



Politechnika Wroclawska

Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki



LABORATORIUM  
ELEMENTÓW I UKŁADÓW  
ELEKTRONICZNYCH

Opracował zespół: Marek Panek, Waldemar Oleszkiewicz, Iwona Zborowska-Lindert, Bogdan Paszkiewicz, Małgorzata Kramkowska, Beata Ściana, Zdzisław Synowiec, Bogusław Boratyński

## Ćwiczenie nr 7

### Tranzystor polowy MOSFET

#### I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania

- stany powierzchniowe w strukturze MOS: akumulacja, zubożenie, inwersja
- budowa i zasada działania tranzystorów MOSFET
- charakterystyki statyczne ( wyjściowe i przejściowe ) tranzystorów MOSFET
- parametry małosygnalowe tranzystorów unipolarnych

#### II. Program zajęć

- pomiar charakterystyk wyjściowych i przejściowych tranzystorów MOSFET
- wyznaczenie wybranych statycznych i małosygnalowych dynamicznych parametrów elektrycznych mierzonych tranzystorów

#### III. Literatura

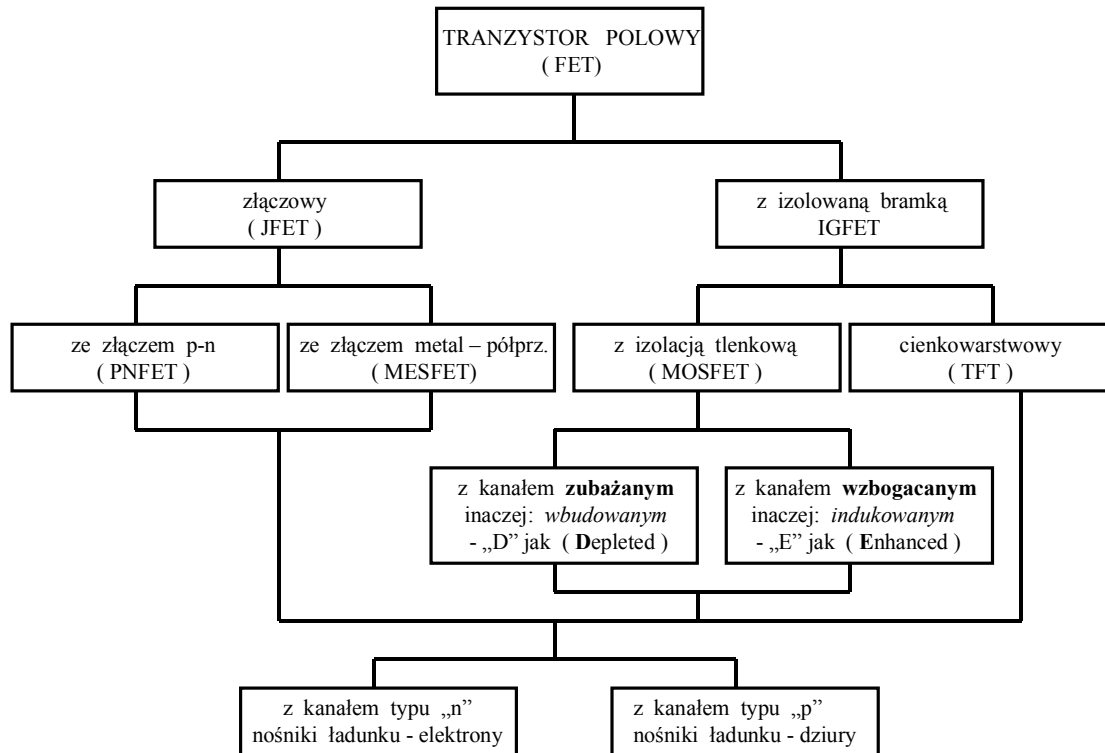
1. Notatki z WYKŁADU
2. A. Świt, J. Pułtorak - Przyrządy półprzewodnikowe
3. W. Marciniak - Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

# 1. Wiadomości wstępne

## 1.1 Nazewnictwo i systematyka tranzystorów unipolarnych

Klasyfikację tranzystorów unipolarnych (nazywanych też polowymi) przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Przykładowa klasyfikacja tranzystorów unipolarnych (polowych)

- FET - tranzystor polowy (*Field Effect Transistor*)
- JFET - tranzystor polowy złączowy (*Junction Field Effect Transistor*)
- PNFET - tranzystor polowy ze złączem p-n
- MESFET - tranzystor polowy ze złączem Schottky'ego (*MEtal Semiconductor Field Effect Transistor*)
- IGFET - tranzystor polowy z izolowaną bramką (*Insulated Gate Field Effect Transistor*)
- MISFET - tranzystor polowy z izolowaną bramką (*MEtal Insulator Semiconductor Field Effect Transistor*)
- MOSFET - tranzystor polowy z izolowaną bramką, izolatorem jest dwutlenek krzemu (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)**
- TFT - tranzystor cienkowarstwowy (*Thin Film Transistor*).

## 1.2 Zasada działania tranzystorów polowych.

W przeciwieństwie do tranzystorów bipolarnych, których działanie zależy od dwóch rodzajów nośników ładunku (dziur i elektronów), w tranzystorze unipolarnym (polowym) o przepływie prądu decyduje tylko jeden rodzaj nośników – są to albo dziury albo elektrony. Nośniki płyną w kanale tranzystora polowego.

Elektrody (końcówki) tranzystorów polowych to:

- Źródło (Source), oznaczone literą **S**, jest elektrodą, z której wypływają nośniki ładunku do kanału.
- Dren (**Drain**), oznaczony literą **D**, jest elektrodą, do której wpływają („ściekają”) z kanału nośniki ładunku. Prąd drenu –  $I_D$ , napięcie dren-źródło –  $U_{DS}$ .
- Bramka (**Gate**), oznaczona literą **G**, jest elektrodą sterującą przepływem ładunków w kanale. Napięcie bramka-źródło –  $U_{GS}$ . Prąd bramki (stały) praktycznie nie płynie (=0)

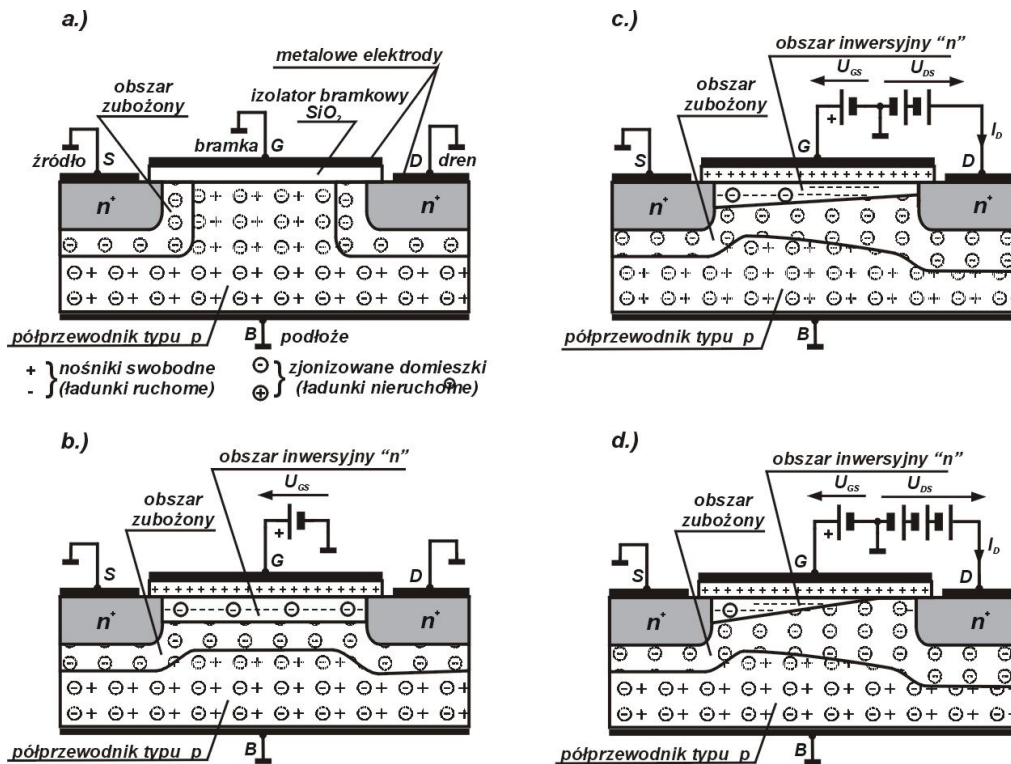
Z powyższej definicji elektrod tranzystora wynika ogólna reguła:

Źródło i dren tranzystora polowego powinny być spolaryzowane napięciem  $U_{DS}$  w taki sposób, aby umożliwić przepływ nośników większościowych przez kanał w kierunku od źródła do drenu. W tranzystorze z kanałem typu „p” od źródła do drenu przepływają dziury, a w tranzystorze z kanałem typu „n” od źródła do drenu przepływają elektrony.

Konstrukcje tranzystorów MOSFET zgodnie z klasyfikacją, przedstawioną na rys.1. można podzielić na dwie grupy:

- ✓ Typu „E” (Enhanced) **E-MOSFET** – z kanałem wzbogacanym czyli indukowanym lub MOSFET normalnie wyłączony – **dla zerowej polaryzacji bramki kanał nie istnieje i prąd drenu nie płynie.**
- ✓ Typu „D” (Depleted) **D-MOSFET**– z kanałem zubażonym lub MOSFET normalnie załączony – **posiadają wbudowany kanał przewodzący i dla zerowej polaryzacji bramki prąd drenu może płynąć.**

Zasadę działania tranzystora MOSFET można wyjaśnić korzystając z rys.2, na którym przedstawiono uproszczone przekroje struktury tranzystora z indukowanym kanałem typu  $n$  w warunkach różnej polaryzacji. Zasadniczym elementem tranzystora MOSFET jest struktura kondensatora MOS utworzona przez elektrodę bramki, warstwę dielektryka ( $SiO_2$ ) oraz powierzchniową warstwę podłoża krzemowego (Si). Zmiany pojemności tego kondensatora na skutek zmian napięcia bramki (na wejściu tranzystora) powodują zmiany wartości prądu drenu (na wyjściu tranzystora).



Rys.2 Przekroje uproszczonej struktury tranzystora E-MOSFET z indukowanym kanałem typu n w warunkach różnej polaryzacji. Objaśnienia w tekście.

Rys.2a obrazuje sytuację, gdy polaryzacja drenu i bramki jest zerowa ( $U_{DS}=0$  i  $U_{GS}=0$ ). W takim przypadku, struktura złożona z dwóch obszarów półprzewodnika typu  $n^+$  (dren i źródło), rozdzielonych półprzewodnikiem typu  $p$  (podłoże), tworzy dwa złącza  $n^+p$  i  $p-n^+$  połączone ze sobą szeregowo przeciwsobnie. Obszar podłoża, typu  $p$ , jest wspólną anodą dla złącz: S-podłoże i podłoże-D. Obszar zubożony obu złącz wnika znacznie bardziej w półprzewodnik o mniejszej koncentracji domieszki, a więc w podłoże. W takiej sytuacji brak jest możliwości przepływu nośników pomiędzy drenem i źródłem. Źródło **S** i podłoże **B** (ang. bulk) są zwarte ze sobą i stanowią punkt odniesienia do określania potencjałów drenu **D** i bramki **G**.

Na kolejnym Rys.2b pokazano sytuację, gdy bramka spolaryzowana jest dostatecznie dużym napięciem  $U_{GS}>0$  tak, aby umożliwić przepływ prądu drenu. Dodatni ładunek tak spolaryzowanej bramki indukuje pod powierzchnią izolatora ( $SiO_2$ ) ładunek przestrzenny, który składa się z przyciągniętych polem elektrycznym bramki elektronów (tzw. warstwa inwersyjna) i głębiej położonej warstwy ładunku przestrzennego jonów akceptorowych, z której tym samym polem elektrycznym wypchnięte zostały dziury w głąb podłoża. W takiej sytuacji, dzięki utworzeniu warstwy inwersyjnej o przewodnictwie elektronowym typu  $n$ , zostaje dokonane połączenie elektryczne – właśnie ta warstwa stanowi przewodzący kanał między źródłem (**S**) a drenem (**D**) (powstaje struktura:  $n^+(S)$ –kanał( $n$ )– $n^+(D)$ ).

**Wartość napięcia bramki  $U_{GS}$ , przy którym kanał zostanie utworzony nazywa się z definicji napięciem progowym  $U_T$  (threshold voltage).**

Przewodność tego połączenia elektrycznego (kanału) zależy od koncentracji elektronów w indukowanym kanale, a więc przede wszystkim od napięcia  $U_{GS}$ . Jeżeli teraz zostanie podwyższony potencjał drenu,  $U_{DS} > 0$  (tak jak pokazano na Rys.2c), to popłynie prąd drenu  $I_D$  tym większy im większe będzie napięcie  $U_{DS}$ .

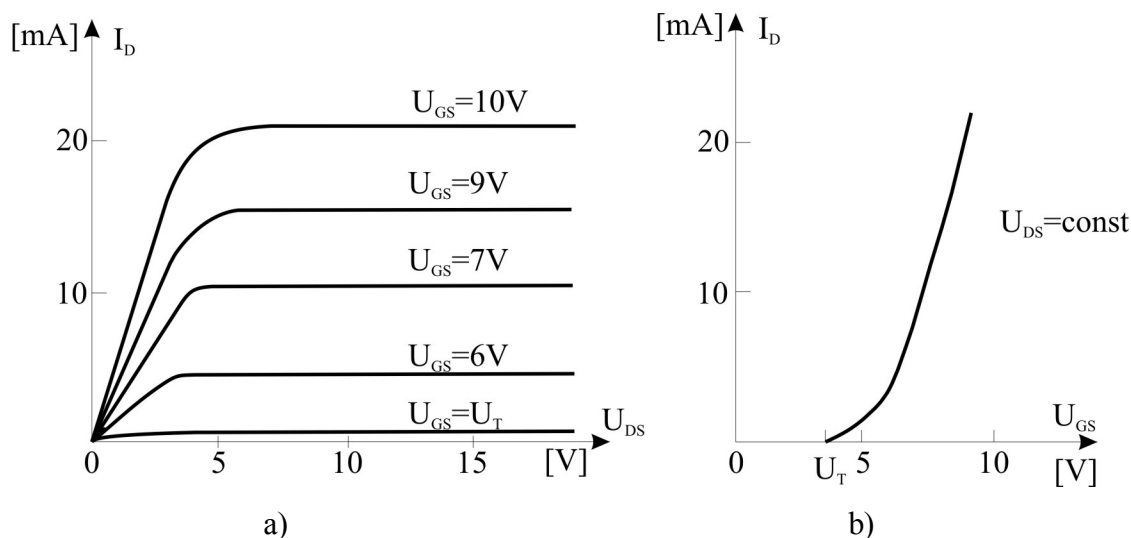
Zależność prądu drenu  $I_D$  od napięcia drenu  $U_{DS}$  nie jest jednak liniowa. Jest to spowodowane tym, że spadek napięcia wzdłuż kanału, wywołany płynącym przez niego prądem, zmienia stan polaryzacji bramki wzdłuż jej długości. Im bliżej drenu tym różnica potencjałów między bramką a kanałem jest mniejsza, a kanał płytszy. Ze wzrostem wartości  $U_{DS}$  całkowita rezystancja kanału rośnie i wzrost wartości prądu drenu nie jest proporcjonalny do wzrostu napięcia. Przy  $U_{DS} = (U_{GS} - U_T)$  kanał w pobliżu drenu „przestaje istnieć” (w rzeczywistości istnieje niewielki otwarty przekrój) i prąd drenu ulegnie nasyceniu (ustali się stała wartość). Przy dalszym wzroście potencjału na drenie „punkt zamknięcia” kanału będzie przesuwiał się w kierunku źródła. Taka sytuacja przedstawiona jest na Rys.2d. Wzrost napięcia drenu  $U_{DS}$  powyżej wartości napięcia bramki będzie powodował więc tylko bardzo nieznaczny wzrost wartości prądu drenu  $I_D$ .

### 1.3 Charakterystyki statyczne tranzystorów MOSFET.

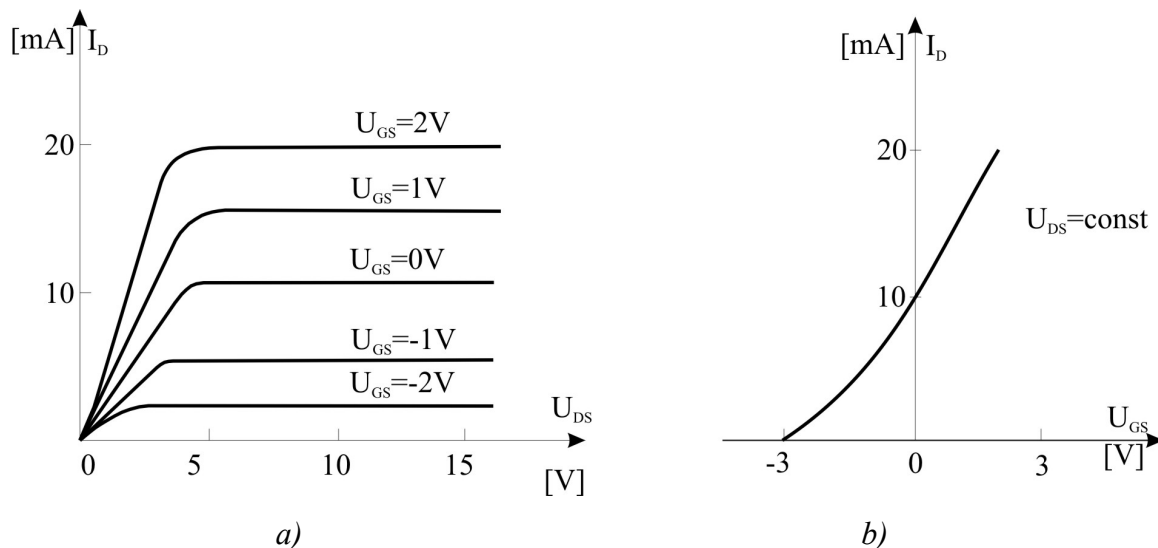
Charakterystyki statyczne tranzystorów polowych są przedstawiane zazwyczaj w postaci dwóch rodzin:

- charakterystyk wyjściowych  $I_D = f(U_{DS})$  dla  $U_{GS} = \text{const}$ .
- charakterystyk przejściowych  $I_D = f(U_{GS})$ , dla  $U_{DS} = \text{const}$ .

Podstawowe rodziny charakterystyk tranzystorów unipolarnych MOS z kanałem typu  $n$  wzbogacanym pokazano na rys.3, a z kanałem zubożanym – na rys.4.



Rys.3 Charakterystyki: a) wyjściowe i b) przejściowa tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką i kanałem wzbogacanym typu  $n$ .



Rys.4 Charakterystyki: a) wyjściowe i b) przejściowa tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką i kanałem zubożonym typu n

Tranzystory polowe MOSFET ze zubożonym kanałem (normalnie załączony) – zazwyczaj używane są w układach wzmacniających. Tranzystory MOSFET z kanałem wzbogacanym (normalnie wyłączony) stosuje się głównie w układach przełączających oraz wzmacniaczach mocy. Największym polem zastosowań MOSFETów w układach cyfrowych jest technologia układów scalonych CMOS.

Charakterystykę wyjściową tranzystora MOSFET można podzielić na dwie części: obszar nasycenia i obszar nienasycenia (liniowy). W obszarze nasycenia tranzystor polowy zachowuje się jak bardzo dobry element transkonduktancyjny, tzn. taki, dla którego prąd  $I_D$  jest praktycznie stały dla różnych napięć  $U_{DS}$ . Natomiast dla małych wartości  $U_{DS}$ , czyli w obszarze nienasycenia, zachowuje się on jak rezystor (liniowa charakterystyka I-U), tzn. prąd  $I_D$  jest proporcjonalny do napięcia  $U_{DS}$ . Oczywiście dla obu obszarów prąd drenu  $I_D$  jest funkcją napięcia bramka-źródło  $U_{GS}$ , a ściślej rzecz biorąc jest funkcją różnicy  $(U_{GS} - U_T)$ , gdzie  $U_T$  (Threshold – próg) jest napięciem progowym, czyli takim, przy którym zostaje zainicjowany kanał.

Obszar liniowy, w którym prąd drenu jest proporcjonalny do  $U_{DS}$ , rozciąga się od  $U_{DS}=0V$  do  $U_{DS}=U_{DSsat}$ . Na prawo od  $U_{DS}=U_{DSsat}$  charakterystyki prądu drenu  $I_D$  biegną prawie poziomo. W obszarze liniowym nachylenie charakterystyki, czyli  $I_D/U_{DS}$ , jest proporcjonalne do  $(U_{GS}-U_T)$ . Napięcie dren-źródło, dla którego następuje przejście do obszaru nasycenia jest równe  $U_{DSsat}=(U_{GS}-U_T)$ . W efekcie daje to proporcjonalność prądu nasycenia drenu  $I_{D(sat)}$  do  $(U_{GS}-U_T)^2$ , czyli kwadratową zależność prądu drenu od napięcia sterującego.

Bardziej ogólne równania prądu drenu tranzystora polowego można przedstawić przy pomocy poniższych wzorów:

$$\text{- dla obszaru liniowego: } I_D = \beta \left[ (U_{GS} - U_T) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]$$

- dla obszaru nasycenia:

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

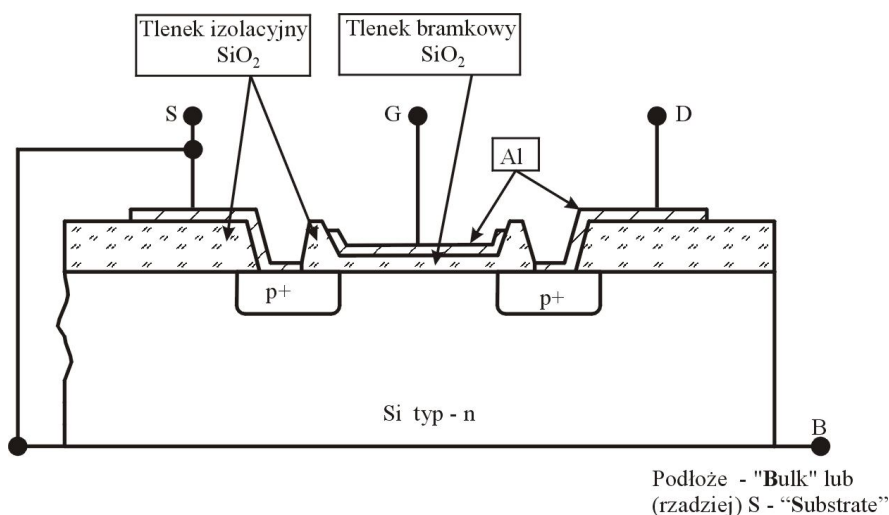
gdzie:  $\beta$  – współczynnik materiałowo – konstrukcyjnym, decyduje o wzmacnieniu

$U_T$  - napięcie progowe bramka-źródło ( $U_{GS}$ ), przy którym zaczyna powstawać kanał, a w rzeczywistości napięcie katalogowe, przy którym prąd drenu osiąga określoną normatywnie wartość, np.  $10\mu A$ .

- Jeżeli różnicę ( $U_{GS} - U_T$ ) nazwie się wysterowaniem bramki, to można stwierdzić, że:
- w obszarze nienasylenia (liniowym) rezystancja kanału jest odwrotnie proporcjonalna do wysterowania bramki,
  - granicą obszaru liniowego jest linia, dla której napięcie dren-źródło jest równe wysterowaniu bramki:  $U_{DS} = (U_{GS} - U_T)$ ,
  - prąd nasycenia drenu jest proporcjonalny do kwadratu wysterowania bramki. Należy zauważyć, że **zależność prądu drenu od napięcia sterującego  $U_{GS}$  jest kwadratowa, tzn. charakterystyka przejściowa jest fragmentem paraboli.**

Przekroczenie dopuszczalnych napięć  $U_{GSmax}$  lub  $U_{DSmax}$  spowoduje wystąpienie przebicia i uszkodzenie tranzystora. W złączowych tranzystorach unipolarnych przebicie następuje w złączu bramka-kanał. W tranzystorach z izolowaną bramką może wystąpić przebicie warstwy izolacyjnej między bramką i kanałem. Przy dostatecznie dużym napięciu zostaje przekroczona wytrzymałość dielektryczna warstwy, co powoduje punktowe jej zniszczenie. Następuje wówczas trwale uszkodzenie tranzystora.

Na Rys.5 przedstawiono uproszczony przekrój struktury tranzystora E-MOSFET z kanałem typu  $p$  stosowanej powszechnie w układach scalonych. Widoczne jest zwarcie źródła z podłożem. Tlenek bramkowy o grubości rzędu nanometrów decyduje o wzmacnieniu MOSFETA, natomiast tlenek izolacyjny, wiele set razy grubszy, definiuje obszar czynny, czyli kanał tranzystora.



Rys.5 Przykładowa konstrukcja tranzystora polowego E-MOSFET z kanałem wzbogacającym (indukowanym) typu  $p$ .

#### 1.4 Parametry i model zastępczy tranzystorów polowych dla małych sygnałów prądu zmiennego

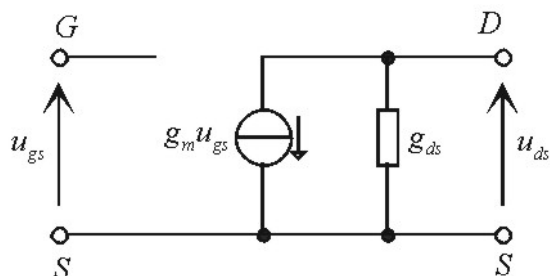
Z omówionymi charakterystykami wiążą się parametry dynamiczne tranzystorów unipolarnych. W zakresie małych częstotliwości prądu zmiennego dla małych amplitud sygnału definiuje się konduktancję przejściową  $g_m$  i konduktancję wyjściową  $g_{ds}$ :

$$g_m = \frac{di_d}{du_{gs}} \quad \text{dla} \quad U_{DS} = const$$

$$g_{ds} = \frac{di_d}{du_{ds}} \quad \text{dla} \quad U_{GS} = const$$

Wartości parametrów  $g_m$  i  $g_{ds}$  zależą od warunków polaryzacji, tzn. od wartości stałego napięcia bramka - źródło  $U_{GS}$  i wartości prądu drenu  $I_D$  (punktu pracy).

Na podstawie tych parametrów można przedstawić uproszczony schemat zastępczy tranzystora polowego dla zakresu małych częstotliwości, który pokazano na rys.6. Wejście napięciowe MOSFETA, G-S ma bardzo dużą rezystancję (nieskończenie wielką), co symbolizuje niepodłączony zacisk bramki, G.



Rys.6 Schemat zastępczy tranzystora polowego dla małych sygnałów zmiennych w zakresie małych częstotliwości

Wzmocnienie napięciowe, tranzystora polowego w układzie ze wspólnym źródłem (przy założeniu  $R_{obc} < 1/g_{ds}$ ) dane jest wzorem:

$$K_u = -g_m \cdot R_{obc}$$

gdzie:  $R_{obc}$  – zewnętrzna rezystancja obciążenia dołączona do wyjścia

## 2. Pomiary

### 2.1 Program ćwiczenia

1. Pomiar rodziny charakterystyk wyjściowych  $I_D=f(U_{DS})$ , dla co najmniej pięciu napięć  $U_{GS}$  (parametr).
2. Pomiar charakterystyk przejściowych  $I_D=f(U_{GS})$  dla jednej wartości napięcia  $U_{DS}$  (parametr) w zakresie nasycenia prądu  $I_D$ .

**Uwaga:** Jeżeli brak czasu nie pozwoli na dokończenie tego pomiaru należy charakterystyki przejściowe wykreślić na podstawie zmierzonych charakterystyk wyjściowych.

3. Z charakterystyk wyznaczyć następujące parametry tranzystora:
  - $U_T$ , - napięcie progowe
  - $g_m$  oraz  $g_{ds}$  w punkcie pracy, dla zakresu nasyconych charakterystyk wyjściowych
  - $G_{DS0}=I_D/U_{DS}$  - konduktancję kanału otwartego (jest to nachylenie charakterystyki wyjściowej w jej liniowym zakresie) dla ustalonego napięcia  $U_{GS}$  (prądu  $I_D$ ).

Pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych można wykonać przy pomocy programu komputerowego „Rejestrator” lub metodą tzw. „techniczną” czyli odczytu danych z mierników punkt po punkcie. O sposobie wykonywania pomiarów decyduje prowadzący. Obsługa programu „Rejestrator” opisana jest w Instrukcji do ćw.1.



Przed przystąpieniem do pomiarów sprawdzić typ (rodzaj kanału) mierzonych tranzystorów, parametry katalogowe i dobrać odpowiednią polaryzację elektrod. W czasie pomiaru należy zwrócić uwagę na to, aby moc wydzielana w tranzystorach, prąd drenu  $I_D$ , napięcie źródło-dren  $U_{DS}$  nie przekroczyły dopuszczalnych wartości. W tym celu należy ustawić ograniczenia prądowe na zasilaczach zgodnie z danymi katalogowymi.

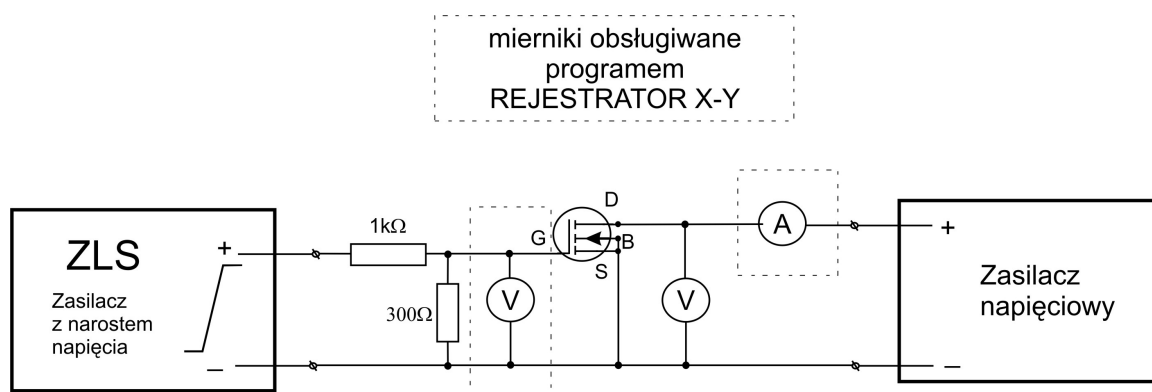
We wszystkich pomiarach jako zasilacz napięciowy stosować zasilacz podwójny Agilent E3649A lub E3631A, a do pomiarów odpowiednich prądów i napięć stosować mierniki HP34401A. Przed pomiarami sprawdzić, które z nich podłączone są do komputera. Mierniki mierzące prąd ustawić w trybie pomiaru prądu **AUTO**.

## 2.2 Pomiar charakterystyk przejściowych tranzystora MOSFET normalnie wyłączzonego z kanałem typu n.

Zmontować układ pomiarowy według schematu z Rys.7. Przed wykonaniem pomiaru ustawić ograniczenie prądowe zasilacza z narostem napięcia na poziomie 5mA, a zasilacza napięciowego obwodu wyjściowego - 100mA. Ustawić na zasilaczu napięciowym obwodu wyjściowego wartość napięcia  $U_{DS}=5V$  lub 10V i wykonać pomiar przy napięciu zasilacza ZLS zmieniającym się od zera do 16V.

Jeżeli pomiary wykonujemy przy pomocy komputera, to odpowiednio (zgodnie z instrukcją obsługi **Rejestratora**) nadajemy nazwy miernikom, a prędkość narostu napięcia w zasilaczu ustawiamy na 30s. Po wykonaniu pomiaru drukujemy uzyskane charakterystyki (wydruk podpisujemy nazwiskami studentów w grupie).

**Uwaga:** z wykresu należy odczytać wartość napięcia progowego  $U_T$  i oszacować w jakim zakresie powinna zmieniać się wartość napięcia  $U_{GS}$  aby zmienić prąd  $I_D$  od 0 do 100mA.



Rys. 7 Schemat układu do pomiaru charakterystyk: przejściowej tranzystora MOSFET normalnie wyłączzonego z kanałem typu n.

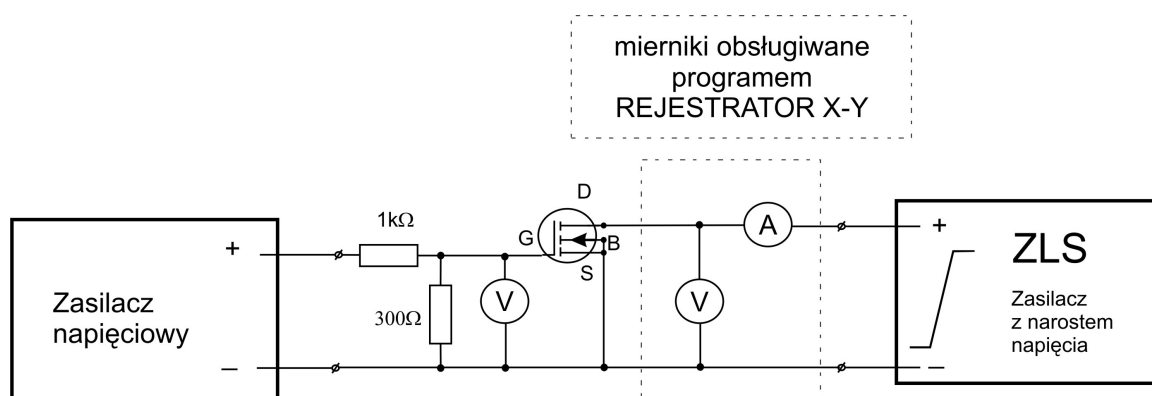
### 2.3 Pomiar charakterystyk wyjściowych tranzystora MOSFET normalnie wyłączanego z kanałem typu n.

Zmontować układ pomiarowy według schematu na rys.8. Przed wykonaniem pomiaru ustawić ograniczenie prądowe zasilacza obwodu wejściowego na poziomie 20mA, a zasilacza obwodu wyjściowego z narostem napięcia na 100mA. Wykonać serię pomiarów dla co najmniej pięciu wartości napięcia  $U_{GS}$  tak aby wartość prądu nie przekraczała wartości 100mA (nie powinien zapalać się wskaźnik ograniczenia prądu zasilacza ZLS) dla napięcia  $U_{DS}$  zmieniającego się od 0 do 10V.

**Uwaga: wartość napięcia  $U_{GS}$ , ze względu na dużą transkonduktancję tranzystora (sprawdzić katalogową wartość  $g_m$ ), zmieniać się może jedynie o bardzo małe wartości aby nie doszło do przekroczenia limitu prądu zasilacza.**

Dla pierwszej serii pomiarowej ustawić  $U_{GS}=U_T$  (wyznaczone z charakterystyki przejściowej). Jeżeli pomiary wykonujemy przy pomocy komputera, to odpowiednio (zgodnie z instrukcją obsługi **Rejestratora**) nadajemy nazwy miernikom a prędkość narostu napięcia w zasilaczu ustawiamy na 30s. Po wykonaniu pomiaru drukujemy charakterystyki wyjściowe.

Z uzyskanych charakterystyk wyjściowych wyznaczamy parametry małosygnałowe  $g_m$  oraz  $g_{ds}$  w punkcie pracy wskazanym przez prowadzącego. Jeżeli natomiast pomiary wykonujemy metodą „techniczną”, to wyniki zapisujemy w tabelce, a na ich podstawie na papierze milimetrowym wykreślamy uzyskane charakterystyki.



Rys. 8 Schemat układu do pomiaru charakterystyk: wyjściowej tranzystora MOSFET normalnie wyłączanego z kanałem typu n.

### 3 Opracowanie wyników

Powinno zawierać:

- Opisane wykresy zmierzonych charakterystyk
- Wartości liczbowe podstawowych parametrów zmierzonych tranzystorów, wyznaczone na podstawie otrzymanych charakterystyk
- Obliczenia i wartości liczbowe parametrów tranzystora:  $g_m$ ,  $g_{ds}$  wyznaczone we wskazanym punkcie pracy
- Wnioski: porównać wartości parametrów katalogowych mierzonych tranzystorów z wartościami wyznaczonymi po odpowiednich pomiarach.