



Ćwiczenie nr 8

Badanie tranzystorów unipolarnych typu JFET i MOSFET

I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania:

- zasada działania tranzystorów unipolarnych złączowych, JFET
- charakterystyki statyczne, wyjściowe i przejściowe, tranzystorów JFET
- stany powierzchniowe w strukturze MOS: akumulacja, zubożenie, inwersja
- budowa i zasada działania tranzystorów MOSFET
- charakterystyki statyczne, wyjściowe i przejściowe, tranzystorów MOSFET
- parametry małosygnałowe tranzystorów unipolarnych

II. Program zajęć

- pomiar charakterystyk wyjściowych i przejściowych tranzystorów JFET
- pomiar charakterystyk wyjściowych i przejściowych tranzystorów MOSFET
- wyznaczenie parametrów elektrycznych mierzonych tranzystorów

III. Literatura

- A. Świt, J. Pułtorak - Przystroje półprzewodnikowe
- W. Marciniak - Przystroje półprzewodnikowe i układy scalone
- Wykład

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

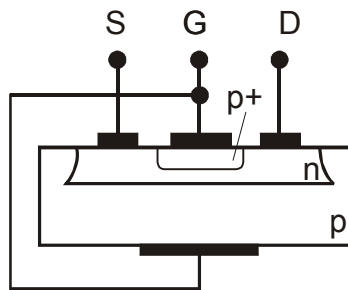
IV. Wiadomości wstępne

1. Zasady polaryzacji tranzystorów JFET i MOSFET

W przeciwieństwie do tranzystorów bipolarnych, których działanie zależy od dwóch rodzajów nośników ładunku (dziur i elektronów), w tranzystorze unipolarnym (polowym) o przepływie prądu decyduje jeden rodzaj nośników (dziury lub elektrony). Kanał tranzystora unipolarnego stanowi ścieżka przewodząca prąd od źródła do drenu, której przekrój jest regulowany za pomocą wnikającego poprzecznego pola elektrycznego (stąd ta druga nazwa - tranzystory polowe). Pole elektryczne może być wprowadzone przez:

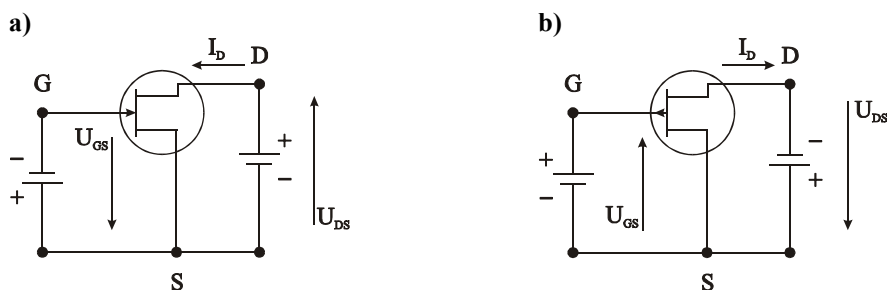
- spolaryzowane zaporowo złącze p-n, bramka-kanał w tranzystorach polowych złączowych (JFET),
- pojemność bramka-kanał utworzoną przez strukturę bramka-dielektryk- półprzewodnik (struktura MOS) w tranzystorach polowych z izolowaną bramką (MOSFET).

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie tranzystor JFET wykonany metodą epitaksjalno-dyfuzyjną.



Rys. 1. Konstrukcja tranzystora polowego JFET z kanałem typu n

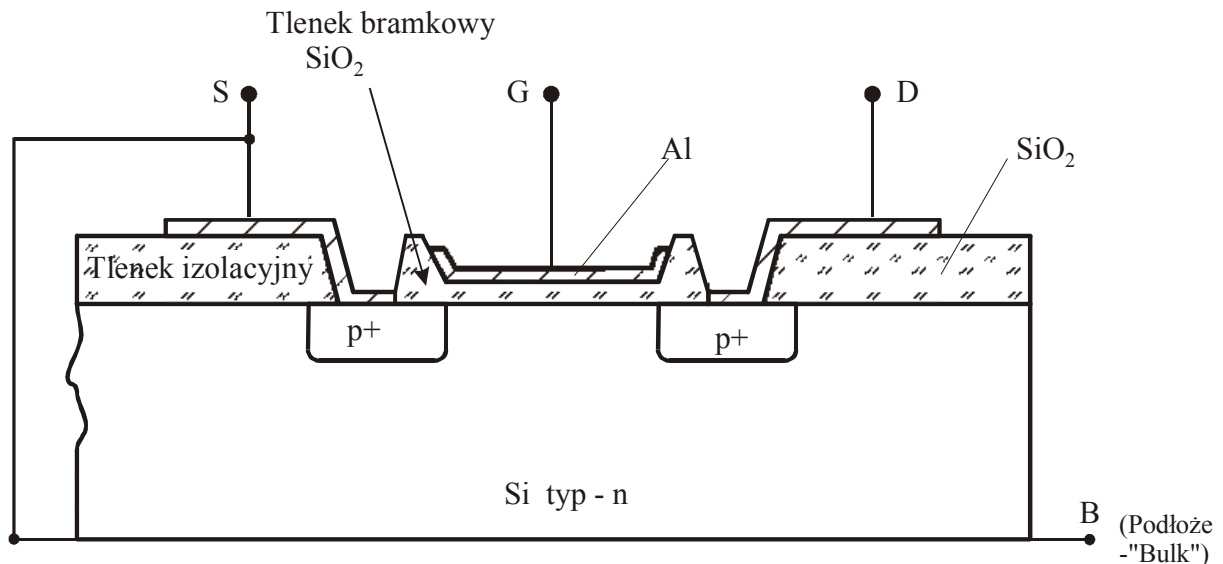
Zasady polaryzacji złączowego tranzystora polowego z kanałem typu n i typu p pokazano na rys. 2. Napięcie polaryzujące bramkę podaje się względem źródła.



Rys. 2. Zasady polaryzacji złączowego tranzystora unipolarnego z kanałem typu n (a) oraz typu p (b)

Charakterystyczną cechą tranzystorów polowych jest mały pobór prądu wejściowego, ze względu na bardzo dużą rezystancję wejściową (zaporowo spolaryzowane złącze bramka-kanal w tranzystorze JFET lub pojemność MOS w tranzystorze MOSFET). Wejście tranzystorów FET sterujemy więc napięciowo a nie prądowo jak w tranzystorach bipolarnych. Konstrukcje tranzystorów MOSFET można podzielić na dwie grupy:

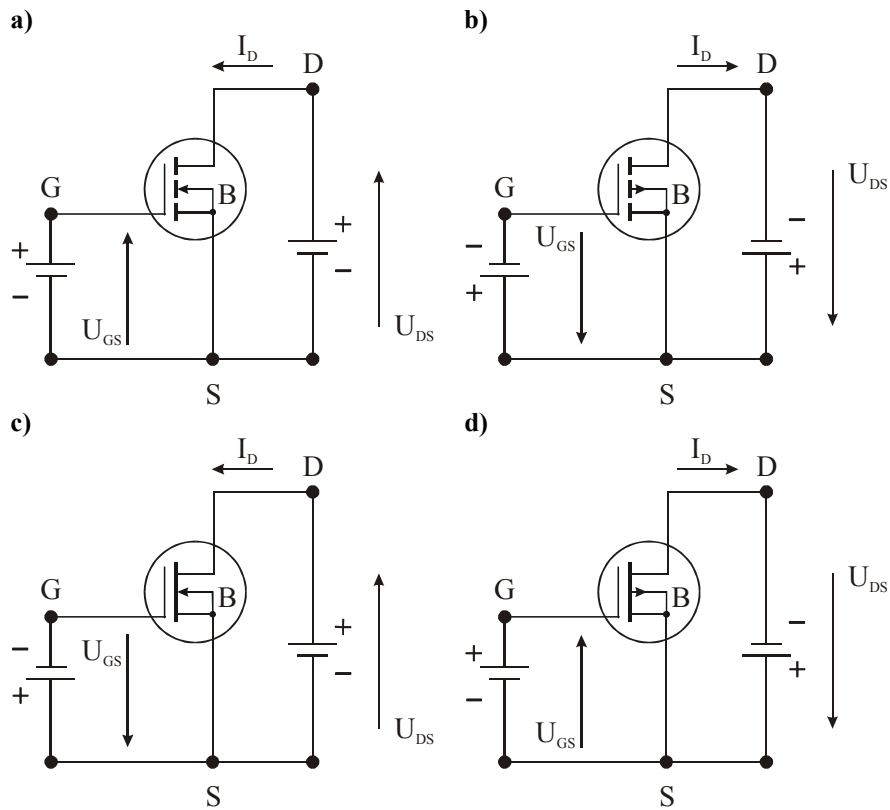
- normalnie wyłączone (lub z kanałem wzbogacającym czyli indukowanym) - w przypadku braku polaryzacji bramki nie mają kanału przewodzącego (rys. 3),
- normalnie załączone (lub z kanałem zubożającym) - posiadają wbudowany kanał przewodzący.



Rys. 3. Konstrukcja tranzystora MOSFET (unipolarnego z izolowaną bramką) z kanałem wzbogacającym typu p.

Te dwie konstrukcje mogą posiadać kanał zarówno typu-n jak i typu-p.

Zasady polaryzacji tranzystorów unipolarnych z izolowaną bramką przedstawiono na rys.4. W tranzystorach normalnie wyłączonych należy przyłożyć napięcie U_{GS} (wartości bezwzględne) większe od napięcia progowego U_T aby wytworzyć warstwę inwersyjną półprzewodnika, która zapewni utworzenie kanału. A więc bramkę polaryzuje się względem źródła napięciem o znaku przeciwnym do znaku ładunku nośników prądu w indukowanym kanale.



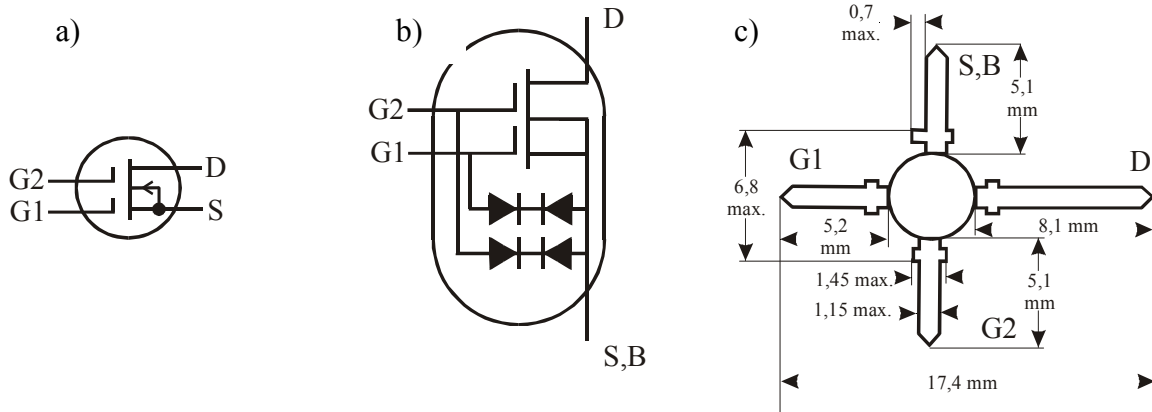
Rys. 4. Zasady polaryzacji tranzystorów unipolarnych z izolowaną bramką; a) z kanałem wzbogacanym typu n; b) z kanałem wzbogacanym typu p; c) z kanałem zubożonym typu n; d) z kanałem zubożonym typu p.

Tranzystor normalnie załączony może pracować zarówno ze zubożeniem nośników w kanale, jak też z ich wzbogacaniem. Na Rys.4 pokazano polaryzację właściwą w zakresie zubożonym. W tym zakresie, napięcie polaryzacji bramki ma taki sam znak jak znak ładunków nośników większościowych w kanale, natomiast w zakresie wzbogacaniem znak przeciwny (patrz charakterystyki Rys.8a).

Tranzystory MOSFET z podwójną bramką

Tranzystor typu MOSFET z podwójną bramką jest szczególną odmianą tranzystora z kanałem zubożonym. Bramka pierwsza spełnia podobną rolę jak w standardowym tranzystorze MOSFET, druga umożliwia polaryzację kanału tranzystora. W przypadku tranzystora MOSFET z kanałem typu n, przyłożenie dodatniego napięcia U_{G2S} powoduje poszerzenie toru przepływu prądu w kanale a przyłożenie napięcia ujemnego - jego zawężenie. Tym samym napięcie U_{G2S} stanowi parametr, przesuwający charakterystyki wyjściowe tego tranzystora w stronę wyższych ($U_{G2S} > 0$) lub niższych ($U_{G2S} < 0$) prądów drenu (patrz Rys.9).

Na rysunku 5 przedstawiono kolejno: symbol tranzystora polowego z podwójną bramką, schemat elektryczny z uwzględnieniem diod zabezpieczających warstwę SiO_2 przed przebiciem oraz obudowę tego tranzystora wraz z wyprowadzeniami. W załączniku zamieszczono dane katalogowe produkowanych tranzystorów polowych z podwójną bramką.



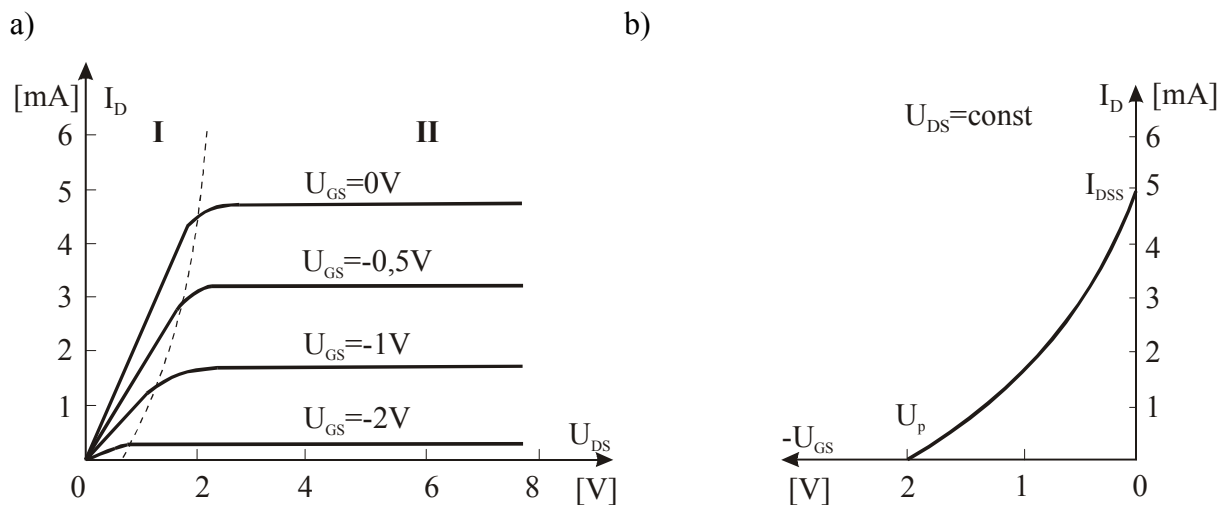
Rys. 5. Tranzystor polowy MOSFET z podwójną bramką; a) symbol, b) schemat elektryczny z uwzględnieniem wewnętrznych diod zabezpieczających, c) obudowa tranzystora i opis wyprowadzeń.

2. Charakterystyki statyczne tranzystorów unipolarnych.

Charakterystyki statyczne tranzystorów unipolarnych są przedstawione najczęściej w postaci dwóch rodzin:

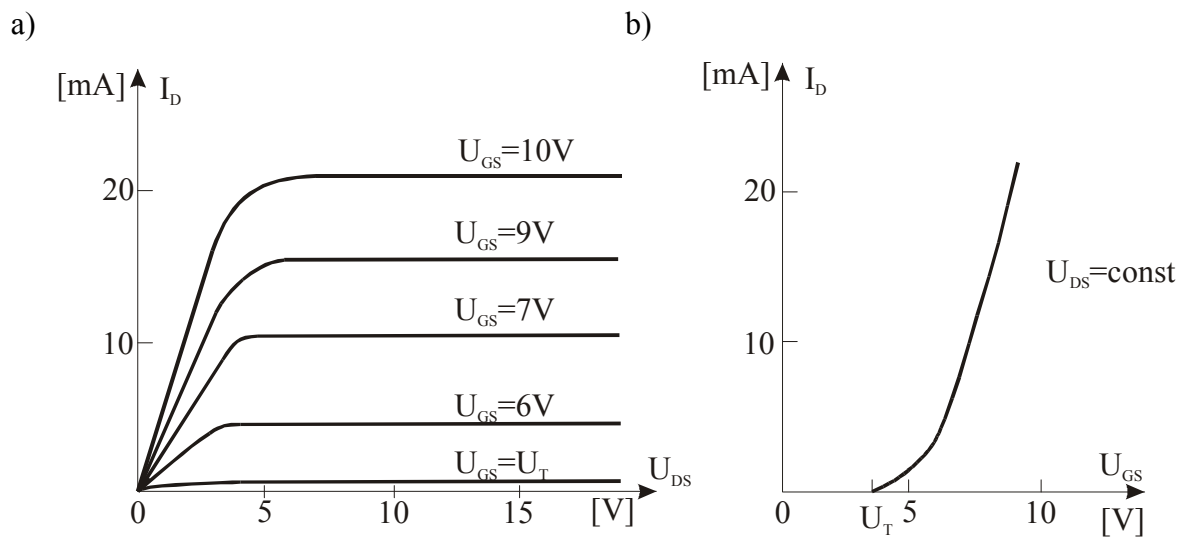
- charakterystyki wyjściowej $I_D=f(U_{DS})$ dla $U_{GS}=\text{const}$.
- charakterystyki przejściowej $I_D=f(U_{GS})$, dla $U_{DS}=\text{const}$.

Charakterystyki wyjściowe tranzystorów unipolarnych wszystkich typów mają podobny kształt (rys. 6a, 7a, 8a), różnica występuje w wartościach oraz kierunkach napięć i prądów. Charakterystyki te omówiono na przykładzie tranzystora polowego złączowego (rys. 6).

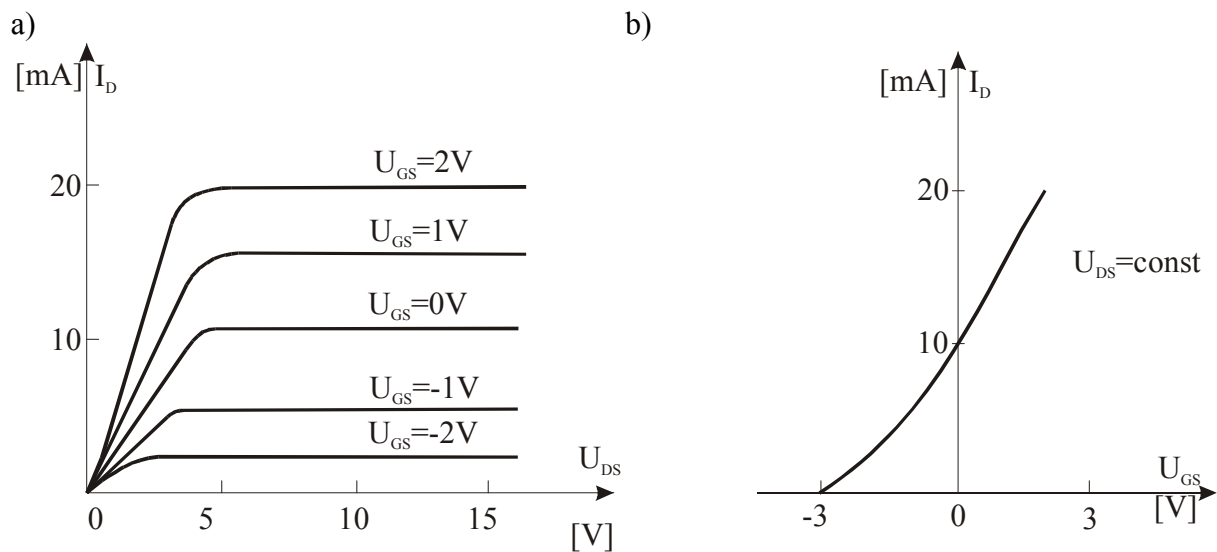


Rys. 6. Charakterystyka wyjściowa (a) i przejściowa (b) tranzystora unipolarnego złączowego z kanałem typu n; I - obszar omowy; II - obszar nasycenia.

Dla małych napięć dren-źródło, kiedy szerokość kanału jest zdefiniowana praktycznie tylko napięciem bramki, prąd drenu rośnie proporcjonalnie w miarę wzrostu napięcia U_{DS} (obszar I). Charakterystyka wyjściowa jest wtedy prostoliniowa, a tranzystor może być wykorzystywany jako rezystor o rezystancji zależnej od napięcia bramki. W miarę wzrostu napięcia dren-źródło U_{DS} , wzrasta polaryzacja zaporowa złącza bramka-kanał, powodując zwężanie kanału w kierunku drenu. W związku z tym zależność prądu drenu od napięcia U_{DS} ma charakter nieliniowy. Gdy warstwa zubożona w pobliżu drenu rozszerzy się prawie na całą grubość kanału następuje ustalenie wartości prądu drenu - jest to tzw. obszar nasyconych charakterystyk wyjściowych (obszar II).



Rys. 7. Charakterystyka wyjściowa (a) i przejściowa (b) tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką i kanałem wzbogacanym typu n.



Rys. 8. Charakterystyka wyjściowa (a) i przejściowa (b) tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką i kanałem zubożanym typu n.

W złączowym tranzystorze unipolarnym natężenie prądu drenu I_D w zakresie nasycenia prądu drenu (patrz: charakterystyka przejściowa) można opisać zależnością:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p} \right)^2$$

gdzie:

I_{DSS} - prąd w zakresie nasycenia dla $U_{GS}=0$,

U_p - napięcie odcięcia kanału, napięcie polaryzacji U_{GS} , przy którym obszary ładunku przestrzennego złącza zamykają kanał, $I_D=0$

Dla tranzystorów z izolowaną bramką, MOSFET, prąd drenu, w zakresie nasyconych charakterystyk wyjściowych, opisuje się zależnością:

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

gdzie: β - współczynnik konstrukcyjno-materiałowy,

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

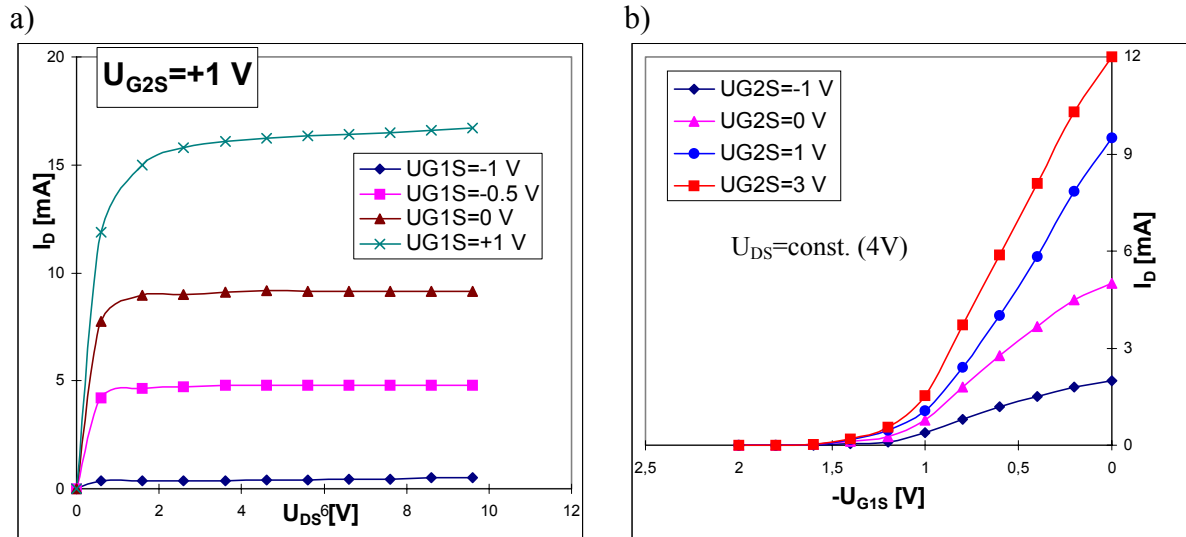
Należy zauważyć, że w obydwu przypadkach, zależność prądu drenu od napięcia sterującego U_{GS} jest kwadratowa, tzn. charakterystyka przejściowa jest fragmentem paraboli.

Przekroczenie dopuszczalnych napięć $U_{GS \max}$ lub $U_{DS \max}$ powoduje wystąpienie przebicia. W złączowych tranzystorach unipolarnych przebicie występuje 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 trwałe uszkodzenie tranzystora.

Charakterystyki przejściowe tranzystorów unipolarnych obrazują zależności prądu drenu od napięcia polaryzującego bramkę w zakresie nasycenia prądu drenu. Charakterystyki te wykazują niewielką zależność od napięcia U_{DS} . Na rysunkach 7b i 8b przedstawiono charakterystyki przejściowe omówionych tranzystorów MOSFET.

Tranzystory unipolarne złączowy i MOSFET ze zubożanym kanałem (normalnie załączony) – zazwyczaj używane są w układach wzmacniających. Tranzystory z izolowaną bramką z kanałem wzbogacanym (normalnie wyłączony) stosuje się głównie w układach przełączających oraz wzmacniaczach mocy.

Na Rys.9 pokazano charakterystyki tranzystora MOSFET (norm. zał.) z podwójną bramką.



Rys. 9. Charakterystyka wyjściowa (a) i przejściowa (b) tranzystora MOSFET z podwójną bramką i kanałem zubożanym typu n.

3. Parametry i model zastępczy tranzystorów unipolarnych dla małych sygnałów prądu zmiennego

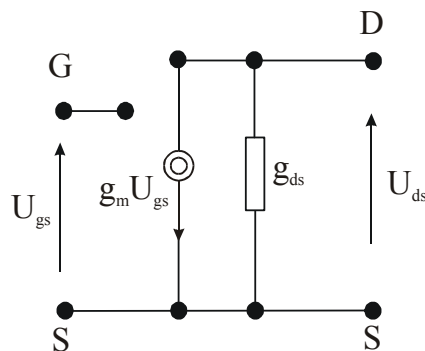
Z omówionymi charakterystykami wiążą się parametry dynamiczne tranzystorów unipolarnych. W zakresie małych częstotliwości prądu zmiennego dla małych amplitud sygnału definiuje się konduktancję przejściową g_m i konduktancję wyjściową g_{ds} :

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

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

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 (punkt pracy).

Na podstawie tych parametrów można przedstawić uproszczony schemat zastępczy tranzystora polowego dla zakresu małych częstotliwości (rys. 10).



Rys. 10. Schemat zastępczy tranzystora unipolarnego dla zakresu 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

V. Pomiary

Uwaga: Przed przystąpieniem do pomiarów sprawdzić typ (rodzaj kanału) tranzystora i dobrać odpowiednią polaryzację elektrod.

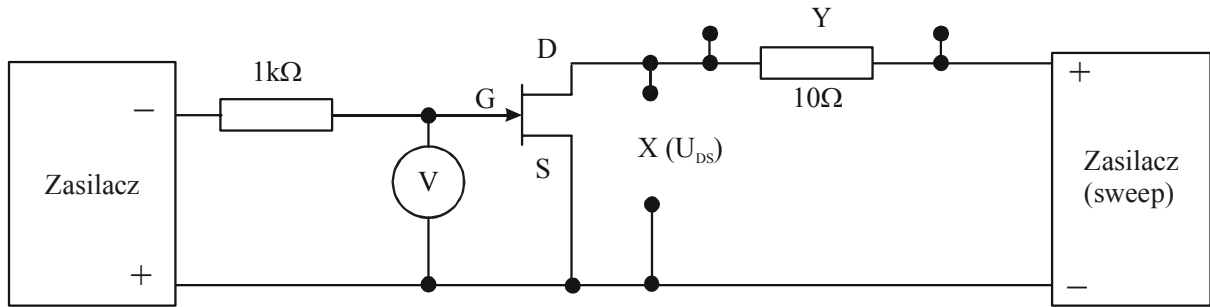
1. Pomiar charakterystyki $I_D=f(U_{DS})$, dla kilku napięć U_{GS} , dla tranzystora JFET.
2. Pomiar charakterystyki $I_D=f(U_{DS})$, dla kilku napięć U_{GS} dla tranzystora MOSFET.
3. Pomiar charakterystyk przejściowych $I_D=f(U_{GS})$ dla powyższych tranzystorów

Uwaga:

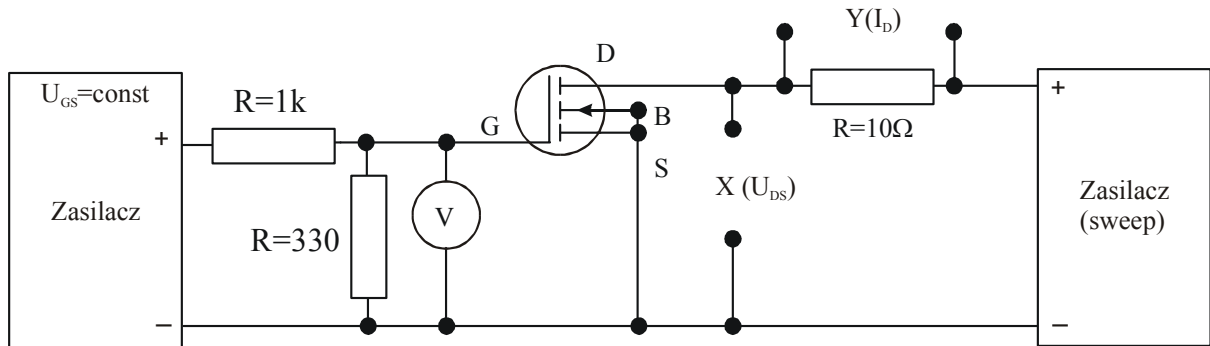
Jeżeli brak czasu nie pozwoli na dokończenie tego pomiaru należy charakterystyki przejściowe wykreślić na podstawie zmierzonych charakterystyk wyjściowych.

4. Pomiar charakterystyki $I_D=f(U_{DS})$ dla kilku napięć U_{G1S} przy zadanej przez prowadzącego wartości napięcia U_{G2S} tranzystora MOSFET z podwójną bramką (w miarę dostępnego czasu)
5. Z charakterystyk odczytać lub wyznaczyć następujące parametry tranzystorów:
 - I_{DSS} , U_p dla JFETa oraz U_T , dla MOSFETa
 - g_m oraz g_{ds} w punkcie pracy, dla zakresu nasyconych charakterystyk wyjściowych
 - $G_{DS}=I_D/U_{DS}$ - konduktancję kanału otwartego (zakres liniowy charakterystyk) dla ustalonego napięcia U_{GS} (prądu I_D).
6. Dokonać porównania obliczonych parametrów dla zmierzonych tranzystorów JFET i MOSFET z ich parametrami katalogowymi.

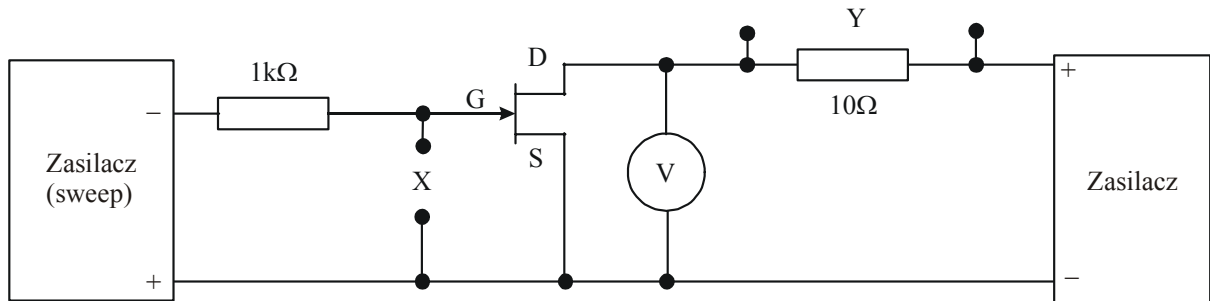
Układy pomiarowe z wykorzystaniem rejestratora X-Y przedstawione są na rys. 11-16.



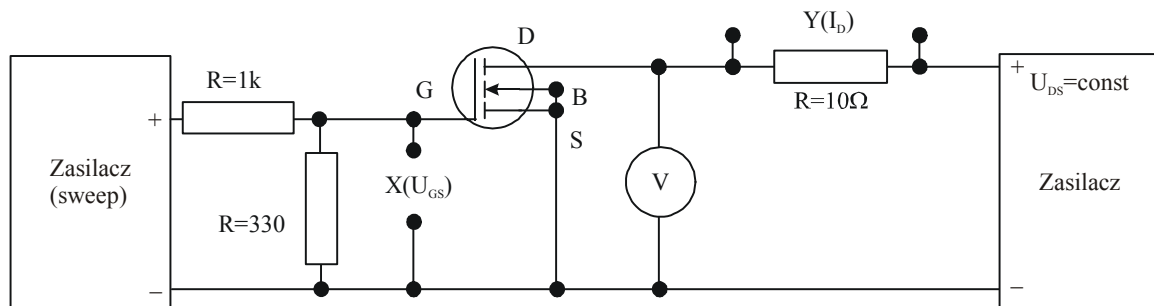
Rys. 11. Układ do pomiaru charakterystyki wyjściowej tranzystora unipolarnego złączonego z wykorzystaniem rejestratora X-Y.



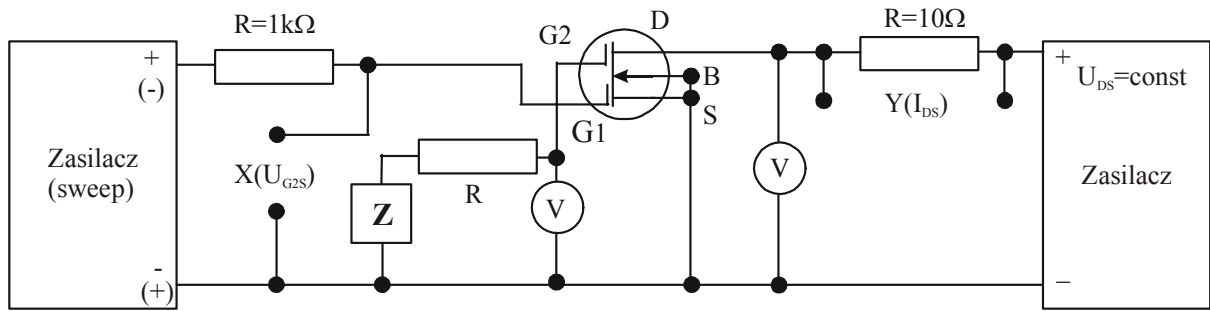
Rys. 12. Schemat układu do pomiaru charakterystyki wyjściowej tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką z wykorzystaniem rejestratora X-Y.



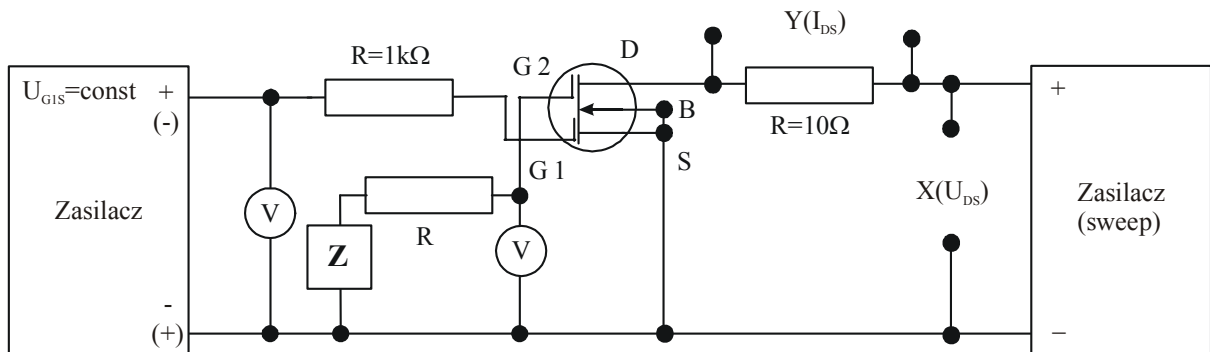
Rys. 13. Układ do pomiaru charakterystyki przejściowej tranzystora unipolarnego złączonego.



Rys. 14. Układ do pomiaru charakterystyki przejściowej tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką.



Rys. 15. Układ do pomiaru charakterystyk przejściowych tranzystora unipolarnego z podwójną bramką.



Rys. 16. Układ do pomiaru charakterystyk wyjściowych tranzystora unipolarnego z podwójną bramką.