

Ćwiczenie 2

Parametry statyczne tranzystorów bipolarnych

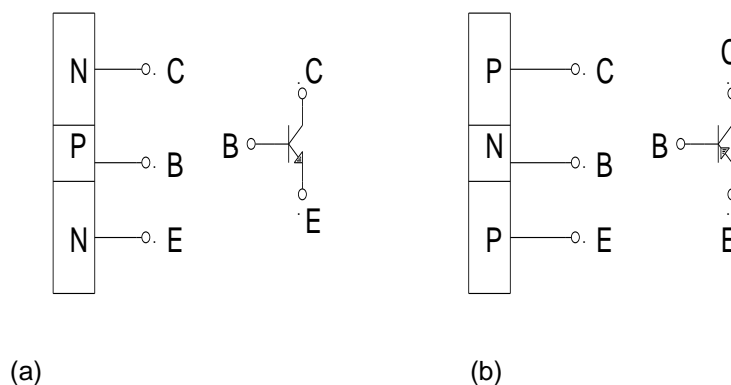
Cel ćwiczenia

Podstawowym celem ćwiczenia jest poznanie statycznych charakterystyk tranzystorów bipolarnych oraz metod identyfikacji parametrów odpowiadających im modeli małosygnalowych. Aby umożliwić zapoznanie się z wpływem efektów termicznych na warunki pracy tranzystorów przewidziano pomiar charakterystyk w warunkach izotermicznych oraz w warunkach występowania efektu samonagrzewania.

Wiadomości podstawowe

Budowa i zasada działania tranzystora bipolarnego

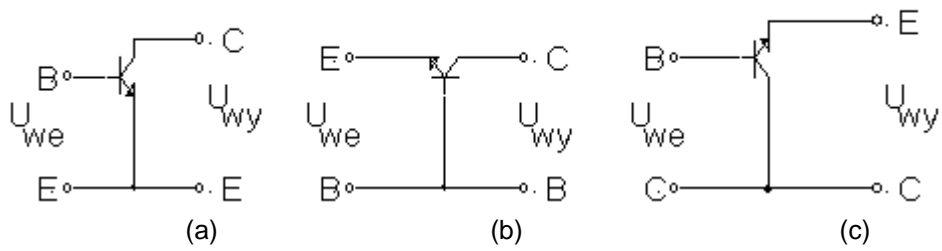
Tranzystor jest strukturą trzywarstwową o trzech elektrodach zewnętrznych: emiterze (E), bazie (B) i kolektorze (C). Jak pokazano na rys.1 może to być struktura typu p-n-p lub n-p-n, przy czym zawsze obszar emitera jest w niej domieszkowany silniej niż baza, a obszar kolektora słabiej. Ta asymetria wynika z przeznaczenia każdej z tych warstw i powoduje, że mimo iż emiter i kolektor są tego samego typu sposób włączenia tranzystora w obwód elektryczny nie jest obojętny. W normalnych warunkach pracy złącze baza-emiter jest polaryzowane w kierunku przewodzenia, złącze baza-kolektor w kierunku zaporowym.



Rys.1. Schematyczna budowa i symbole tranzystora bipolarnego
(a) typu n-p-n i (b) typu p-n-p

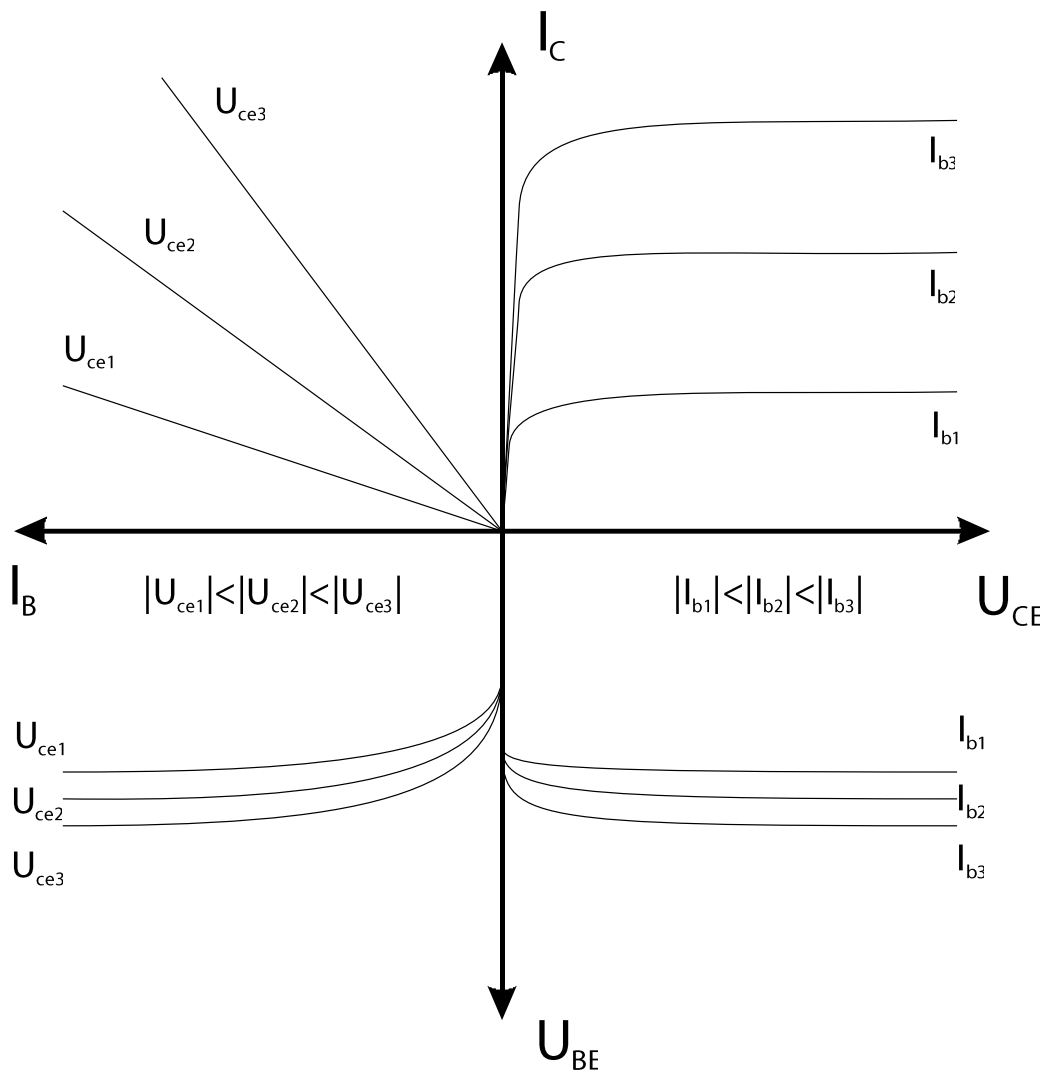
Dzięki takiemu domieszkowaniu główną część prądu złącza emiterowego stanowi prąd wstrzykiwania nośników z emitera do bazy co oznacza dużą sprawność emitera. Nośniki wstrzyknięte przez emiter dyfundują poprzez obszar bazy do kolektora. Dla zapewnienia dużej wartości współczynnika transportu nośniki mniejszościowe powinny w jak najmniejszym stopniu rekombinować w obszarze bazy. Osiąga się to przede wszystkim przez zmniejszenie jej grubości (szerokości). Efektywną szerokość bazy stanowi obszar między granicami obszarów ładunku przestrzennego złącz emiterowego i kolektorowego. Zmiana napięcia na złączu kolektorowym powoduje zmianę szerokości bazy (zjawisko modulacji szerokości bazy – efekt Early'ego).

Tranzystor jako element o trzech końcówkach może być włączony do układu elektrycznego na trzy sposoby nazywane układami pracy. Są to odpowiednio: układ wspólnego emitera (OE), wspólnej bazy (OB) i wspólnego kolektora (OC). Pokazano je schematycznie na rys. 2.



Rys.2. Tranzystor n-p-n w konfiguracjach: (a) wspólnego emitera, (b) wspólnej bazy i (c) wspólnego kolektora

Charakterystyki statyczne tranzystora



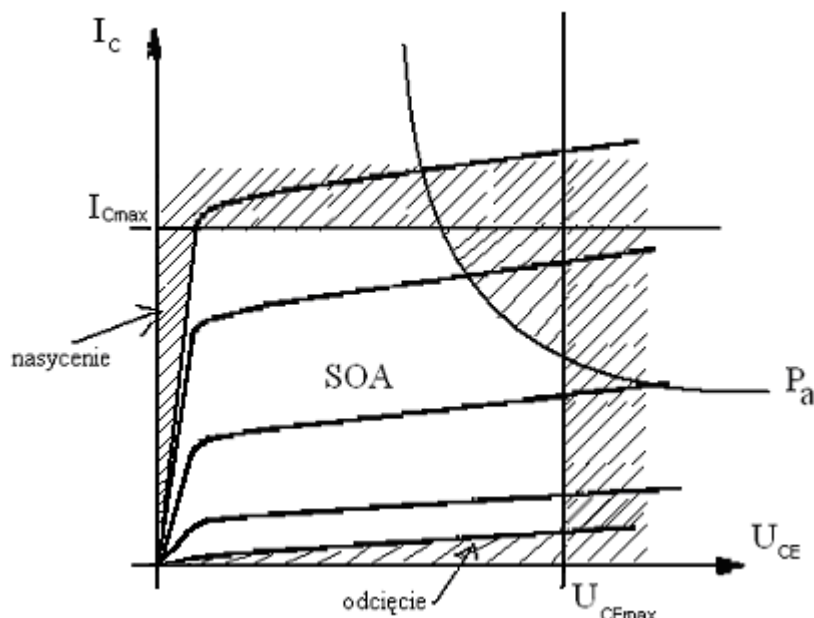
Rys.3. Typowe charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego w układzie wspólnego emitera: charakterystyki wejściowe $U_{BE}=f(I_B)|U_{CE}=\text{const}$, charakterystyki przejściowe $I_C=f(I_B)|U_{CE}=\text{const}$, charakterystyki oddziaływania wstecznego $U_{BE}=f(U_{CE})|I_B=\text{const}$, charakterystyki wyjściowe $I_C=f(U_{CE})|I_B=\text{const}$,

W każdym układzie pracy tranzystora jedna z jego końcówek jest wspólna dla obwodu wejściowego i wyjściowego. Dlatego tranzystor bipolarny traktujemy go jako czwórnik. Można go zatem opisać czterema rodzinami charakterystyk statycznych, określającymi zależności pomiędzy wartościami stałych prądów i napięć występujących na wejściu i wyjściu. Są to:

- charakterystyki wejściowe $U_{we} = f(I_{we})$ przy $U_{wy} = \text{const}$,
- charakterystyki przejściowe $I_{wy} = f(I_{we})$ przy $U_{wy} = \text{const}$,
- charakterystyki oddziaływania wstecznego $U_{we} = f(U_{wy})$ przy $I_{we} = \text{const}$,
- charakterystyki wyjściowe $I_{wy} = f(U_{wy})$ przy $I_{we} = \text{const}$.

Typowe charakterystyki tranzystora w układzie wspólnego emitera (OE) są pokazane na rys.3. Spośród tych charakterystyk największe znaczenie praktyczne ma charakterystyka wyjściowa. Jest ona wykorzystywana do definiowania obszarów pracy tranzystora jak to pokazano na rys.4. Są to:

- **obszar odcięcia** znajdujący się poniżej krzywej dla $I_B=0$, w którym oba złącza tranzystora polaryzuje się w kierunku zaporowym,
- **obszar nasycenia** odpowiadający narastającej części charakterystyk, w którym oba złącza tranzystora są spolaryzowane w kierunku przewodzenia,
- **obszar aktywny** znajdujący się pomiędzy obszarem odcięcia i nasycenia, obejmujący płaskie części charakterystyk. W obszarze tym złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze kolektor-baza w kierunku zaporowym,
- **obszar bezpiecznej pracy** (SOA) w którym przyrząd może pracować bez ryzyka przebicia lub uszkodzenia w wyniku efektu samonagrzewania. Obejmuje on fragmenty ww. obszarów ograniczone z góry hiperbolą mocy admysyjnej P_a i prostą I_{Cmax} oraz z prawej strony prostą odpowiadającą maksymalnemu napięciu U_{CEmax} .



Rys.4. Charakterystyki wyjściowe z zaznaczonymi obszarami pracy

Parametry małosygnałowe typu h

Tranzystor jest czwornikiem nieliniowym z uwagi na nieliniowe zależności między jego prądami i napięciami. W zakresie małych amplitud sygnału tranzystor można traktować jako czwórnik liniowy opisany układem równań:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \end{aligned}$$

gdzie indeksy 1 i 2 reprezentują odpowiednio stosowane wcześniej indeksy "we" i "wy". Ze względu na to, iż równania te można zapisać w formie macierzowej parametry tego równania noszą nazwę parametrów macierzowych (typu h). Parametry te w zakresie małych częstotliwości są liczbami rzeczywistymi i odpowiadają tangensowi kąta nachylenia stycznych do odpowiednich charakterystyk statycznych w wybranym punkcie pracy, czyli w punkcie odpowiadającym składowym stałym prądów i napięć. Są one zatem określone przez odpowiednie pochodne tych charakterystyk:

$$h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \Big|_{U_2 = const.} \qquad h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \Big|_{I_1 = const.}$$

określają nachylenie charakterystyki wejściowej i charakterystyki oddziaływania wstecznego,

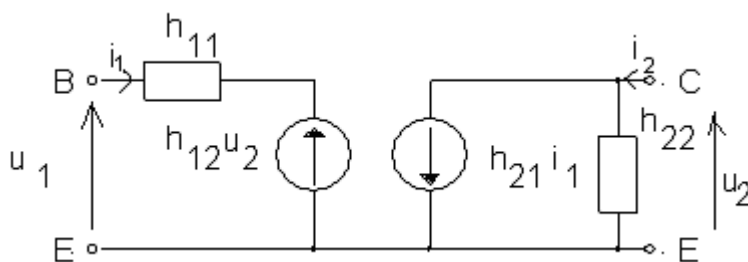
$$h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \Big|_{U_2 = const.} \qquad h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \Big|_{I_1 = const.}$$

określają nachylenie charakterystyki przejściowej i charakterystyki wyjściowej.

W praktyce wielkości tych nie wyznacza się poprzez liczenie pochodnych, ale stosuje się metodę przybliżoną polegającą na zastąpieniu pochodnych ilorazami małych przyrostów odpowiednich napięć i prądów.

Korzystając z równania macierzowego typu h można utworzyć schemat zastępczy tranzystora, który będzie jego modelem małosygnalowym. Schemat ten jest przedstawiony na rys.5. Pozwala on na podanie sensu fizycznego poszczególnych parametrów h. Parametry te w danym układzie pracy tranzystora mają następującą interpretację:

- h_{11} - impedancja wejściowa tranzystora przy zwartym obwodzie wyjściowym,
- h_{12} - współczynnik sprzężenia zwrotnego przy rozwartym obwodzie wejściowym,
- h_{21} - zwarciovyy współczynnik wzmocnienia prądowego,
- h_{22} - rozwarciowa konduktancja wyjściowa.



Rys.5. Schemat zastępczy odpowiadający macierzy h

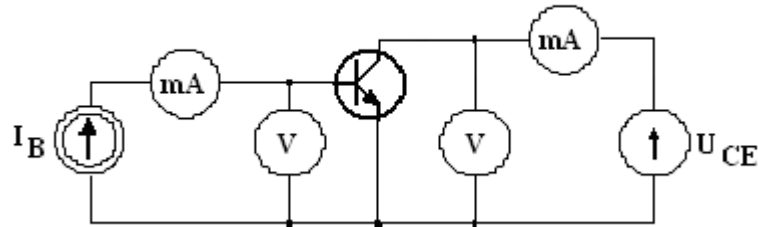
Wykonanie ćwiczenia

Uproszczony schemat układu pomiarowego pokazany jest na rys. 6. W ćwiczeniu badane są tranzystory pracujące w układzie wspólnego emitera (OE). Dla tranzystorów tych należy wyznaczyć rodziny charakterystyk w izotermicznych warunkach pracy (po trzy charakterystyki dla trzech różnych parametrów), oraz w warunkach występowania efektu samonagrzewania (po jednej charakterystyce dla maksymalnej wartości parametrów użytych przy pomiarze izotermicznym). W pierwszym przypadku pomiar jest przeprowadzany metodą impulsową, która zapewnia wydzielanie małej mocy i tym samym utrzymanie temperatury tranzystora na stałym poziomie. W drugim przypadku temperatura tranzystora zmienia się wraz ze wzrostem wydzielanej mocy określonej przez aktualne wartości napięcia U_{CE} i prądu I_C .

Dla badanego tranzystora należy wyznaczyć charakterystyki: wejściową, przejściową, wyjściową i oddziaływania wstecznego. W warunkach izotermicznych pomiar każdej z charakterystyk należy

wykonać dla kilku wartości parametru. Dla największej wartości parametru należy pomiar powtórzyć w warunkach samonagrzewania. Podczas tych ostatnich pomiarów należy po każdej zmianie nastawy odczekać ok. 30 sek. dla ustalenia się temperatury tranzystora.

Uwaga ! Przed przystąpieniem do pomiarów sprawdzić „zachowanie się” badanego elementu w układzie pomiarowym. Tzn. dokonać wszystkich możliwych regulacji i zaobserwować, w jakim zakresie zmieniają się poszczególne wielkości, jak się zmieniają (gwałtownie, wolno). W oparciu o te obserwacje ustalić zakres pomiarów, krok pomiarowy (niekoniecznie stały w całym zakresie pomiarowym) oraz wartości parametrów przy jakich będą mierzone poszczególne charakterystyki. Dopiero wtedy przystąpić do właściwych pomiarów.



Rys.6. Schemat układu pomiarowego do zdejmowania charakterystyk statycznych tranzystora bipolarnego w układzie OE.

Opracowanie wyników

- wykreślić pomierzone w warunkach izotermicznych charakterystyki badanych tranzystorów (wszystkie charakterystyki jednego tranzystora na wspólnym wykresie, jak pokazano na rys.3),
- wyznaczyć na podstawie charakterystyk parametry macierzy mieszanej typu h modelu małosygnałowego tranzystora w układzie OE (wszystkie dla tego samego, jednego punktu pracy),
- wykreślić charakterystyki statyczne dla jednego z tranzystorów z naniesionymi na nich prostymi, wynikającymi z modelu małosygnałowego (obliczonymi w poprzednim punkcie),
- na wspólnym wykresie narysować charakterystyki statyczne tranzystora pracującego w warunkach izotermicznych i samonagrzewania (dla tej samej wartości parametru).

Literatura

- Z. Lisik – Podstawy fizyki półprzewodników, skrypt PŁ,
A. Świt, J. Pułtorak – Przyrządy półprzewodnikowe,
W. Marciniak – Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone.