

5. Tranzystory

Diody półprzewodnikowe były stosowane już w latach dwudziestych XX wieku. Znacznie później, bo dopiero w 1948 roku, wynaleziono **tranzystor** (ang. *transfer resistor transistor*) – trójskładnikowy element półprzewodnikowy. Stało się to możliwe tylko dzięki dobremu zrozumieniu fizycznych właściwości półprzewodników niesamoistnych i dostatecznemu opanowaniu problemów technologicznych, związanych z kontrolowanym domieszkowaniem półprzewodników.

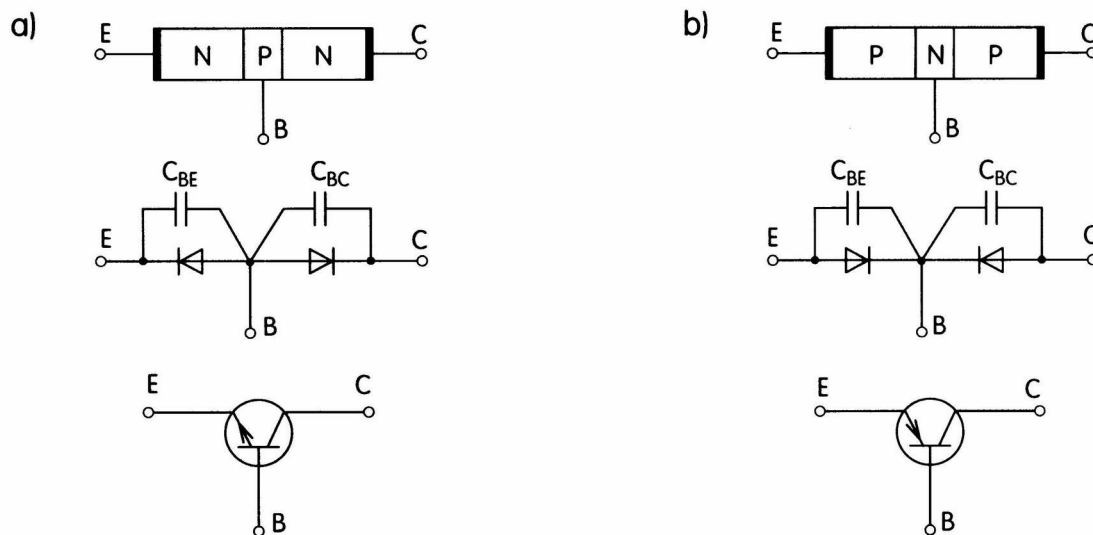
Ze względu na zasadę działania wyróżnia się dwa rodzaje tranzystorów:

- **tranzystory bipolarne**, których działanie jest oparte na przepływie zarówno ładunków większościowych, jak i mniejszościowych (prądu elektronowego, jak i dziurowego) i stąd przedrostek „bi-” w nazwie;
- **tranzystory unipolarne**, zwane też polowymi, w których przepływ prądu zachodzi za pośrednictwem nośników tylko jednego znaku (ładunków większościowych) i stąd przedrostek „uni-”.

5.1. Tranzystory bipolarne

Tranzystory bipolarne są aktywnymi, trójwarstwowymi elementami półprzewodnikowymi umożliwiającymi sterowanie przepływem dużej mocy za pomocą sygnału małej mocy.

Obecnie, ze względu na technologię wytwarzania złączy, są produkowane tranzystory warstwowe. **Tranzystor warstwowy** otrzymuje się w wyniku złożenia dwu złączy PN, przykładowo w konfiguracji NPN – głównie tranzystory krzemowe (rys. 5.1a). Jeżeli obszar P jest zbyt szeroki, to oba złącza działają niezależnie od siebie (jak diody). Jeżeli natomiast obszar P jest odpowiednio wąski, a koncentracja nośników większościowych jest w nim mniejsza niż w warstwach zewnętrznych, to złącza przestają być niezależne i mają specyficzne właściwości. Właściwości te są związane ze zmiennością energii elektronów (lub dziur) od jednego końca tranzystora do drugiego oraz ze zmianami tej energii pod wpływem doprowadzonego napięcia polaryzującego. Inną możliwą konfiguracją warstw jest układ PNP (rys. 5.1b). Obszar wewnętrzny tranzystora

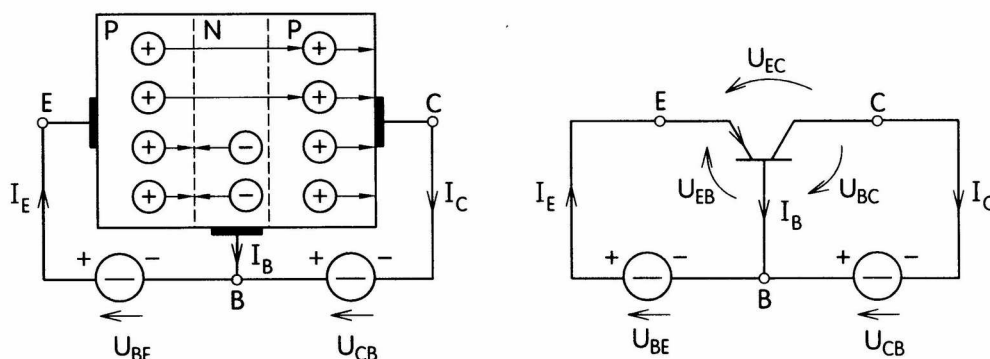


Rys. 5.1. Struktura, model i graficzne symbole tranzystora w obudowie: a) NPN, b) PNP

nazywamy **bazą** (B), a obszary zewnętrzne odpowiednio **emiterem** (E) i **kolektorem** (C). Do obszarów tych są przyłączane metalowe elektrody B, E, C. Zadaniem emitera jest wysyłanie ładunków elektrycznych, a zadaniem kolektora zbieranie ich.

Jeżeli w tranzystorze typu PNP złącze emiterowe zostanie spolaryzowane w kierunku przewodzenia* (rys. 5.2), to na skutek wprowadzenia do obszaru bazy dodatkowych dziur nastąpi zwiększenie prądu kolektora I_C . Bariera potencjału między emiterem a bazą obniży się i pod wpływem napięcia zewnętrznego U_{BE} nastąpi dyfuzyjny przepływ dziur z obszaru emitera do bazy i elektronów w kierunku przeciwnym. Pewna, niewielka liczba dziur ($1 \div 5\%$), które wniknęły z emitera do bazy będzie ulegała rekombinacji z elektronami bazy (czemu odpowiada prąd bazy, I_B), ale ich większość będzie się przemieszczała dalej, a po osiągnięciu złącza baza–kolektor, pod wpływem pola elektrycznego kolektora przejdzie dalej do obszaru kolektora (czemu odpowiada prąd kolektora I_C). Opisane zjawisko przebiega tym łatwiej, im mniejsza jest grubość bazy i mniejsza koncentracja nośników w tym obszarze.

Polaryzacja złączy tranzystora NPN jest odmienna od polaryzacji złączy PNP, na co należy zwrócić uwagę.



Rys. 5.2. Tranzystor PNP w stanie aktywnego przewodzenia

* Polaryzacja w kierunku przewodzenia polega na tym, że do obszaru typu P przyłączamy potencjał wyższy (+), a do N potencjał niższy (-).

Między prądami i napięciami tranzystora zachodzą następujące zależności:

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

$$U_{BC} + U_{EB} = U_{EC} \quad (5.2)$$

Podstawową cechą tranzystora jest wzmacnianie sygnału elektrycznego. Właściwości wzmacniające tranzystor wykazuje w zakresie pracy aktywnej normalnej, tzn. gdy złącze E-B jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze B-C w kierunku zaporowym. Właściwa polaryzacja złącza jest związana z typem tranzystora: PNP lub NPN. W stanie pracy aktywnej normalnej występuje proporcjonalność prądów, a mówiąc ściślej, proporcjonalność przyrostów prądów

$$I_C = \alpha I_E \quad (5.3)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (5.4)$$

gdzie: α, β – współczynniki wzmocnienia prądowego tranzystora.

Wartość współczynnika $\alpha = 0,95 \div 0,99$, można przyjąć za stałą. Wartość współczynnika β zawiera się w granicach od 20 do 1000, zależnie od typu tranzystora. Oprócz pracy aktywnej normalnej istnieją inne stany związane z różną polaryzacją złączy E-B i B-C, np. stan zatkania tranzystora wystąpi wówczas, gdy złącza E-B i B-C są spolaryzowane w kierunku zaporowym. Wyróżnia się cztery stany pracy tranzystora, związane z możliwymi wariantami polaryzacji złączy, które zestawiono w tabeli 5.1.

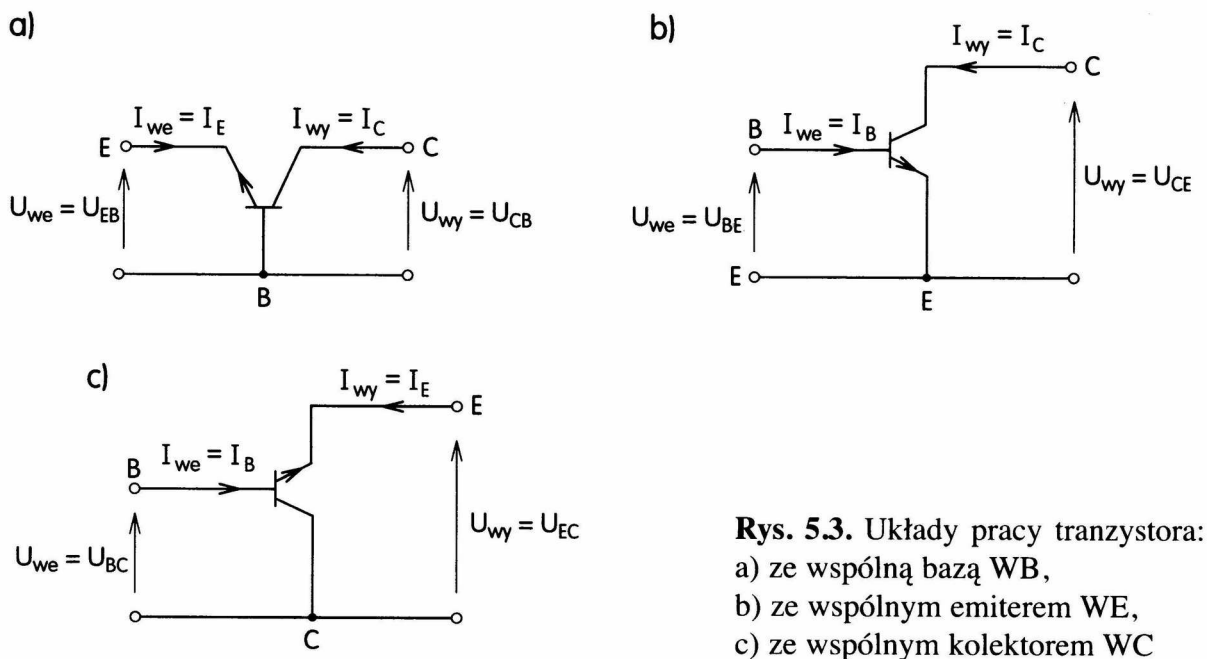
Tabela 5.1

Stany pracy tranzystora bipolarnego i odpowiadające im polaryzacje złączy

Stan pracy	Kierunki polaryzacji złączy	
	emiter-baza	kolektor-baza
Przewodzenie aktywne	przewodzenia	zaporowy
Nasycenie	przewodzenia	przewodzenia
Zatkanie (nieprzewodzenie)	zaporowy	zaporowy
Przewodzenie inwersyjne	zaporowy	przewodzenia

W zależności od sposobu przyłączenia do tranzystora źródła sygnału wejściowego i obciążenia wyróżnia się trzy układy pracy (konfiguracje), charakteryzujące się odpowiednimi właściwościami (rys. 5.3):

- wspólnego emitera WE (jest też stosowane oznaczenie OE) – duże wzmocnienie prądowe ($\beta = I_C/I_B$), napięciowe i mocy, napięcie wyjściowe jest odwrócone w fazie w stosunku do napięcia wejściowego, rezystancja wejściowa jest rzędu kilkuset omów, a wyjściowa kilkudziesięciu kiloomów;
- wspólnej bazy WB (OB) – mała rezystancja wejściowa, a bardzo duża rezystancja wyjściowa, wzmocnienie prądowe $\alpha = I_C/I_E \approx 1$, zaletą jest stabilna praca, często stosowany w obwodach wielkiej częstotliwości;
- wspólnego kolektora WC (OC) – duża rezystancja wejściowa, wzmocnienie napięciowe równe jedności ($U_{CE}/U_{BC} = 1$), duże wzmocnienie prądowe ($I_E/I_B = \beta + 1$).



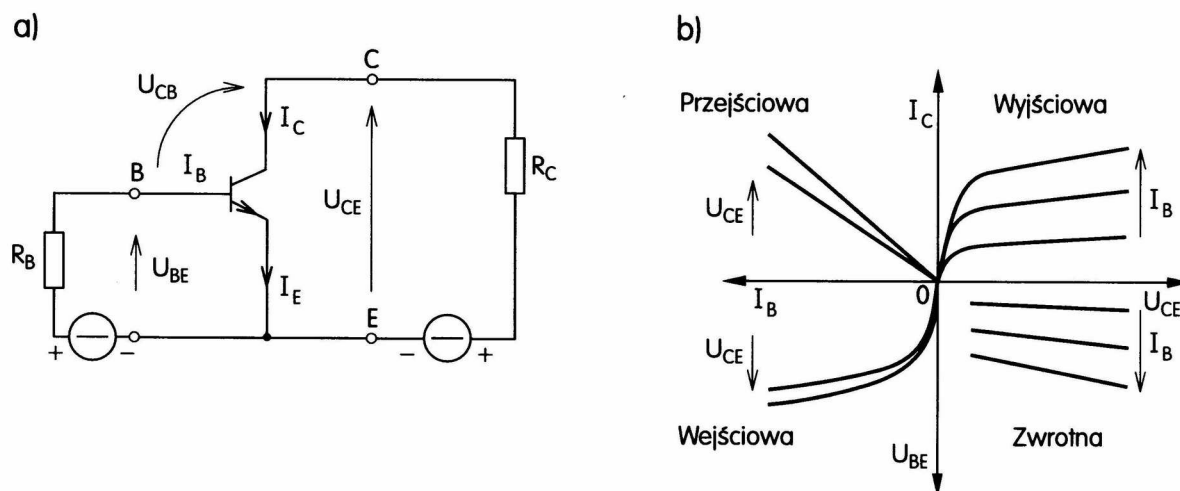
Rys. 5.3. Układy pracy tranzystora:
a) ze wspólną bazą WB,
b) ze wspólnym emiterem WE,
c) ze wspólnym kolektorem WC

Na rysunku 5.4a przedstawiono tranzystor NPN pracujący w układzie wspólnego emitera WE.

Zachowanie się tranzystora w stanach ustalonych opisują charakterystyki statyczne:

- **wejściowa** $U_{we} = f(I_{we})$ przy $U_{wy} = \text{const}$,
- **zwrotna napięciowa** $U_{we} = f(U_{wy})$ przy $I_{we} = \text{const}$,
- **przejściowa prądowa** $I_{wy} = f(I_{we})$ przy $U_{wy} = \text{const}$,
- **wyjściowa** $I_{wy} = f(U_{wy})$ przy $I_{we} = \text{const}$.

W katalogach elementów półprzewodnikowych najczęściej są podawane tylko charakterystyki wejściowa i wyjściowa, ponieważ na ich podstawie można wyznaczyć pozostałe charakterystyki. Każdemu układowi pracy tranzystora odpowiadają ściśle określone charakterystyki. Przykładową rodzinę charakterystyk dla układu WE pokazano na rys. 5.4b.

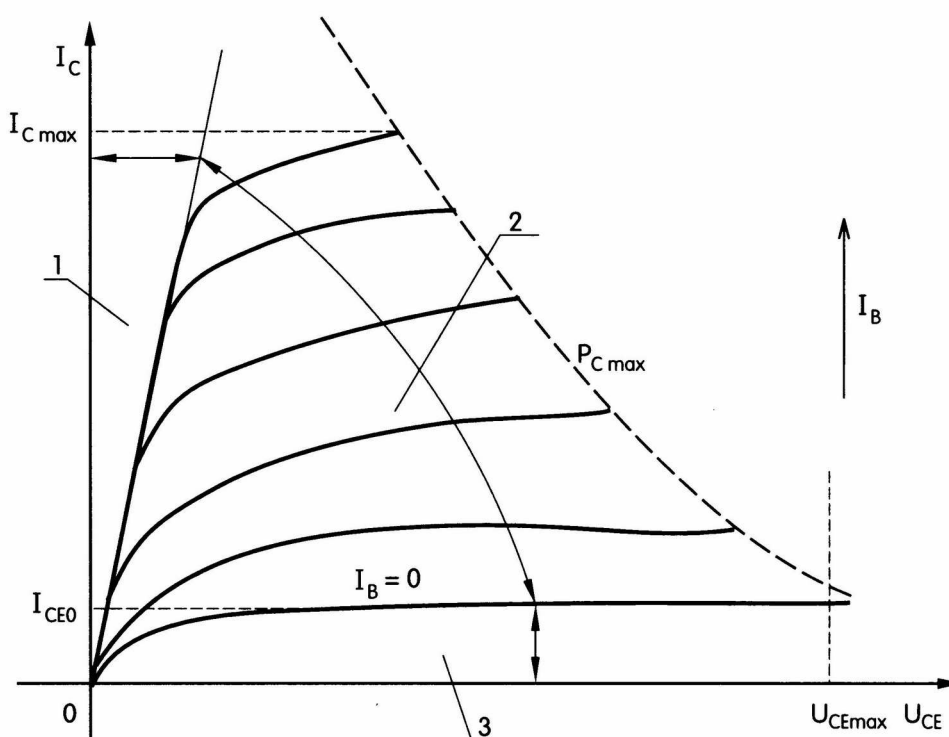


Rys. 5.4. Tranzystor NPN pracujący w układzie WE: a) schemat połączeń, b) rodzina charakterystyk statycznych

Na charakterystykach wyjściowych można wyróżnić stany pracy tranzystora podane w tab. 5.1. Na rysunku 5.5 dla tranzystora NPN pracującego w układzie WE zaznaczono trzy stany (zakresy) pracy, związane z polaryzacją złączy emiter–baza i baza–kolektor. Najczęściej wykorzystuje się zakres aktywnego przewodzenia, w którym złącze emiter–baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze kolektor–baza w kierunku zaporowym. Tranzystor ma wówczas właściwości wzmacniające o współczynniku wzmocnienia prądowego $\beta = I_C/I_B$ (przy $U_{CE} = \text{const}$). Zakres pracy aktywnej jest ograniczony od dołu prądem zerowym I_{CE0} , który jest prądem wstecznym ładunków mniejszościowych (płynącym przez tranzystor w danym układzie pracy przy $I_B = 0$). Zależność prądu kolektora od prądu bazy ma więc postać:

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \quad (5.5)$$

Poniżej krzywej prądu I_{CE0} znajduje się zakres zatkania tranzystora – stan nieprzewodzenia (lub inaczej odcięcia).



Rys. 5.5. Charakterystyka wyjściowa tranzystora bipolarnego

1 –zakres nasycenia, 2 – zakres aktywnej pracy, 3 – zakres zatkania

Należy zwrócić uwagę, że w stanie aktywnym napięcie U_{CE} w dużym zakresie zmian ma niewielki wpływ na wartość prądu I_C , co oznacza, że rezystancja wyjściowa $r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$ przy $I_B = \text{const}$ ma dużą wartość.

Od lewej strony aktywny zakres pracy jest ograniczony obszarem nasycenia. W stanie nasycenia oba złącza są spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Złącze

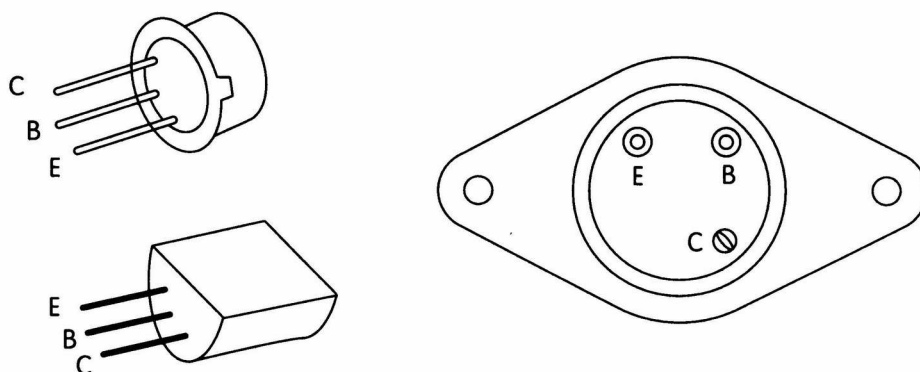
kolektor–baza zaczyna przewodzić, przy przewodzącym drugim złączu, gdy napięcie U_{CE} osiągnie wartość napięcia nasycenia (ok. 0,2 V do kilku woltów). Stan nasycenia odpowiada zwarcia na zaciskach kolektor–emiter. Charakteryzuje się dużą wartością prądu I_C przy małych napięciach U_{CE} , co oznacza, że rezystancja wyjściowa w stanie nasycenia jest bardzo mała.

Stan nasycenia i odcięcia są wykorzystywane do pracy przełącznikowej tranzystora, jako tzw. **klucza elektronicznego**. Stanowi nasycenia odpowiada zamknięcie, a stanowi odcięcia rozwarcie styków przełącznika.

Od góry zakres aktywnej pracy ogranicza dopuszczalny prąd kolektora $I_{C\max}$. Od prawej strony – krzywa (hiperbola) określająca maksymalną moc $P_{C\max}$, jaka może być wydzielona w tranzystorze bez przekroczenia dopuszczalnych temperatur złącza, oraz wartość dopuszczalnego napięcia $U_{CE\max}$ ze względu na możliwość przebiecia złącza kolektor-emiter.

Na parametry tranzystora bipolarnego, zwłaszcza na jego współczynnik wzmocnienia prądowego, duży wpływ ma częstotliwość sygnału wejściowego. Wraz ze zwiększeniem częstotliwości sygnału maleje wzmocnienie prądowe, ponieważ pojemności złączy C_{BE} i C_{BC} (rys. 5.1) odgrywają coraz większą rolę w pracy tranzystora. Ze względu na częstotliwość tranzystory dzieli się na: tranzystory małej (mniejszej niż 3 MHz), średniej (3 ÷ 30 MHz), wielkiej (30 ÷ 300 MHz) i bardzo wielkiej częstotliwości (większej niż 300 MHz).

Ze względu na wydzielaną moc tranzystory można podzielić na: tranzystory małej (mniejszej niż 0,3 W), średniej (do 5 W) i dużej mocy (większej niż 5 W). Na rysunku 5.6 pokazano przykładowe ich obudowy. Tranzystory dużej mocy montuje się na radiatorach.



Rys. 5.6. Przykładowe obudowy tranzystora

Parę tranzystorów PNP i NPN o bardzo zbliżonych parametrach nazywa się **tranzystorami komplementarnymi** – uzupełniającymi się. Są one przeciwnie spolaryzowane, a prądy w nich płynące mają przeciwne kierunki. Takie tranzystory stosuje się we wzmacniaczach przeciwsoobnych.