



Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptaak

Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113
konsultacje: pn. – cz. 11-12



Plan wykładu



Tranzystor bipolarny

- Zasady działania
- Struktury i symbole
- Model pasmowy
- Zakresy pracy
- Współczynniki wzmacnienia prądowego
- Układy włączenia
- Charakterystyki statyczne
- Parametry statyczne

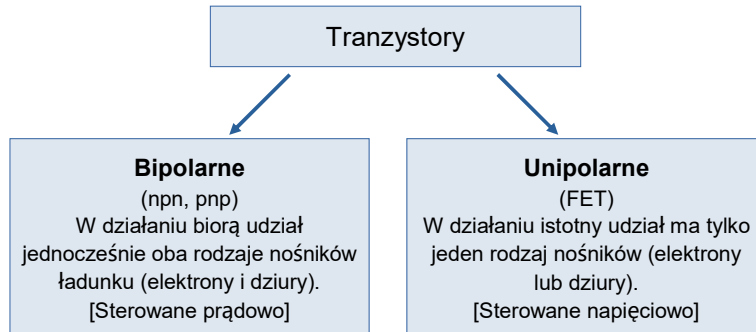


Tranzystory - wstęp



Tranzystor – trójkońcówkowy aktywny element półprzewodnikowy zdolny do wzmacniania sygnałów prądu stałego i zmiennego.

Tranzystor to wzmacniacz –
– umożliwia sterowanie większej mocy mniejszą.

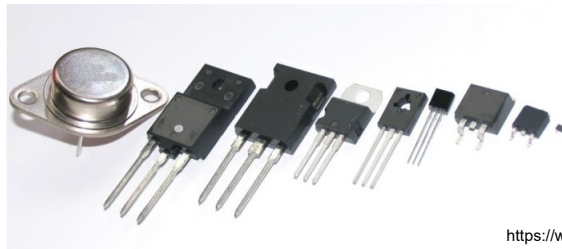


Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

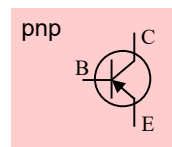
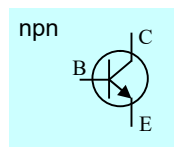
3



Tranzystory bipolarne



<https://www.aphelektra.com>



Prąd płynący między dwiema końcówkami (C, E) tranzystora bipolarnego jest regulowany przez stosunkowo niewielki prąd płynący przez trzecią końcówkę (B).

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

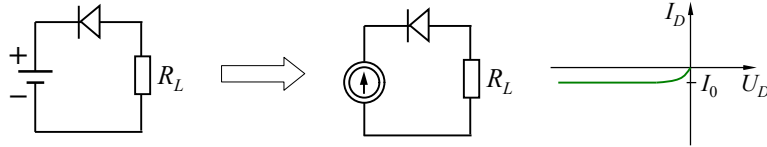
4



Zasada działania

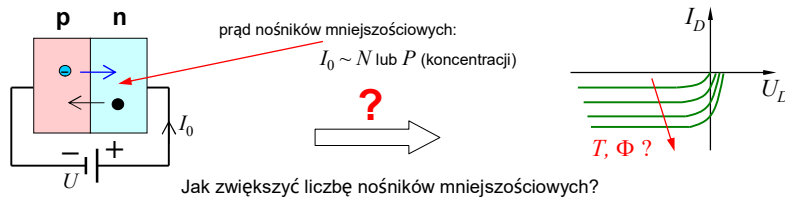


Dioda spolaryzowana zaporowo (przypomnienie) –



– źródło prądowe o stałej wydajności prądowej I_0 – niesterowalne:

- I_0 nie zależy od U_D oraz od R_L – nie ma oddziaływania (niepożądanego) sygnału wyjściowego na wejściowy,
- R_L duże, ΔI_D małe – zatem ΔU_{RL} jest duże.



Jak zwiększyć liczbę nośników mniejszościowych?

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

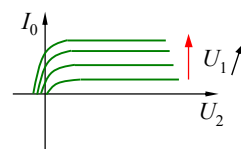
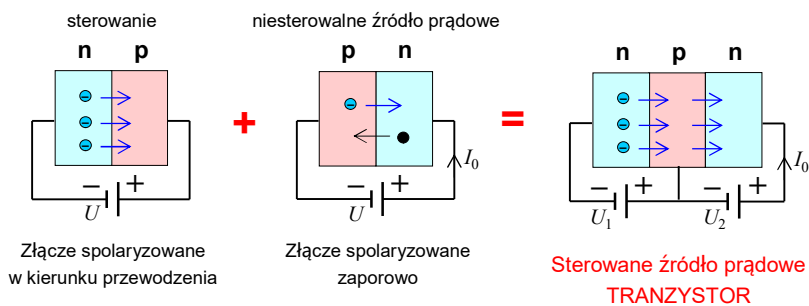
5



Zasada działania



Jak zwiększyć liczbę nośników mniejszościowych? – Wstrzyknąć z zewnątrz!



Analogiczne rozumowanie dla tranzystora p-n-p.

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

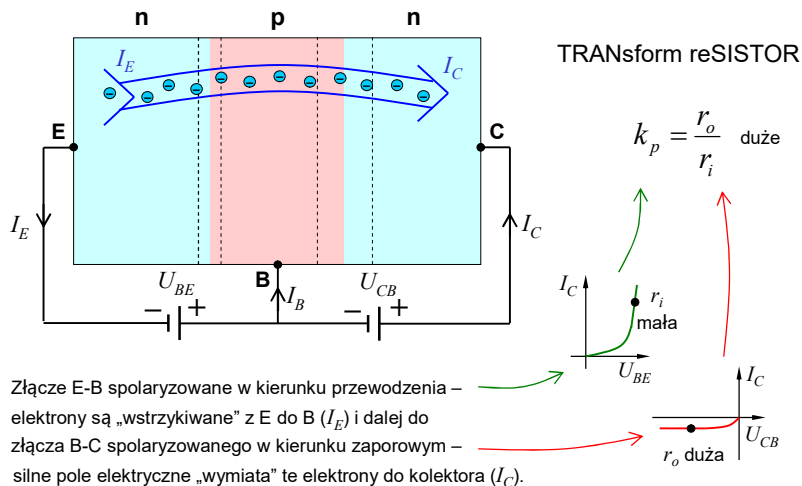
6



Podstawowe zasady działania tranzystora



1. przybliżenie $I_E \approx I_C$



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

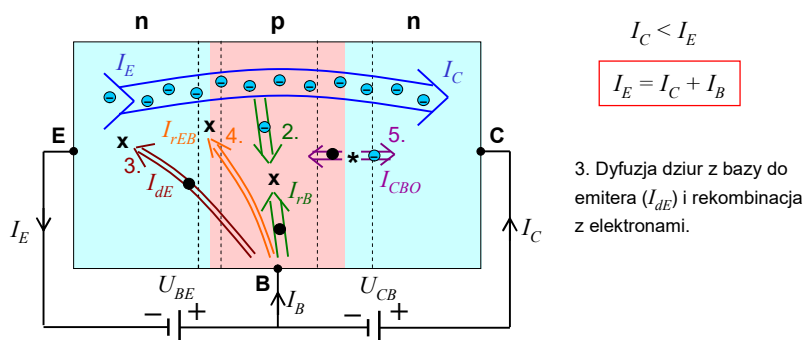
7



Podstawowe zasady działania tranzystora



2. Rekombinacja elektronów i dziur w obszarze bazy (I_{rB}).



4. Rekombinacja w obszarze warstwy zaporowej złącza E-B (I_{rEB}).

5. Generacja (termiczna) pary elektron-dziura w warstwie zaporowej złącza C-B (I_{CBO}):

$$I_C = \alpha_N I_E + I_{CBO}$$

$$I_B = I_{rB} + I_{dE} + I_{rBE} - I_{CBO}$$

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

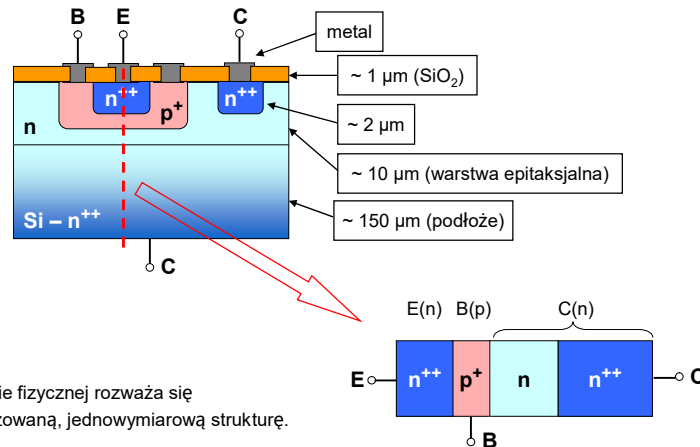
8



Rzeczywista struktura tranzystora



Tranzystor wykonany metodą epitaksjalno-planarną (epiplanarną)

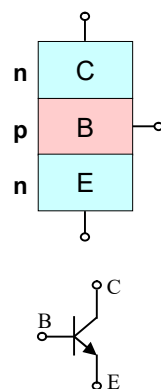


Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

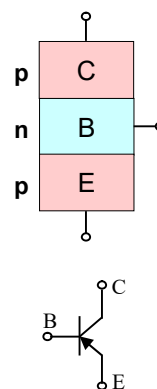
9



Struktury i symbole tranzystorów



Kolejne warstwy:
– emiter – dostarcza nośniki mniejszościowe do bazy,
– baza,
– kolektor – zbiera nośniki wstrzykiwane z emitera do bazy.



