

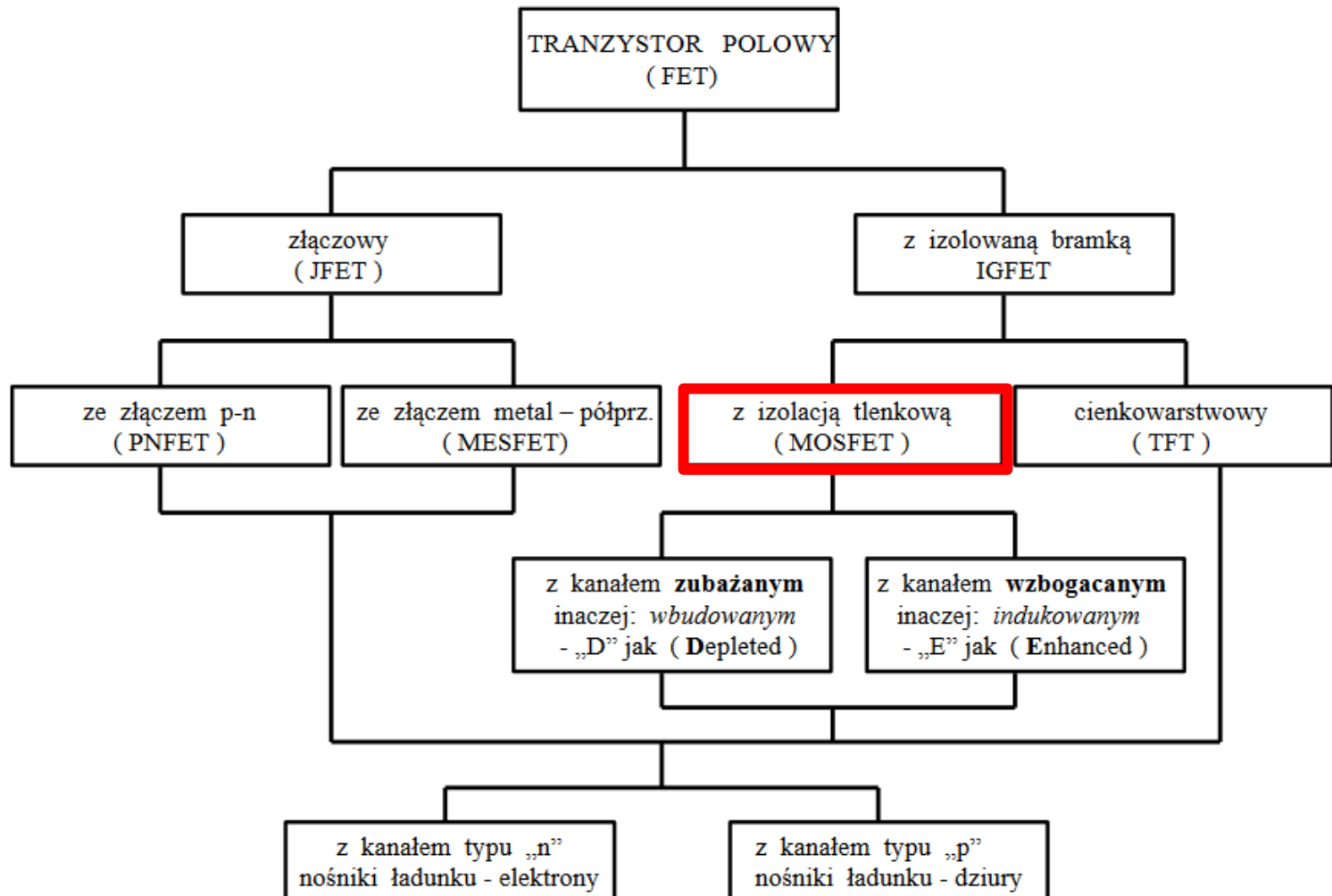
Ćw. 12

Click to add Text

Badanie tranzystorów polowych MOSFET

Klasyfikacja tranzystorów

MOSFET-tranzystor polowy z izolowaną bramką (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)



Tranzystor polowy

Click to add Text

- 1 rodzaj nośników w kanale!
- 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**.

Elektrody (końcówki) tranzystorów polowych to:

- Źródło (Source), oznaczone literą **S**, jest elektrodą, z której wyphywają nośniki ładunku do kanału.
- Dren (Drain), oznaczony literą **D**, jest elektrodą, do której wphywają („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 (prąd stały) praktycznie nie płynie ($I_G=0$)

Tranzystor polowy

Click to add Text

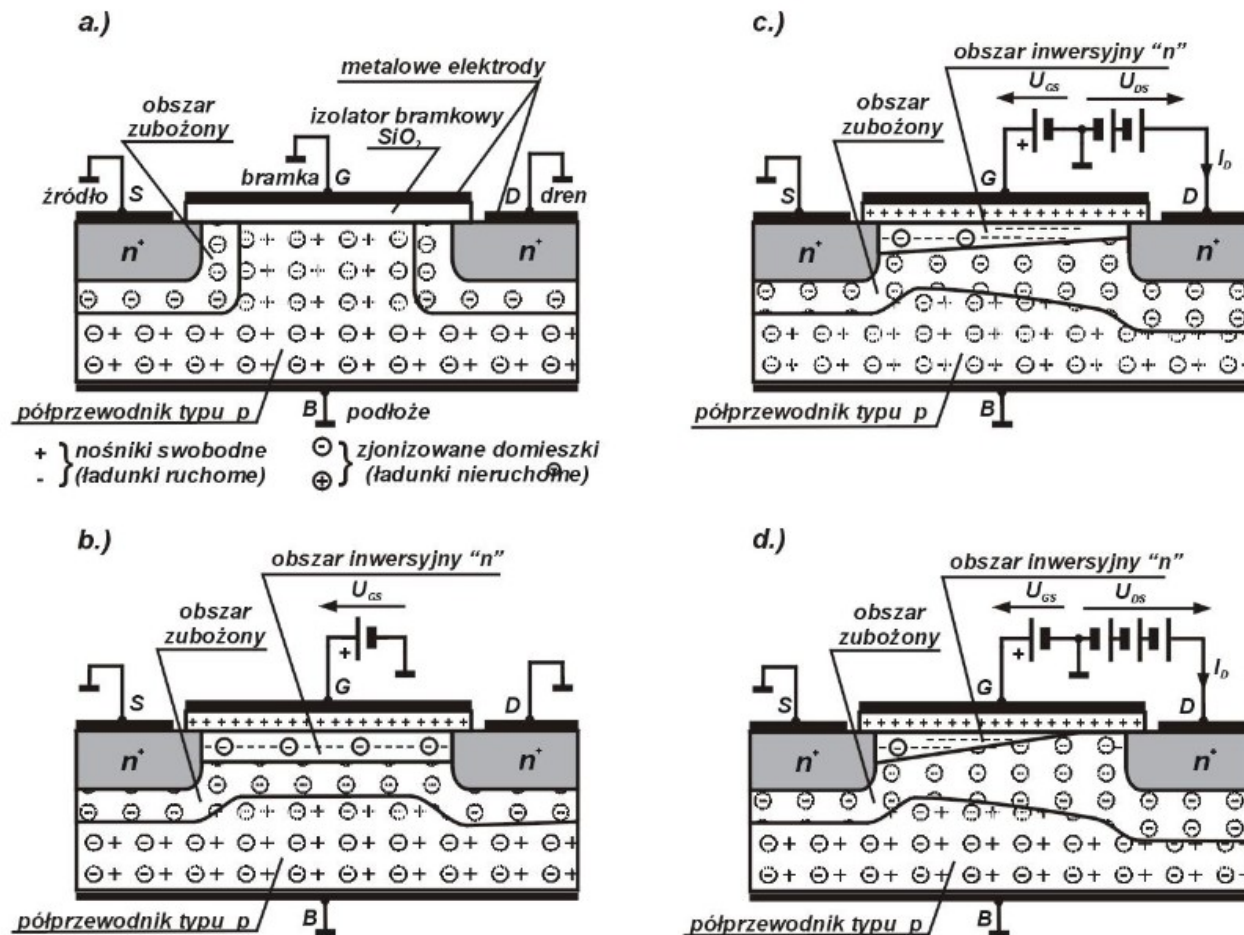
Konstrukcje tranzystorów MOSFET zgodnie z klasyfikacją, przedstawioną na rys.1. można podzielić na dwie grupy:

- ✓ 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 zubażanym 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).

Tranzystor polowy

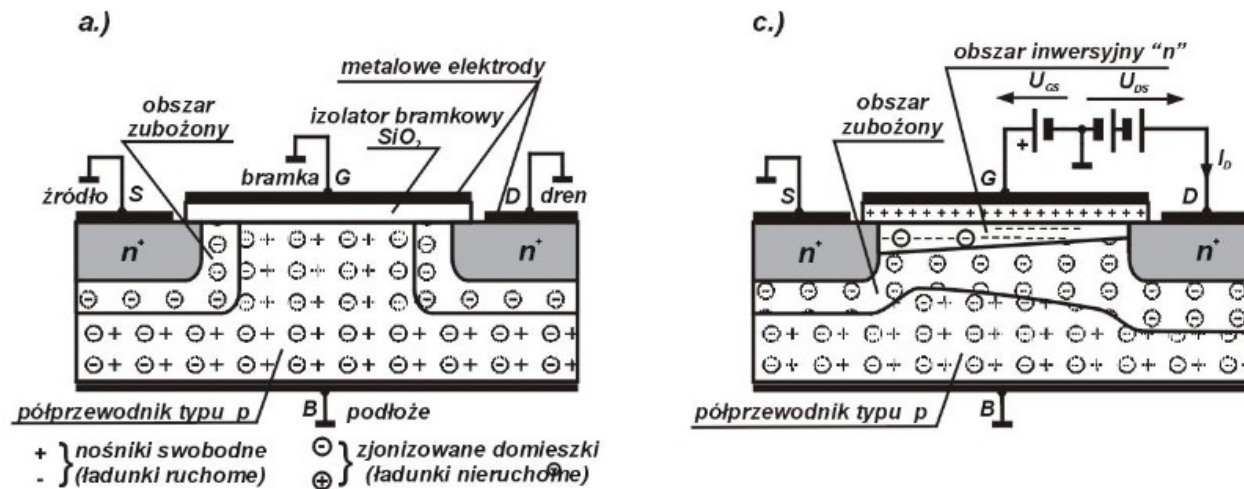
E-MOSFET – kanał indukowany (wzbogacany)



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

Tranzystor polowy

Click to add Text

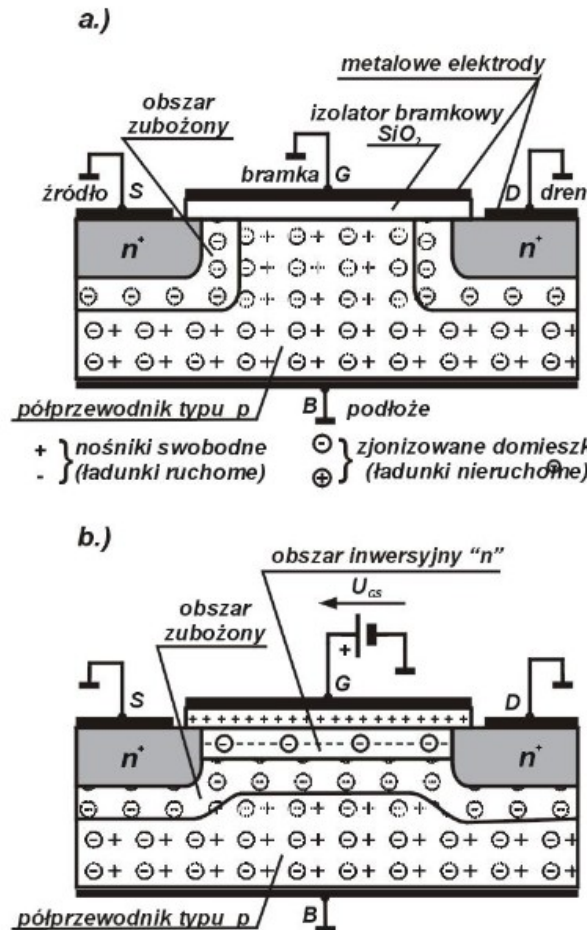


Rys.a obrazuje sytuację, **gdy polaryzacja drenu i bramki jest zerowa** ($U_{DS}=0$

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**.

Tranzystor polowy

Click to add Text



Rys. b pokazano sytuację, gdy **bramka spolaryzowana jest dostatecznie dużym napięciem $U_{GS} > 0$** tak, aby **umożliwić przepływ prądu drenu**.

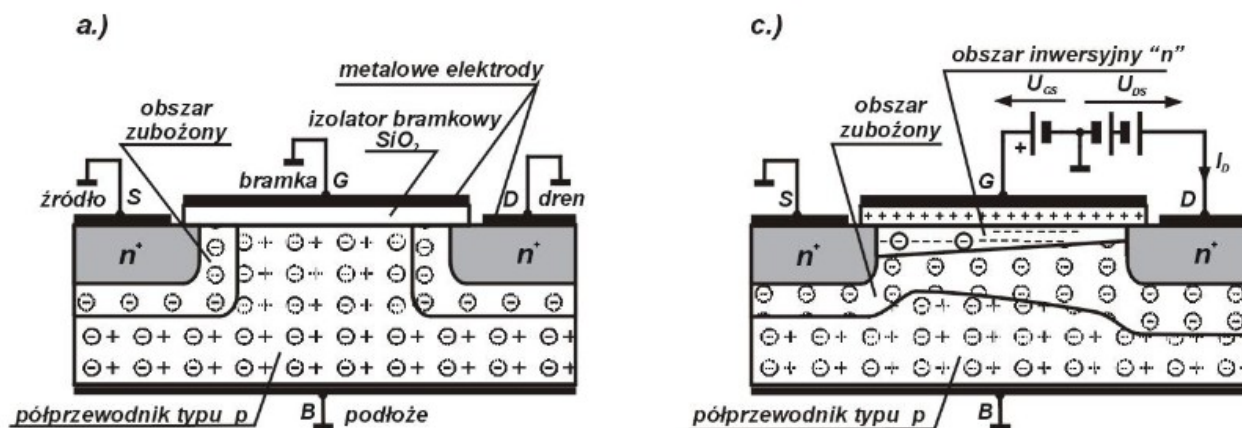
Dodatni ładunek tak spolaryzowanej bramki indukuje pod powierzchnią izolatora (SiO_2) ładunek przestrzenny, który składa się z przyciągniętych polem elektrycznym bramki **elektronów** (tzw. warstwa inwersyjna) i głębiej położonej warstwy ładunku przestrzennego **jonów akceptorowych**, z której tym samym 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))**

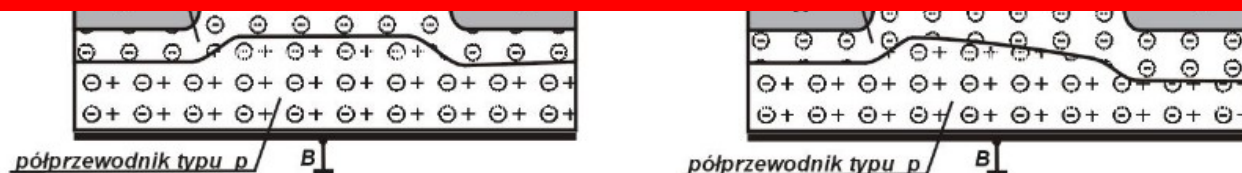
Rys.2 Przekroje uproszczonej struktury tranzystora E-MOSFET z indukowanym kanałem typu n w warunkach różnej polaryzacji. Objaśnienia w tekście.

Tranzystor polowy

Click to add Text



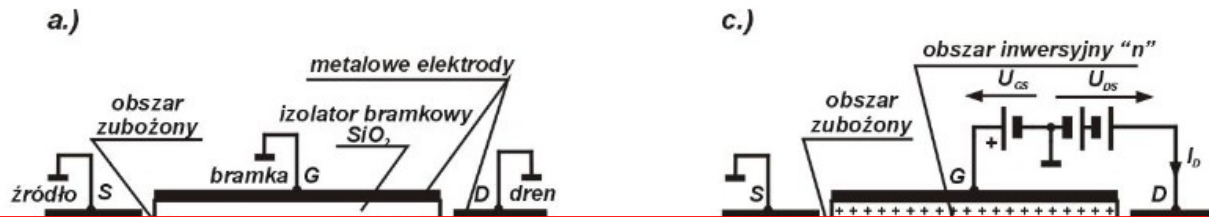
Przewodność tego połączenia elektrycznego (kanału) **zależy od koncentracji elektronów w indukowanym kanale**, a więc **przede wszystkim od napięcia U_{GS}** . Jeżeli teraz zostanie **podwyższony potencjał drenu, $U_{DS} > 0$** (tak jak pokazano na Rys.2c), to popłynie **prąd drenu I_D tym większy im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



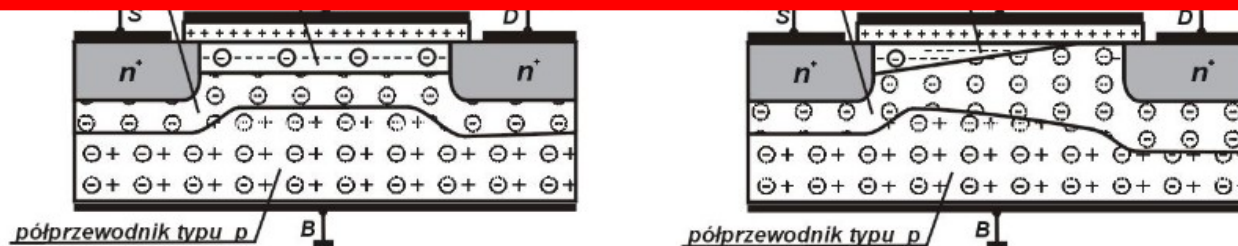
Rys.2 Przekroje uproszczonej struktury tranzystora E-MOSFET z indukowanym kanałem typu n w warunkach różnej polaryzacji. Objaśnienia w tekście.

Tranzystor polowy

Click to add Text



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.**



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

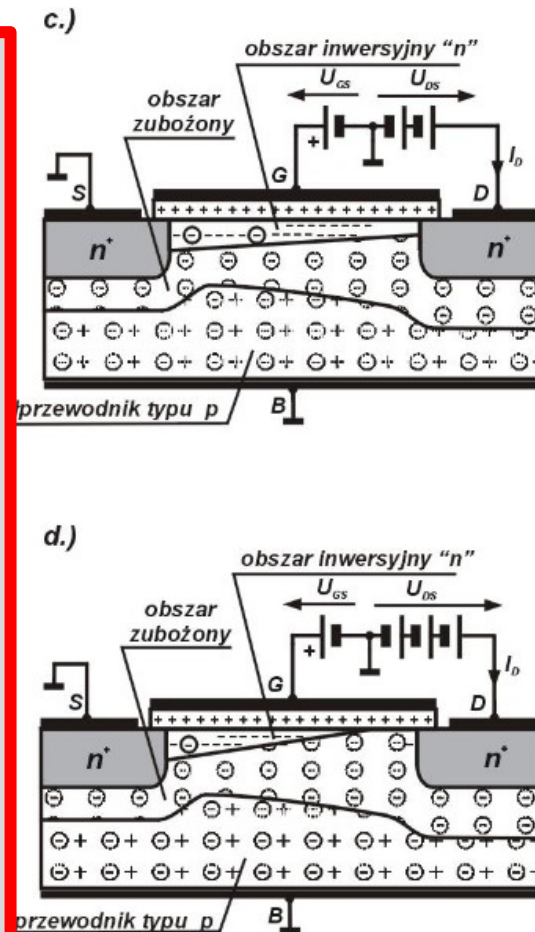
Tranzystor polowy

Click to add Text

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 .**



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

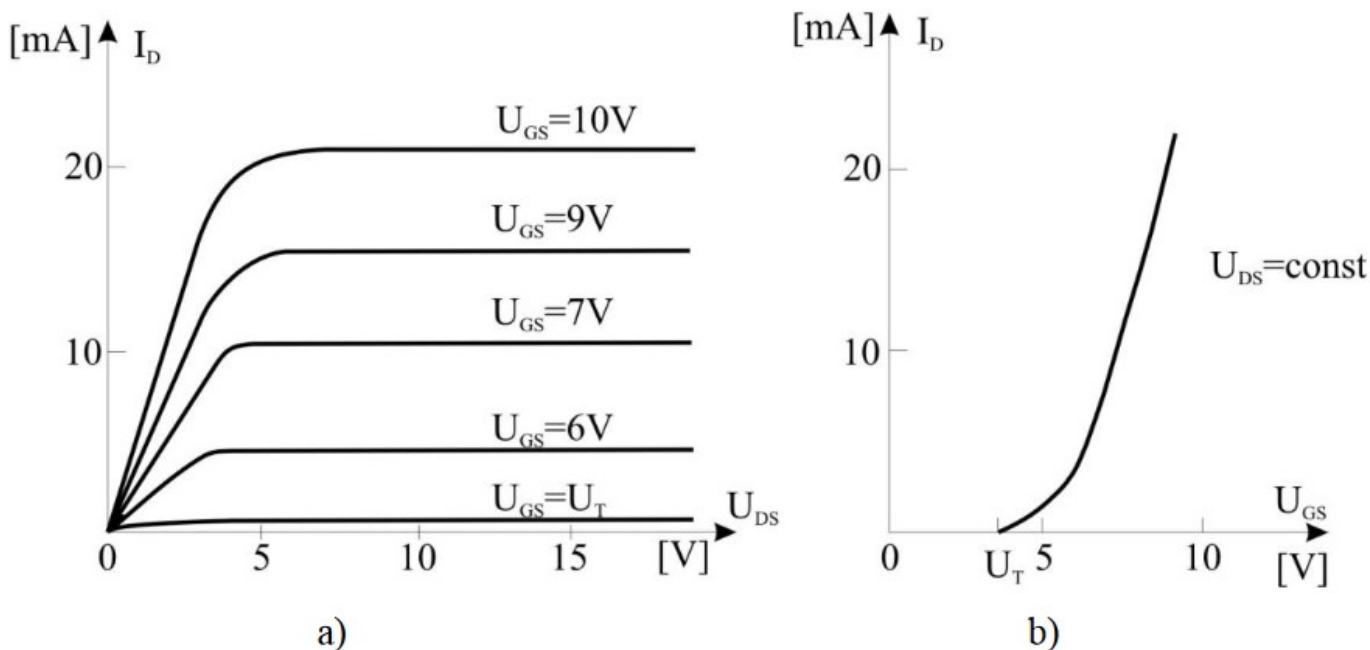
Charakterystyki statyczne

Kanał wzbogaczony typu n

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 wzbogaczonym pokazano na rys.3, a z kanałem zubożanym – na rys.4.



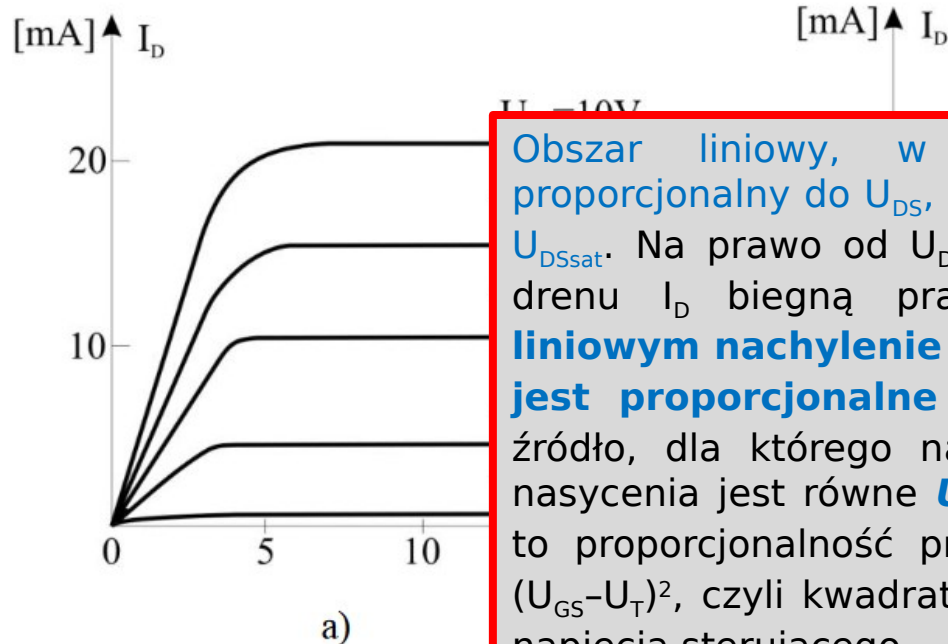
Rys.3 Charakterystyki: a) wyjściowe i b) przejściowa tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką i kanałem wzbogaczonym typu n .

Charakterystyki

sta

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}** .

w 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.**

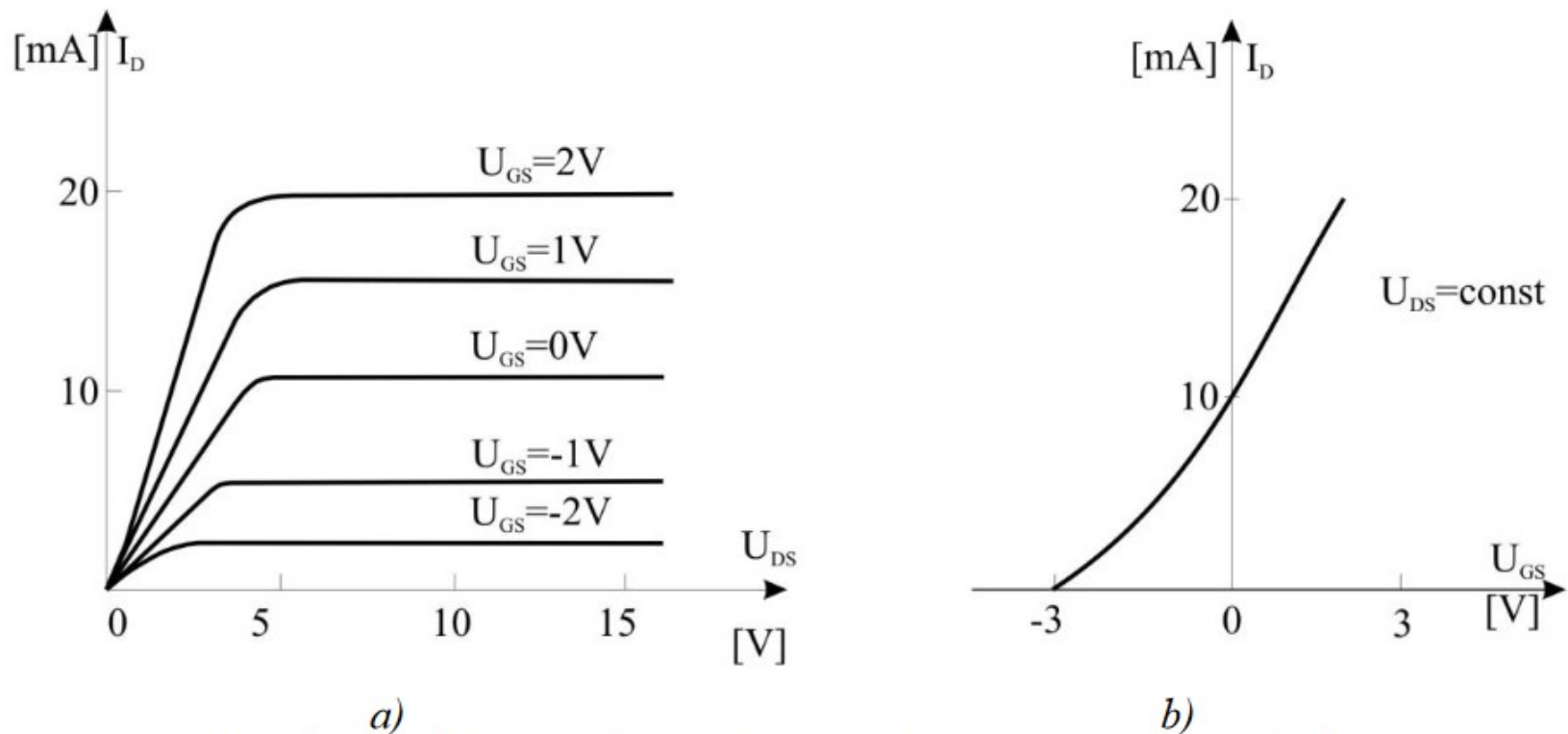


Obszar liniowy, w którym prąd drenu jest proporcjonalny do U_{DS} , rozciąga się od $U_{DS}=0V$ do $U_{DS}=U_{DSsat}$. Na prawo od $U_{DS}=U_{DSsat}$ charakterystyki prądu drenu I_D biegną prawie poziomo. **W liniowym nachylenie charakterystyki, czyli I_D/U_{DS} , jest proporcjonalne do $(U_{GS}-U_T)$** . 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.

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

Charakterystyki statyczne

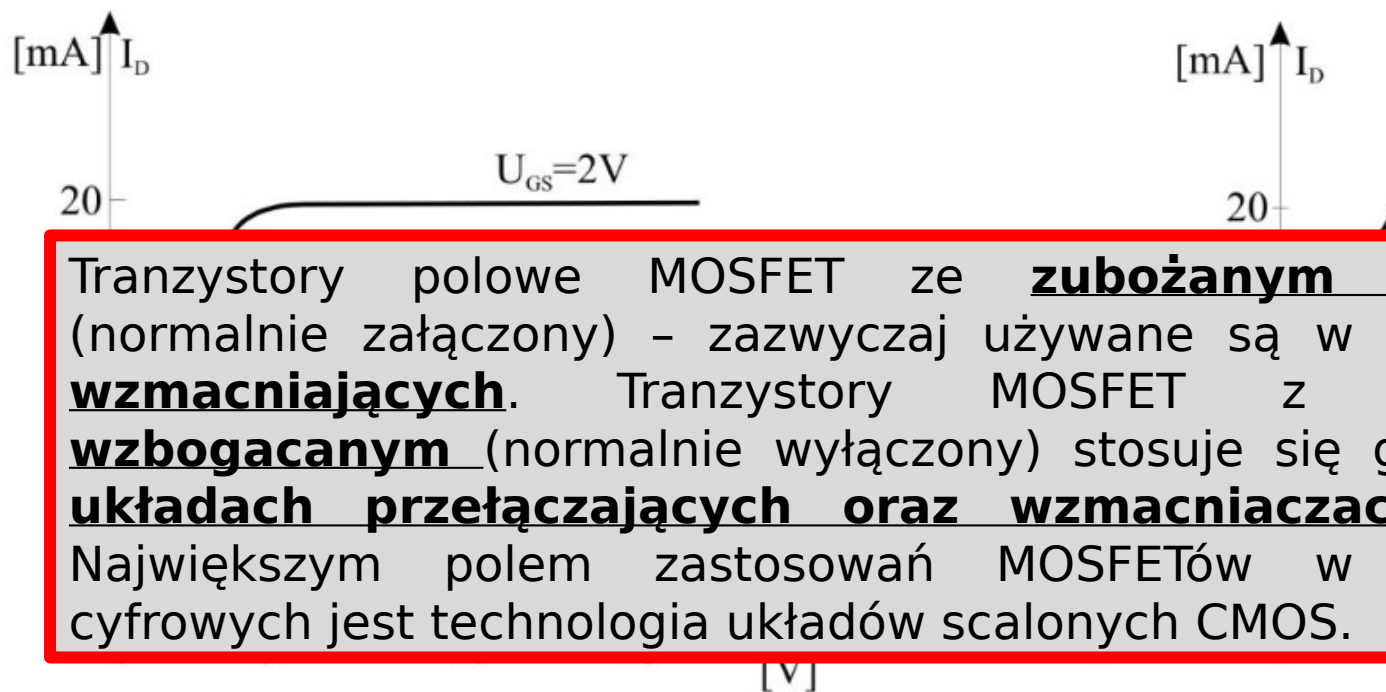
Kanał zubożony typu n



Rys.4 Charakterystyki: a) wyjściowe i b) przejściowa tranzystora unipolarnego z izolowaną bramką i **kanalem zubożanym typu n**

Charakterystyki statyczne

Click to add Text



a)

b)

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

Parametry małosygnałowe

Click to add Text

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} :

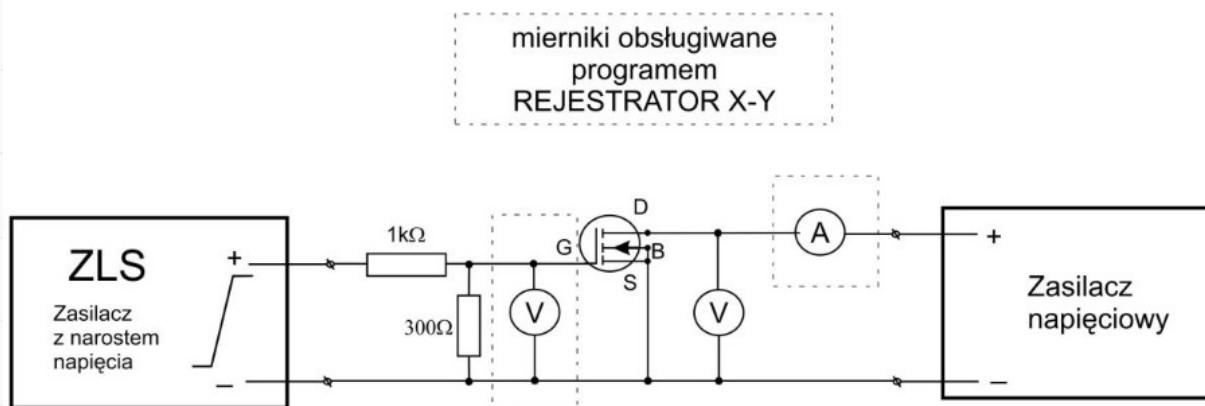
$$g_m = \frac{di_d}{du_{gs}} \quad \text{dla} \quad U_{DS} = const$$

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

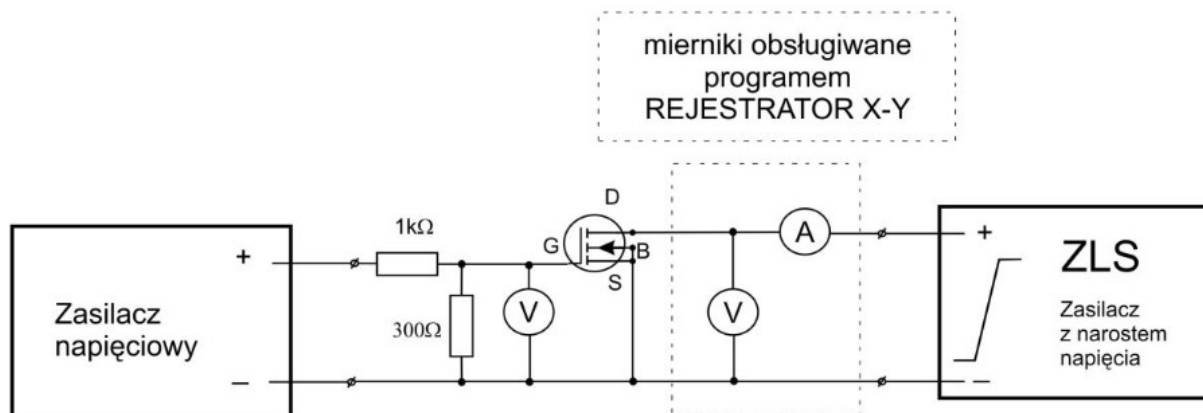
Wartości parametrów **g_m** oraz **g_{ds}** zależą od warunków polaryzacji, tzn. od **wartości stałego napięcia bramka -źródło U_{GS}** i wartości **prądu drenu I_D** (punktu pracy) oraz **napięcia U_{DS}** .

Pomiary

Click to add Text



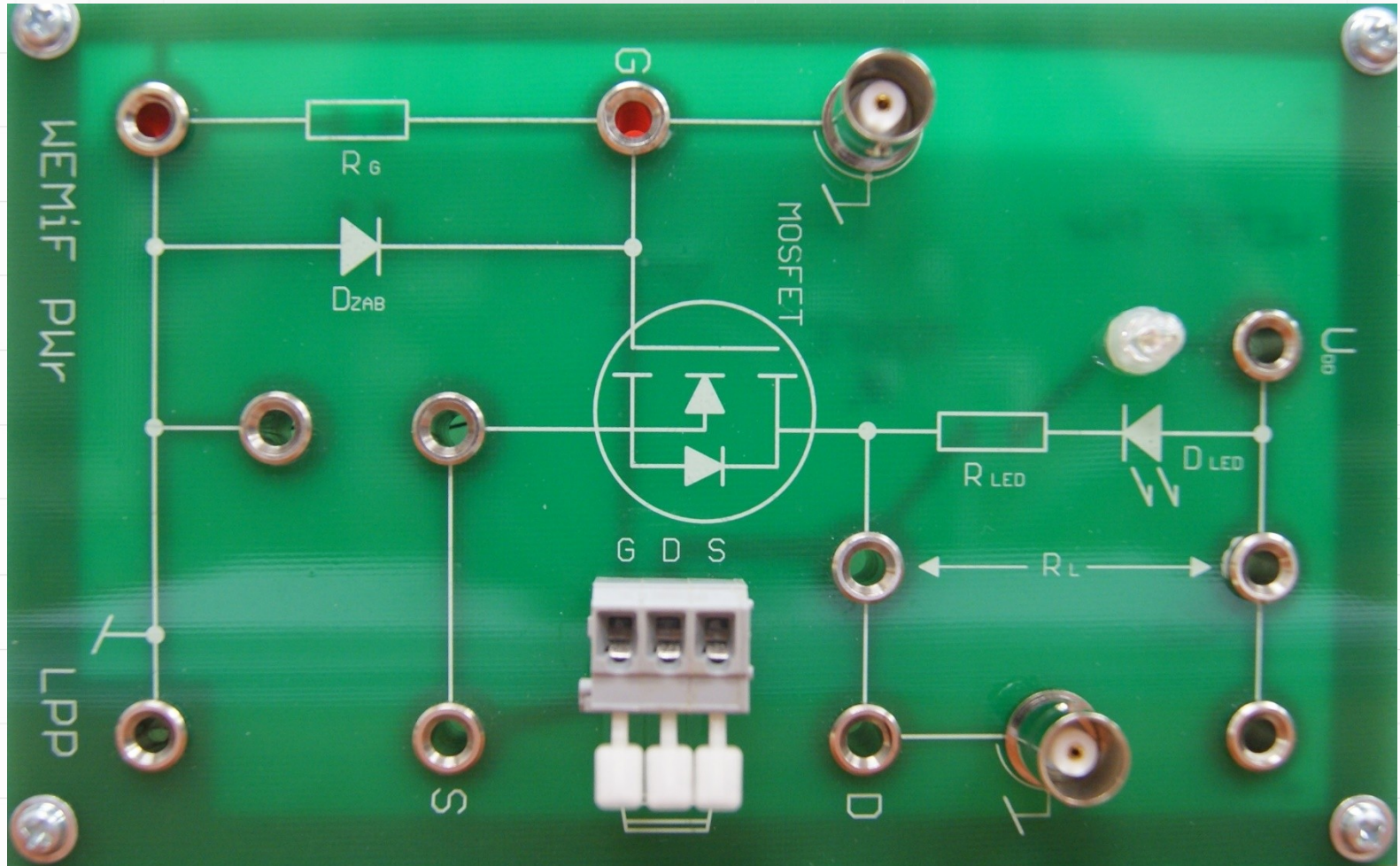
Rys. 7 Schemat układu do pomiaru charakterystyki przejściowej tranzystora MOSFET normalnie wyłączzonego z kanałem typu n.

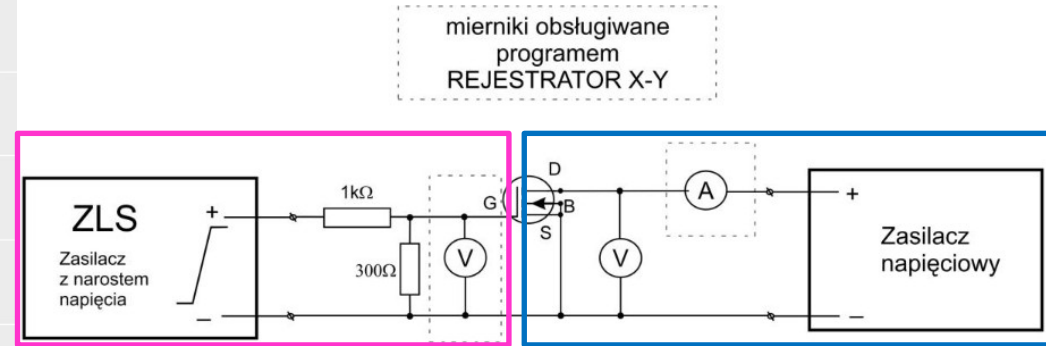


Rys. 8 Schemat układu do pomiaru charakterystyk wyjściowych tranzystora MOSFET normalnie wyłączzonego z kanałem typu n.

Pomiary

Click to add Text





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

Charakterystyka przejściowa

Kolor czerwony = czerwony kabelek

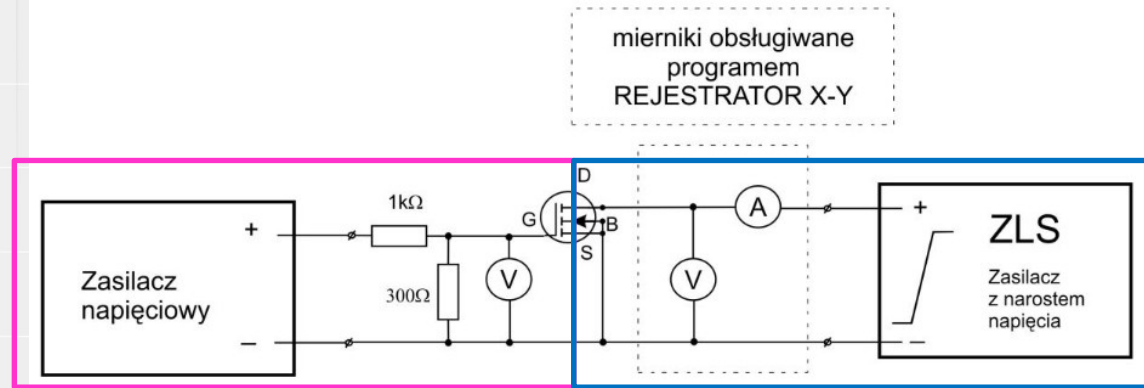
Kolor czarny = czarny kabelek

I obwód – zasilacz rejestrator (ograniczenie 25 mA) → 0 – 16 V

1. Z + zasilacza na 1 kΩ
2. Z 1 kΩ na bramkę (Gate)
3. Z – zasilacza na źródło (Source)
4. Z rezystora 330 Ω na źródło
5. + woltomierza (od rejestratora U_{GS}) na bramkę (Gate)
6. – woltomierza (od rejestratora – U_{GS}) na źródło (Source)

II obwód – zasilacz dolny (ograniczenie 100 mA) – $U_{DS} = 5 V$

7. Z + zasilacza na amperomierz (od rejestratora I_D) (czerwone wejście)
8. Z amperomierza na dren (Drain)
9. Z – zasilacza na źródło (Source)
10. + woltomierza U_{DS} (dolny) na dren (Drain)
11. – woltomierza U_{DS} (dolny) na źródło (Source)



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

Charakterystyka wyjściowa

I obwód – zasilacz dolny (ograniczenie 20 mA) - U_{GS} - 5 różnych wartości

1. Z + zasilacza na 1 kΩ
2. Z 1 kΩ na bramkę (Gate)
3. Z – zasilacza na źródło (Source)
4. Z rezystora 330 Ω na źródło
5. + woltomierza (DOLNY U_{GS}) na bramkę (Gate)
6. – woltomierza (DOLNY - U_{GS}) na źródło (Source)

II obwód – zasilacz rejestrator (ograniczenie 100 mA) - 0 – 10 V

7. Z + zasilacza na amperomierz (od rejestratora I_D) (czerwone wejście)
8. Z amperomierza na dren (Drain)
9. Z – zasilacza na źródło (Source)
10. + woltomierza U_{DS} (rejestrator) na dren (Drain)
11. - woltomierza U_{DS} (rejestrator) na źródło (Source)

Pytania na kartkówkę

Click to add Text

Charakterystyki statyczne (wyjściowe i przejściowe) tranzystorów MOSFET (kanał zubażany i wzbogacany typu n)

Wyjaśnij skrót MOSFET

Opis elektron – dren, źródło i bramka