

Pracownia fizyczna i elektroniczna

Wykład 3: Tranzystory i wzmacniacze tranzystorowe

Kontakt: mkuich@fuw.edu.pl

Materiały: Pracownia fizyczna i elektroniczna (1100-2F23,1100-2BF21)

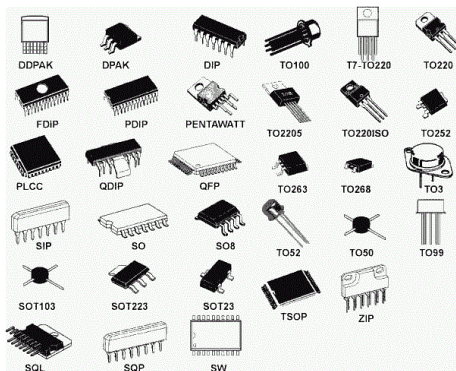
- kurs na platformie Kampus

TRANSfereable resISTOR

- ▶ trójelektrodowy (lub czteroelektrodowy) półprzewodnikowy komponent elektroniczny stanowiący odpowiednie połączenie dwóch złącz p-n
- ▶ **aktywny** nieliniowy element elektroniczny - zdolność blokowania lub wzmacniania sygnału elektrycznego

- Rodziny tranzystorów:

- ▶ Tranzystory bipolarne - sterowane prądem
- ▶ Tranzystory unipolarne (polowe) - sterowane napięciem



Notka historyczna

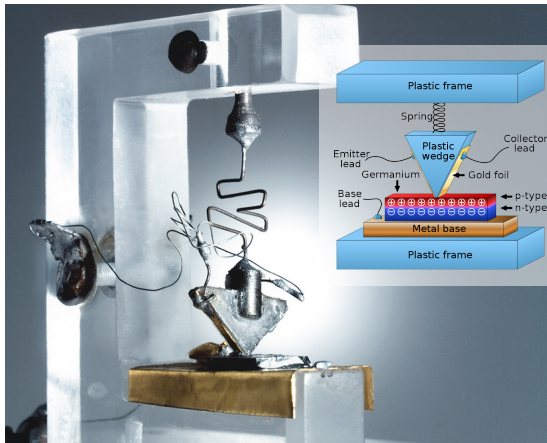
- Rok 1926 - pierwszy patent tranzystora opracowany przez Juliusa Lilienfelda
- Rok 1947 - pierwszy tranzystor skonstruowany przez Johna Bardeena, Waltera Brattaina i Williama Shockley'a
- Rok 1956 - Nagroda Nobla z dziedziny fizyki:
„Za ich badania nad półprzewodnikami i wynalezienie tranzystora”

John Bardeen

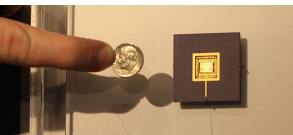
Walter Brattain



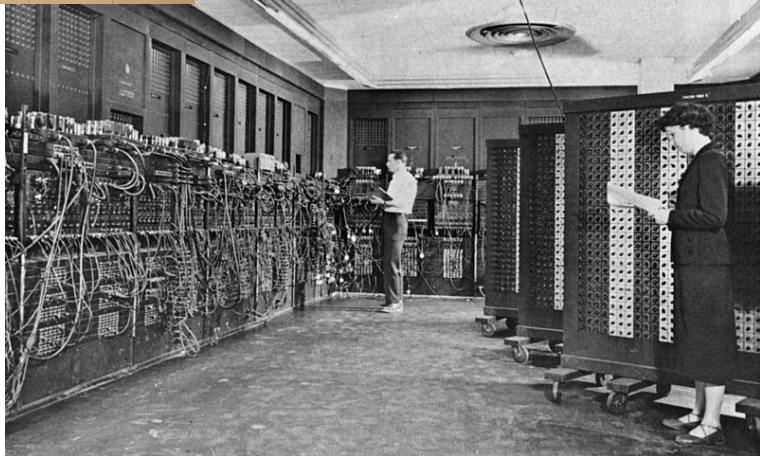
William Shockley



ENIAC - "pierwszy" komputer elektroniczny (1945)