Strzałka w symbolach ma zwrot zgodny z kierunkiem przepływu prądu według konwencji przyjętej w elektrotechnice (od + do -), czyli zwrot zgodny z kierunkiem przepływu ładunków dodatnich (dziur).

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

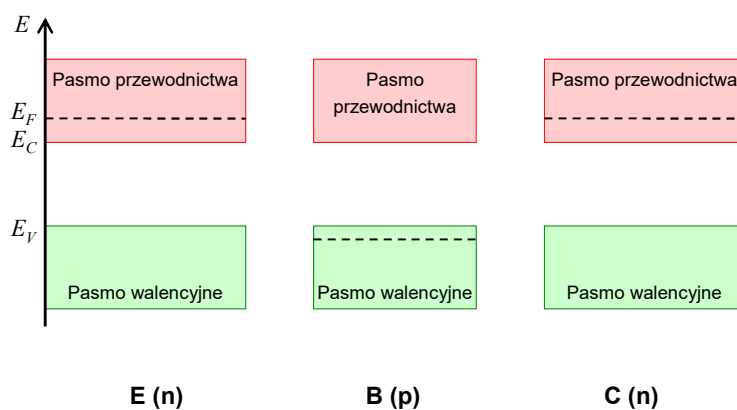
10



Model pasmowy tranzystora



Przed połączeniem obszarów n, p, n



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

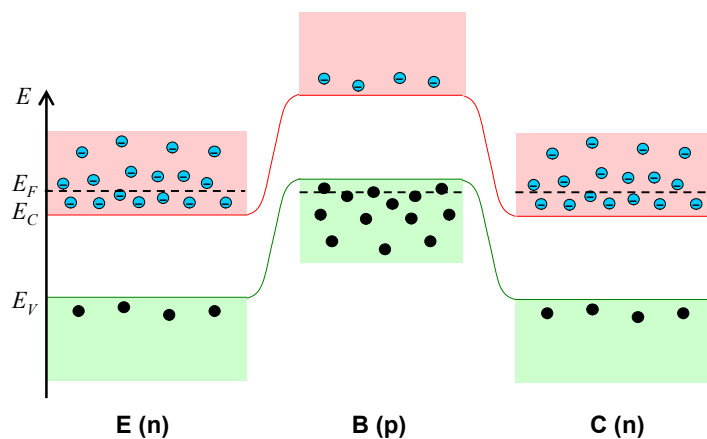
11



Model pasmowy tranzystora



Po połączeniu obszarów n, p, n – stan równowagi termodynamicznej



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

12

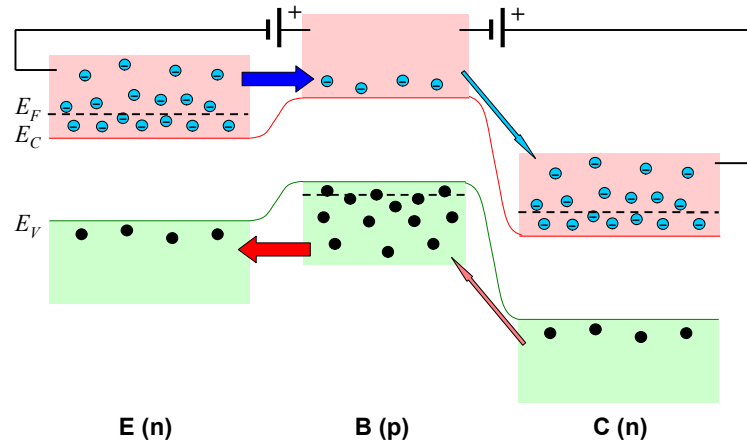


Model pasmowy tranzystora



Po połączeniu obszarów n, p, n – stan aktywny: $U_{BE} > 0$

$$U_{BC} < 0$$



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

13

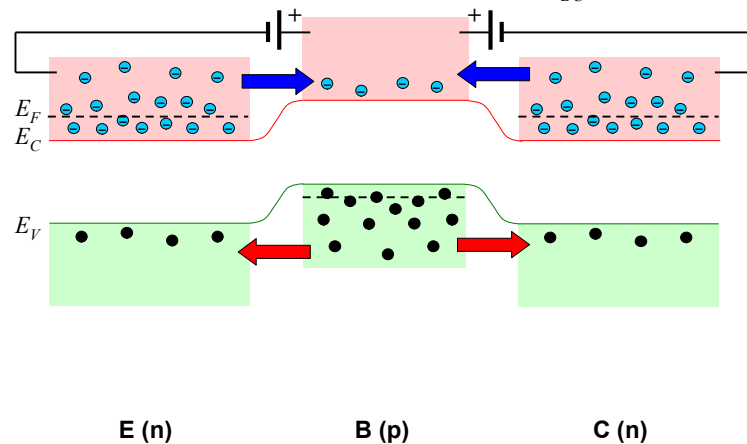


Model pasmowy tranzystora



Po połączeniu obszarów n, p, n – stan nasycenia: $U_{BE} > 0$

$$U_{BC} > 0$$



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

14

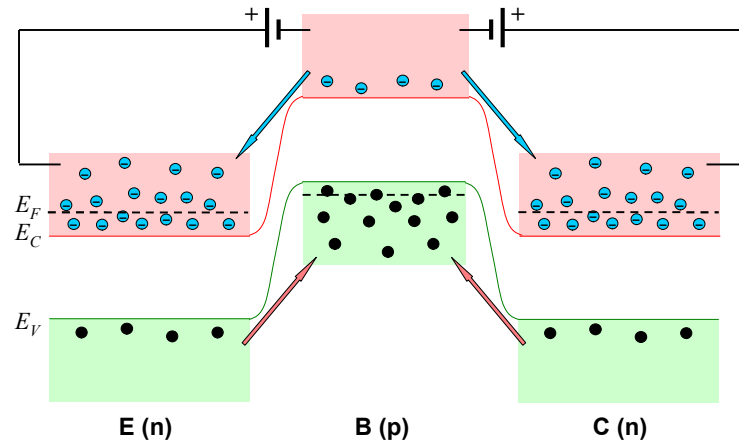


Model pasmowy tranzystora



Po połączeniu obszarów n, p, n – stan zatkania: $U_{BE} < 0$

$$U_{BC} < 0$$



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

15

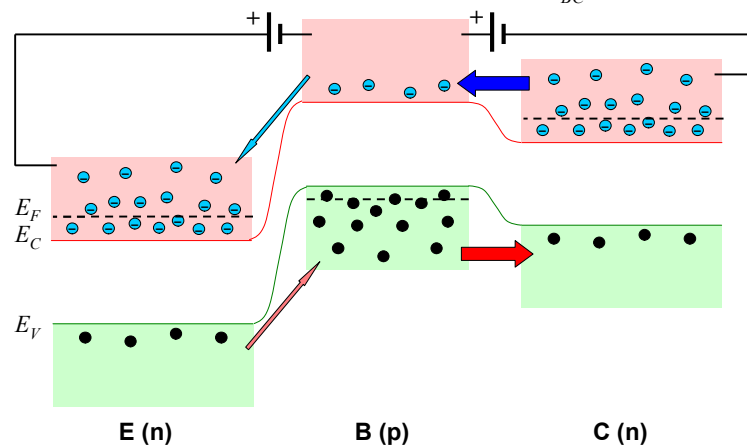


Model pasmowy tranzystora



Po połączeniu obszarów n, p, n – stan inwersyjny: $U_{BE} < 0$

$$U_{BC} > 0$$



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

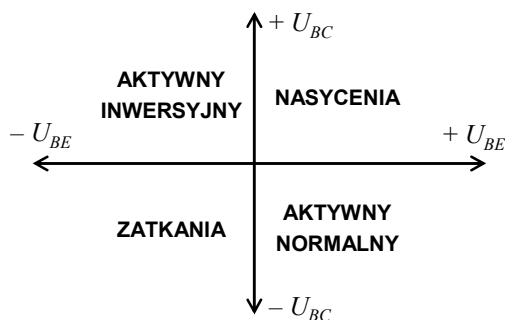
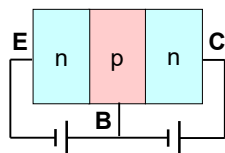
16



Zakresy pracy tranzystora



Ile złącz ma tranzystor?



4 warianty (zakresy) pracy.

Zakres AI – emiter spełnia funkcję kolektora, a kolektor – emitera.

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

17



Współczynniki wzmocnienia prądowego



Stan aktywny

Założenie: cały obszar bazy jest obojętny elektrycznie:

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{oraz} \quad \Delta I_E = \Delta I_C + \Delta I_B \quad \text{dla małych przyrostów prądu}$$

Tranzystor jest tym lepszy (większe wzmocnienie) im mniej nośników rekombinuje w bazie, $I_{rB} \searrow \rightarrow k_p \nearrow$

$$I_C \leq I_E, \quad I_B \ll I_C, \quad I_B \ll I_E$$

$$\alpha_N = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{– współczynnik wzmocnienia prądowego dla prądu stałego}$$

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad \text{– współczynnik wzmocnienia dla małych przyrostów prądu}$$

$$\beta_N = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Stosuje się, gdy tranzystor jest tak włączony, że $I_{WE} = I_B$.

