

ĆWICZENIE 2

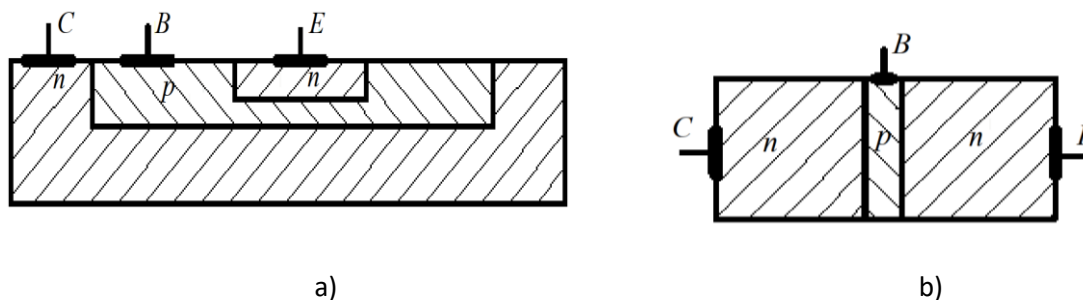
Podstawowe elementy elektroniczne – tranzystory

2.1. Wstęp – przygotowanie do zajęć

Budowa i właściwości tranzystorów BTJ

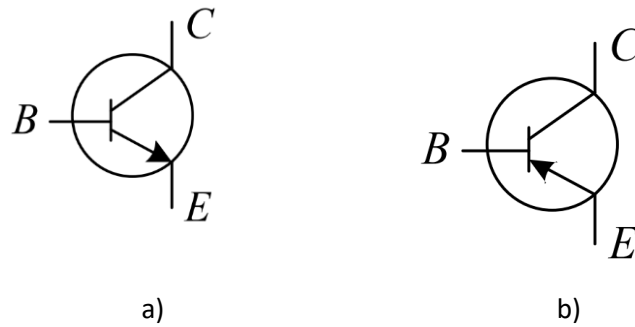
Tranzystor bipolarny (BJT) jest trójelektrodowym elementem półprzewodnikowym, mającym dwa złącza półprzewodnikowe **p-n** utworzone w jednym kryształie półprzewodnika. Termin "*bipolarny*" oznacza, że o właściwościach elektrycznych tranzystora BJT decydują dwa typy nośników ładunku elektrycznego, swobodne elektrony i dziury. Tranzystor BJT to monokrystaliczna płytka półprzewodnikowa, w której za pomocą specjalnych metod technologicznych, utworzone są trzy warstwy półprzewodnika niesamoistnego, z których dwie mają ten sam typu przewodzenia (np. n), a trzecia oddzielająca je przeciwny (np. p).

Warstwa środkowa kryształu nazywa się bazą, a dwie pozostałe warstwy zewnętrzne to emiter oraz kolektor. Rzeczywisty przekrój struktury tranzystora n-p-n przedstawiono Rys. 2.1a, jej uproszczoną reprezentację Rys. 2.1b. Można tu zaobserwować, zarówno pomiędzy bazą a emiterem, jaki pomiędzy bazą a kolektorem powstają struktury o charakterze złącz p-n takim jak w diodach – w tym przypadku byłyby to dwie diody złączone anodami w punkcie bazy.



Rys. 2.1 Struktura bipolarnego tranzystora złączeniowego a) rzeczywista, b) uproszczona

Po wpływem przyłożonego pomiędzy *kolektor-emiter* napięcia, emiter wstrzykuje nośniki większościowe do obszaru bazy. Niewielka część tych nośników rekombinuje w obszarze bazy tworząc *prąd bazy*. Druga znacznie większa, ma wystarczająco dużą energię kinetyczną, żeby przemieścić się przez wąski obszar bazy i poprzez **wstecznie spolaryzowane złącze kolektor-baza** przedostać się do obszaru kolektora tworząc w nim prąd kolektora. Przejście nośników większościowych z obszaru emitera przez wąski obszar bazy do obszaru kolektora nazywa się efektem tranzystorowym. Jeśli emiter i kolektor tranzystora są półprzewodnikami typu p, a baza typu n to taki tranzystor nazywany jest tranzystorem typu **p-n-p**. Jeśli baza jest półprzewodnikiem typu p, a emiter i kolektor typu n to taki tranzystor nazywany jest tranzystorem typu **n-p-n**. Symbole tranzystorów bipolarnych typu n-p-n oraz p-n-p pokazano odpowiednio na Rys. 2.2a n-p-n i Rys. 2.2b p-n-p. W symbolu tranzystora strzałka reprezentująca emiter i wskazuje kierunek przewodzenia prądu w złączu baza-emiter. Pomimo tego, iż najczęściej omawianym (ze względów dydaktycznych) tranzystorów jest typ n-p-n, należy pamiętać, że tranzystor p-n-p są również wykorzystywane (choćby jako komplementarny element do n-p-n układach typu *push-pull*), kierunki napięć i prądów są odwrotne względem n-p-n (tj. tranzystor p-n-p jest załączany ujemnym prądem bazy).



Rys. 2.2 Symbol tranzystora bipolarnego typu: a) n-p-n i b) p-n-p.

W układzie elektronicznym do elektrod tranzystora dołącza się zewnętrzne napięcia tak, że złącze baza-emiter (B-E) jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze baza-kolektor (B-C) w kierunku zaporowym (zaporowym). Pod wpływem zewnętrznego napięcia wewnątrz płytki półprzewodnika powstaje pole elektryczne, które powoduje, że bariera potencjału między emiterym i bazą zmniejszy się (złącze B-E jest w stanie przewodzenia), a między kolektorem i bazą zwiększy się (złącze B-C jest spolaryzowane w kierunku zaporowym). Pod wpływem pola elektrycznego nośniki większościowe z obszaru emitera przesuują się do obszaru bazy, a następnie dzięki dostatecznie dużej energii kinetycznej do obszaru kolektora, tworząc w ten sposób prąd kolektora. Tylko niewielka liczba nośników większościowych z obszaru emitera, które znalazły się w obszarze bazy, rekombinuje z nośnikami większościowymi tego obszaru i tworzy w ten sposób prąd bazy. Pozostałe nośniki większościowe, które znalazły się w obszarze bazy dyfundują przez złącze baza-kolektor do obszaru kolektora i tworzą tam prąd kolektora.

Zależność między prądem emitera i prądem kolektora można wyznaczyć z przybliżonej zależności:

$$I_C = \alpha_0 I_E \quad (2.1)$$

lub:

$$\alpha_0 = \frac{I_C}{I_E} \quad (2.2)$$

W bipolarnych tranzystorach sygnałowych współczynnik wzmocnienia prądowego α_0 jest bliski jedności i zmienia się w zakresie od 0,9 do 0,999 i odzwierciedla jaka część prądu emitera została przechwycona przez kolektor.

W praktyce jednak powszechniejszą wartością jest wzmocnienie prądowe β . Pamiętając o fakcie, iż:

$$I_E = I_B + I_C \quad (2.3)$$

Wartość tego wzmocnienia możemy zapisać jako:

$$\beta_0 = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.4)$$

lub

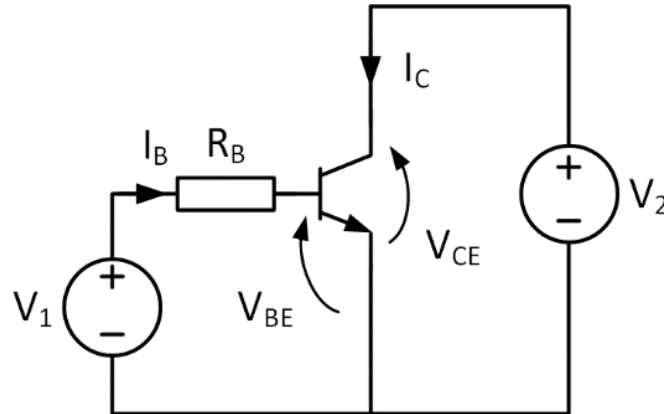
$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} \quad (2.5)$$

Są to współczynniki dla wartości tzw. wielosygnałowych, zwanych też sygnałami stałymi (DC). Analogicznie stosowane są współczynniki dla sygnałów małych tzw. przyrostowych lub (AC):

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{i_C}{i_B} \quad (2.6)$$

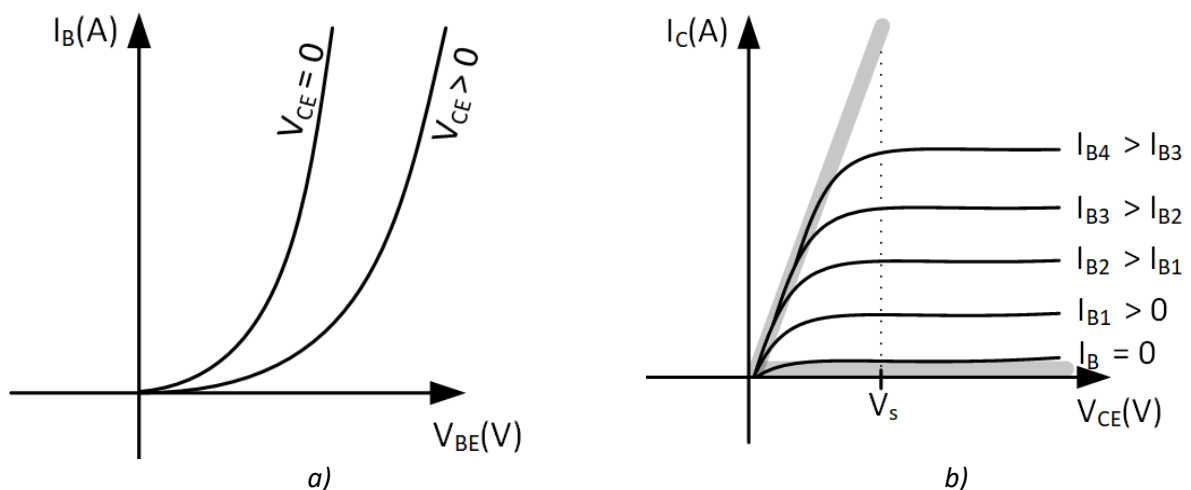
Wartość ta niestety nie jest stała zależy silnie zarówno od temperatury jak i od wartości prądu I_C .

Istotą poprawnego stosowania tranzystorów BJT jest świadomość zależności prądu kolektora od prądu bazy, a także złączonego charakteru obwodu, a dokładnie złącza baza-emiter. W zrozumieniu tych zależności pomocne mogą być statyczne charakterystyki wejściowe oraz wyjściowe (przy założeniu że obwód wejściowy to B-E, a wyjściowy C-E) jak pokazano na Rys. 2.3



Rys. 2.3 Układ pomiarowy charakterystyk wejściowych i wyjściowych tranzystora BJT

Charakterystyki wejściowe tranzystora to rodzina zależności prądu wejściowego od napięcia wejściowego przy stałych wartościach napięcia wyjściowego. Statyczne charakterystyki wyjściowe tranzystora to rodzina zależności prądu wyjściowego od napięcia wyjściowego, przy stałych wartościach prądu wejściowego. Charakterystyki tranzystora zawierają informacje o właściwościach tranzystora we wszystkich stanach pracy tranzystora zarówno dla dużych jak i małych sygnałów. Na podstawie tych charakterystyk można określić szereg parametrów tranzystorów nie podanych w notach katalogowych, a także wyznaczyć położenie jego punktu pracy dla szerokiego zakresu stałych i impulsowych prądów i napięć sterujących. Przykłady tych charakterystyk pokazano na Rys. 2.4.



Rys. 2.4 Rodzina wejściowych i wyjściowych charakterystyk tranzystora a) prąd bazy w funkcji napięcia złącza B-E, b) prąd kolektora w funkcji napięcia złącza K-E.

Na Rys. 2.4a można zauważyć, iż kształt przedstawionych charakterystyk przypomina charakterystykę diody. Jest zrozumiałe zważywszy przyłożenie dodatniego napięcia do złącza B-E jest

w istocie spolaryzowaniem złącza p-n (a więc diody – Rys. 2.1b) w kierunku przewodzenia. Można również zauważyć, iż charakterystyka dodatkowo zależna jest od napięcia zasilającego obwód C-E (oddziaływanie wstecznego).

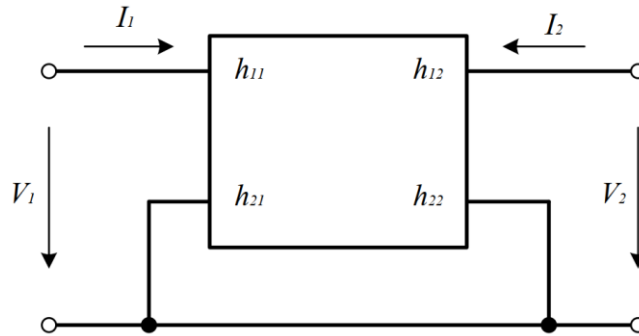
Na Rys. 2.4b przedstawiono zaś charakterystyki wyjściowe tranzystora BJT, tj. zależność prądu kolektora od napięcia na zaciskach C-E tranzystora. Są to charakterystyki wykreślone dla kilku różnych wartości prądu bazy. Warto to zwrócić uwagę na kilka istotnych zagadnień, mianowicie:

- Dla prądu bazy równego 0, tranzystor nie przewodzi (prąd kolektora jest równy 0), stan wyłączenia lub tzw. **odcięcia tranzystora** (*ang. cut-off region*) oznaczony szarą poziomą linią na Rys. 2.4b
- Dla prądów bazy większych od zera, na początku charakterystyki (niskie napięcia V_{CE} osiągające wartości do V_S , które dla tranzystorów krzemowych małej mocy wynosi ok. 0.2 V) prąd narasta przy niewielkich zmianach napięcia C-E – obszar pracy tranzystora z wykorzystaniem tej części charakterystyk **nazywamy pracą w nasyceniu** i oznaczono ukośną linią szarą na Rys. 2.4b
- Po przekroczeniu odpowiedniej wartości napięcia V_{CE} (powyżej V_S), pomimo zmian napięcia V_{CE} , prąd kolektora praktycznie się nie zmienia – **nazywamy to obszarem pracy aktywnej** tranzystora. W tym zakresie tranzystor przypomina nieidealne źródło prądu.

Warto przy tym pamiętać, że zależności od zastosowania tranzystora BJT w konkretnej aplikacji, można wykorzystywać różne obszary punktów pracy wynikających z charakterystyk, i tak na przykład: wykorzystując pracę tranzystora jako łącznika wykorzystuje się pracę naprzemiennie przejście pomiędzy obszarem **nasycenia**, a stanem **odcięcia** (tj. zerowego prądu bazy), podczas gdy przy zastosowaniu tranzystora np. w realizacji wzmacniacza małej częstotliwości klasy A, wykorzystuje się zakres **pracy aktywnej** tranzystora.

Należy także pamiętać o tym, iż tranzystor BJT w przedstawionej konfiguracji może blokować wyłącznie dodatnie wartości napięć V_{CE} , a ponadto po przekroczeniu wartości maksymalnej wartości napięcia blokowania mamy **do czynienia z przebiegiem lawinowym** podobnym do tego której występuje w diodach (wynika to również z „diodowego” charakteru złącza B-C).

Jeżeli elektrody: baza i emiter potraktuje się jako zaciski wejściowe, a elektrody: kolektor i emiter jako zaciski wyjściowe to tranzystor bipolarny można zastąpić czwórnikiem (pracującym w układzie wspólnego emitera). Ponieważ charakterystyki elektryczne (wejściowa i wyjściowa) tranzystora są nieliniowe, to i sam czwórnik jest nieliniowy. **Jeżeli jednak zmiany napięć i prądów tranzystora wokół przyjętego na charakterystykach punktu pracy są małe** można przyjąć, że charakterystyki tranzystora, na krótkich odcinkach są liniowe, a zatem także czwórnik (pokazany na Rys. 2.1) reprezentujący tranzystor jest liniowy – należy przy tym nadmienić, że jest on liniowy w okolicach przyjętego punktu pracy, a współczynnik liniowości dla małych sygnałów zmienia się w zależności od przyjętego punktu pracy. Jeżeli wymuszeniem są: prąd wejściowy I_1 i napięcie wyjściowe V_2 , a odpowiednią napięcie wejściowe V_1 i prąd wyjściowy I_2 czwórnik jest typu H (hybrydowy). Czwórnik taki jest opisany parametrami hybrydowymi h (tzw. *parametry typu h* – każdy parametr ma inny wymiar: Ω , V/V , A/A , S).



Rys. 2.5 Reprezentacja tranzystora BJT jako czwórnik nieliniowego

Zależność między wejściowymi i wyjściowymi przyrostami prądów i napięć – odpowiednio (V_1, I_1 oraz V_2, I_2) – wyrażona jest za pomocą parametrów h ma postać dwóch równań:

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta V_2 \\ \Delta I_2 &= h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta V_2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Przyrost prądu wejściowego ΔI_1 , i przyrost napięcia wyjściowego ΔV_2 są traktowane jako zmienne niezależne, natomiast przyrost napięcia wejściowego ΔV_1 i prądu wyjściowego ΔI_2 są wyznaczane za pomocą parametrów typu h .

Ponieważ wartości dynamiczne (przyrostowych) parametrów h wyznaczone są dla topologii wspólnego emitera, parametrom tym nadawany jest indeks E. Można zatem uogólnioną postać równań czwórnik uszczegółowić do omawianego przykładu:

$$\begin{aligned} \Delta V_{BE} &= h_{11E} \Delta I_B + h_{12E} \Delta V_{CE} \\ \Delta I_C &= h_{21E} \Delta I_B + h_{22E} \Delta V_{CE} \end{aligned} \quad (2.8)$$

gdzie wartości parametrów h_{xxE} tranzystora można zdefiniować następująco:

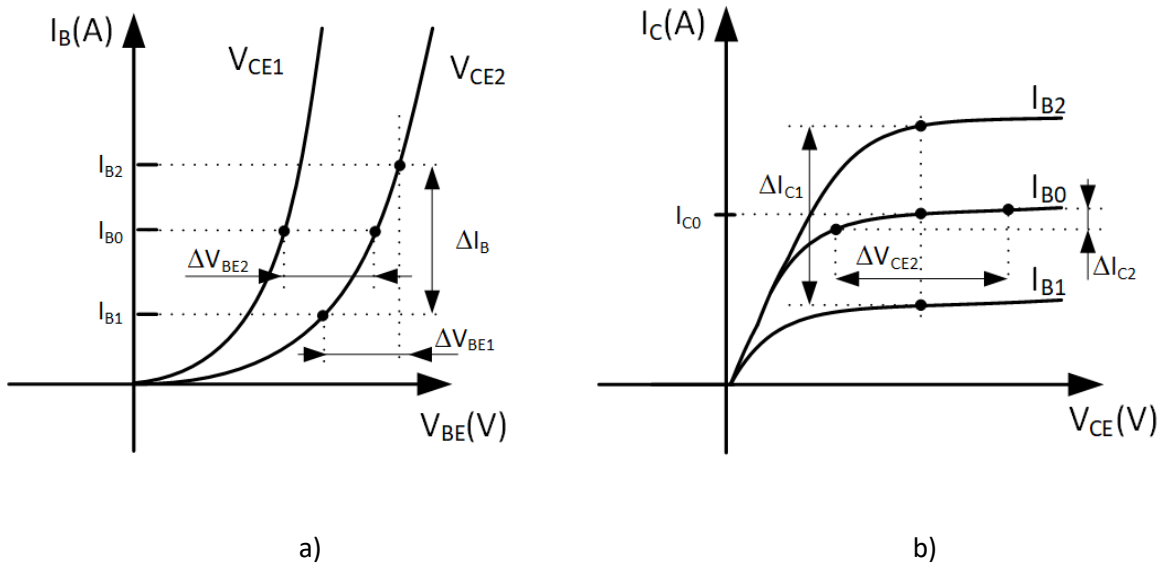
$h_{11E} = r_{BE} = \Delta V_{BE} / \Delta I_B$, przy $V_{CE} = \text{const}$ – dynamiczna rezystancja wejściowa tranzystora [Ω];

$h_{12E} = k_f = \Delta V_{BE} / \Delta V_{CE}$, przy $I_B = \text{const}$ – współczynnik oddziaływania wstecznego [V/V];

$h_{21E} = \beta = \Delta I_C / \Delta I_B$, przy $V_{CE} = \text{const}$ – współczynnik wzmocnienia prądowego β [A/A];

$h_{22E} = g_{CE} = 1 / r_{CE} = \Delta I_C / \Delta V_{CE}$, przy $I_B = \text{const}$ – dynamiczna konduktancja wyjściowa tranzystora [$1 / \Omega = S$].

Jak wcześniej wspomniano wartości parametrów h_{xxE} zależą od przyjętego, na charakterystykach tranzystora punktu pracy, który opisany jest stałymi wartościami prądów i napięć – wielosygnałowych zwanych też sygnałami stałymi, które można na Rys. 2.6 oznaczyć symbol jako : I_{B0}, V_{BE0}, I_{C0} i V_{CE0} . Przyjmując na charakterystykach tranzystora odpowiednie przyrosty sygnałów wokół punktu pracy można graficznie wyznaczyć parametry h_{xxE} , przy czym parametry h_{11E} i h_{12E} wyznacza się z charakterystyki wejściowej (Rys. 2.6a) a parametry h_{21E} i h_{22E} z charakterystyki wyjściowej (Rys. 2.6b).



Rys. 2.6. Wyznaczanie parametrów h_{xxE} z charakterystyk statycznych tranzystora a) wyznaczenie h_{11E} i h_{12E} b) wyznaczenie h_{21E} i h_{22E} .

Na podstawie przyrostów sygnałów odczytanych z charakterystyk można obliczyć wartości odpowiednich współczynników w następujący sposób:

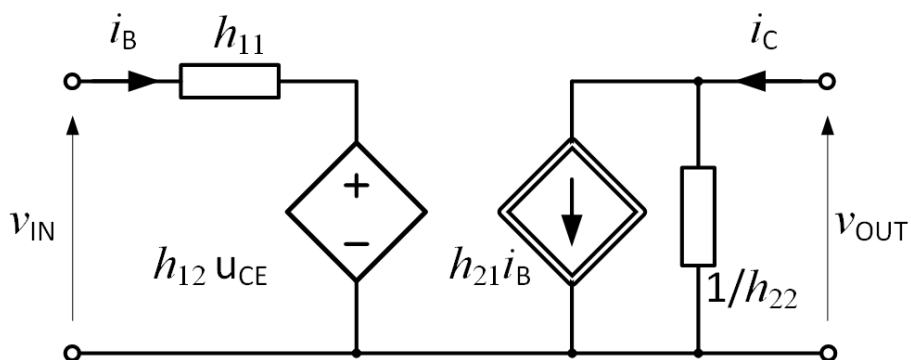
$$h_{11E} = \Delta V_{BE1} / \Delta I_B, \text{ dla } V_{CE} = V_{CE2};$$

$$h_{12E} = \Delta V_{BE2} / \Delta V_{CE1}, \Delta V_{CE1} = V_{CE2} - V_{CE1}, \text{ dla } I_B = I_{B0};$$

$$h_{21E} = \Delta I_{C1} / \Delta I_B, \text{ dla } V_{CE} = V_{CE0};$$

$$h_{22E} = \Delta I_{C2} / \Delta V_{CE2}, \text{ dla } I_B = I_{B0};$$

Układ równań (2.8) linearyzuje charakterystyki tranzystora w wybranych punkcie pracy. Przedstawione równania można zilustrować przy pomocy równoważnego im obwodu elektrycznego – co zostało przedstawione na Rys. 2.7.



Rys. 2.7. Małosygnalowy obwód zastępczy tranzystora BJT

Tranzystor złączowy FET

Tranzystory polowe, nazywane też **unipolarnymi** to elementy półprzewodnikowe, w których pole elektryczne oddziałuje na rezystancję półprzewodnika lub rezystancję cienkiej warstwy nieprzewodzącej znajdującej się tuż pod powierzchnią izolatora, na którym umieszczona jest elektroda zwana bramką. W tranzystorach polowych przepływ większościowych nośników ładunku odbywa się w obszarze półprzewodnika nazywanym kanałem. Zmiana pola elektrycznego, które jest sterowane

napięciem bramka-źródło wpływa na zmianę przekroju poprzecznego kanału. Prąd w elemencie tworzy tylko jeden rodzaj nośników – nośniki większościowe, stąd nazwa – tranzystory unipolarne.

Jedną z głównych właściwości tranzystorów polowych jest możliwość stosowania do ich produkcji różnych materiałów półprzewodnikowych, a to pozwala na budowę elementów odpornych np. na zmianę temperatury. Ważną zaletą tranzystorów polowych jest wysoka odporność na zakłócenia (w porównaniu z tranzystorami bipolarnymi) oraz bardzo duża impedancja wejściowa.

Istnieje kilka odmian tranzystorów polowych, które różnią się od siebie budową i sposobem sterowania przewodnością kanału, a które w wielu zastosowaniach działają bardziej efektywnie niż tranzystory bipolarne. Podstawowe rodzaje tranzystorów unipolarne to:

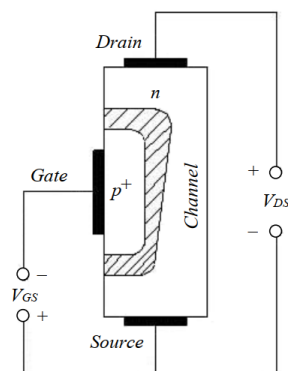
- tranzystory polowe złączowe (ang. *Junction Field-Effect Transistor, JFET*);
- tranzystory polowe z izolowaną bramką (ang. *Insulated Gate Field-Effect Transistor, IGFET*), w których najczęściej wykorzystuje się struktury MOS: metal-tlenek-półprzewodnik (ang. *Metal-Oxide-Semiconductor*) nazywane też **MOSFET** (ang. **Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor**) lub MIS (ang. *Metal-Insulator-Semiconductor*);
- tranzystory polowe cienkowarstwowe TFT (ang. *Thin Film Transistor*).

Tranzystor polowy ma trzy elektrody:

- źródło (ang. *source*) – z którego nośniki większościowe wpływają do kanału;
- dren (ang. *drain*) – do którego nośniki większościowe wypływają z kanału;
- bramkę (ang. *gate*) – która służy do sterowania przepływem nośników poprzez zmianę powierzchni przekroju kanału.

Tranzystor polowy złączowy, JFET

Uproszczoną strukturę tranzystora polowego złączowego (JFET) z kanałem typu n pokazano na Rys. 2.8. Bramka (**gate, G**) wykonana jest z półprzewodnika typu p⁺ natomiast Dren (**drain, D**) jak i źródło (**source, S**) są podłączone do dwóch końców tego samego materiału typu n, a zatem praktycznie bez podawania jakiegokolwiek sygnału sterującego jest połączenie pomiędzy D oraz S – także tranzystor ten jest z natury załączony (ang. *normally-closed*). Można również zauważyć że na styku półprzewodników typu n oraz p tworzy się typowa dla tego typu materiałów, strefa wolna od nośników swobodnych (elektronów i dziur) tzw. strefa zubożona. Dlatego też mechanizm sterowania tym tranzystorem polega na polaryzacji wstecznej tego złącza (diody pracująca w kierunku zaporowym – potencjał anody musi być mniejszy niż katody) przy pomocy napięcia V_{GS} dzięki czemu możliwa jest zmiana (zwiększanie) szerokości strefy zubożonej, tak aby możliwe było finalnie zablokowanie kanału pomiędzy D, a S ograniczając w ten sposób przepływ prądu (wyłączenie przewodzenia tranzystora).



Rys. 2.8 Uproszczony przekrój struktury tranzystora polowego złączowego (ang. Junction Field-Effect Transistor, JFET) i sposób polaryzacji jego elektrod

Bardziej szczegółowe wytłumaczenia działania tego elementu można przedstawić w sposób następujący: przy napięciu $V_{GS} = 0$ nośniki większościowe (elektrony) pod wpływem pola elektrycznego wytworzonego w kanale ($E = 10^5 - 10^4 \text{ V/cm}$) są kierowane od źródła do drenu. W tym stanie złącze p-n (bramka – źródło) nie przewodzi. Prąd drenu (prąd jaki jest w kanale tranzystora) I_D wytwarzany przez te elektrony zależy zarówno od napięcia drenu V_{DS} , jak i rezystancji kanału. Rezystancja kanału zależy od rezystywności półprzewodnika, z jakiego wykonano kanał i jego przekroju. Przekrój kanału jest ograniczony szerokością złącza p-n (obszar domieszkowania) i napięciem bramka - źródło. Ponieważ potencjał pola elektrycznego wzrasta wzdłuż kanału od źródła do drenu liniowo, to szerokość złącza p-n jest najmniejsza w pobliżu źródła i największa w pobliżu drenu. Wynika z tego, że wzdłuż złącza p-n od źródła do drenu kanał zwęża się i ma maksymalną rezystancję w swoim największym obszarze, tj. w pobliżu drenu.

Jeśli napięcie wsteczne $V_{GS} < 0$ przyłożone do bramki zwiększy się, szerokość złącza p-n wzdłuż jego długość zwiększy się, a więc powierzchnia przekroju kanału i prąd drenu zmniejszą się. Im większa jest rezystancja materiału półprzewodnikowego, tym silniejsze będzie oddziaływanie opisanego efektu, dlatego też tranzystory polowe są wykonane z materiału o wysokiej rezystywności (z niewielką koncentracją domieszkowania w kanale). W przypadku przyłożonego do bramki napięcia wstecznego o wartości V_{GS0} , przekrój kanału w pobliżu drenu jest równy zeru i prąd drenu $I_D = 0$. W tym wypadku mówi się, że tranzystor jest w stanie wyłączenia.

Charakterystyki statyczna tranzystora polowego złączowego (JFET)

Charakterystyki statyczne tranzystorów polowych (typu FET) to funkcje opisujące zależności między prądami i napięciami przyłożonymi do wyprowadzeń tranzystora:

- charakterystyka wejściowa $I_G = f(V_{GS})$, gdy $V_{DS} = \text{const}$;
- charakterystyka oddziaływania wstecznego $I_G = f(V_{DS})$, gdy $V_{GS} = \text{const}$;
- charakterystyki przewodzenia $I_D = f(V_{GS})$, gdy $V_{DS} = \text{const}$;
- charakterystyka wyjściowa $I_D = f(V_{DS})$, gdy $V_{GS} = \text{const}$.

Jednakże tylko dwie ostatnie charakterystyki są stosowane w praktyce: pierwsza z nich $I_D = f(V_{GS})$, gdy $V_{DS} = \text{const}$ jest powszechnie nazywana charakterystyką przenoszenia (lub przez analogię do lamp elektronowych charakterystyką bramkową), a druga $I_D = f(V_{DS})$, gdy $V_{GS} = \text{const}$ to typowa charakterystyka wyjściowa.

Charakterystyki: wejściowa i oddziaływania wstecznego nie są stosowane, ponieważ w większości tranzystorów FET prądy bramkowe są pomijalnie małe (od 100 pA do 1 nA) i praktycznie niemierzalne.

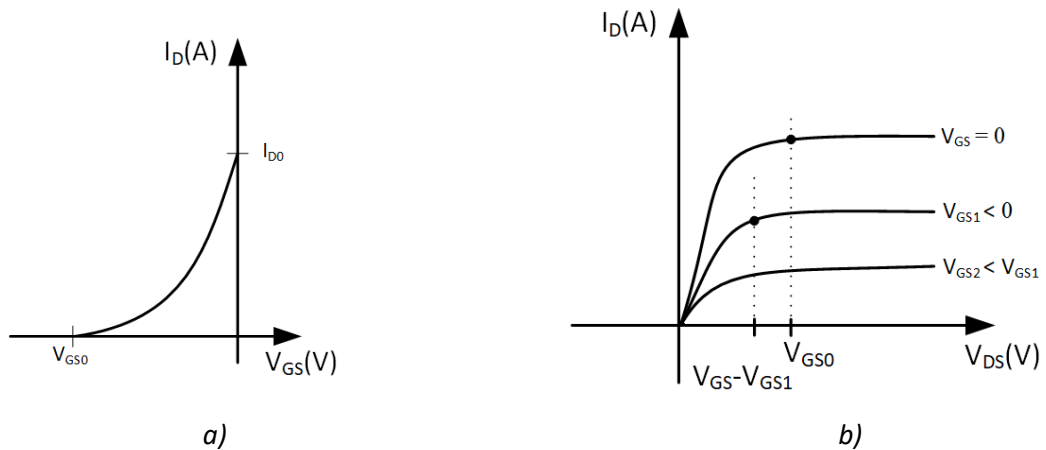
Przykładową charakterystykę przenoszenia $I_D = f(V_{GS})$ tranzystora FET pokazano na Rys. 2.9a

Dla napięć drenu $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS0}$ (zakres pracy nieliniowej) charakterystyka przenoszenia jest opisana z wystarczającą dokładnością za pomocą wyrażenia:

$$I_D = I_{D0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS0}} \right)^2, \quad (2.9)$$

gdzie I_{D0} – prąd drenu przy $V_{GS} = 0$.

Wspomniano już, że tranzystor JFET można zaliczyć do tranzystorów normalnie załączonych, ponieważ przy $V_{GS} = 0$, przy danym $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS0}$ płynie prąd drenu I_{D0} różny od zera.



Rys. 2.9 Charakterystyki tranzystora JFET: a) przenoszenia/przejsciowa, b) wyjsciowa.

Na Rys. 2.9b przedstawiono rodzinę statycznych charakterystyk wyjściowych $I_D = f(V_{DS})$ dla różnych napięć bramki $V_{GS} \leq 0$. Na każdej z tych charakterystyk można wskazać dwa istotne zakresy pracy tranzystora:

- zakres pracy liniowej (gdy $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS0}$)
- oraz zakres pracy nieliniowej (gdy $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS0}$).

W pierwszym obszarze prąd drenu I_D narasta praktycznie liniowo ze wzrostem napięcia V_{DS} , a nachylenie charakterystyki zależy od wartości napięcia V_{GS} . W zakresie pracy liniowej, gdy $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS0}$ prąd drenu można opisać zależnością:

$$I_D = K_{FET} \left[(V_{GS0} - V_{GS}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right], \quad (2.10)$$

gdzie K_{FET} stały współczynnik, który zależy od budowy tranzystora i właściwości zastosowanego materiału. Może być wyrażony za pomocą parametrów tranzystorów FET. Na przykład w przypadku tranzystorów JFET:

$$K_{FET} = \frac{2I_{D0}}{V_{GS0}^2}. \quad (2.11)$$

W zakresie, gdy $V_{DS} \approx V_{GS} - V_{GS0}$ charakterystyki zmieniają nachylenie i prąd drenu I_D narasta powoli względem zmian napięcia V_{DS} . W tym wypadku szerokość warstwy zaporowej (złącza p-n) i rezystancja kanału w obszarze przyległym do drenu zwiększają się, co powoduje, że przy większych wartościach prądu drenu I_D wzrasta spadek napięcia wzdłuż kanału i w ten sposób szybkość narastania prądu drenu zmniejsza się. Dla napięcia $V_{DS} = V_{GS} - V_{GS0}$ przekrój kanału w pobliżu drenu jest bliski zera i prąd drenu I_D przestaje narastać. Tranzystor wchodzi w stan pracy nieliniowej. Przy kolejnych charakterystykach wykreślonych dla napięcia bramki – źródło $|V_{GSn}| > |V_{GS0}|$, szerokość warstwy zaporowej złącza n-p jest większa dla tych samych wartości V_{DS} co przy V_{GS0} . Charakterystyka załamuje się dla mniejszych wartości prądu I_D , tzn. tranzystor wchodzi w obszar nasycenia dla niższych wartości $V_{DSn} = V_{GSn} - V_{GS0}$.

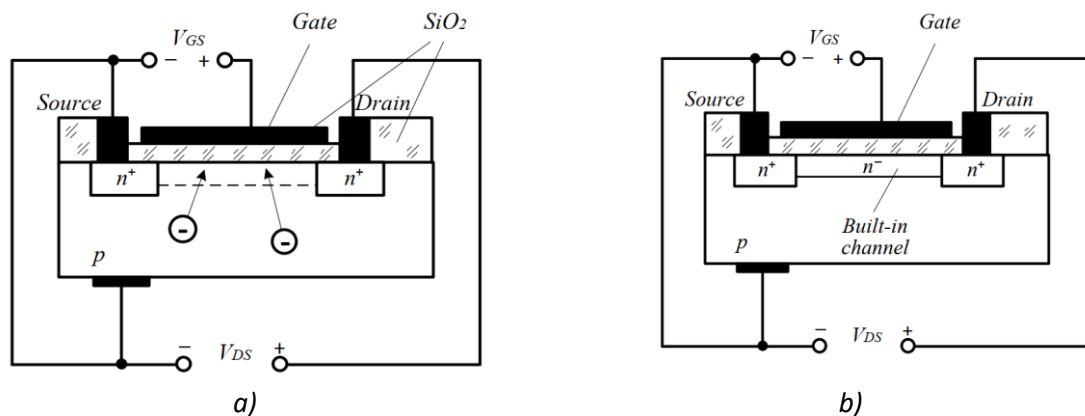
Warto również wspomnieć, że dla wyższych wartości napięć dren-źródło $V_{DS} > V_{DSMAX}$ występuje nagły wzrost prądu drenu I_D . W tym wypadku, jeżeli wydzielona w kanale tranzystora moc przekracza wartość dopuszczalną (możliwą do rozproszenia), następuje nieodwracalne uszkodzenie elementu.

Jeśli do złącza bramka – źródło będzie spolaryzowane w kierunku przewodzenia, szerokość złącza zmniejszy się i efektywna szerokość kanału wzrośnie. W tym wypadku prąd I_D zwiększy się. Kiedy jednak wartość tego napięcia będzie większa (dla przyrządów krzemowych) od około 0,6 V prąd przewodzenia wzrośnie znacznie co spowoduje znaczne zmniejszenie się prądu drenu i rezystancji wejściowej tranzystora. Z tego powodu, w większości zastosowań tranzystorów FET, praca z prądem wejściowym płynącym w obwodzie bramka - źródło jest stanem niepożądanym.

Tranzystory polowe złączowe zaleca się stosować w układach wejściowych wzmacniaczy operacyjnych wyposażonych w źródło sygnału o wysokiej rezystancji, w układach do pomiaru prądu, obwodach impulsowych, regulatorach poziomu sygnału itp.

Tranzystor MOSFET

Tranzystor polowy z izolowaną bramką składa się z trzech warstw: **metal – izolator – półprzewodnik (ang. Metal – Insulator – Semiconductor, MIS)**. Istnieją dwa rodzaje tranzystorów z izolowaną bramką: z **kanałem indukowanym** (Rys. 2.10a) i **kanałem wbudowanym** (Rys. 2.10b). Ich symbole przedstawiono odpowiednio na Rys. 2.11a oraz Rys. 2.11b. W tranzystorach krzemowych jako izolator często jest stosowana warstwa tlenku krzemu i taka struktura jest nazywana tranzystorem **metal – tlenek – półprzewodnik (ang. Metal – Oxide – Semiconductor, MOS)**.



Rys. 2.10 Uproszczone przekroje tranzystorów z izolowaną bramką: a) tranzystor z indukowanym kanałem (kanałem wzbogacającym) MOSFET; b) tranzystor z wbudowanym kanałem (kanałem zubożającym) MOS-JFET.



Rys. 2.11 Symbole tranzystorów MOSFET a) z kanałem indukowanym (typu n), b) z kanałem wbudowanym (typu n)

W tranzystorze z kanałem indukowanym (Rys. 2.10a) typu n źródło i dren są przewodnikami typu n^+ , a tzw. podłoże półprzewodnikiem typu p . Elektrody źródła i drenu są bezpośredni napylone na warstwy półprzewodnika typu n^+ w obszarach pozbawionych dwutlenku krzemu. Warstwa aluminium, która pełni rolę bramki jest napylona na warstwę dwutlenku krzemu. Przyjmuje się, że aluminiowa

bramka, izolator (tlenek krzemu) oraz półprzewodnik typu p tworzą płaski kondensator. Tranzystory, w których prąd drenu jest zależny od napięcia bramki, tj. **tranzystory z kanałem indukowanym** nazywane są także **tranzystorami z kanałem wzbogacającym**, które mogą mieć zarówno kanał typu n , sterowany napięciem $V_{GS} > 0$ jak i kanał typu p - sterowany napięciem $V_{GS} < 0$.

Jeśli pomiędzy bramką i źródło, które jest zwarte z podłożem p , zostanie przyłożone napięcie dodatnie V_{GS} , to po przekroczeniu pewnej jego wartości, tzw. napięcia progowego V_{GSth} (*ang. threshold*) przy powierzchni półprzewodnika, tuż pod bramką będą gromadziły się swobodne ładunki ujemne i powstanie cienka warstwa o przewodnictwie typu n przeciwnym niż typ przewodnictwa półprzewodnika stanowiącego podłoże (p). Jest to warstwa **inwersyjna**, która stanowi zaindukowany kanał typu n . W kanale tym, po doprowadzeniu napięcia polaryzującego źródła-dren, możliwy jest przepływ prądu drenu. Wraz ze wzrostem napięcia V_{GS} wartość prądu drenu będzie rosła. Przed powstaniem warstwy inwersyjnej rezystancja między źródłem i drenem jest określona przez rezystancję spolaryzowanego wstecznie złącza wynikającego ze struktury kanału typu $n^+ - p - n^+$ i jest duża (brak ciągłości ładunku tego samego znaku). Po inwersji powstaje w warstwie przypowierzchniowej powstaje przewodnictwo typu n i struktura kanału jest teraz typu $n^+ - n - n^+$. Rezystancja kanału zmniejsza się i po przyłożeniu napięcia U_{DS} w kanale będzie płynął prąd drenu. Można go sterować poprzez zmianę napięcia bramka-źródło.

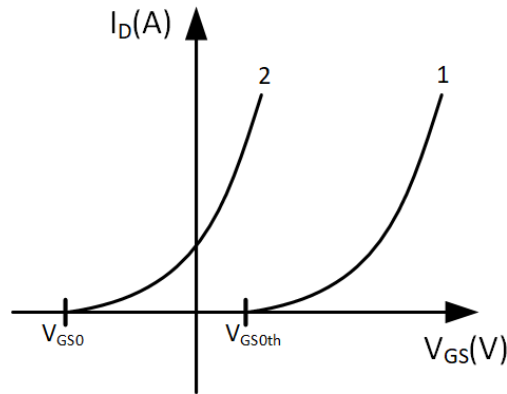
Budowa tranzystora z **kanałem wbudowanym (kanałem zubożającym)** jest podobna (Rys. 2.10b). Kiedy brak jest napięcia bramka - źródło (Rys. 2.10b) zero prąd drenu jest określany przez rezystancję kanału, który ma strukturę $n^+ - n - n^+$. Kiedy pomiędzy bramką - źródło przyłożone będzie ujemne napięcie, koncentracja swobodnych elektronów w kanale zmniejszy się (powstanie warstwa zubożony), a kanał będzie miał teraz strukturę $n^+ - p - n^+$. Rezystancja kanału zwiększy się, a prąd drenu zmniejszy się. Można tutaj zauważyć, że tranzystor ten, w przypadku braku sygnału sterującego, jest normalnie załączony (podobnie jak to miało miejsce w tranzystorach JFET) – jednak mechanizm blokowania przepływu prądu ma tutaj znacząco inny charakter.

Zarówno tranzystory z kanałem zubożającym jak i z kanałem wzbogacającym mogą mieć kanał typu n lub kanał typu p . Zatem cztery podstawowe rodzaje tranzystorów to tranzystory: z kanał zubożającym typu p , kanał zubożającym typu n , z kanał wzbogacającym typu p i kanał wzbogacającym typu n .

Charakterystyki statyczne tranzystora z izolowaną bramką (MOSFET)

Charakterystyki bramkowe (przejściowe) tranzystorów z izolowaną bramką przedstawiono na Rys. 2.12, gdzie krzywa 1 to charakterystyka tranzystora z kanałem indukowanym (wzbogacającym), często nazywanym także **tranzystorem normalnie wyłączonym**, a krzywa 2 to charakterystyka tranzystora z kanałem wbudowanym (zubożającym), często nazywanym także **tranzystorem normalnie załączonym**. Obie charakterystyki to rodzina krzywych wykreślona dla stałych wartości napięcia $U_{DS} = const$.

W odróżnieniu od charakterystyk wejściowych tranzystorów BJT, charakterystyki bramkowe tranzystorów MOSFET w bardzo słabym stopniu zależą od napięć dren – źródło, dlatego na rysunku pokazano po jednej charakterystyce dla tranzystora normalnie załączonego i normalnie wyłączzonego.



Rys. 2.12 Charakterystyki bramkowe (przejściowe) tranzystorów MOSFET; 1) z kanałem indukowanym (wzbogačany);
2) z kanałem wbudowanym (zubożany).

Charakterystyki bramkowe tranzystora z kanałem indukowanym (wzbogačonym, normalnie wyłączonego - „1”) w zakresie pracy nieliniowej, kiedy jest spełniony warunek:

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{GSth}), \quad (2.12)$$

można opisać zależnością kwadratową:

$$I_D = I_{D0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSth}}\right)^2, \quad (2.13)$$

gdzie:

- V_{GSth} – napięcie odcięcia wyznaczone dla prądu drenu $I_D = 10 \mu A$;
- I_{D0} – prąd nasycenia prądu drenu zmierzony dla napięcia $V_{GS} = 2 V_{GSth}$.

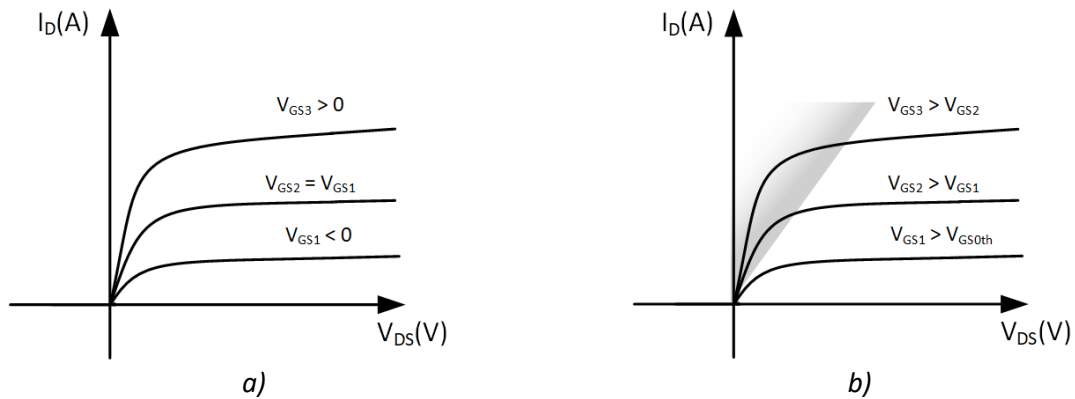
Rodziny charakterystyk wyjściowych tranzystorów z kanałem typu n indukowanym (tranzystor normalnie wyłączony) oraz z kanałem wbudowanym (tranzystor normalnie załączony) zostały przedstawione odpowiednio na Rys. 2.13a) i Rys. 2.13b). Można tu zauważyć, że wraz ze wzrostem napięcia sterującego V_{GS} (powyżej napięcia progowego V_{GSth} – większego od 0 - dla tranzystora z kanałem indukowanym, rośnie prąd drenu I_D . Dla tranzystora z kanałem wbudowanym, w przypadku braku napięcia sterującego tranzystor przewodzi, a jego wyłączenie następuje przy ujemnych wartościach napięciu wejściowym zgodnie z charakterystykami przejściowymi/bramkowymi (Rys. 2.12).

Istotną różnicą w charakterystykach tranzystorów typu FET względem charakterystyk tranzystorów bipolarnych jest fakt, iż niskich napięć V_{DS} w zakresie $V_{DS} < |V_{GS} - V_{GSth}|$ charakterystyki wyjściowe mają charakter zbliżony do rezystancyjnego i w tym niewielkim obszarze możemy traktować tranzystor jako rezystor o rezystancji proporcjonalnej do napięcia V_{GS} na bramce. Prąd drenu w tym zakresie można opisać zależnością:

$$I_D = K_{FETind} \left[(V_{GS} - V_{GSth})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right], \quad (2.14)$$

przy czym K_{FETind} zależy od parametrów tranzystora.

W tym zakresie, również można tranzystor połowy wykorzystywać jako łącznik (podobnie do tranzystora BJT pracującego w nasyceniu) – pokazano to na Rys. 2.13b przy pomocy szarego obszaru; stan łącznika wyłączonego uzyskuje się gdy $V_{GS} < V_{GSth}$.



Rys. 2.13. Charakterystyki wyjściowe tranzystorów MOSFET: a) tranzystor normalnie załączony (z kanałem wbudowanym lub inaczej z kanałem zubożonym); b) tranzystor normalnie wyłączony (z kanałem indukowanym lub inaczej z kanałem wzbogaconym).

Podobny obszar istnieje analogicznie dla tranzystora z kanałem wbudowanym (celowo niezaznaczonym na rysunku). Należy zaznaczyć, iż zakreślony obszar (podobnie jak same charakterystyki) ma charakter poglądowy i jest pewnym uproszczeniem rzeczywistych zjawisk.

Dla wartości V_{DS} powyżej omówionego zakresu, charakterystyka dla każdego z napięć GS zaczyna przyjmować kształt linii poziomej, co odpowiada pracy tranzystora jako źródła prądu – jest to obszar pracy aktywnej, która jest wykorzystywana np. do budowania wzmacniaczy sygnałów analogowych.

Parametry dynamiczne czwórnika admitancyjnego [Y] modelu tranzystora polowego

Tranzystory polowe są sterowane napięciowo można zatem opisać je równaniami czwórnika typu admitancyjnego. W tym wypadku prądy: wejściowy I_1 i wyjściowy I_2 czwórnika są funkcjami napięć: wejściowego V_1 i wyjściowego V_2 :

$$\Delta I_1 = y_{11}\Delta V_1 + y_{12}\Delta V_2 \quad (2.15)$$

$$\Delta I_2 = y_{21}\Delta V_1 + y_{22}\Delta V_2$$

Dla tranzystora unipolarnego: V_1 – napięcie bramka-źródło, I_1 – prąd bramki, V_2 – napięcie dren-źródło, I_2 – prąd drenu, dlatego możemy zapisać:

$$\begin{aligned} \Delta I_G &= y_{11}\Delta V_{GS} + y_{12E}\Delta V_{DS} \\ \Delta I_D &= y_{21}\Delta V_{GS} + y_{22}\Delta V_{DS} \end{aligned} \quad (2.16)$$

gdzie wartości parametrów y_{xx} tranzystora można zdefiniować następująco:

$y_{11} = \Delta I_G / \Delta V_{GS}$ dla $V_{DS} = \text{const}$; - dynamiczna konduktancja wejściowa [1/Ω];

$y_{12} = \Delta V_G / \Delta V_{DS}$, dla $V_{GS} = \text{const}$; - dynamiczna konduktancja przejściowa [1/Ω];

$y_{21} = \Delta I_D / \Delta V_{GS}$, dla $V_{DS} = \text{const}$; - dynamiczna transkonduktancja [1/Ω];

$y_{22} = \Delta I_D / \Delta V_{DS}$, dla $V_{GS} = \text{const}$. - dynamiczna konduktancja wyjściowa [1/Ω].

Ponieważ prąd bramki I_G jest pomijalnie mały można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że konduktancja wejściowa $y_{11} = 0$ i konduktancja przejściowa $y_{12} = 0$.

Transkonduktancja y_{21} nazywana jest często nachyleniem charakterystyki bramkowej S (*ang. steepness*). Aby uzyskać większe wartości S kanał powinien być krótki i szeroki. Najczęściej kanał ma długość od 1 do 10 μm , a grubość izolatora pod bramką około 0,1 μm . Jednak nie jest możliwe nieograniczone skracanie i zwiększania szerokości kanału.

Dynamiczną konduktancję wyjściową y_{22} wyznacza się z charakterystyki wyjściowej. W zakresie pracy nieliniowej dynamiczna konduktancja wyjściowa jest bardzo mała i zależy od zmiany długości kanału pod wpływem zmiany napięcia drenu. Im krótszy kanał, tym większa względna zmiana jego długości dla tych samych przyrostów napięcia V_{DS} , a więc większa konduktancja y_{22} . Zamiast parametru y_{22} często używana jest jego odwrotność $r_{DS} = 1/y_{22}$. Ten parametr to dynamiczna rezystancja wyjściowa.

Czasami do opisu tranzystora unipolarnego stosowany jest parametr zwany wzmocnieniem, oznaczony jako μ , który jest zdefiniowany zależnością:

$$\mu = -\frac{\Delta V_{DS}}{\Delta V_{GS}} \quad \text{dla } I_D = \text{const.} \quad (2.17)$$

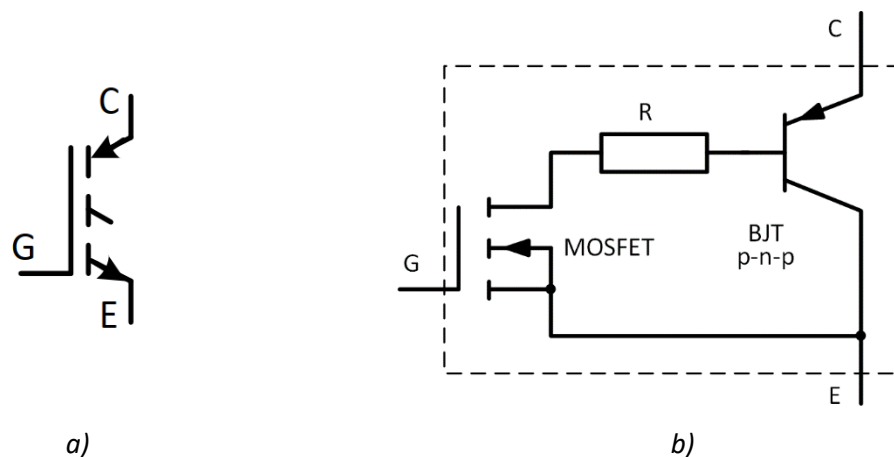
Znak "minus" w równaniu oznacza, że przyrosty ΔV_{DS} i ΔV_{GS} są przeciwnego znaku. Związek pomiędzy parametrami przyrostowymi μ oraz S i r_{DS} można opisać równaniem:

$$\mu = S \cdot r_{DS}. \quad (2.18)$$

Podobnie jak w przypadku tranzystorów złączowych JFET, parametrami dynamicznymi tranzystorów MOS są: nachylenie charakterystyki bramkowej S (*ang. steepness*), konduktancja wyjściowa y_{22} lub rezystancja wyjściowa r_{DS} i wzmocnienie μ . Te parametry dla tranzystorów typu FET można wyznaczyć na podstawie charakterystyk, podobnie jak dla tranzystorów BJT.

Tranzystory IGBT

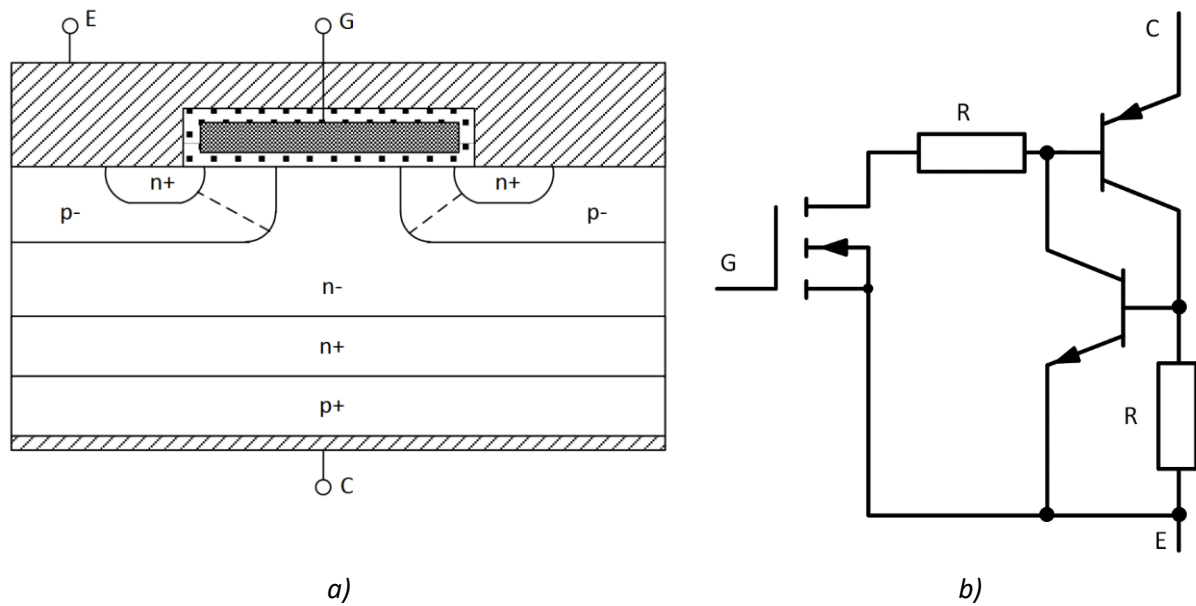
Tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (IGBT) łączy w sobie zalety tranzystora bipolarnego (niewielki spadek napięcie kolektor-emiter w stanie przewodzenia) i tranzystora polowego (sterowanie tranzystora sygnałem napięciowym). Oznaczenie wyprowadzeń na symbolu graficznym tranzystora IGBT przedstawiono na Rys. 2.14a, natomiast wewnętrzną uproszczoną budowę tego elementu pokazano na Rys. 2.14b. Tranzystor ma trzy elektrody: **G – bramkę** (ang. *gate*), **C – kolektor** (ang. *collector*), **E – emiter** (ang. *Emitter*). Jest to element składający się z dwóch odpowiednio połączonych ze sobą struktur: w obwodzie sterującym (wejściowym) jest tranzystor MOS z kanałem indukowanym, a w obwodzie obciążenia (wyjściowym) tranzystora bipolarny **p-n-p**. Z faktu zastosowania tranzystor BJT o strukturze p-n-p emiter tranzystora BJT to kolektor tranzystora IGBT, a kolektor tranzystora BJT to emiter tranzystora IGBT.



Rys. 2.14. Tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (IGBT): a) symbol, b) uproszczony schemat zastępczy

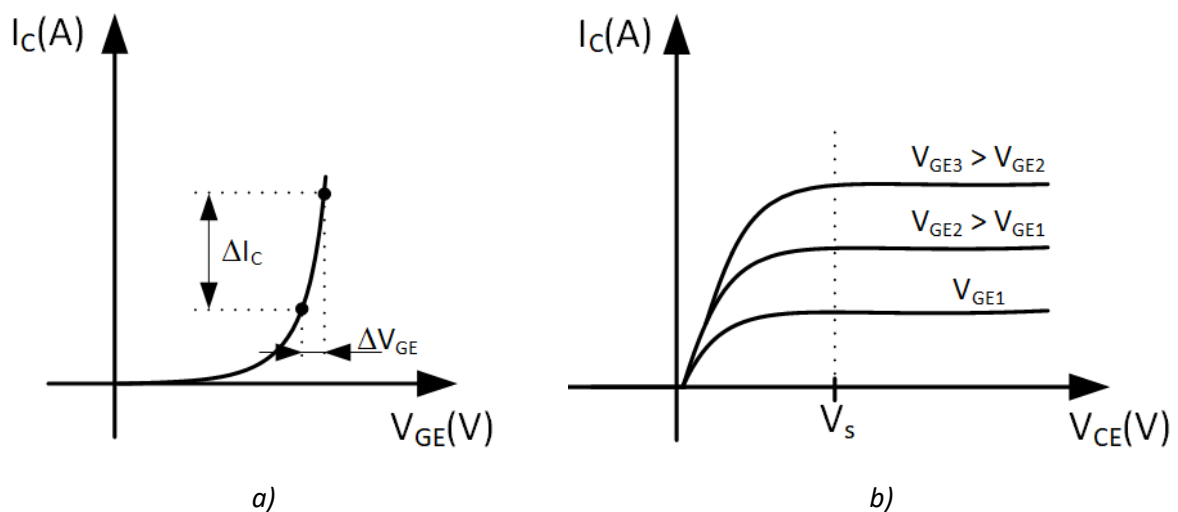
Przekrój wewnętrznej struktury tranzystora IGBT pokazano na Rys. 2.15a. Gdy tranzystor znajduje się w stanie "wyłączenia", dodatnie napięcie kolektor- emiter polaryzuje złącze **p-n** w kierunku zaworowym i prąd kolektora nie płynie. Jeżeli pomiędzy bramkę (**G**) i emiter (**E**) zostanie przyłożone dodatnie napięcie, to kanał **p** będzie wzbogacany swobodnymi elektronami z obszaru **n** (linia przerywana na Rys. 2.15a. Ciągłość ładunku tego samego znaku (minus) spowoduje, że pomiędzy kolektorem i emitorem zacznie przepływać prąd. Tranzystor MOS jest w stanie "załączenia", zapewniając w ten sposób stan "przewodzenia" (załączenia) bipolarnego tranzystora **p-n-p**.

Rys. 2.15b przedstawia bardziej szczegółowy schemat zastępczy tranzystora IGBT, nieco inny niż na Rys. 2.14b, ponieważ w rzeczywistości wejściowy tranzystor **MOS** jest bocznikowany przez pasożytniczy tranzystor BJT **n-p-n** powstający w procesie produkcji elementu. Ten pasożytniczy element bipolarny **n-p-n** w połączeniu z wyjściowym tranzystorem **p-n-p** tworzą strukturę tyrystora, który można wysterować tak, że ze stanu wyłączenia „blokowania” natychmiast przejdzie do stanu "przewodzenia". Zjawisko to jest znane jako efekt "zatrzaśnięcia się" (ang. *latch-up*) tranzystora IGBT. Wystąpienie tego zjawiska powoduje niekorzystne, z punktu widzenia zastosowania tranzystora, utracenie kontroli nad jego wyłączaniem. W nowoczesnych strukturach tranzystorów IGBT praktycznie wyeliminowano tę wadę, stan "zatrzaśnięcie" tranzystora można zaobserwować tylko, gdy przekroczona zostanie maksymalna dopuszczalna stromość przełączanych napięć.



Rys. 2.15. Przekrój przez strukturę tranzystora IGBT.

Podobnie jak w przypadku opisywanych wcześniejszych typów tranzystorów, także tranzystor IGBT ma odpowiednie charakterystyki: przejściową (Rys. 2.16a) oraz wyjściową (Rys. 2.16b)



Rys. 2.16 Charakterystyki tranzystora IGBT: a) przejściowa $I_C=f(V_{GE})$. b) wyjściowa $I_C=f(V_{CE})$

Charakterystyka przejściowa ($I_C=f(V_{GE})$ przy $V_{CE} = const$) jest charakterystyką liniową w szerokim zakresie zmian prądu kolektora. Parametrem dynamicznym opisującym charakterystykę przejściową tranzystora jest nachylenie charakterystyki S (ang. *steepness*), opisaną wzorem:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{GE}} \text{ dla } V_{CE} = const . \quad (2.19)$$

Nachylenie charakterystyki przejściowej ma wymiar mA/V i jest wyznaczone z charakterystyki przejściowej tranzystora.

Skrócenie czasów załączania i wyłączenia zmniejsza straty energii w urządzeniu (iloczyn chwilowych wartości prądu oraz napięcia powoduje wydzielanie się w strukturze krzemu energii, która nie jest dostarcza do odbiornika – zatem jest to energia strata), bo skraca się czas, w którym tranzystor IGBT jest w stanie aktywnym. Z drugiej jednak strony szybkie załączania powodują znaczne przetężenia prądu kolektora podczas załączania (ze względu na nieidealną diodę zwrotną) i przepięcia w przebiegu U_{CE} podczas wyłączenia (ze względu na indukcyjności pasywnicze).

Proces załączania. Do obwodu wejściowego VGE przyłożone jest źródło napięcia startującego jak pokazano na Rys. 2.17. Ze względu na rezystancję wewnętrzną źródła sygnału i pojemność wewnętrzną tranzystora (pojemnościowy charakter tranzystora MOSFET wewnątrz IGBT) prawdziwe napięcie bramka-emiter V_{GE} będzie narastać wolniej niż napięcie źródła. Kiedy to napięcie przekroczy wartość progowa V_{GE} , prąd kolektora zacznie narastać. Przedział czasu mierzony od momentu, kiedy chwilowe napięcie sterujące osiąga 10% wartości maksymalnej do momentu, kiedy chwilowy prąd kolektora osiągnie 10% wartości maksymalnej ustalonej nazywany jest czasem opóźnienia załączania – $t_{d(on)}$. Przedział czasu mierzony od momentu, kiedy chwilowy prąd kolektora zmienia się od 10% do 90% wartości maksymalnej ustalonej nazywa się czasem narastania – t_{rise} . Straty energii podczas załączania tranzystora (straty łączeniowe) są największe w czasie narastania prądu kolektora. Suma czasu opóźnienia $t_{d(on)}$ i czasu narastania t_{rise} nazywa się czasem załączania – t_{on} . Podczas obliczania jednostkowych strat energii należy wziąć pod uwagę, że napięcie kolektor-emiter w procesie załączania, po czasie t_{on} nie osiągnęło wartości końcowej równej około 0 V. W obliczeniach należy również uwzględnić przetężenie prądu kolektora wynikający z obecności diody zwrotnej.

Proces wyłączenia. Przejście tranzystora IGBT ze stanu "ON" (załączony) do stanu "OFF" (wyłączony) ma miejsce, gdy napięcie sterujące staje się ujemne lub równe zero. Przedział czasu mierzony od momentu, kiedy chwilowe napięcie sterujące zmniejszy się do 90% wartości maksymalnej ustalonej do momentu, kiedy chwilowy prąd kolektora osiągnie 90% wartości maksymalnej ustalonej nazywa się czasem opóźnienia wyłączenia – $t_{d(off)}$. Przedział czasu mierzony od momentu, kiedy chwilowy prąd kolektora zmienia się od 90% do 10% wartości maksymalnej ustalonej nazywa się czasem opadania – t_{fall} . Suma czasów $t_{d(off)}$ i t_{fall} to czas wyłączenia – t_{off} . Po przejściu tranzystora ze stanu "ON" do stanu "OFF" przez tranzystor przez pewien czas płynie niewielki prąd kolektora, nazywany prądem końcowym lub ogonowym (*ang. tail current*). Wartość jego zależy od rezystancji wewnętrznej obwodu sterującego: im mniejsza rezystancja, tym większa wartość prądu. W celu zminimalizowania strat spowodowanych prądem ogonowym i uniezależnienia ich od temperatury struktury elementu, dla częstotliwości łączy od 10 kHz do 20 kHz (przy których dominują straty łączeniowe) stosuje się moduły o jednorodnej (jednolitej) strukturze krzemowej.

2.2. Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego

Ćwiczenie nr 1: Elementy elektroniczne - tranzystory

Materiały obowiązujące na teście i w trakcie realizacji ćwiczenia:

- 1) Wprowadzenie teoretyczne do tranzystorów
- 2) Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego
- 3) Znajomość obsługi stanowiska laboratoryjnego NI Elvis (Industrial Electronics)

Cel ćwiczenia: Zapoznanie się z podstawowymi właściwościami elementów półprzewodnikowych jakimi są tranzystory – w tym bipolarne, polowe oraz IGBT, z ich charakterystykami prądowo-napięciowymi, wejściowymi, przejściowymi i wyjściowymi, a także z właściwościami dynamicznymi. Dodatkowo, w zakres ćwiczenia wchodzi zapoznanie się z podstawowymi układami wykorzystującymi tranzystory takimi jak: łącznik, podstawowe układy wzmacniaczy

1. Wyznaczanie rodziny charakterystyk wejściowych $I_B = f(V_{BE})$ oraz wyjściowych $I_C = f(V_{CE})$ tranzystora BJT.

Aby wykreślić statyczną charakterystykę wejściową tranzystora bipolarnego należy podłączyć połączyć układ jak na Rys. . Należy stopniowo zmieniać prąd źródła napięcia od 0 do 10V monitorując jednocześnie wartość prądu bazy, który nie powinien przekroczyć 1mA. Napięcie kolektor-emiter ustawiane za pomocą źródła +E jest stałe (nie należy zmieniać jego wartość). Dla kolejnych wartości **prądu bazy** (ustalanego poprzez zmianę napięcia E) należy mierzyć **napięcie baza-emiter** – te wartości należy zapisywać w tabeli (Tabela 2.2.2) – posłużą do wykreślenia charakterystyki. Jednocześnie można monitorować kształt charakterystyki wejściowej za pomocą narzędzia „Graph Plotter” (oprogramowanie Elvis NI). Charakterystyka wejściowa powinna zostać wykonana dla (przynajmniej) dwóch różnych stałych wartości napięcia kolektor-emiter podanych przez prowadzącego (

Tabela 2.2.1).

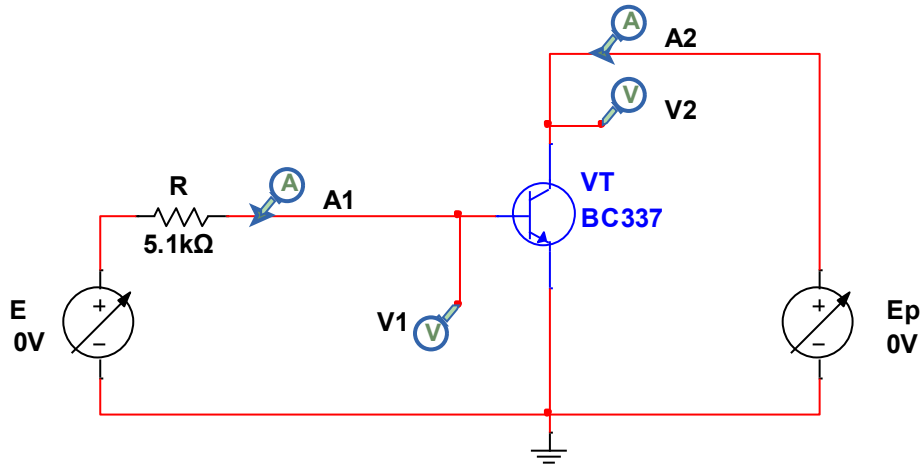
Aby wykreślić charakterystykę wyjściową, w tym samym układzie pomiarowym (Rys.) należy stopniowo zmieniać napięcie kolektor-emiter od 0 do 10 V (przy użyciu regulowanego źródła napięcia +E lub Ep) przy zachowaniu stałej wartości prądu bazy. Dla kolejnych wartości **napięcia kolektor-emiter** należy mierzyć **prąd kolektora** i zmierzone wartości zapisywać w formie tabeli (Tabela 2.2.2) – posłużą do wykreślenia charakterystyki wyjściowej. Jednocześnie można monitorować charakterystykę wyjściową za pomocą narzędzia „Graph Plotter” (oprogramowanie Elvis NI). Charakterystyka wyjściowa jest wykreślana dla trzech różnych stałych wartości prądu bazy podanych przez prowadzącego (

Tabela 2.2.1).

Uwaga: Podczas mierzenia wartości należy pamiętać o charakterystycznych punktach charakterystyk i ich okolicach należy odpowiednio zwiększyć rozdzielczość pomiarową w celu lepszego odwzorowania kształtu danej charakterystyki!

Tabela 2.2.1. Parametry układu dla badań tranzystora BJT.

N	1	2	3	4	5
V_{CE} [V]	2	4	6	8	10
I_B [mA]	0.2	0.4	0.6	0.8	1
R_L [k Ω]	10				
R [k Ω]	5.1				



Rys. 2.2.1. Schemat układu do pomiaru charakterystyk tranzystora BJT

Na podstawie otrzymanych danych należy:

- porównać charakterystyki wejściowe tranzystora na jednym wspólnym wykresie oraz na ich podstawie określić
- porównać charakterystyki wyjściowe tranzystora na jednym wspólnym wykresie oraz na ich podstawie określić
- określić następujące parametry dynamiczne tranzystora: h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} w wybranych dwóch punktach pracy tranzystora
- omówić różnice pomiędzy rzeczywistymi wynikami, a teoretycznymi

Tabela 2.2.2. Dane pomiarowe do wykreślenia charakterystyki wejściowej i wyjściowej $I=f(V)$ tranzystora BJT.

N	I_B [A]	V_{BE} [V]	V_C [mA]	V_{CE} [V]
1				
2				
3				

2. Wyznaczanie rodziny charakterystyk: bramkowych $I_D = f(V_{GS})$ oraz wyjściowych $I_D=f(V_{GS})$ tranzystorów FET.

Poniższa część instrukcji dotyczy tranzystorów zarówno JFET jak MOSFET.

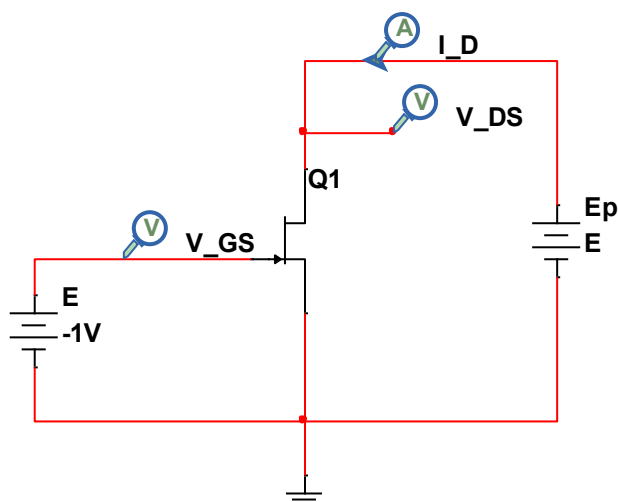
Aby wykreślić statyczną charakterystykę wejściową tranzystora polowego należy podłączyć połączyć układ jak Rys. 2. Należy stopniowo zmieniać napięcie E od 0V do 3.5V dla tranzystora typu MOSFET (lub od -4V do 0.7V JFET). Napięcie dren-źródło ustawiane za pomocą źródła +E jest stałe (nie należy zmieniać jego wartość) dla jednej z wartości podanej w Tabela 2.2.3. Dla kolejnych wartości **napięcia bramka-źródło** (ustalanego poprzez zmianę napięcia E) należy mierzyć **prąd drenu** – te wartości należy zapisywać w tabeli (Tabela 2.2.4) – posłużą do wykreślenia charakterystyki przejściowej. Jednocześnie można monitorować kształt charakterystyki wejściowej za pomocą narzędzia „Graph Plotter” (oprogramowanie Elvis NI).

Aby wykreślić charakterystykę wyjściową, w tym samym układzie pomiarowym (Rys.) należy stopniowo zmieniać napięcie dren-źródło od 0 do 10 V (przy użyciu regulowanego źródła napięcia +E lub Ep) przy zachowaniu stałego napięcia bramka-źródło. Dla kolejnych wartości **napięcia dren-źródło** należy mierzyć **prąd kolektora** i zmierzone wartości zapisywać w formie tabeli (Tabela 2.2.4) – posłużą do wykreślenia charakterystyki wyjściowej. Jednocześnie można monitorować charakterystykę wyjściową za pomocą narzędzia „Graph Plotter” (oprogramowanie Elvis NI). Charakterystyka wyjściowa jest wykreślana dla trzech różnych stałych wartości napięcia bramka-źródło podanych przez prowadzącego (Tabela 2.2.3)

Uwaga: Podczas mierzenia wartości należy pamiętać o charakterystycznych punktach charakterystyk i ich okolicach należy odpowiednio zwiększyć rozdzielczość pomiarową w celu lepszego odwzorowania kształtu danej charakterystyki!

Tabela 2.2.3. Dane do wykreślenia charakterystyki przewodzenia.

N	1	2	3	4	5	6	7	8
Typ tranzystora	Tranzystor JFET (z kanałem zubożonym)				Tranzystor MOSFET (z kanałem wzbożonym)			
V_{DS} [V]	0.1	0.2	0.3	0.4	2	3	4	5
V_{GS} [V]	od -4 do 1				od 0 do 3.5			
V_{GS_OUT} [V]	-2	-1.7	-1.5	-1.3	3.4	3.5	3.6	3.7



Rys. 2.2.2. Schemat układu do pomiaru charakterystyk tranzystora FET

Na podstawie otrzymanych danych należy (dla każdego typu tranzystora FET):

- Porównać wykresić charakterystykę bramkową tranzystora polowego oraz aproksymować ją odpowiednią funkcją
- porównać charakterystyki wyjściowe tranzystora na jednym wspólnym wykresie oraz wyznaczyć rezystancje w zakresie pracy rezystancyjnej.
- określić następujące parametry dynamiczne tranzystora: γ_{21} , γ_{22} , w wybranych dwóch punktach pracy tranzystora
- omówić różnice pomiędzy rzeczywistymi wynikami, a teoretycznymi

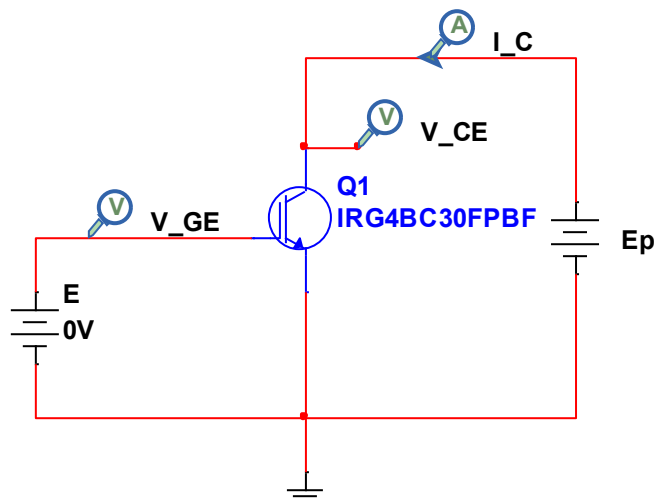
Tabela 2.2.4. Dane pomiarowe do wykreślenia charakterystyki wejściowej i wyjściowej $I=f(V)$ tranzystora BJT.

N	V_{GS} [V]	I_D [mA]	V_{DS} [V]	I_D [mA]
1				
2				
3				

3. **Wyznaczanie rodziny charakterystyk: bramkowych $I_C = f(V_{GE})$ oraz wyjściowych $I_C=f(V_{CE})$ tranzystora IGBT.**

Aby wykreślić statyczną charakterystykę wejściową tranzystora polowego należy podłączyć połączyć układ jak Rys. Rys. . Należy stopniowo zmieniać napięcie E od 0V do 10V. Napięcie kolektor-emiter ustawiane za pomocą źródła +E (Ep) jest stałe (nie należy zmieniać jego wartość) i wynosi 10 V. Dla kolejnych wartości **napięcia bramka-emiter** (ustalanego poprzez zmianę napięcia E) należy mierzyć **prąd kolektora** – te wartości należy zapisywać w tabeli (Tabela 2.2.6) – posłużą do wykreślenia charakterystyki przejściowej. Jednocześnie można monitorować kształt charakterystyki wejściowej za pomocą narzędzia „Graph Plotter” (oprogramowanie Elvis NI).

Aby wykreślić charakterystykę wyjściową, w tym samym układzie pomiarowym (Rys. Rys.) należy stopniowo zmieniać napięcie kolektor-emiter od 0 do 10 V (przy użyciu regulowanego źródła napięcia +E lub Ep) przy zachowaniu stałego napięcia bramka-emiter. Dla kolejnych wartości **napięcia kolektor-emiter** należy mierzyć **prąd kolektora** i zmierzone wartość zapisywać w formie tabeli (Tabela 2.2.6) – posłużą do wykreślenia charakterystyki wyjściowej. Jednocześnie można monitorować charakterystykę wyjściową za pomocą narzędzia „Graph Plotter” (oprogramowanie Elvis NI). Charakterystyka wyjściowa jest wykreślana dla trzech różnych stałych wartości napięcia bramka-emiter (Tabela 2.2.5).



Rys. 2.2.3. Schemat układu do pomiaru charakterystyk tranzystora FET

Tabela 2.2.5 Dane do badania tranzystora IGBT

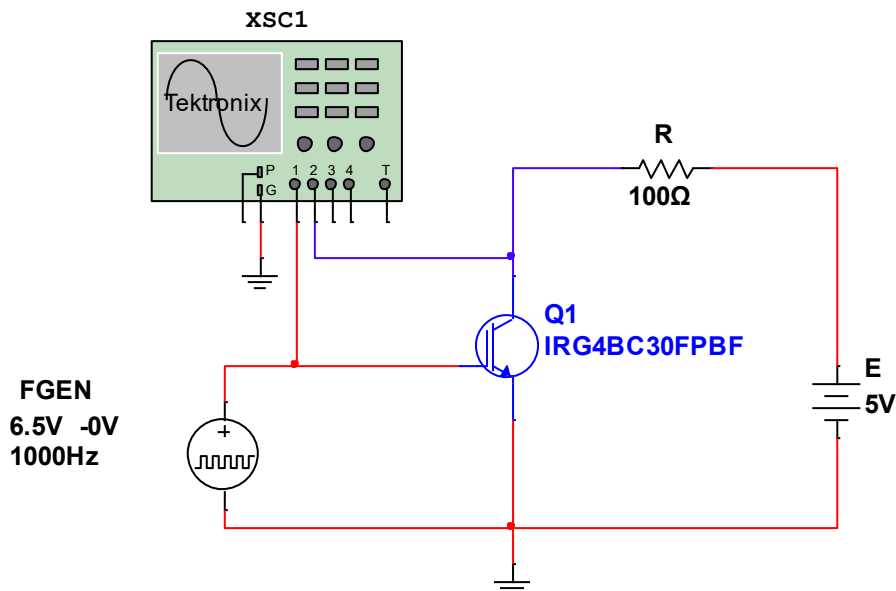
<i>N</i>	1	2	3	4
Napięcie bramki tranzystora V_{GE} [V]	5	5.1	5.2	5.3

Tabela 2.2.6. Dane pomiarowe do wykreślenia charakterystyki wejściowej i wyjściowej $I=f(V)$ tranzystora BJT.

N	V_{GE} [V]	I_D [mA]	V_{CE} [V]	I_C [mA]
1				
2				
3				

4. Obserwacja i analiza właściwości dynamicznych tranzystora IGBT

Aby zbadać stany dynamiczne tranzystora IGBT należy zbudować układ testowy tak jak na Rys. 2.2.4 Schemat układu do badania właściwości dynamicznych tranzystora IGBT. W przypadku wykonywania symulacji (w odróżnieniu od stanowiska laboratoryjnego) można dodać wirtualną sondę prądową którą można wpiąć w obwód kolektora i podpiąć np. pod CH3 oscyloskopu cyfrowego.



Rys. 2.2.4 Schemat układu do badania właściwości dynamicznych tranzystora IGBT

Źródło napięcia prostokątnego FGEN o $f = 1\text{kHz}$ i poziomach napięcia 0-6.5V jest sygnałem sterującym tranzystora IGBT. Prąd kolektora jest ograniczony przez rezystancję $R=100\ \Omega$, a obwód kolektora zasilony jest z 5V.

Należy:

- Zaobserwować zmianę stanów pracy tranzystora
- Przedstawić osobno (w odpowiednim przybliżeniu) proces załączania oraz proces wyłączenia
- Zmierzyć czasy t_{on} oraz t_{off}

2.3. Zawartość raportu z przebiegu ćwiczenia

Laboratorium podstaw elektroniki SK2A – Ćw. 2 Elementy elektroniczne - tranzystory					
Rodzaj studiów:	Stacjonarne		Kierunek studiów:	Elektrotechnika	
Grupa dziekańska:		Data i godzina:		Nr zespołu:	
Skład zespołu:					

1. Wykreślanie charakterystyk prądowo-napięciowych wejściowych tranzystora BJT

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednie opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Porównanie charakterystyk na wspólnych wykresie dla dwóch różnych napięć Kolektor-Emiter:

1b. Wykreślanie charakterystyk prądowo-napięciowych wyjściowych tranzystora BJT

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednio opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Porównanie charakterystyk na wspólnych wykresie dla 3 różnych prądów bazy:

1c Wyznaczanie współczynników czwórnika dla tranzystora w układzie WE w dwóch wybranych punktach pracy

Obliczenia:

- $h_{11}, h_{21}, h_{12}, h_{22}$ dla punktu pracy nr 1

- $h_{11}, h_{21}, h_{12}, h_{22}$ dla punktu pracy nr 2

2a. Wykreślanie charakterystyki przejściowej tranzystora JFET

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednio opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Wykreślenie charakterystyki przejściowej:

Aproksymacja charakterystyki funkcją kwadratową:

2b. Wykreślanie wyjściowych charakterystyk prądowo-napięciowych tranzystora JFET

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednio opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Porównanie charakterystyk na wspólnych wykresie dla 3 różnych napięć bramka źródło :

Obliczenia:

- Rezystancji kanału:
- y_{21}, y_{22} dla punktu pracy 1
- y_{21}, y_{22} dla punktu pracy 2

3a Wykreślanie charakterystyki przejściowej tranzystora MOSFET

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednie opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Wykreślenie charakterystyki przejściowej:

Aproksymacja charakterystyki funkcją kwadratową:

3b. Wykreślanie wyjściowych charakterystyk prądowo-napięciowych tranzystora MOSFET

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednie opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Porównanie charakterystyk na wspólnych wykresie dla 3 różnych napięć bramka-źródło:

Obliczenia:

- Rezystancji kanału:
- y_{21}, y_{22} dla punktu pracy 1
- y_{21}, y_{22} dla punktu pracy 2

3a. Wyznaczenie charakterystyki przejściowej tranzystora IGBT

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednie opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Wykreślenie charakterystyki:

3b. Wyznaczenie charakterystyki wyjściowej tranzystora IGBT

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednio opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Wykreślenie charakterystyki dla 3 różnych napięć bramka-emiter:

4. Analiza procesów łączeniowych tranzystora IGBT

Schemat analizowanego układu:

Przedstawienie procesów załączania i wyłączania tranzystora IGBT na dwóch osobnych przebiegach

(a)	(b)

5. Porównanie - wnioski.

2.4. Przykładowe pytania sprawdzające

- Jak wyglądają charakterystyki wejściowe i wyjściowe tranzystora BJT typu pnp oraz npn
- Proszę obliczyć napięcie na złączu CE dla podanych parametrów obwodu
- Jakiego rodzaju ładunki biorą udział w przewodzeniu prądu występuje w tranzystorach BJT
- Jak wyglądają charakterystyki przejściowe i wyjściowe tranzystora MOSFET
- Jaka elektryczna wartość wejściowa steruje jaką wartością wyjściową w tranzystorach MOSFET a jakie w BJT
- Proszę omówić budowę struktury tranzystora BJT
- Proszę omówić budowę struktury tranzystora MOSFET
- Jaki element elektroniczny powstaje naturalnie wewnątrz struktury MOSFET
- Proszę omówić mechanizm powstawania strat łączeniowych w tranzystora IGBT
- Czym jest tranzystor IGBT – jakie technologie tranzystorowe są wykorzystane i w jaki sposób
- Do jakich zastosowań nadają się tranzystory BJT, MOSFET a do jakich IGBT – proszę uzasadnić
- Omówić pracę tranzystorów BJT oraz MOSFET pracujących w nasyceniu i obszarze pracy liniowej

Odpowiedzi na pytania znajdują się w rozdziale 2.1.