

Tranzystory polowe

Wiadomości podstawowe

Tranzystory polowe w skrócie FET (Field Effect Transistor), są również nazywane unipolarnymi. Działanie tych tranzystorów polega na sterowanym transporcie jednego rodzaju nośników, czyli albo elektronów albo dziur. Sterowanie transportem tych nośników, odbywającym się w części tranzystora zwanej kanałem, odbywa się za pośrednictwem zmian pola elektrycznego przyłożonego do elektrody zwanej bramką.

Bramka jest odizolowana od kanału, a więc pomiędzy nią a pozostałymi elektrodami tranzystora polowego, znajdującymi się na obu końcach kanału (zwanymi źródłem oraz drenem) występuje bardzo duża impedencja.

Tranzystory polowe zajęły obecnie miejsce tranzystorów bipolarnych, zalicza się je do najczęściej stosowanych elementów dyskretnych. Rewelacyjne efekty można uzyskać, stosując tranzystory polowe w połączeniu z obwodami scalonymi, zarówno dla niskich jak i wysokich częstotliwości.

Klasyfikacja tranzystorów polowych

Istnieją dwie zasadnicze grupy tranzystorów polowych, różniących się sposobem odizolowania bramki od kanału. Pierwsza to tranzystory polowe złączone zwane także tranzystorami JFET, w których oddzielenie bramki od kanału jest wykonane za pośrednictwem zaporowo spolaryzowanego złącza p-n. W drugiej grupie tranzystorów polowych bramka jest odizolowana od kanału cienką warstwą izolatora, którym jest najczęściej dwutlenek krzemu. Tranzystory nazywane są tranzystorami z izolowaną bramką lub tranzystorami MOSFET.

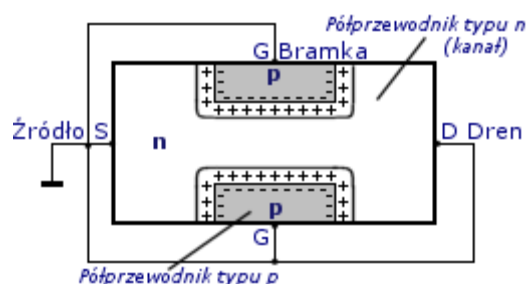
Tranzystory MOSFET można podzielić dalej w zależności od rodzaju kanału na tranzystory z kanałem wbudowanym (tranzystory normalnie załączone, tranzystory z kanałem zubożanym) oraz tranzystory z kanałem indukowanym (tranzystory normalnie wyłączone). Poniższa tabela przedstawia sześć typowych tranzystorów polowych z ich symbolami graficznymi, charakterystykami (opisanymi później) i krótkim opisem zastosowania.

złączowe		z izolowaną bramką			
		z kanałem zubożonym		z kanałem wzbogacającym	
kanał typu n	kanał typu p	kanał typu n	kanał typu p	kanał typu n	kanał 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.

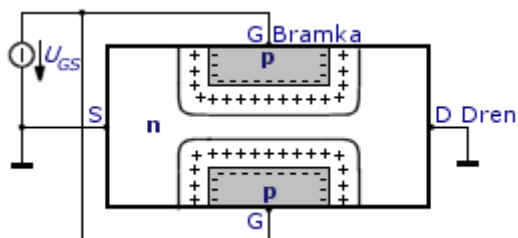
Jak widać każdy rodzaj tranzystora polowego dzieli się dodatkowo na tranzystor z kanałem typu n lub p. Rodzaj kanału zależy od rodzaju nośników prądu. Dla tranzystorów z kanałem p są to dziury, a dla tranzystorów z kanałem n elektrony. Dla tranzystorów z kanałem n prąd płynący przez kanał jest tym mniejszy im mniejszy jest potencjał na bramce, a dla tranzystorów z kanałem p jest odwrotnie.

