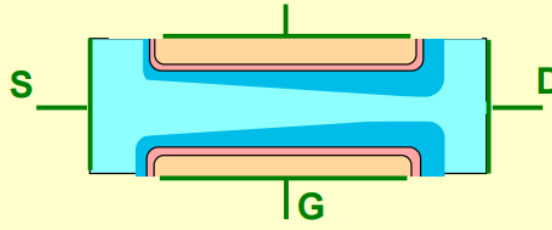
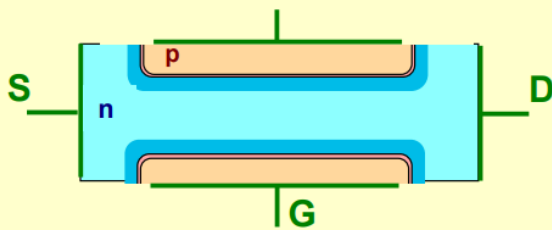
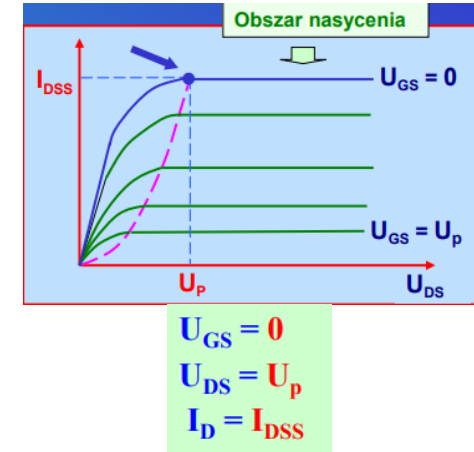
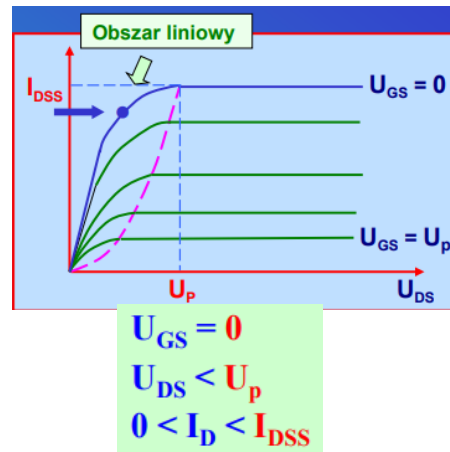
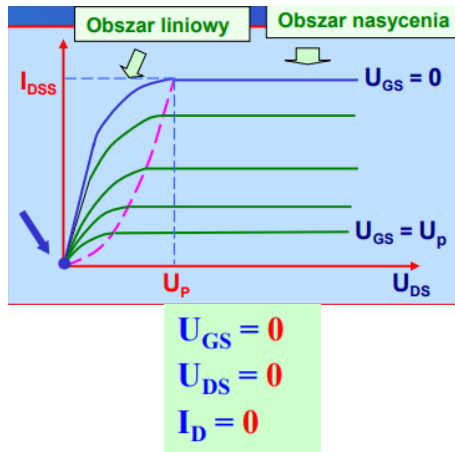
$$\begin{aligned} U_P &< U_{GS} < 0 \\ U_{DS} &\text{ - male} \\ I_D &< I_1 \end{aligned}$$



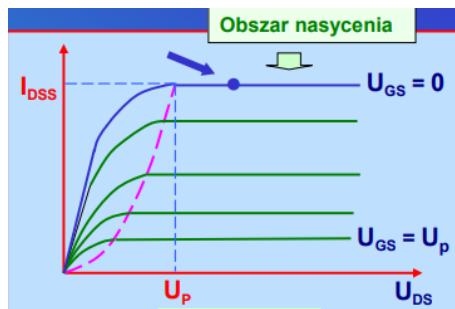
$$\begin{aligned} U_{GS} &= U_P \\ U_{DS} &\text{ - male} \\ I_D &= 0 \end{aligned}$$



