

## Ćwiczenie 4

### Parametry statyczne tranzystorów polowych JFET i MOSFET

#### Cel ćwiczenia

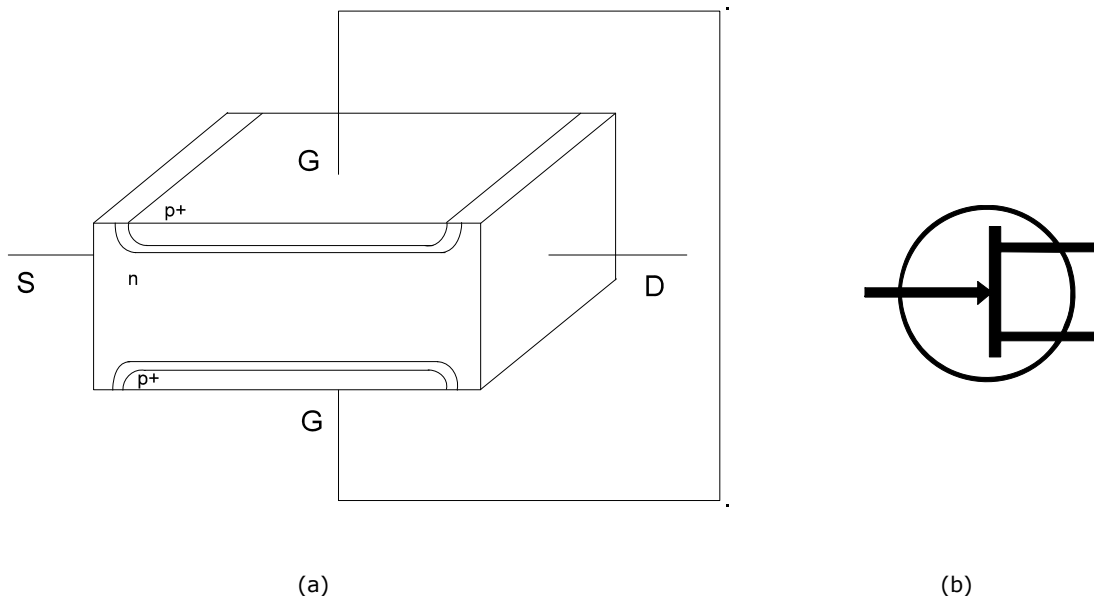
Podstawowym celem ćwiczenia jest poznanie charakterystyk statycznych tranzystorów polowych złączowych oraz z izolowaną bramką.

#### Tranzystory JFET

##### Wiadomości podstawowe

##### Budowa i zasada działania tranzystora polowego ze złączem pn

Tranzystor polowy złączowy należy do grupy przyrządów unipolarnych, w których nie ma charakterystycznego dla przyrządów bipolarnych procesu wstrzykiwania nośników przez złącze. W przyrządach tych prąd płynie w materiale tego samego typu (n lub p) poprzez obszar nazywany kanałem. Zmiany wartości tego prądu uzyskuje się zmieniając rezystancję kanału przez zmianę jego przekroju poprzecznego.

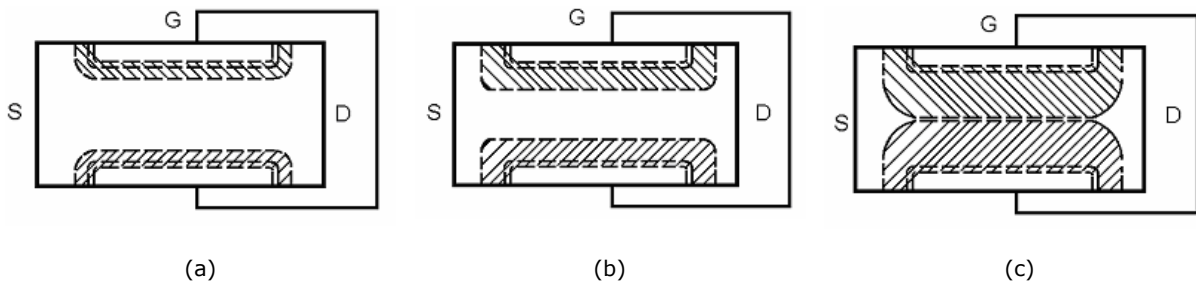


Rys.3.1. Schematyczna budowa (a) oraz symbol tranzystora polowego złączowego z kanałem typu (b)

Zasadę działania polowego tranzystora złączowego ilustruje rys.3.1, na którym przedstawiono jego schematyczną budowę. Prąd płynie w nim od źródła S do drenu D przez kanał (na rys. jest to kanał typu n). Szerokość tego kanału jest ograniczona z dołu i z góry przez dwa złącza powstałe w wyniku wprowadzenia do jednorodnej płytki typu n dwóch wysepek typu p<sup>+</sup> (o dużej koncentracji domieszek) połączonych ze sobą i stanowiących elektrodę bramki G. W normalnych warunkach pracy złącze bramka-kanał jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, a sterowanie pracą tranzystora odbywa się przez zmianę napięcia bramka-źródło  $U_{GS}$ .

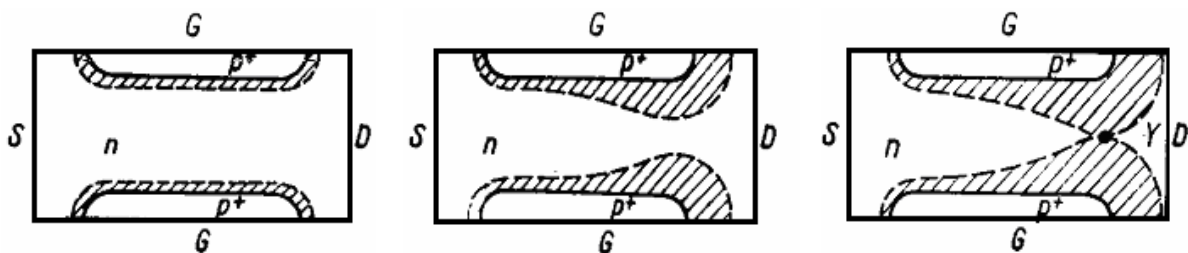
Na rys.3.2 przedstawiono sytuację w kanale dla różnych napięć bramka-źródło przy pomijalnie małym prądzie drenu  $I_D$ , (prądzie płynącym przez kanał od źródła do drenu). Rys. 3.2a przedstawia stan odpowiadający napięciu  $U_{GS}=0$ . Szerokość kanału jest z góry i z dołu ograniczona przez obszary ładunku przestrzennego złącz p-n, których rozmiar jest określony jedynie przez potencjały dyfuzyjne tych złącz. Rys. 3.2b odpowiada spolaryzowaniu złącz napięciem wstecznym o niewielkiej wartości. Obszar ładunku przestrzennego złącz spolaryzowanych wstecznie wnika głębiej w obszar kanału, szerokość kanału maleje i tym samym rośnie jego rezystancja, prąd przez kanał może

jednak w dalszym ciągu przepływać. Rys. 3.2c odpowiada spolaryzowaniu złącz napięciem  $U_{GS} = U_p$ . Napięcie  $U_p$  nosi nazwę napięcia odcięcia i odpowiada sytuacji, w której obszary ładunku przestrzennego obu złącz połączą się. Oznacza to, że szerokość kanału staje się praktycznie równa 0.



Rys.3.2. Kanał w tranzystorze polowym złączowym dla napięcia  $U_{GS}=0$  (a),  $0 < |U_{GS}| < |U_p|$  (b),  $U_{GS}=U_p$  (c)

Wprowadzenie napięcia źródło-dren powoduje poszerzenie warstwy zaporowej pomiędzy bramką a drenem (przy normalnej polaryzacji  $U_{GD}=U_{DS}+U_{GS}$ ) i jednocześnie przepływ prądu przez kanał. W wyniku tego zmienia się kształt kanału. Przy dalszym wzroście napięcia źródło-dren osiąga ono wartość  $U_p$  co powoduje zamknięcie kanału od strony drenu. Pokazano to na rys.3.3. W zamkniętej części kanału pole elektryczne silnie wzrasta i powoduje usuwanie wszystkich nośników dostarczanych od strony źródła do drenu. W rezultacie prąd przez kanał nie przestaje płynąć, ale jego wartość nie zależy w tym zakresie od wartości napięcia  $U_{DS}$ .

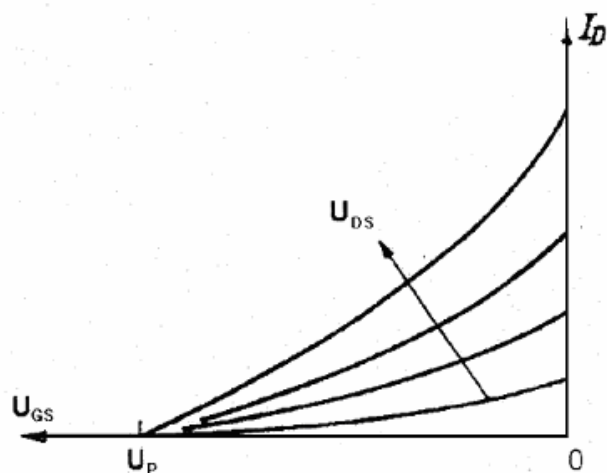


Rys.3.3 Kanał w tranzystorze polowym złączowym dla stałego napięcia  $U_{GS}$  oraz różnych wartości napięcia  $U_{DS}$

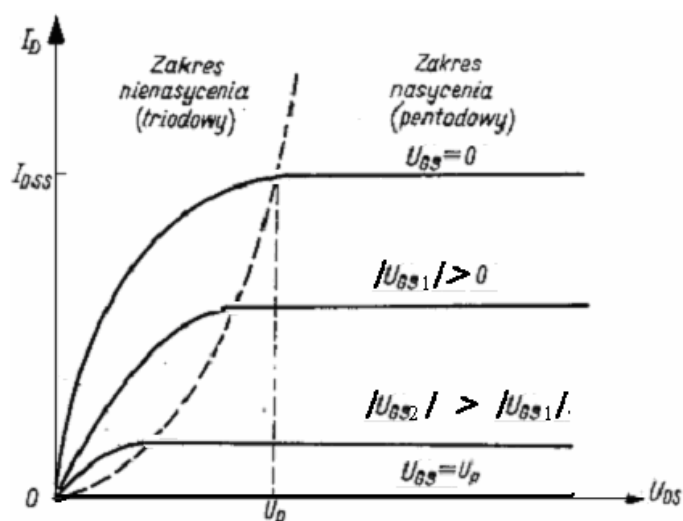
### Charakterystyki statyczne tranzystora JFET

Pracę tranzystora polowego złączowego charakteryzują dwie podstawowe rodziny charakterystyk statycznych: charakterystyki przejściowe  $I_D=f(U_{GS})$  dla  $U_{DS}=const$  oraz charakterystyki wyjściowe  $I_D=f(U_{DS})$  dla  $U_{GS}=const$ . Typowy przebieg tych charakterystyk pokazano na rys.3.4 i 3.5.

Na rys.3.5, obrazującym charakterystyki wyjściowe, można wyróżnić dwa obszary odpowiadające różnym warunkom pracy tranzystora: obszar nienasyenia i obszar nasycenia. Przez analogię z charakterystykami lamp elektronowych nazwano je odpowiednio obszarem triodowym i obszarem pentodowym.



Rys.3.4 Charakterystyki statyczne przejściowe tranzystora polowego złączowego



Rys.3.5 Charakterystyki statyczne wyjściowe tranzystora polowego złączowego

### Parametry małosygnałowe

Tranzystor polowy złączowy – podobnie jak tranzystor bipolarny - można traktować jako czwórnik nieliniowy, którego właściwości statyczne są opisane rodzinami charakterystyk wyjściowych i przejściowych. W przypadku pracy z przebiegami o małej amplitudzie tranzystor można traktować jako czwórnik liniowy i opisać go małosygnałowymi parametrami różniczkowymi określonymi dla danego punktu pracy. Parametry te stanowią elementy małosygnałowego schematu zastępczego tranzystora.

