

6. TRANZYSTORY UNIPOLARNE

6.1. WSTĘP

Tranzystory unipolarne, inaczej **polowe**, są przyrządami półprzewodnikowymi, których działanie polega na sterowaniu za pomocą pola elektrycznego wielkością prądu przez nie przepływającego. Istnieją dwa typy tranzystorów polowych:

- 1) tranzystor **polowy złączowy**, w skrócie określany jako JFET (*Junction Field Effect Transistor*) lub prościej zwany FET,
- 2) tranzystor **polowy z izolowaną bramką**, w skrócie określany IGFET (*Insolated Gate Field Effect Transistor*) lub MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), lub MISFET (*Metal Insulator Semiconductor FET*).

Tranzystor polowy różni się od bipolarnego tranzystora złączowego następującymi cechami charakterystycznymi:

1. działanie jego zależy wyłącznie od przepływu nośników większościowych i dlatego nazywa go się przyrządem unipolarnym, czyli wykorzystującym jeden typ nośników,
2. jest łatwiejszy do wytwarzania i w postaci scalonej zajmuje mniej miejsca,
3. charakteryzuje się dużą rezystancją wejściową (kilkaset $M\Omega$ i więcej),
4. jest przyrządem o mniejszych szumach niż tranzystor bipolarny.

Podział, symbole graficzne stosowane na schematach elektrycznych oraz kształty wybranych charakterystyk tranzystorów polowych przedstawiono tabelarycznie na rys 6.1.

| Tranzystory polowe | | | | | |
|--------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|
| złączowe | | z izolowaną bramką | | | |
| | | normalnie włączony | | normalnie wyłączony | |
| z kanałem typu n | z kanałem typu p | z kanałem typu n | z kanałem typu p | z kanałem typu n | z kanałem typu p |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

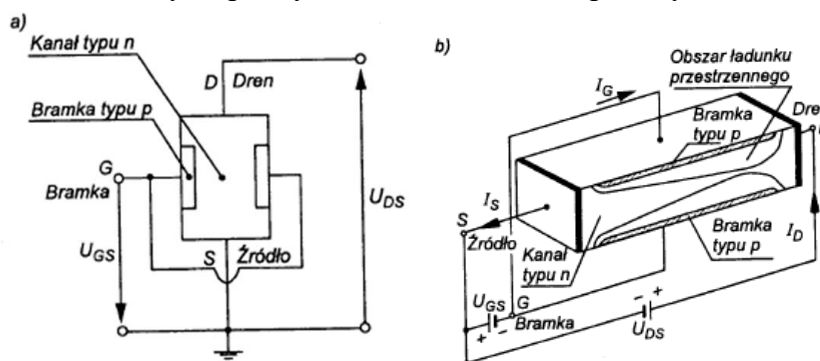
Rys.6.1. Podział, symbole graficzne i kształty charakterystyk tranzystorów polowych

6.2. TRANZYSTOR POLOWY ZŁĄCZOWY

Na rysunku 6.2 przedstawiona została struktura tranzystora polowego złączowego. Jest to tranzystor z kanałem typu n, gdyż płytka materiału półprzewodnikowego, do której doprowadzono kontakty dren D (*drain*) i źródło S (*source*), jest właśnie tego typu (jeżeli zastosuje się krzem typu p, to otrzymany przyrząd będzie tranzystorem polowym z kanałem typu p). Po obu stronach płytki znajduje się elektroda zwana bramką i oznaczona literą G (*gate*). Jest ona zbudowana z materiału półprzewodnikowego przeciwnego typu niż kanał, w przypadku omawianego tranzystora z półprzewodnika typu p.

Źródło S jest elektrodą, przez którą nośniki większościowe wpływają do wnętrza płytki. Stanowią one prąd źródła I_S . Dren D jest elektrodą, przez którą nośniki większościowe opuszczają płytkę. Tworzą one prąd drenu I_D . Prąd drenu płynie kanałem pomiędzy elektrodami źródła S i drenu D.

Pomiędzy elektrody drenu i źródła doprowadzane jest napięcie U_{DS} . Bramka G jest elektrodą sterującą. Pomiędzy bramką i źródłem przyłożone jest napięcie sterujące U_{GS} , tak aby złącze bramka-kanał było spolaryzowane w kierunku zaporowym.

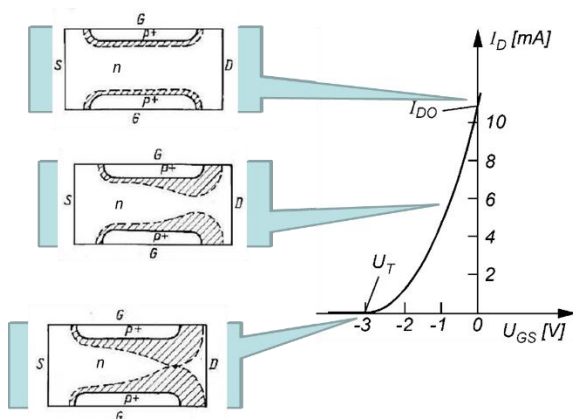


Rys. 6.2. Podstawowa struktura tranzystora JFET z kanałem typu n: a) widok ogólny, b) widok szczegółowy

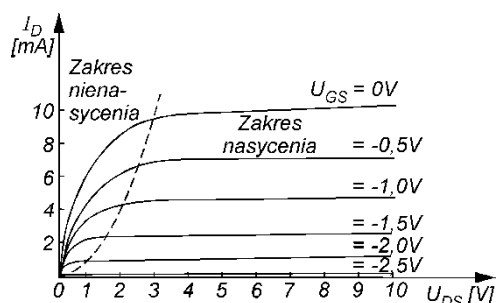
Aby zrozumieć działanie tego tranzystora, należy przypomnieć ten fakt, że po obu stronach zaporowo spolaryzowanego złącza p-n znajdują się obszary ładunku przestrzennego. Szerokość obszaru ładunku przestrzennego zwiększa się wraz ze wzrostem napięcia wstecznego. Obszar ładunku przestrzennego tworzą nie zneutralizowane jony domieszek akceptorowych i donorowych odpowiednio po obu stronach złącza. Nie występują w nim nośniki swobodne i dlatego niekiedy nazywany jest obszarem „wymiecionym”.

Rozszerzenie się tego obszaru w głąb kanału zmniejsza jego efektywną szerokość, a rozszerzenie to jest zależne od wielkości napięcia polaryzacji zaporowej złącza U_{GS} . Zatem, dla ustalonego napięcia dren-źródło U_{DS} prąd drenu będzie funkcją napięcia polaryzującego złącze bramki w kierunku zaporowym. **Efekt polowy** występujący w tranzystorze polega na tym, że przy wzroście napięcia wstecznego następuje ekspansja obszaru ładunku przestrzennego w głąb kanału. Zmieniają się wtedy przekrój i wypadkowa rezystancja kanału, a wskutek tego zmniejsza się również prąd drenu I_D płynący pod wpływem napięcia U_{DS} .

Charakterystyki statyczne typowego tranzystora JFET małej mocy przedstawiono na rys. 6.3 i 6.4.



Rys.6.3. Typowa charakterystyka przejściowa tranzystora JFET z kanałem typu n wraz z ilustracją zjawisk fizycznych towarzyszących jej przebiegowi; U_T (threshold voltage) - napięcie zaciśnięcia kanału



Rys.6.4. Typowe charakterystyki wyjściowe tranzystora JFET z kanałem typu n

Aby wyjaśnić, dlaczego charakterystyki wyjściowe mają właśnie taką postać jak prezentowana, rozpatrzmy przypadek, gdy $U_{GS}=0$. Dla $I_D=0$ kanał pomiędzy złączami bramki jest całkowicie otwarty. Po doprowadzeniu małego napięcia U_{DS} płytka półprzewodnikowa działa jak prosty rezystor liniowy i prąd I_D wzrasta liniowo ze wzrostem U_{DS} . Jest to zakres nienasyceń tranzystora. Przy zwiększaniu się prądu spadek napięcia na rezystancji obszaru kanału między źródłem a drenem zacznie polaryzować złącze w kierunku zaporowym i przewodząca część kanału zacznie się zwężać. Dzięki temu, że spadek napięcia rozkłada się równomiernie na całej długości kanału, to zwężenie się kanału nie jest jednorodne, lecz wzrasta w miarę oddalania się od źródła, jak pokazano na rys.6.2b. Ostatecznie osiągnięte zostanie napięcie U_{DS} , przy którym kanał jest zaciśnięty (odcięty).

Jest niemożliwe, aby kanał zamknął się całkowicie i prąd drenu zmalał do zera. Jest to spowodowane zjawiskami towarzyszącymi zmianie ruchliwości nośników przy bardzo dużych natężeniach pola elektrycznego, co ma miejsce na krótkim odcinku zamykającego się kanału. Otóż okazuje się, że ruchliwość elektronów jest wtedy odwrotnie proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego. Powoduje to, że występuje pewna minimalna szerokość kanału, przez którą przepływa prąd drenu o prawie stałej wartości zwanej prądem nasycenia. Tranzystor jest wtedy w zakresie nasycenia.

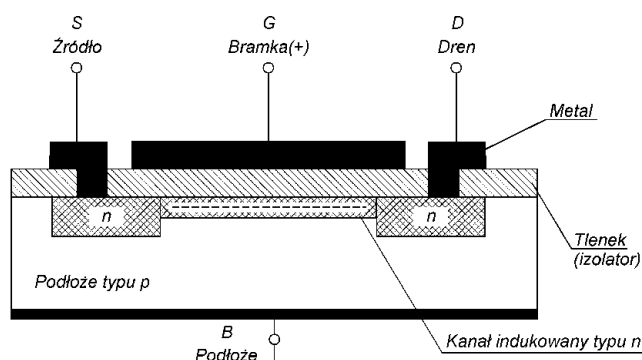
Jeżeli z kolei zmienimy napięcie U_{GS} tak, że zapewnimy dodatkową polaryzację zaporową, to zaciśnięcie kanału nastąpi dla mniejszych wartości prądu drenu.

Zwiększanie napięcie dren-źródło U_{DS} poza dopuszczalne granice powoduje wystąpienie

zjawiska lawinowego przebicia złącza bramka-kanal, charakteryzującego się gwałtownym wzrostem prądu drenu (nie zaznaczono tego na rys. 6.4). Przebicie następuje przy mniejszych wartościach U_{DS} , gdy bramka jest silnie spolaryzowana w kierunku zaporowym. Jest to spowodowane dodawaniem się napięcia zaporowego bramki do napięcia drenu, na skutek czego wzrasta efektywne napięcie na złączu bramki.

6.3. TRANZYSTOR POLOWY Z IZOLOWANĄ BRAMKĄ

Uproszczoną strukturę tranzystora MOSFET z kanałem typu n przedstawiono na rys. 6.5. Metalowa bramka połączona jest z izolacyjną warstwą tlenku, który z kolei sąsiaduje z materiałem podłoża. Elektrody źródła S i drenu D doprowadzone są do obszarów typu n w głębi płytki. Żadna kombinacja napięć doprowadzonych do końcówek S i D nie powoduje przepływu prądu między elektrodami, gdyż co najmniej jedno złącze p-n (podłoże-źródło, podłoże-dren) będzie spolaryzowane zaporowo. Transmisja prądu zatem może się odbywać tylko przy udziale bramki G, która oddziałuje polem elektrycznym poprzez warstwę izolatora. Jeżeli uziemimy podłoże B (*bulk*)¹ struktury przedstawionej na rys. 6.5, a na bramkę podamy napięcie dodatnie, to pole elektryczne będzie skierowane prostopadle przez warstwę izolatora. Linie sił pola będą dochodzić do zaindukowanych w półprzewodniku ładunków ujemnych, które w podłożu typu p są nośnikami mniejszościowymi. Ze wzrostem napięcia bramki zwiększa się zaindukowany ujemny ładunek elektronów zgromadzony w sąsiedztwie izolatora. Obszar ten będzie miał zatem nagromadzone w nadmiarze nośniki typu n i może się okazać, że jest ich tak dużo, iż nastąpiła **inwersja, czyli zmiana typu materiału półprzewodnikowego**. Oto bowiem w bezpośrednim sąsiedztwie izolatora koncentracja elektronów w półprzewodniku okaże się większa od koncentracji dziur i dren ze źródłem zostaną elektrycznie połączone poprzez materiał o tym samym typie przewodnictwa, a więc typie n. Zacznie wtedy płynąć między tymi elektrodami prąd, którego wielkość jest zależna od napięcia sterującego bramki, gdyż w ten sposób regulowana jest grubość zaindukowanego kanału (grubość warstwy inwersyjnej).



Rys. 6.5. Uproszczonej struktury tranzystora MOSFET z kanałem typu n

¹ Końcówka podłoża może być połączona wewnątrz w obudowie tranzystora z jedną z elektrod (źródłem lub drenem) albo może być wyprowadzona na zewnątrz jako czwarta elektroda tranzystora. Wówczas obowiązuje następująca zasada łączenia: podłoże tranzystora z kanałem typu n jest łączone z punktem o najniższym potencjale w układzie, a podłoże tranzystora typu p jest łączone z punktem o najwyższym potencjale w układzie.

Ze względu na typ przewodnictwa kanału wyróżnia się tranzystory polowe z izolowaną bramką z kanałem typu n i p. Natomiast ze względu na różnice w sposobie uzyskiwania właściwości sterujących kanału wyróżnia się:

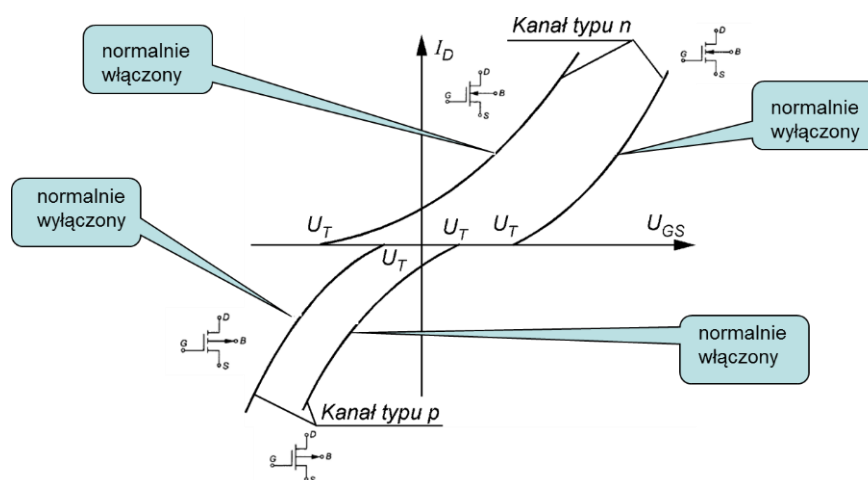
- tranzystory **normalnie wyłączone** (*normally off*) inaczej z kanałem **wzbogacanym**,
- tranzystory **normalnie włączone** (*normally on*) inaczej z kanałem **zubożanym**.

Tranzystor pokazany na rys. 6.5 należy do grupy tranzystorów z kanałem wzbogacanym (normalnie wyłączony). Dopiero działając odpowiednio dużym napięciem bramki można zaindukować kanał (włączyć tranzystor). Dalszy wzrost napięcia bramki powoduje zwiększenie konduktancji kanału, tj. wzbogacanie kanału w sensie posiadania przez niego coraz większej liczby nośników.

W tranzystorach normalnie włączonych kanał już istnieje przy braku polaryzacji bramki (przy $U_{GS}=0$) i może płynąć duży prąd drenu. Tranzystory te mają bowiem kanał specjalnie wbudowany lub trwale zaindukowany ładunkiem powierzchniowym zgromadzonym w izolatorze przy granicy z podłożem. Działając napięciem bramki można zmniejszyć konduktancję kanału, tj. zubożyć go w sensie zmniejszania liczby nośników.

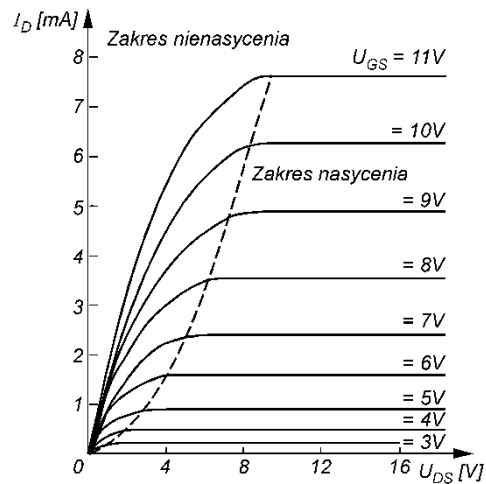
Charakterystyki przejściowe dla czterech rodzajów tranzystorów MOSFET przedstawiono na rys. 6.6.

Warto zauważyć, że przedstawione tam charakterystyki dla tranzystorów normalnie włączonych wskazują, że możliwa jest ich praca zarówno przy dodatniej jak i ujemnej polaryzacji bramki.



Rys. 6.6. Charakterystyki przejściowe dla czterech rodzajów tranzystorów MOSFET; U_T (*threshold voltage*) - napięcie zaciśnięcia kanału

Charakterystyka wyjściowa (rys. 6.7) przedstawia zależność prądu drenu od napięcia dren źródło przy określonych wartościach napięcia bramki. W zakresie nienasycenia, gdy napięcie drenu U_{DS} jest małe w porównaniu z napięciem bramki U_{GS} , kanał spełnia funkcję liniowego rezystora łączącego źródło z drenem. W tym zakresie napięcia drenu zmiany prądu I_D w funkcji napięcia U_{DS} są w dużej części liniowe. W miarę wzrostu U_{DS} zwiększa się wartość prądu I_D i na rezystancji kanału odkłada się znaczny spadek napięcia. Zatem, podobnie jak w tranzystorze JFET, wzdłuż kanału występuje wzrastający rozkład potencjału od źródła do drenu.



Rys.6.7. Przykładowa charakterystyka wyjściowa tranzystora MOSFET z kanałem typu n (normalnie wyłączony)

Spadek napięcia na kanale powoduje zmniejszanie różnicy potencjałów między bramką a kanałem, tj. zmniejszanie natężenia pola elektrycznego prostopadłego do powierzchni półprzewodnika. Dalszy wzrost napięcia prowadzi do usunięcia inwersji z części kanału sąsiadującego z drenem. Naruszona zostaje liniowa zależność prądu I_D w funkcji U_{DS} . Kanał zostaje odcięty i tranzystor pracuje w obszarze nasycenia. W tym obszarze prąd drenu osiąga, praktycznie biorąc, stałą wartość mimo dalszego zwiększania napięcia U_{DS} .