

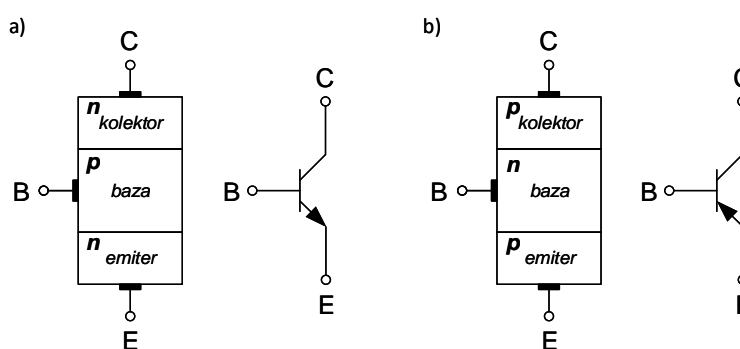
5. TRANZYSTOR BIPOLARNY

5.1. BUDOWA TRANZYSTORA I ROZPŁYW PRĄDÓW

Nazwa tranzystor wywodzi się z języka angielskiego: TRANSfer resISTOR, co po polsku oznacza element transformujący rezystancję. Tak nazwano pierwszy półprzewodnikowy element wzmacniający, będący funkcjonalnym odpowiednikiem lampy próżniowej (triody). Odkrycia dokonano w 1948 r.¹. Termin bipolarny oznacza, że istotną rolę w działaniu tego przyrządu odgrywają jednocześnie oba rodzaje nośników (dziury i elektrony).

Tranzystor jest to trójkońcówkowy element półprzewodnikowy zdolny do wzmacniania sygnałów prądu stałego i zmiennego. Każdy tranzystor jest zatem wzmacniaczem².

Na rysunku 5.1 przedstawiono dwie struktury tranzystora bipolarnego różniące się kolejnością umiejscowienia półprzewodnika o określonym typie n lub p. Jak widać, możliwe są dwie kombinacje: tranzystor typu n-p-n i p-n-p.



Rys. 5.1. Dwie struktury tranzystora bipolarnego i ich symbole elektryczne (stosowane na schematach): a) tranzystor n-p-n, b) tranzystor p-n-p.

Końcówki tranzystora nazwano: E - emiter, B - baza, C - kolektor. Takie same nazwy noszą obszary (warstwy) półprzewodnika sąsiadujące ze sobą w jego strukturze. Emiter jest pierwszą warstwą, która dostarcza nośników mniejszościowych (emituje) do drugiej warstwy, tj. bazy. W bazie przebiegają podstawowe (bazowe) procesy transmisji. Natomiast trzecia warstwa - kolektor - zbiera te nośniki, które zostały wstrzyknięte z emitera do bazy i zdołały dotrzeć do kolektora.

Tranzystor ma dwa złącza p-n. Są to złącza: baza-emiter (złącze B-E) i baza-kolektor (złącze B-C).

Rozpływ prądów w tranzystorze.

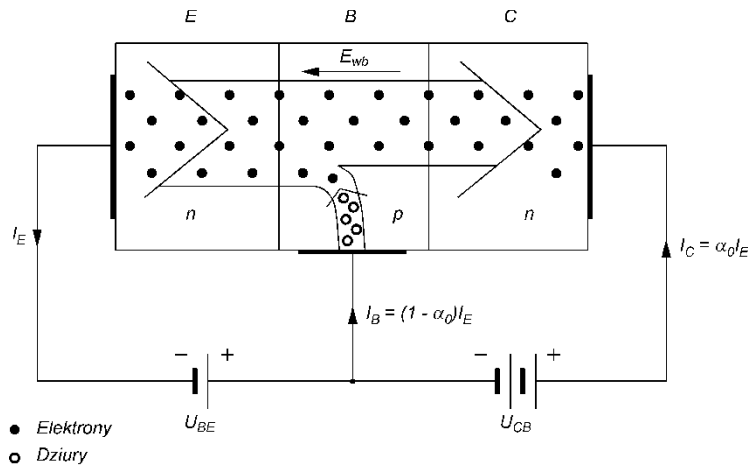
Złącze baza-emiter (B-E) jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze baza-kolektor (B-C) w kierunku zaporowym. Przy takiej polaryzacji tranzystor pełni funkcję elementu czynnego, tj. może służyć do wzmacniania sygnałów elektrycznych. Jest to praca w tzw. **obszarze aktywnym**.

Wskutek polaryzacji złącza B-E w kierunku przewodzenia z emitera do bazy są wstrzykiwane elektrony (rys.5.2). W bazie istnieje wbudowane pole elektryczne E_{wb} spowodowane nierównomiernym rozkładem koncentracji domieszek. Elektrony wstrzyknięte z emitera do bazy

¹ Odkrycia dokonali w Stanach Zjednoczonych J. Bardeen i W.H. Brattain, ściśle biorąc w grudniu 1947 r., a opublikowano to w 1948 r. W. Shockley w 1948 roku przedstawił teorię działania tranzystora. W 1957 r. zespołowi Bardeen, Brattain i Shockley przyznano nagrodę Nobla.

² Należy zwrócić uwagę na definicję wzmacniacza, gdyż nie jest ona wbrew pozorom banalna, a mianowicie: „wzmacniacz jest przyrządem (urządzeniem) umożliwiającym sterowanie większej mocy mniejszą mocą”.

są unoszone przez to pole w kierunku kolektora³. Po przejściu przez bazę elektrony dostają się do warstwy zaporowej złącza B-C, w której istnieje silne pole elektryczne „wymiatające” te elektrony dalej do obwodu kolektora.



Rys. 5.2. Rozpływ prądów w tranzystorze

Jak wcześniej powiedziano, złącze B-E jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Elektrony w emiterze są nośnikami większościowymi, więc swobodnie przechodzą przez złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia (złącze B-E). Po znalezieniu się w bazie (półprzewodnik typu p) wstrzyknięte elektrony są nośnikami mniejszościowymi i tu znowu istnieją dla nich dogodne warunki do dalszego transportowania. W tranzystorze dryftowym wbudowane pole elektryczne E_{wb} przenosi je w pobliże złącza B-C. Złącze to jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, zatem łatwo transportowane są nośniki mniejszościowe, a właśnie takimi są owe elektrony, które przebyły drogę z emitera poprzez bazę do złącza B-C. Stąd złącze B-C natychmiast przechwytuje elektrony, przenosząc je do obszaru kolektora.

Nie wszystkie jednak elektrony, które zostały wstrzyknięte do bazy przez złącze B-E, dotrą do złącza B-C. Część z nich rekombinuje w bazie. Ubytek dziur spowodowany rekombinacją musi być uzupełniany przez dopływ nośników do bazy. Zatem, z zewnętrznego obwodu bazy dopływa prąd uzupełniający straty ładunku dodatniego. Stąd można napisać podstawowe równanie dotyczące rozptywu prądów w tranzystorze:

$$I_E = I_B + I_C \quad (5.1)$$

Równanie to obowiązuje również dla małych przyrostów prądu:

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_C \quad (5.2)$$

Współczynniki wzmocnienia prądowego.

Definiowane są współczynniki wzmocnienia prądowego:

$$\alpha_0 = \frac{I_C}{I_E} \quad (5.3)$$

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad (5.4)$$

gdzie: α_0 - współczynnik wzmocnienia prądowego dla prądu stałego w konfiguracji pracy

³ Omawiany jest tranzystor dryftowy. Należy jednak zwrócić uwagę, że istnienie pola wbudowanego nie jest warunkiem koniecznym do pracy tranzystora. W tranzystorach bezdryftowych transport nośników w bazie (od emitera do kolektora) odbywa się wskutek dyfuzji. W tranzystorach dryftowych składowa dyfuzyjna jest mniejsza, ale również występuje. Istnienie pola wbudowanego wpływa jednak znacząco na parametry tranzystora.

wspólnej bazy WB⁴, α - współczynnik wzmocnienia prądowego dla składowych zmiennych w konfiguracji pracy WB.

Współczynnik wzmocnienia prądowego α_0 jest nieco mniejszy od jedności. Najczęściej $\alpha_0=0,980\div 0,995$. Wynika to z faktu, że odzwierciedla on stosunek prądów o porównywalnych wielkościach, przy czym prąd emitera I_E jest zawsze największym prądem tranzystora bipolarnego.

Współczynnik wzmocnienia prądowego można również zdefiniować następująco:

$$\beta_0 = \frac{I_C}{I_B} \quad (5.5)$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (5.6)$$

gdzie: β_0 - współczynnik wzmocnienia prądowego dla prądu stałego w konfiguracji pracy wspólnego emitera WE⁵, β - współczynnik wzmocnienia prądowego dla składowych zmiennych w konfiguracji pracy WE.

Przekształcając zależności (5.1) i (5.2) z uwzględnieniem (5.3) ÷ (5.6) określić można związki między współczynnikami wzmocnień prądowych w konfiguracjach WB i WE:

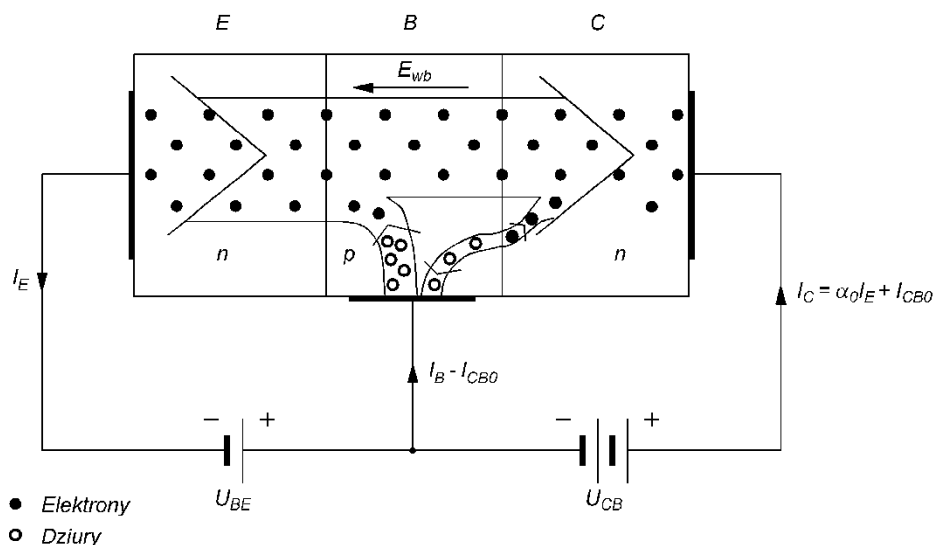
$$\alpha_0 = \frac{\beta_0}{1 + \beta_0} \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (5.7)$$

$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (5.8)$$

Ze wzoru (5.8) wynika, że współczynniki wzmocnienia β_0 i β są zawsze znacznie większe od jedności, gdyż np. dla $\alpha_0 = 0,98$, $\beta_0 = 0,98/(1 - 0,98) \approx 50$, natomiast dla $\alpha_0 = 0,995$, $\beta_0 = 0,995/(1 - 0,995) \approx 200$.

Rozpływ prądów w tranzystorze z uwzględnieniem prądu I_{CB0} .

Na rysunku 5.3 przedstawiającym rozpływ prądów w tranzystorze występuje jeszcze jedna składowa prądu bazy, którą jest prąd I_{CB0} . Jest to tzw. prąd zerowy złącza kolektor-baza.



Rys. 5.3. Rozpływ prądów w tranzystorze z uwzględnieniem prądu zerowego I_{CB0}

⁴ Konfiguracja pracy wspólnej bazy (WB) jest to taki układ połączeń tranzystora, w którym prądem wejściowym jest prąd emitera, a prądem wyjściowym prąd kolektora. Mowa o tym będzie dalej.

⁵ Konfiguracja pracy wspólnego emitera (WE) jest to taki układ połączeń tranzystora, w którym prądem wejściowym jest prąd bazy, a prądem wyjściowym prąd kolektora. Mowa o tym będzie dalej.

Prąd zerowy jest prądem nośników mniejszościowych generowanych w obszarze warstwy zaporowej złącza B-C spolaryzowanego w kierunku zaporowym. Para elektron-dziura powstająca w warstwie zaporowej jest natychmiast „wymiatana”, przy czym elektron podąża do kolektora, a dziura do bazy. Prąd I_{CB0} dodaje się do prądu kolektora, a odejmuje od prądu bazy. Zatem:

$$I_C = \alpha_0 I_E + I_{CB0} \quad (5.9)$$

Wykorzystując związki (5.1) i (5.8) można określić współczynniki wzmocnienia przy uwzględnieniu prądu zerowego I_{CB0} w postaci jak niżej:

$$\alpha_0 = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_E} \quad \beta_0 = \frac{I_C - I_{CB0}}{I_B + I_{CB0}} \quad (5.10)$$

W przypadku składowych zmiennych istnienie prądu I_{CB0} nie wpływa na zmianę wyrażen (5.4) i (5.6).

Prąd zerowy I_{CB0} jako prąd nasycenia złącza B-C przy jego polaryzacji w kierunku zaporowym silnie zależy od temperatury. Prąd ten podwaja swą wartość wraz ze wzrostem temperatury o 10°C . Niemniej, w przypadku temperatury złącza mniejszej od $70\text{-}80^\circ\text{C}$ prąd I_{CB0} tranzystorów krzemowych małej mocy może być pominięty.

5.2. STANY PRACY TRANZYSTORA

Wspomniano już, że tranzystor spełnia funkcje elementu wzmacniającego (jest w stanie aktywnym) przy polaryzacji złącza B-E w kierunku przewodzenia i złącza B-C w kierunku zaporowym. Wynikają z tego zasady rozkładu potencjałów na poszczególnych końcówkach tranzystora:

$$V_C > V_B > V_E \text{ – dla tranzystorów n-p-n}$$

$$V_C < V_B < V_E \text{ – dla tranzystorów p-n-p}$$

Słownie można to określić następująco: aby tranzystor n-p-n pracował w stanie aktywnym potencjał kolektora musi być większy od potencjału bazy a potencjał bazy musi być większy od potencjału emitera oraz aby tranzystor p-n-p pracował w stanie aktywnym potencjał kolektora musi być mniejszy od potencjału bazy a potencjał bazy musi być mniejszy od potencjału emitera.

Wielkości tych potencjałów odzwierciedlają napięcia mierzone względem jakiegoś punktu wspólnego (najczęściej względem zerowego potencjału masy układu).

Tabela 5.1. Stany pracy tranzystora

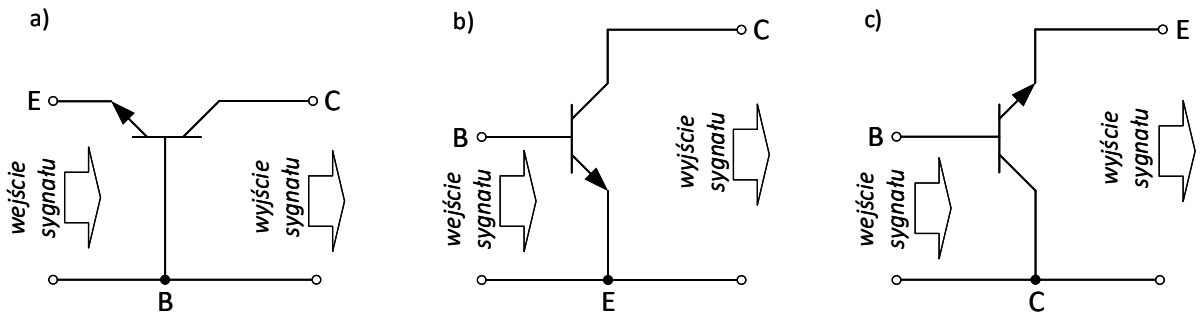
Stan	Polaryzacja złącza	
	B-E	B-C
aktywny	przewodzenia	zaporowo
nasycenia	przewodzenia	przewodzenia
zatkania	zaporowo	zaporowo
inwersyjnie aktywny	zaporowo	przewodzenia

Tranzystor może pracować jeszcze w innych stanach pracy, które charakteryzowane są poprzez różne polaryzacje złącz. Przedstawiono to w tabeli 5.1. Oprócz wspomnianego już stanu aktywnego, w tabeli pojawiły się inne określenia stanów. Stan nasycenia i stan zatkania są charakterystyczne dla wykorzystania tranzystora w technice impulsowej i cyfrowej. Stan inwersyjnie aktywny odwraca funkcje końcówek. Końcówka kolektora pełni funkcję emitera i

odwrotnie. Jest to stan wykorzystywany bardzo rzadko z uwagi na złe parametry elektryczne (szczególnie małe wzmocnienia).

5.3. KONFIGURACJE PRACY TRANZYSTORA

Tranzystor ma trzy końcówki (elektrody), z których jedna służy jako wejście sygnału, druga jako wyjście, a trzecia jest końcówką wspólną. Do uzyskania wzmocnienia trzeba, aby baza była zawsze jedną z końcówek wejściowych, co powoduje, że możliwe są trzy konfiguracje pracy tranzystora (rys. 5.4):



Rys.5.4. Trzy konfiguracje pracy tranzystora bipolarnego; a) konfiguracja wspólnej bazy WB, b) konfiguracja wspólnego emitera WE, c) konfiguracja wspólnego kolektora WC

WB - konfiguracja **wspólnej bazy**, wejście sygnału jest między emiterem a bazą, a wyjście pomiędzy kolektorem a bazą; baza jest elektrodą wspólną;

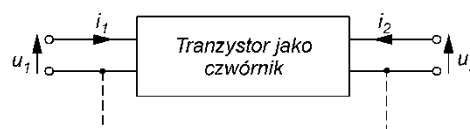
WE - konfiguracja **wspólnego emitera**, wejście sygnału jest między bazą a emiterem, a wyjście między kolektorem a emiterem, emiter jest elektrodą wspólną;

WC - konfiguracja **wspólnego kolektora**, wejście sygnału jest między bazą a kolektorem, wyjście między emiterem a kolektorem, kolektor jest elektrodą wspólną.

Rysunek 5.4 należy traktować poglądowo. Prezentuje on ideę transmisji sygnałów (a więc przebiegów zmiennych) w tranzystorach w różnych konfiguracjach. Rysunek ten nie obejmuje innych elementów układu (choćby biernych), które muszą towarzyszyć tranzystorom, aby pracowały one poprawnie.

5.4. CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE

W każdej konfiguracji tranzystor ma różne właściwości i różne charakterystyki. Tranzystor traktować można jako czwórnik (rys.5.5) o napięciu wejściowym U_1 , prądzie wejściowym I_1 , napięciu wyjściowym U_2 i prądzie wyjściowym I_2 .



Rys.5.5. Tranzystor jako czwórnik

Pełny opis takiego czwornika zapewnia para równań, przy czym można te równania pogrupować na różne sposoby i tak:

równania impedancyjne

$$U_1 = f(I_1, I_2)$$

$$U_2 = f(I_1, I_2)$$

równania admitancyjne

$$I_1 = (U_1, U_2)$$

$$I_2 = (U_1, U_2)$$

równania mieszane

$$U_1 = f(I_1, U_2)$$

$$I_2 = f(I_1, U_2)$$

Najbardziej dogodny jest układ równań mieszanych, gdyż te równania najdokładniej odzwierciedlają rzeczywiste warunki pracy tranzystora bipolarnego (sterowanie prądowe na wejściu, sterowanie napięciowe na wyjściu). Dlatego rozpatrzone będą charakterystyki statyczne określone na podstawie równań mieszanych.

Charakterystyka statyczna jest to graficzne przedstawienie związku jednej wielkości zależnej i dwu niezależnych, przy czym jedna z wielkości niezależnych traktowana jest jako parametr.

Na podstawie równań mieszanych można określić rodzinę czterech charakterystyk statycznych:

- charakterystyki wejściowe $U_1 = f(I_1)$ przy $U_2 = \text{const}$,
- charakterystyki zwrotne $U_1 = f(U_2)$ przy $I_1 = \text{const}$,
- charakterystyki przejściowe $I_2 = f(I_1)$ przy $U_2 = \text{const}$,
- charakterystyki wyjściowe $I_2 = f(U_2)$ przy $I_1 = \text{const}$.

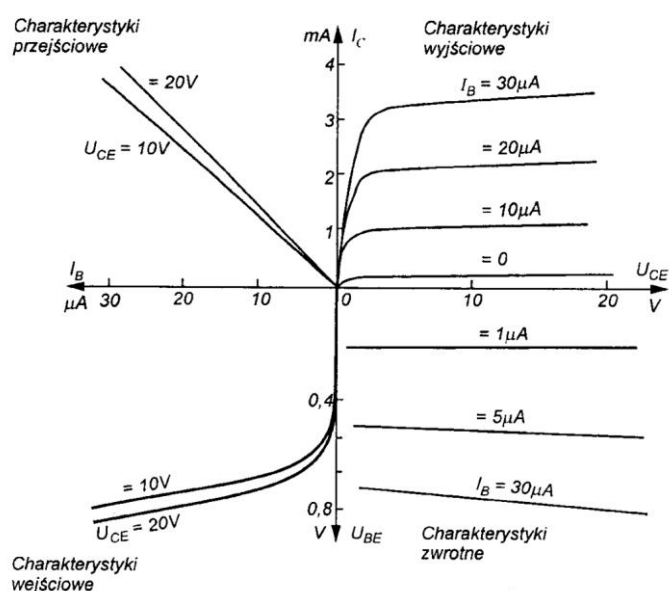
Dla każdej z trzech konfiguracji pracy tranzystora wielkości I_1 , I_2 , U_1 , U_2 oznaczają zupełnie różne prądy i różne napięcia (na przykład I_1 jest prądem emitera w konfiguracji WB, a w konfiguracji WE jest prądem bazy). Można zatem stwierdzić, że każda konfiguracja pracy tranzystora posiada swoją rodzinę charakterystyk statycznych.

Poniżej omówione zostaną jedynie charakterystyki statyczne dla konfiguracji WE.

Dla tej konfiguracji zgodnie z rys. 5.6 mamy: $I_1 = I_B$, $U_1 = U_{BE}$, $I_2 = I_C$, $U_2 = U_{CE}$.

Interesują nas zatem rodziny charakterystyk:

- charakterystyka wejściowa $U_{BE} = f(I_B)$ przy $U_{CE} = \text{const}$,
- charakterystyka zwrotna $U_{BE} = f(U_{CE})$ przy $I_B = \text{const}$,
- charakterystyka przejściowa $I_C = f(I_B)$ przy $U_{CE} = \text{const}$,
- charakterystyka wyjściowa $I_C = f(U_{CE})$ przy $I_B = \text{const}$.



Rys. 5.6. Charakterystyki tranzystora w konfiguracji WE.

Uwaga: jest to złożenie czterech wykresów, które mają po jednej osi wspólnej.

Wszystkie cztery rodziny charakterystyk przedstawiono na rys. 5.6. Charakterystyki te mają

sens ogólny, jednak dla lepszej orientacji wyskalowano osie prądów i napięć w wartościach typowych dla tranzystorów małej mocy.

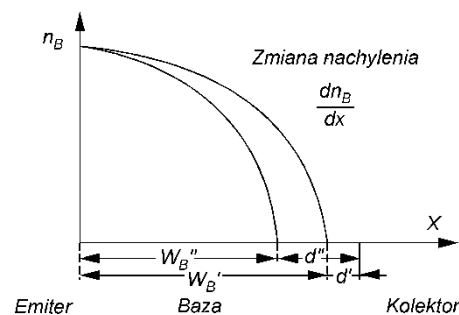
Informacja dodatkowa

Wyjaśnienie przebiegu charakterystyk

Wyjaśnienie przebiegu charakterystyk w pewnych zakresach ich zmienności wymaga wcześniejszego omówienia zjawiska Early'ego.

Zjawisko Early'ego jest to zjawisko **modulacji efektywnej grubości bazy**.

Złącze B-C tranzystora jest spolaryzowane zaporowo. Grubość warstwy zaporowej tego złącza zmienia się w funkcji przyłożonego napięcia U_{BC} (patrz rys.5.7). Przy zwiększaniu się napięcia U_{BC} grubość złącza zwiększa się i wnika ono głębiej w obszar bazy. Od strony złącza B-C maleje zatem efektywna grubość bazy. Termin „efektywna” należy rozumieć w ten sposób, że ta część bazy, która jest wykorzystywana przy silnej polaryzacji wstecznej złącza B-C, jest mniejsza niż w warunkach słabszej polaryzacji tego złącza. Nie następują natomiast, co jest oczywiste, żadne zmiany wymiarów fizycznych bazy.



Rys.5.7. Zjawisko Early'ego w przypadku tranzystora dryftowego; n_B - koncentracja elektronów w bazie; W_B' - grubość bazy dla U'_{CB} , W_B'' - grubość bazy dla U''_{CB} , d'' - grubość warstwy zaporowej dla U'_{CB} , d'' - grubość warstwy zaporowej dla U''_{CB} , $U'_{CB} < U''_{CB}$

Na granicy bazy i rozszerzonego złącza B-C następuje natychmiastowe „wymiatanie” elektronów w kierunku kolektora i ich koncentracja w tym miejscu wynosi zero. Zatem, zmniejszenie efektywnej grubości bazy powoduje, że zmiana koncentracji nośników od wartości maksymalnej (przy złączu B-E, gdzie następuje wstrzykiwanie) do wartości zerowej (na granicy złącza B-C) może nastąpić z większym gradientem. Zwiększenie gradientu koncentracji nośników (dn_B/dx) to zwiększenie składowej dyfuzyjnej prądu bazy. Ponieważ w tranzystorze dryftowym istnieje niewielka składowa dyfuzyjna (dominuje składowa unoszenia), dlatego zjawisko Early'ego ma ograniczony zasięg, niemniej nie jest do pominięcia. Wzrost składowej dyfuzyjnej jest to wzrost prądu płynącego przez tranzystor. Zatem wzrost polaryzującego napięcia wyjściowego (które głównie odkłada się na złączu B-C jako spolaryzowanym zaporowo) powoduje przy tym samym napięciu i prądzie wejściowym wzrost prądu wyjściowego.

Charakterystyka wejściowa. Kształt przebiegu jest zbliżony do charakterystyki diody przy polaryzacji w kierunku przewodzenia. Spowodowane jest to polaryzacją złącza B-E tranzystora w kierunku przewodzenia. Różnice w przebiegu dla różnych napięć U_{CE} spowodowane są występowaniem zjawiska Early'ego. Przy większym U_{CE} maleje efektywna grubość bazy i mniej nośników wstrzykiwanych z emitera do bazy rekombinuje w jej objętości, przez co prąd I_B maleje

(można porównać dla każdego $U_{BE}=\text{const}$).

Charakterystyka wyjściowa. W początkowym zakresie charakterystyka prądu kolektora szybko wzrasta. Tranzystor wychodzi ze stanu nasycenia i przy $U_{CE}>U_{BE}$ pracuje w obszarze aktywnym. Ten zakres pracy charakteryzuje się natomiast niemal stałą wartością prądu kolektora, która jest proporcjonalna do wartości prądu bazy ($I_C=\beta_0 I_B$) będącego na wykresie parametrem. Przyczyną pewnego nachylenia charakterystyk w tym zakresie jest występowanie zjawiska Early'ego. Wzrost wartości napięcia U_{CE} zmieniając efektywną grubość bazy zwiększa gradient koncentracji nośników w bazie, zwiększając tym samym składową dyfuzyjną prądu bazy, a następnie zwiększając wartość prądu kolektora.

Charakterystyka przejściowa. Charakterystyka ta w przybliżeniu jest liniowa, gdyż $I_C=\beta_0 I_B$. Napięcie U_{CE} wpływa na tę zależność przez zmianę efektywnej grubości bazy (podobnie jak w przypadku charakterystyki wejściowej).

Charakterystyka zwrotna. Gdyby charakterystyka ta była linią prostą równoległą do osi U_{CE} , można by mówić o braku wpływu napięcia U_{CE} na U_{BE} (oddziaływania zwrotnego z wyjścia na wejście tranzystora). Fakt istnienia tego oddziaływania jest zjawiskiem negatywnym. Mówi się, że tranzystor w pewnych warunkach jest „przezroczysty”. Na skutek modulacji efektywnej grubości bazy istnieje (choć niewielkie) oddziaływanie zwrotne w tranzystorze. Prąd bazy jest parametrem charakterystyki zwrotnej. Przy wzroście napięcia U_{CE} (a więc i U_{BE}) i zmniejszaniu się efektywnej grubości bazy oraz, co za tym idzie, zmniejszaniu ilości rekombinujących nośników w zmniejszonej objętości bazy stanowiących składową prądu bazy, prąd bazy ma tendencję malejącą. Aby zachować wartość parametru $I_B=\text{const}$, musi nastąpić wzrost U_{BE} celem zwiększenia ilości wstrzykiwanych nośników. Aby prąd rekombinacji był ten sam w mniejszej objętości bazy, musi wpływać ich więcej. Stąd istnieje pewne pochylenie charakterystyki zwrotnej.

Koniec informacji dodatkowej

5.5. OGRANICZENIA OBSZARU PRACY TRANZYSTORA

Na rysunku 5.8 przedstawiono w polu charakterystyk wyjściowych tranzystora pewne wielkości ograniczające obszar pracy tranzystora. Można wymienić następujące istotne parametry statyczne wpływające na ograniczenie obszaru pracy aktywnej tranzystora: maksymalna moc admisyjna P_a , maksymalny prąd kolektora $I_{C\text{max}}$, maksymalne napięcie kolektor emiter $U_{CE\text{max}}$, prąd zerowy I_{CE0} , napięcie nasycenia $U_{CE\text{sat}}$. Poniżej omówiono bardziej szczegółowo poszczególne parametry.

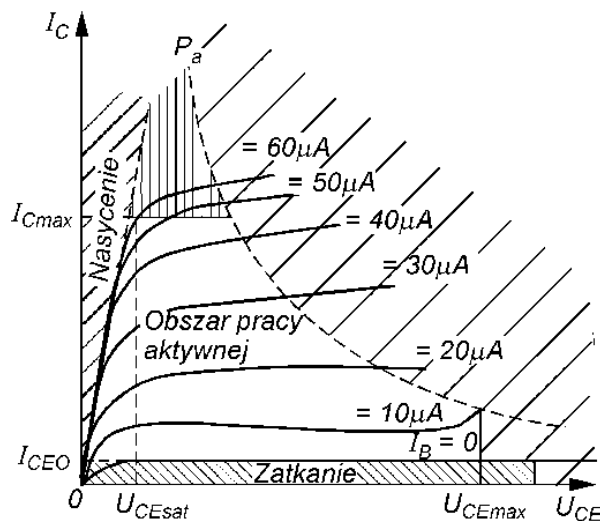
Maksymalna moc admisyjna P_a . Moc admisyjna określa maksymalną wartość iloczynu prądu kolektora I_C i napięcia kolektor emiter U_{CE} , przy którym tranzystor może pracować w sposób długotrwały. Krzywa mocy admisyjnej w polu charakterystyk wyjściowych jest hiperbolą $I_C=P_a/U_{CE}$ (używany jest termin - *hiperbola mocy admisyjnej*).

Maksymalny prąd kolektora $I_{C\text{max}}$. Prąd maksymalny $I_{C\text{max}}$ jest ograniczeniem wynikającym często nie z nadmiernej ilości ciepła wydzielanego w tranzystorze (jego wartość jest mniejsza niż wartość wynikająca z równania hiperboli mocy admisyjnej), lecz ze zmianą współczynnika wzmocnienia prądowego β_0 . W przypadku dużych prądów kolektora następuje bowiem spadek współczynnika wzmocnienia prądowego do wartości nie akceptowanych w zastosowaniach tranzystora i gwarantowanych przez producenta.

Prąd zerowy I_{CE0} . Prąd zerowy I_{CE0} jest to prąd w obwodzie emiter-kolektor przy prądzie bazy $I_B=0$. Związek tego prądu ze znanym już prądem I_{CB0} jest następujący:

$$I_{CE0}=(\beta_0+1) I_{CB0}$$

Jest to prąd graniczny między obszarem aktywnym a obszarem zatkania tranzystora.



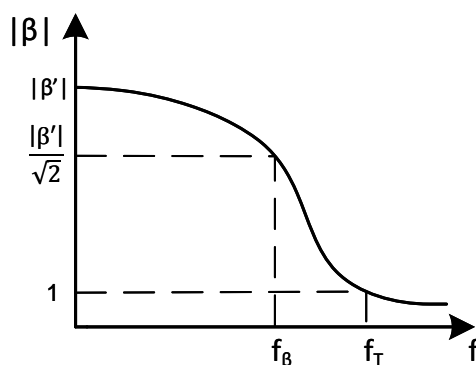
Rys.5.8. Ograniczenia obszaru pracy tranzystora

Napięcie nasycenia U_{CEsat} . Napięcie nasycenia U_{CEsat} jest wartością ograniczającą minimalne wartości napięcia U_{CE} przy pracy tranzystora w obszarze aktywnym. Rozgranicza ono zatem zakres aktywny i zakres nasycenia tranzystora. Ogólnie definiując: napięcie U_{CEsat} jest to napięcie kolektor emiter U_{CE} zmierzone przy określonym prądzie kolektora i prądzie bazy spełniającym warunek nasycenia $I_B \beta_0 > I_C$. Dlatego przy podawaniu U_{CEsat} powinny być podane wartości prądów I_B i I_C , przy jakich mierzono to napięcie.

5.6. OGRANICZENIA CZĘSTOTLIWOŚCIOWE TRANZYSTORA

Sam tranzystor nie ma ograniczeń w przenoszeniu sygnału w dolnym zakresie częstotliwości. W tym zakresie częstotliwości ograniczenia spowodowane są właściwościami układu w jakim on pracuje np. stosowaniem kondensatorów sprzęgających - ale nie jest to przedmiotem rozważań w tym miejscu i dlatego na rys.5.9 w dolnym zakresie częstotliwości nie ma zakrzywienia w dół charakterystyki częstotliwościowej.

Bardzo istotny wpływ na wielkość możliwej do osiągnięcia górnej częstotliwości granicznej układu ma fakt zależności współczynnika wzmocnienia prądowego samego tranzystora od częstotliwości.



Rys. 5.9. Częstotliwości graniczne tranzystora bipolarnego w konfiguracji pracy WE zaznaczone na charakterystyce częstotliwościowej

Definiowane są następujące częstotliwości graniczne tranzystora bipolarnego pracującego w konfiguracji wspólnego emitera WE (rys.5.9):

f_{β} – częstotliwość graniczna przy której moduł współczynnika wzmocnienia prądowego β tranzystora w konfiguracji WE maleje o 3 dB, zatem osiąga wartość $|\beta'|/\sqrt{2}$ czyli 0,707 wartości maksymalnej $|\beta'|$,

f_T - częstotliwość graniczna przy której moduł współczynnika wzmocnienia prądowego β tranzystora w konfiguracji WE równa się jedności co oznacza, że po przekroczeniu tej częstotliwości tranzystor przestaje wzmacniać a jedynie tłumi sygnał.

Definiowana jest również jedna częstotliwość graniczna tranzystora pracującego w konfiguracji wspólnej bazy WB, a mianowicie:

f_{α} – częstotliwość graniczna przy której moduł współczynnika wzmocnienia prądowego α tranzystora w konfiguracji WB maleje o 3 dB, zatem osiąga wartość $|\alpha'|/\sqrt{2}$ czyli 0,707 wartości maksymalnej $|\alpha'|$,

Istnieje następujący związek:

$$f_T = f_{\beta} \beta = f_{\alpha} \alpha \quad (5.11)$$

z którego wynika uszeregowanie wielkościowe częstotliwości granicznych:

$$f_{\beta} \ll f_T < f_{\alpha} \quad (5.12)$$

Ze wzoru (5.11) wynika też bardzo ważny wniosek, że częstotliwość graniczna tranzystora w konfiguracji wspólnego emitera jest o ok. β razy mniejsza od częstotliwości granicznej w konfiguracji wspólnej bazy. Prowadzi to do stwierdzenia, że z punktu widzenia wzmacniania sygnałów wysokich częstotliwości konfiguracja wspólnej bazy jest najkorzystniejsza.