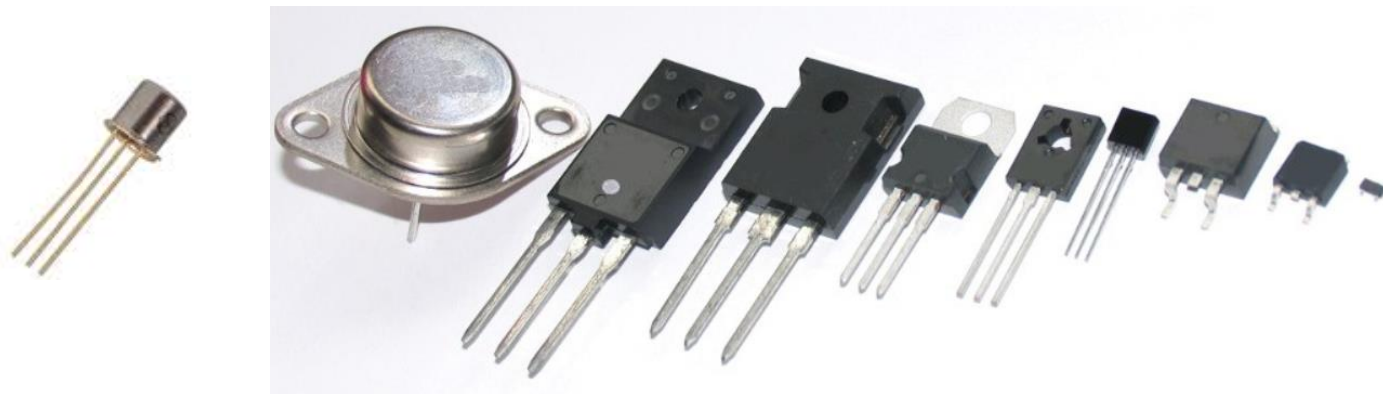


Tranzystor bipolarny



Tranzystor jest to trójkońcówkowy element półprzewodnikowy zdolny do wzmacniania sygnałów prądu stałego i zmiennego.

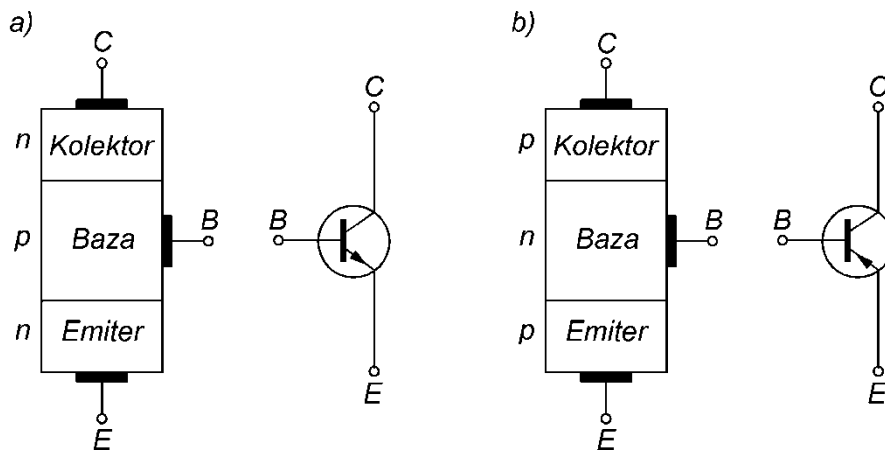
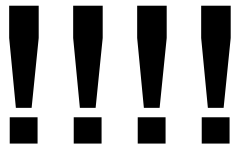
Każdy tranzystor jest zatem wzmacniaczem.

Definicja wzmacniacza: „Wzmacniacz jest przyrządem (urządzeniem) umożliwiającym sterowanie większej mocy mniejszą mocą”.



Nazwa tranzystor wywodzi się z języka angielskiego: TRANSfer resISTOR, co oznacza element transformujący rezystancję.

Termin bipolarny oznacza, że istotną rolę w działaniu tego przyrządu odgrywają jednocześnie oba rodzaje nośników (dziury i elektrony)



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

Uwaga: w symbolach kółko nie musi być rysowane !

Końcówki tranzystora: E - emiter, B - baza, C - kolektor.

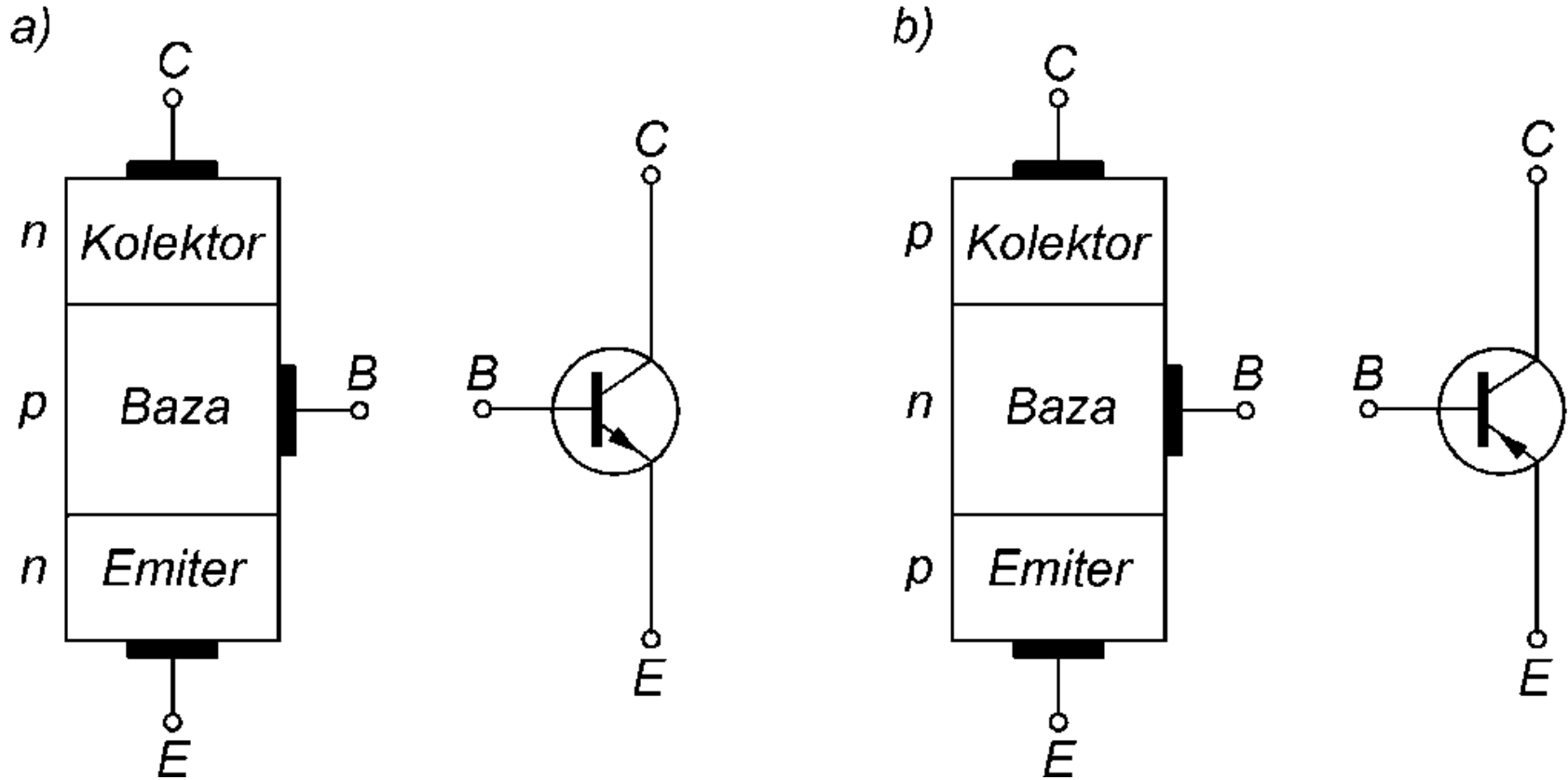
Tak samo nazwano obszary (warstwy) półprzewodnika sąsiadujące ze sobą w jego strukturze.

Emiter jest pierwszym obszarem, który dostarcza nośników mniejszościowych (emituje) do drugiego obszaru tj. bazy.

W bazie przebiegają podstawowe (bazowe) procesy transmisji.

Trzeci obszar - kolektor - zbiera te nośniki, które zostały wstrzyknięte z emitera do bazy i zdołały dotrzeć do kolektora.

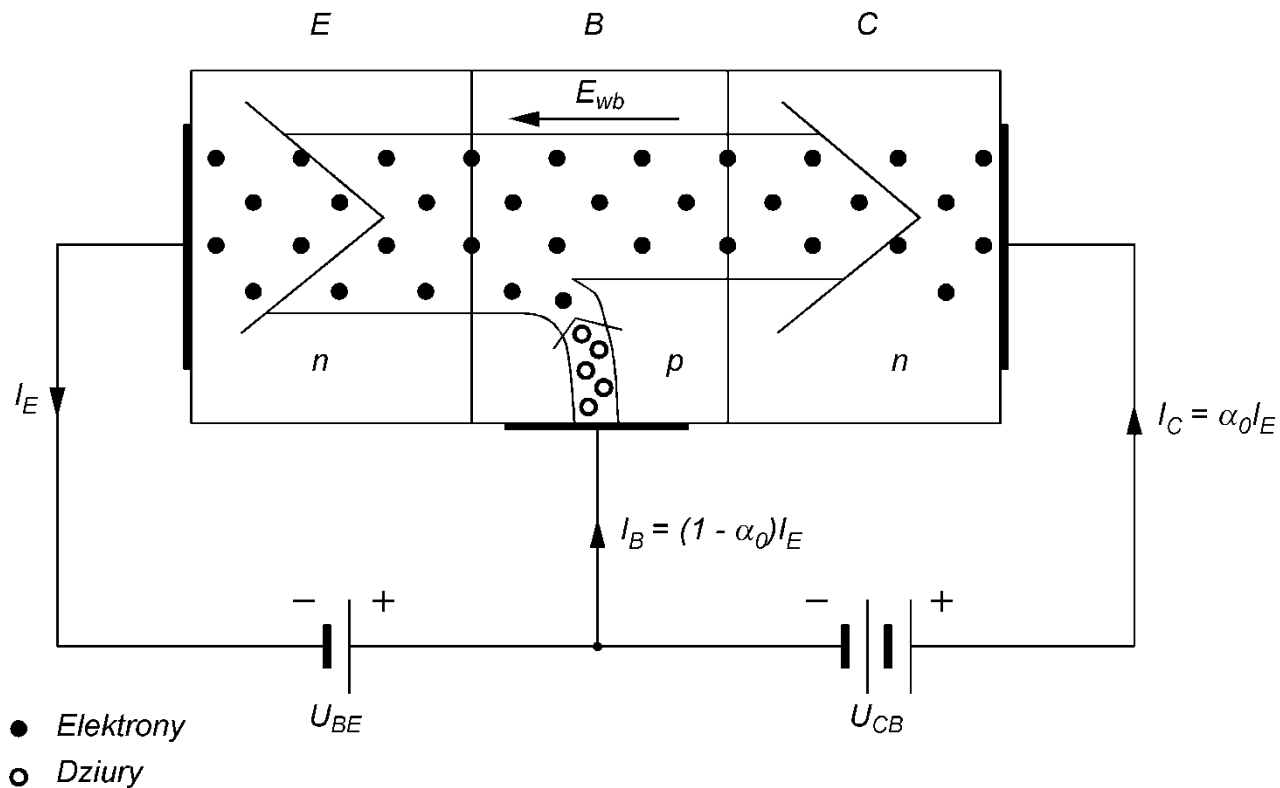
Tranzystor posiada dwa złącza p-n. Są to złącza baza - emiter (złącze B-E) i baza - kolektor (złącze B-C).



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

Uwaga: w symbolach kółko nie musi być rysowane !

rozpływ prądów w tranzystorze

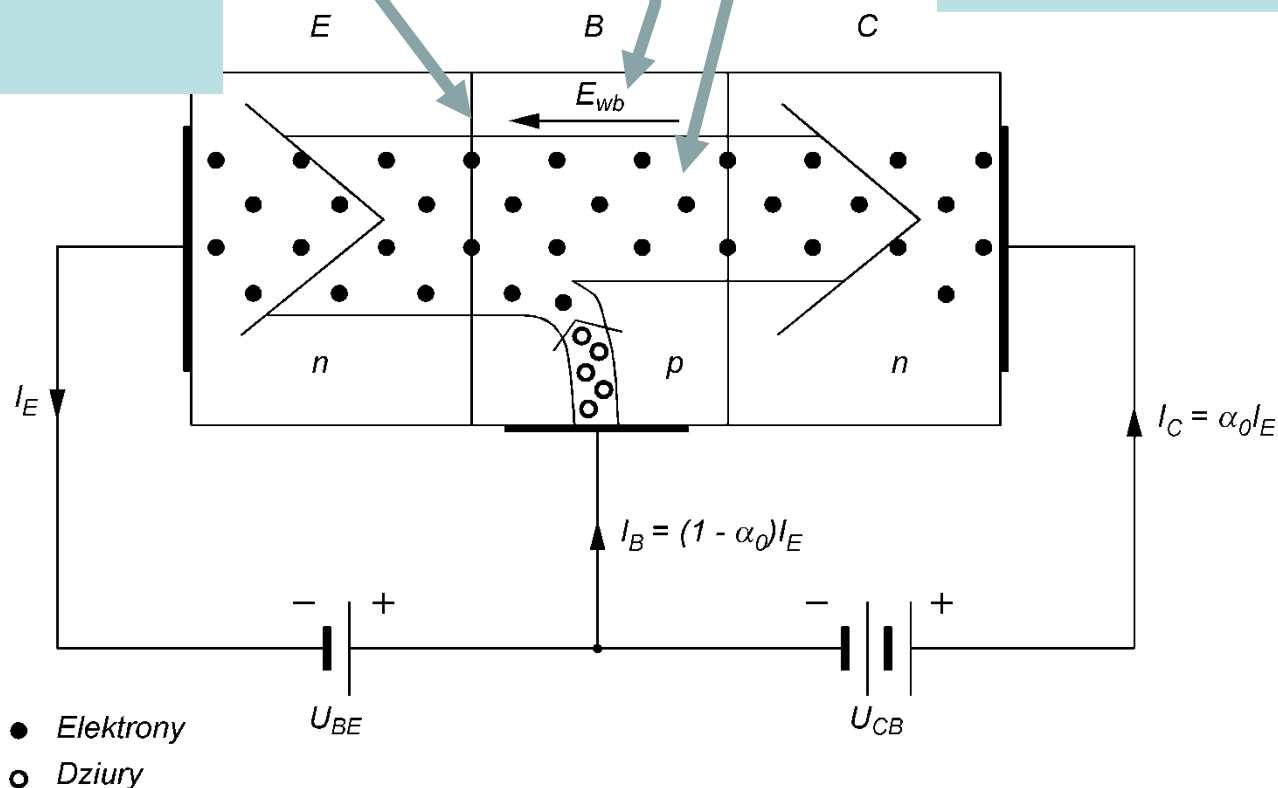


Złącze baza-emiter (B-E) jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze baza-kolektor (B-C) w kierunku zaporowym. Jest to praca w tzw. **obszarze aktywnym**

Polaryzacja złącza B-E w kierunku przewodzenia. Z emitera do bazy są wstrzykiwane elektrony; elektrony w emiterze są większościowe i swobodnie przechodzą przez złącze B-E

W bazie istnieje wbudowane pole elektryczne E_{wb}

Elektrony wstrzyknięte z emitera do bazy są unoszone przez wbudowane pole w kierunku kolektora

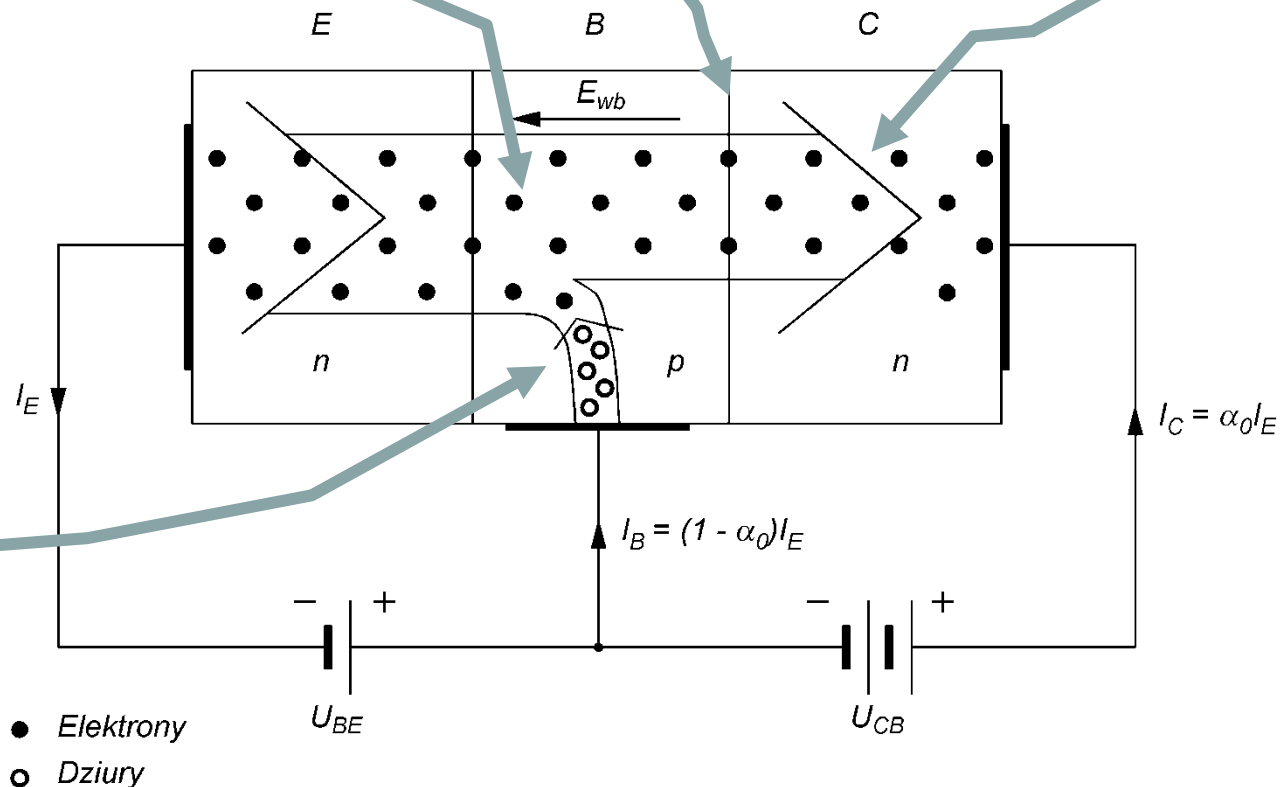


Po znalezieniu się w bazie elektrony są nośnikami mniejszościowymi i znowu istnieją dla nich dogodne warunki do dalszego transportowania

Złącze B-C to jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, łatwo transportuje nośniki mniejszościowe

Złącze B-C przechwytuje elektrony i przenosi do obszaru kolektora

Cześć elektronów rekombinuje w bazie. Ubytek dziur spowodowany rekombinacją jest uzupełniany przez prąd bazy



rozpływu prądów w tranzystorze – opis poprzednich slajdów

Wskutek polaryzacji złącza B-E w kierunku przewodzenia z emitera do bazy są wstrzykiwane elektrony.

W bazie istnieje wbudowane pole elektryczne E_{wb} .

Elektrony wstrzyknięte z emitera do bazy są unoszone przez to pole w kierunku kolektora.

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.

Elektrony w emiterze są nośnikami większościowymi, więc swobodnie przechodzą przez złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia (złącze B-E).

Po znalezieniu się w bazie są nośnikami mniejszościowymi i znowu istnieją dla nich dogodne warunki do dalszego transportowania.

Złącze B-C to jest spolaryzowane w kierunku zaporowym, zatem łatwo transportowane są nośniki mniejszościowe, a takimi są elektrony, które przebyły drogę z emitera poprzez bazę do złącza B-C.

Stąd złącze B-C natychmiast przechwytuje elektrony, przenosząc do obszaru kolektora.

Nie wszystkie 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.

Z zewnętrznego obwodu bazy wpływa prąd uzupełniający straty ładunku dodatniego.

podstawowe równanie dotyczące prądów w tranzystorze

$$I_E = I_B + I_C$$

obowiązuje również dla małych przyrostów prądu

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_C$$

współczynniki wzmocnienia prądowego

współczynnik wzmocnienia prądowego dla prądu stałego w konfiguracji pracy wspólnej bazy WB

$$\alpha_0 = \frac{I_C}{I_E}$$

współczynnik wzmocnienia prądowego dla składowych zmiennych w konfiguracji pracy WB

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$$

Najczęściej $\alpha_0 = 0,980 \div 0,995$

współczynniki wzmocnienia prądowego c.d.

współczynnik wzmocnienia prądowego dla prądu stałego w konfiguracji pracy wspólnego emitera WE

$$\beta_0 = \frac{I_C}{I_B}$$

współczynnik wzmocnienia prądowego dla składowych zmiennych w konfiguracji pracy WE

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

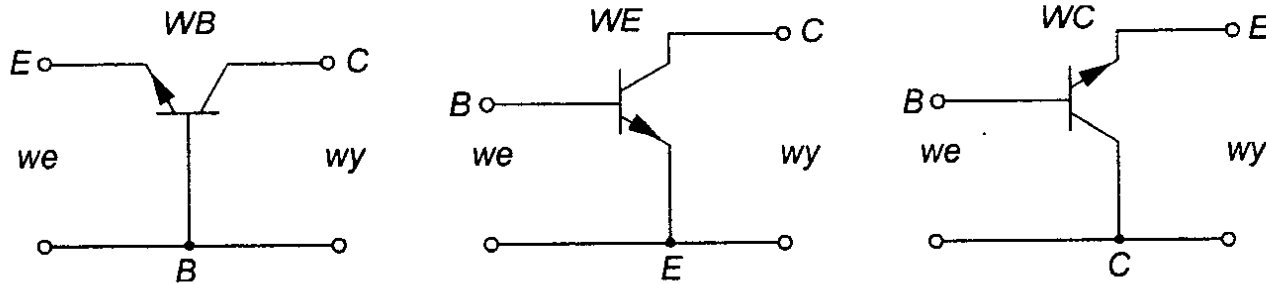
związki pomiędzy współczynnikami wzmocnień prądowych w konfiguracjach WB i WE

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

$$\alpha_0 = 0,98, \quad \beta_0 = 0,98 / (1 - 0,98) \approx 50$$

$$\alpha_0 = 0,995, \quad \beta_0 = 0,995 / (1 - 0,995) \approx 200$$

Konfiguracje pracy tranzystora



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 pomiędzy bazą a emiterem a wyjście pomiędzy kolektorem a emiterem, emiter jest elektrodą wspólną;

WC konfiguracja wspólnego kolektora

wejście sygnału jest pomiędzy bazą a kolektorem, wyjście pomiędzy emiterem a kolektorem, kolektor jest elektrodą wspólną.

Zakresy pracy tranzystora

Zakres pracy (stany tranzystora)	Polaryzacja złącza	
	B-E	B-C
aktywny	przewodzenia	zaporowo
nasycenia	przewodzenia	przewodzenia
zatkania	zaporowo	zaporowo
inwersyjnie aktywny	zaporowo	przewodzenia

technika analogowa

technika cyfrowa

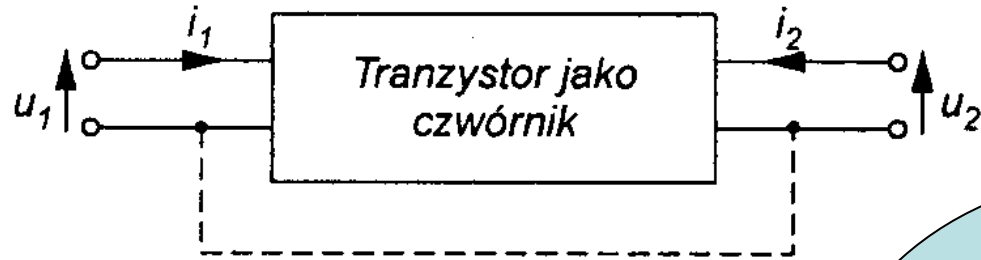
wykorzystywany rzadko - tłumi

rozkład potencjałów tranzystora w zakresie aktywnym

$V_C > V_B > V_E$ dla tranzystora n-p-n

$V_C < V_B < V_E$ dla tranzystora p-n-p

Charakterystyki statyczne



równania impedancyjne

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

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

równania admitancyjne

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

$$I_2 = f(U_1, U_2)$$

równania mieszane

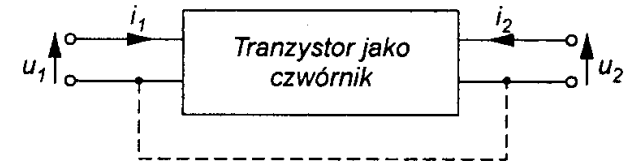
$$U_1 = f(I_1, U_2)$$

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

równania mieszane najdokładniej odzwierciedlają rzeczywiste warunki pracy tranzystora bipolarnego (sterowanie prądowe na wejściu, sterowanie napięciowe na wyjściu)

Na podstawie równań mieszanych można określić cztery rodziny 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 $I_1=\text{const}$



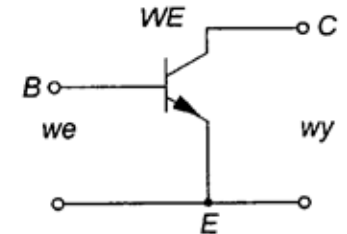
charakterystyki statyczne dla konfiguracji WE

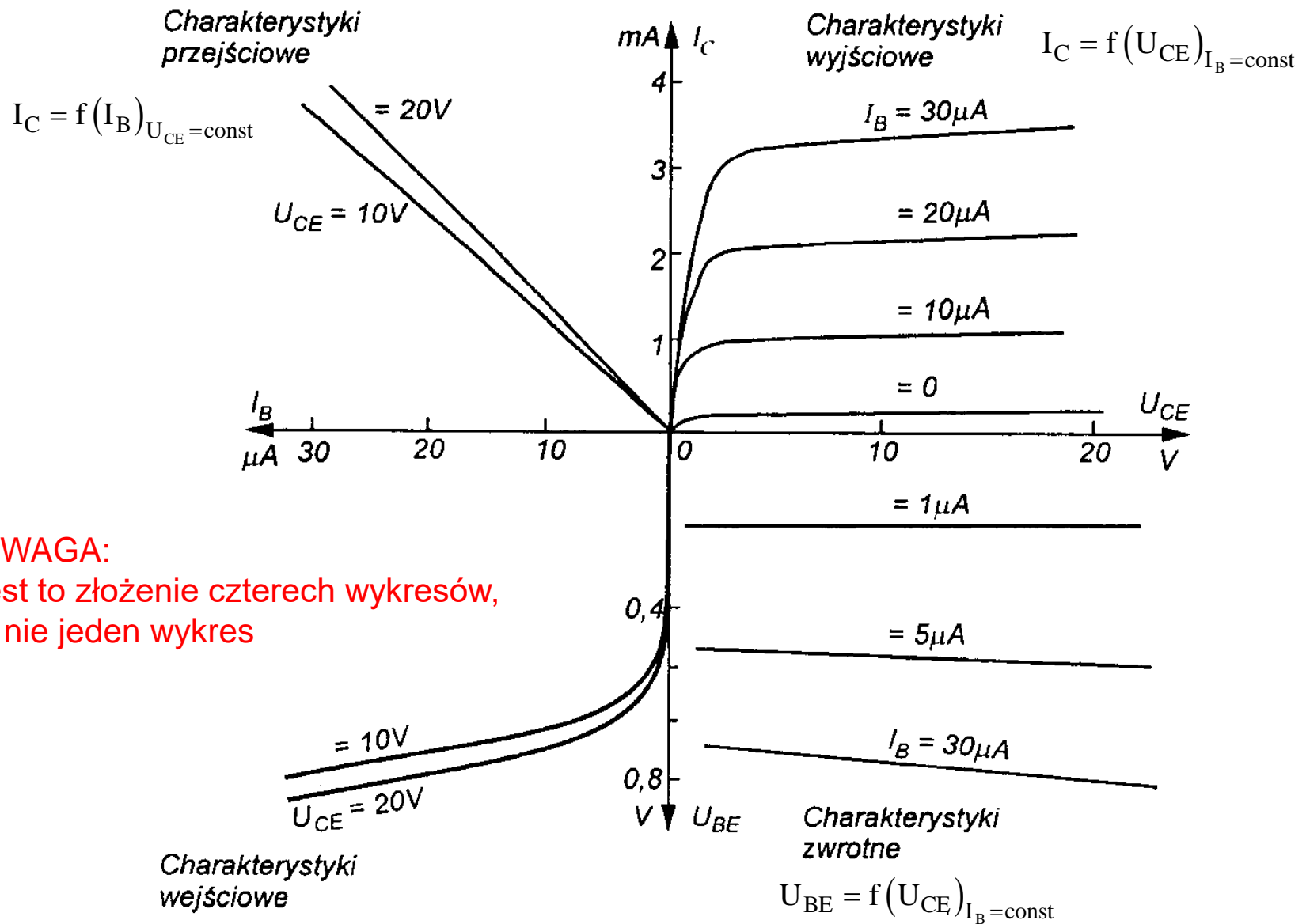
$$U_{BE} = f(I_B)_{U_{CE}=\text{const}} \quad - \text{ charakterystyka wejściowa}$$

$$U_{BE} = f(U_{CE})_{I_B=\text{const}} \quad - \text{ charakterystyka zwrotna}$$

$$I_C = f(I_B)_{U_{CE}=\text{const}} \quad - \text{ charakterystyka przejściowa}$$

$$I_C = f(U_{CE})_{I_B=\text{const}} \quad - \text{ charakterystyka wyjściowa}$$

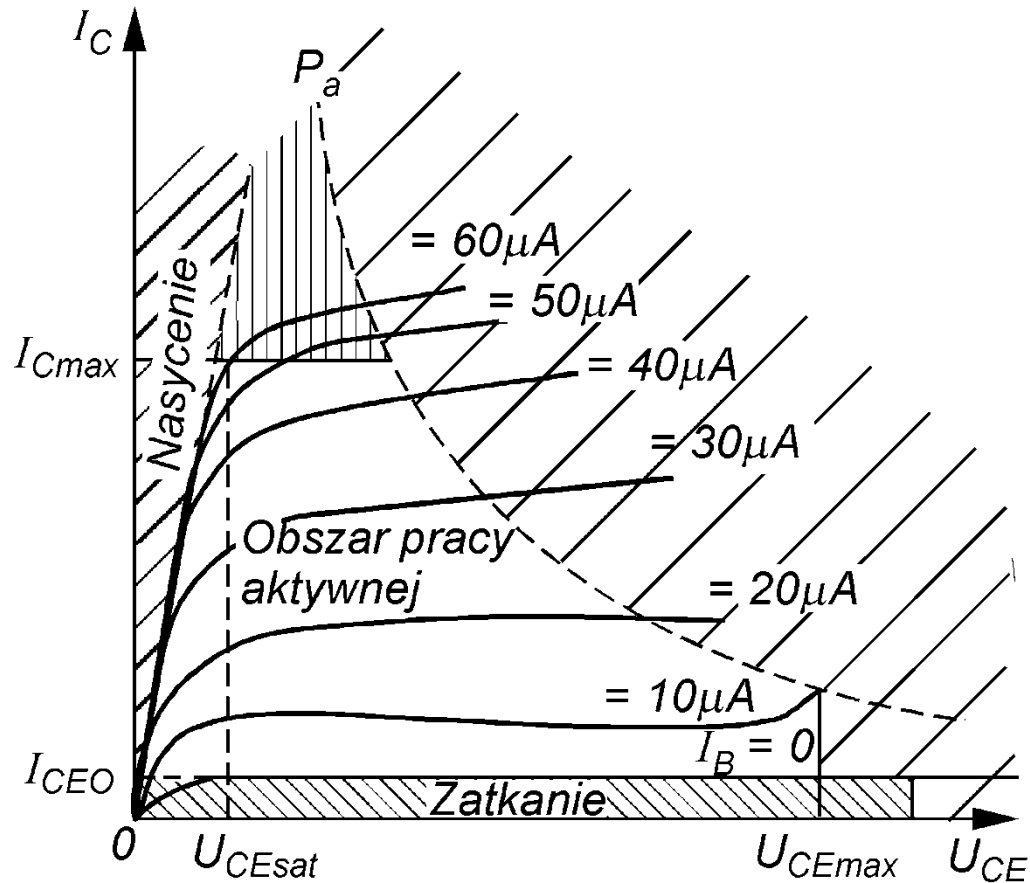




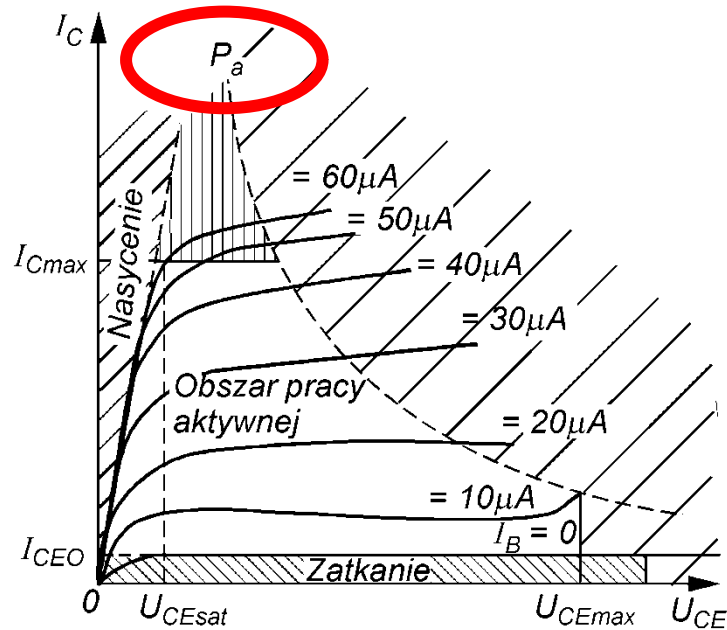
UWAGA:
 jest to złożenie czterech wykresów,
 a nie jeden wykres

$$U_{BE} = f(I_B)_{U_{CE} = \text{const}}$$

Ograniczenia obszaru pracy tranzystora



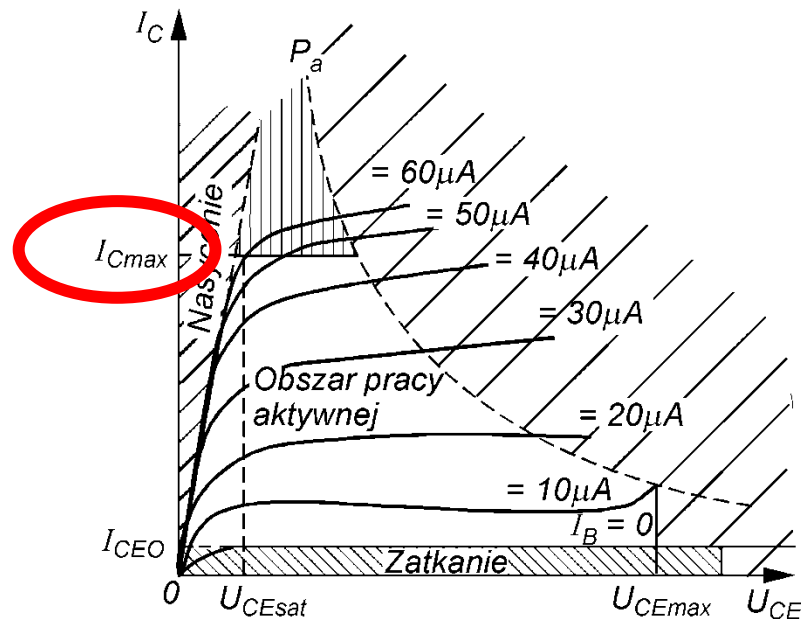
Charakterystyka wyjściowa tranzystora z zaznaczeniem ograniczeń, o których mowa dalej



Maksymalna moc admisyjna P_a

Moc admisyjna tranzystora - maksymalna 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 $I_C = P_a / U_{CE}$ (*hiperbola mocy admisyjnej*).

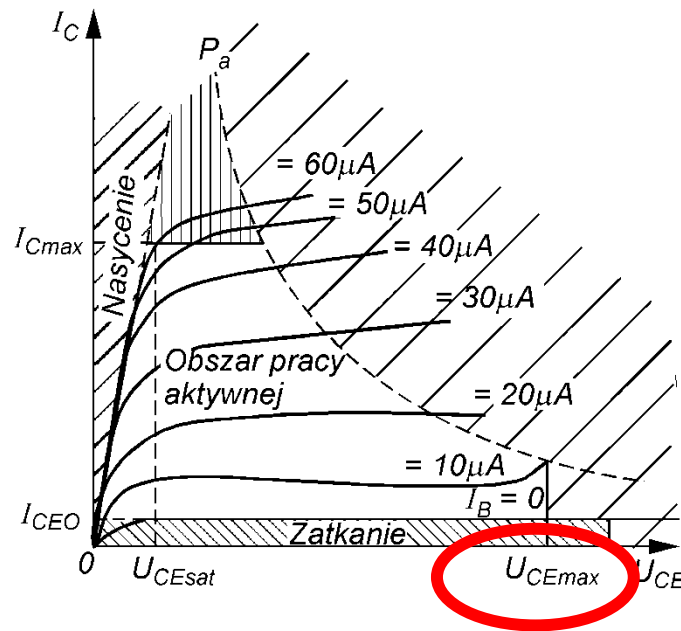


Maksymalny prąd kolektora I_{Cmax}

Prąd maksymalny I_{Cmax} jest ograniczeniem wynikającym ze zmian współczynnika wzmocnienia prądowego. Dla dużych prądów kolektora następuje spadek wartości współczynnika wzmocnienia prądowego do poziomów nie akceptowanych w zastosowaniach tranzystora.

Uwaga:

ograniczenie nie wynika z nadmiernej ilości ciepła wydzielanego w tranzystorze (wartość I_{Cmax} jest mniejsza niż wartość wynikająca z równania hiperboli mocy admisyjnej).



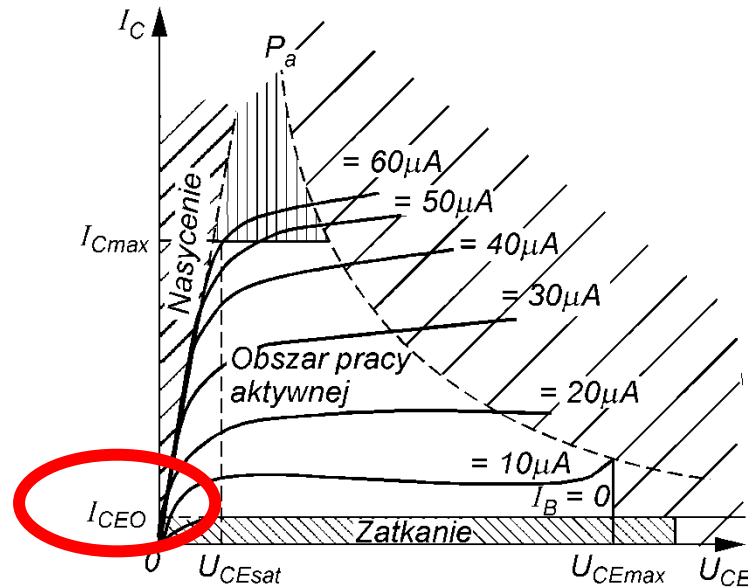
Maksymalne napięcie kolektor-emiter U_{CEmax}

Ograniczenie spowodowane zjawiskami przebicia tranzystorów.

Przebiecie Zenera dotyczy złącza emiter-baza, gdyż są to złącza silnie domieszkowane.

Przebiecie skośne dotyczy obszaru bazy i polega na tym, że wskutek rozszerzania się warstwy zaporowej złącza baza-kolektor warstwa ta „wchłonie” cały obszar bazy. Wtedy to nośniki wstrzykiwane przez emiter odbierane są od razu przez kolektor i prąd gwałtownie rośnie. Przebiecie to jest możliwe tylko w tranzystorach przy cienkiej bazie.

Przebieciu lawinowemu ulegają najczęściej złącza baza-kolektor.



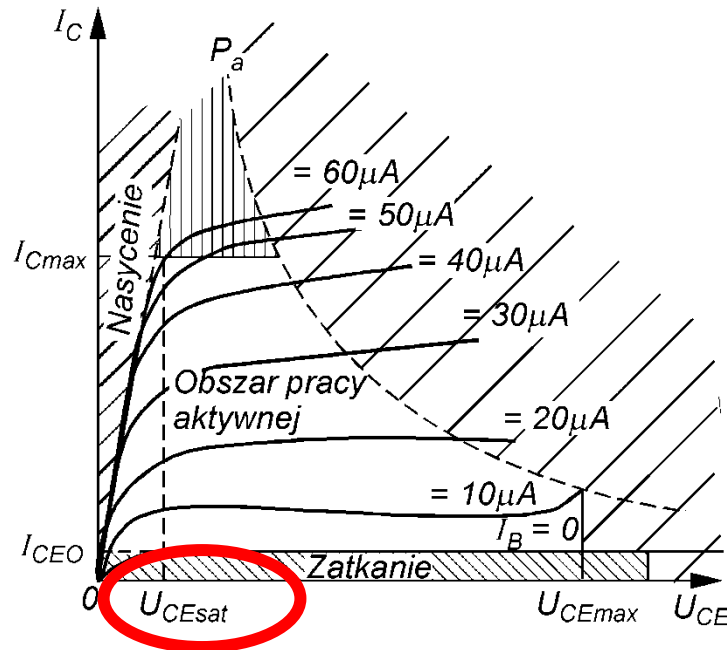
Prąd zerowy I_{CE0}

Prąd zerowy I_{CE0} jest to prąd w obwodzie emiter-kolektor przy prądzie bazy $I_B=0$.

Związek tego prądu z prądem I_{CB0} :

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

Jest to prąd graniczny między obszarem aktywnym a obszarem zatkania tranzystora



Napięcie nasycenia U_{CEsat}

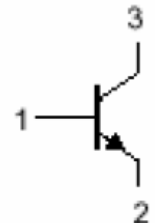
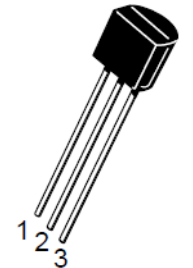
Napięcie nasycenia U_{CEsat} jest wartością ograniczającą minimalne wartości napięcia U_{CE} przy pracy tranzystora w obszarze aktywnym. Rozgranicza ono zakres aktywny i zakres nasycenia tranzystora.

Ogólnie definiując: napięcie U_{CEsat} jest to napięcie kolektor-emiter U_{CE} zmierzone przy określonym prądzie kolektora i prądzie bazy spełniającym warunek nasycenia

$$I_B \cdot \beta_0 > I_C$$

Parametry przykładowych tranzystorów

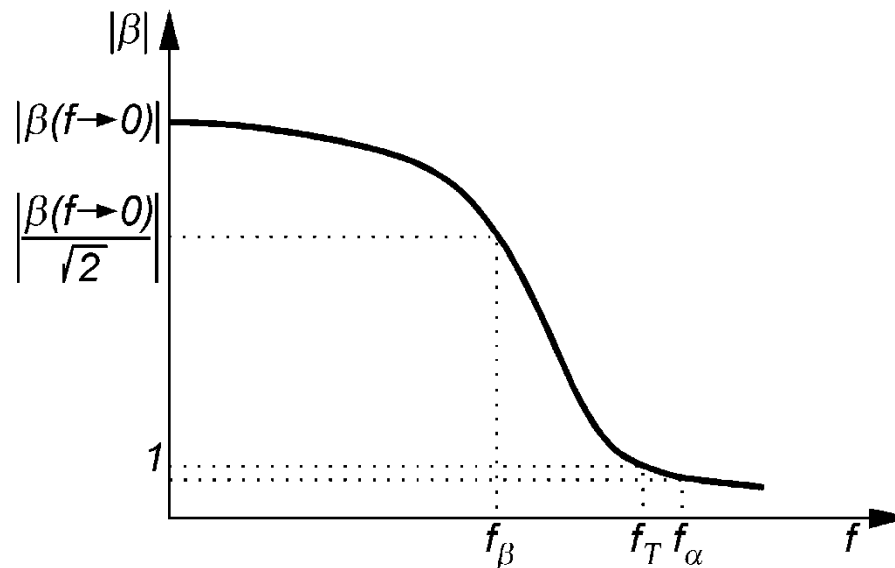
	Typ	BC237B	BD249A
	Typ przewodnictwa	npn	npn
	Parametry graniczne		
U_{CEmax}	Napięcie kolektor-emiter U_{CE0max}	45V	60V
I_{Cmax}	Prąd kolektora I_{Cmax}	100mA	25A
	Napięcie baza-emiter U_{EB0max}	6V	5V
	Prąd bazy I_{Bmax}	50mA	5A
P_a	Moc strat P_{strmax}	300mW	125W
	Parametry		
I_{CE0}	Prąd zerowy kolektora I_{CE0}	0,2nA	0,5mA
	Pojemność kolektor-baza C_{jc}	3pF	500pF
	Pojemność emiter-baza C_{je}	8pF	
	Parametry przy I_C	1mA	1A
	Napięcie baza-emiter U_{BE}	0,6V	0,8V
U_{CEsat}	Napięcie nasycenia U_{CEsat}	60mV	200mV
	Wsp. wzmacnienia prądowego b	ok. 150	ok. 100



Ograniczenia częstotliwościowe tranzystora

Tranzystor nie ma ograniczeń w przenoszeniu sygnału w dolnym zakresie częstotliwości.

W górnym zakresie ma ograniczenia definiowane jako częstotliwości graniczne



Charakterystyka częstotliwościowa zmian modułu współczynnika wzmocnienia prądowego z zaznaczeniem częstotliwości granicznych

częstotliwość graniczna f_{β}

częstotliwość, przy której moduł współczynnika wzmocnienia prądowego β w konfiguracji WE maleje o 3 dB

częstotliwość graniczna f_T

częstotliwość, przy której moduł współczynnika wzmocnienia prądowego β w konfiguracji WE równa się jedności

częstotliwość graniczna f_{α}

częstotliwość, przy której moduł współczynnika wzmocnienia prądowego w konfiguracji WB maleje o 3 dB

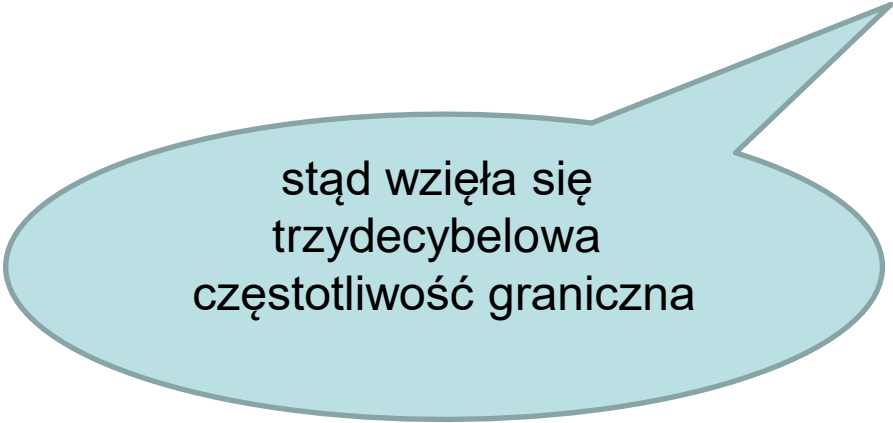
przypomnienie skali decybelowej

dla mocy zapis wzmocnienia w dB

$$K_P [\text{dB}] = 10 \log P_{\text{wy}}/P_{\text{we}}$$

spadek mocy o połowę odpowiada - 3 dB

$$K_P [\text{dB}] = 10 \log P_{\text{wy}}/P_{\text{we}} = 10 \log 0,5 = 10 (- 0,3) = - 3 \text{ dB}$$



stąd wzięła się
trzydecybelowa
częstotliwość graniczna

przypomnienie skali decybelowej

dla napięcia zapis wzmocnienia w dB

$$K_U [\text{dB}] = 20 \log U_{wy}/U_{we}$$

$$10 \log \frac{P_{wy}}{P_{we}} = 10 \log \frac{\frac{U_{wy}^2}{R_{wy}}}{\frac{U_{we}^2}{R_{we}}} \Bigg|_{\text{przy } R_{we} = R_{wy}} = 10 \log \frac{U_{wy}^2}{U_{we}^2} = 10 \log \left(\frac{U_{wy}}{U_{we}} \right)^2 = 20 \log \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

spadek wzmocnienia napięciowego o -3 dB zachodzi gdy:

stosunek U_{wy}/U_{we} jest $1/\sqrt{2} = 0,707$

$$K_U [\text{dB}] = 20 \log U_{wy}/U_{we} = 20 \log 0,707 = -3 \text{ dB}$$

przypomnienie skali decybelowej

dla prądu zapis wzmocnienia w dB

$$K_I [\text{dB}] = 20 \log I_{wy}/I_{we}$$

$$10 \log \frac{P_{wy}}{P_{we}} = 10 \log \frac{I_{wy}^2 R_{wy}}{I_{we}^2 R_{we}} = 10 \log \frac{I_{wy}^2}{I_{we}^2} = 10 \log \left(\frac{I_{wy}}{I_{we}} \right)^2 = 20 \log \frac{I_{wy}}{I_{we}}$$

| przy $R_{we} = R_{wy}$

spadek wzmocnienia napięciowego o -3 dB zachodzi gdy:

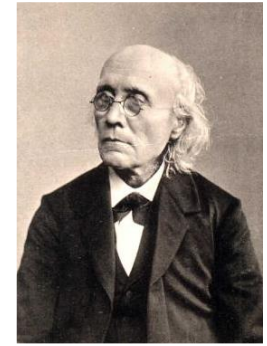
stosunek I_{wy}/I_{we} jest $1/\sqrt{2} = 0,707$

$$K_I [\text{dB}] = 20 \log I_{wy}/I_{we} = 20 \log 0,707 = -3 \text{ dB}$$

logarytmy w życiu człowieka



Ernst Heinrich Weber



Gustav Theodor
Fechner

Prawo Webera-Fechnera

wyraża relację pomiędzy fizyczną miarą bodźca a reakcją układu biologicznego

Wielkość wrażenia zmysłowego jest proporcjonalna do logarytmu bodźca

Prawo fenomenologiczne wynika z obserwacji.

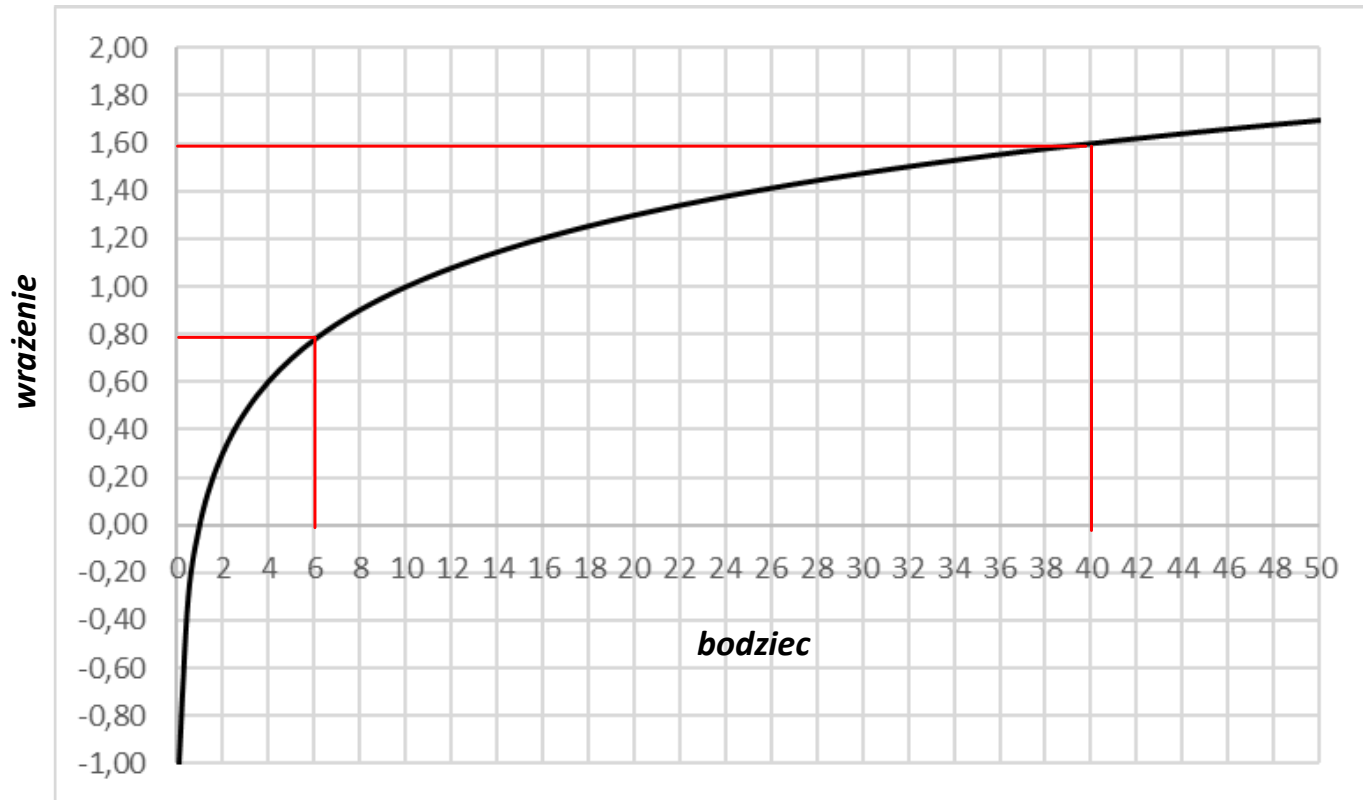
Odnosi się między innymi do:

reakcja na światło, dźwięk, zapach, dotyk, postrzegania czasu przez człowieka i innych

materiał
rozszerzający wiedzę

logarytmy w życiu człowieka

bodziec wzrósł blisko siedem razy a wrażenie dwukrotnie



logarytmy w życiu człowieka

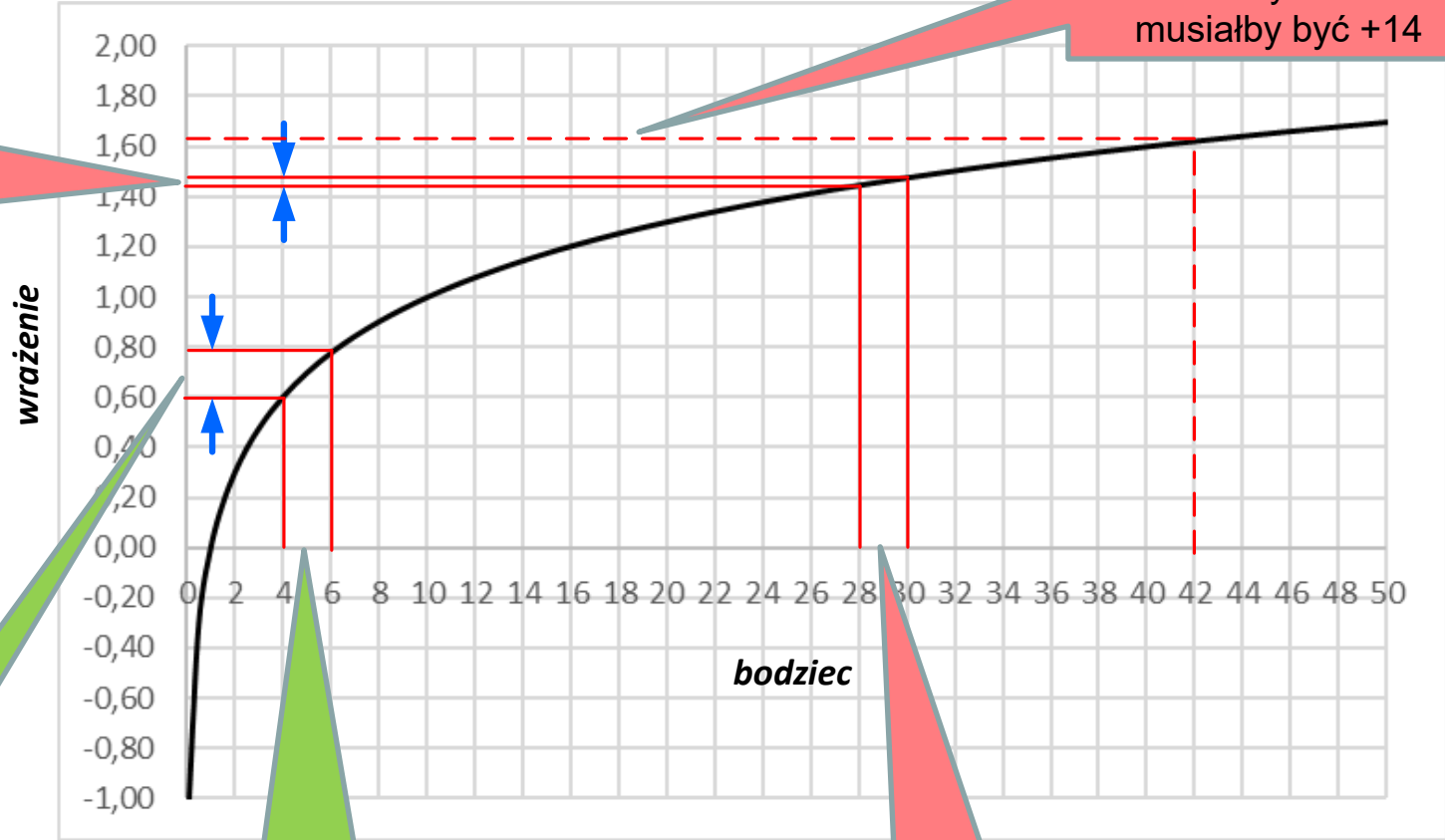
logarytmiczne postrzeganie finansów

materiał
rozszerzający
wiedzę

słabe
wrażenie
to mnie nie
interesuje

silne
wrażenie
wchodzę w
ten interes

gdyby było tak to
owszem
ale wtedy bodziec
musiałby być +14



mogę zarobić +2
gdy mam 4

mogę zarobić +2
gdy mam 28

5. Tranzystor bipolarny

K O N I E C