

TRANZYSTORY BIPOLARNE ZŁĄCZOWE Bipolar Junction Transistor - BJT

Tranzystor bipolarny to odpowiednie połączenie dwóch złącz *pn*

kolektor
baza
emiter

kolektor
baza
emiter

FET **BJT**

n-type Si

n-type diffused p-type diffused

■ p-type Si(diffused) ■ n-type Si(substrate) ■ SiO₂
■ Aluminum ■ Photoresist ■ n-type Si(diffused)

Budowa tranzystora w technologii planarnej:

Tranzystor - 1947

The Nobel Prize in Physics 1956

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"

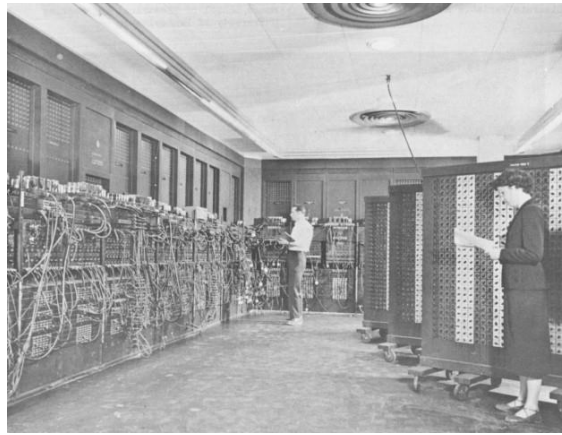
William Bradford Shockley
1/3 of the prize
USA
Semiconductor Laboratory of Beckman Instruments, Inc.

John Bardeen
1/3 of the prize
USA
University of Illinois Urbana, IL, USA

Walter Houser Brattain
1/3 of the prize
USA
Bell Telephone Laboratories Murray Hill, NJ, USA

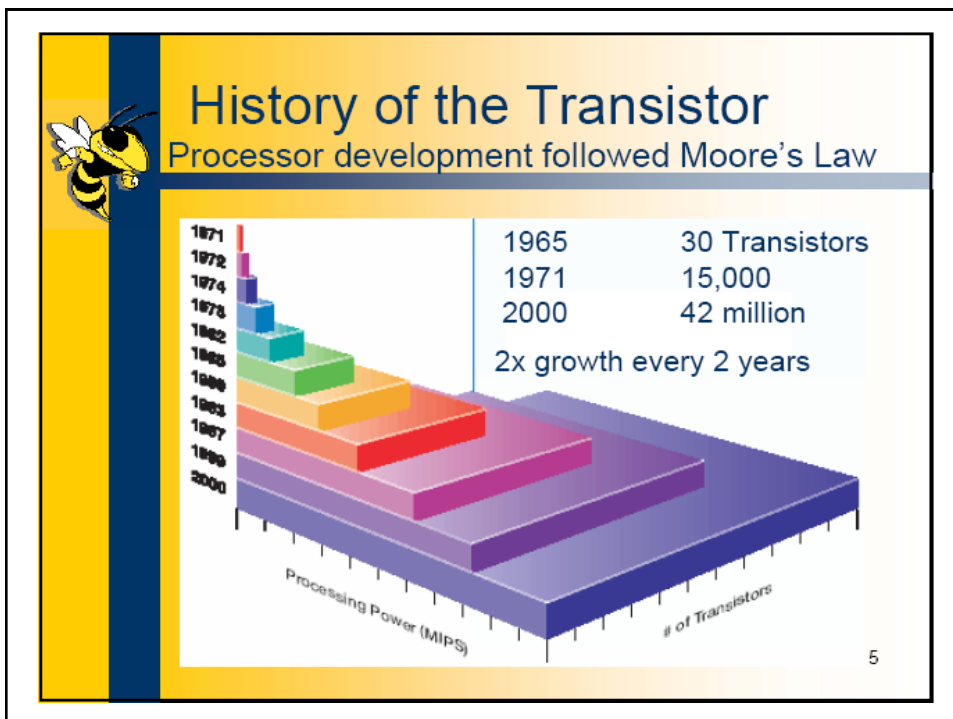
ENIAC (1947)

18 000 lamp elektronowych
masa: ponad 27 ton,
powierzchnia ok. 140 m²



"Nature abhors the vacuum tube."

J.R. Pierce, Bell Labs engineer who coined the term 'transistor'

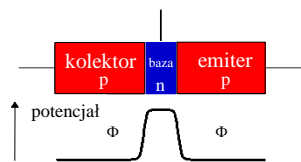


Działanie tranzystora bipolarnego złączowego pnp

a) Układ niespolaryzowany

(brak wymuszonej polaryzacji zewnętrznej)

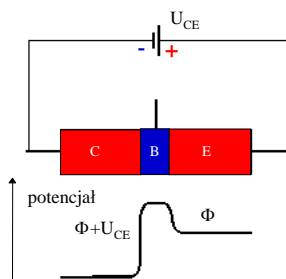
- ❑ Bariera potencjału na złączu emiter-baza i na złączu kolektor-baza
- ❑ dziury z emitera nie przenikają do kolektora, równowaga dynamiczna prądów rekombinacji i generacji



b) Zewnętrzne źródło polaryzacji układu emiter-kolektor

(baza na potencjale nieustalonym zewnętrznie)

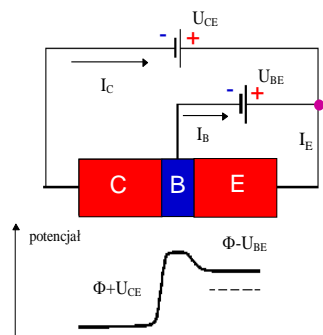
- ❑ Napięcie U_{CE} odkłada się na zaporowo spolaryzowanym złączu baza-kolektor
- ❑ Wysokość bariery potencjału na złączu emiter-baza bez zmian.
- ❑ Brak przepływu prądu w obwodzie



Działanie tranzystora bipolarnego złączowego pnp c.d.

c) Złącze emiter-baza spolaryzowane w kierunku przewodzenia napięciem U_{BE}

- ❑ Bariera potencjału na złączu E-B maleje,
- ❑ Dziury z emitera dyfundują do bazy,
- ❑ Następnie dziury dyfundują do kolektora,
- ❑ Płynie prąd I_C w gałęzi kolektora (warunek: niewielka rekombinacja dziur w bazie)
- ❑ Napięcie U_{BE} określa wysokość bariery potencjału na złączu E-B, czyli „opór” między emiterem i kolektorem



TRANSISTOR = TRANSfereable resISTOR.

Tranzystor **nnp** działa analogicznie przy odwrotnej polaryzacji; kierunek przepływu prądu jest przeciwny; nośnikami prądu kolektora są elektrony

złącze B-C złącze B-E

kolektor baza emiter

Rozkład prądów w tranzystorze bipolarnym

prąd emitera
 $I_E = I_C + I_B$

prąd kolektora I_C

I_B = prąd rekombinacji elektronów w emiterze + prąd rekombinacji dziur w bazie

Prąd emitera I_E - dyfuzja dziur z emitera do bazy

Procesy rekombinacyjne:

- część dziur rekombinuje w bazie
- elektrony z bazy dyfundują do emitera, gdzie także rekombinują

jeśli baza odpowiednio cienka, większość dziur z emitera dociera do złącza B-C

dziury wpływające do kolektora tworzą prąd kolektora I_C

Wyływ prądu I_B z bazy do zewnętrznego źródła:

- równowagi procesy rekombinacyjne
- utrzymuje wysokość bariery potencjału baza - emiter na stałym poziomie

Efekt tranzystorowy zachodzi gdy:

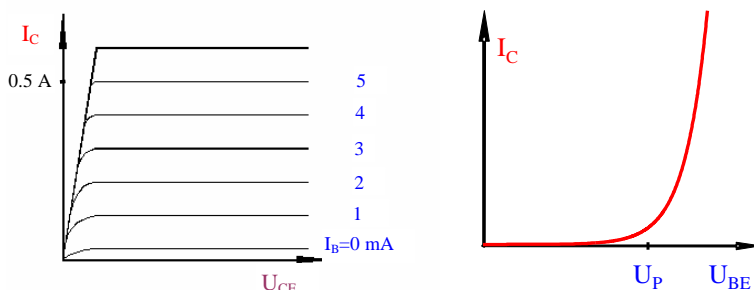
- oba złącza monokrystaliczne
- dioda (złącze) emiterowa spolaryzowana w kierunku przewodzenia
- dioda (złącze) kolektorowa spolaryzowana w kierunku zaporowym
- grubość bazy mała w porównaniu z długością drogi dyfuzji nośników większościowych z emitera ($\ll 0.01 - 0.1 \text{ mm}$)
- obszar emitera musi zawierać znacznie więcej nośników większościowych niż obszar bazy;
- prąd płynący od strony emitera $10^3 - 10^5$ razy większy niż prąd od strony bazy

Zachodzi relacja: $I_E = I_C + I_B$ oraz prąd I_C jest proporcjonalny do prądu I_B

Współczynnik wzmacnienia prądowego tranzystora:

$$\beta = h_{21E} = \frac{I_C}{I_B}$$

zwykle $\beta \approx 100$, o ile zewnętrzne źródła zezwalają



Charakterystyka prądowo-napięciowa tranzystora

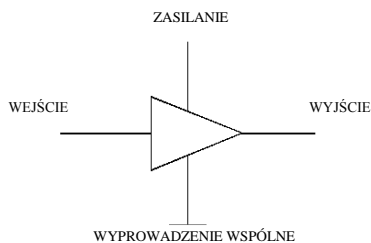
- Prąd kolektora I_C narasta β -razy szybciej niż prąd bazy I_B
- Prąd kolektora słabo zależy od napięcia kolektor-emiter (U_{CE}).

Wprowadzenie prądu do bazy (wywołanie przepływu prądu kolektora) jest możliwe, gdy napięcie U_{BE} przekroczy napięcie przewodzenia złącza danego typu (0.65 V dla krzemu, 0.35 V dla germanu)

WZMACNIACZE TRANZYSTOROWE

Wzmacniacz to układ elektroniczny, w którym energia z układu zasilania jest zamieniana na energię sygnału wyjściowego

Sygnał wyjściowy jest funkcją sygnału wejściowego



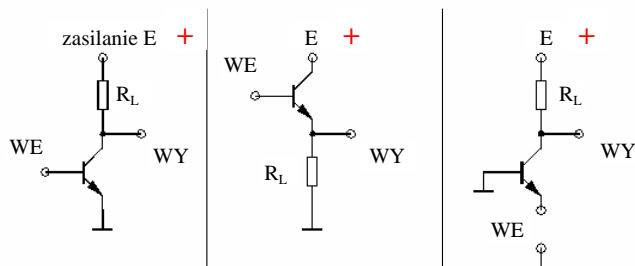
Wzmacniacz tranzystorowy:



specjalny, sterowany dzielnik napięcia zasilającego

Jednym z rezystorów w tym dzielniku jest tranzystor

Trzy podstawowe układy wzmacniające z tranzystorem bipolarnym:

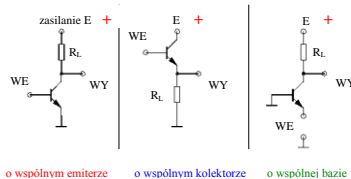


o wspólnym emiterze o wspólnym kolektorze o wspólnej bazie

Inne wyspecjalizowane wzmacniacze:

są modyfikacjami lub kombinacjami układów podstawowych.

WŁASNOŚCI WZMACNIACZY



o wspólnym emiterze o wspólnym kolektorze o wspólnej bazie

Zakładamy kształt sygnału wejściowego (sterującego):

$$u_{WE}(t) = U_{WE} \cos(\omega t) + U_{WE0}$$

- podkład stały U_{WE0}
- składowa zmienna harmoniczna o amplitudzie U_{WE}

Sygnał użyteczny (niosący informację): składowa zmienna

Zakładamy :

- tę samą postać napięcia wyjściowego i wejściowego
- tę samą postać prądu wyjściowego i wejściowego

czyli wzmacniacz pracuje w zakresie liniowym

Przypomnienie: $I_C = \beta \cdot I_B$ $I_E = I_C + I_B$ $I_E = (\beta + 1) \cdot I_B$

Wzmacniacz o wspólnym emiterze:

- ❑ prąd wejściowy = prąd bazy
- ❑ prąd wyjściowy = prąd kolektora

$$\Rightarrow I_{WY} = I_{WE} \cdot \beta$$

➔ duże wzmocnienie prądowe

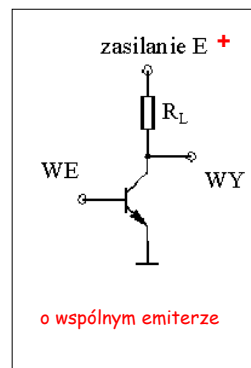
$$U_{WY} = E - I_{WY} \cdot R_L$$

Dla dużego oporu rezystora R_L następuje na nim duży spadek napięcia, a więc:

➔ duże wzmocnienie napięciowe

➔ duże wzmocnienie mocy

➔ zachodzi **odwrócenie fazy** napięcia wyjściowego względem wejściowego



Wzmacniacz o wspólnym kolektorze (wtórnik emiterowy)

$$U_{WY} = U_{WE} - U_{BE}$$

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{U_{WE} - U_{BE}}{U_{WE}} < 1$$

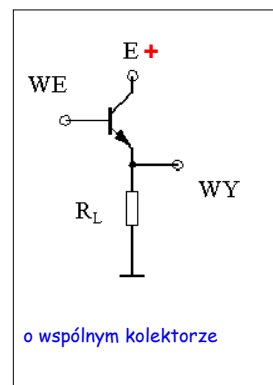
czyli: **brak wzmocnienia napięciowego**

prąd wejściowy = prąd bazy
prąd wyjściowy = prąd emitera

czyli $I_{WY} = I_{WE} \cdot (\beta + 1)$

➔ **wzmocnienie prądowe jest duże**

- ❑ zgodne fazy sygnału wyjściowego i wejściowego



Wzmacniacz o wspólnej bazie:

prąd wejściowy = prąd emitera:

$$I_{WE} = I_B(\beta + 1)$$

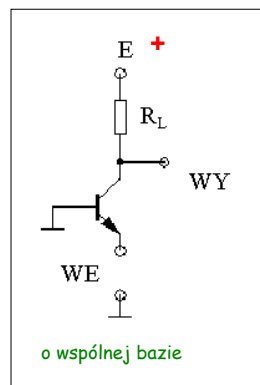
prąd wyjściowy = prąd kolektora:

$$I_{WY} = I_B\beta$$

wzmocnienie prądowe: $\frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{\beta}{\beta + 1} < 1$

brak wzmocnienia prądowego !

- przy odpowiednio dużym oporze rezystora R_L można uzyskać duże zmiany napięcia na wyjściu czyli **możliwe duże wzmocnienie napięciowe**
- napięcie wyjściowe zgodne w fazie z napięciem wejściowym



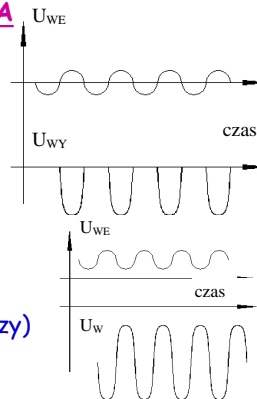
PODSUMOWANIE

	Wzmacniacz o:	WSPÓLNYM EMITERZE	WSPÓLNYM KOLEKTORZE	WSPÓLNEJ BAZIE
1	Wzmocnienie napięciowe	duże	< 1	duże
2	Wzmocnienie prądowe	duże	duże	< 1
3	Przesunięcie fazowe WE-WY	180°	0°	0°
4	Pasma przenoszenia	małe	średnie	duże

WYZNACZANIE PUNKTU PRACY TRANZYSTORA

1. (ustalenie wejściowego prądu składowej stałej)

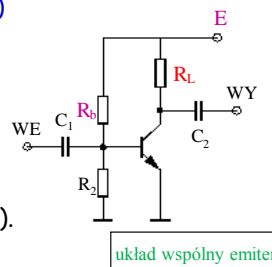
- efekt „prostowania jednopółkowego” - tranzystor pracuje liniowo tylko wtedy, gdy napięcie U_{BE} przekroczy napięcie przewodzenia złącza (np. 0.65 V)
- uzyskanie wzmacniania pełno-okresowego wymaga dodania stałego podkładu (stały prąd bazy) do wejściowego sygnału zmiennego (zmiennego prądu bazy)



Układ automatycznego dodawania podkładu stałego jest układem polaryzacji (określenie punktu pracy tranzystora)

Przykład:

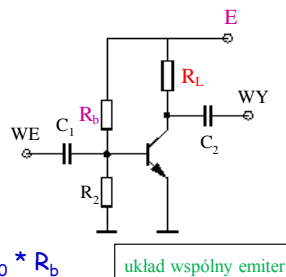
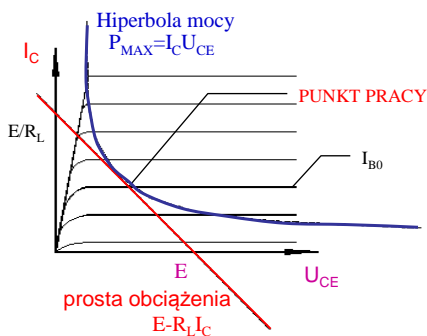
prąd polaryzacji bazy tranzystora ze źródła zasilania przez opornik R_b ustalający składową stałą na wejściu. Kondensatory C_1 i C_2 służą do odseparowania podkładu stałego od wejścia i wyjścia wzmacniacza (sprzężenie AC).

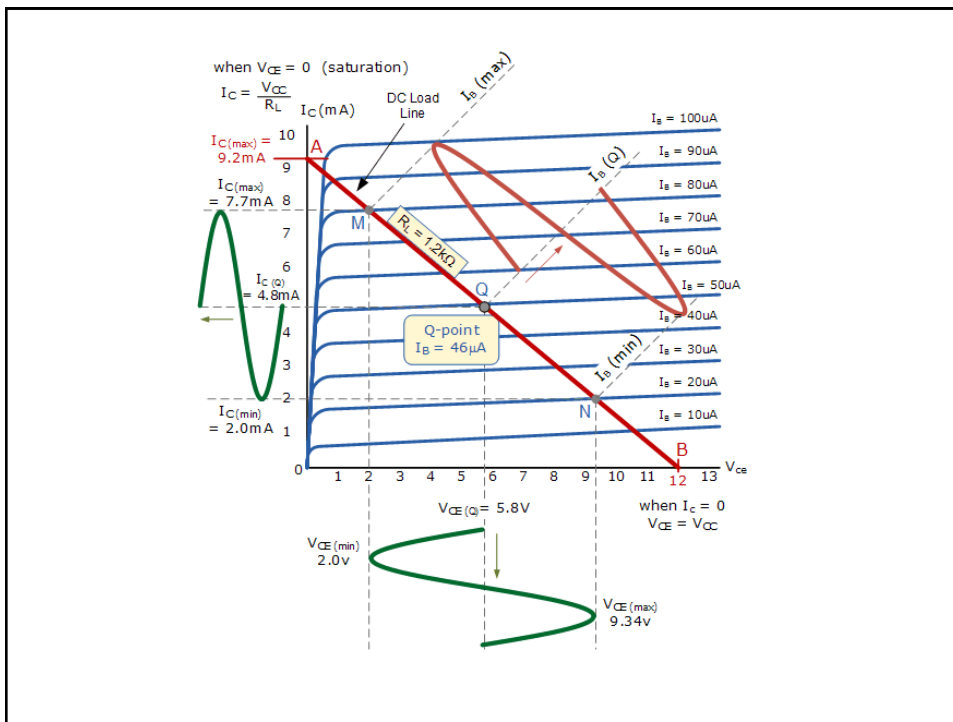


USTALANIE OPTIMALNEGO PUNKTU PRACY TRANZYSTORA graficzna analiza charakterystyk

Schemat postępowania:

1. Przestrzeń punktów pracy (U_{CE} , I_C) tranzystora jest ograniczona przez hiperbolę maksymalnej dopuszczalnej cieplnej mocy strat tranzystora, określonej w katalogu przez producenta:
 $P_{MAX}=I_C * U_{CE}$
2. Tranzystor pracuje w układzie dzielnika napięcia z rezystorem R_L
 - przestrzeń punktów pracy ogranicza się do prostej opisanej równaniem: $U_{CE} = E - R_L * I_C$ (tzw. prosta obciążenia)
 - Napięcie zasilania E oraz opór R_L dobieramy tak, by prosta obciążenia była styczna do hiperboli mocy (lub przebiegała poniżej)
3. Odczytujemy optymalny prąd stałego podkładu I_{B0} ,
→ wyznaczamy wartość opornika R_b z r-nia: $E-0.65V=I_{B0} * R_b$





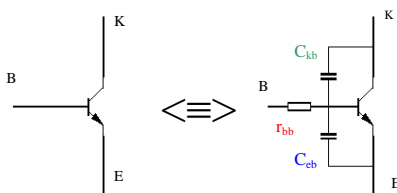
PASMO WZMOCNIENIA I PASMO PRZENOSZENIA

Pasmo wzmocnienia (przenoszenia) wzmacniacza określone jest przez:

- własności tranzystora (**wielkości pasożytnicze**)
- sposób współdziałania tranzystora z obwodem wzmacniacza
- podłączenia wejścia i wyjścia wzmacniacza

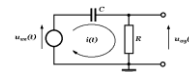
Pasożytnicze elementy tranzystora rzeczywistego:

rozproszona rezystancja bazy r_{bb} , pojemności emiter-baza C_{eb} i kolektor-baza C_{kb}



r_{bb} i C_{eb} tworzą filtr górnoprzepustowy, który bocznkuje złącze baza-emiter

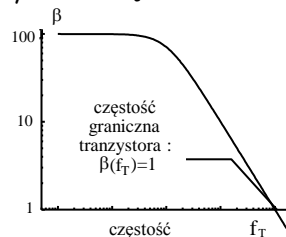
➔ zmniejszenie prądu sterującego tranzystor przy wysokich częstotliwościach



Skutek: współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora maleje wraz ze wzrostem częstotliwości

Pasmo wzmocnienia tranzystora jest ograniczone przez **częstość graniczną f_T** :

- powyżej częstotliwości f_T współczynnik wzmocnienia prądowego $\beta < 1$



Efekt Millera

Sprężenie między kolektorem a bazą w postaci filtra górnoprzepustowego tworzono przez: C_{kb} , r_{bb} oraz rezystancję źródła sygnału R_{WYG}

➔ ograniczenie pasma przenoszenia wzmacniacza w układzie o wspólnym emiterze
sygnały wyjściowe i wejściowe są przeciwne w fazie

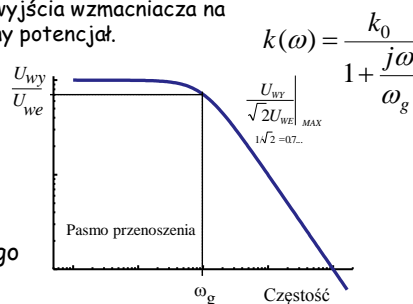
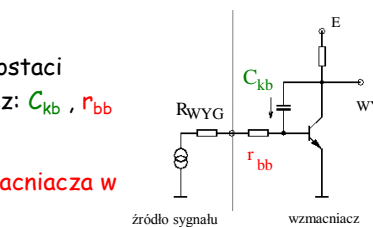
ujemne sprzężenie zwrotne wyjścia (kolektor) z wejściem (baza)

W układzie o wspólnym kolektorze słaby wpływ efektu Millera, gdyż kolektor tranzystora jest połączony z niskorezystywnym źródłem zasilania

W układzie o wspólnej bazie nie ma oddziaływania wyjścia wzmacniacza na wejście przez pojemność C_{kb} , gdyż baza ma ustalony potencjał.

Pasma przenoszenia wzmacniacza określa się podobnie jak pasmo przenoszenia filtra:

dla częstotści granicznych wzmacniacza wzmocnienie jest mniejsze: $\frac{1}{\sqrt{2}}$ maksymalnego



Instrukcja do ćwiczenia „Tranzystor bipolarny - wzmacniacz tranzystorowy Część I

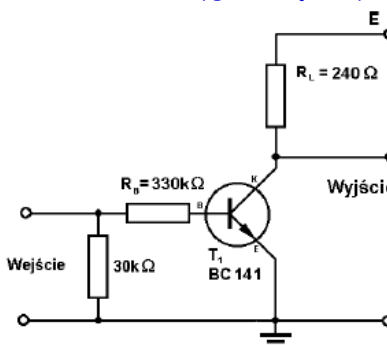
Napięcie E z generatora:
sygnał liniowo narastający od 0V do 5 V i
częstości około 1000 Hz (sygnał trójkątny)

Zbudować obwód:

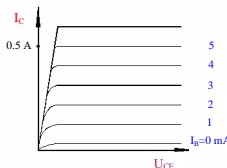
Napięcie U_{WE} :

- stałe napięcie z zasilacza regulowane w zakresie od 0 do 10 V
- mierzymy za pomocą woltomierza

$$I_C = \frac{E - U_{WY}}{R_L} \quad I_B = \frac{U_{WE} - 0.65V}{R_B}$$



$$U_{CE} = U_{WY}$$



- ❑ wyznaczyć charakterystyki $I_C(U_{CE})$; parametr: prąd bazy I_B
- ❑ wykreślić rodzinę charakterystyk tranzystora.

Część II

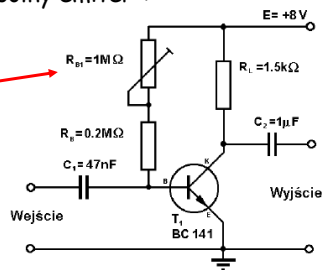
Zbudować wzmacniacz w układzie „wspólny emiter”:

- ❑ zasilić układ napięciem stałym $E=+8\text{ V}$
- ❑ zmierzyć za pomocą woltomierza napięcie kolektora
- ❑ dobrać wartość opornika regulowanego R_{B1} by $U_{CE}=4\text{ V}$

→ optymalny punkt pracy tranzystora we wzmacniaczu

U_{WE} - zmienny sygnał sterujący bazą

U_{WY} - napięcie na kolektorze



Wyznaczenie charakterystyki amplitudowej wzmacniacza - $U_{WY}(U_{WE})$

- ❑ Wejście układu: sygnał sinusoidalny o częstotliwości około 1000 Hz
- ❑ Mierzimy $U_{WY}(U_{WE})$ w całym zakresie mierzalnych amplitud wejściowych.
- ❑ Określamy zakres amplitud U_{WE} , dla których wzmacniacz pracuje liniowo.
- ❑ Dla tego zakresu wyznaczamy wzmocnienie wzmacniacza k , dopasowując do danych doświadczalnych prostą typu $U_{WY}=k \cdot U_{WE}$

Wyznaczenie charakterystyki częstotściowej wzmacniacza:

wzmocnienie w funkcji częstotliwości: $k(\omega)$

Amplitudę sygnału wejściowego należy dobrać tak, by w całym zakresie badanych częstotliwości (10 Hz - 1 MHz) sygnał był przetwarzany liniowo

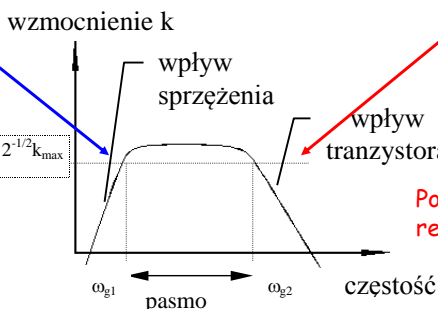
ANALIZA

Wyznaczyć częstotliwości graniczne

Układ różniczkujący

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{\frac{j\omega}{\omega_{g1}}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{g1}}}$$

Pojemność i rezystancja wejściowa wzmacniacza

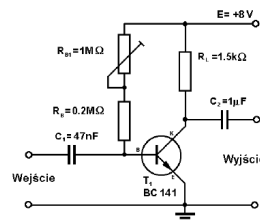


Układ całkujący

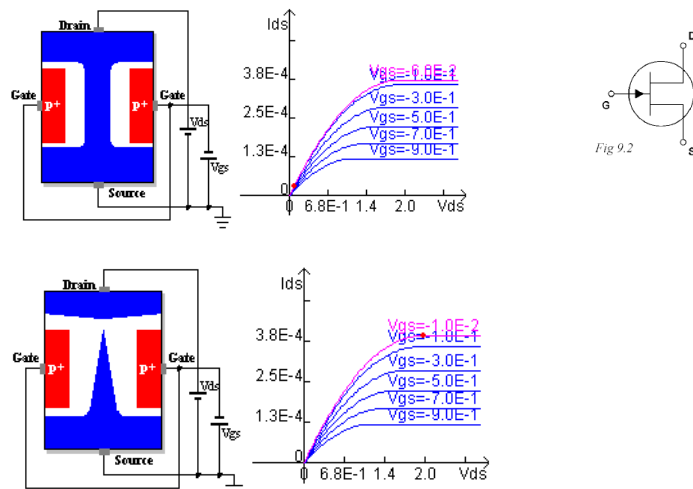
$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{1}{\frac{j\omega}{\omega_{g2}}}$$

Pojemność i rezystancja wyjścia

Filtr górno- dolno-przepustowy: $\omega_g = \frac{1}{RC}$



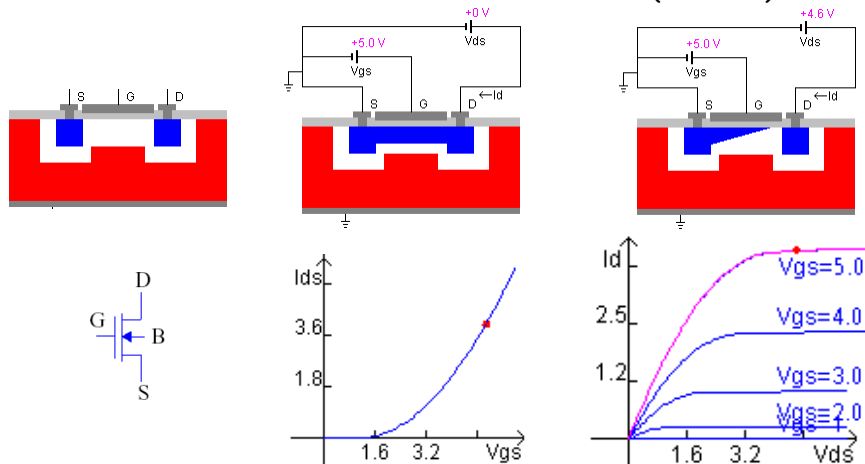
TRANZYSTORY POLOWE TRANZYSTORY POLOWE ZŁĄCZOWE (Junction Field Effect Transistors)



Rezystancja wejściowa (GATE - SOURCE) tranzystora sięga $10^9 \Omega$

TRANZYSTORY POLOWE Z IZOLOWANĄ BRAMKĄ

Isolated Gate Field Effect Transistors
Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET)



Opór bramki względem podłoża sięga $10^{12}-10^{14} \Omega$

tranzystory MOSFET w wersjach: wstępnie otwarty lub wstępnie zamknięty