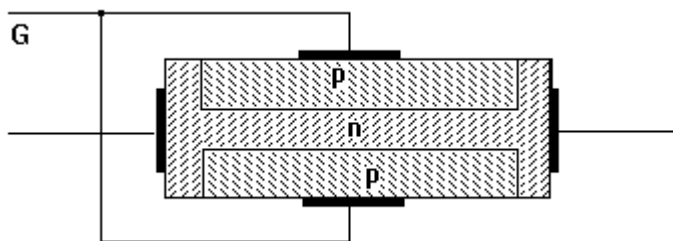


Tranzystory polowe

Tranzystory polowe dzielą się na tranzystory polowe złączone oraz tranzystory polowe z izolowaną bramką.

Tranzystor polowy złączony, określany też skrótem FET (field effect transistor) stanowi płytka półprzewodnika, w której zostały wytworzone trzy warstwy: warstwa środkowa o określonym typie przewodnictwa (może być typu p albo typu n) oraz dwie warstwy zewnętrzne o typie przewodnictwa przeciwnym w stosunku do typu przewodnictwa warstwy środkowej (rys. 1). Określony typ przewodnictwa półprzewodnika uzyskuje się przez domieszkowanie czystego materiału półprzewodnika (zwykle krzemu) atomami pierwiastków z grupy trzeciej (dają one przewodnictwo typu p) albo z grupy piątej (dają one przewodnictwo typu n).



Rys. 1. Budowa tranzystora polowego złączonego.

Warstwa środkowa nazywa się kanałem. Na obu końcach tej warstwy znajdują się doprowadzenia, dzięki którym można przepuszczać prąd elektryczny przez kanał. Warstwy zewnętrzne (na rys. 1 są to warstwy typu p) także posiadają doprowadzenia elektryczne. Doprowadzenia warstw zewnętrznych są ze sobą połączone. Ich wspólne wyprowadzenie jest nazywane bramką i oznaczane jest literą G (od słowa „gate”).

Jak widzimy, w tranzystorze polowym złączonym istnieją dwa złącza p-n. Cechą charakterystyczną złącza p-n jest istnienie po obu jego stronach obszaru pozbawionego swobodnych nośników prądu elektrycznego. Obszar taki nie przewodzi prądu. Szerokość tego obszaru zależy od napięcia pomiędzy warstwami p i n. Im większe jest napięcie polaryzujące złącze p-n w kierunku zaporowym, tym większa jest szerokość obszaru pozbawionego nośników. Zmieniając napięcie przyłożone pomiędzy bramką a kanał w tranzystorze polowym, wpływamy na szerokość obszaru pozbawionego nośników w kanale tranzystora. Im większą wartość ma napięcie polaryzujące zaporowo złącza p-n, tym szerokość warstwy przewodzącej w kanale jest mniejsza, a tym samym opór kanału jest większy.

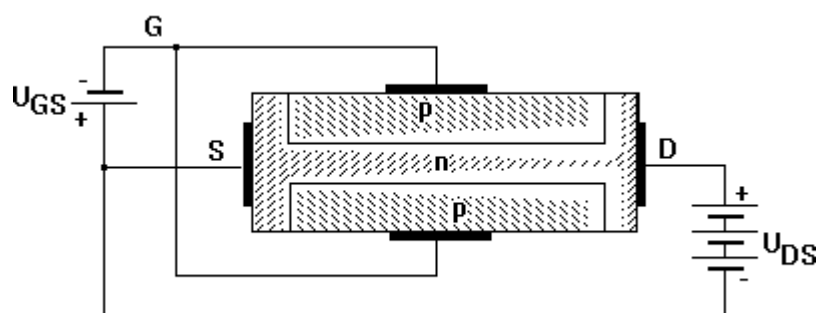
Dla tranzystora zbudowanego zgodnie z rys. 1 złącza p-n są spolaryzowane zaporowo, gdy potencjał bramki jest niższy, niż potencjał kana-

łu. Im bardziej ujemnie będzie spolaryzowana bramka, tym węższy będzie kanał, a jego opór - oczywiście - większy.

Dla tranzystora posiadającego kanał typu p wzrost oporu kanału będzie następował przy polaryzacji bramki w kierunku dodatnim. Jeżeli między doprowadzenia kanału dołączymy źródło napięcia, przez kanał będzie płynął prąd elektryczny. Wartość natężenia tego prądu można zmieniać, zmieniając wartość napięcia przyłożonego między bramkę a jedno z doprowadzeń kanału.

Na rys. 2 zostały pokazane dwa źródła napięć przyłożonych do elektrod tranzystora polowego. Wyprowadzenie S nazywa się "źródłem" (stąd oznaczenie "S" - source), wyprowadzenie D nazywa się drenem (drain). To, które wyprowadzenie jest źródłem a które jest drenem zależy od tego, jak przyłączymy do wyprowadzeń kanału źródło napięcia U_1 . Istnieją typy tranzystorów polowych, w których nie ma znaczenia, które wyprowadzenie kanału pełni rolę źródła a które drenu. Ale istnieją też tranzystory polowe niesymetryczne, których własności bardzo zależą od "kierunku" przyłączenia źródła napięcia do wyprowadzeń kanału; wtedy należy użytkować tranzystor zgodnie z oznaczeniami podanymi przez wytwórcę.

Pomiędzy oba doprowadzenia kanału (rys. 2) zostało włączone źródło napięcia U_{DS} . Pomiędzy bramkę a jedno z doprowadzeń kanału zostało włączone źródło napięcia U_{GS} . Złącza p-n są spolaryzowane zaporowo. Przy doprowadzeniu S napięcie zaporowe pomiędzy bramką a kanałem jest bliskie wartości U_{GS} . Przy doprowadzeniu D napięcie zaporowe pomiędzy bramką a kanałem jest większe - jest bliskie wartości $U_{GS}+U_{DS}$. Oznacza to, że przy doprowadzeniu D szerokość warstw pozbawionej nośników elektrycznych jest największa. Tutaj też będzie niewielka szerokość warstwy przewodzącej kanału. W pobliżu doprowadzenia D prąd płynie przez wąski obszar przewodzący, tzw. dren (dlatego też prąd płynący przez kanał tranzystora polowego nosi nazwę prądu drenu). Na rys. 2 obszary, w których istnieją swobodne nośniki prądu elektrycznego zostały zaznaczone przez zakreskowanie. Obszar czysty na rysunku, to obszar pozbawiony swobodnych nośników elektrycznych.



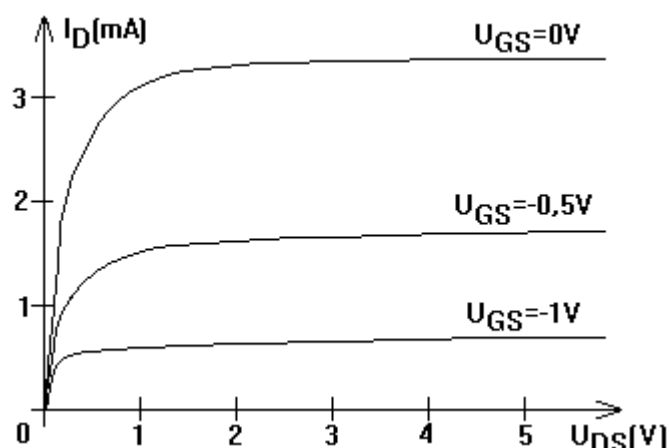
Rys.2. Polaryzacja elektrod tranzystora polowego złączowego o kanale n.

Zwiększając wartość zaporowego napięcia U_{GS} można spowodować, że natężenie prądu drenu zupełnie zaniknie. Wartość napięcia U_{GS} , dla której zanika natężenie prądu drenu nosi nazwę napięcia odcięcia. Będziemy ją oznaczać symbolem $U_{GS_{odc}}$.