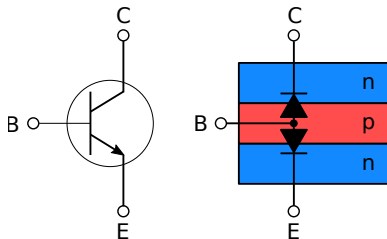


18 000 lamp elektronicznych
masa: ponad 27 ton
powierzchnia ok. 70 m²

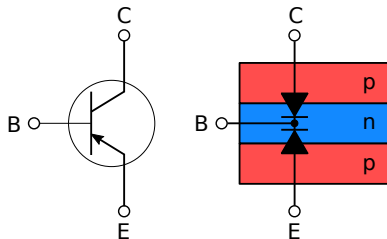


Tranzystor bipolarny

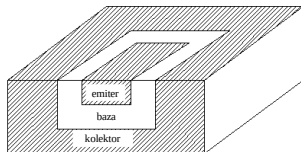
Tranzystor typu n-p-n



Tranzystor typu p-n-p



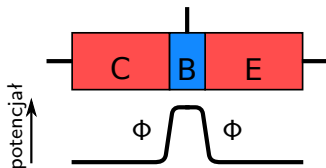
- Tranzystor bipolarny składa się z trzech warstw półprzewodnika o różnym typie przewodnictwa:
 - ▶ emiter (E) - warstwa silnie domieszkowana
 - ▶ baza (B) - warstwa cienka i słabo domieszkowana
 - ▶ kolektor (C) - warstwa najslabiej domieszkowana



Działanie tranzystora bipolarnego złączowego p-n-p

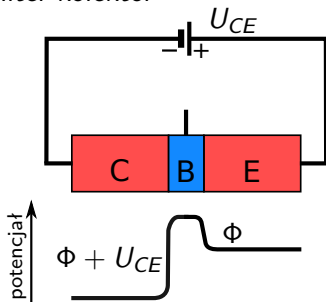
❶ Układ niespolaryzowany (brak wymuszonej polaryzacji zewnętrznej)

- ▶ bariera potencjału na złączu emiter-baza i kolektor-baza
- ▶ dziury z emitera nie przenikają do kolektora → równowaga dynamiczna prądów rekombinacji i generacji



❷ Zewnętrzne źródło polaryzacji układu emiter-kolektor

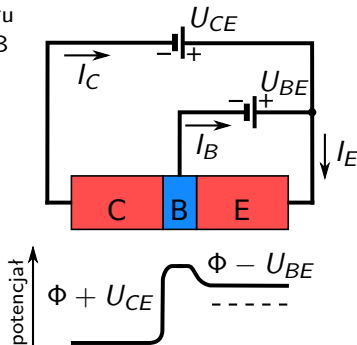
- ▶ napięcie U_{CE} odkłada się na zaporowo spolaryzowanym złączu baza-kolektor
- ▶ baza na potencjale nieustalonym zewnątrz
- ▶ wysokość bariery potencjału na złączu emiter-baza pozostaje bez zmian
- ▶ **brak przepływu prądu w obwodzie**



Działanie tranzystora bipolarnego złączowego p-n-p

3 Złącze emiter-baza spolaryzowane w kierunku przewodzenia napięciem U_{BE}

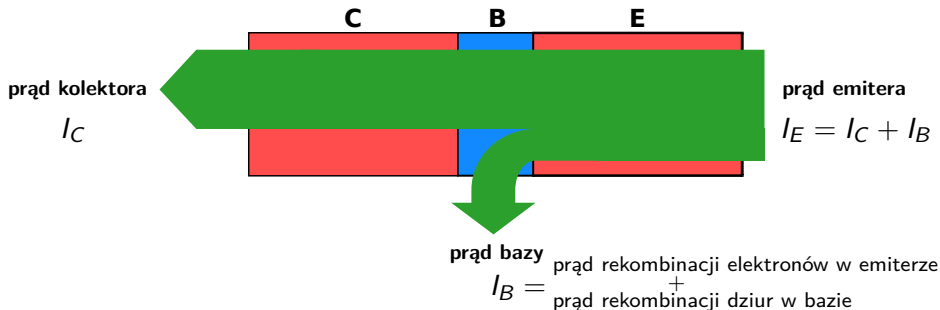
- ▶ napięcie U_{BE} określa wysokość bariery potencjału na złączu E-B (bariera potencjału na złączu E-B maleje), czyli „opór” między emiterym i kolektorem
- ▶ dziury z emitera dyfundują do bazy
- ▶ następnie dziury dyfundują do kolektora
- ▶ w gałęzi kolektora płynie prąd I_C (warunek: niewielka rekombinacja dziur w bazie)
- ▶ w gałęzi bazy płynie prąd I_B
- ▶ prąd I_C i I_B łączą się w gałęzi emitera, gdzie płynie prąd I_E



Tranzystor n-p-n działa analogicznie przy odwrotnej polaryzacji:

- kierunek przepływu prądu jest przeciwny
- nośnikami prądu kolektora są elektrony

Prąd płynący w tranzystorze bipolarnym



- Dziury z emitera dyfundują do bazy $\rightarrow I_E$
- W złączu B-E zachodzą procesy rekombinacyjne:
 - ▶ część dziur rekombinuje w bazie
 - ▶ elektrony z bazy dyfundują do emitera, gdzie także rekombinują
- Jeśli baza odpowiednio cienka, większość dziur z emitera dociera do złącza B-C (dziury wpływające do kolektora tworzą prąd kolektora I_C)
- Wyptyw prądu I_B z bazy do zewnętrznego źródła:
 - ▶ równoważy procesy rekombinacyjne
 - ▶ utrzymuje wysokość bariery potencjału B-E na stałym poziomie

Efekt tranzystorowy

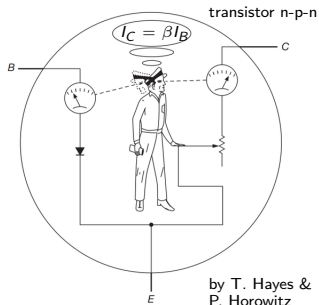
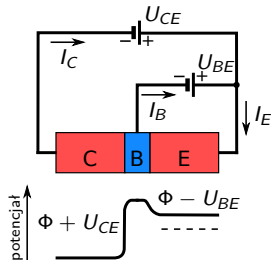
Warunki:

- oba złącza p-n są monokrystaliczne
- obszar emitera zawiera znacznie więcej nośników większościowych niż obszar bazy (odpowiednie domieszkowanie)
- dioda (złącze) emiterowa spolaryzowana w kierunku przewodzenia
- $U_{BE} > U_p$ złącza p-n diody emiterowej
- dioda (złącze) kolektorowa spolaryzowana w kierunku zaporowym
- grubość bazy jest mała w porównaniu z długością drogi dyfuzji nośników większościowych z emitera ($\ll 0.01 - 0.1$ mm); tj. czas rekombinacji dziur w bazie musi być znacznie dłuższy niż czas ich dyfuzji przez bazę

wtedy zachodzi relacja:

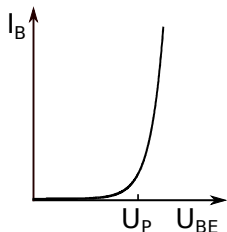
$$I_C = \beta I_B$$

β - współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora; $\beta \approx 100$, o ile źródła zezwalają

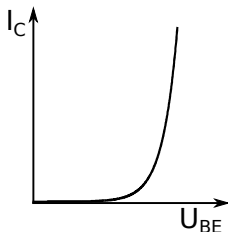


Charakterystyki tranzystora bipolarnego

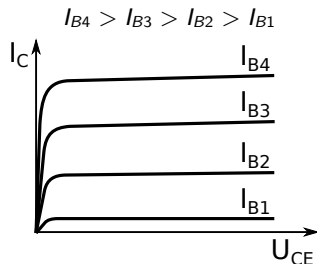
WEJŚCIOWA



PRZEJŚCIOWA

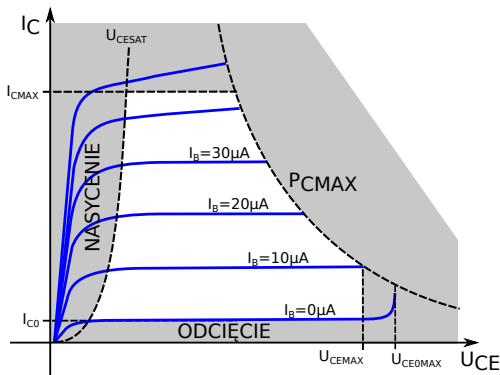


WYJŚCIOWA



- Wprowadzenie prądu do bazy (I_B), czyli jednocześnie wywołanie przepływu prądu kolektora, jest możliwe, gdy napięcie baza-emiter (U_{BE}) przekroczy napięcie przewodzenia złącza
- Do wywołania dużej zmiany prądu kolektora (I_C) wystarczy mała zmiana prądu bazy (I_B), tj. napięcia baza-emiter (U_{BE})
- Prąd kolektora (I_C) słabo zależy od napięcia kolektor-emiter (U_{CE}) dla stałego prądu bazy (I_B)
! wyjątek \rightarrow obszar nasycenia tranzystora, gdzie $I_C \neq \beta I_B$

Parametry graniczne tranzystora



- $P_{C_{max}}$ - maksymalna dopuszczalna moc strat, maksymalna moc, jaka może się wydzielać na obu złączach tranzystora i przy której tranzystor może pracować w sposób długotrwały; Krzywa mocy tranzystora jest opisana hiperbolą

$$I_C = P_{C_{max}} / U_{CE}$$

- $I_{C_{max}}$ - maksymalny dopuszczalny prąd kolektora wynikający ze zmian współczynnika wzmocnienia prądowego
- I_{C_0} - prąd zerowy kolektora
- $U_{CE_{max}}$ - maksymalne dopuszczalne napięcie kolektor-emiter ($U_{CE0_{max}}$ - groźba przebicia złącza kolektorowego)
- $U_{CE_{sat}}$ - napięcie nasycenia tranzystora

Wzmacniacze tranzystorowe

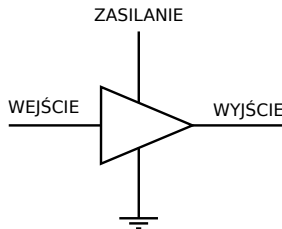
- Wzmacniacz to układ elektroniczny, w którym **energia z układu zasilania** jest zamieniana na **energię sygnału wyjściowego**
- Sygnał wyjściowy jest funkcją sygnału wejściowego
- Zakładamy kształt sygnału wejściowego (sterującego):

$$u_{WE}(t) = U_{WE} \cos(\omega t) + U_{WE0}$$

→ podkład stały U_{WE0}

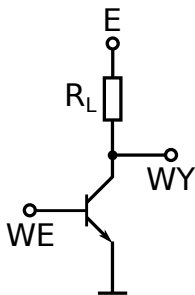
→ składowa zmienna harmoniczna o amplitudzie U_{WE} - sygnał użyteczny niosący informację

- Zakładamy tę samą postać napięcia wyjściowego i wejściowego oraz tę samą postać prądu wyjściowego i wejściowego, czyli pracę wzmacniacza w zakresie liniowym
- Wzmacniacz tranzystorowy to specjalny, sterowany dzielnik napięcia zasilającego, w którym jednym z rezystorów w tym dzielniku jest tranzystor

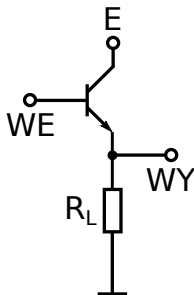


Podstawowe układy wzmacniające z tranzystorem bipolarnym

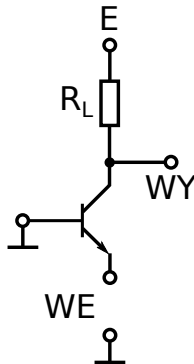
o wspólnym emiterze



o wspólnym kolektorze



o wspólnej bazie



- Inne wyspecjalizowane wzmacniacze są modyfikacjami lub kombinacjami układów podstawowych
- Przypomnienie o prądzie płynącym w tranzystorze:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

Wzmacniacz o wspólnym emiterze

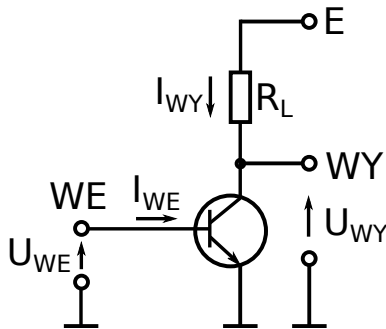
- prąd wejściowy = prąd bazy
- prąd wyjściowy = prąd kolektora:

zakładając, że I_{WY} mierzymy amperomierzem podłączonym szeregowo do R_L

$$I_{WY} = \beta I_{WE}$$

- ▶ **duże wzmocnienie prądowe**
- napięcie wyjściowe mierzymy między kolektorem a emiterem:
$$U_{WY} = E - I_{WY} R_L$$
- ▶ **odwrócenie fazy** U_{WE} względem U_{WY} o 180°
- dla odpowiednio dobranej rezystancji opornika R_L :

- ▶ **duże wzmocnienie napięciowe**
- ▶ **duże wzmocnienie mocy**



Wzmacniacz o wspólnym kolektorze

- prąd wejściowy = prąd bazy
- prąd wyjściowy = prąd emitera:

$$I_{WY} = (\beta + 1)I_{WE}$$

► **duże wzmocnienie prądowe**

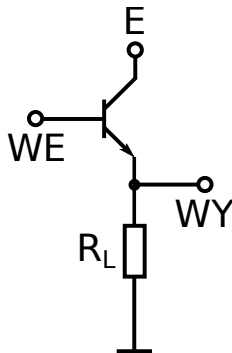
- napięcie wyjściowe:

$$U_{WY} = U_{WE} - U_{BE}$$

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{U_{WE} - U_{BE}}{U_{WE}} < 1$$

► **brak wzmocnienia napięciowego**

► fazy sygnału wyjściowego i wejściowego są zgodne



Wzmacniacz o wspólnej bazie

- prąd wejściowy = prąd emitera:

$$I_{WE} = (\beta + 1)I_B$$

- prąd wyjściowy = prąd kolektora:

$$I_{WY} = (\beta)I_B$$

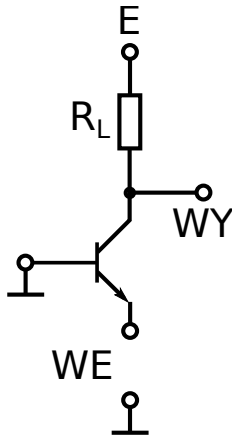
$$\frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{\beta}{\beta + 1} < 1$$

► **brak wzmacnienia prądowego**

- napięcie wyjściowe:

$$U_{WY} = E - I_{WY}R_L$$

- dla odpowiedniego oporu rezystora R_L można uzyskać duże zmiany napięcia na wyjściu, czyli **możliwe duże wzmacnienie napięciowe**
- napięcie wyjściowe zgodne w fazie z napięciem wejściowym

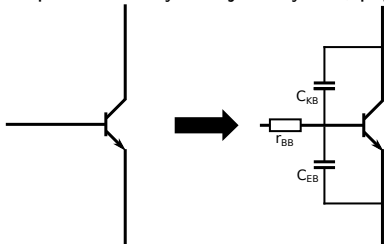


Podsumowanie

Wzmacniacz o:	wspólnym emiterze	wspólnym kolektorze	wspólnej bazie
Wzmocnienie napięciowe	duże	< 1	duże
Wzmocnienie prądowe	duże	duże	< 1
Przesunięcie fazowe WE-WY	180°	0°	0°
Pasma przenoszenia	wąskie	średnie	szerokie

Pasma wzmocnienia tranzystora

- Pasma wzmocnienia jest określone przez: własności tranzystora (jego wielkości pasożytnicze), sposób jego działania w obwodzie wzmacniacza oraz podłączenia wejścia i wyjścia wzmacniacza
- Pasożytnicze elementy tranzystora rzeczywistego: rozproszona rezystancja bazy r_{BB} , pojemności emiter-baza C_{EB} i kolektor-baza C_{KB}



→ r_{BB} i C_{EB} tworzą filtr górnoprzepustowy, który przy wysokich częstotliwościach bocznikuje złącze baza-emiter

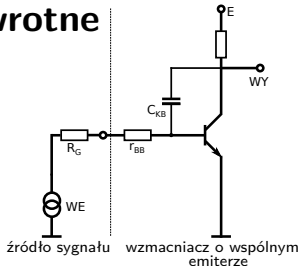
- Współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora maleje wraz ze wzrostem częstotliwości
- Pasma wzmocnienia tranzystora jest ograniczone przez częstotliwość graniczną f_T
- Powyżej częstotliwości f_T współczynnik wzmocnienia prądowego $\beta < 1$



Efekt Millera - ujemne sprzężenie zwrotne

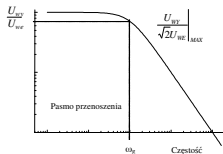
- W układzie wzmacniacza mamy sprzężenie między kolektorem a bazą (filtr górnoprzepustowy) tworzone przez: C_{KB} , r_{BB} oraz R_G
→ przy wysokich częstotliwościach prąd kolektora przenika do bazy

Oddziaływanie sygnału wyjściowego na sygnał wejściowy nazywamy sprzężeniem zwrotnym



- W tym układzie napięcia U_{WE} (bazy) i U_{WY} (kolektora) są przeciwne w fazie
→ sprzężenie zwrotne osłabia sygnał sterujący (**sprzężenie zwrotne ujemne**)
- W układzie o wspólnym kolektorze kolektor tranzystora jest połączony z niskorezystywnym źródłem zasilania - **słaby wpływ efektu Millera**
- W układzie o wspólnej bazie baza ma ustalony potencjał - **nie ma oddziaływania wyjścia wzmacniacza na wejście przez pojemność C_{KB}**

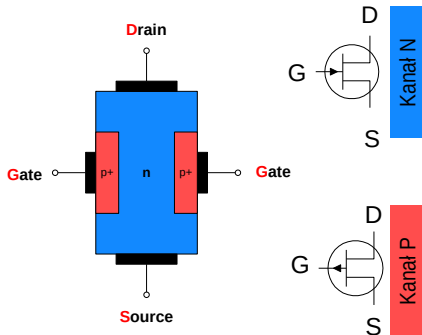
- Pasmo przenoszenia wzmacniacza** określa się podobnie jak pasmo przenoszenia filtrów
→ dla częstotści granicznych wzmacniacza wzmocnienie jest mniejsze o $\frac{1}{\sqrt{2}}$ w stosunku do wzmocnienia maksymalnego



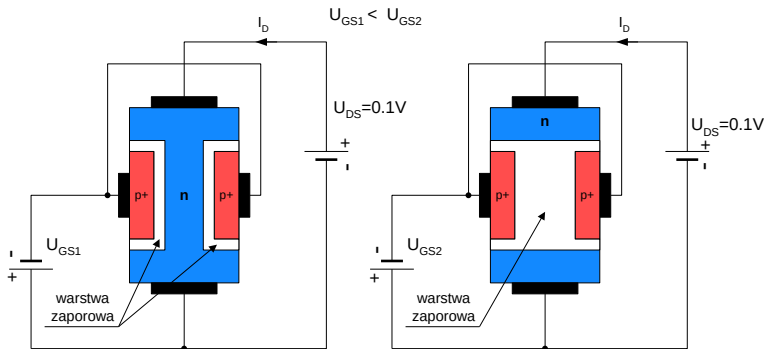
Tranzystory unipolarne (polowe)

► Field Effect Transistor (FET)

- 3 elektrody: **źródło (S)**, **dren (D)** i **bramka (G)**
- Napięcie przyłożone do układu dren-źródło (U_{DS}) powoduje przepływ prądu między tymi elektrodami
- Prąd płynie tzw. **kanalem** między drenem a źródłem
- Napięcie bramki (dodatkowe pole elektryczne w kryształce) wpływa na rozkład nośników prądu w kanale
 - zmienia efektywny przekrój kanału
 - zmienia "opór" dren-źródło

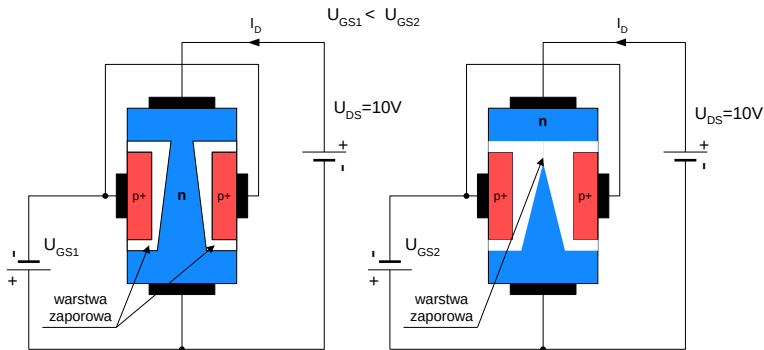


JFET - zasada działania 1



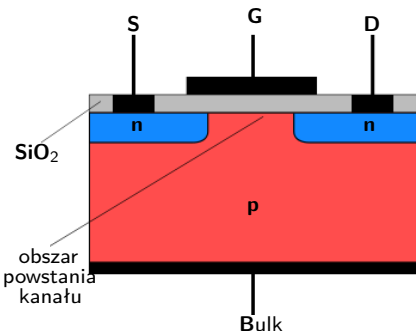
- Zwiększanie napięcia bramki U_{GS} w polaryzacji zaporowej powoduje zwiększenie dyfuzji nośników mniejszościowych do obszaru dren-źródło i poszerzanie się tam obszaru zubożonego (warstwy zaporowej)
- Przy małym napięciu U_{DS} i niewielkich prądach płynących przez kanał szerokość warstw zubożonych jest praktycznie równa na całej długości
- JFET pracuje w trybie liniowym, a prąd drenu liniowo zależy od napięcia dren-źródło

JFET - zasada działania 2



- Dla napięcia dren-źródło $> U_{DS_{sat}}$, JFET pracuje w trybie nasycenia, a prąd drenu zależy praktycznie wyłącznie od napięcia bramka-źródło
- W miarę wzrostu prądu zmienia się rozkład potencjału wzdłuż kanału i szerokość obszaru zubożonego wzrasta w stronę drenu
- Przy ujemnej polaryzacji bramki następuje zwiększenie rezystancji kanału i wcześniejsze zamknięcie kanału (wzrost napięcia drenu przestaje wywoływać wzrost prądu)

Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor



- Jak w JFET mamy elektrody: źródło (S), bramkę (G) i dren (D)
- Dodatkowa elektroda: podłoże (bulk, B)
- Bramka jest odizolowana od półprzewodnika cienką warstwą SiO
- Spolaryzowanie bramki dodatnio względem podłoża powoduje zgromadzenie się mniejszościowych elektronów i odepchnięcie dziur w obszarze kanału
→ możliwy przepływ prądu w obwodzie drenu

- Zmieniając napięcie bramki względem podłoża zmienia się szerokość kanału (oporność między źródłem i drenem)
- Przepływ dużego prądu przez kanał wywołuje spadek napięcia wzdłuż jego długości, co jest przyczyną zmiennej szerokości kanału, a w pewnych warunkach kanał może zostać odcięty

Podsumowanie charakterystyk tranzystorów polowych

złączone		z izolowaną bramką			
		z kanałem zubożonym		z kanałem wzbogacającym	
kanal typu n	kanal typu p	kanal typu n	kanal typu p	kanal typu n	kanal typu p
Wzmacniacze zbudowane z elementów dyskretnych. Analogowe układy scalone.	Wzmacniacze zbudowane z elementów dyskretnych. Analogowe układy scalone.	Wzmacniacze w.cz. zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone.	Wzmacniacze w.cz. zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone.	Wzmacniacze mocy zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone.	Wzmacniacze mocy zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone.