

Tranzystory polowe MIS

Tomasz Noga

Fizyka Ciała Stałego

Rok IV

Streszczenie

Tranzystory MIS (*ang. Metal-Insulator-Semiconductor*) należą do rodziny tranzystorów polowych z izolowaną bramką, w których poprzecznym polem elektrycznym, działającym na warstwę dielektryka (izolującą kanał od bramki), steruje się przewodnością kanału półprzewodnikowego. Do ogromnego rozwoju technologii tranzystorowej przyczyniły się badania prowadzone w Bell Laboratories przez *Wiliama Shockleya*, *Walter Brattaina* i *John Bardeena*. Obecnie produkuje się kilka rodzajów tranzystora MIS. Niniejsza praca zawiera opis budowy i zasady działania tranzystora MIS jak i klasyfikację ze względu na typ przewodnictwa kanału, oraz ze względu na kryteria umownie zwane „fizycznymi” i „układowymi”. Statyczne charakterystyki prądowo-napięciowe zostały oddzielno rozpatrzone dla zakresu nienasyceń jak i nasycenia.

1. Wstęp

Tranzystory MIS należą do klasy tranzystorów unipolarnych, często zwanych polowymi. Stanowią one grupę elementów, w których ma miejsce transport tylko jednego rodzaju nośników, tzw. *nośników większościowych*. Przy czym sterowanie prądu wyjściowego odbywa się za pomocą poprzecznego pola elektrycznego.

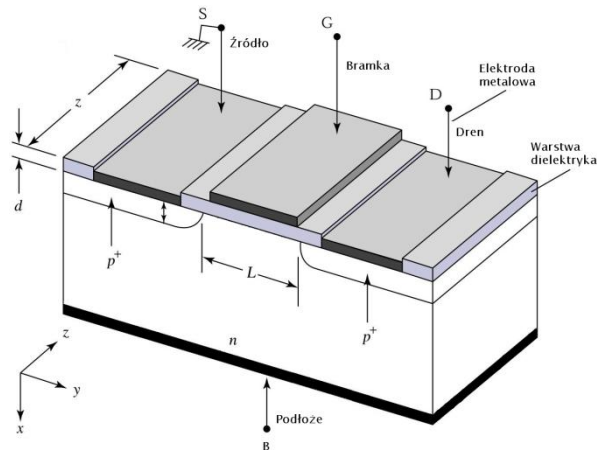
Historia rozwoju tranzystorów polowych sięga połowy wieku XIX, kiedy to zaczęto intensywne badania nad półprzewodnikami. W ciągu lat 20-tych i 30-tych prowadzono szereg prac nad półprzewodnikami, ale działo się to na marginesie wysiłków skupionych na technologii lampowej. Jednak badania naukowe w dziedzinie fizyki ciała stałego były kontynuowane. Do ich przyspieszenia znacznie przyczyniły się prace *Erwina Schrödingera* i *Wernera Heisenberga*, gdyż dzięki mechanice kwantowej można było wyjaśnić zaobserwowane wcześniej zjawiska w metalach. Na wiosnę 1945 r. w Bell Laboratories odbyła się duża konferencja na temat przyszłości badań nad półprzewodnikami. W wyniku podjętych tam decyzji została utworzona grupa badawcza fizyki ciała stałego pod kierownictwem *Wiliama Shockleya* i *Stanleya Morgana*. Shockley kierował także podgrupą półprzewodników, w której uczestniczyli również *Walter Brattain* i *John Bardeen*¹. Właśnie ta trójka rozpoczęła systematyczne badania tranzystora polowego. Jednak efekt polowy, obserwowany doświadczalnie, był znacznie słabszy niż przewidywany na podstawie teorii. Okazało się, że prawie cały ładunek zaindukowany przy powierzchni, pozostaje unieruchomiony w pułapkach występujących na powierzchni półprzewodnika, czyli nie wpływa na wartość sterowanego prądu. Badanie własności tych pułapek doprowadziły w 1947 r. do przypadkowego odkrycia tranzystora ostrzowego. W 1952 r. Shockley przedstawił nową koncepcję tranzystora polowego, w którym funkcję dielektryka rozdzielającego elektrodę sterującą od kanału przewodzącego spełniała warstwa zaporowa złącza p-n spolaryzowanego zaporowo. Takie rozwiązanie umożliwiło odsunięcie kanału od powierzchni, czyli usunięcie trudności związanych ze stanami powierzchniowymi. Obecnie produkuje się wiele różnych typów polowych. Dwie główne grupy stanowią tranzystory złączowe (JFET) oraz tranzystory z izolowaną bramką (IGFET – *ang. Insuled Gate Field – Effect Transistor*). Tranzystory z izolowaną bramką można wykonywać z półprzewodnika monokrystalicznego lub polikrystalicznego. W pierwszym przypadku podstawową strukturę tranzystora tworzą warstwy metal – izolator - półprzewodnik, stąd nazwa **MIS** (*ang. Metal-Insulator-Semiconductor*).

Tak więc tranzystory MIS należą do grupy tranzystorów polowych z izolowaną bramką, w których przewodność kanału półprzewodnikowego jest sterowana poprzecznym polem elektrycznym, które działa przez warstwę dielektryka, izolującą kanał od bramki.

¹ http://www.elportal.pl/pdf/k03/05_03.pdf

2. Budowa i zasada działania tranzystora MIS

Schematyczną budowę tranzystora MIS z kanałem typu p przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1: Budowa tranzystora MIS z kanałem typu p

W płytce monokrystalicznego krzemu typu n o rezystywności około $(0.01 \div 0.1)\Omega \cdot m$ przez dyfuzję lub implantację wytworzono obszary silnie domieszkowane o odmiennym w stosunku do podłoża typie przewodnictwa, tj. p^+ z koncentracją domieszki $(10^{24} \dots 10^{26})m^{-3}$. Jeden z tych obszarów silnie domieszkowanych, nazywamy *źródłem*, znajduje się w odległości kilku do kilkudziesięciu mikrometrów od drugiego, nazywanego *drenem*. Oba są pokryte kontaktowymi warstwami metalicznymi. Powierzchnia półprzewodnika jest między źródłem a drenem jest pokryta warstwą dielektryka. Elektroda metalowa, znajdująca się na powierzchni dielektryka, nosi nazwę *bramki*. Oznaczenie literowe poszczególnych elektrod są następujące: S – źródło, G – bramka, D – dren. Końcówka *podłoża* oznaczona jest literą B.

2.1 Elementarna zasada działania tranzystora MIS

Obwód prądu przepływającego od źródła do drenu zamyka się przez obszar przypowierzchniowy półprzewodnika, który znajduje się pod warstwą dielektryka. Zatem wartość prądu źródło – dren zależy od konduktancji tego obszaru. W zależności od czynników takich jak polaryzacja bramki, kontaktowa różnica potencjałów, ładunek nieskompensowany w dielektryku i stanach powierzchniowych, w półprzewodniku pod bramką może utworzyć się warstwa: *akumulacyjna*, *zubożona* oraz *inwersyjna*. Dla tranzystora MIS z kanałem typu p w przypadku warstwy akumulacyjnej jak i zubożonej droga od źródła do drenu odpowiada dwu złączom $p^+ - n$ włączonym szeregowo przeciwstawnie. Wówczas niezależnie od polaryzacji drenu w stosunku do źródła prąd źródło – dren ma znikomą małą wartość, gdyż może to być tylko prąd wsteczny jednego z wymienionych złączy. Natomiast w przypadku warstwy inwersyjnej obszary p^+ źródła i drenu są połączone

warstwą inwersyjną, która w sensie fizycznym ma ten sam typ przewodnictwa. Warstwę tą nazywamy *kanalem*. Istnienie kanału typu p umożliwia przepływ dużego prądu dziurowego między źródłem a drenem. Wartość prądu źródło – dren sterowana jest przez zmiany napięcia bramki, które modulują konduktancję kanału.

2.2 Klasyfikacja tranzystorów MIS

Ze względu na przewodnictwo kanału tranzystory MIS można podzielić na dwa rodzaje:

- tranzystor MIS z kanałem typu p , w którym występuje przewodnictwo dziurowe,
- tranzystor MIS z kanałem typu n , w którym występuje przewodnictwo elektronowe.

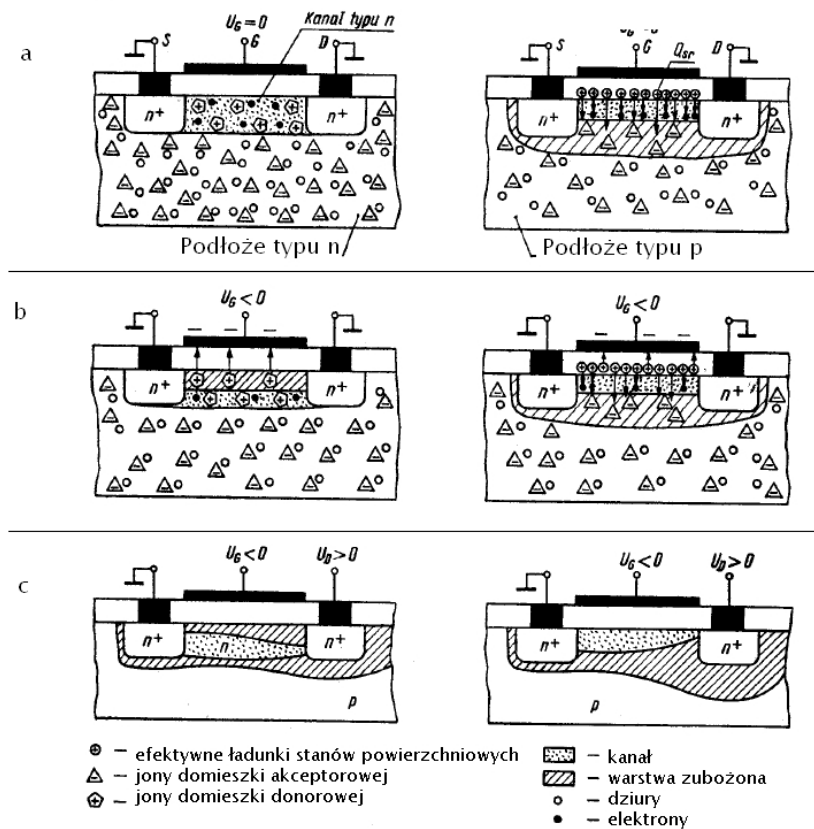
Ze względu na różnice w zjawiskach fizycznych (różnice w sposobie modulacji przewodności kanału) tranzystory MIS dzielimy na dwa rodzaje:

- z kanałem zaindukowanym, czyli z kanałem w postaci warstwy inwersyjnej,
- z kanałem wbudowanym, czyli z kanałem w postaci warstwy domieszkowanej o przeciwnym typie przewodnictwa niż podłoże.

Różnice te obrazowo przedstawia poniższy rysunek 2. Dla łatwiejszego porównania zjawisk przyjęto, że w obu tranzystorach przewodności kanałów są identyczne przy napięciu $U_{GS} = 0$. Rysunek 2a przedstawia sytuację w obu tranzystorach dla stanu neutralnego. W tranzystorze z kanałem wbudowanym kanałem jest warstwa typu n domieszkowana donorami. W tranzystorze z kanałem zaindukowanym kanałem jest warstwa inwersyjna typu n , powstała w skutek przyciągania dużej liczby elektronów do powierzchni przez dodatni ładunek powierzchniowy. W stanie neutralnym nie ma jeszcze istotnych różnic pomiędzy tymi tranzystorami poza tym, że kanał w tranzystorze z „wbudowanym” jest obojętny elektrycznie, a w tranzystorze z kanałem zaindukowanym jest on naładowany ujemnie. W przypadku ujemnej polaryzacji bramki (rysunek 2b) elektrony są odpychane w głąb półprzewodnika, co powoduje w tranzystorze z kanałem wbudowanym powstanie przypowierzchniowej warstwy zubożonej w tranzystorze z kanałem zaindukowanym natomiast – zmniejszenie ładunku elektronów w kanale. Przewodności kanałów w obu tranzystorach zmieniły się identycznie, jednak wyraźnie widać podstawową różnicę w ich działaniu, polegającą na tym, że kanał w tranzystorze „wbudowanym” odsuwa się od powierzchni, a w tranzystorze z kanałem zaindukowanym pozostaje zawsze przy powierzchni.

Tranzystor z kanałem wbudowanym

Tranzystor z kanałem zaindukowanym



Rysunek 2: Ilustracja zjawisk w tranzystorach z kanałem wbudowanym oraz zaindukowanym dla trzech stanów polaryzacji: a) stan neutralny, $U_{GS} = U_{DS} = 0$; b) $U_{GS} \neq 0, U_{DS} = 0$; c) $U_{GS} \neq 0, U_{DS} \neq 0$ ²

Ze względu na przebieg podstawowych charakterystyk wyróżnia się dwa rodzaje tranzystorów MIS, a mianowicie:

- tranzystor z *kanałem zubożonym*, inaczej tranzystorem *normalnie włączonym*,
- tranzystor z *kanałem wzbogaconym*, inaczej nazywany tranzystorem *normalnie wyłączonym*.

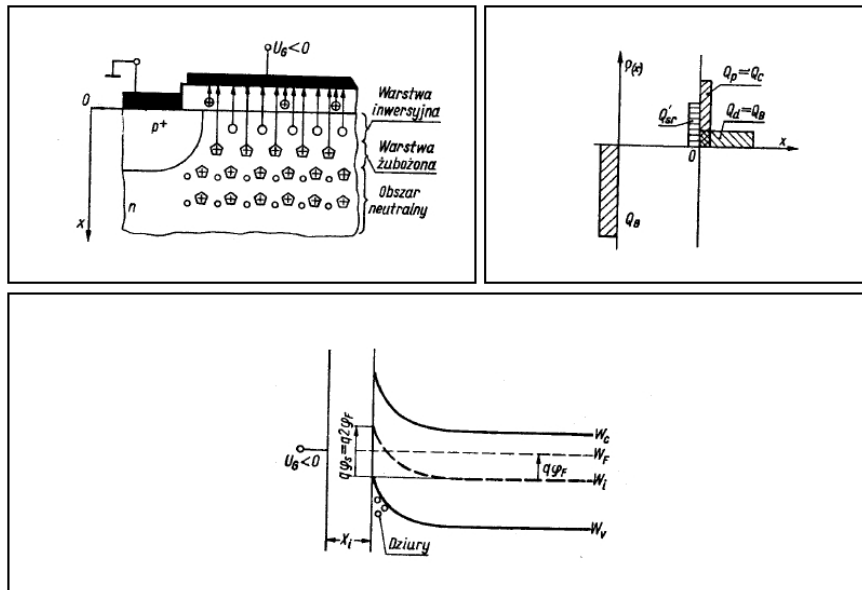
Procesy fizyczne, warunkujące określone przebiegi podstawowych charakterystyk tranzystora, tj.:

- przejściowej $I_D(U_{GS})|_{U_{DS}=const}$,
- wyjściowej $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=const}$.

2.3 Charakterystyka przejściowa – pojęcie napięcia progowego

Przy badaniu zjawiska określającego przebieg charakterystyki przejściowej, tj. zależność prądu drenu od napięcia bramka – źródło dla przypadku bardzo małego napięcia dren – źródło. Poniższy rysunek przedstawia ładunki oraz poziomy energetyczne w obszarze półprzewodnika znajdującego się pod bramką dla przypadku inwersji.

² Wiesław Marciniak, *Przrządy półprzewodnikowe scalone*



Rysunek 3: Ilustracja ładunków oraz poziomów energetycznych w obszarze półprzewodnika znajdującego się pod bramką³

ładunek oznaczony Q_{sr} reprezentuje efektywne działanie wszystkich czynników wewnętrznych, powodujących zagięcie pasm energetycznych półprzewodnika, tj. kontaktowej różnicy potencjałów, stanów powierzchniowych i ładunków nieskompensowanych w warstwie dielektryka. Powyższy rysunek przedstawia zagięcie pasm energetycznych przy powierzchni półprzewodnika, odpowiadające wartości potencjału powierzchniowego $\varphi_s = 2\varphi_F$, przy której zaczyna się inwersja w obszarze przypowierzchniowym półprzewodnika. Wartość napięcia U_{GS} , przy której potencjał powierzchniowy $\varphi_s = 2\varphi_F$, nazywa się *napięciem progowym* U_T wyrażony poprzez:

$$U_T = \varphi_{ms} - \frac{Q_{sr}}{C_i} + 2\varphi_F - \frac{Q_B}{C_i} \quad (1)$$

gdzie: φ_{ms} - kontaktowa różnica potencjałów, C_i - pojemność dielektryka, Q_B - ładunek domieszek zjonizowanych w półprzewodniku, który można wyznaczyć z zależności:

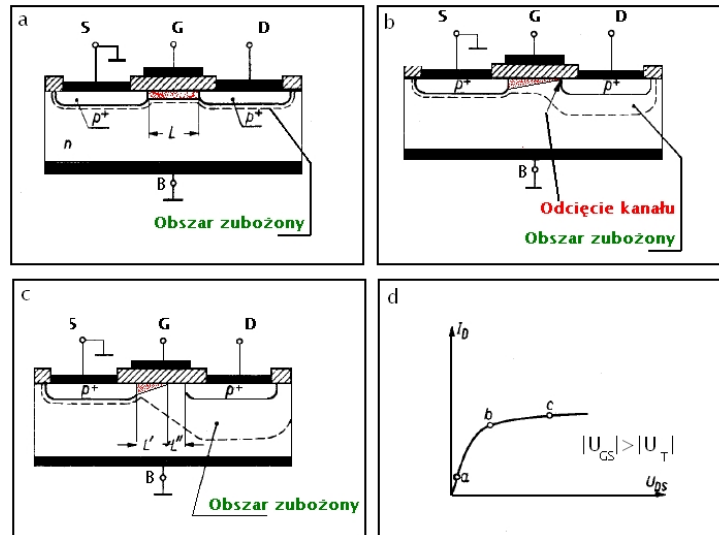
$$Q_B = \sqrt{2\epsilon_s q N_D \cdot 2\varphi_F} \quad (2)$$

2.4 Charakterystyka wyjściowa

Jeżeli napięcie drenu U_{DS} jest małe w porównaniu z napięciem bramki U_{GS} , to kanał spełnia funkcję rezystora liniowego, łączącego źródło z drenem (rysunek 5a). W tym zakresie napięć drenu ($|U_{DS}| > |U_T|$) zmiany prądu drenu I_D w funkcji napięcia drenu U_{DS} są liniowe. W miarę wzrostu ujemnej wartości U_{DS} zwiększa się wartość prądu drenu i na rezystancji

³ Wiesław Marciniak, *Przrządy półprzewodnikowe scalone*

kanalu odkłada się znaczny spadek napięcia – wzdłuż kanału występuje wzrastający (co do wartości bezwzględnej) rozkład potencjału od źródła do drenu.



Rysunek 4: Stany w tranzystorze MIS, objaśniające przebieg charakterystyki wyjściowej: a) zakres nienasylenia; b) odcięcie kanału; c) zakres nasycenia; d) charakterystyka $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}}$

Spadek napięcia w kanale powoduje zmniejszenie różnicy potencjałów między bramką a kanałem, czyli zmniejszenie natężenie pola elektrycznego, prostopadłego do powierzchni półprzewodnika. Ponieważ spadek napięcia w kanale zwiększa się w kierunku od źródła do drenu, zatem w tym samym kierunku zmniejsza się natężenie pola elektrycznego bramki – maleje grubość kanału. Dalszy wzrost napięcia ujemnego U_{DS} powoduje *odcięcie kanału* (punkt *b* na charakterystyce $I_D(U_{DS})$), czyli całkowite usunięcie inwersji w części kanału sąsiadującym z drenem. Wartość napięcia, której odpowiada zanik inwersji, nosi nazwę *napięcia nasycenia*:

$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T \quad (3)$$

Dla zakresu napięć $|U_{GS}| \geq |U_{Dsat}|$ prąd drenu osiąga praktycznie stałą wartość (punkt *c* na charakterystyce $I_D(U_{DS})$). Wzrost napięcia ujemnego U_{DS} powyżej wartości U_{Dsat} powoduje rozszczepienie obszaru zubożonego przy drenie i punkt odcięcia przesuwają się w stronę źródła. Jednak spadek napięcia na części przewodzącej kanału pozostaje stały i równy napięciu U_{Dsat} .

3 Charakterystyki i parametry statyczne

3.1 Zakres nienasylenie $0 \leq U_{DS} \leq U_{Dsat}$

W pierwszym przybliżeniu przyjmuje się, że natężenie pola elektrycznego nie zmienia się wzdłuż kanału, czyli nie zmienia się również szybkość unoszenia nośników. Stąd czas przelotu nośników przez kanał wyraża się poprzez:

$$\tau_p = \frac{L}{\mu_n E_y} = \frac{L^2}{\mu_n U_{DS}} \quad (4)$$

Jeżeli $U_{DS} \neq 0$, to wzdłuż kanału istnieje rozkład potencjału $U(y)$. Dla współrzędnej y ładunek zaindukowany w kanale, w jednostce powierzchni jest równy:

$$Q_c^*(y) = C_i(U_G - U_T - U(y)) \quad (5)$$

Średni potencjał w kanale, przy założeniu że potencjał $U(y)$ zmienia się liniowo jest równy $(U_S + U_D)/2$. Uwzględniając ten fakt, całkowity ładunek kanału można zapisać jako:

$$Q_c(y) = C_g \left(U_G - U_T - \frac{U_S + U_D}{2} \right) \quad (6)$$

Zatem prąd drenu można zapisać jako:

$$I_D = \frac{Q_c}{\tau_p} = \beta \left\{ (U_G - U_T)(U_D - U_S) - \frac{U_D^2 - U_S^2}{2} \right\} \quad (7)$$

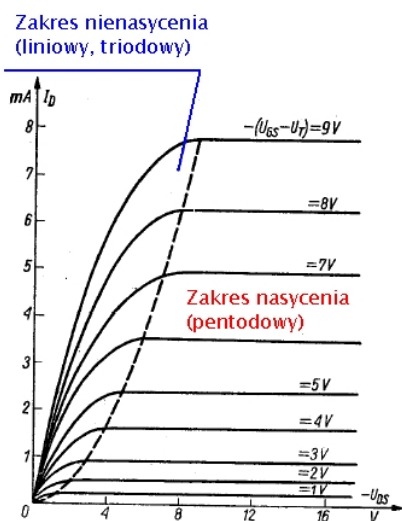
przy czym $\beta = \frac{\mu_n C_g}{L^2}$. W przypadku uziemionego źródła ($U_S = 0$) równanie (7) ma postać:

$$I_D = \beta \left\{ (U_{GS} - U_T)U_{DS} - \frac{U_D^2}{2} \right\} \quad (8)$$

3.2 Zakres nasycenia - $|U_{DS}| > |U_{Dsat}|$

Gdy napięcie drenu jest równe U_{Dsat} prąd drenu wchodzi w zakres nasycenia, zatem:

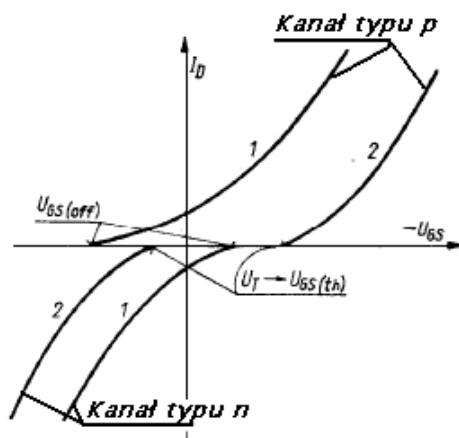
$$I_D = \beta \frac{(U_{GS} - U_T)^2}{2} \quad (9)$$



Rysunek 5: Teoretyczna charakterystyki wyjściowe tranzystora MIS

Z powyższego równania wynika, że prąd drenu I_D w zakresie nasycenia jest kwadratową funkcją napięcia bramki U_{GS} a ponadto nie zależy od napięcia U_{DS} . Dwie powyższe zależności opisujące charakterystyki prądowo-napięciowe tranzystora MIS nie uwzględniają szeregu zjawisk tj.: efekt skracania kanału, wpływ zmian ładunku podłoża w funkcji długości kanału, zależności ruchliwości od napięć polaryzacyjnych. Teoretyczna charakterystyki wyjściowe tranzystora MIS przedstawione są na poniższym rysunku 5.

Rysunek 6 przedstawia różnice w przebiegu charakterystyk dla czterech różnych rodzajów tranzystora MIS.



Rysunek 6: Charakterystyki przejściowe dla czterech rodzajów tranzystorów MIS: 1- tranzystor z kanałem zubożonym; 2 - tranzystor z kanałem wzbogaconym

4 Parametry statyczne

Najważniejszym parametrem statycznym jest napięcie progowe U_T , które jest technicznie zdefiniowane jako wartość napięcia U_{GS} , przy której prąd drenu osiąga określoną wartość

- *napięcie przebicia między bramką a podłożem przy zwartych elektrodach drenu i źródła, mierzone przy określonej wartości prądu I_D ,*
- *napięcie przebicia między drenem a źródłem przy zwarceniu bramki ze źródłem,*
- *prąd nasycenia tranzystora, gdy elektrody i źródła są zwarte oraz przy określonym napięciu U_{DS} ,*
- *prąd upływu bramki w przypadku zwartych elektrod źródła i drenu oraz dla określonego napięcia U_{GS} ,*
- *rezystancja statyczna między drenem a źródłem w warunkach maksymalnego prądu drenu.*

5 Podsumowanie

Tranzystory MIS stanowią dojrzałą technologicznie realizację elementy wzmacniającego. Ze względu na znacznie prostszą zasadę działania niż tranzystorów polowych znalazły one zastosowanie w każdej dziedzinie życia. Szczególne zastosowanie mają one we: wzmacniaczach, wzmacniaczach różnicowych, jako rezystory sterowane napięciowo, wyłączniki analogowe. Dzięki rozwojowi technologii (a przede wszystkim miniaturyzacji) obecnie produkuje się procesory zawierające dwa miliardy tranzystorów.

6 Bibliografia

- Wiesław Marciniak, *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*,
- S.M. Sze, *Physics of semiconductor devices*,
- K.F. Brennan, A.S. Brown, *Theory of Modern Electronic Semiconductor Devices*,
- [http://www.odysseus.nildram.co.uk/RFIC Theory Files/MOS Transistor.pdf](http://www.odysseus.nildram.co.uk/RFIC_Theory_Files/MOS_Transistor.pdf)
- <http://www.freepatentsonline.com/4924277.html>
- <http://web.cs.mun.ca/~paul/transistors/node1.html>

Spis treści

1. Wstęp	2
2. Budowa i zasada działania tranzystora MIS.....	3
2.1 Elementarna zasada działania tranzystora MIS.....	3
2.2 Klasyfikacja tranzystorów MIS	4
2.3 Charakterystyka przejściowa – pojęcie napięcia progowego	5
2.4 Charakterystyka wyjściowa.....	6
3 Charakterystyki i parametry statyczne	7
3.1 Zakres nienasycenie $0 \leq U_{DS} \leq U_{Dsat}$	7
3.2 Zakres nasycenia - $U_{DS} > U_{Dsat} $	8
4 Parametry statyczne.....	9
5 Podsumowanie	10
6 Bibliografia.....	10