

Zależność między napięciem i prądem przepływającym przez półprzewodnik jest liniową, a współczynnikiem proporcjonalności jest znana nam konduktancja (przewodność). Konduktancja dla prostopadłościennego próbki półprzewodnika typu n jest określona następującą zależnością:

$$G = e\mu n(S/l)$$

gdzie: e – ładunek elektronu,

μ – ruchliwość elektronów,

n – koncentracja nośników,

S – pole przekroju próbki,

l – długość próbki.

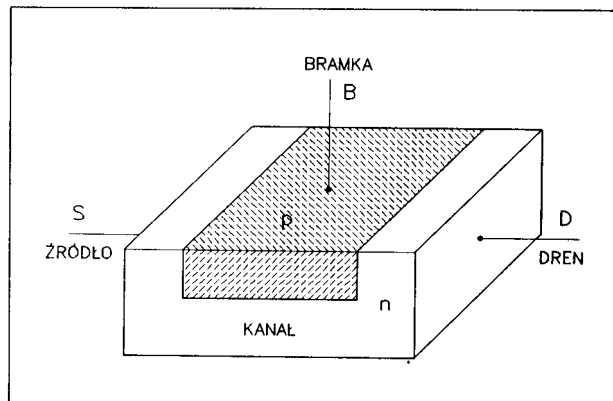
Aby uzyskać z tego kawałka półprzewodnika element sterowany, należy znaleźć sposób wpływania sygnałem sterującym (wejściowym) na jego przewodność. Współczynniki e i μ są stałymi. Pozostaje możliwość zmiany koncentracji nośników n lub przekroju poprzecznego próbki S . Zmianę przekroju poprzecznego jest wykorzystane w tranzystorach polowych złączowych, a zmiana koncentracji nośników w tranzystorach polowych z izolowaną bramką.

Tranzystor polowy złączowy

Do zmiany przekroju poprzecznego w tranzystorze polowym złączowym JFET wykorzystuje się właściwość złącza p-n polaryzowanego w kierunku zaporowym. Ze zwiększaniem napięcia zaporowego zwiększa się szerokość obszaru ładunku przestrzennego. Tak więc do naszej próbki półprzewodnika trzeba dodać półprzewodnik o przeciwnym charakterze przewodnictwa w sposób pokazany na rys. 1.

Właściwa próbka to prostopadłościenny półprzewodnik typu n, do którego wtrącono półprzewodnik typu p. Spolaryzowanie półprzewodnika typu p w kierunku zaporowym względem półprzewodnika typu n

umożliwi zmianę przekroju poprzecznego półprzewodnika typu n dla prądu płynącego od źródła S do drenu D. Przestrzeń w jakiej płynie ten prąd nazywana jest kanałem. Elektroda dołączona do półprzewodnika typu p nazywana jest bramką G. Oznaczenia S, G, D są symbolami przyjętymi powszechnie z języka angielskiego.



Rys. 1 Budowa tranzystora polowego złączowego

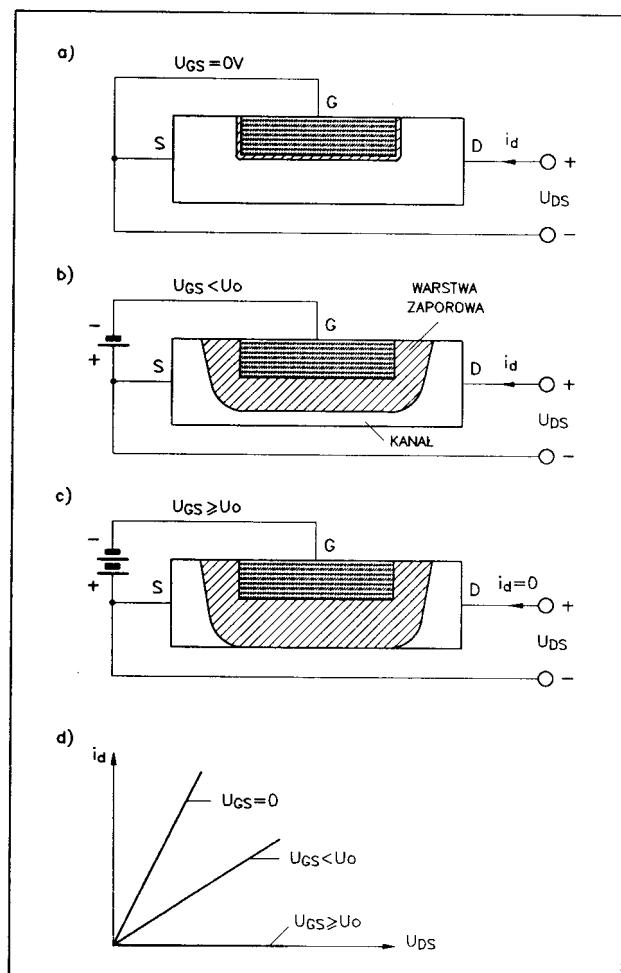
Zasada działania tranzystora JFET jest zilustrowana za pomocą rys. 2. Pokazuje on trzy przypadki polaryzacji tranzystora.

Przypadek a) dotyczy zerowego napięcia polaryzacji złącza. Szerokość kanału jest ograniczona jedynie szerokością obszaru ładunku przestrzennego powstałego w wyniku dyfuzji nośników. Polaryzacja złącza na granicy przewodzenia (około 0,6 V w kierunku przewodzenia) pozwala na uzyskanie największego przekroju kanału. Polaryzacja złącza bramka – źródło w kierunku przewodzenia pozbawia nas możliwości sterowania prądem drenu.

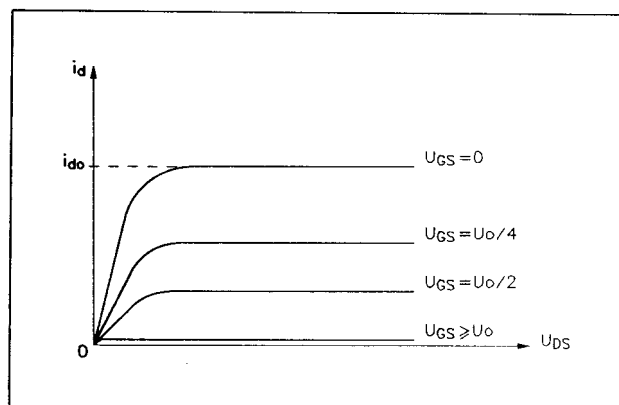
Przypadek b) przedstawia złącze bramka – źródło polaryzowane w kierunku zaporowym za pomocą napięcia sterującego U_{GS} . Zwiększenie szerokości warstwy zaporowej zmniejsza przekrój kanału, a więc i jego kon-

duktancję. Zmiany tego napięcia umożliwiają sterowanie prądem drenu i_D .

Rys. 2c przedstawia skrajny przypadek zablokowania kanału warstwą zaporową po przyłożeniu napięcia większego od tzw. napięcia odcięcia U_0 . W tej sytuacji prąd drenu jest bardzo mały zbliżony do 0. Charakterystyki prądowo napięciowe dla przypadków a), b), c) przedstawiono na rys. 2d.



Rys. 2 Działanie JFET z kanałem typu n



Rys. 3 Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora JFET z kanałem typu n

Charakterystyki takie uzyskuje się jedynie przy małych napięciach U_{DS} . Wzrost napięcia U_{DS} powoduje

wzrost szerokości warstwy zaporowej w pobliżu drenu i w efekcie ograniczanie, a nawet wręcz stabilizację prądu drenu. Rodzina charakterystyk wyjściowych JFET z kanałem typu n pokazana jest na rys. 3.

Charakterystyki wyjściowe tranzystora polowego przedstawiają zależność prądu drenu i_D od napięcia między drenem a źródłem U_{DS} , przy różnych napięciach bramka – źródło U_{GS} , traktowanych jako tzw. parametr. Początkowa liniowa zależność przechodzi w nasycenie tzn. prąd drenu minimalnie tylko zależy od napięcia U_{DS} . Prąd ten zależy natomiast silnie od napięcia U_{GS} , przy czym jest to zależność nieliniowa.

Oczywiście możliwe jest wykonanie tranzystora polowego złączowego z materiałów o przeciwnym rodzaju przewodnictwa. Jeśli bramka jest wykonana z półprzewodnika typu n, a kanał z półprzewodnika typu p, mamy do czynienia z JFET z kanałem p. Do zapewnienia właściwych warunków pracy takiego tranzystora napięcia polaryzujące muszą mieć kierunki odwrotne niż w tranzystorze z kanałem n. Tranzystory polowe z kanałem typu p są komplementarne względem tranzystorów z kanałem typu n.

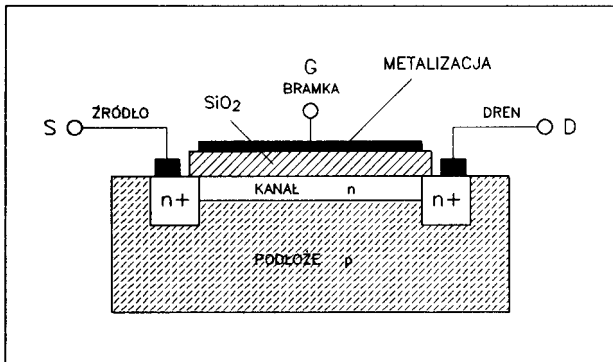
W przewodnictwie prądu w tranzystorze polowym biorą udział nośniki jednego rodzaju i dlatego często nazywany jest "tranzystorem unipolarnym". Ponieważ obwód wejściowy takiego tranzystora jest złączem polaryzowanym zaporowo, posiada on bardzo dużą rezystancję wejściową. W odróżnieniu od tranzystora bipolarnego jest on sterowany napięciowo. Obwód wejściowy nie pobiera mocy. Umożliwia natomiast sterowanie dużymi prądami w obwodzie wyjściowym.

Duża rezystancja wejściowa sprzyja natomiast gromadzeniu się ładunków np. elektryczności statycznej na bramce co może prowadzić do uszkodzenia tranzystora polegającego na przebiciu napięciowym złącza bramka – źródło. Wymaga to bardzo ostrożnego obchodzenia się z takimi tranzystorami. Na pocieszenie mogą podać, że aktualnie tranzystory te są zabezpieczane wewnętrznie za pomocą diod zenera.

Tranzystor polowy z izolowaną bramką

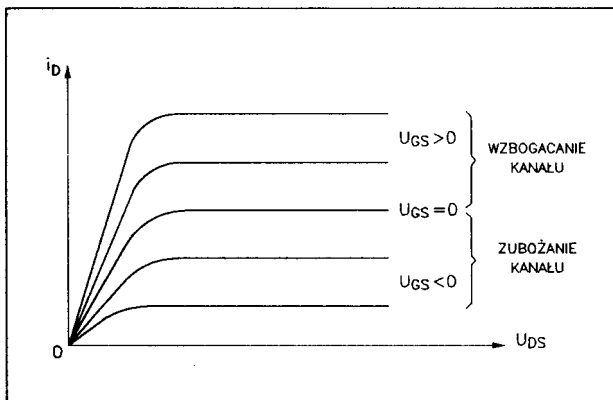
Budowa takiego tranzystora pokazana jest na rys. 4.

Na podłożu z półprzewodnika typu p naniesione są dwie wyspy półprzewodnika typu n o bardzo dużej koncentracji nośników oznaczanej jako n^+ . Połączone są one warstwą półprzewodnika typu n o normalnej koncentracji nośników, która będzie wykorzystywana jako kanał tranzystora. Jedna z wysp n^+ będzie traktowana jako źródło, a druga jako dren. Do wysp za pośrednictwem warstwy metalizacji dołączone są elektrody S i D. Nad warstwą kanału znajduje się warstwa izolacyjna, którą stanowi tlenek krzemu SiO_2 , a na niej naniesiona jest metalizacja bramki. Metalowa bramka nie ma bezpośredniego kontaktu z kanałem – jest od niego odizolowana. Stąd pochodzi nazwa tranzystora z izolowaną bramką. Używany powszechnie skrót MOS pochodzi od pierwszych liter z języka angielskiego – metal, tlenek, półprzewodnik.



Rys. 4 Budowa tranzystora polowego z izolowaną bramką

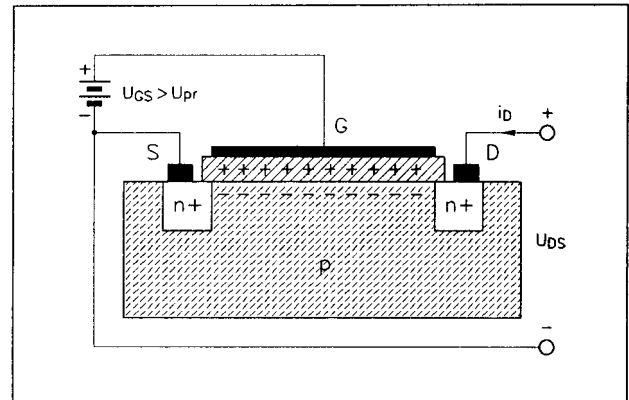
Przyłożone między bramką i źródło napięcie powoduje zmianę koncentracji nośników w kanale na zasadzie przyciągania lub odpychania ładunków elektrycznych. Polaryzacja bramki napięciem dodatnim powoduje przyciąganie elektronów, a więc wzrost ich koncentracji w kanale. Polaryzacja napięciem ujemnym powoduje zmniejszanie koncentracji elektronów w kanale wskutek wypychania ich jako ładunki jednoimienne. Efekt zwiększania ilości nośników w kanale nazywamy wzbogacaniem kanału, a zmniejszanie ilości nośników nazywane jest zubożaniem kanału.



Rys. 5 Charakterystyki wyjściowe tranzystora MOS

Na charakterystykach wyjściowych tranzystora MOS pokazanych na rys. 5, linią rozdzielającą obszary wzbogacania i zubożania jest charakterystyka odpowiadająca $U_{GS} = 0$. Tranzystor MOS z kanałem typu p będzie wymagał przeciwnych kierunków napięć polaryzujących. Tego rodzaju tranzystory nazywane są tranzystorami z *wbudowanym kanałem*, a ich charakterystyczną cechą jest przepływ prądu drenu przy napięciu $U_{GS} = 0$.

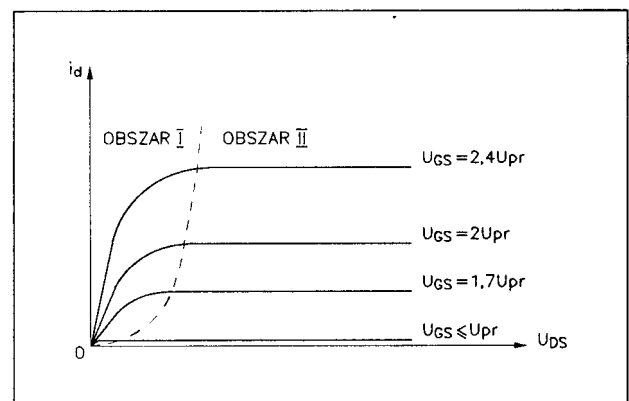
Osobną grupę stanowią tranzystory MOS, które nie posiadają kanału bez polaryzacji. Nazywane są tranzystorami z *indukowanym kanałem*. Przy napięciu $U_{GS} = 0$ prąd drenu jest równy 0. Dopiero przyłożenie dość dużego napięcia o odpowiedniej polaryzacji powoduje skupienie nośników i wytworzenie kanału. Tranzystor ten działa więc wyłącznie na zasadzie wzbogacania kanału. Działanie tranzystora z kanałem indukowanym typu n wyjaśnia rys. 6.



Rys. 6 Budowa i działanie tranzystora z kanałem indukowanym

W tranzystorze tym, podłożem podobnie jak poprzednio jest półprzewodnik typu p. Na nim naniesione są dwie wyspy półprzewodnika silnie domieszkowanego n^+ przewidziane jako wyprowadzenia źródła S i drenu D. Znajdujący się między nimi półprzewodnik typu p pokryty jest izolacyjną warstwą tlenku krzemu, na którą naniesiona jest metalizacja bramki.

Bez polaryzacji bramki po przyłożeniu napięcia U_{DS} złącze źródło – podłoże jest polaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze dren – podłoże w kierunku zaporowym. Prąd drenu w tej sytuacji nie będzie płynął. Dopiero spolaryzowanie bramki w kierunku pokazanym na rys. 6 spowoduje przyciąganie elektronów do bramki i w efekcie utworzenie cienkiej warstwy półprzewodnika typu n (kanału). Umożliwia to przepływ prądu między źródłem i drenem. Wzrost napięcia bramki spowoduje wzrost koncentracji elektronów, a więc i wzrost konduktancji kanału. Zmiana napięcia U_{GS} steruje wielkością prądu drenu. Napięcie U_{GS} , przy którym zaczyna płynąć prąd drenu nazywane jest *napięciem progowym* i wynosi od 2÷4 V. Charakterystyki wyjściowe tranzystora MOS z kanałem indukowanym prezentuje rys. 7.



Rys. 7 Charakterystyki wyjściowe tranzystora MOS z kanałem indukowanym

Analizując charakterystyki stwierdzamy, że można podzielić je na dwa obszary:

I – gdzie prąd drenu jest proporcjonalny jednocześnie do napięć U_{GS} i U_{DS} , tzw. obszar trydowy,

II – gdzie prąd drenu zależy tylko od napięcia U_{DS} , tzw. obszar pentodowy (przez analogię do charakterystyk lamp elektronowych).

Linia przerywana oddzielająca te obszary określona jest następującą zależnością:

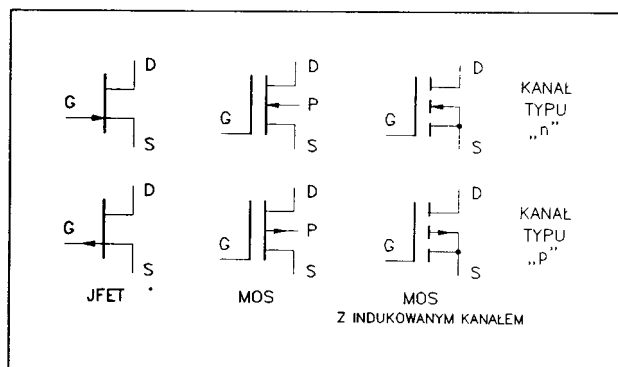
$$U_{DS} = U_{GS} - U_{pr}$$

Zależność prądu drenu od napięcia bramki jest początkowo (po przekroczeniu napięcia progowego) w obszarze pentodowym silnie nieliniowa. Ze wzrostem prądu drenu poprawia się jego liniowość w odniesieniu do napięcia bramki U_{GS} . Normalny obszar wykorzystania tranzystora to właśnie obszar pentodowy.

Należy podkreślić, że parametrem sterującym w tranzystorze polowym jest napięcie między bramką i źródłem. Duża rezystancja warstwy izolacyjnej tlenku krzemu powoduje, że prąd bramki jest pomijalnie mały. Niestety stwierdzenie to dotyczy jedynie statycznych warunków pracy tranzystora. Przy napięciu zmiennym wskutek występowania pojemności między bramką a źródłem i między bramką a kanałem (drenem) pojawia się prąd. Zwłaszcza w tranzystorach mocy z uwagi na duże powierzchnie, pojemności te są znaczne i odpowiednio duże prądy.

Wykonywane są także tranzystory z kanałem indukowanym typu p. Podłoże takiego tranzystora stanowi półprzewodnik typu n. Przypominam, że nośniki w półprzewodniku typu p (dziury) charakteryzują się mniejszą ruchliwością niż elektrony. Uzyskanie tranzystora komplementarnego z kanałem typu p wymaga wykonania tranzystora o większych wymiarach niż tranzystor z kanałem typu n. Połączenie komplementarnych tranzystorów MOS z kanałem typu n i p znalazło zastosowanie w popularnych układach scalonych CMOS.

Oznaczanie tranzystorów polowych



Rys. 8 Oznaczenia schematowe tranzystorów polowych

Przy oznaczeniach schematowych tranzystorów polowych, rodzaj kanału określa się na podstawie rodzaju półprzewodnika bramki dla JFET lub podłoża dla tranzystora MOS. Rodzaj półprzewodnika oznacza się strzałką odpowiednio skierowaną, analogicznie do oznaczenia rodzaju półprzewodnika emitera w tranzystorze bipolarnym. Strzałka skierowana do elementu oznacza półprzewodnik typu p, a skierowana na zewnątrz oznacza półprzewodnik typu n. Bramkę z półprzewodnika

typu p posiada tranzystor złączowy z kanałem typu n i odwrotnie. Z kolei podłoże tranzystora MOS z półprzewodnika typu p oznacza tranzystor z kanałem n. Oznaczenia schematowe tranzystorów polowych zestawione są na rys. 8.

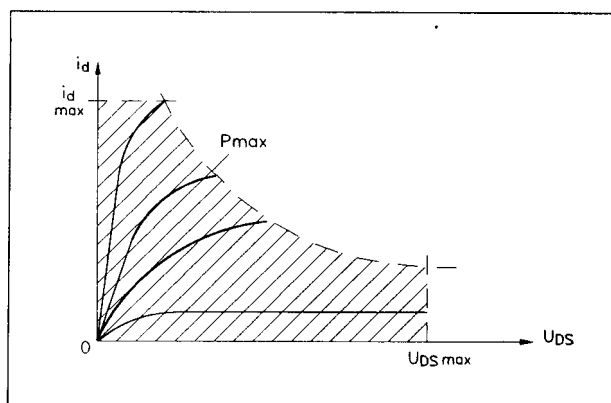
Oznaczenia tranzystorów MOS z kanałem indukowanym odznaczają się linią przerywaną łączącą dren ze źródłem. Podłoże tranzystorów MOS jest najczęściej łączone ze źródłem. Jeśli taki tranzystor posiada tylko trzy wyprowadzenia, połączenie to jest realizowane już wewnątrz tranzystora, co pokazano na oznaczeniach tranzystorów MOS z kanałem indukowanym.

Wykonywane są tranzystory MOS z dwoma bramkami. Możliwe jest wtedy sterowanie prądu drenu jednocześnie za pomocą dwóch oddzielnych sygnałów wejściowych. Tranzystory dwubramkowe stosuje się zwłaszcza w układach wielkiej częstotliwości.

Dopuszczalne wartości prądów i napięć

Tak samo jak dla tranzystorów bipolarnych i diod, dopuszczalne wartości prądów i napięć określone są przez właściwości rozpraszania wydzielanej w tranzystorze mocy i warunkami powstawania przebiegów. Wydzielana w tranzystorze polowym moc jest określona iloczynem napięcia U_{DG} i prądu drenu i_d . Moc ta nie powinna przekroczyć wartości dopuszczalnej dla danego elementu P_{max} wynikającej z podanego wyżej warunku rozpraszania mocy. Dopuszczalna moc zależy od budowy i wielkości tranzystora.

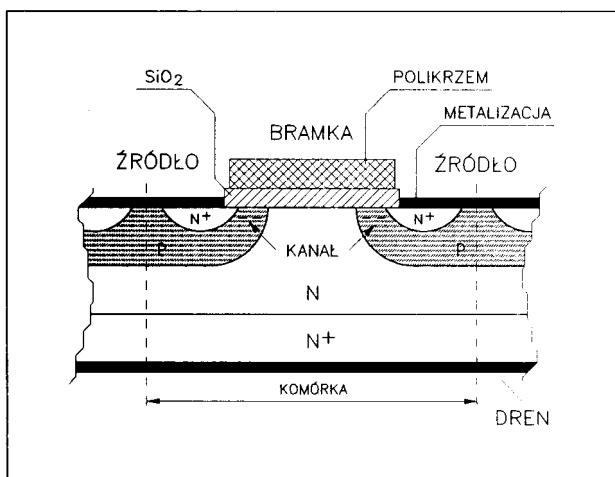
Podobnie od wielkości i budowy tranzystora zależy maksymalny prąd drenu i_{dmax} . Prąd ten także powoduje wydzielanie ciepła i podwyższanie temperatury tranzystora. Maksymalne napięcie U_{DS} wynika z możliwości powstania przebiecia napięciowego między drenem a źródłem. Obszar bezpiecznej pracy tranzystora polowego jest zaznaczony przez zakreskowanie na charakterystyce wyjściowej pokazanej na rys. 9.



Rys. 9 Obszar bezpiecznej pracy tranzystora polowego

Istotna jest dopuszczalna wartość napięcia między bramką i źródłem. W przypadku tranzystora JFET będzie ona określona możliwością wystąpienia przebiecia złącza p – n polaryzowanego w kierunku zaporowym. W tranzystorze MOS będzie to napięcie przebiecia cienkiej warstwy izolacyjnej tlenku krzemu. W tranzystorze

JFET napięcie przebicia jest niesymetryczne, ponieważ przyłożenie napięcia w kierunku przewodzenia wywoła jego ograniczanie wskutek przepływu prądu. W tranzystorze MOS napięcie przebicia jest symetryczne, ponieważ dotyczy warstwy izolacyjnej, przepływ prądu nastąpi dopiero po przebiciu tej warstwy. Przebiecie tranzystora polowego, zwłaszcza MOS objawia się zwarcie między wszystkimi elektrodami.



Rys. 10 Struktura tranzystora mocy DMOS z kanałem typu n

Wartości parametrów dopuszczalnych są zmniejszane ze wzrostem temperatury pracy. Chcąc maksymalnie wykorzystać możliwości tranzystora należy zapewnić dobre warunki chłodzenia i wentylacji. Parametry dopuszczalne i ich zależność od temperatury podawane są w katalogach producentów.

Dla zilustrowania realizacji tranzystora polowego mocy przedstawimy strukturę wewnętrzną popularnego ostatnio tranzystora DMOS. Rozpatrywane dotychczas struktury tranzystorów polowych są tzw. strukturami poziomymi. Zasadniczym elementem jest półprzewodnikowe podłoże, na którym naniesione są wyspy źródła i drenu oraz kanał. Podczas przepływu prądu drenu najwyższa moc wydziela się w pobliżu drenu i on osiąga najwyższą temperaturę. Struktura pozioma nie umożli-

liwia odprowadzenia dużej ilości ciepła. Znacznie korzystniejsze warunki posiada struktura planarna tranzystora bipolarnego, gdzie kolektor ma dużą powierzchnię i może być bezpośrednio związany z metalową obudową. Odprowadzanie ciepła z obudowy realizowane jest za pomocą radiatora. Sądzę, że właśnie to było przesłanką prowadzącą do powstania struktury DMOS pokazanej na rys. 10.

Jest to oczywiście tranzystor z kanałem indukowanym. Podłoże z półprzewodnika typu p znalazło się w środku tranzystora. Natomiast dolna powierzchnia tranzystora jest drenem, którego metalizacja oprócz kontaktu elektrycznego służy do odprowadzania ciepła do metalowej obudowy tranzystora. Z tej zresztą przyczyny dren tranzystorów mocy jest połączony z obudową i wymagane są podkładki izolacyjne między obudową tranzystora a uziemionym radiatorem. Struktura tranzystora z poziomej została zamieniona na pionową i dlatego często tego rodzaju tranzystory oznaczane są jako VMOS lub VDMOS.

Źródło w tym tranzystorze stanowi wyspa półprzewodnika silnie domieszkowanego n^+ . Dren natomiast składa się z dwóch warstw – półprzewodnika typu n, normalnie domieszkowanego i silnie domieszkowanego. Kontakt elektryczny źródła i podłoża zapewniony jest przez metalizację. Bramka z polikrzemu naniesiona jest na warstwę izolatora – tlenku krzemu. Kanał indukują się na krótkim odcinku między obszarami źródła i drenu.

Tranzystory DMOS mają budowę komórkową. Na płytce krzemu wykonywane jest wiele tranzystorów połączonych równolegle, z których każdy stanowi komórkę. Na rys. 10 szerokość komórki zaznaczona jest linią przerywaną. Na lewo i prawo od zaznaczonej komórki znajdują się następne. Od ilości komórek będzie zależała wielkość maksymalnego prądu drenu i dopuszczalnej mocy strat.

Producenci preferują różne kształty komórek np. firma Siemens kwadratowy, a firmy IRF i SGS Thomson sześciokątny. Właśnie od sześciokątnego kształtu komórek pochodzi nazwa HEXFET.

Ciąg dalszy w następnym numerze.