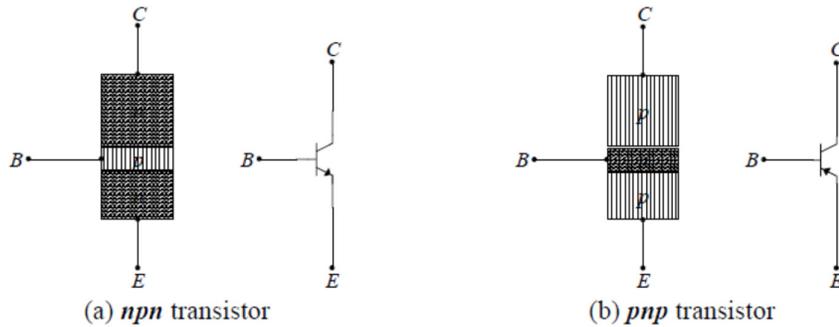


## Transistor Bipolare a Giunzione

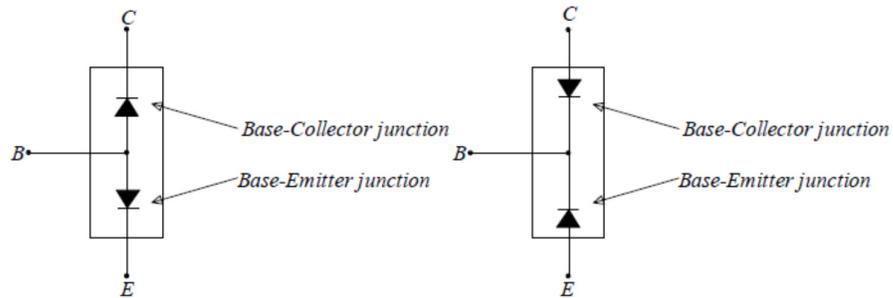
(Bipolar Junction Transistor  $\equiv$  *BJT*; Transistor  $\equiv$  *Transfer Resistor*)

Dispositivo a 3 terminali (cfr. diodo: 2 terminali)

2 tipi: NPN , PNP



2 giunzioni *pn*, 'back to back':



Tuttavia: Non equivalente a 2 diodi collegati insieme!

Utile come modello circuitale per alcuni scopi,

ma con 2 diodi non si fa un transistor..

2 giunzioni, BE e BC: ognuna in polarizzazione diretta/inversa

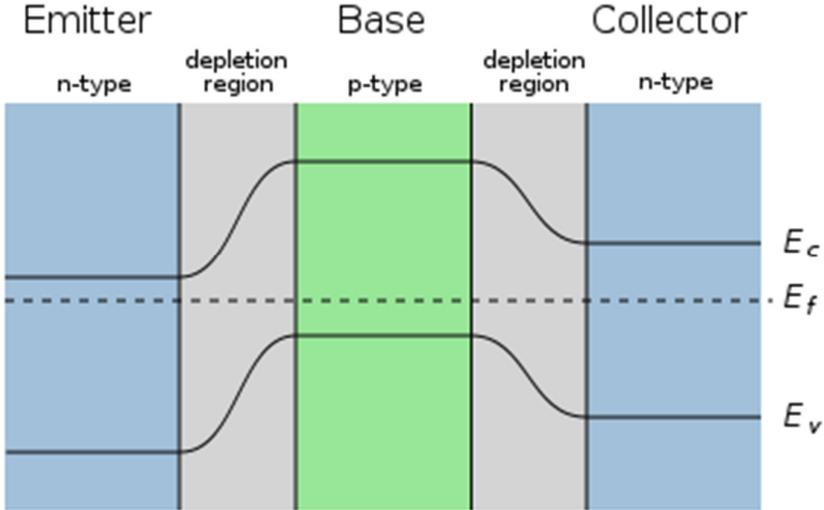
→ 4 possibili modi di funzionamento

<i>BE On / BC Off</i>	<i>BE On / BC On</i>
<i>Zona lineare</i>	<i>Saturazione</i>
<i>BE Off / BC Off</i>	<i>BE Off / BC On</i>
<i>Interdizione</i>	<i>Zona lineare inversa</i>