$$\alpha \approx 0,980 \dots 0,995$$

$$\beta \approx 50 \dots 200$$

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

18



Współczynniki wzmocnienia prądowego KPE



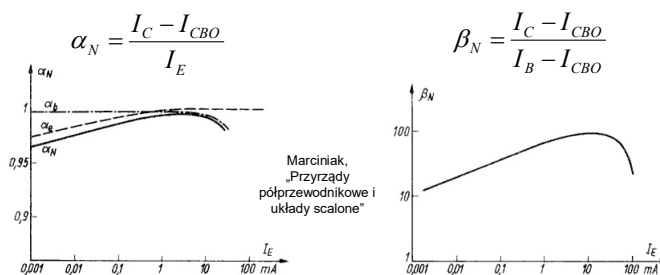
Stan aktywny

$$I_E = I_C + I_B \quad / : I_C \Rightarrow \frac{I_E}{I_C} = 1 + \frac{I_B}{I_C} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Uwzględniając rozpyły prądów w tranzystorze ($I_C = \alpha_N I_E + I_{CBO}$), dla prądu stałego:



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

19



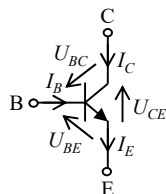
Oznaczanie prądów i napięć



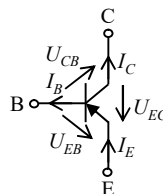
$$I_E = I_C + I_B \quad \beta_N = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_E = \beta_N I_B + I_B$$

$$I_E = I_B (\beta_N + 1)$$



$$U_{BE} - U_{BC} - U_{CE} = 0$$



$$U_{CB} + U_{EC} - U_{EB} = 0$$

Strzałka w symbolach ma zwrot zgodny z kierunkiem przepływu prądu według konwencji przyjętej w elektrotechnice (od + do -), czyli zwrot zgodny z kierunkiem przepływu ładunków dodatnich (dziur).

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

20

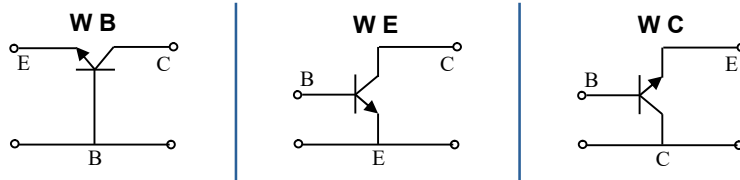


Układy włączenia tranzystora



Tranzystor – element 3-końcówkowy, traktowany jako czwórnik –
– jedna końcówka wspólna dla wejścia i wyjścia.

Dla wzmocnienia mocy: **B** na wejściu, **C** na wyjściu:



Każdy z układów ma różne właściwości (m.in. wzmocnienia k_i , k_u , k_p), ale tranzystor działa zawsze JEDNAKOWO.

$$I_E = I_C + I_B, \quad \alpha_N = I_C / I_E, \quad \beta_N = I_C / I_B$$

$$I_{WE} = I_E, \quad I_{WY} = I_C$$

$$k_i = \frac{I_C}{I_E} = \alpha_N$$

$$I_{WE} = I_B, \quad I_{WY} = I_C$$

$$k_i = \frac{I_C}{I_B} = \beta_N$$

$$I_{WE} = I_B, \quad I_{WY} = I_E$$

$$k_i = \frac{I_E}{I_B} = \beta_N + 1$$

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

21



Opis właściwości funkcjonalnych tranzystora



Praca tranzystora:

- nieliniowa:
 - statyczna, (i)
 - dynamiczna, (ii)
- liniowa (małe sygnały m. i d. cz.). (iii)

} duże sygnały

- (i) Praca nieliniowa statyczna – związki między stałymi napięciami i prądami na końcówkach tranzystora.
- (ii) Procesy przejściowe przy przełączaniu tranzystora z **Z** do **N** (włączanie) i odwrotnie (wyłączanie).
- (iii) Tranzystor jest spolaryzowany w określonym punkcie pracy i sterowany małym sygnałem prądu zmiennego (o takiej amplitudzie, że tranzystor zachowuje się jak element liniowy).

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

22



Opis właściwości funkcjonalnych tranzystora



Tranzystor jako czwórnik nieliniowy

Punkt pracy (statyczny): I_1, U_1, I_2, U_2 .

Równanie czwornika – zależność jednej wielkości od dwóch innych przy niekontrolowanej czwartej (12).



Do pełnego opisu czwornika wystarczy jedna para równań; praktyczne znaczenie mają trzy – impedancyjne $U(I_1, I_2)$, admitancyjne $I(U_1, U_2)$ i mieszane:

$$U_1 = f(I_1, U_2) \quad \text{ i } \quad I_2 = f(I_1, U_2)$$

Cztery rodziny charakterystyk statycznych:

$$U_1 = f(I_1), \quad U_2 = \text{const} \quad \text{– ch-ki wejściowe}$$

$$U_1 = f(U_2), \quad I_1 = \text{const} \quad \text{– ch-ki zwrotne napięciowe}$$

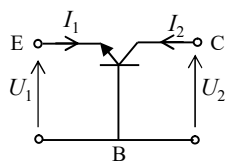
$$I_2 = f(I_1), \quad U_2 = \text{const} \quad \text{– ch-ki przejściowe prądowe}$$

$$I_2 = f(U_2), \quad \underbrace{I_1 = \text{const}}_{\text{parametr}} \quad \text{– ch-ki wyjściowe}$$

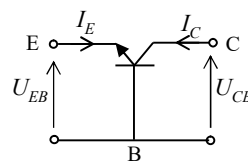
Dowolna kombinacja po jednym z pary wystarczy do wyznaczenia dwóch pozostałych.



Charakterystyki statyczne WB



$$\begin{aligned} I_1 &= I_E & U_1 &= U_{EB} \\ I_2 &= I_C & U_2 &= U_{CB} \end{aligned}$$



Stan aktywny: U_{EB} – przewodzenia
 U_{CB} – zaporowo

$$\begin{aligned} U_{EB} &= f(I_E, U_{CB}) \\ I_C &= f(I_E, U_{CB}) \end{aligned}$$

Cztery rodziny charakterystyk statycznych:

$$U_{EB} = f(I_E) \Big|_{U_{CB}} \quad \text{– wejściowa}$$

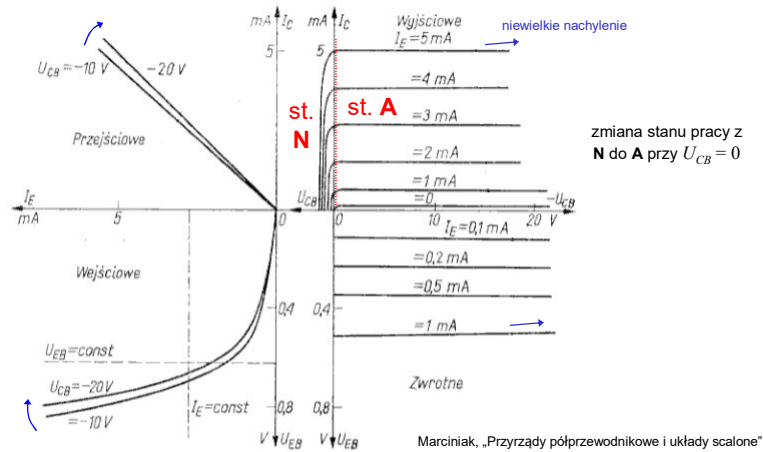
$$U_{EB} = f(U_{CB}) \Big|_{I_E} \quad \text{– zwrotna}$$

$$I_C = f(I_E) \Big|_{U_{CB}} \quad \text{– przejściowa}$$

$$I_C = f(U_{CB}) \Big|_{I_E} \quad \text{– wyjściowa}$$



Charakterystyki statyczne WB



Zjawisko Early'ego – zjawisko modulacji efektywnej szerokości bazy (zmiana koncentracji nośników nadmiarowych w bazie przy zmianie U_{CB}).

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

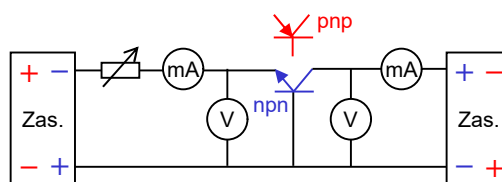
25



Charakterystyki statyczne WB



Pomiar charakterystyk



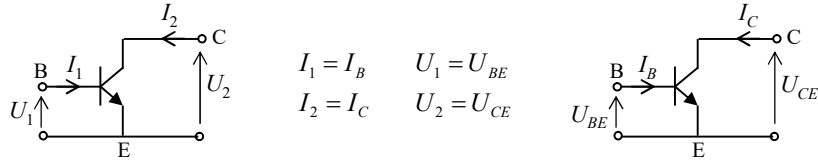
- Określić zakres dopuszczalnych zmian prądów i napięć.
- Pomiar charakterystyk parami (jednocześnie):
 - wejściowe i przejęciowe ($U_{CB} = \text{const}$) – zmiana I_E , odczyt U_{BE} i I_C ,
 - wyjściowe i zwrotne ($I_E = \text{const}$) – zmiana U_{CB} , odczyt I_C i U_{BE} .
- Pomiar po trzy charakterystyki (dla trzech różnych wartości parametru – ważne jest utrzymywanie jego stałej wartości).
- Pomiar ch-k wyjściowych najpierw w st. A, potem w st. N (zmiana polaryzacji U_{CB}).
- Ch-ka wejściowa (złącza p-n) – można wyznaczyć I_0 , η , R_S .

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

26



Charakterystyki statyczne WE



Napięcie U_{CE} polaryzuje oba złącza: E-B i B-C.

W stanie aktywnym:

U_{BE} – przewodzenia

U_{CE} – przewodzenia

$$U_{BE} = f(I_B, U_{CE})$$

$$I_C = f(I_B, U_{CE})$$

Cztery rodziny charakterystyk statycznych: $U_{BE} = f(I_B)_{|U_{CE}}$ – wejściowa

$$U_{BE} = f(U_{CE})_{|I_B}$$
 – zwrotna

$$I_C = f(I_B)_{|U_{CE}}$$
 – przejściowa

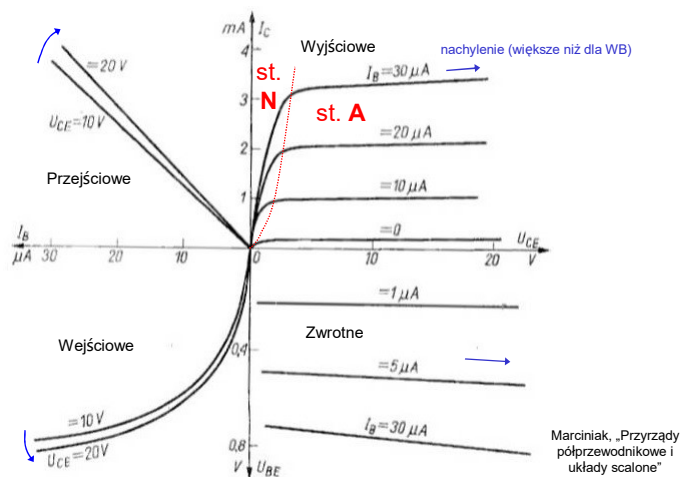
$$I_C = f(U_{CE})_{|I_B}$$
 – wyjściowa

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

27



Charakterystyki statyczne WE



Zjawisko Early'ego – zjawisko modulacji efektywnej szerokości bazy (zmiana koncentracji nośników nadmiarowych w bazie przy zmianie U_{CB}).

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

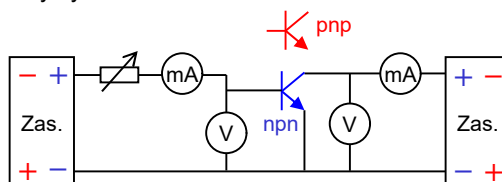
28



Charakterystyki statyczne WE



Pomiar charakterystyk



- Określić zakres dopuszczalnych zmian prądów i napięć.
- Pomiar charakterystyk parami (jednocześnie):
 - wejściowe i przejściowe ($U_{CE} = \text{const}$) – zmiana I_B , odczyt U_{BE} i I_C ,
 - wyjściowe i zwrotne ($I_B = \text{const}$) – zmiana U_{CE} , odczyt I_C i U_{BE} .
- Pomiar po trzy charakterystyki (dla trzech różnych wartości parametru – ważne jest utrzymywanie jego stałej wartości). Dokładny pomiar dla stanu nasycenia.
- Ch-ka wejściowa (złącza p-n) – można wyznaczyć I_0 , η , R_S .
- Wyznaczyć napięcie Early'ego.

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

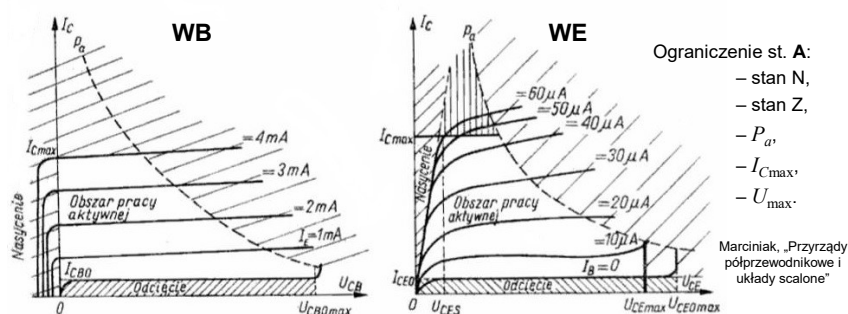
29



Parametry statyczne



Większość parametrów ogranicza dozwolony obszar pracy aktywnej tranzystora.



- P_a – moc admissyjna – maksymalna wartość $I_{dc} \cdot U_{dc}$ – hiperbola mocy.
- I_{Cmax} – prąd maksymalny – ograniczenie przeważnie wynika ze zmian α lub β dla dużych I_E (I_C).
- U_{max} – napięcie maksymalne – ograniczenie ze względu na zjawiska przebicowe.
- I_{C0} – prądy zerowe – granica między zakresem aktywnym i odcięcia.
- U_{CEs} – napięcie nasycenia (tylko dla WE).
- Współczynniki wzmocnienia prądowego α_N i β_N .

Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

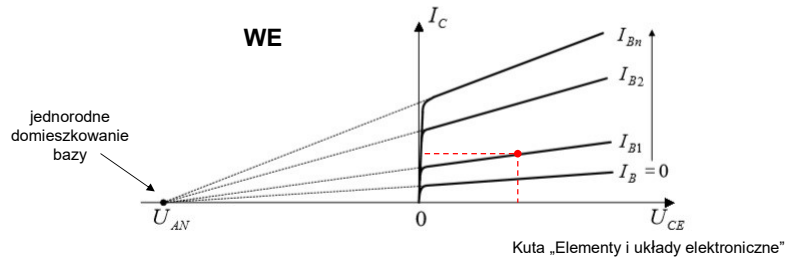
30



Parametry statyczne



Napięcie Early'ego



W stanie aktywnym:

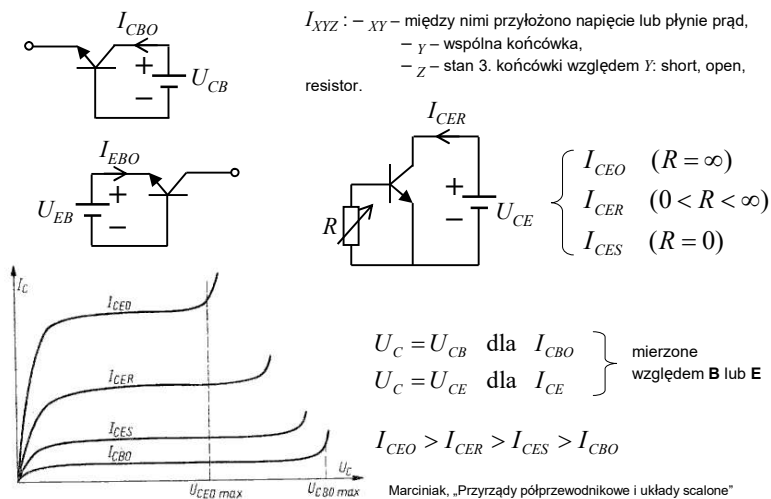
$$I_C = \beta_N I_B \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_{AN}} \right) \quad g_{CE} = \left. \frac{dI_C}{dU_{CE}} \right|_{I_B = \text{const}} = \frac{I_C}{U_{CE} + U_{AN}}$$



Parametry statyczne



Prądy zerowe – prądy płynące przez tranzystor włączony w układzie dwójnika





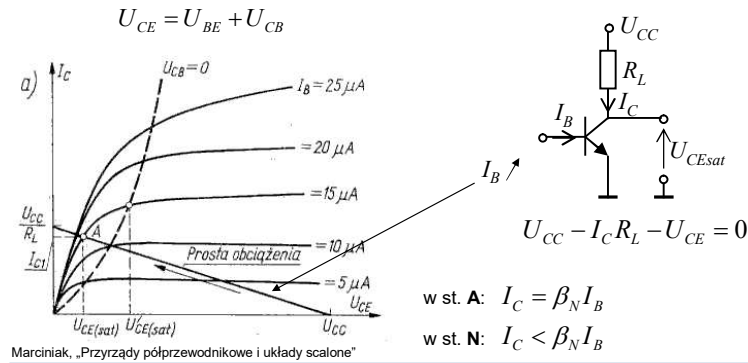
Parametry statyczne



Napięcie nasycenia (stan nasycenia – oba złącza spolaryzowane w kierunku przewodzenia)

Dla WB **A** → **N** dla $U_{CB} = 0$.

Dla WE **A** → **N** przy U_{CEsat} : takie U_{CE} , przy którym $U_{CB} = 0 \Rightarrow U_{CEsat} = U_{BE}$

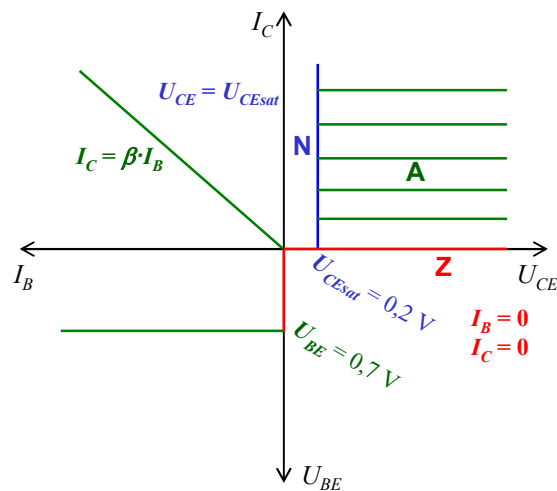


Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

33



Model odcinkowo-liniowy tranzystora WE



Elementy elektroniczne I – tranzystor bipolarny

34