Ciekawie wygląda zależność natężenia prądu drenu od napięcia U_{DS} . Załóżmy, że przy ustalonej wartości napięcia U_{GS} , mniejszej od $U_{GS_{odc}}$, zwiększamy, poczynając od wartości zero, wartość napięcia U_{DS} . Na początku natężenie prądu drenu praktycznie liniowo zależy od wartości napięcia U_{DS} ; główną rolę we wzroście natężenia prądu drenu gra tutaj prawo Ohma. Gdy wartość napięcia U_{DS} wzrasta, szerokość kanału maleje, najbardziej w pobliżu drenu. Opór kanału wzrasta i im większą wartość ma napięcie U_{DS} , tym - dla takich samych przyrostów napięcia U_{DS} - przyrosty natężenia prądu są mniejsze. Coraz większą rolę gra zwążanie kanału. Gdy napięcie pomiędzy drenem a bramką osiąga wartość $U_{GS_{odc}}$, to - wydawałoby się - kanał przy drenie powinien się zamknąć i natężenie prądu drenu powinno najpierw zacząć maleć, by w momencie zamknięcia kanału spaść do zera. Przy stosunkowo dużej wartości napięcia U_{DS} kanał powinien być zamknięty prawie na całej jego długości. Jednak nic takiego się nie dzieje. Natężenie prądu drenu osiąga pewną wartość i podczas dalszego wzrostu wartości napięcia U_{DS} praktycznie wartość tę zachowuje. Obrazowo mówi się, że w kanale tworzy się wąska szczelina (dren), przewodząca prąd elektryczny. Natężenie prądu drenu zanika tylko wtedy, gdy nastąpi zamknięcie kanału przy źródle. Wtedy - oczywiście - następuje zamknięcie kanału na całej jego długości. Niezwykłe zachowanie się kanału podczas przekraczania przez napięcie pomiędzy drenem a bramką wartości $U_{GS_{odc}}$ tłumaczy się złożonymi procesami związanymi z występowaniem silnego natężenia pola elektrycznego w kryształach, na którym zbudowany jest tranzystor.

Niezależność (dokładniej: niewielka zależność) natężenia prądu drenu od napięcia między źródłem a drenem dla wyższych wartości tego napięcia jest zaletą tranzystora polowego, podobnie jak w tranzystorze bipolarnym niezależność prądu kolektora od napięcia pomiędzy kolektorem i emiterem lub też niezależność prądu anodowego od napięcia anodowego w pentodzie.

Rysunek 3 przedstawia przykładowe zależności natężenia prądu drenu od napięcia pomiędzy drenem a źródłem dla kilku różnych wartości napięcia pomiędzy bramką a źródłem.

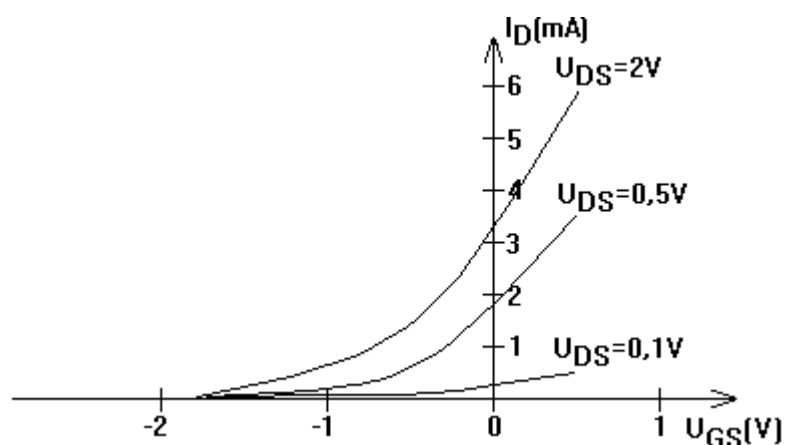


Rys. 3. Zależność natężenia prądu drenu od napięcia U_{DS} dla różnych wartości napięcia U_{GS} .

Jeżeli bramkę tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n spolaryzować dodatnio w stosunku do kanału, to złącza p-n w tranzystorze zostaną spolaryzowane w kierunku przewodzenia i obszary pozbawione nośników elektrycznych będą węższe a tym samym opór kanału będzie mniejszy w porównaniu z przypadkiem, gdy potencjały bramki i źródła (dokładnie chodzi o potencjały odpowiednich metalowych wyprowadzeń) są sobie równe.

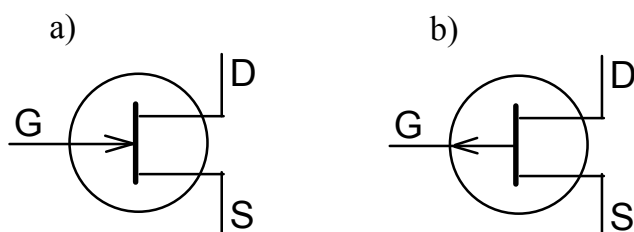
Tranzystor krzemowy z kanałem n pracuje jeszcze prawidłowo, gdy potencjał bramki jest wyższy o 0,6V od potencjału źródła. Dalsze zwiększanie potencjału bramki wywołuje szybki wzrost prądu płynącego przez złącza p-n. Opór między bramką a kanałem gwałtownie maleje. W tych warunkach zanikają właściwości wzmacniające tranzystora.

Rysunek 4 przedstawia przykładowe zależności natężenia prądu drenu od napięcia między bramką a źródłem (U_{GS}) dla kilku różnych wartości napięcia między drenem a źródłem (U_{DS}).



Rys.4. Zależność natężenia prądu drenu od napięcia U_{GS} dla różnych wartości napięcia U_{DS} .

Ważną cechą tranzystorów polowych jest duży opór wejściowy (rzędu $10^9 \Omega$ dla prądu stałego) w przypadku wykorzystania bramki jako wejścia. Własność ta wynika z tego, że bramka jest oddzielona od kanału spolaryzowanymi zaporowo złączami p-n. W zwykłym tranzystorze, tzn w tranzystorze bipolarnym, baza, będąca odpowiednikiem bramki w tranzystorze polowym tworzy z emiterem (odpowiednik źródła) złącze p-n, które podczas pracy tranzystora musi być spolaryzowane przepustowo i przez które musi płynąć znaczący prąd. Rysunek 5 przedstawia symbole tranzystorów polowych złączowych z kanałem typu n (rys.a) oraz z kanałem typu p (rys.b).



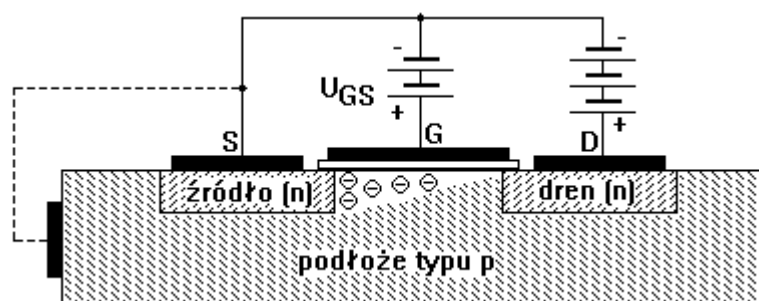
Rys. 5. Symbole tranzystorów złączowych: z kanałem typu n (rys.a) i z kanałem typu p (rys.b).

Tranzystory polowe z izolowaną bramką, noszące nazwę MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) są wytwarzane na tzw. podłożu, czyli kryształach krzemu o określonym typie przewodnictwa, uzyskanym w wyniku odpowiedniego domieszkowania czystego krzemu. Na rys. 6 została pokazana budowa tranzystora polowego z izolowaną bramką. W przypowierzchniowej warstwie podłoża są wytwarzane dwa, położone w pewnej od siebie odległości, silnie domieszkowane obszary o przeciwnym do podłoża typie przewodnictwa. Do obu tych obszarów doprowadza się przewodniki elektryczne. Jeden obszar będzie źródłem, drugi drenem tranzystora. W znajdującym się między tymi dwoma obszarami przypowierzchniowym materiale podłoża jest wytwarzany (albo tylko indukowany) kanał tranzystora. Jeśli podłoże jest typu p, to będzie to kanał typu n; jeśli podłoże jest typu n, to będzie to kanał typu p. Materiał, w którym powstaje kanał, zawiera na powierzchni cienką warstwę izolatora, którym jest dwutlenek krzemu. Na tę warstwę izolatora jest naporowana warstwa metalu, stanowiąca bramkę tranzystora. Do warstwy metalu jest doprowadzony przewodnik elektryczny.



Rys. 6. Budowa tranzystora MOSFET.

Jeśli materiał, w którym powstaje kanał, jest niezmiennym materiałem podłoża o przewodnictwie np. typu p, to po przyłożeniu dodatniego potencjału do bramki pod izolatorem zostanie wyindukowany kanał typu n. Z obszaru znajdującego się pod izolatorem odpłyną dziury i napłyną do niego (z obszaru źródła a także drenu) elektrony. Im większa będzie wartość potencjału bramki, tym będzie większa koncentracja nośników ujemnych w pobliżu bramki, tym szerszy będzie obszar wypełniony tymi nośnikami i tym mniejszy będzie opór kanału. Jeśli spolaryzujemy dodatnio bramkę i pomiędzy dren a źródło przyłączymy źródło napięcia (nazwijmy to napięcie napięciem zasilającym tranzystor - w odróżnieniu od napięcia polaryzującego bramkę tranzystora), to przez wyindukowany kanał tranzystora popłynie prąd elektryczny. Przy braku dodatniej (w naszym przypadku) polaryzacji bramki w takim tranzystorze prąd nie popłynie. Gdy pomiędzy dren a źródło jest włączone napięcie zasilające i przez kanał płynie prąd, to - podobnie jak w tranzystorze polowym złączowym - z powodu spadku potencjału wzdłuż kanału, w związku z oddziaływaniem w różnych miejscach kanału różnych wartości potencjału tegoż kanału na nośniki elektryczne, szerokość kanału jest różna w różnych miejscach: jest największa w pobliżu źródła i najmniejsza w pobliżu drenu. W tranzystorze przedstawionym na rys. 7 indukowany kanał typu n jest szeroki przy źródle i wąski przy dodatnio spolaryzowanym drenie.



Rys. 7. Polaryzacja tranzystora polowego z izolowaną bramką o indukowanym kanale typu n.

Można wytworzyć "na stałe" kanał, zmieniając także typ przewodnictwa przypowierzchniowej warstwy materiału pomiędzy źródłem a drenem, stosując słabsze, niż w obszarze źródła i drenu, domieszkowanie. Wtedy obszary źródła, kanału i drenu będą miały ten sam typ przewodnictwa. W takim tranzystorze będzie mógł płynąć prąd przez kanał także przy braku polaryzacji bramki (gdy napięcie pomiędzy źródłem a bramką wynosi zero). Odpowiednio polaryzując bramkę możemy zwiększać albo zmniejszać szerokość kanału aż do zupełnego jego zamknięcia i zupełnego zaniku przepływu prądu przez kanał.

Tranzystory zbudowane na podłożu typu n są "zwierciadlanymi" obrazami tranzystorów zbudowanych na podłożu typu p. Zmniejszając potencjał bramki w tranzystorze zbudowanym na podłożu typu p

zmniejszamy szerokość kanału a tym samym zwiększamy opór kanału, zaś zwiększając potencjał bramki, zwiększamy szerokość kanału a tym samym zmniejszamy opór kanału. W tranzystorze zbudowanym na podłożu typu n jest odwrotnie: zmniejszając w nim potencjał bramki, zwiększamy szerokość kanału a tym samym zmniejszamy opór kanału, zaś zwiększając potencjał bramki, zmniejszamy szerokość kanału a tym samym zwiększamy opór kanału.

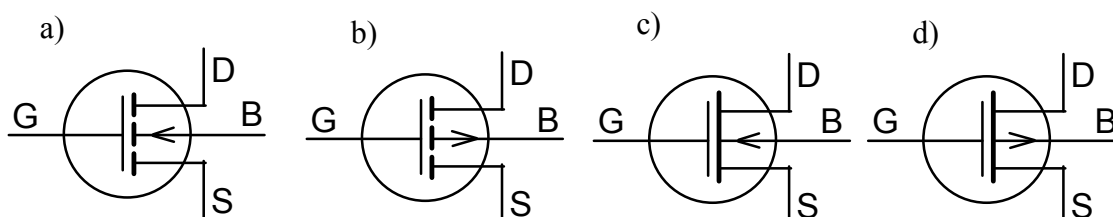
To, która elektroda staje się źródłem a która drenem, decyduje kierunek przyłączenia napięcia zasilającego tranzystor. W tranzystorach z kanałem typu n dodatnią elektrodą jest dren, ujemną jest źródło. W tranzystorach z kanałem typu p ujemną elektrodą jest dren, dodatnią jest źródło. Jeśli podłoże tranzystora MOSFET posiada swoje osobne wyprowadzenie, to albo łączymy je z wyprowadzeniem źródła albo polaryzujemy je zaporowo - w tranzystorze z kanałem typu n podłoże polaryzujemy ujemnie, w tranzystorze z kanałem typu p podłoże polaryzujemy dodatnio. Dlatego też, jeżeli podłoże jest fabrycznie połączone z którymś z wyprowadzeń, to owo wspólne wyprowadzenie należy traktować jako źródło tranzystora.

Zależność natężenia prądu kanału od napięcia pomiędzy źródłem a drenem jest podobna, jak w tranzystorze polowym złączowym.

Tranzystory polowe MOS z indukowanym kanałem, nieprzewodzące przy braku polaryzacji bramki, tzw. normalnie nieprzewodzące, o których się mówi, że pracują na zasadzie "wzbogacania kanału w nośniki" są zwykle produkowane - ze względów technologicznych - na podłożu krzemowym typu p.

Tranzystory polowe MOS z wytworzonym kanałem, przewodzące przy braku polaryzacji bramki, tzw. normalnie przewodzące, o których się mówi, że pracują na zasadzie "zubożania kanału" są zwykle produkowane na podłożu krzemowym typu n.

Na rysunku 8 zostały przedstawione symbole tranzystorów polowych z izolowaną bramką: rys. a - tranzystor z kanałem typu n wzbogacanym w nośniki, rys. b - tranzystor z kanałem typu p wzbogacanym w nośniki, rys. c - tranzystor z kanałem typu n zubożanym, rys. c - tranzystor z kanałem typu p zubożanym. Literą "B" (od słowa bulk) oznacza się wyprowadzenia podłoża tranzystora.

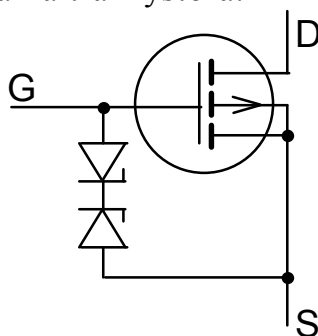


Rys. 8. Symbole tranzystorów polowych z izolowaną bramką.

Często można spotkać uproszczone symbole tranzystorów polowych z izolowaną bramką, w których np. nie ma zaznaczonego podłoża albo nie

ma stosownej strzałki, wskazującej na typ kanału czy też nie ma oddzielnego (na symbolu) obszaru drenu od obszaru źródła - tak jakby to był tranzystor z kanałem zubożonym, pomimo że chodzi o tranzystor z kanałem wzbogacającym w nośniki.

Cechą charakterystyczną tranzystorów polowych z izolowaną bramką jest bardzo duży, dla napięć stałych praktycznie nieskończenie duży, opór wejściowy bramki. Inaczej jest dla napięć zmiennych. Zawada wejściowa bramki - ze względu na to, że bramka tworzy z pozostałymi elektrodami tranzystora kondensator - jest stosunkowo mała dla napięć zmiennych o wysokiej częstotliwości. Praktyczny brak przewodnictwa elektrycznego pomiędzy bramką a pozostałymi elektrodami tranzystora może być przyczyną jego uszkodzenia z powodu napięciowego przebiccia cienkiej warstwy izolatora oddzielającego bramkę od kryształu, na którym zbudowany jest tranzystor, co może zająć w wypadku elektryzowania się bramki np. przez zetknięcie się jej wyprowadzeń z materiałami łatwo elektryzującymi się lub naładowanymi elektrycznie. Można zapobiec takim uszkodzeniom, łącząc bramkę np. ze źródłem tranzystora (rys. 9) przez dwie diody Zenera o dostatecznie dużym napięciu Zenera, tak by istniała możliwość sterowania tranzystora.



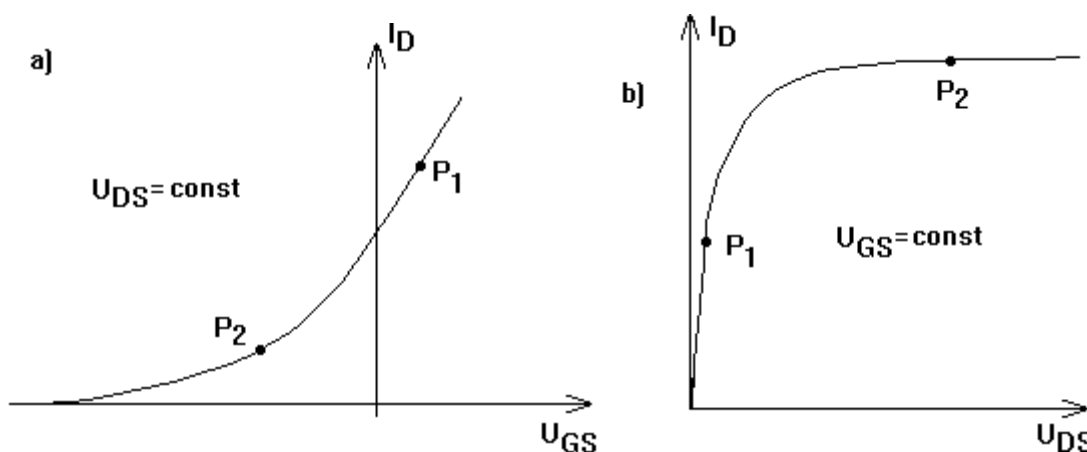
Rys. 9. Sposób zabezpieczenia tranzystora polowego z izolowaną bramką przed przebicciem elektrostatycznym.

Plan ćwiczenia.

1. Zbadać zależność natężenia prądu drenu od napięcia między drenem a źródłem dla kilku różnych wartości U_{GS} dla tranzystora polowego złączowego oraz tranzystora polowego z izolowaną bramką.
2. Zbadać zależność natężenia prądu drenu tranzystora od napięcia między bramką a źródłem dla kilku różnych wartości U_{DS} dla tranzystora polowego złączowego oraz tranzystora polowego z izolowaną bramką.
3. Zmierzyć natężenie prądu płynącego przez bramkę tranzystora dla podanych przez prowadzącego ćwiczenia wartości U_{DS} i U_{GS} dla tranzystora polowego złączowego.
4. Na podstawie sporządzonych wykresów obliczyć dla tranzystora polowego złączowego oraz tranzystora polowego z izolowaną bramką:

- nachylenie charakterystyki „bramkowej” tranzystora $\left(\frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}}\right)_{U_{DS}=\text{const}}$ dla jednej z podanych wartości U_{DS} (w przypadku podanych trzech wartości U_{DS} niech to będzie wartość "średkowa") oraz dwu wybranych wartości U_{GS} - (punkt P₁ i punkt P₂ na rys.10a, odpowiadające 1/4 i 3/4 wartości maksymalnego zmierzonego natężenia I_D),

- nachylenie charakterystyki „drenowej” tranzystora $\left(\frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}}\right)_{U_{GS}=\text{const}}$ dla jednej z podanych wartości U_{GS} (w przypadku podanych trzech wartości U_{GS} niech to będzie wartość "średkowa") oraz dwu wybranych wartości U_{DS} : takiej, dla której istnieje silna zależność natężenia prądu drenu od napięcia U_{DS} (punkt P₁ na rys.10b) oraz takiej, dla której ta zależność prawie nie istnieje (punkt P₂ na rys.10a).

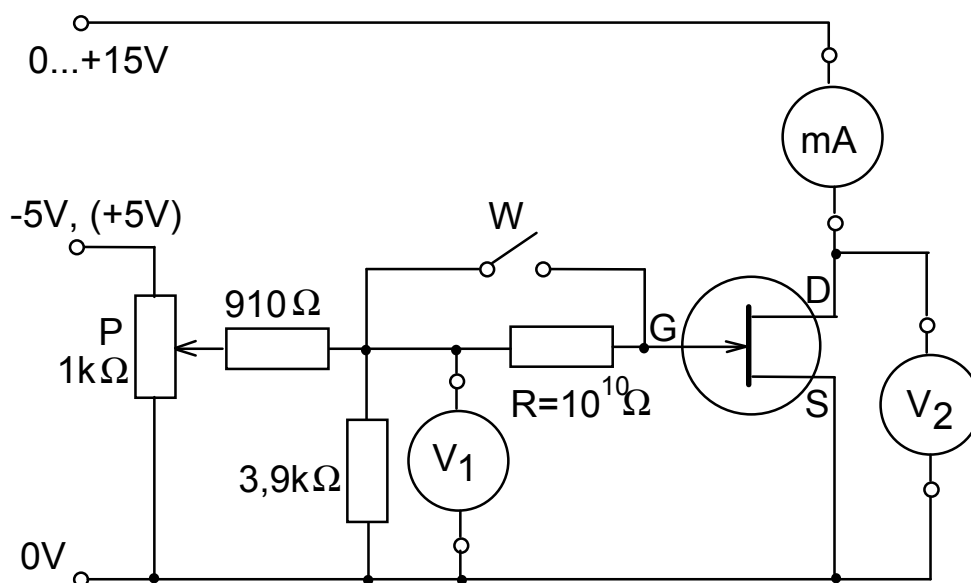


Rys. 10. Rysunek pomocniczy do wykonania punktu 4 ćwiczenia.

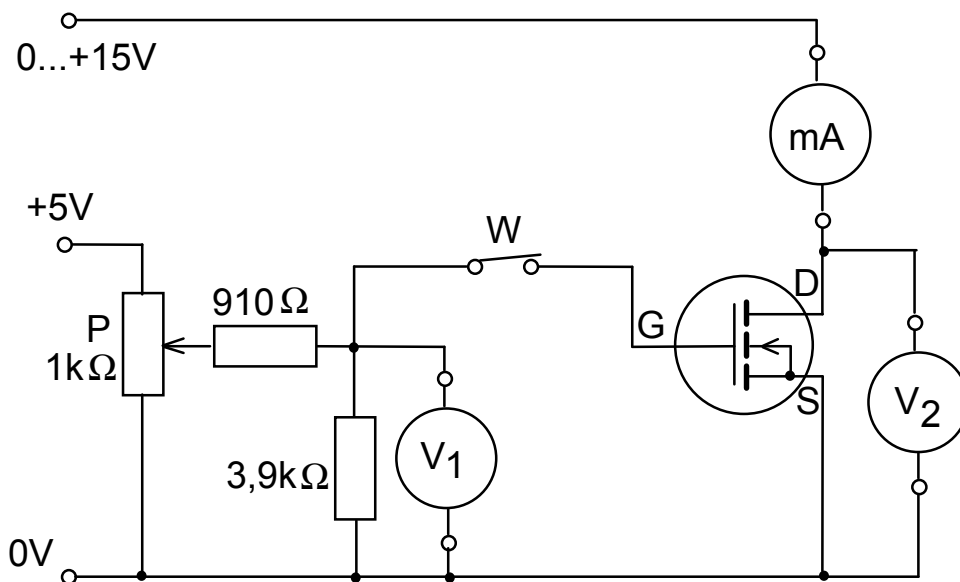
Uwagi.

1. Do badania tranzystora polowego złączowego służy układ pokazany na rysunku 11. Wszystkie elementy, za wyjątkiem woltomierza i amperomierza są zamontowane na płytce. Układ wymaga zasilania. Najlepiej jest użyć dwu zasilaczy napięć stałych: jednego z regulacją napięcia wyjściowego w granicach od 0 do +15V oraz drugiego, o napięciu wyjściowym 5V. Dla badania tranzystora przy ujemnej polaryzacji bramki względem kanału należy biegun dodatni źródła napięcia 5V połączyć z biegunem ujemnym źródła napięcia regulowanego od 0 do 15V. Dla badania tranzystora przy dodatniej polaryzacji bramki względem kanału (dokładniej: względem źródła) należy z biegunem ujemnym źródła napięcia regulowanego w granicach od 0 do +15V połączyć ujemny biegun źródła napięcia 5V. Przy dodatniej polaryzacji bramki

(dla tranzystora z kanałem typu n) podczas zamkniętego wyłącznika W woltomierz V_1 nie może wskazywać napięcia większego, niż ok. $+0,65V$.



Rys. 11. Układ do badania tranzystora polowego złączowego.



Rys. 12. Układ do badania tranzystora polowego z izolowaną bramką.

- Przy odczycie wartości natężenia prądu drenu należy uwzględnić prąd płynący przez woltomierz V_2 , jeśli jest to woltomierz laboratoryjny o niskim oporze wewnętrznym.
- Przy pomiarze natężenia prądu bramki tranzystora złączowego postępujemy następująco: dla określonych wartości U_{DS} i U_{GS} (wyłącznik W

zamknięty) zanotować wskazanie miliamperomierza. Następnie otworzyć klucz W. Wskazanie miliamperomierza powinno się zmienić (przynajmniej cokolwiek). Nie zmieniając napięcia U_{DS} , ustawić potencjometr P w takim położeniu, by wskazanie miliamperomierza wróciło do poprzedniej wartości. Woltomierz V_1 będzie teraz wskazywał inną, niż przedtem, wartość napięcia. Jeśli po wykonaniu tych czynności wskazanie miliamperomierza jest znowu takie same jak poprzednio, to - wnioskujemy - napięcie U_{GS} na pewno też jest takie same jak poprzednio. Woltomierz V_1 wskazuje teraz sumę napięć: $U_{GS} + U_R$, gdzie U_R jest spadkiem potencjału na oporze R. Znając wartości U_R i R, obliczamy natężenie prądu płynącego przez bramkę tranzystora.

LITERATURA:

1. Aldert van der Ziel: Podstawy fizyczne elektroniki ciała stałego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
2. Zdzisław Korzec: Tranzystory polowe. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1969.
3. Wiesław Marciniak: Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone.
4. Procesy technologiczne w elektronice półprzewodnikowej. Praca zbiorowa.

Roman Kazański.
Lublin, 15 maja 2001r.
Ostatnia zmiana 5 stycznia 2007r.