Zasada działania tranzystora JFET

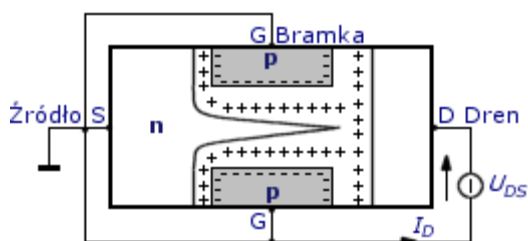
Zasadę działania opisują poniższe rysunki:



Jednorodny obszar półprzewodnika występujący między drenem i źródłem stanowi kanał, przez który płynie prąd i którego rezystancję można zmieniać przez zmianę szerokości kanału. Zmianę szerokości kanału uzyskuje się przez rozszerzenie lub zwężenie warstwy zaporowej złącza p-n, a więc przez zmianę napięcia U_{GS} polaryzującego to złącze w kierunku zaporowym.



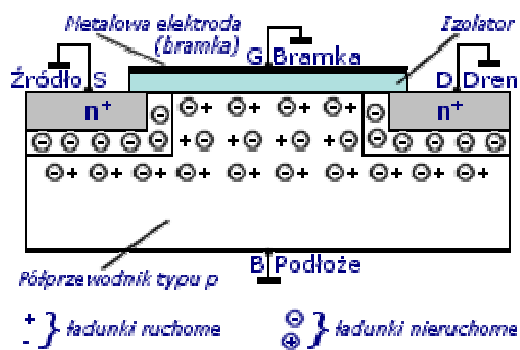
Dalsze zwiększanie napięcia U_{GS} może spowodować połączenie się warstw zaporowych i zamknięcie kanału.



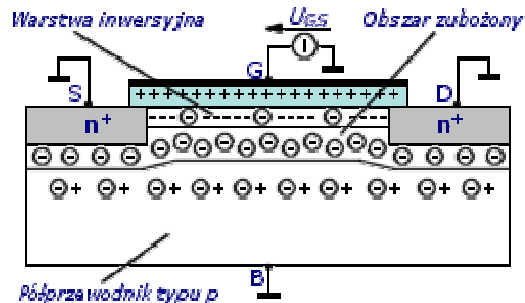
Rezystancja będzie wówczas bardzo duża. Można powiedzieć, że tranzystor JFET jest swego rodzaju rezystorem sterowanym napięciowo.

Zasada działania tranzystora MOSFET

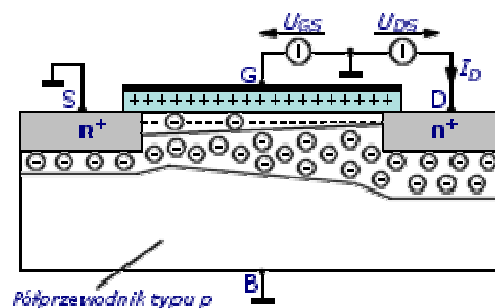
Poniżej przedstawiono zasadę działania tranzystora MOSFET z kanałem indukowanym typu n i podłożem typu p.



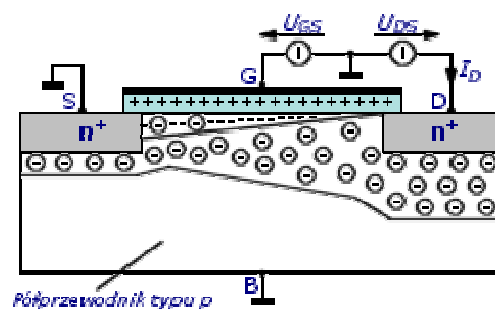
Na powyższym rysunku przedstawiona jest sytuacja, w której polaryzacja drenu i bramki jest zerowa czyli $U_{DS}=0$ i $U_{GS}=0$. W takiej sytuacji brak jest połączenia elektrycznego pomiędzy drenem i źródłem czyli brak jest kanału. Jeżeli zaczniemy polaryzować bramkę coraz większym napięciem $U_{GS}>0$ to po przekroczeniu pewnej wartości tego napięcia, zwanej napięciem progowym U_T , zaistnieje sytuacja przedstawiona na poniższym rysunku.



Dodatni ładunek bramki spowodował powstanie pod jej powierzchnią warstwy inwersyjnej złożonej z elektronów swobodnych o dużej koncentracji oraz głębiej położonej warstwy ładunku przestrzennego jonów akceptorowych, z której wypchnięte zostały dziury. Powstaje w ten sposób w warstwie inwersyjnej połączenie elektryczne pomiędzy drenem a źródłem. Przewodność tego połączenia zależy od koncentracji elektronów w indukowanym kanale, czyli od napięcia U_{GS} . Wielkość prądu płynącego powstałym kanałem zależy niemalże liniowo od napięcia U_{DS} . Zależność ta nie jest jednak do końca liniowa, ponieważ prąd ten zmienia stan polaryzacji bramki, na skutek czego im bliżej drenu, tym różnica potencjałów pomiędzy bramką i podłożem jest mniejsza, a kanał płytszy.



Gdy w wyniku dalszego zwiększania napięcia U_{GS} przekroczona zostanie pewna jego wartość zwana napięciem odcięcia U_{GSoff} , lub wartość napięcia U_{DS} zrówna się z poziomem napięcia U_{GS} ($U_{DS}=U_{GS}$), powstały kanał całkowicie zniknie.



Można zatem powiedzieć iż dla małych wartości napięcia dren-źródło omawiany tranzystor typu MOSFET stanowi liniowy rezystor, którego rezystancję można regulować za pomocą napięcia bramka-źródło.

Podstawowe parametry tranzystora oraz parametry różniczkowe g_m i g_{ds} - ich sens fizyczny

Tranzystory unipolarne opisuje się, między innymi za pomocą następujących parametrów:

- **Napięcie odcięcia bramka-źródło** $U_{GS(OFF)}$, czyli napięcie jakie należy doprowadzić do bramki, aby przy ustalonym napięciu U_{DS} nie płynął prąd drenu.
- **Napięcie progowe** U_P - napięcie jakie należy doprowadzić, aby przez tranzystor popłynął prąd
- **Prąd nasycenia** I_{DSS} prąd drenu płynący przy napięciu $U_{GS}=0$ i określonym napięciu U_{DS} .
- **Prąd wyłączenia** $I_{D(OFF)}$ - prąd drenu płynący przy spolaryzowaniu bramki napięciem $|U_{GS}| > |U_{GS(OFF)}|$
- **Rezystancja statyczna włączenia** $R_{DS(ON)}$ - rezystancja między drenem a źródłem tranzystora pracującego w zakresie liniowym charakterystyki $I_D = f(U_{DS})$ przy $U_{GS}=0$;
- **Rezystancja statyczna wyłączenia** $R_{DS(OFF)}$ - rezystancja między drenem a źródłem tranzystora znajdującego się w stanie odcięcia
- **Dopuszczalny prąd drenu** I_{Dmax}
- **Dopuszczalny prąd bramki** I_{Gmax}
- **Dopuszczalne napięcie dren-źródło** U_{DSmax}
- **Dopuszczalne straty mocy** $P_{tot max}$

Właściwości wzmacniającego tranzystora określa stosunek zmiany prądu I_D do zmiany napięcia sterującego U_{GS} nazywany konduktancją wzajemną (transkonduktancją) g_m :

$$g_m = \partial I_D / \partial U_{GS}$$

W interpretacji graficznej g_m oznacza tangens kąta nachylenia stycznej do charakterystyki przejściowej w określonym punkcie. Wyznaczając w analogiczny sposób nachylenie stycznej do charakterystyki wyjściowej w punkcie otrzymać można drugi ważny parametr tranzystora g_{ds} zwany konduktancją drenu lub konduktancją wyjściową.

$$g_{ds} = \partial I_D / \partial U_{DS}$$

Wykorzystując wyprowadzone powyżej parametry można przedstawić jeszcze jeden parametr tranzystora zwany współczynnikiem wzmocnienia napięciowego, który można opisać zależnością:

$$k_u = \frac{g_m}{g_{ds}}$$

Typowe parametry tranzystorów polowych dla dwóch przykładowych tranzystorów przedstawione zostały poniżej:

Typ		BF245B	IRF530
Technologia		Złączowy	MOS
Rodzaj		Kanał typu n zubożany	Kanał typu n wzbogacany
Parametry graniczne			
Napięcie dren-źródło	U_{DSmax}	30V	100V
Prąd drenu	I_{Dmax}	25mA	10A
Napięcie bramka-źródło	U_{GSmax}	-30V	$\pm 20V$
Moc strat	P_{strmax}	300mW	75W
Parametry charakterystyczne			
Napięcie progowe	U_P	-1,5...-4,5V	1,5...3,5V
Prąd drenu przy $U_{GS}=0$	I_{DSS}	6..15mA	5A
Transkonduktancja	g_{mm}	5mA/V	5A/V
Rezystancja w stanie włączenia	r_{dson}	200W	0,14W
Maksymalny prąd bramki	I_{Gmax}	5nA	0,5mA
Prąd drenu w stanie odcięcia	I_{Dmax}	10nA	1mA
Pojemność wejściowa	C_{weS}	4pF	750pF
Pojemność wyjściowa	C_{wyS}	1,6pF	300pF
Pojemność zwrotna	C_{wS}	1,1pF	50pF
Pole wzmocnienia	f_S	700MHz	
Czas włączenia	t_{on}		30ns
Czas wyłączenia	t_{off}		50ns

Sposoby polaryzacji tranzystora - praca w obszarze aktywnym, odcięcia, nasycenia

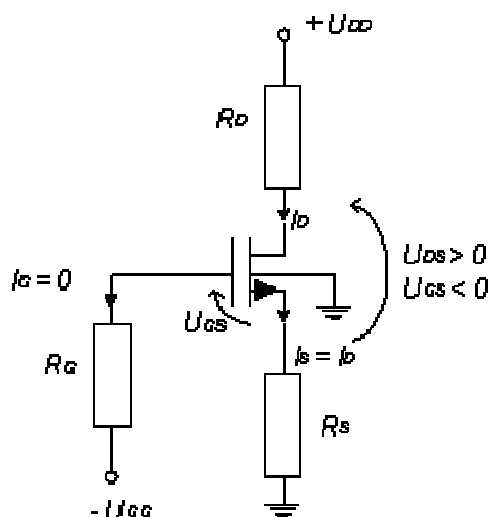
W zależności od sposobu polaryzacji tranzystora unipolarnego, może on pracować w trzech różnych obszarach:

- o w obszarze odcięcia - gdy $|U_{GS}| > |U_P|$, U_{DS} -dowolne
- o w obszarze aktywnym - gdy $|U_{GS}| < |U_P|$ i $|U_{DS}| \leq |U_{DS SAT}|$
- o w obszarze nasycenia - gdy $|U_{GS}| < |U_P|$ i $|U_{DS}| > |U_{DS SAT}|$

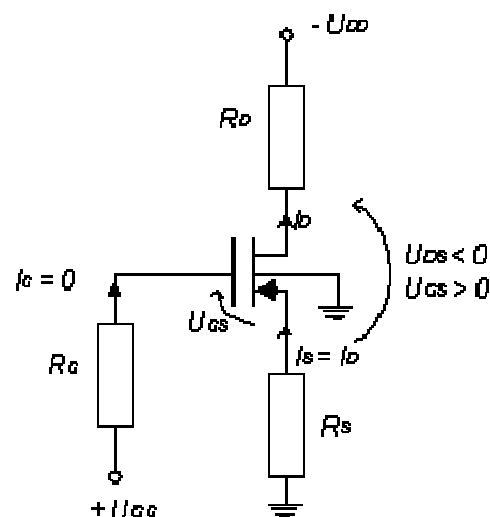
gdzie $U_{DS SAT}$ jest napięciem dren-źródło, dla którego następuje wejście charakterystyki prądu drenu do obszaru nasycenia.

Przykładowe układy polaryzacji

Jak zostało to powiedziane wcześniej tranzystory MOSFET mogą pracować z kanałem zubożanym oraz z kanałem wzbogacanym. Ponieważ jednak praca ze wzbogaceniem odbywa się jedynie dla małego przedziału wartości napięcia bramka-źródło U_{GS} , najczęściej wykorzystywanym zakresem pracy jest praca ze zubożaniem. Tranzystory z kanałem n pracują w obszarze nasycenia gdy $U_{DS} > 0$ i $U_{GS} < 0$, tranzystory z kanałem p natomiast na odwrót, dla $U_{DS} < 0$ i $U_{GS} > 0$. Do otrzymania napięcia o podanej polarności wykorzystać można układ z dwoma źródłami zasilania, przedstawiony na poniższych schematach.



Schemat dla kanału typu n



Schemat dla kanału typu p

Przy założeniu iż prąd bramki jest dostatecznie mały aby można go było pominąć, powyższy układ opisać można następującymi zależnościami:

Dla kanału typu n:

$$\begin{cases} U_{GS} = -U_{GG} - I_D R_S \\ U_{DD} = U_{DS} + I_D (R_D + R_S) \end{cases}$$

Dla kanału typu p:

$$\begin{cases} U_{GS} = +U_{GG} + I_D R_S \\ U_{DD} = -U_{DS} + I_D (R_D + R_S) \end{cases}$$

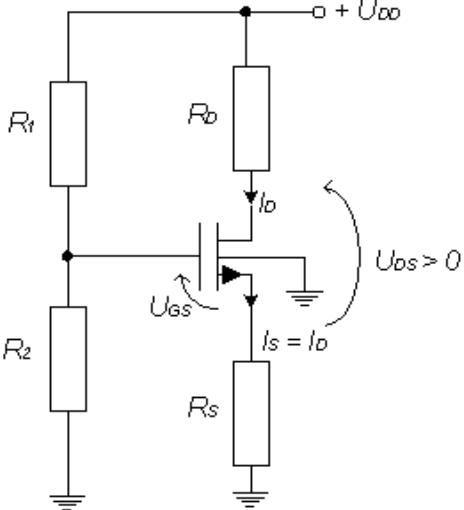
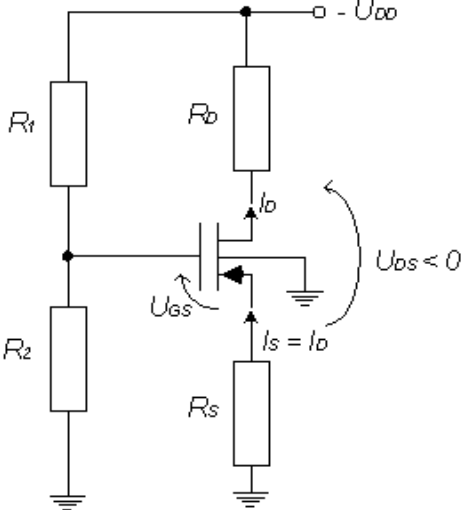
Wadą powyższych układów jest konieczność zastosowania dwóch źródeł zasilania i to o odmiennej polarności. Aby pozbyć się tego problemu zastosować można układ zasilania z automatyczną polaryzacją bramki, w którym $U_{GG}=0$. Dla kanału typu n układ ten nazwać można układem z automatycznym minusem:

$$U_{GS} = -I_D R_S$$

natomiast dla kanału typu p jest to układ zasilania z automatycznym plusem:

$$U_{GS} = I_D R_S.$$

Innym układem z pojedynczym źródłem zasilania jest układ potencjometryczny, przedstawiony poniżej:

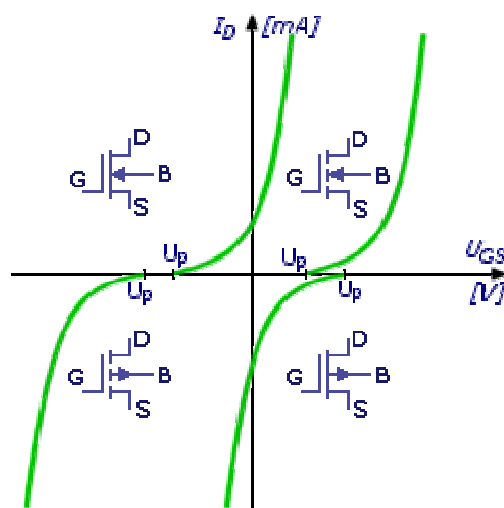
Dla kanału typu n	Dla kanału typu p
	
$\begin{cases} U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{DD} - I_D R_S \\ U_{DD} = U_{DS} + I_D (R_D + R_S) \end{cases}$	$\begin{cases} U_{GS} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{DD} + I_D R_S \\ U_{DD} = -U_{DS} + I_D (R_D + R_S) \end{cases}$

Tranzystory złączone JFET, mogą również być zasilane przez omówione powyżej układy.

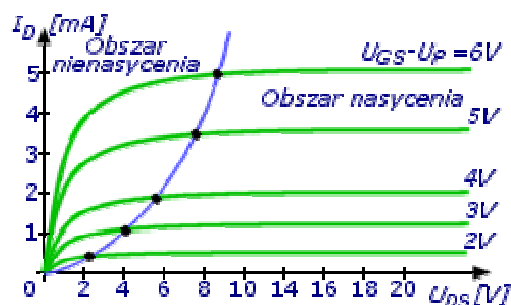
Podstawowe charakterystyki

Przejsiowa - zależność prądu drenu (I_D) od napięcia bramka-źródło (U_{GS}) przy stałym napięciu dren-źródło (U_{DS}).

Charakterystyka ta dla różnych typów tranzystorów przedstawiona została poniżej.



Charakterystyka Wyjściowa - zależność prądu drenu (I_D) od napięcia dren-źródło (U_{DS}), przy stałym napięciu bramka-źródło (U_{GS}). Cały obszar charakterystyki wyjściowej można podzielić na dwie części: obszar nasycenia i obszar nienasycenia (liniowy). Na poniższym rysunku obszary te są rozdzielone niebieską linią, której kształt przypomina parabolę.

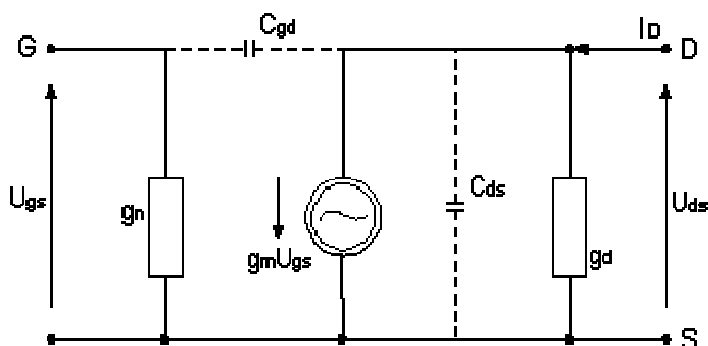


W zakresie liniowym (nienasyceń) tranzystor unipolarny zachowuje się jak rezystor półprzewodnikowy. Prąd I_D ze wzrostem napięcia U_{DS} wzrasta w przybliżeniu liniowo.

W zakresie nasycenia napięcie U_{DS} bardzo nieznacznie wpływa na wartość prądu drenu, natomiast bramka zachowuje właściwości sterujące.

Schemat zastępczy tranzystora unipolarnego.

Poniżej przedstawiony został schemat zastępczy tranzystora unipolarnego w układzie ze wspólnym źródłem.



Schemat ten zawiera źródło prądowe o wydajności równej iloczynowi transkonduktancji g_m oraz napięcia U_{gs} doprowadzonego pomiędzy bramkę i źródło. Prąd wyjściowy $I_d = g_m U_{gs}$ jest zatem zależny od napięcia sterującego U_{gs} .

Zebrał i Opracował:
mgr inż. Marcin Jabłoński
Zespół Szkół Technicznych
im. J. i J. Śniadeckich w Grudziądzu

Literatura:

1. "Sztuka elektroniki" P. Horowitz, W. Hill
2. "Układy półprzewodnikowe" U. Tietze, Ch. Schenk
3. "Elementy i układy elektroniczne" pod redakcją Stanisława Kuty
4. "Podstawowe układy elektroniczne" W. Nowakowski
5. Wikipedia
6. Materiały własne