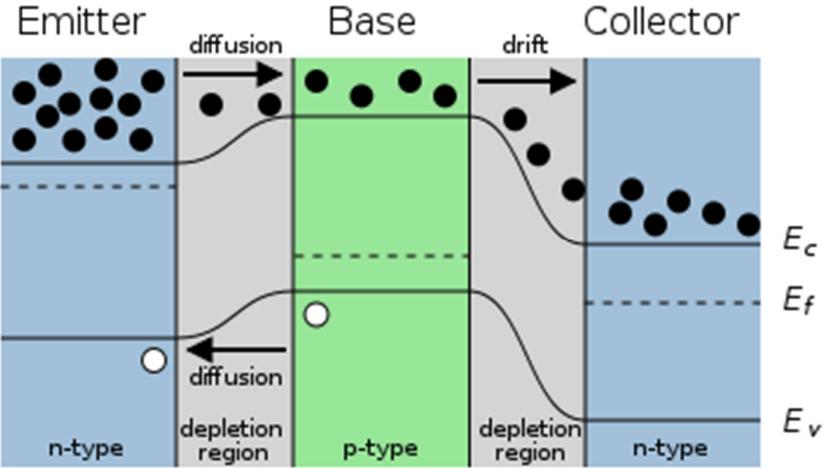
NB Zona lineare inversa: Ottenibile in principio per scambio  $C \leftrightarrow E$

Costruzione del *BJT* non simmetrica → Non utilizzabile/usata

No polarizzazione → Equilibrio:



Zona attiva:



Effetto transistor: Zona lineare

→ Giunzione di emettitore On / Giunzione di collettore Off

Giunzione  $BE$ :

$$I = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

Contributi alla corrente, es  $npn$ :  $I = I_e + I_h$

Se drogaggio di  $E \gg$  drogaggio di  $B, C \rightarrow I_e \gg I_h$

→ Movimento di  $e$  da  $E$  a  $B$  dominante

→  $B$  dinamicamente ricca di  $e$

Se geometria di  $B$  adatta ( $\leftarrow B$  sottile, ben circondata da  $C$ )

→ Diffusione di  $e$  da  $B$  a strato di svuotamento di giunzione  $BC$  facile

Giunzione  $BC$ :

polarizzata inversamente per  $h$  provenienti da  $B$  (normali = maggioritari)

'polarizzata direttamente' ( $\leftarrow$  come se) per  $e$  provenienti da  $E$  tramite  $B$  (minoritari)

Sistema di 2 giunzioni (opportunamente costruite, in zona lineare):

Frazione elevata ( $>90\%$ , vicina al  $100\%$  tipicamente) della corrente 'maggioritaria' di  $e$  nella giunzione  $BE$  scorre come corrente 'minoritaria' nella giunzione  $BC$

Quindi:

$$\left. \begin{array}{l} I_E = I_B + I_C \\ I_B \ll I_E, I_C \end{array} \right\} I_C = \alpha I_E \approx I_E$$

→ Corrente di collettore  $\sim$  Corrente di emettitore

D'altra parte:

$I_B$  controlla iniezione di  $e$  da  $E$  a  $B \rightarrow$  Concentrazione di  $e$  in  $B \rightarrow I_C$

Fissati geometria e drogaggio:

$$I_C = \alpha I_E \rightarrow I_B = (1 - \alpha) I_E \rightarrow I_E = \frac{1}{1 - \alpha} I_B \rightarrow I_C = \alpha I_E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B$$

$$\beta \equiv \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \alpha \geq 0.9 (\text{tipico}) \rightarrow \beta \geq 10$$

$$\beta_{\text{tipico}} \sim 100$$

$\rightarrow I_C = \beta I_B$  (Forte) Amplificazione di corrente

Morale:

Sistema di 2 giunzioni opportunamente realizzate > Somma delle sue parti

Nuova proprieta' utilizzabile per amplificazione di segnali (es da antenne Radio, TV)

Variatione della corrente di base:  $\delta_{IB}$   $\rightarrow$  Variatione della corrente di collettore:  $\delta_{IB} \times \beta$

*Input* *Output*

$\beta$  parametro caratteristico di ogni tipo di BJT:

Guadagno di corrente a emettitore comune

Dipende da geometria e concentrazioni

Tradizionalmente (tempo dei componenti discreti):

Controllo del processo limitato

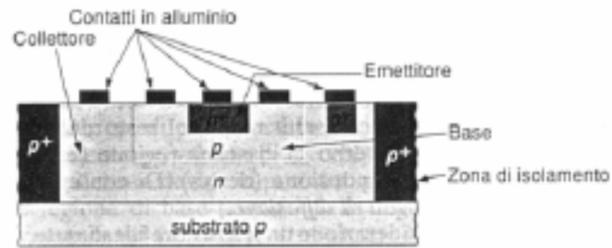
$\rightarrow$  Forti fluttuazioni in geometria, concentrazioni

$\rightarrow \beta$  non costante da un esemplare all'altro

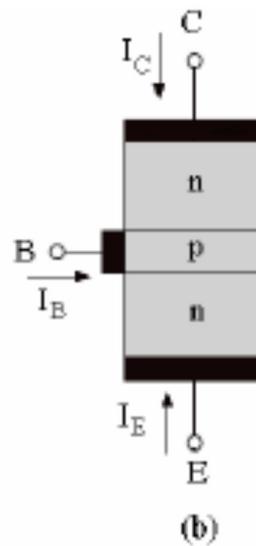
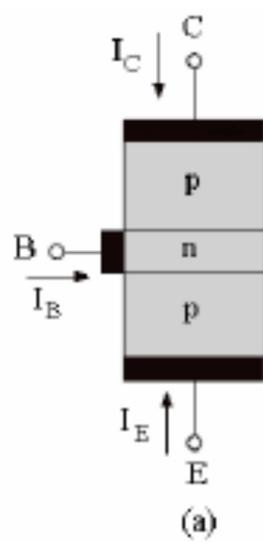
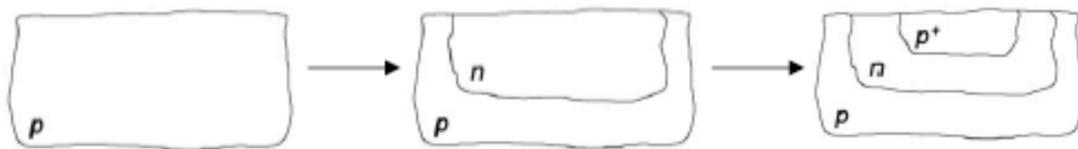
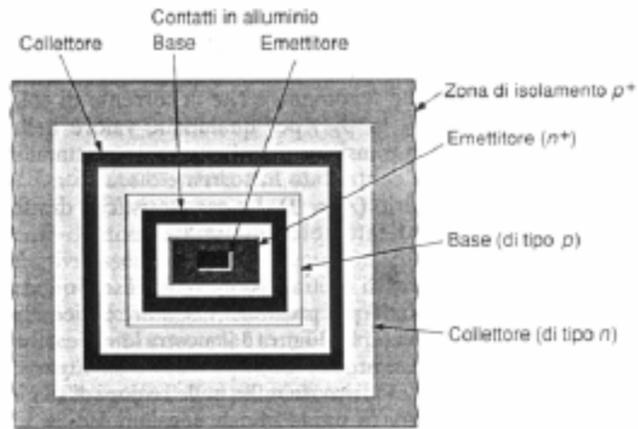
$\rightarrow$  *Non usare*  $\beta$  come parametro di progetto

Principio salutare, anche se oggi meno importante

(costruzione BJT sui circuiti integrati meglio controllata)

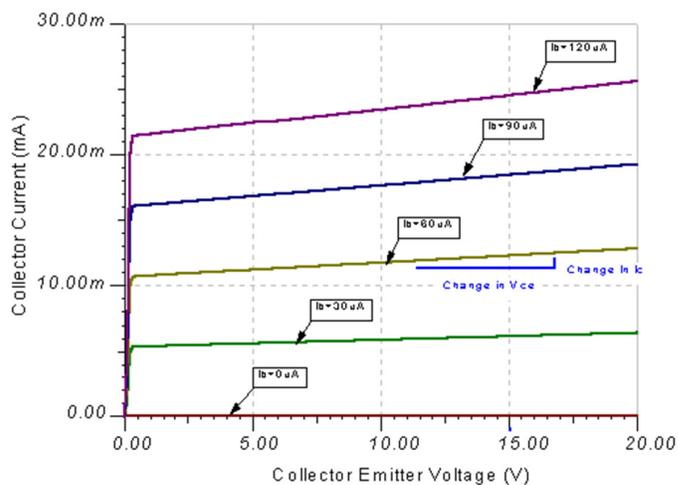
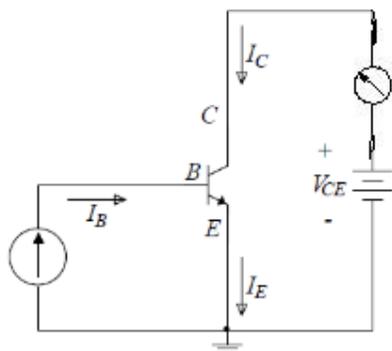


(a)



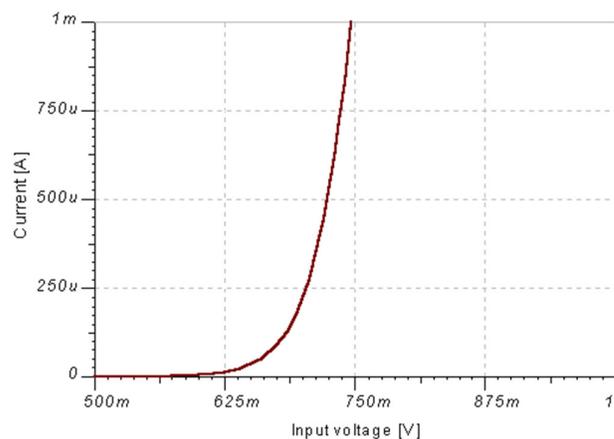
Caratteristiche di uscita:  $I_C$  vs  $V_{CE}$ , a step di  $I_B$

Circuito 'teorico' per la misura delle caratteristiche di collettore:



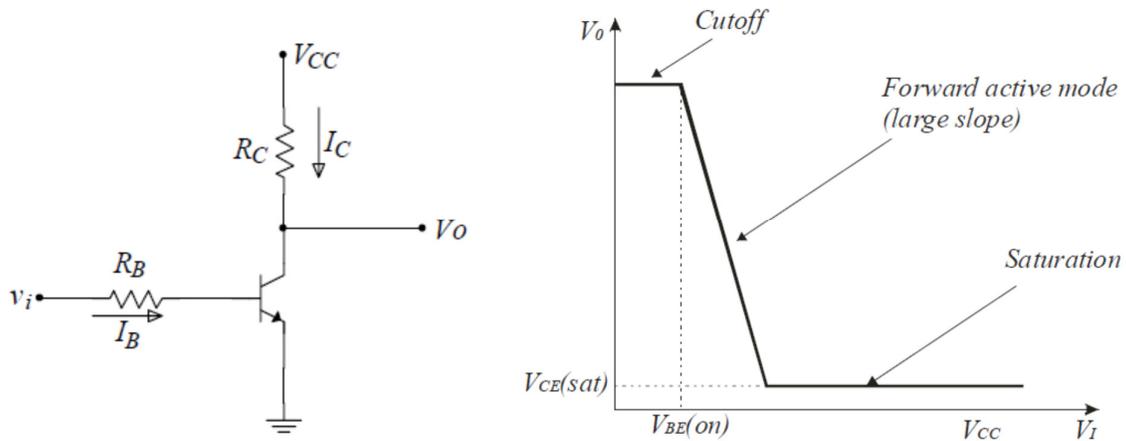
Caratteristiche di ingresso:  $I_B$  vs.  $V_{BE}$

Pochissimo dipendente da  $V_{CE}$



Configurazione a emettitore comune:

*E* contatto in comune fra *in* e *out*

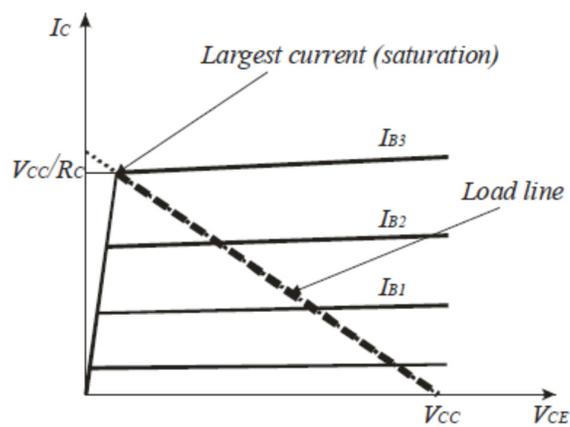


$$I_B = \frac{v_i - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{v_i - V_{BE}}{R_B}$$

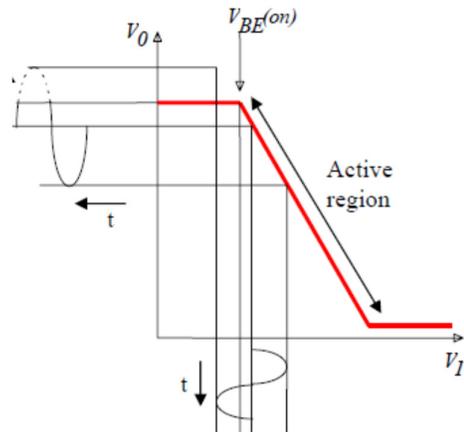
$$\rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \beta \frac{R_C}{R_B} (v_i - V_{BE}), v_i > V_{BE}, V_{CE} < V_{CC}$$



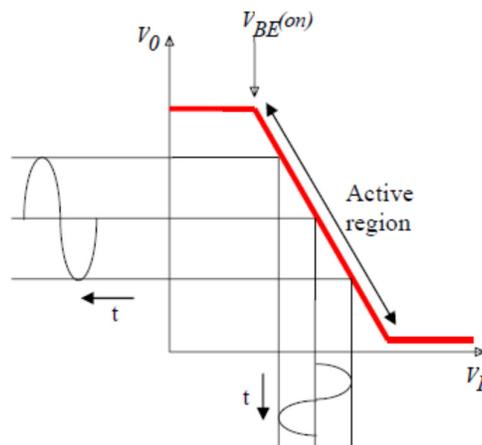
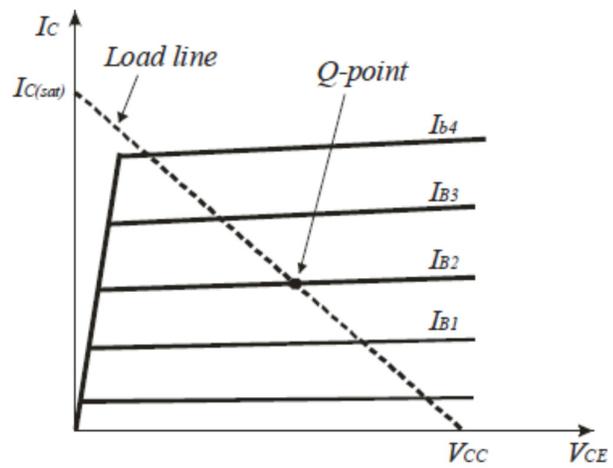
Insoddisfacente quando usato per applicazioni lineari perche':

Guadagno  $\beta$  dipendente

Facile finire in saturazione/interdizione

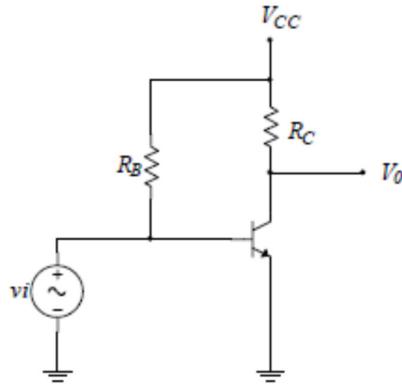


Soluzione: Centraggio su punto medio della retta di carico



→ Transistor deve essere polarizzato (bias)

Schema piu' semplice:



$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} \rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$\rightarrow I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad \text{retta di carico}$$

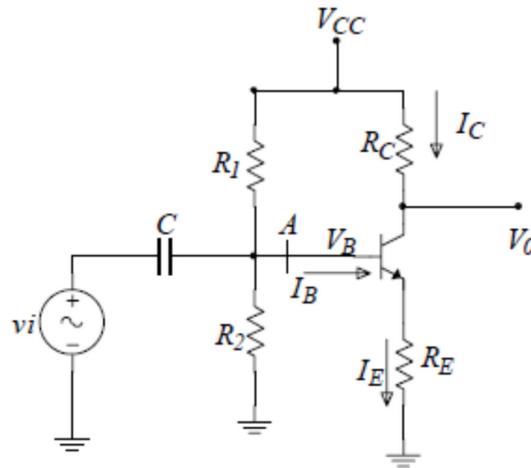
$$\rightarrow \beta I_B = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad \text{punto di lavoro (quiescente)}$$

Insoddisfacente perche' fissato da  $\beta$ :

Variabile da esemplare a esemplare

$T$ -dipendente

Schema migliorato:

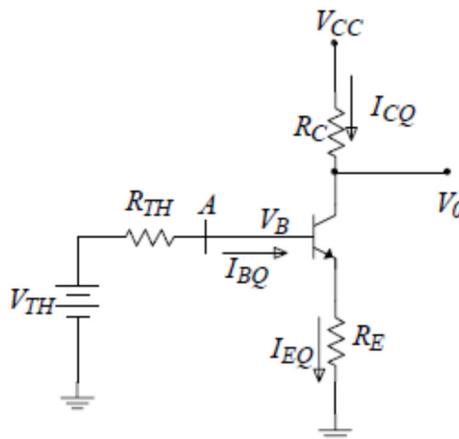


Assunzione di progetto (non sempre valida):

$$V_o \text{ quiescente a meta' range} \rightarrow V_o = \frac{V_{CC}}{2}$$

$$\rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{2R_C} \rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{V_{CC}}{2\beta R_C}$$

Equivalente di Thevenin del partitore di base alimentato da  $V_{CC}$ :



$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, V_{TH} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Punto di lavoro (= quiescente):

$$V_{TH} = I_B R_{TH} + V_{BE} + I_E R_E$$

$$I_C = \beta I_B \rightarrow I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$\rightarrow V_{TH} = I_B [R_{TH} + (\beta + 1) R_E] + V_{BE}$$

$$\rightarrow I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E}$$

$$R_{TH} \ll (\beta + 1) R_E \rightarrow I_B \approx \frac{V_{TH} - V_{BE}}{(\beta + 1) R_E}$$

$$\text{Es: } R_{TH} = \frac{(\beta + 1) R_E}{10}$$

$$\rightarrow I_C \approx \frac{\beta (V_{TH} - V_{BE})}{(\beta + 1) R_E} \approx \frac{(V_{TH} - V_{BE})}{R_E}$$

$$\rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = V_{CC} - I_C \left( R_C + \frac{1 + \beta}{\beta} R_E \right)$$

$$\rightarrow V_{CE} \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

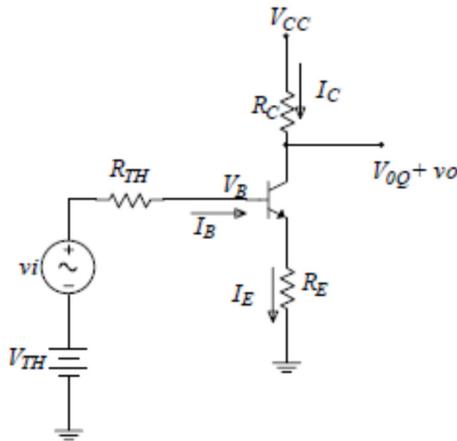
Punto di lavoro (=  $(I_C, V_{CE})$ ):

Indipendente da  $\beta$ , purché  $\beta \gg 1$

→ Indipendente da esemplare

→ Indipendente da T

Guadagno (piccoli segnali):



Transistor in zona lineare:

Correnti/Tensioni corrispondenti al punto di lavoro prescelto

Segnali di ingresso/uscita: incrementi/decrementi rispetto al punto di lavoro

Legge di Kirchoff per le maglie di ingresso e di uscita, applicata agli incrementi di tensione:

$$v_i = i_b R_{TH} + v_{be} + i_E R_E \approx i_b R_{TH} + i_E R_E \quad V_{BE} \sim \text{cost}$$

$$\beta i_B R_C + v_{CE} + i_E R_E = 0 \quad V_{CC} = \text{cost}$$

$$i_B = \frac{v_i - i_E R_E}{R_{TH}}, i_E = (\beta + 1) i_B$$

$$\rightarrow \beta i_B R_C + v_{CE} + (\beta + 1) i_B R_E = 0$$

$$\rightarrow \frac{v_o}{v_i} = - \frac{\beta i_B R_C}{v_i} = - \frac{\beta i_B R_C}{i_B R_{TH} + i_E R_E} = - \frac{\beta i_B R_C}{i_B R_{TH} + i_B (\beta + 1) R_E}$$

$$\rightarrow \frac{v_o}{v_i} = - \frac{\beta i_B R_C}{i_B R_{TH} + i_B (\beta + 1) R_E} = - \frac{\beta R_C}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E}$$

Guadagno di tensione a bassa frequenza per piccoli segnali

$$\frac{v_o}{v_i} \approx - \frac{R_C}{\frac{R_{TH}}{\beta} + R_E} \approx - \frac{R_C}{R_E}, \text{ indipendente da } \beta \text{ etc}$$

Osservazione:

$$v_o = -i_C R_C$$

$$i_B = \frac{v_i - i_E R_E}{R_{TH}}, i_E = (\beta + 1)i_B, i_C = \beta i_B$$

$$\rightarrow i_E = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C$$

$$\rightarrow v_o = -\beta i_B R_C = -\beta \frac{v_i - i_E R_E}{R_{TH}} R_C$$

$$\rightarrow v_o = -\beta \frac{v_i - R_E \frac{\beta + 1}{\beta} i_C}{R_{TH}} R_C = -\beta \frac{v_i - R_E \frac{\beta + 1}{\beta} \frac{v_o}{R_C}}{R_{TH}} R_C$$

$$\rightarrow v_o = -\beta \frac{v_i R_C - v_o \frac{\beta + 1}{\beta} R_E}{R_{TH}}$$

$$\rightarrow v_o \left[ 1 + (\beta + 1) \frac{R_E}{R_{TH}} \right] = -\beta \frac{R_C}{R_{TH}} v_i$$

$$\rightarrow \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta \frac{R_C}{R_{TH}}}{1 + (\beta + 1) \frac{R_E}{R_{TH}}}$$

Sistema controreazionato:

$$A_V (\text{open loop}) \equiv A_{VOL} = -\beta \frac{R_C}{R_{TH}}$$

$$A_V (\text{closed loop}) = -\frac{\beta \frac{R_C}{R_{TH}}}{1 + (\beta + 1) \frac{R_E}{R_{TH}}} = \frac{A_{VOL}}{1 - \frac{A_{VOL}}{\beta} \frac{R_E}{R_C} - A_{VOL} \frac{R_E}{R_C}}$$

$$A_V (\text{closed loop}) \rightarrow = \frac{A_{VOL}}{1 - A_{VOL} \frac{R_E}{R_C} \frac{\beta + 1}{\beta}}$$

$$\rightarrow A_V (\text{closed loop}) \underset{\beta \gg 1}{\approx} \frac{A_{VOL}}{1 - A_{VOL} \frac{R_E}{R_C}} \underset{A_{VOL} \gg 1}{\approx} -\frac{R_C}{R_E}$$