



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

Laboratorio di Elettronica

Marco Aglietta – Ernesto Migliore

aglietta@to.infn.it

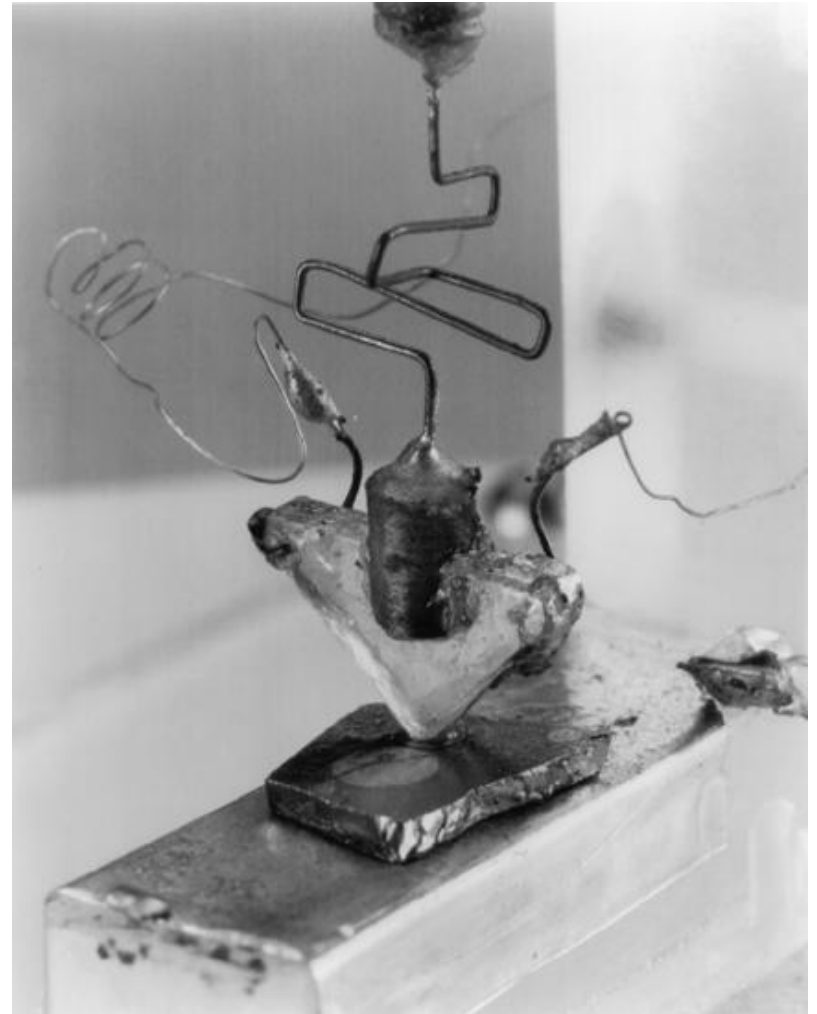
migliore@to.infn.it

CFU 6 - A.A. 2021/22
Corso di laurea in Fisica

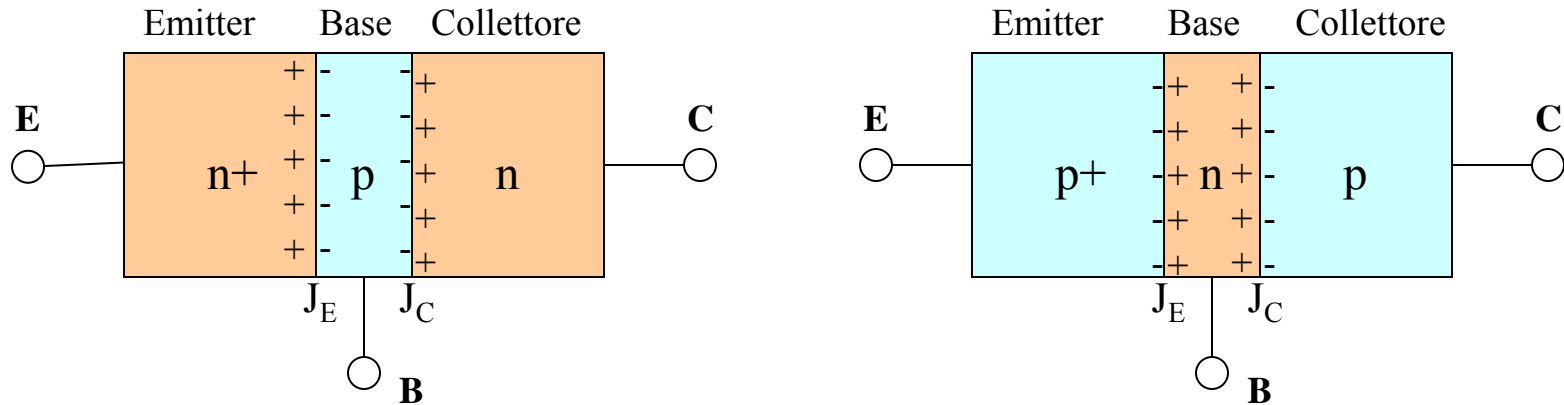
Il Transistor (point contact --- BJT)

Bardeen, Brattain e Schokley. Bell Labs. 1947 -1948

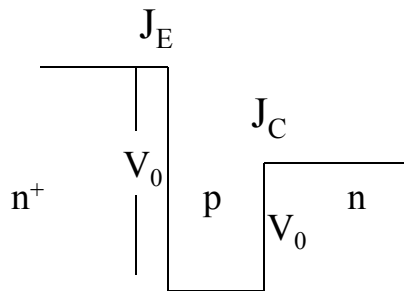
Nobel Fisica 1956



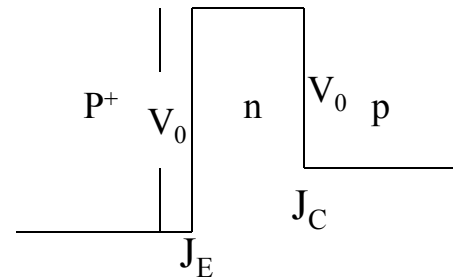
Transistor BJT (Bipolar Junction Transistor)



Base molto sottile (pochi micron) . Emitter piu' intensamente drogato



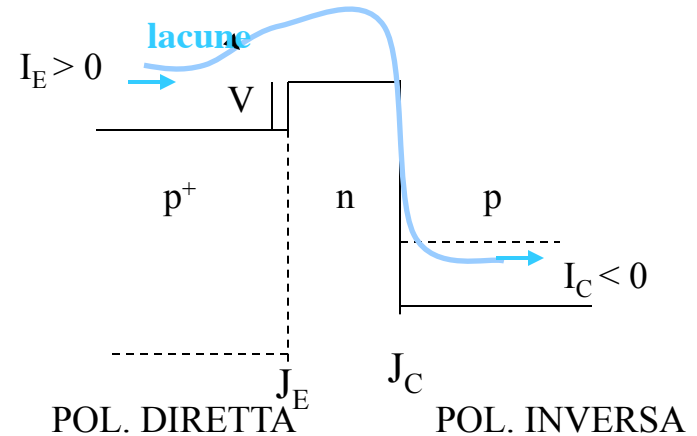
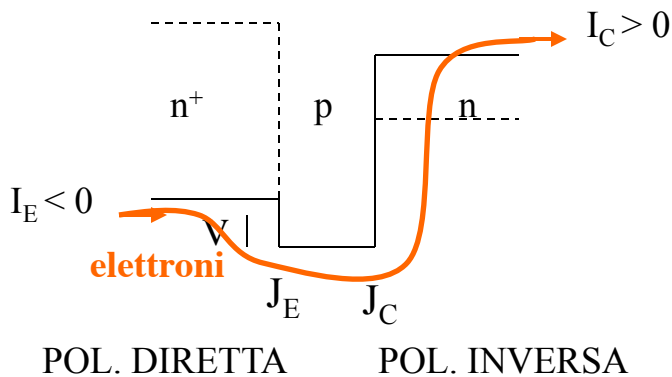
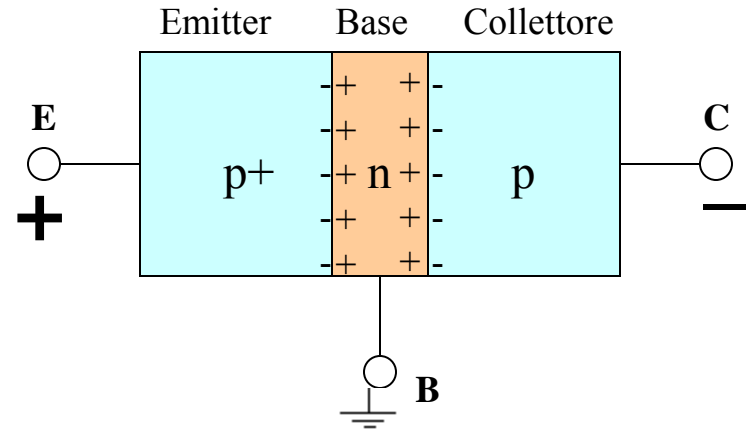
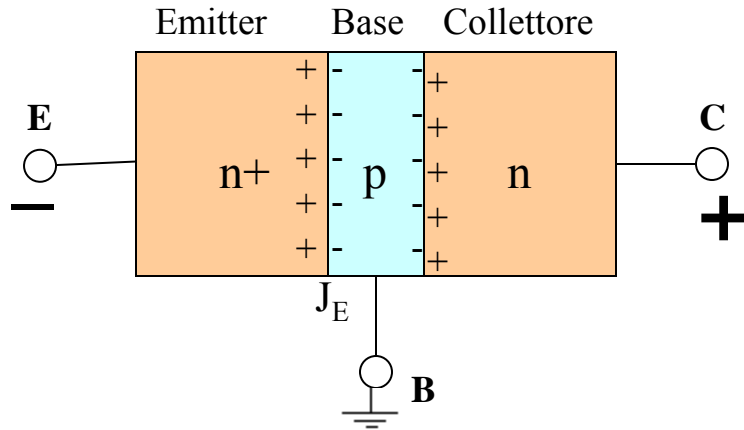
$$V_0 = V_T \ln (N_A N_D / n_i^2)$$



Senza tensioni esterne applicate le barriere di potenziale che si formano alle giunzioni (‘Potenziali di contatto V_0 ’ pochi decimi di Volts) impediscono ulteriori spostamenti delle cariche elettriche ($I=0$)

$$I_{\text{Diffusione}} = I_{\text{Deriva}}$$

Quando la giunzione di emettitore e' polarizzata **direttamente** e quella di collettore e' polarizzata **inversamente** si dice che il transistor e' nella regione **ATTIVA**

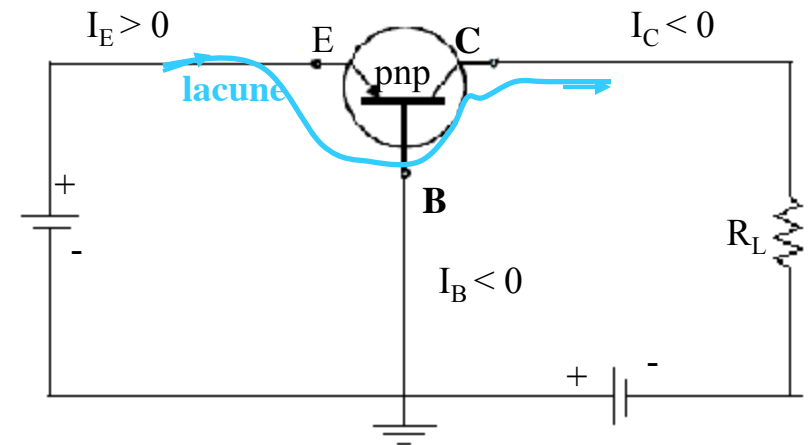
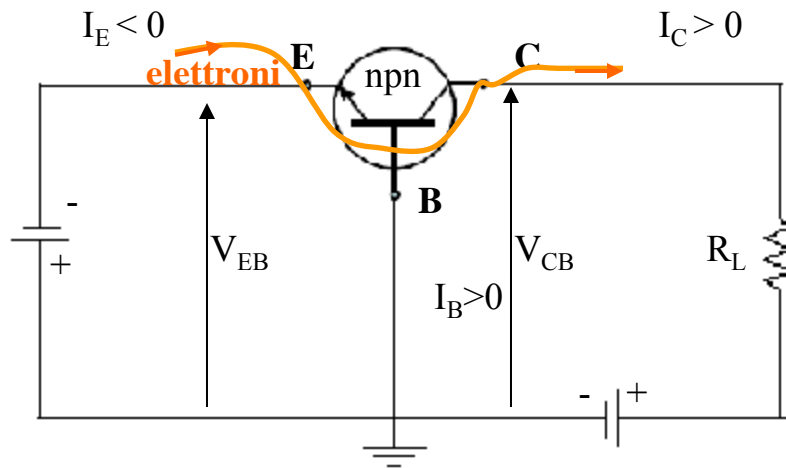
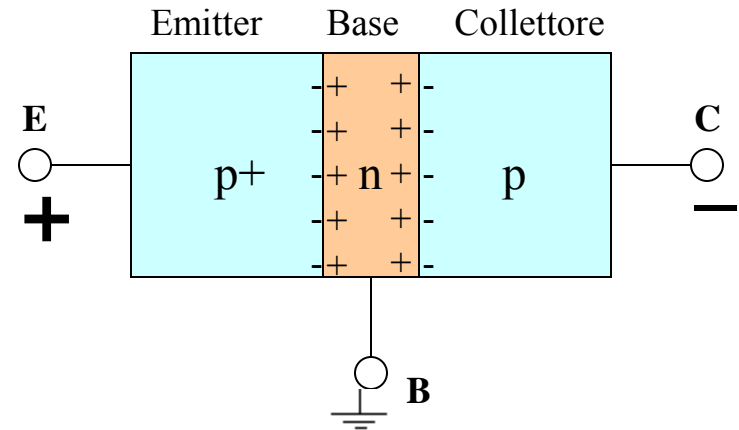
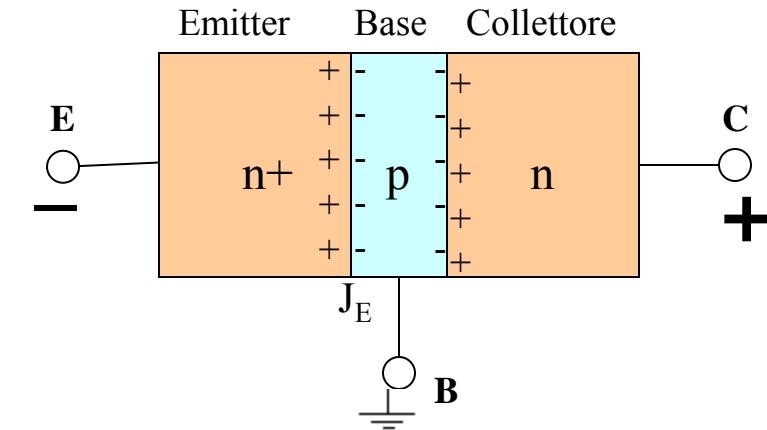


npn → principalmente corrente di elettroni

pnp → principalmente corrente di lacune

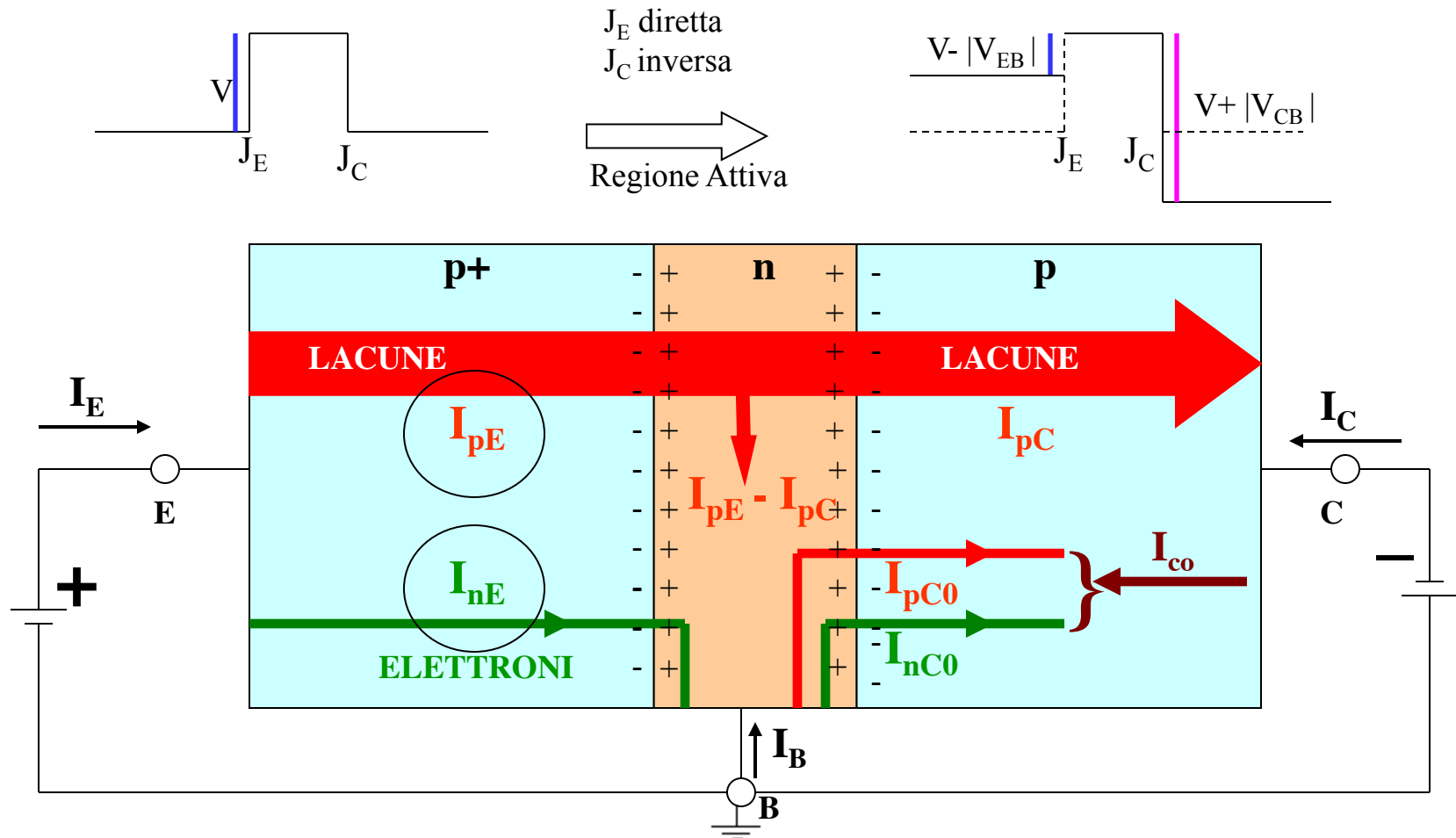
Le correnti del transistor sono considerate positive quando sono entranti nel dispositivo.

Quando la giunzione di emettitore e' polarizzata **direttamente** e quella di collettore e' polarizzata **inversamente** si dice che il transistor e' nella regione **ATTIVA**.



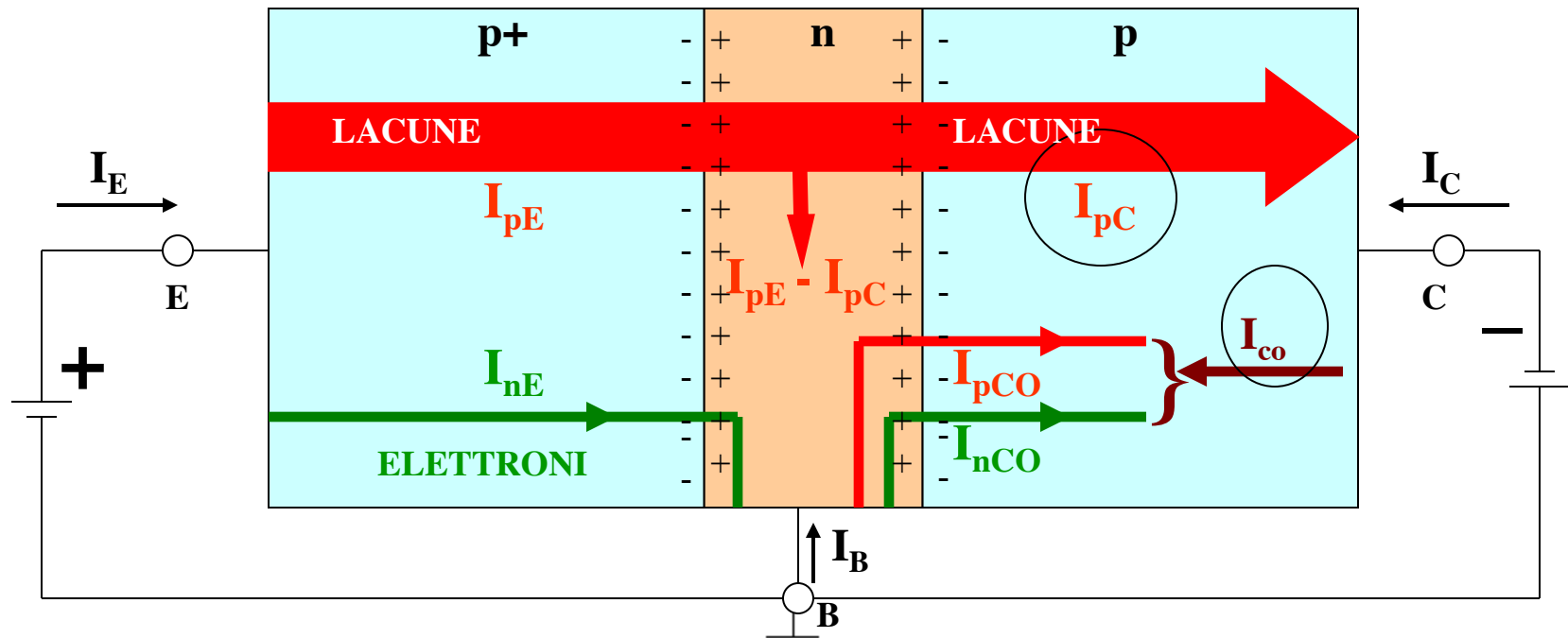
Configurazione a BASE COMUNE → la base e' condivisa tra il circuito di ingresso e quello di uscita.

Correnti in un transistor BJT pnp



La giunzione di emettitore e' polarizzata direttamente. Le lacune dall'emitter (drogato intensamente) diffondono nella base mentre gli elettroni (molti meno) dalla base passano nell 'emitter . I_{nE} piccola rispetto I_{pE} è ok tanto gli elettroni non contribuiscono alla corrente di collettore

$$I_E = I_{pE} + I_{nE} \quad I_E > 0$$



La base e' sottile \rightarrow pochissime ricombinazioni \rightarrow quasi tutte le lacune arrivano sulla giunzione J_C polarizzata inversamente dove vengono raccolte al collettore: corrente I_{pC}

D'altra parte se consideriamo per un momento nulla la polarizzazione sull'emitter, avremo comunque una corrente di collettore dovuta alla corrente di saturazione inversa della giunzione di collettore polarizzata inversamente (il verso di I_{co} e' scelto convenzionalmente concorde ad I_C)

In definitiva

$$I_C < 0 \quad \boxed{I_C = I_{CO} - I_{pC} = I_{CO} - \alpha I_E}$$

α e' detto "Guadagno in Corrente per Grandi Segnali" della configurazione a BASE COMUNE. Il suo valore varia tra 0.90 e 0.998

$$I_B + I_E + I_C = 0 \rightarrow I_B = - (I_E + I_C) \rightarrow I_B < 0 \text{ piccola}$$

Quantita' positiva piccola

$$I_C = I_{CO} - I_{pC} = I_{CO} - \alpha I_E$$

1)

Questa equazione vale quando il transistor opera nella **REGIONE ATTIVA** (J_E polarizzata direttamente, J_C inversamente.). In questo caso la corrente di collettore dipende solo da quella di emettitore mentre e' è praticamente indipendente dalla tensione di collettore.

La generalizzazione della equazione precedente si ottiene considerando le diverse polarizzazioni della giunzione di collettore J_C . Sostituiamo pertanto I_{CO} con l'espressione completa della relazione tensione – corrente di un diodo

$$I_D = I_0 (e^{V/V_T} - 1)$$

$$I_0 \rightarrow -I_{CO} \quad e \quad V \rightarrow V_{CB} = V_C$$

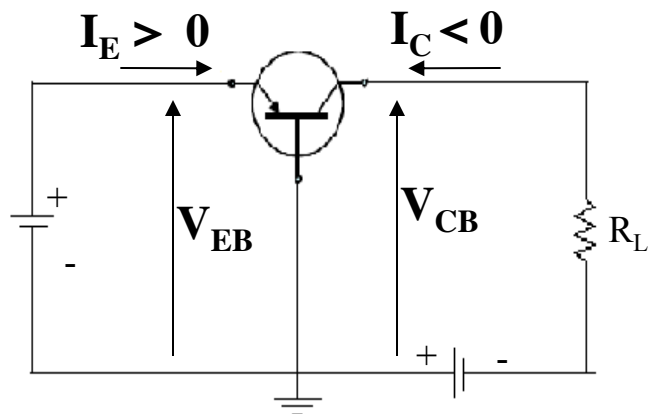
Otteniamo in questo modo l'espressione completa della corrente di collettore I_C in funzione del valore della corrente di emitter I_E e della tensione di collettore V_C

$$I_C = -\alpha I_E - I_{CO} (e^{V_C/V_T} - 1)$$

Per V_C (V_{CB}) negativo e grande rispetto a V_T si ritorna alla 1)

$I_C (V_{CB}, I_E) \rightarrow$ **CARATTERISTICA DI USCITA a base comune**

CARATTERISTICA DI USCITA a base comune



Configurazione a BASE COMUNE.

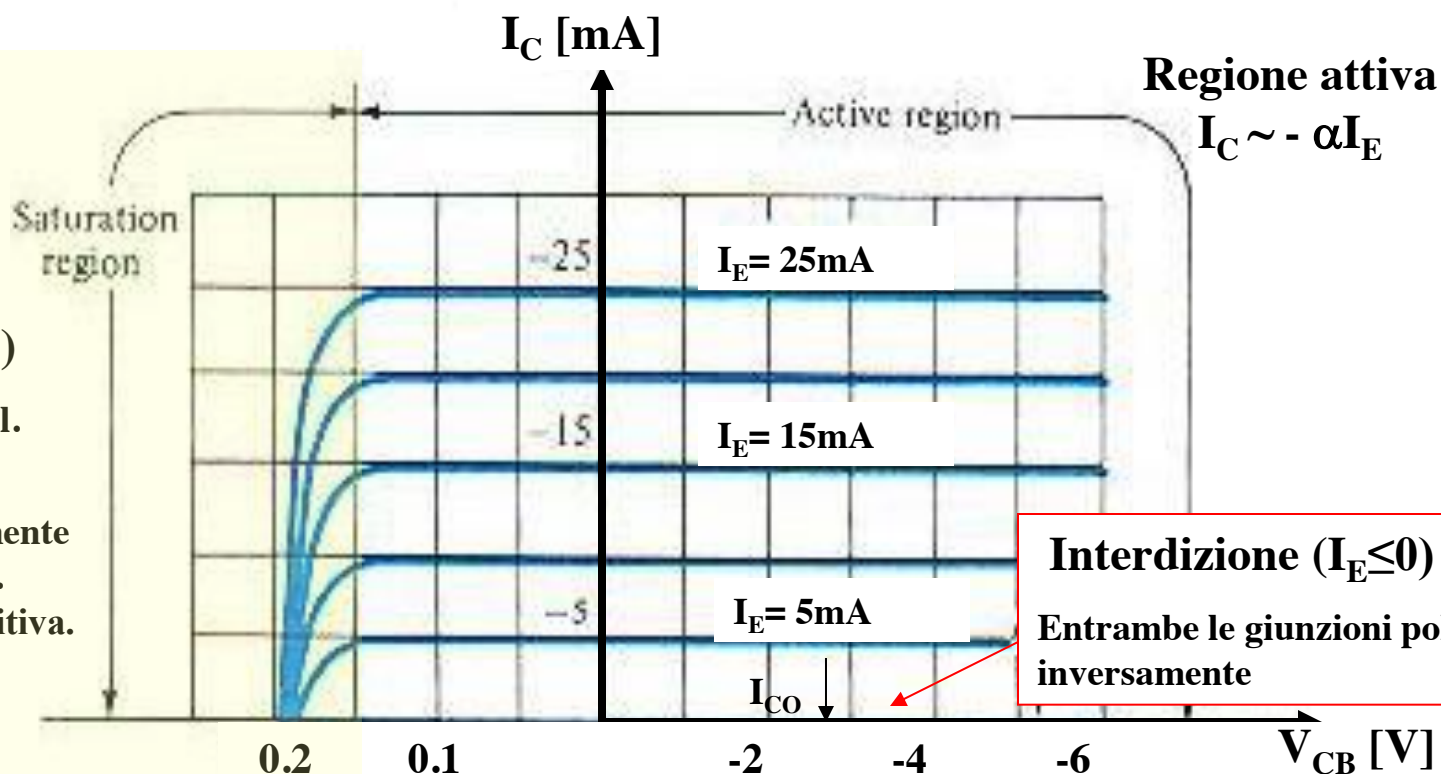
Ingresso (I_E , V_{EB}) \rightarrow diodo

Uscita (I_C , V_{CB}) $\rightarrow I_C = -\alpha I_E - I_{CO} (e^{V_{CB}/V_T} - 1)$

Saturazione ($V_{CB} > 0$)

Entrambe le giunzioni pol. direttamente.

I_C aumenta esponenzialmente (diodo pol. direttamente).
Puo' anche diventare positiva.



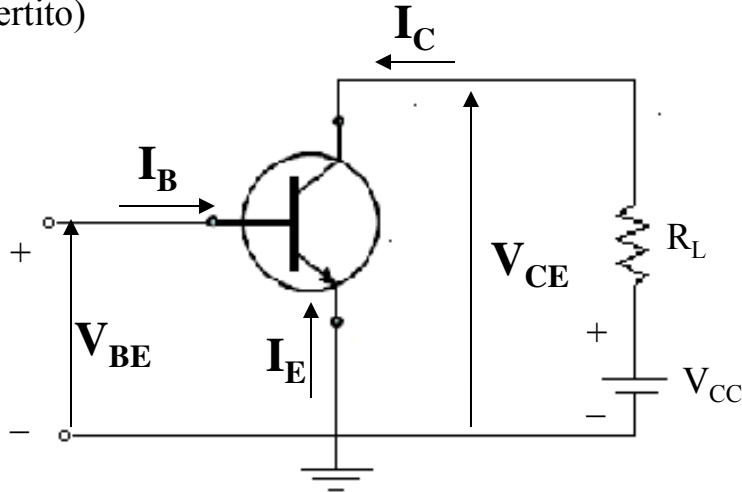
Regione attiva
 $I_C \sim -\alpha I_E$

Interdizione ($I_E \leq 0$)

Entrambe le giunzioni pol. inversamente

Configurazione a EMITTER COMUNE.

Piu' interessante e molto piu' utilizzata e' la configurazione ad EMITTER COMUNE dove l'emitter e' condiviso tra il circuito di ingresso e quello di uscita. Utilizziamo questa volta un transistor tipo **n p n** (tutte le correnti con segno invertito)



In questa configurazione siamo interessati a trovare l'espressione della corrente di collettore (uscita) in funzione della tensione di collettore V_{CE} e della corrente di base (in ingresso).

Nella regione attiva abbiamo visto che vale la relazione approssimata

$$I_C = I_{CO} - \alpha I_E$$

Essendo poi

$$I_E = - (I_C + I_B)$$

sostituendo si ha:

$$I_C = I_{CO} + \alpha (I_C + I_B) \rightarrow I_C (1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CO} \rightarrow I_C = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} I_B + \frac{I_{CO}}{(1 - \alpha)}$$

Se si pone: $\frac{\alpha}{(1 - \alpha)} = \beta$ si ottiene infine

$$\alpha = 0.995 \rightarrow \beta = \frac{0.995}{0.005} \sim 200$$

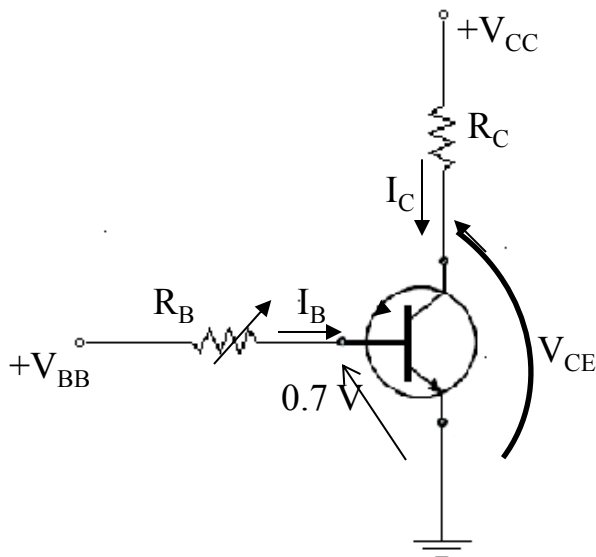
$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CO}$$

Solitamente $I_B \gg I_{CO}$ per cui nella regione attiva $I_C = \beta I_B$

FUNZIONA DA AMPLIFICATORE

CARATTERISTICA DI USCITA ad emitter comune

$$I_C (V_{CE}, I_B)$$



Configurazione a EMITTER COMUNE.

Ingresso (I_B, V_{BE}) \rightarrow diodo

Uscita (I_C, V_{CE}) $\rightarrow I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CO}$

Per fare funzionare il transistor come amplificatore bisogna portare il suo punto di lavoro nella regione attiva (meglio se al centro della medesima),

Considerando il circuito in uscita abbiamo:

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0$$

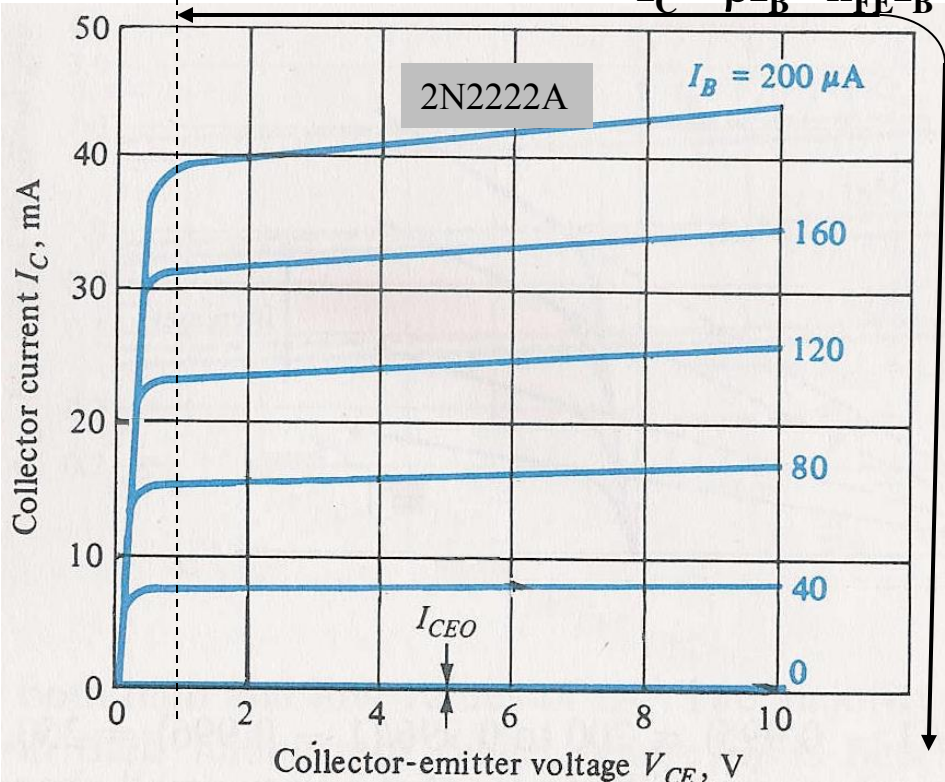
$$I_C = -V_{CE}/R_C + V_{CC}/R_C \quad \text{retta di carico}$$

$$I_C = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC}$$

$$V_{CE} = 0 \rightarrow I_C = V_{CC}/R_C$$

Regione attiva

$$I_C \sim \beta I_B \sim h_{FE} I_B$$

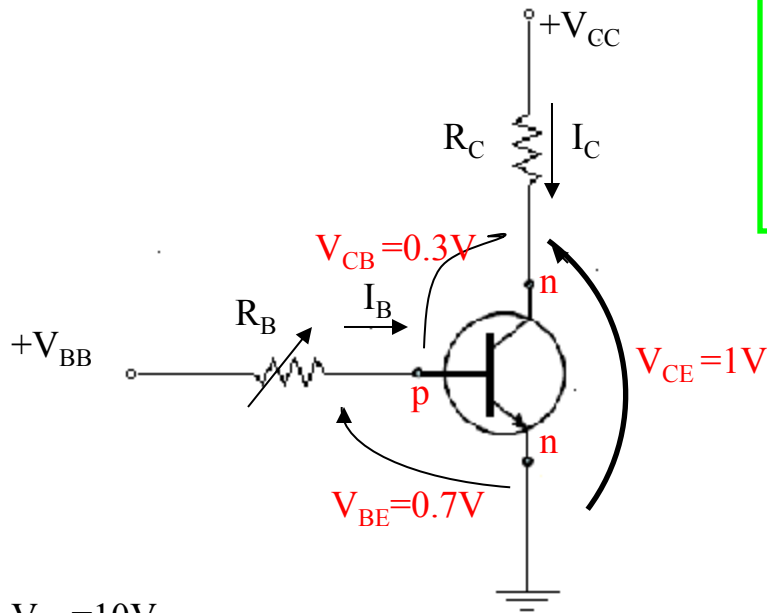


CARATTERISTICA DI USCITA ad emitter comune

Configurazione a **EMITTER COMUNE**.

Ingresso (I_B , V_{BE}) \rightarrow diodo

Uscita (I_C , V_{CE}) $\rightarrow I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CO}$



$$V_{CC} = 10V$$

$$R_C = 500\Omega$$

$$V_{CC}/R_C = 20mA$$

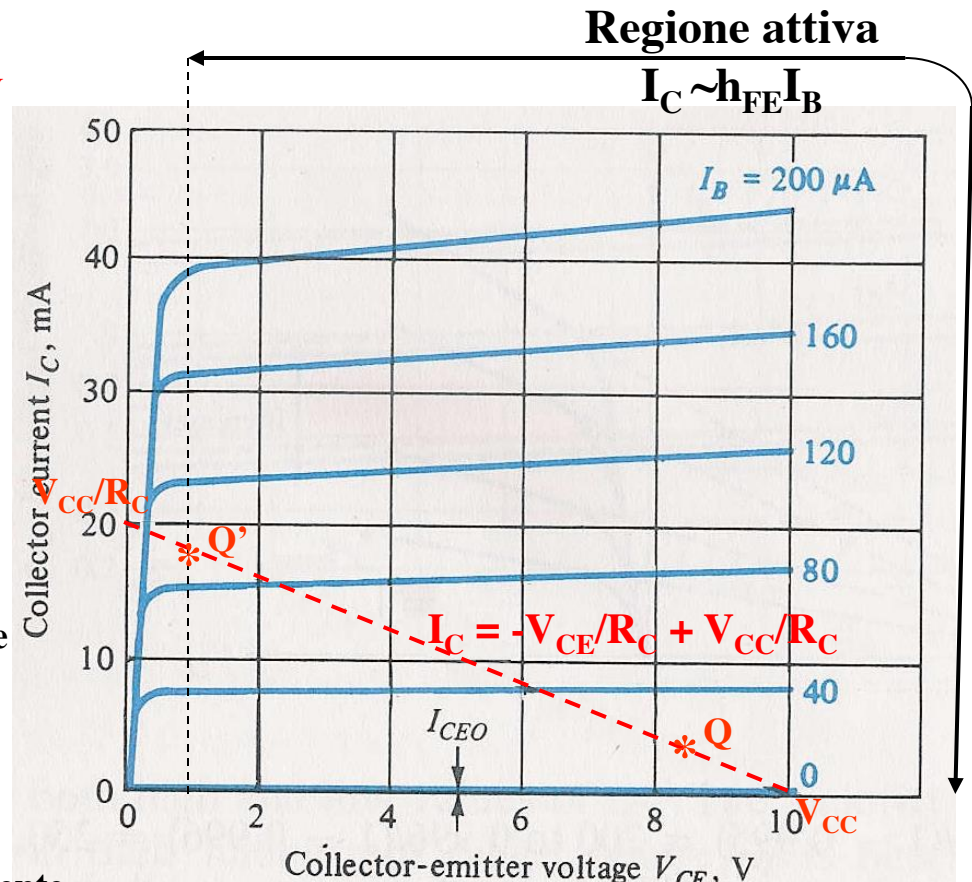
Con questa retta di carico il transistor lavora nella regione attiva se la corrente di base varia tra circa 20 μ A e 90 μ A (punti **Q** e **Q'**)

Nella regione attiva J_E e' polarizzata direttamente $\rightarrow V_{BE} \sim 0.7V$ Per il punto **Q'** abbiamo:

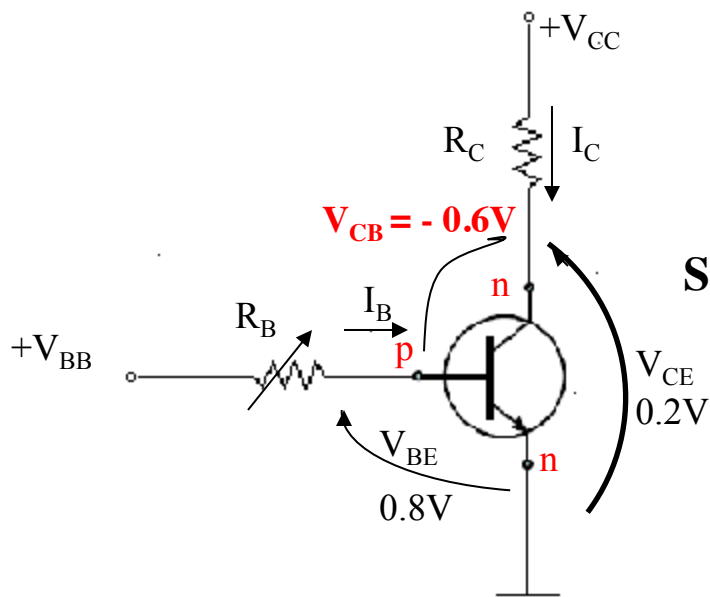
$$I_B = 90\mu A \rightarrow I_C = h_{FE} I_B \sim 200 I_B \sim 18mA \rightarrow R_C I_C = 9V$$

$$V_{CE} = 1V \rightarrow V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 0.3V$$

$\rightarrow J_C$ e' ancora polarizzata inversamente



CARATTERISTICA DI USCITA ad emitter comune



Per valori della corrente di base vicini ed oltre $100\mu A$ (punto **Q''**) il transistor del nostro esempio entra nella regione di Saturazione. V_{BE} cresce a 0.8V

La corrente di collettore e' sempre minore del valore nominale $h_{FE} I_B$ (non puo' superare i 20mA!) ed il suo valore dipende dalla resistenza R_C

SATURAZIONE $\rightarrow I_C < h_{FE} I_B$

$$\begin{cases} V_{BE} = 0.8V \\ V_{CE} \text{ e' molto basso } (\sim 0.2V) \end{cases}$$

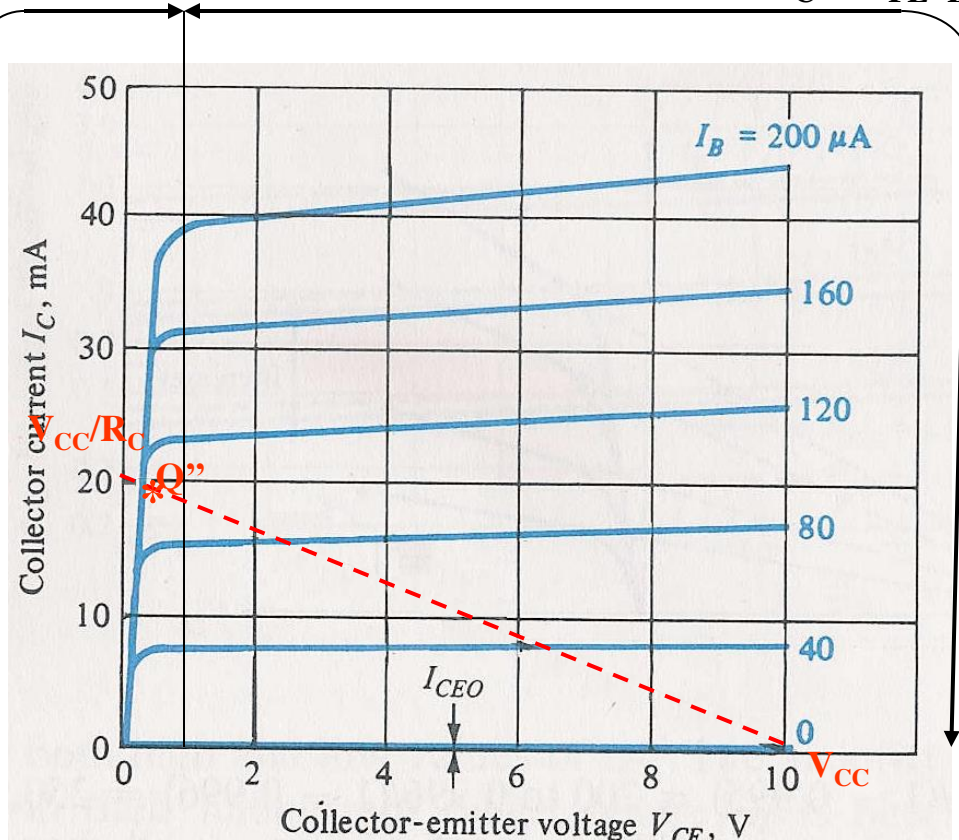
$$\rightarrow V_{CB} = -0.6V$$

anche J_C e' polarizzata direttamente

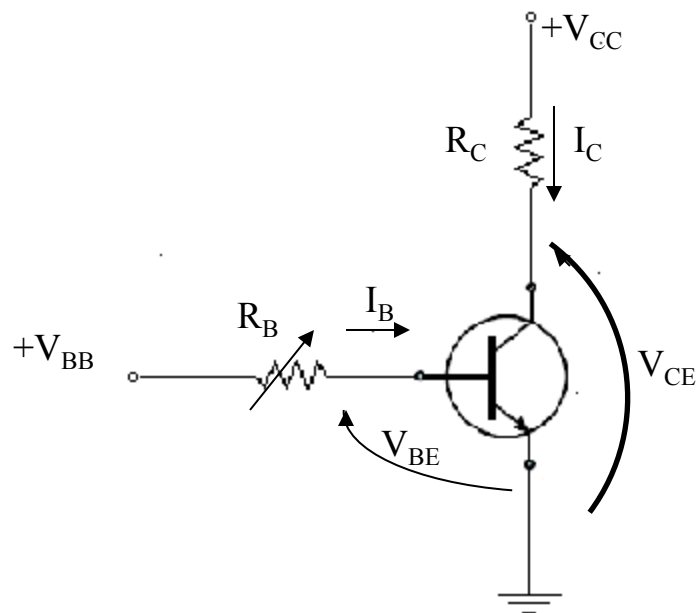
Saturazione

Regione attiva

$$I_C \sim h_{FE} I_B$$



CARATTERISTICA DI USCITA ad emitter comune



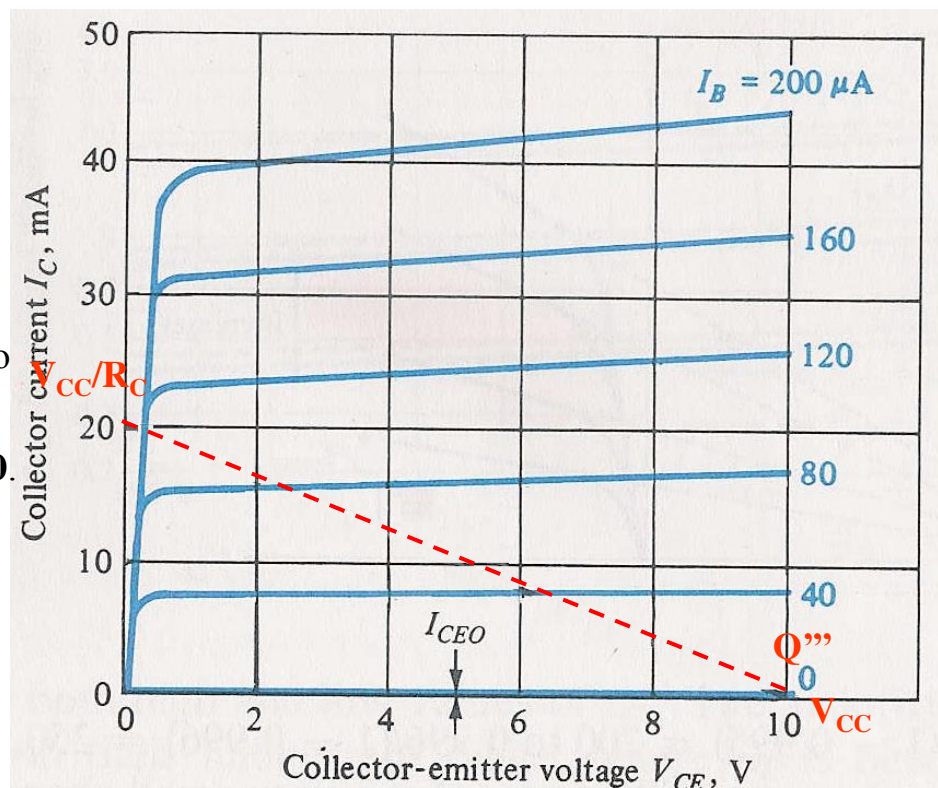
Se invece I_B diminuisce il punto di lavoro si sposta verso destra lungo la retta di carico e I_C diminuisce fino ad arrivare all'interdizione. **Q'''**

Per definizione il transistor e' **interdetto** quando $I_E = 0$.

Allora avremo $I_C = I_{CO}$ ($I_C = I_{CO} - \alpha I_E$)

Praticamente si porta il transistor in interdizione polarizzando inversamente la giunzione di emitter

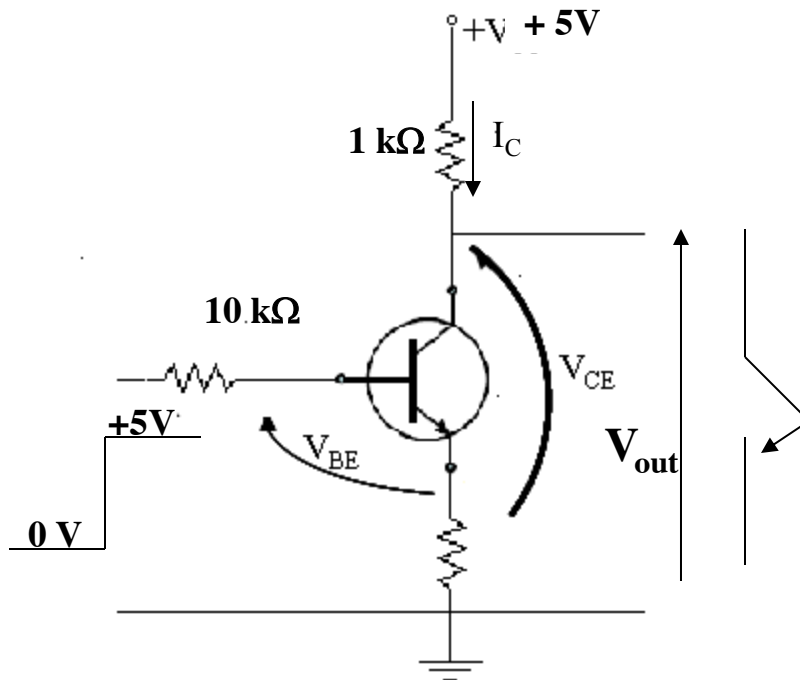
$\rightarrow V_{BE} < 0$



Il transistor BJT come interruttore

Viene fatto lavorare in commutazione tra la zona di **saturazione** (interruttore chiuso) e quella di **interdizione** (interruttore aperto)

$$h_{FE}=200$$



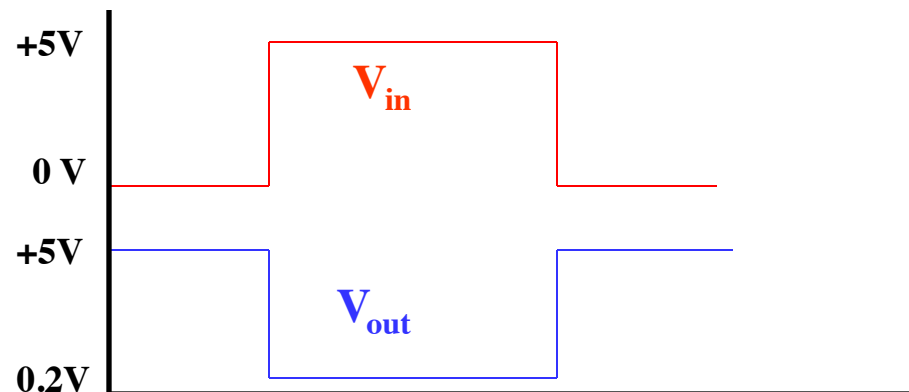
Saturazione $I_B > I_C/h_{FE}$ ($V_{in} = +5V$)

$V_{CE} \sim 0.2V \rightarrow I_C = 4.8 \text{ mA}$ $4.8\text{mA}/200 = 24\mu\text{A}$

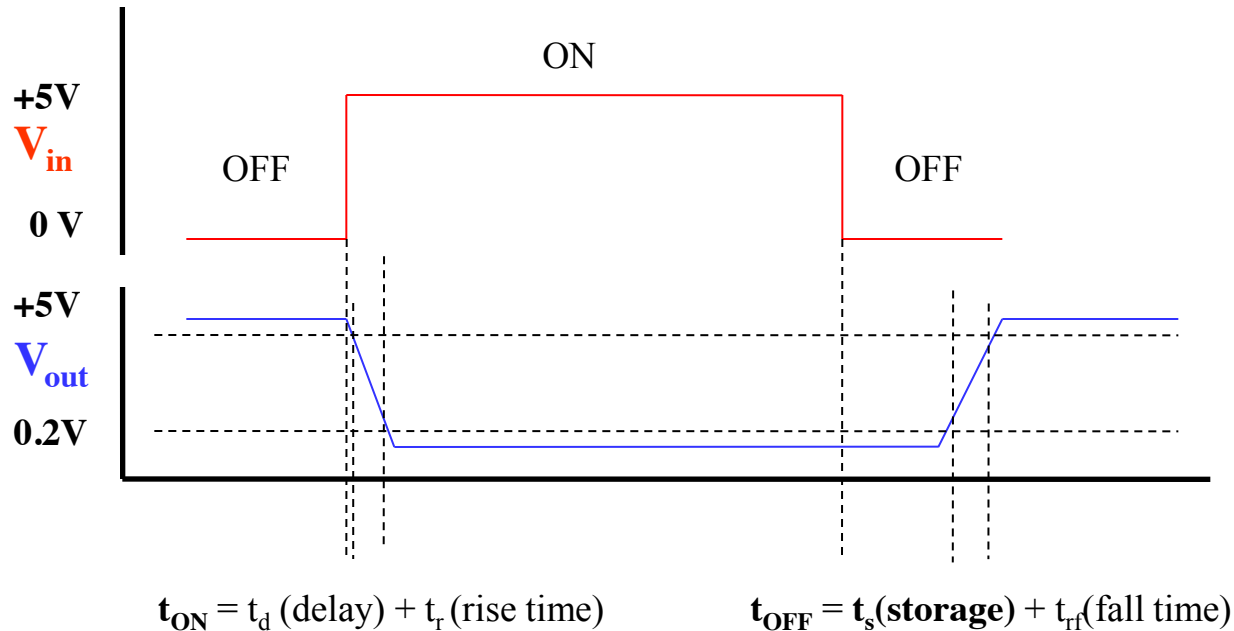
$$I_B = \frac{5 - 0.8}{10000} = 420\mu\text{A} \gg I_C/200$$

Interdizione $V_{BE} < 0$ ($V_{in} = 0V$)

$$I_C = I_{C0} \Rightarrow V_{CE} \sim V_{CC} = 5V$$



Nelle applicazioni veloci, quando si utilizza il transistor come interruttore, assumono importanza i tempi di commutazione del dispositivo. Si distinguono un tempo di commutazione diretta t_{ON} (turn-on time) necessario per passare da uno stato iniziale interdetto alla conduzione, ed un tempo di commutazione inverso t_{OFF} (turn-off time) necessario per annullare la corrente di saturazione e ritornare allo stato interdetto.



t_d = tempo impiegato dalla giunzione di emettitore per polarizzarsi direttamente (I_C al 10%)

t_s = tempo necessario per eliminare l'eccesso di portatori minoritari nella base

t_r = tempo impiegato da I_C per arrivare al 90% del valore di saturazione

t_f = tempo necessario perché I_C passi dal 90% al 10%

P2N2222A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
SWITCHING CHARACTERISTICS					
Delay Time	$(V_{CC} = 30\text{ Vdc}, V_{BE(on)} = -2.0\text{ Vdc}, I_C = 150\text{ mAdc}, I_{B1} = 15\text{ mAdc})$ (Figure 1)	t_d	-	10	ns
Rise Time		t_r	-	25	ns
Storage Time	$(V_{CC} = 30\text{ Vdc}, I_C = 150\text{ mAdc}, I_{B1} = I_{B2} = 15\text{ mAdc})$ (Figure 2)	t_s	-	225	ns
Fall Time		t_f	-	60	ns

← Il passaggio da ON a OFF e' molto piu' lento

SWITCHING TIME EQUIVALENT TEST CIRCUITS

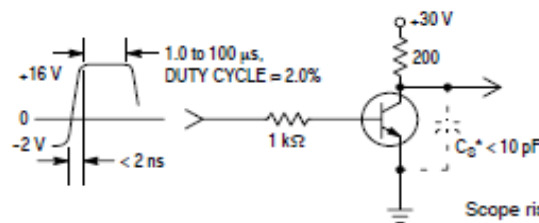


Figure 1. Turn-On Time

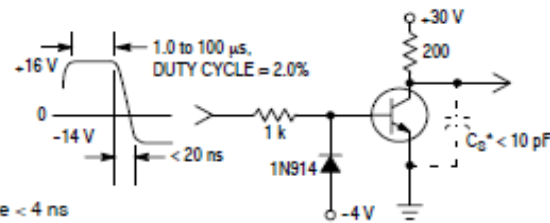


Figure 2. Turn-Off Time

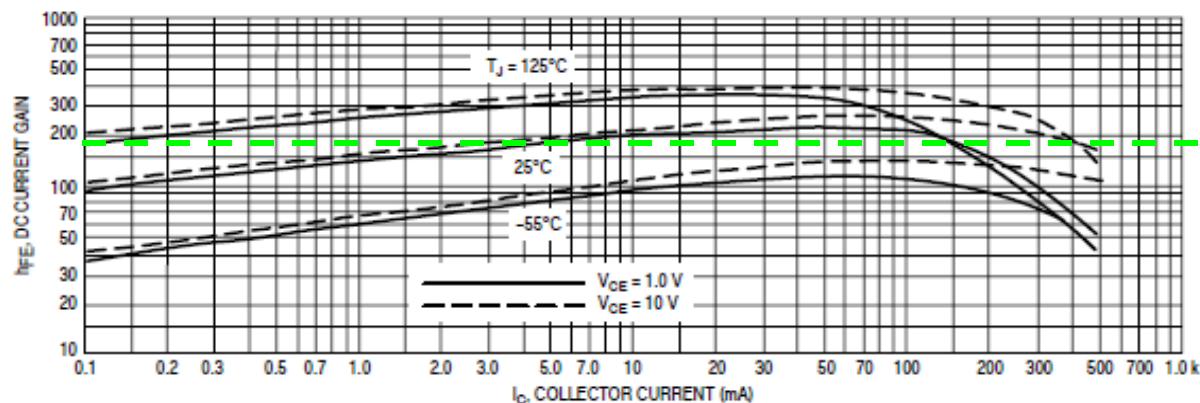
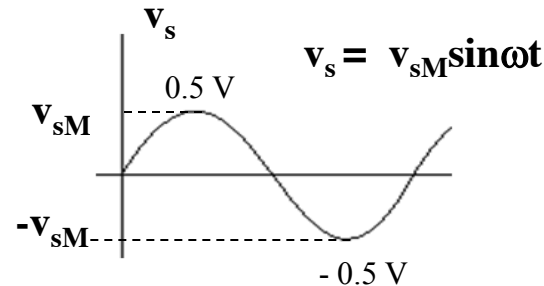
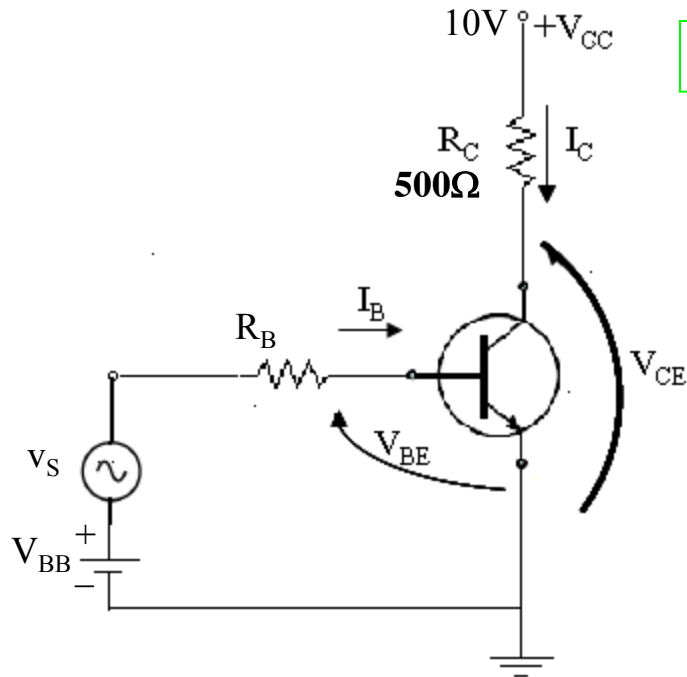


Figure 3. DC Current Gain

Amplificazione di un segnale sinusoidale nella regione attiva



Essendo il segnale simmetrico rispetto al valore nullo, il punto di lavoro Q_0 (per $v_s = 0$) deve essere posto al centro della regione lineare quindi al centro della retta di carico $\rightarrow V_{CE} \sim 5V$ ($V_{CC} = 10V$), $I_C \sim 10mA$

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0 \quad \text{Retta di carico}$$

$$R_C = 500\Omega \rightarrow I_C = 10mA$$

$$I_B = I_C / h_{FE} = 50\mu A$$

La retta di polarizzazione della base quando $v_s = 0$

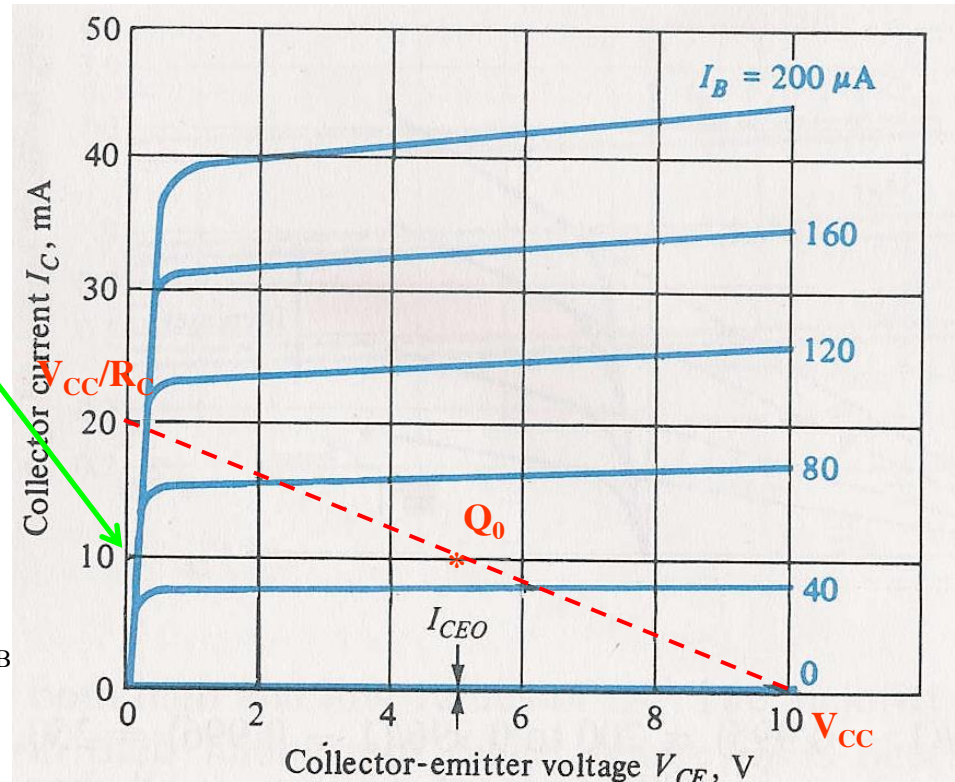
$$V_{BB} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

permette di scegliere il valore di R_B in funzione di V_{BB}

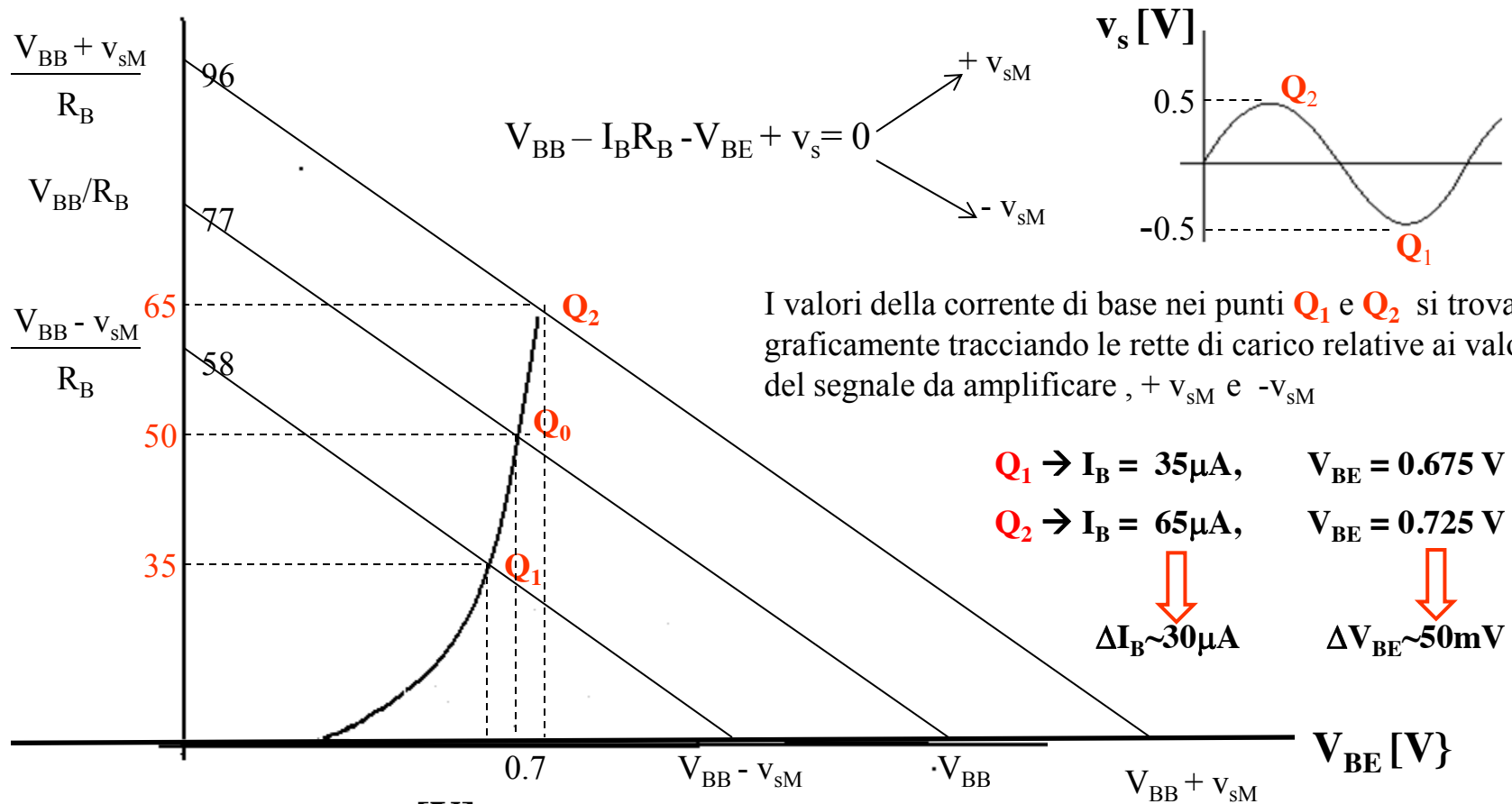
$$R_B = (V_{BB} - V_{BE}) / I_B$$

$$\text{Se } V_{BB} = 2V \rightarrow R_B = 1.3/5 \cdot 10^{-5} = 26 \text{ K}\Omega$$

($V_{BE} = 0.7V$)



Nel circuito di ingresso alla tensione di polarizzazione V_{BB} si somma il segnale sinusoidale da amplificare. La retta di polarizzazione calcolata per $v_s = 0$ traslerà' parallelamente a se stessa ed il punto di lavoro oscillerà tra gli estremi Q_1 e Q_2



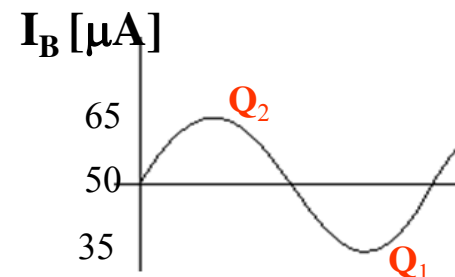
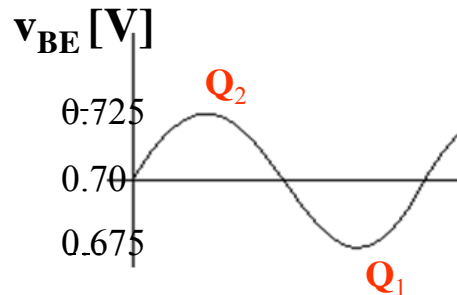
I valori della corrente di base nei punti Q_1 e Q_2 si trovano graficamente tracciando le rette di carico relative ai valori di picco del segnale da amplificare, $+v_{sM}$ e $-v_{sM}$

$$Q_1 \rightarrow I_B = 35\mu A, \quad V_{BE} = 0.675 V$$

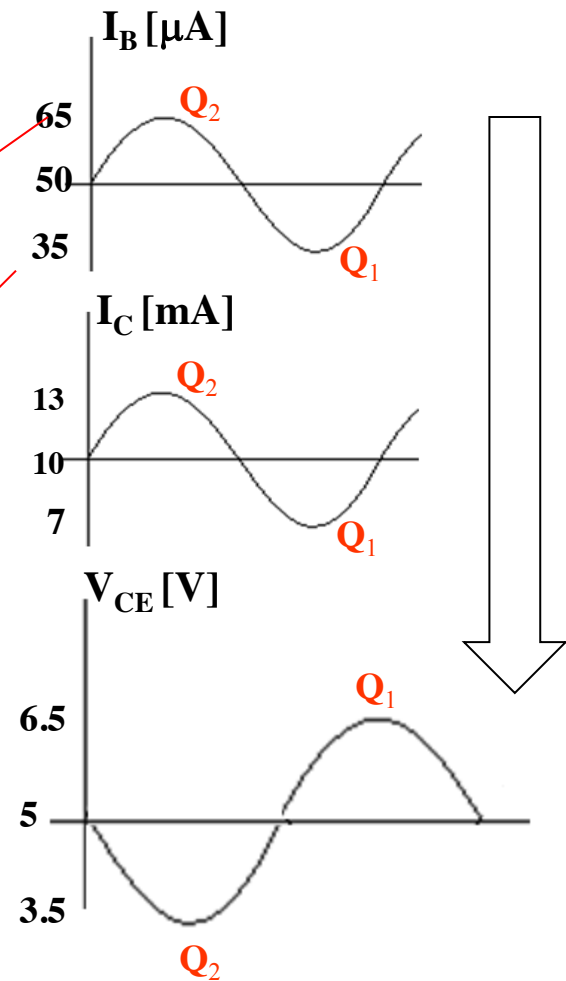
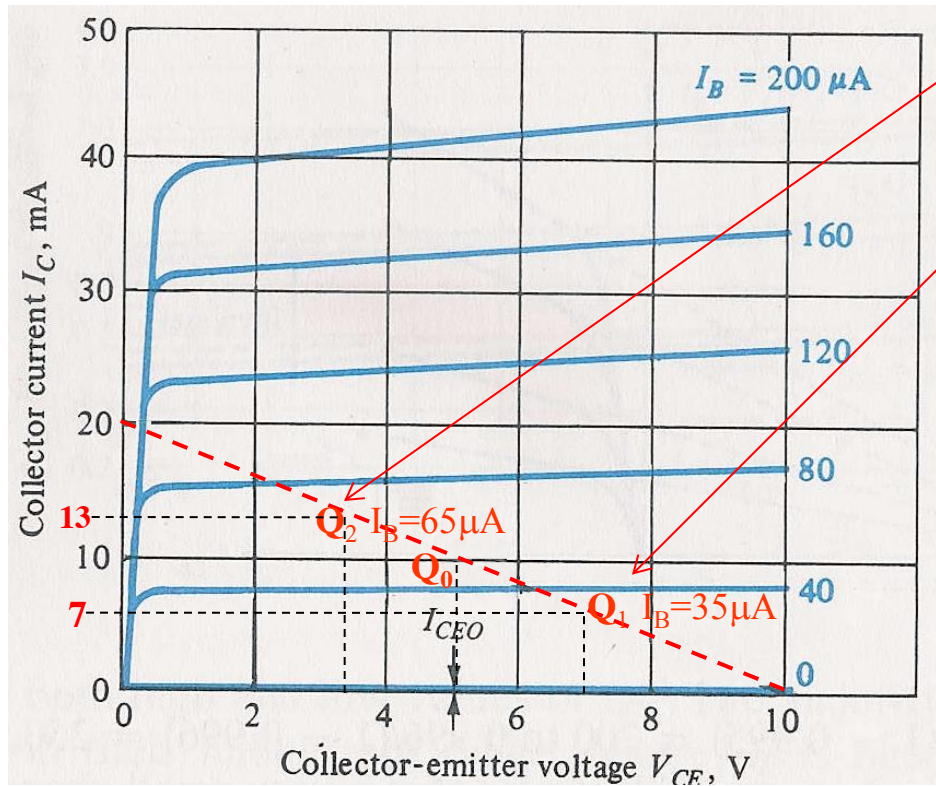
$$Q_2 \rightarrow I_B = 65\mu A, \quad V_{BE} = 0.725 V$$

$$\Delta I_B \sim 30\mu A$$

$$\Delta V_{BE} \sim 50mV$$



I valori della corrente di base relativi ai punti **Q₁** e **Q₂** li riportiamo ora sulle caratteristiche di uscita per valutare l'amplificazione.



$$|A_I| = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \sim \frac{6 \text{ mA}}{30 \mu\text{A}} \sim 200$$

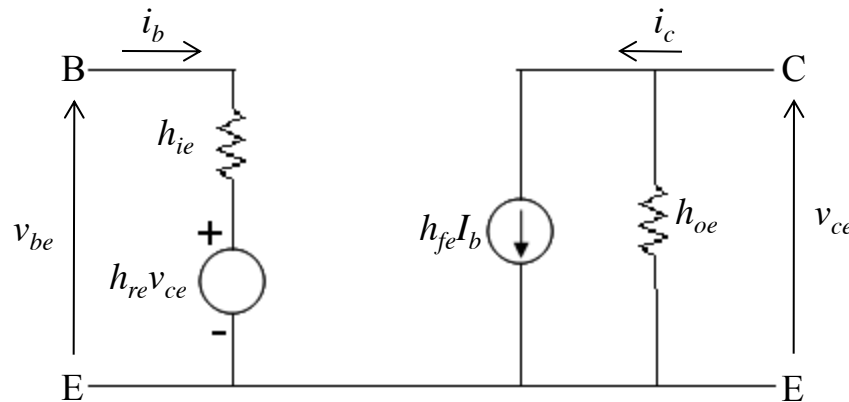
$$|A_V| = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}} \sim \frac{-3 \text{ V}}{50 \text{ mV}} \sim 60$$

L'approssimazione che dato un segnale in ingresso sinusoidale anche la corrente in ingresso ed i segnali in uscita lo siano, vale solo per segnali molto piccoli. Allora la caratteristica di ingresso può essere considerata rettilinea e quella di uscita formata da rette parallele equispaziate per uguali incrementi di I_B

Modello del BJT per piccoli segnali.

Nella zona di funzionamento lineare del BJT, la determinazione della amplificazione di corrente e tensione, si può effettuare, più praticamente, in via analitica utilizzando il **modello a parametri ibridi per piccoli segnali**.

Nel caso della configurazione ad emitter comune il circuito equivalente del transistor è il seguente.



$i \rightarrow$ input

$r \rightarrow$ reverse

$f \rightarrow$ forward

$o \rightarrow$ output

$e \rightarrow$ common emitter

In questo caso i parametri ibridi sono: **(calcolati intorno al punto di lavoro)**

$$h_{ie} = \left. \frac{\Delta v_{be}}{\Delta i_b} \right|_{V_{ce}} \quad (\text{rappresenta la resistenza differenziale della giunzione } J_E). \text{ Resistenza di ingresso. } h_{ie} = 100\Omega - 10K\Omega$$

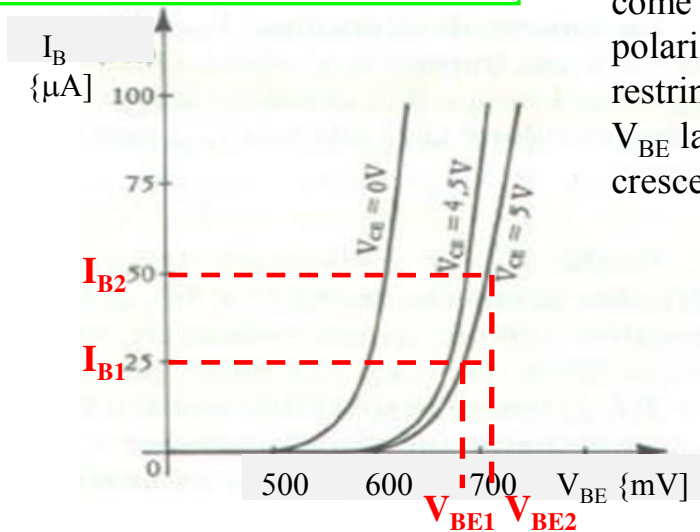
$$h_{re} = \left. \frac{\Delta v_{be}}{\Delta v_{ce}} \right|_{I_b} \quad \text{Amplificazione inversa di tensione} \quad h_{re} = 10^{-3} - 10^{-4}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \right|_{V_{ce}} \quad \text{Amplificazione di corrente} \quad h_{fe} = 10 - 1000$$

$$h_{oe} = \left. \frac{\Delta i_c}{\Delta v_{ce}} \right|_{I_b} \quad \text{Conduttanza di uscita con ingresso a vuoto. } 1/h_{oe} \sim 40k\Omega$$

Il valore dei parametri ibridi dipende dal punto di lavoro. Nelle specifiche di un BJT sono forniti dei grafici

Caratteristica di ingresso npn 2N2222A

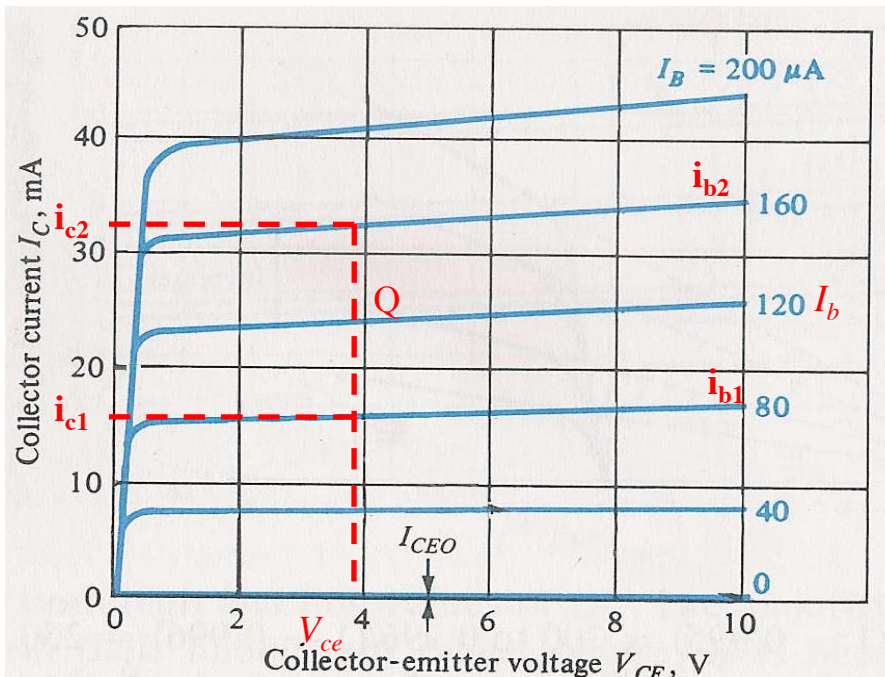


Abbiamo una famiglia di curve infatti I_B non dipende solo da V_{BE} , come sarebbe in un diodo, ma anche da V_{CE} (Effetto Early : cresce polarizzazione inversa \rightarrow cresce la regione di svuotamento su $J_C \rightarrow$ si restringe la base \rightarrow minore ricombinazione nella base \rightarrow a parità di V_{BE} la corrente di collettore aumenta: (e quella di base diminuisce) cresce α .

$$h_{ie} = \left. \frac{\Delta v_{be}}{\Delta i_b} \right|_{V_{ce}} \quad h_{ie} = \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{I_{B2} - I_{B1}} \Big|_{V_{CE} = 5V}$$

$$25mV/25\mu A = 1K\Omega$$

Caratteristica di uscita npn 2N2222A

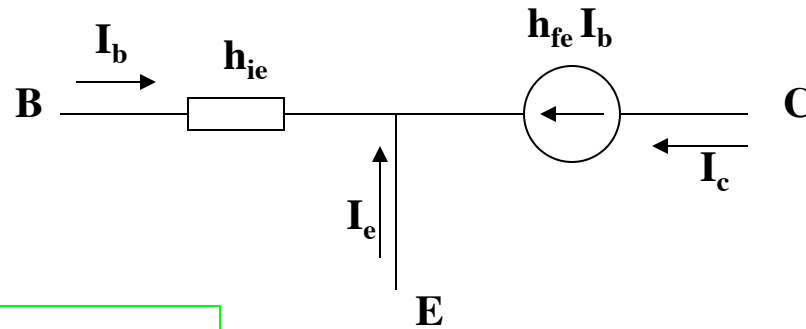


$$h_{fe} = \left. \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \right|_{V_{ce}}$$

$$h_{fe} = \frac{i_{c2} - i_{c1}}{i_{b2} - i_{b1}} \Big|_{V_{ce} = 4V}$$

$$h_{fe} = \frac{17mA}{80\mu A} = 212 \Big|_{V_{ce} = 4V}$$

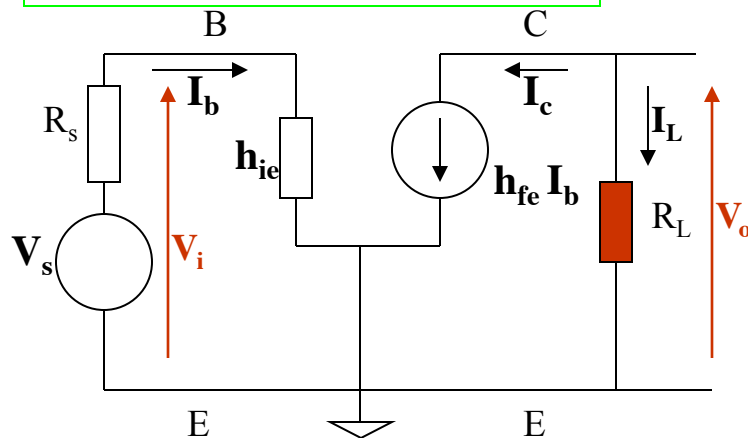
Dato il basso valore di h_{re} e dato che molto spesso il carico ha un valore ohmico piccolo tale che $h_{oe}R_L < 0.1$, in molte applicazioni pratiche e' possibile utilizzare un modello ridotto con i soli parametri ibridi h_{ie} ed h_{fe} . Nel caso della configurazione ad emettitore comune il modello (semplificato) che si utilizza e' il seguente:



$$h_{ie} = V_{be}/I_b \quad \sim 1 \div 2K\Omega$$

$$h_{fe} = I_c/I_b \quad 50 \div 200$$

Configurazione ad emitter comune



$$A_I = I_L / I_b = -I_c / I_b = -h_{fe}$$

$$R_i = V_i / I_b = V_{BE} / I_b = h_{ie}$$

$$A_V = V_o / V_i = I_L R_L / I_b R_i = A_I (R_L / R_i) = -h_{fe} (R_L / R_i)$$

$$R_o = \infty \quad (V_s = 0 \rightarrow I_b = 0 \rightarrow I_c = 0)$$

Applico ai morsetti di uscita (aperti) una tensione V .

Posto quindi $V_s = 0$ trovo $I_c = 0$. Allora $R_o = V/0 = \infty$

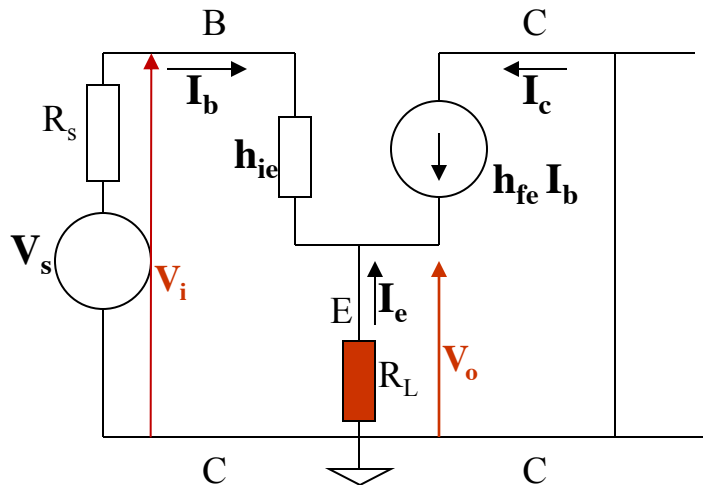
Il conto esatto porta a $h_{oe} - h_{fe}h_{re}/(h_{ie} + R_s) \sim 50K\Omega$

R_i media ($1 \div K\Omega$)

R_o medio elevata (decine di $K\Omega$)

A_I elevata, A_V elevata

Configurazione a collettore comune (inseguitore di emettitore)



$$A_I = I_L / I_b = -I_e / I_b = (h_{fe} I_b + I_b) / I_b = 1 + h_{fe}$$

$$R_i = V_i / I_b = V_{BC} / I_b = [(h_{fe} I_b + I_b) R_L + h_{ie} I_b] / I_b \\ = h_{ie} + \underline{(1 + h_{fe}) R_L}$$

$$A_V = V_o / V_i = I_L R_L / I_b R_i = A_I (R_L / R_i) = (1 + h_{fe}) (R_L / R_i) \\ = (1 + h_{fe}) [R_L / (h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_L)] \underline{\sim 1}$$

$$R_o = V / I = \underline{(h_{ie} + R_s) / (1 + h_{fe})}$$

Applico ai morsetti di uscita (aperti) una tensione V .

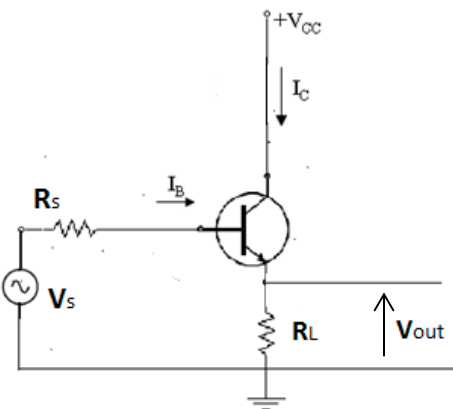
Avendo posto $V_s = 0$ avrò $I_b = -V / (h_{ie} + R_s)$ e quindi

$$I = V / (h_{ie} + R_s) + h_{fe} (V / (h_{ie} + R_s)) = V(1 + h_{fe}) / (h_{ie} + R_s)$$

R_i molto elevata (centinaia di $K\Omega$)

R_o molto bassa (decine di Ω)

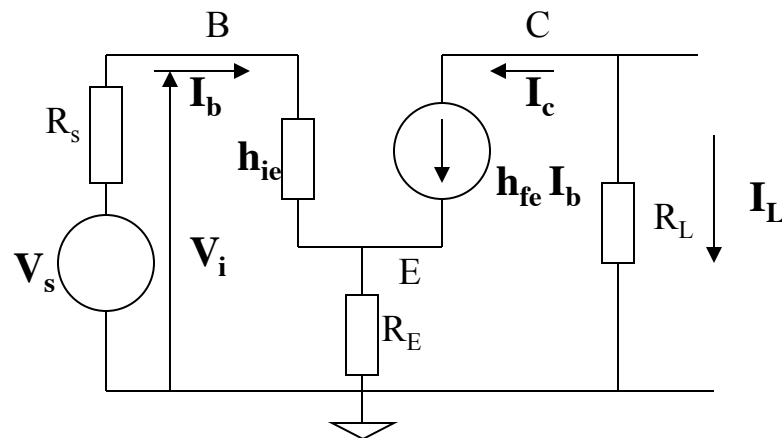
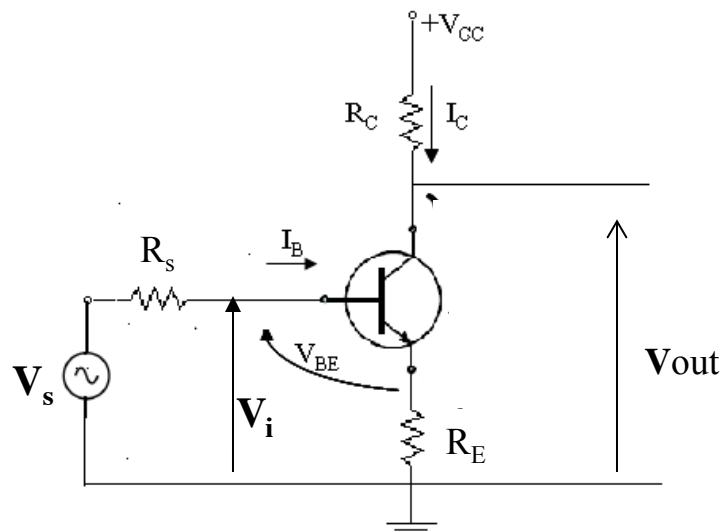
A_I elevata, $A_V \sim 1$



E' utilizzato come stadio 'cuscinetto' per operare una trasformazione di resistenze (da valori elevati a valori bassi) con un amplificazione di tensione prossima ad 1

I parametri caratteristici (h_{fe} , h_{ie} ..) variano molto da un transistor ad un altro \rightarrow difficoltà nella produzione in serie, nelle riparazioni/sostituzioni. Variano anche con la temperatura e con l'invecchiamento del componente.

Configurazione ad emitter comune con resistenza sull'emitter



$$A_I = \frac{I_L}{I_b} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b} = -h_{fe} \quad \text{invariata rispetto a CE}$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_b} = \frac{I_b h_{ie} + I_b(1+h_{fe})R_E}{I_b} = h_{ie} + (1+h_{fe})R_E \quad \text{aumentata rispetto a CE}$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-h_{fe} I_b R_L}{I_b h_{ie} + I_b(1+h_{fe})R_E} \sim \frac{-R_L}{R_E} \quad \text{indipendente dai parametri del transistor}$$