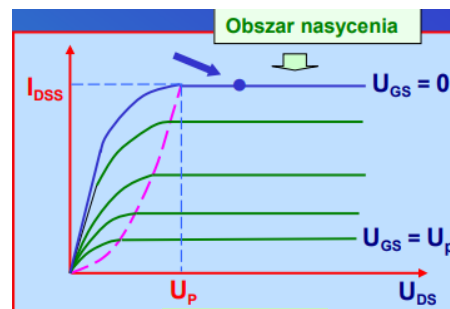
Charakterystyki wyjściowe



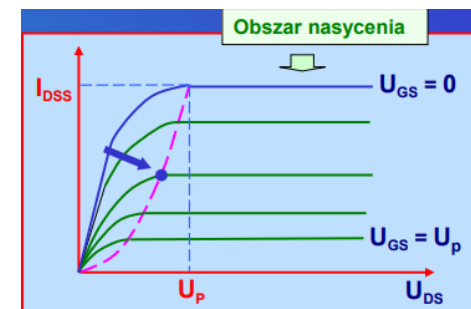
Charakterystyki wyjściowe



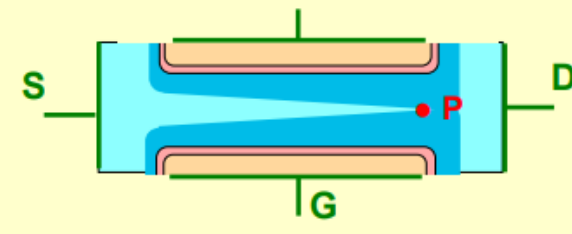
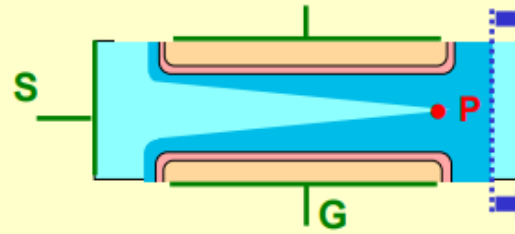
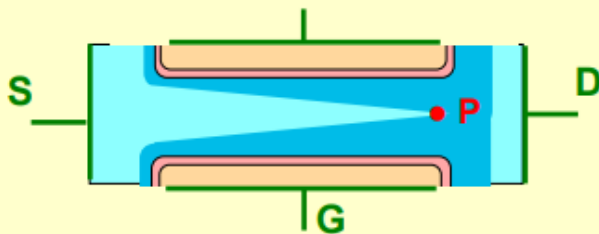
$$\begin{aligned} U_{GS} &= 0 \\ U_{DS} &= U_P \\ I_D &= I_{DSS} \end{aligned}$$



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



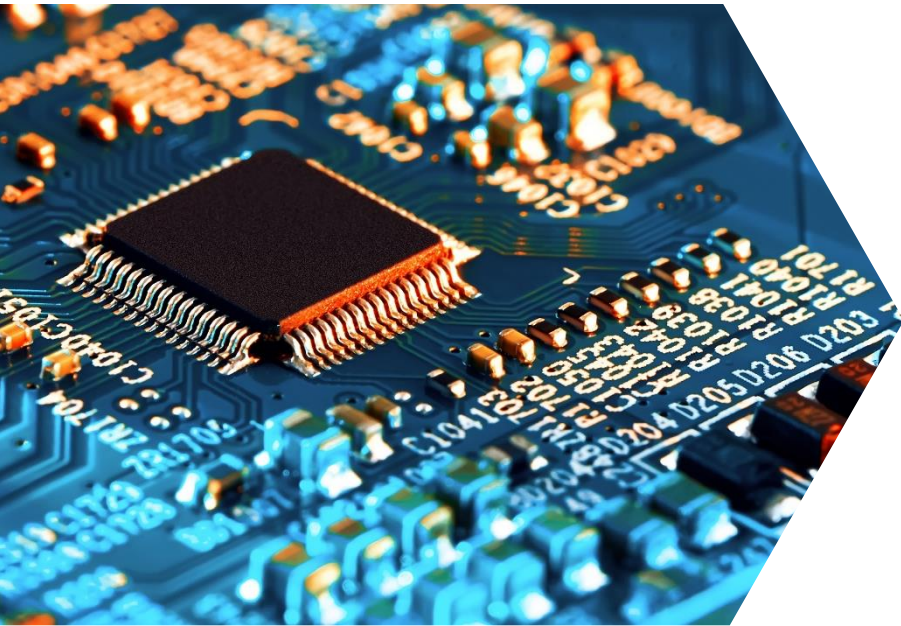
$$\begin{aligned} U_{GS} &< 0 \\ U_{DS} &= U_P \\ I_D &< I_{DSS} \end{aligned}$$



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

- 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)

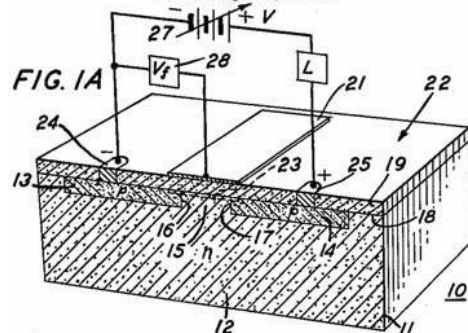
Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



Mohamed Atalla i Dawon Kahng

Rys. 1 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.

Our World
in Data

Transistor count

50,000,000,000

10,000,000,000

5,000,000,000

1,000,000,000

500,000,000

100,000,000

50,000,000

10,000,000

5,000,000

1,000,000

500,000

100,000

50,000

10,000

5,000

1,000

500

100

50

10

5

1

0.5

0.25

0.125

0.0625

0.03125

0.015625

0.0078125

0.00390625

0.001953125

0.0009765625

0.00048828125

0.000244140625

0.0001220703125

6.103515625e-05

3.0517578125e-05

1.52587890625e-05

7.62939453125e-06

3.814697265625e-06

1.9073486328125e-06

9.5367431640625e-07

4.76837158203125e-07

2.384185791015625e-07

1.1920928955078125e-07

5.9604644775390625e-08

2.98023223876953125e-08

1.4901161193847656e-08

7.450580596923828e-09

3.725290298461914e-09

1.862645149230957e-09

9.313225746154785e-10

4.656612873077392e-10

2.328306436538696e-10

1.164153218269348e-10

5.82076609134674e-11

2.91038304567337e-11

1.455191522836685e-11

7.275957614183425e-12

3.637978807091712e-12

1.818989403545856e-12

9.09494701772928e-13

4.54747350886464e-13

2.27373675443232e-13

1.13686837721616e-13

5.6843418860808e-14

2.8421709430404e-14

1.4210854715202e-14

7.105427357601e-15

3.5527136788005e-15

1.77635683940025e-15

8.88178419700125e-16

4.440892098500625e-16

2.2204460492503125e-16

1.1102230246251562e-16

5.551115123125781e-17

2.7755575615628905e-17

1.3877787807814452e-17

6.938893903907226e-18

3.469446951953613e-18

1.7347234759768065e-18

8.673617379884032e-19

4.336808689942016e-19

2.168404344971008e-19

1.084202172485504e-19

5.42101086242752e-20

2.71050543121376e-20

1.35525271560688e-20

6.7762635780344e-21

3.3881317890172e-21

1.6940658945086e-21

8.470329472543e-22

4.2351647362715e-22

2.11758236813575e-22

1.058791184067875e-22

5.293955920339375e-23

2.6469779601696875e-23

1.3234889800848437e-23

6.617444900424219e-24

3.3087224502121095e-24

1.6543612251060547e-24

8.271806125530274e-25

4.135903062765137e-25

2.0679515313825685e-25

1.0339757656912842e-25

5.169878828456421e-26

2.5849394142282105e-26

1.2924697071141052e-26

6.462348535570526e-27

3.231174267785263e-27

1.6155871338926315e-27

8.077935669463157e-28

4.0389678347315785e-28

2.0194839173657892e-28

1.0097419586828946e-28

5.048709793414473e-29

2.5243548967072365e-29

1.2621774483536182e-29

6.310887241768091e-30

3.1554436208840455e-30

1.5777218104420227e-30

7.888609052210114e-31

3.944304526105057e-31

1.9721522630525285e-31

9.860761315262642e-32

4.930380657631321e-32

2.4651903288156605e-32

1.2325951644078302e-32

6.162975822039151e-33

3.0814879110195755e-33

1.5407439555097877e-33

7.703719777548938e-34

3.851859888774469e-34

1.9259299443872345e-34

9.629649721936172e-35

4.814824860968086e-35

2.407412430484043e-35

1.2037062152420215e-35

6.018531076210107e-36

3.0092655381050535e-36

1.5046327690525267e-36

7.523163845262633e-37

3.7615819226313165e-37

1.8807909613156582e-37

9.403954806578291e-38

4.7019774032891455e-38

2.3509887016445727e-38

1.1754943508222863e-38

5.8774717541114315e-39

2.9387358770557157e-39

1.4693679385278579e-39

7.346839692639289e-40

3.6734198463196445e-40

1.8367099231598222e-40

9.183549615799111e-41

4.5917748078995555e-41

2.2958874039497777e-41

1.1479437019748889e-41

5.739718509874444e-42

2.869859254937222e-42

1.434929627468611e-42

7.174648137343055e-43

3.5873240686715275e-43

1.7936620343357637e-43

8.968310171678819e-44

4.484155085839409e-44

2.2420775429197045e-44

1.1210387714598522e-44

5.605193857299261e-45

2.8025969286496305e-45

1.4012984643248152e-45

7.006492321624076e-46

3.503246160812038e-46

1.751623080406019e-46

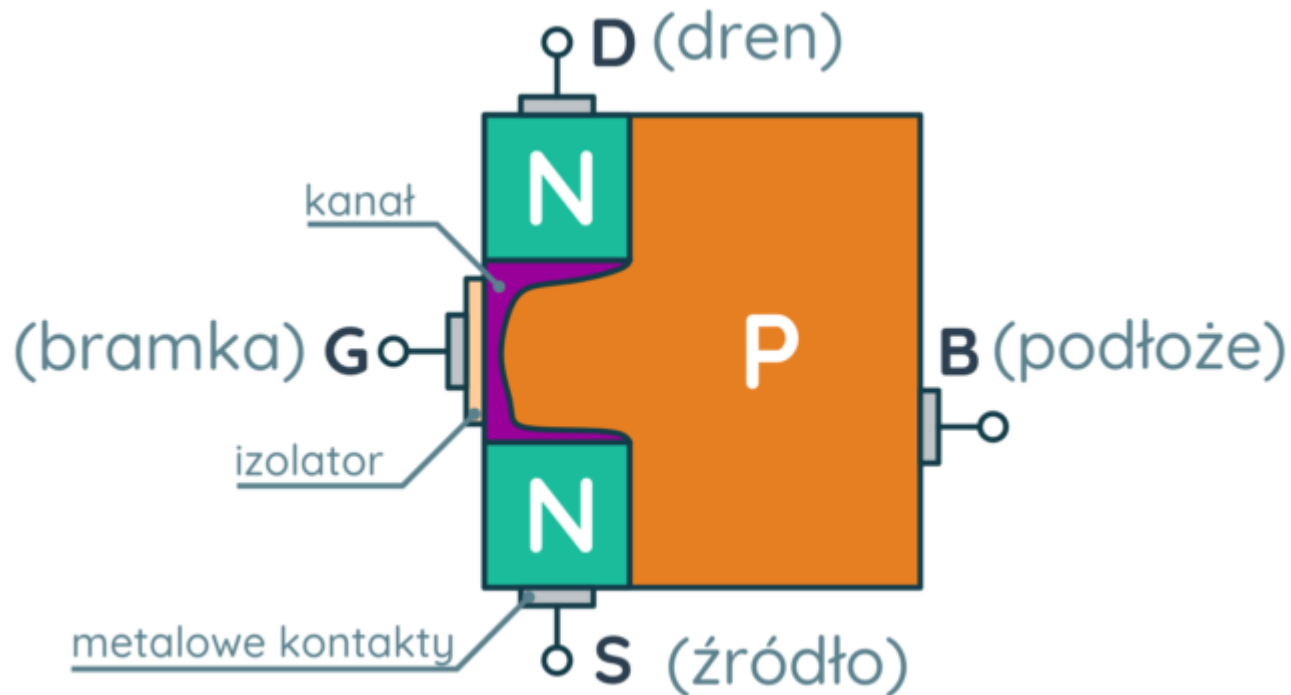
8.758115402030095e-47

4.3790577010150475e-47

2.1895288505075237e-47

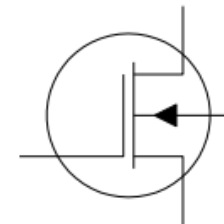
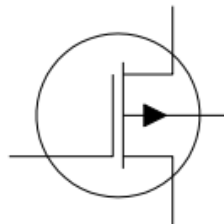
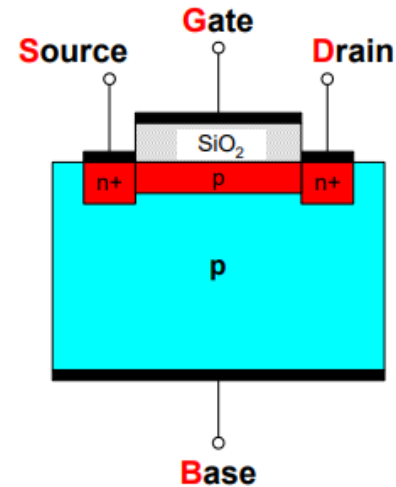
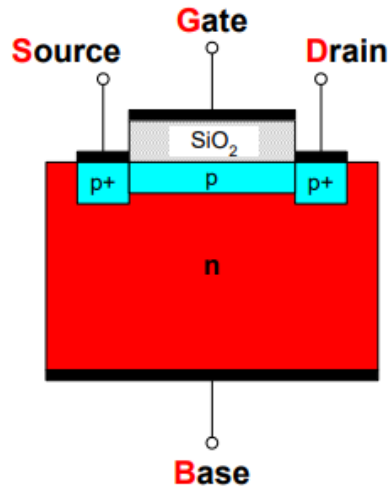
1.0947644252537619e-47

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



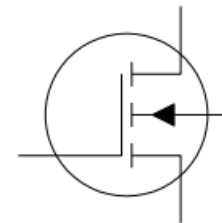
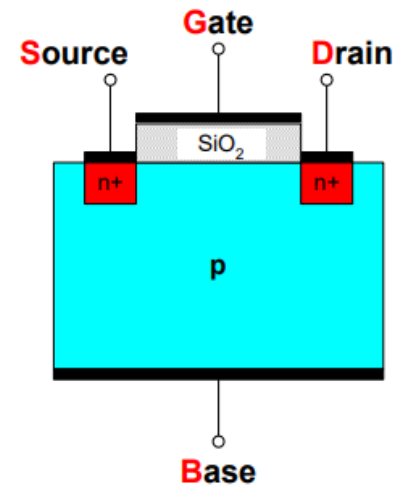
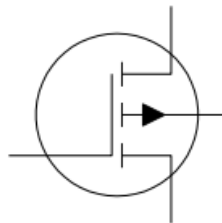
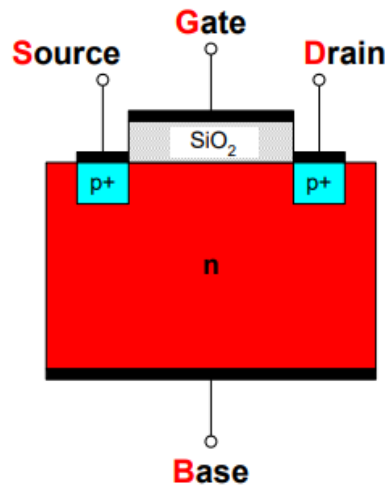
Tranzystor MOSFET

- Z kanałem zubożonym (kanał wbudowany)
- Normalnie włączone

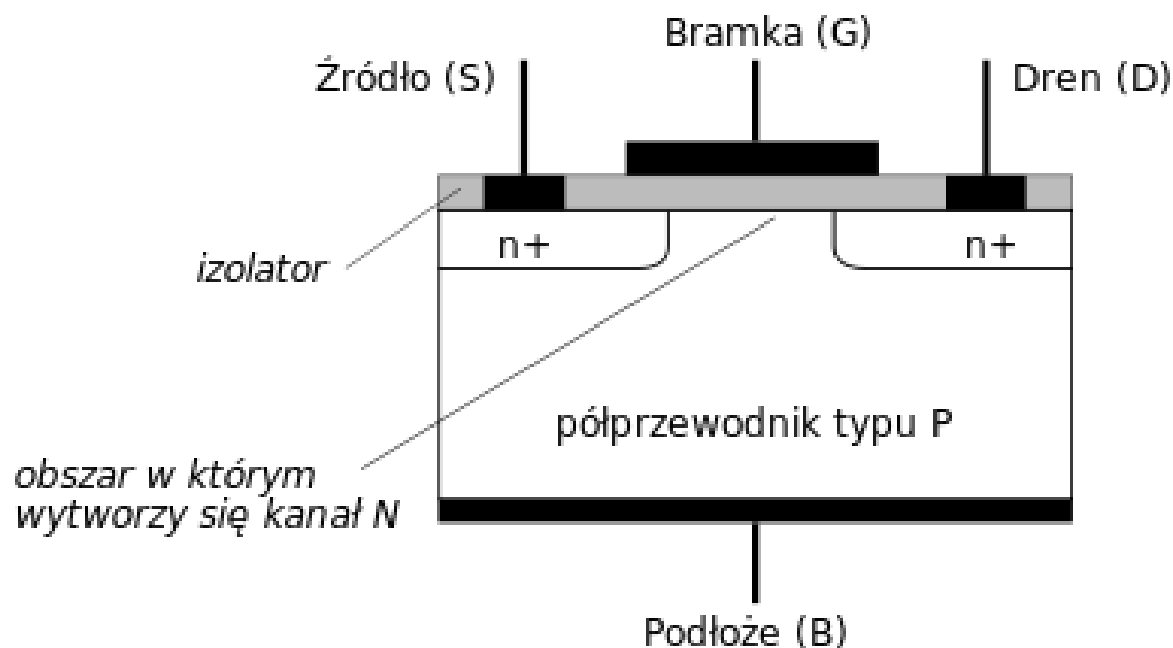


Tranzystor MOSFET

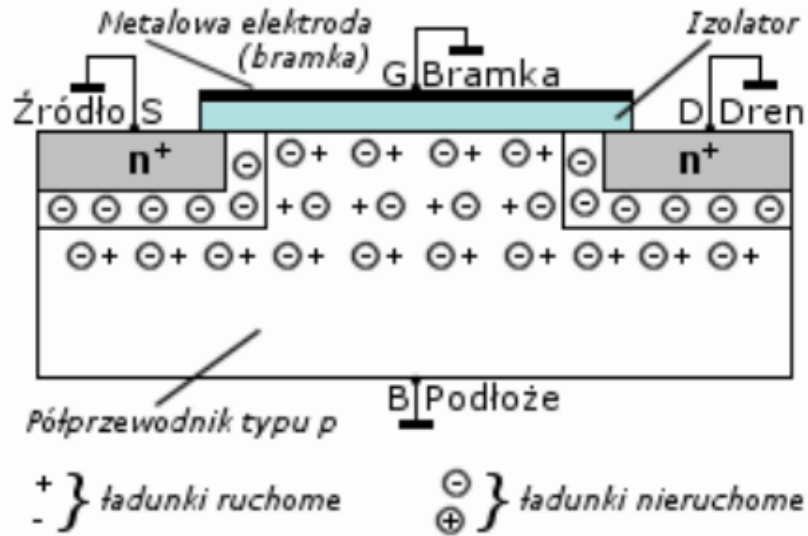
- Z kanałem wzbogaczanym (kanał indukowany)
- Normalnie wyłączone



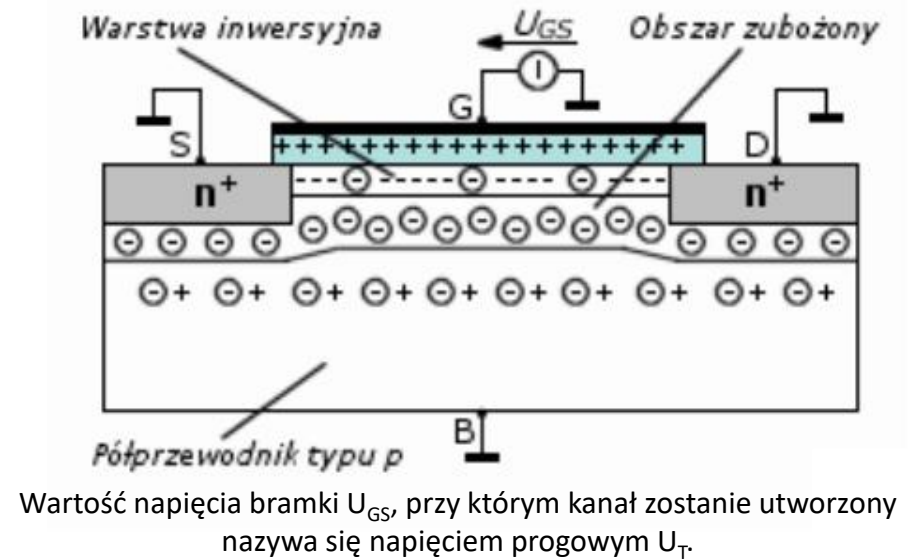
Tranzystor MOSFET - budowa



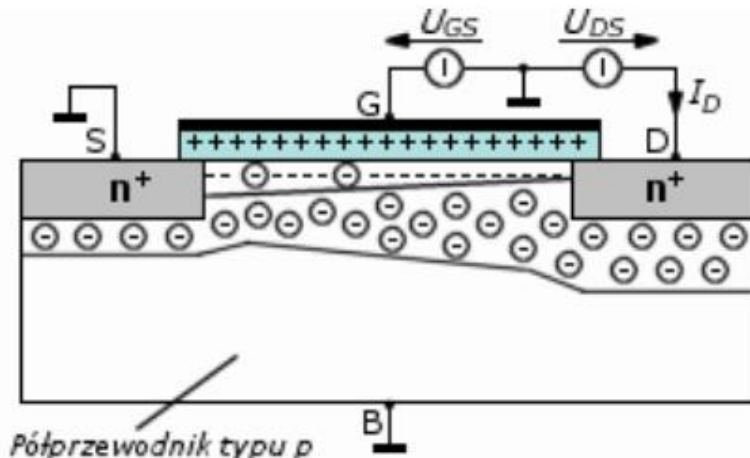
a) $U_{DS} = U_{GS} = 0$



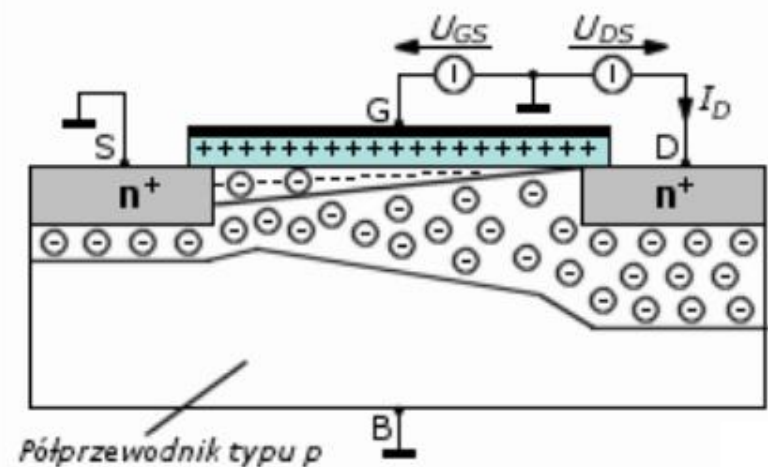
b) $U_{GS} > 0$



c) $U_{DS} > 0$

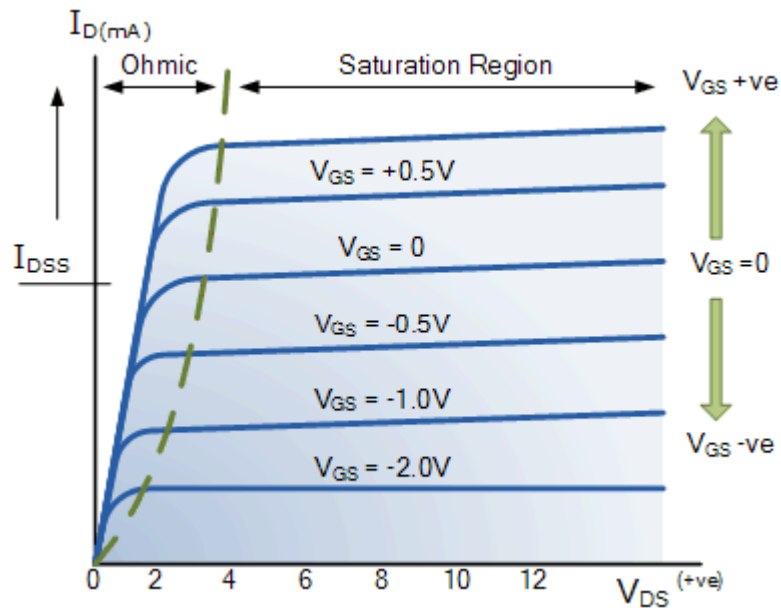


d) $U_{DS} > U_{GS} - U_T$

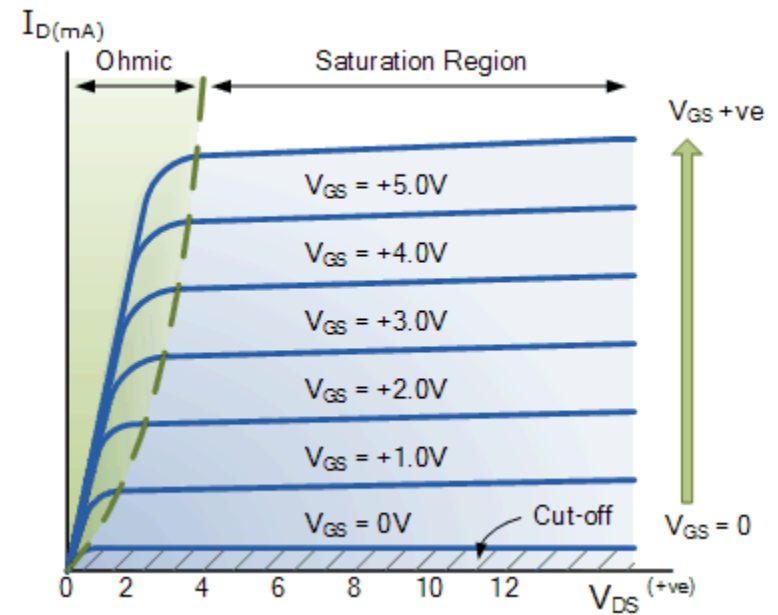


Zakresy pracy

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



Z kanałem zubożonym



Z kanałem wzbożanym

Tranzystor MOSFET n-kanałowy

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			