W zakresie małych częstotliwości najistotniejszymi parametrami są: transkonduktancja bramki  $g_m$  i konduktancja wyjściowa (kanału)  $g_d$ , zdefiniowane wzorami:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS} = const}$$

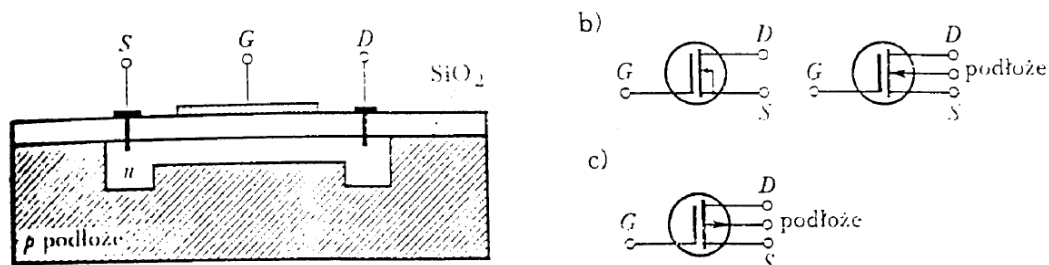
$$g_d = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS} = const}$$

## **Tranzystory MOSFET**

### **Wiadomości podstawowe**

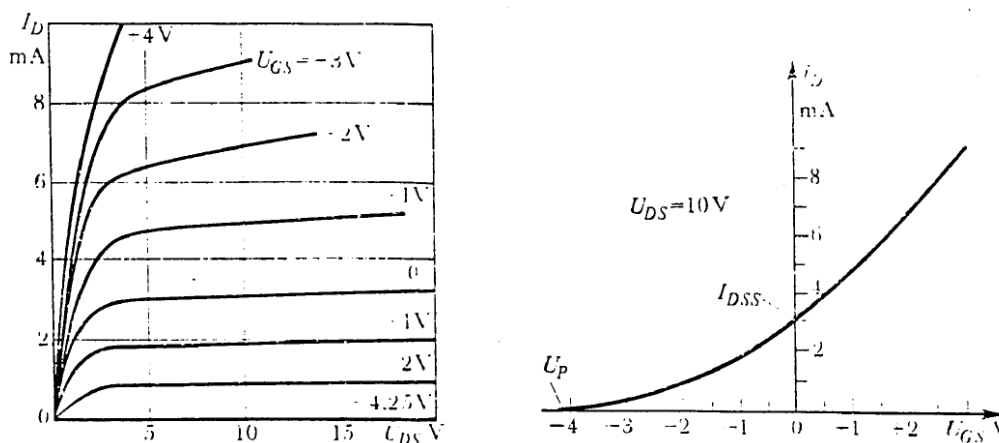
### Budowa i działanie tranzystora polowego z izolowaną bramką.

Tranzystory MOS z izolowaną bramką są jednym z rodzajów tranzystorów polowych. Najczęściej wykorzystywane są w układach mikroelektroniki (pamięci półprzewodnikowe, układy mikroprocesorowe). Elektrody prądowe tranzystora MOS nazywamy źródłem S (ang. source) i drenem D (ang. drain). Elektroda sterująca to bramka G (ang. gate) i podłoże B (ang. bulk). Na rys.3.6 przedstawiono budowę tranzystora polowego z izolowaną bramką, pracującego na zasadzie zubożenia nośników w kanale lub inaczej mówiąc tranzystora polowego z izolowaną bramką typu „normalnie załączony” z kanałem typu n.



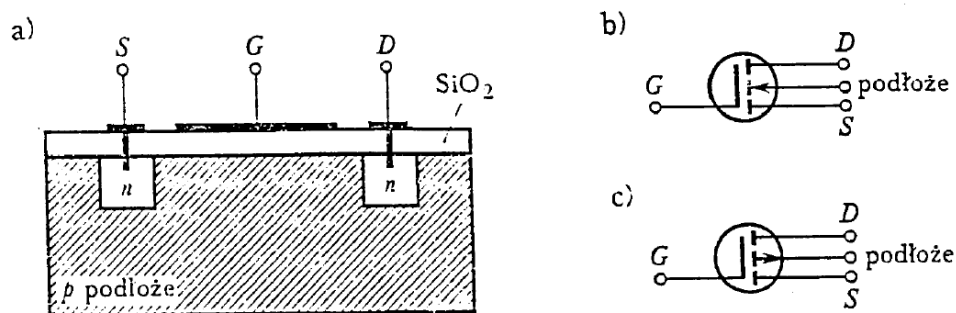
Rys.3.6 Tranzystor MOS FET typu „normalnie załączony” a) przekrój b) symbole graficzne tranzystora z kanałem typu n c) symbol graficzny tranzystora z kanałem typu p.

Bramka jest odizolowana od kanału warstwą SiO<sub>2</sub>. Dzięki temu rezystancja wejściowa obwodu bramki jest rzędu 10<sup>12</sup> Ω i dlatego prąd wejściowy ma bardzo małą wartość, co jest zasadniczą zaletą tych tranzystorów. Tranzystor tego typu pracuje zazwyczaj przy zerowej polaryzacji wstępnej bramki, ponieważ napięcie bramki może się zmieniać wokół zera, przyjmując wartości zarówno dodatnie, jak i ujemne. Przykładowe charakterystyki dla tego typu tranzystora pokazano na rys.3.7.

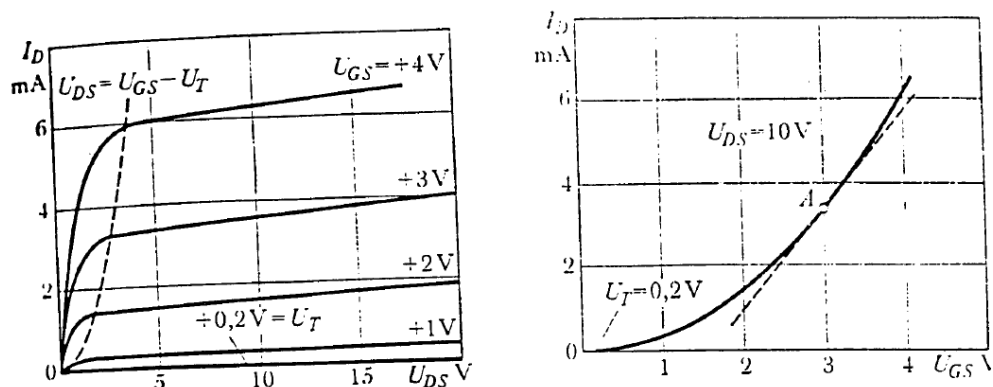


Rys.3.7 Charakterystyka przejściowa i wyjściowa tranzystora formalnie załączonego z kanałem typu n

Innym rodzajem tranzystora MOS jest tranzystor polowy z indukowanym kanałem lub pracującym na zasadzie wzbogacania nośników w kanale, bądź tranzystor typu „normalnie wyłączony”. Jego budowa pokazana jest na rys.3.8. Gdy bramka ma niewielkie napięcie dodatnie, w podłożu typu p poniżej bramki wytwarza się cienka warstwa pozbawiona nośników elektrycznych. Wzrost dodatniego potencjału bramki powoduje przyciąganie elektronów do dna warstwy SiO<sub>2</sub> poniżej bramki, tak że pomiędzy obszarem n źródła S a obszarem n drenu D rozciąga się warstwa wypełniona elektronami. W rezultacie, źródło i dren zostaje połączone zaindukowanym kanałem. Najmniejsze dodatnie napięcie bramki, powodujące zaindukowanie kanału nazywane jest napięciem progowym U<sub>T</sub>. Typowe charakterystyki statyczne tranzystora tego rodzaju pokazano na rys.3.9.



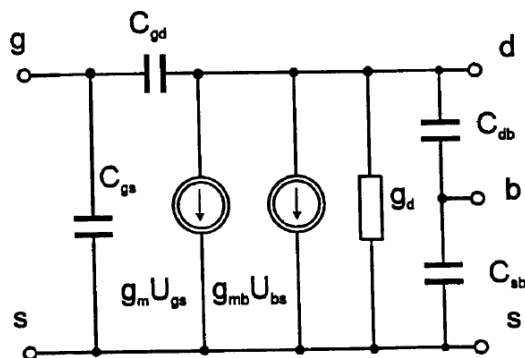
Rys.3.8 Tranzystor MOS FET typu „normalnie wyłączony” a) przekrój b) symbol graficzny tranzystora z kanałem typu n c) symbol graficzny tranzystora z kanałem typu p.



Rys.3.9 Charakterystyka przejściowa i wyjściowa tranzystora formalnie wyłączonego z kanałem typu n

### Parametry małosygnałowe.

Własności dynamiczne tranzystora polowego z izolowaną bramką (MOS) określa się najczęściej w oparciu o model małosygnałowy. Na rys.3.10 pokazano model tranzystora dla małych sygnałów w układzie wspólnego źródła.



Rys.3.10 Schemat zastępczy dla małych sygnałów tranzystorów MOS w zakresie średnich częstotliwości.

gdzie:  $C_{gs}$  - pojemność bramka-źródło;  $C_{gd}$  - pojemność bramka-dren;  $C_{db}$  - pojemność dren-podłoże;  $C_{sb}$  - pojemność źródło-podłoże;  $g_m$  - transkonduktancja bramki;  $g_{mb}$  - transkonduktancja podłoża;  $g_d$  - konduktancja kanału.

Transkonduktancja bramki  $g_m$  określa przyrost prądu drenu wywołany małym przyrostem napięcia bramki w ustalonym punkcie pracy.

$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dU_{GS}} \right|_{\substack{U_{DS} = const \\ U_{BS} = const}}$$

Transkonduktancja podłoża  $g_{mb}$  określa przyrost prądu drenu wywołany małym przyrostem napięcia podłoża w ustalonym punkcie pracy.

$$g_{mb} = \left. \frac{dI_D}{dU_{BS}} \right|_{\substack{U_{DS} = const \\ U_{GS} = const}}$$

Konduktancja kanału  $g_d$  jest zdefiniowana wzorem:

$$g_d = \left. \frac{dI_D}{dU_{DS}} \right|_{\substack{U_{GS} = const \\ U_{BS} = const}}$$

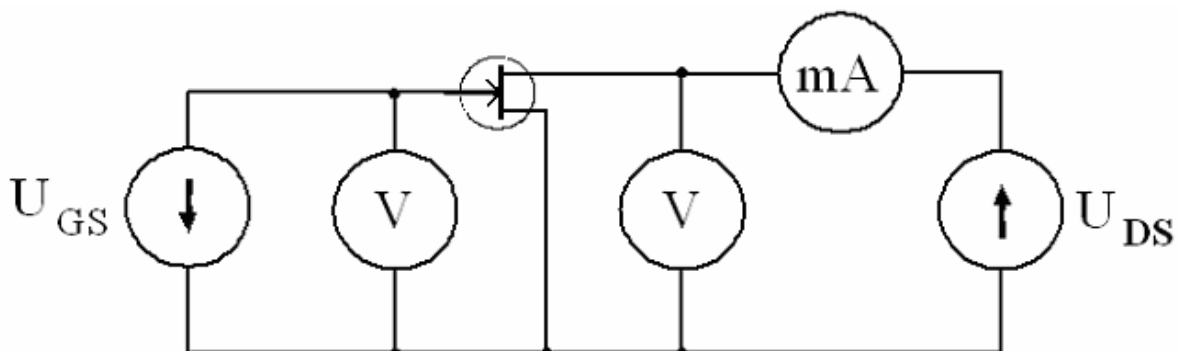
Pojemności  $C_{gs}$  i  $C_{gd}$  występują między elektrodą bramki a kanałem tranzystora. Przy napięciu  $U_{DS}=0$  obie pojemności przyjmują wartość równą połowie całkowitej pojemności warstwy izolatora. Ze wzrostem napięcia  $U_{DS}$  pojemność  $C_{gs}$  rośnie, przyjmując wartość równą 2/3 pojemności izolatora, natomiast  $C_{gd}$  maleje do zera. W rzeczywistym tranzystorze pojemności te są większe ze względu na nachodzenie powierzchni bramki nad obszary dyfuzyjne źródła i drenu (dotyczy to zwłaszcza tranzystorów z kanałem wzbogacanym). Niezerowa wartość pojemności bramka-dren jest przyczyną ograniczenia wzmocnienia przy pracy w zakresie dużych częstotliwości. Pojemności  $C_{db}$  i  $C_{sb}$  są pojemnościami zaporowo spolaryzowanych złącz dren-podłoże i źródło-podłoże. Ich wartości maleją ze wzrostem napięcia polaryzacji dren-źródło.

## Wykonanie ćwiczenia

Uproszczony schemat układu pomiarowego pokazany jest na rys.3.11. Należy wyznaczyć następujące charakterystyki:

wyjściową  $I_D = f(U_{DS})$  dla kilku wartości napięcia bramki  $U_{GS}$ . Jako pierwszą wartość przyjmując  $U_{GS}=0$  a następnie w granicach 0 -  $U_p$  tak, aby otrzymane charakterystyki były na wykresie równomiernie rozłożone.

przejściową  $I_D = f(U_{GS})$  dla kilku wartości napięcia drenu  $U_{DS}$ . Jedną wartość napięcia  $U_{DS}$  należy przyjąć z zakresu pentodowego, pozostałe z pogranicza i z zakresu triodowego. Zadbać, aby wykreślone charakterystyki były równomiernie rozłożone.



Rys.3.11 Schemat układu do pomiaru charakterystyk statycznych tranzystora polowego złączowego.

**Uwaga 1.** Przed wyznaczaniem charakterystyk nastawić wstępnie napięcie  $U_{DS}$  na poziomie kilku woltów (3V - 8V) a następnie zmniejszyć prąd drenu do zera przez zmianę

napięcia  $U_{GS}$ . Pozwoli to na określenie rodzaju kanału badanego tranzystora i wartości napięcia odcięcia. W tabelach wyników pomiarów notować znaki napięć i prądu.

**Uwaga 2.** Przed przystąpieniem do pomiarów dokonać wszystkich możliwych regulacji i zaobserwować, w jakim zakresie zmieniają się poszczególne wielkości, jak się zmieniają (gwałtownie, wolno). W oparciu o te obserwacje ustalić zakres pomiarów, krok pomiarowy (niekoniecznie stały w całym zakresie pomiarowym) oraz wartości parametrów przy jakich będą mierzone poszczególne charakterystyki. Dopiero wtedy przystąpić do właściwych pomiarów.

### **Opracowanie wyników**

wykreślić wszystkie pomierzone charakterystyki,  
na wykresie charakterystyk wyjściowych zaznaczyć granicę między obszarem triodowym i pentodowym,  
określić typ przewodnictwa kanału, wyznaczyć wartość napięcia odcięcia  $U_p$  i wartość prądu nasycenia drenu  $I_{DSS}$ . Zaznaczyć te wartości na wykresach,  
na podstawie pomierzonych charakterystyk wyznaczyć parametry małosygnałowe  $g_m$  i  $g_d$  dla trzech różnych punktów pracy (tych samych dla obydwu parametrów).

### **Literatura**

Z. Lisik – Podstawy fizyki półprzewodników, skrypt PŁ,  
A. Świt, J. Pułtorak – Przyrządy półprzewodnikowe,  
W. Marciniak – Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone.