

A.A. 2021-2022

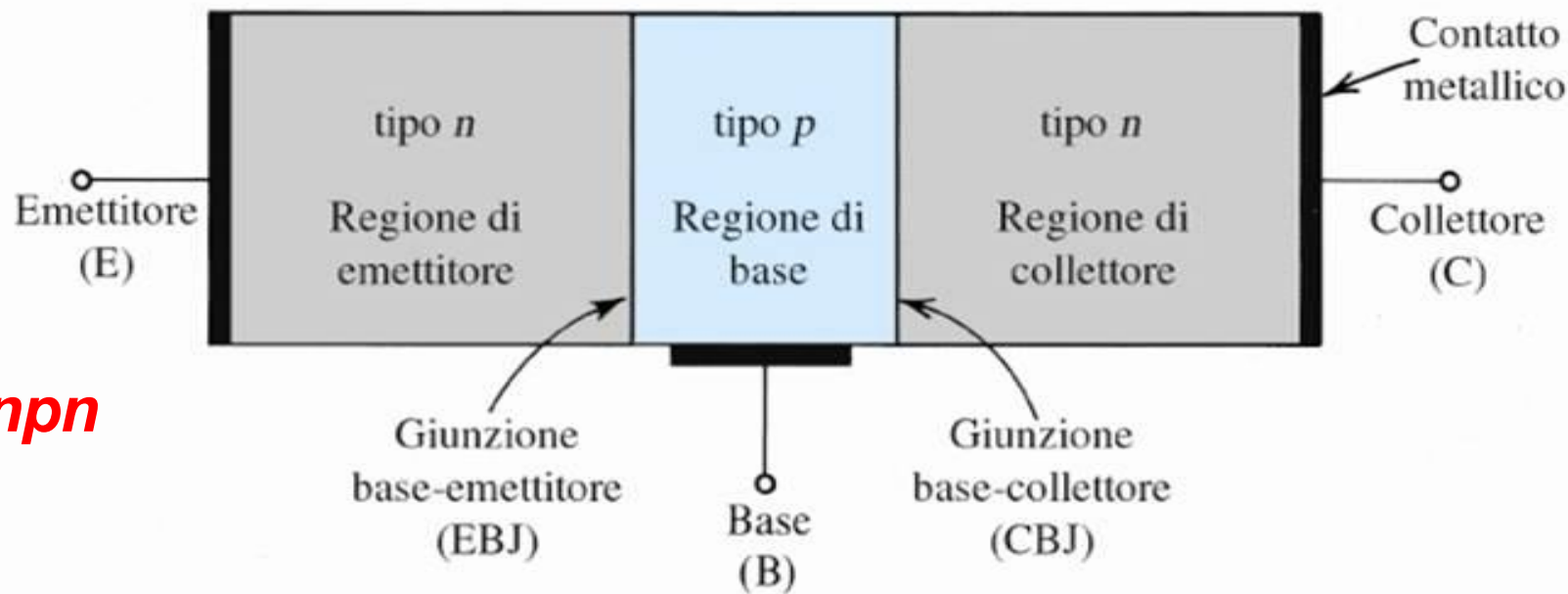
Elementi di Elettronica (INF)

Prof. Paolo Crippa

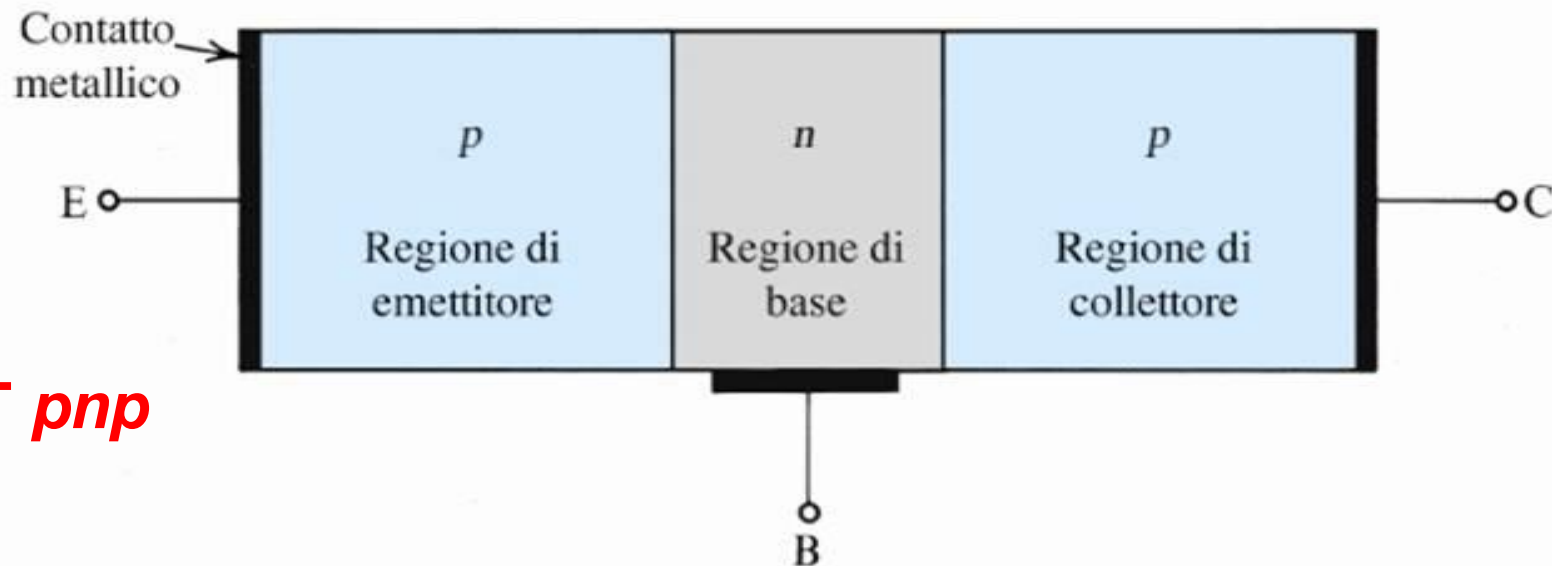
Transistore Bipolare (BJT)

Il Transistore Bipolare (BJT)

BJT npn

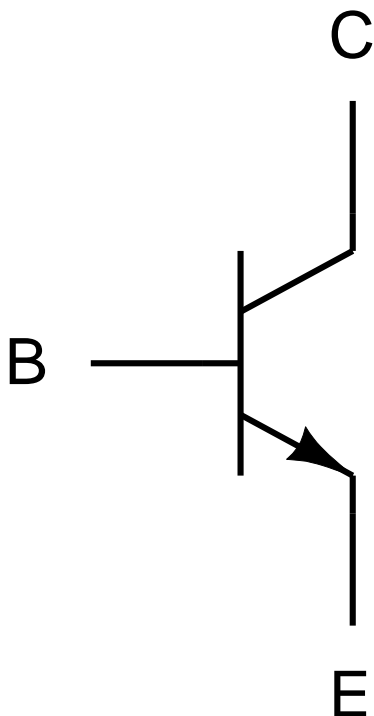


BJT pnp

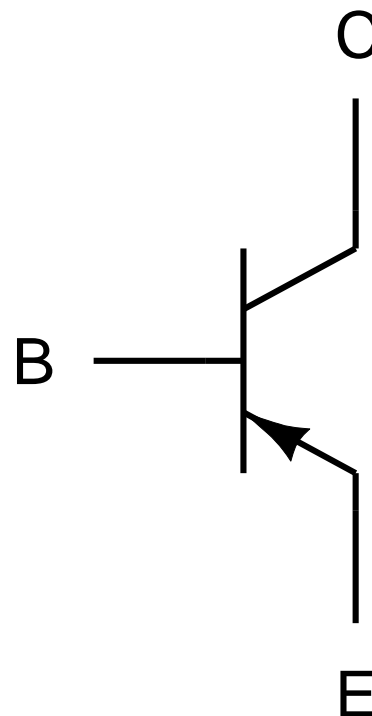


II Transistore Bipolare (BJT)

Simboli Circuitali



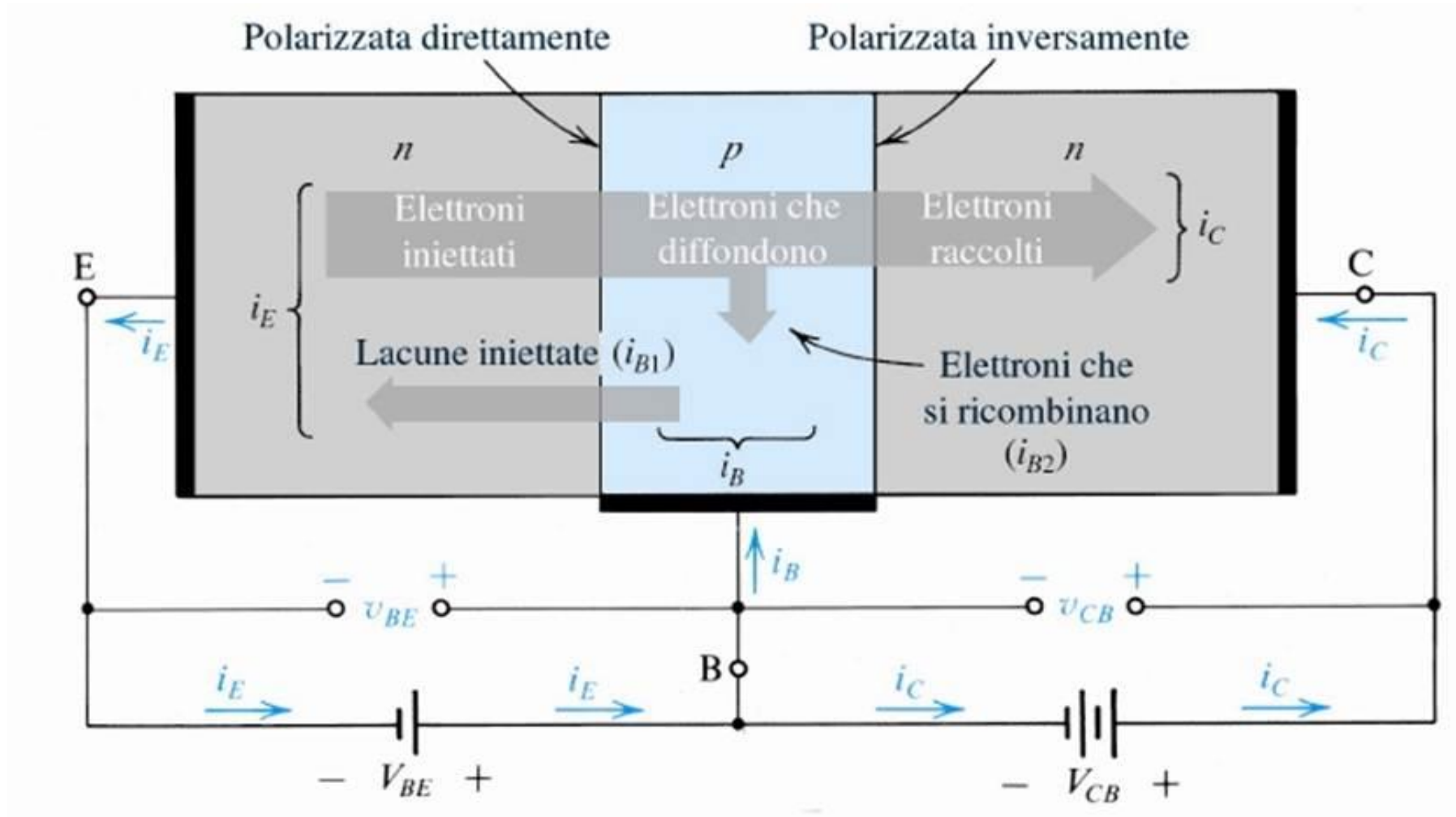
BJT *n*pn



BJT *p*np

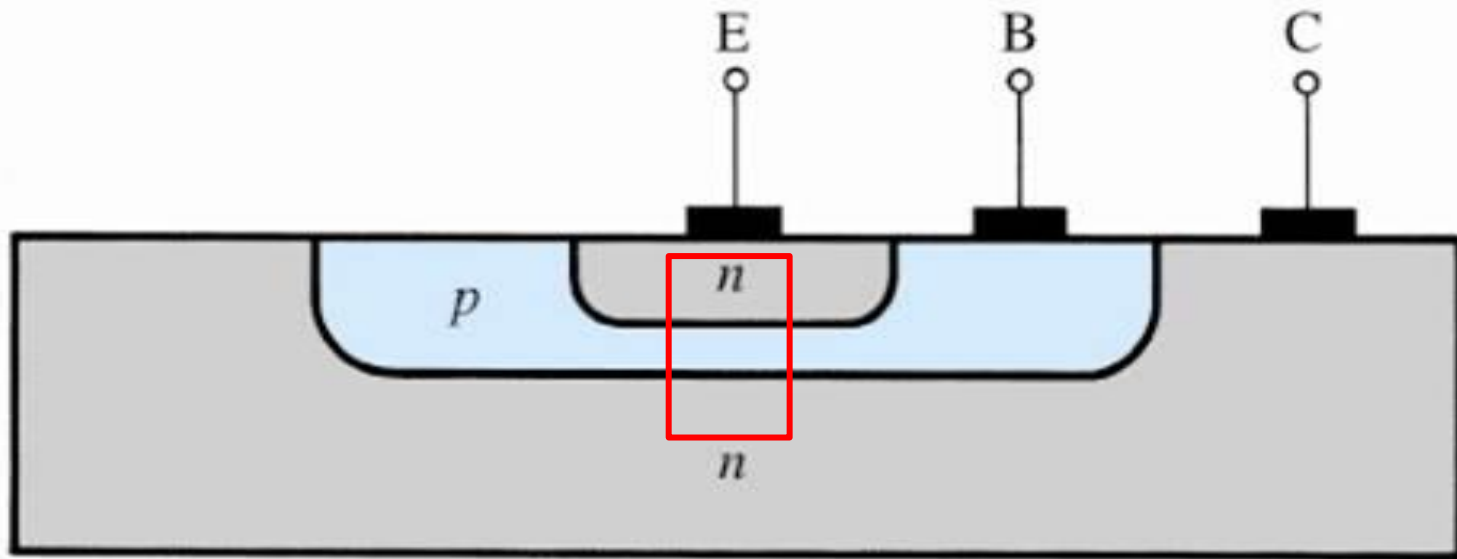
Il Transistore Bipolare (BJT)

Flussi delle correnti nel transistore bipolare



II Transistore Bipolare (BJT)

Il transistor bipolare in tecnologia planare

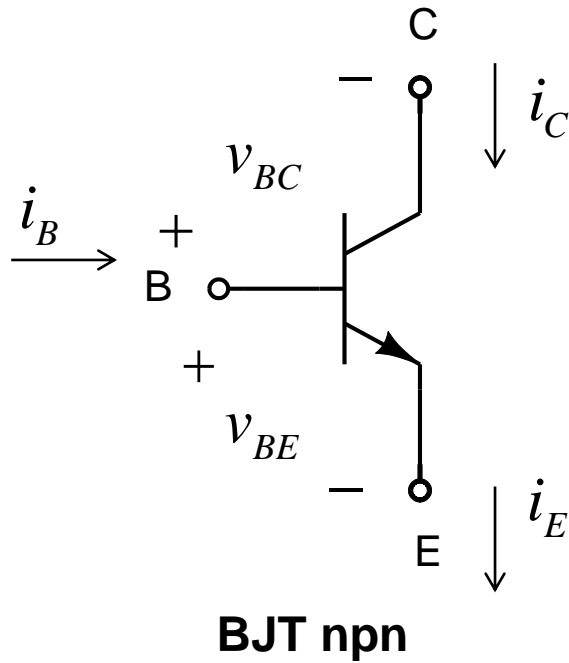


Regioni di funzionamento del BJT

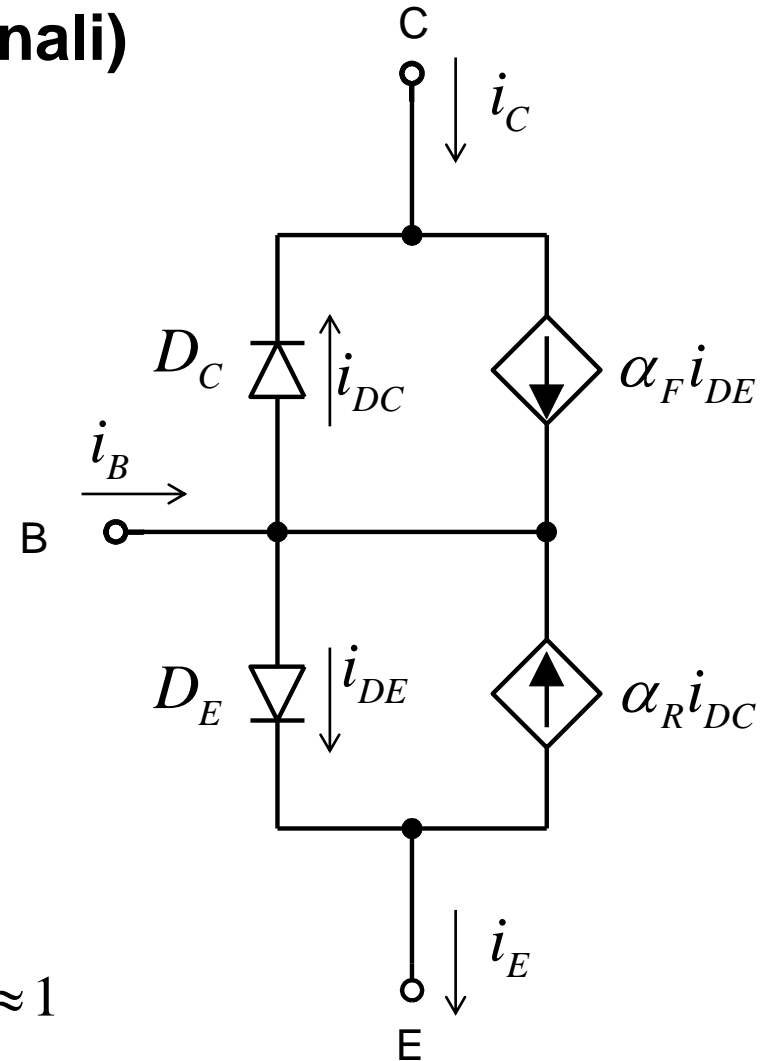
Regione di Funzionamento	Giunzione Base-Elettore	Giunzione Base-Collettore
ATTIVA DIRETTA	ON	OFF
SATURAZIONE	ON	ON
INTERDIZIONE	OFF	OFF
ATTIVA INVERSA	OFF	ON

Il Modello del BJT per Grandi Segnali

Modello di Ebers-Moll (grandi segnali)



$$\begin{cases} i_{DE} = I_{SE} \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) \\ i_{DC} = I_{SC} \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right) \end{cases}$$



Il Modello di Ebers Moll

$$\begin{cases} i_{DE} = I_{SE} \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) \\ i_{DC} = I_{SC} \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_E = i_{DE} - \alpha_R i_{DC} = I_{SE} \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \alpha_R I_{SC} \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right) \\ i_C = -i_{DC} + \alpha_F i_{DE} = \alpha_F I_{SE} \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - I_{SC} \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right) \\ i_B = (1 - \alpha_F) i_{DE} + (1 - \alpha_R) i_{DC} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_E = a_{11} F_E + a_{12} F_C \\ i_C = a_{21} F_E + a_{22} F_C \end{cases}$$

$$F_E = \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right)$$

$$F_C = \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

Il Modello di Ebers Moll

Deve essere

$$\alpha_F I_{SE} = \alpha_R I_{SC} = I_S$$

infatti risulta

$$a_{12} = -a_{21}$$

da cui:

$$\begin{cases} i_E = \frac{I_S}{\alpha_F} (e^{v_{BE}/V_T} - 1) - I_S (e^{v_{BC}/V_T} - 1) \\ i_C = I_S (e^{v_{BE}/V_T} - 1) - \frac{I_S}{\alpha_R} (e^{v_{BC}/V_T} - 1) \\ i_B = \frac{I_S}{\beta_F} (e^{v_{BE}/V_T} - 1) + \frac{I_S}{\beta_R} (e^{v_{BC}/V_T} - 1) \end{cases}$$

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

1) Regime normale diretto

$$v_{BE} > 0, \quad v_{BC} < 0$$

$$v_{BE} \gg V_T, \quad v_{BC} \ll V_T$$

$$\left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right) \rightarrow -1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_E \cong \frac{I_S}{\alpha_F} e^{v_{BE}/V_T} + I_S \left(1 - \frac{1}{\alpha_F} \right) \\ i_C \cong I_S e^{v_{BE}/V_T} + I_S \left(\frac{1}{\alpha_R} - 1 \right) \\ i_B \cong \frac{I_S}{\beta_F} e^{v_{BE}/V_T} - I_S \left(\frac{1}{\beta_F} + \frac{1}{\beta_R} \right) \end{array} \right.$$

1) Regime normale diretto

Trascurando il secondo termine:

$$\begin{cases} i_E \cong \frac{I_S}{\alpha_F} e^{v_{BE}/V_T} \\ i_C \cong I_S e^{v_{BE}/V_T} \\ i_B \cong \frac{I_S}{\beta_F} e^{v_{BE}/V_T} \end{cases}$$

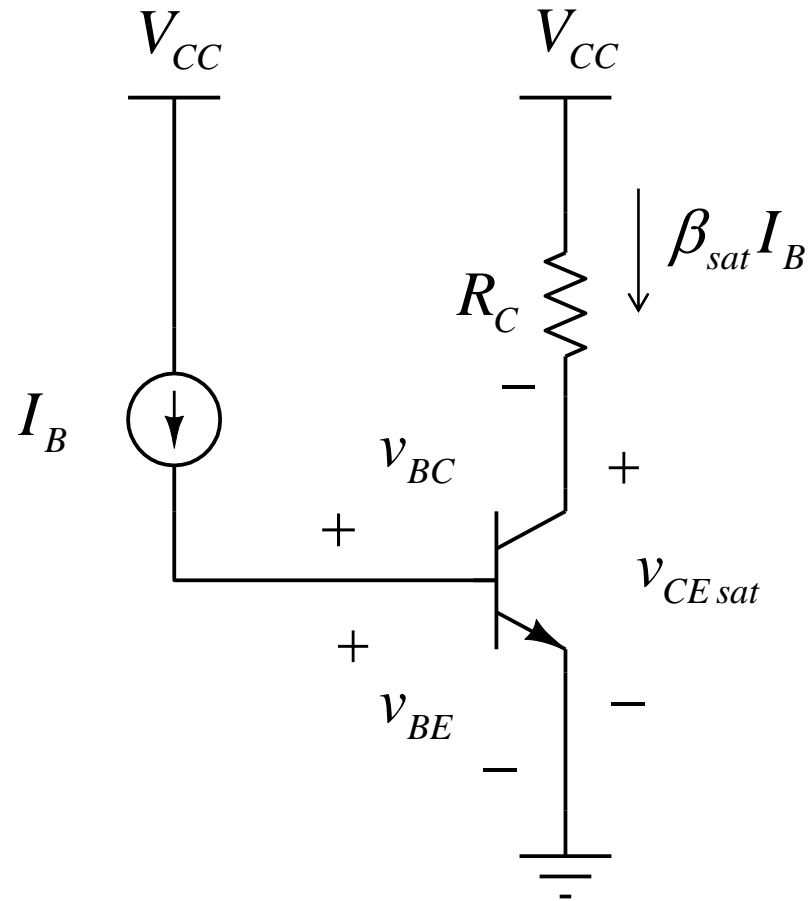
da cui:

$$\frac{i_C}{i_B} = \beta_F$$

$$\frac{i_C}{i_E} = \alpha_F = \frac{\beta_F}{1 + \beta_F}$$

$$\frac{i_B}{i_E} = \frac{\alpha_F}{\beta_F} = \frac{1}{1 + \beta_F}$$

2) Saturazione



Supponiamo che la I_B sia sufficiente per portare il transistor in saturazione

Il Modello di Ebers Moll

2) Saturazione

$$v_{BE} > 0, \quad v_{BC} > 0$$

$$\begin{cases} i_C \cong I_S e^{v_{BE}/V_T} - \frac{I_S}{\alpha_R} e^{v_{BC}/V_T} \\ i_B \cong \frac{I_S}{\beta_F} e^{v_{BE}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_R} e^{v_{BC}/V_T} \end{cases}$$

$$\beta_{sat} = \frac{i_C}{i_B} = \frac{I_S e^{v_{BE}/V_T} - \frac{I_S}{\alpha_R} e^{v_{BC}/V_T}}{\frac{I_S}{\beta_F} e^{v_{BE}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_R} e^{v_{BC}/V_T}} = \frac{I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 - \frac{1}{\alpha_R} e^{v_{BC}/V_T} e^{-v_{BE}/V_T} \right)}{\frac{I_S}{\beta_F} e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{\beta_F}{\beta_R} e^{v_{BC}/V_T} e^{-v_{BE}/V_T} \right)}$$

$$v_{BC} - v_{BE} = -v_{CE sat}$$

2) Saturazione

$$\beta_{sat} = \frac{i_C}{i_B} = \beta_F \frac{1 - \frac{1}{\alpha_R} e^{-v_{CE sat}/V_T}}{1 + \frac{\beta_F}{\beta_R} e^{-v_{CE sat}/V_T}} < \beta_F$$

che insieme alla

$$V_{CC} = R_C i_C + v_{CE sat}$$

$$i_B = I_B$$

consente di determinare $v_{CE sat}$

3) Interdizione

$$v_{BE} < 0, \quad v_{BC} < 0$$

$$\left(v_{BE} < V_\gamma, \quad v_{BC} < V_\gamma \right)$$

$$v_{BE} \ll V_T, \quad v_{BC} \ll V_T$$

$$\begin{cases} i_E \cong 0 \\ i_C \cong 0 \\ i_B \cong 0 \end{cases}$$

4) Regime normale inverso

$$v_{BE} < 0, \quad v_{BC} > 0$$

$$v_{BE} \ll V_T, \quad v_{BC} \gg V_T$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_E \cong -I_S e^{v_{BC}/V_T} + I_S \left(\frac{1}{\alpha_F} - 1 \right) \\ i_C \cong -\frac{I_S}{\alpha_R} e^{v_{BC}/V_T} + I_S \left(\frac{1}{\alpha_R} - 1 \right) \\ i_B \cong \frac{I_S}{\beta_R} e^{v_{BC}/V_T} - I_S \left(\frac{1}{\beta_F} + \frac{1}{\beta_R} \right) \end{array} \right.$$

4) Regime normale inverso

Trascurando il secondo termine:

$$\begin{cases} i_E \cong -I_S e^{v_{BC}/V_T} \\ i_C \cong -\frac{I_S}{\alpha_R} e^{v_{BC}/V_T} \\ i_B \cong \frac{I_S}{\beta_R} e^{v_{BC}/V_T} \end{cases}$$

da cui:

$$\frac{-i_E}{i_B} = \beta_R$$

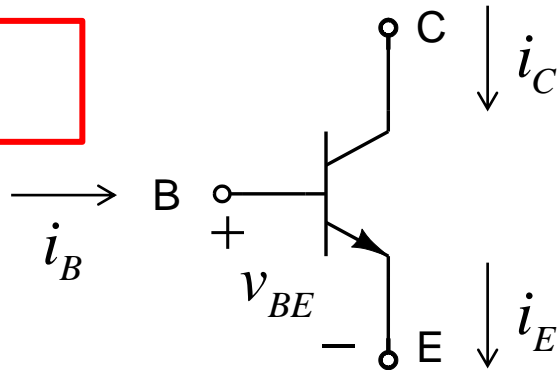
$$\frac{-i_E}{-i_C} = \alpha_R = \frac{\beta_R}{1 + \beta_R}$$

$$\frac{i_B}{-i_C} = \frac{\alpha_R}{\beta_R} = \frac{1}{1 + \beta_R}$$

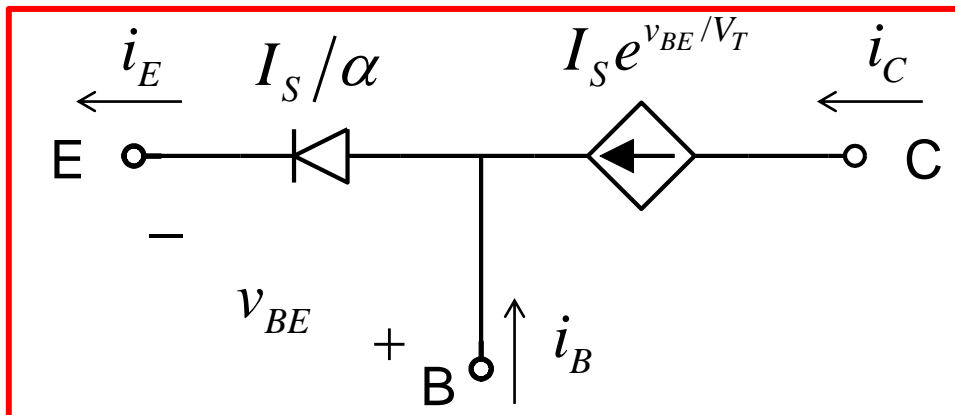
OSS. Sono le stesse relazioni viste nel funzionamento normale diretto con le seguenti sostituzioni: $i_C \rightarrow -i_E$; $i_E \rightarrow -i_C$; $\beta_F \rightarrow \beta_R$ ($\beta_R \ll \beta_F$)

Il Modello di Ebers Moll in Funzionamento Normale Diretto

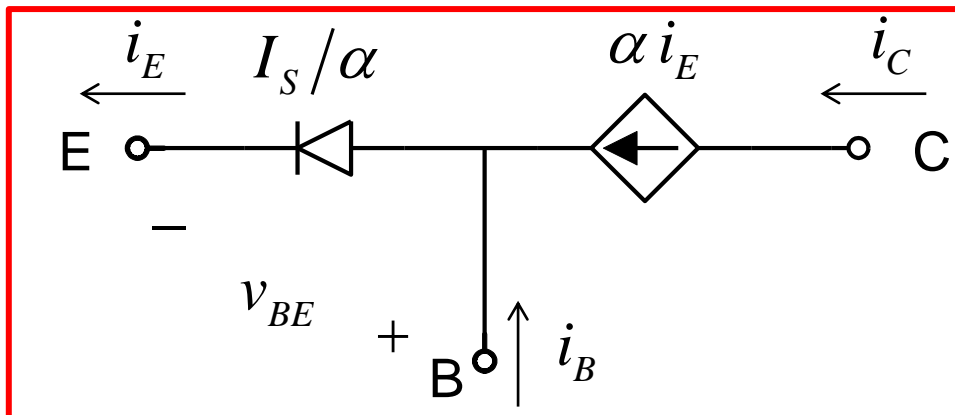
npn



**Negli amplificatori il BJT lavora
generalmente nel
regime normale diretto**

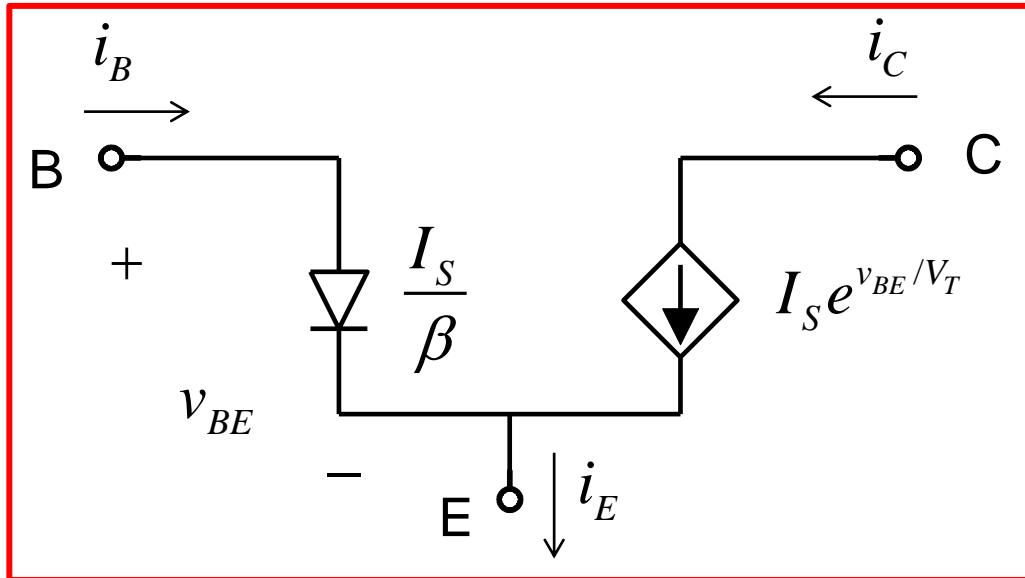


$$\begin{cases} i_E = \frac{I_S}{\alpha} e^{v_{BE}/V_T} \\ i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \\ i_B = i_E - i_C \end{cases}$$



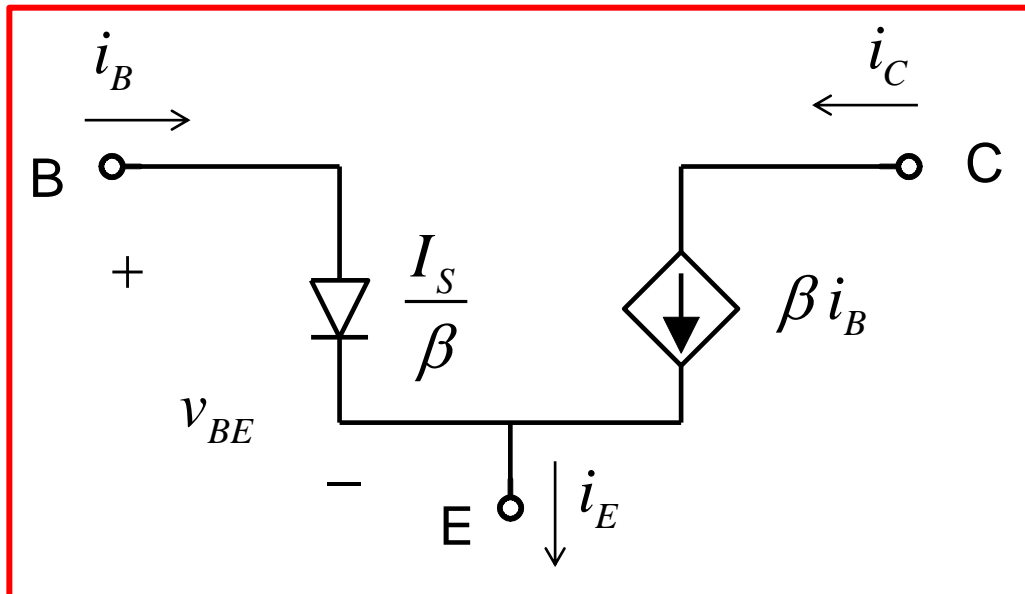
BASE COMUNE

Il Modello di Ebers Moll in Funzionamento Normale Diretto



npn

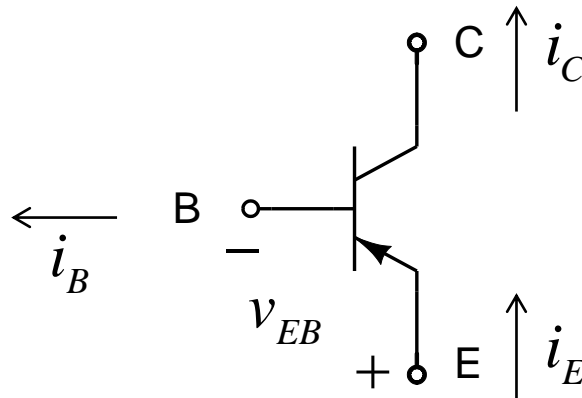
$$\begin{cases} i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \\ i_B = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{BE}/V_T} \\ i_E = i_B + i_C \end{cases}$$



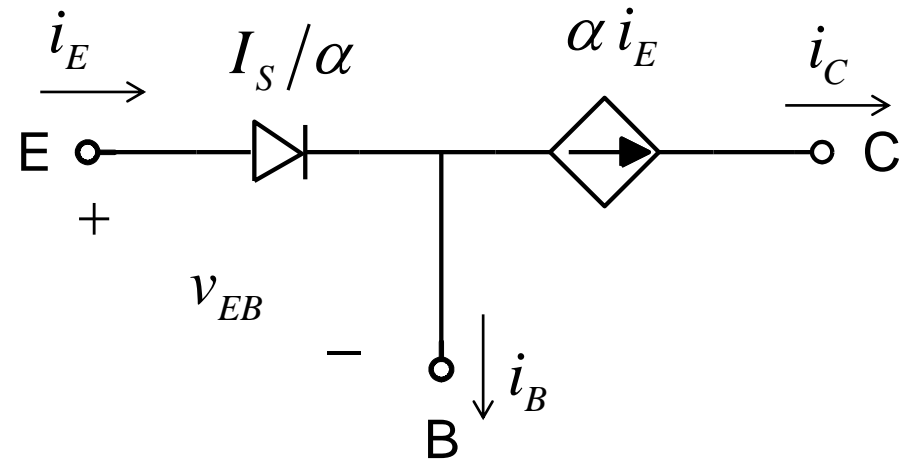
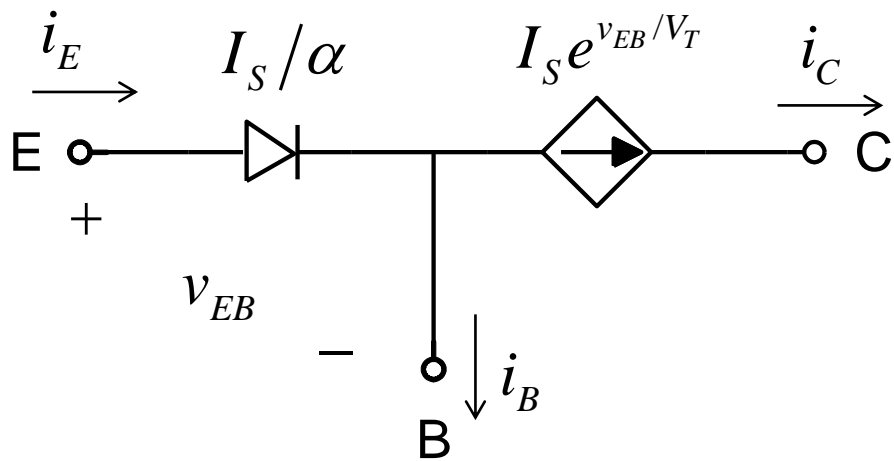
EMETTITORE COMUNE

Il Modello di Ebers Moll in Funzionamento Normale Diretto

pnp



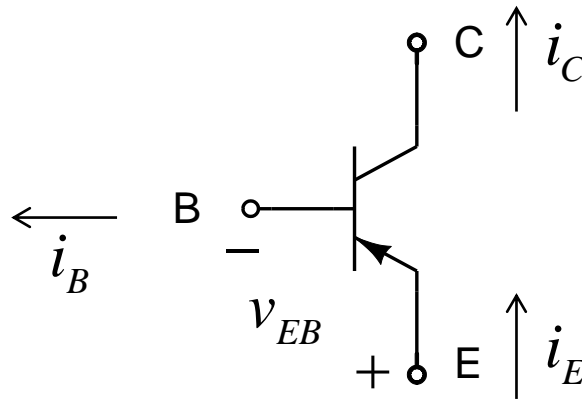
$$\begin{cases} i_E = \frac{I_S}{\alpha} e^{v_{EB}/V_T} \\ i_C = I_S e^{v_{EB}/V_T} \\ i_B = i_E - i_C \end{cases}$$



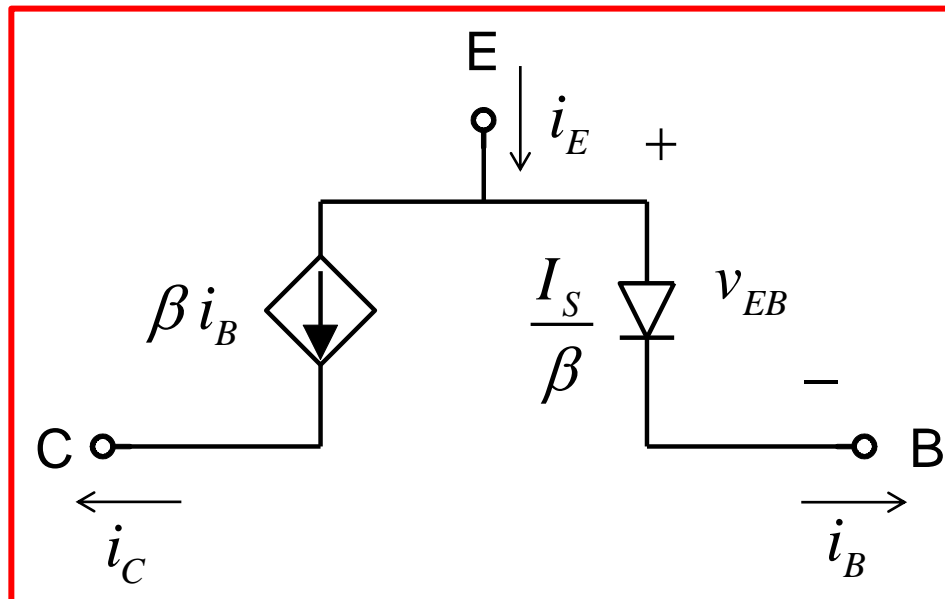
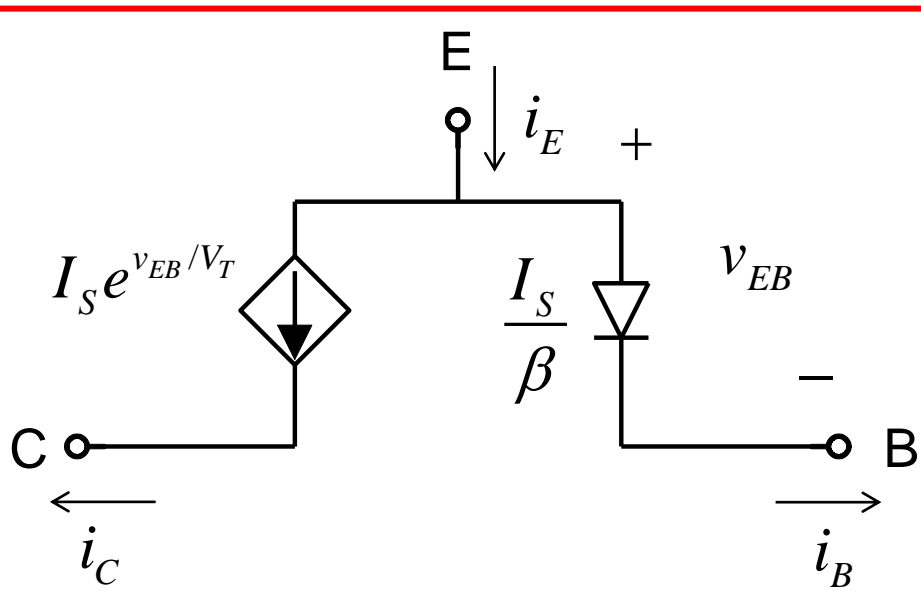
BASE COMUNE

Il Modello di Ebers Moll in Funzionamento Normale Diretto

pnp

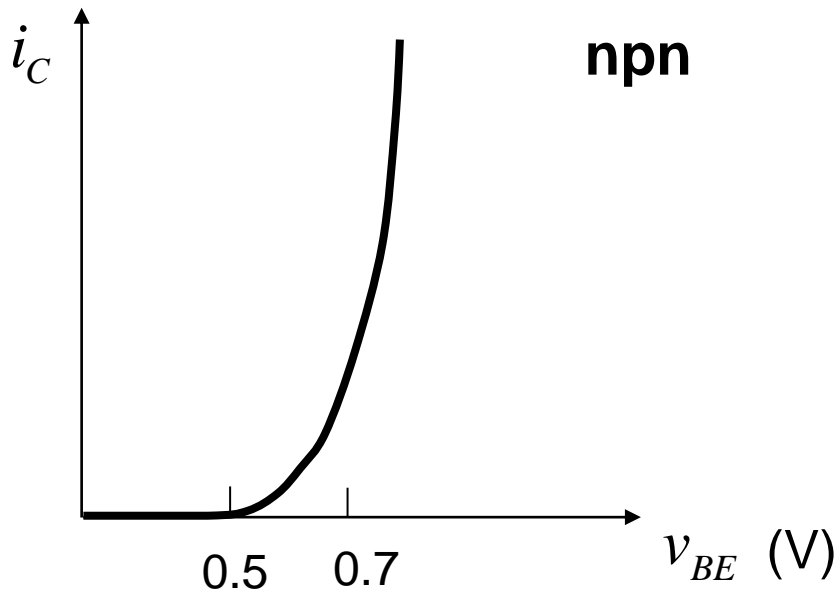


$$\begin{cases} i_C = I_S e^{v_{EB}/V_T} \\ i_B = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{EB}/V_T} \\ i_E = i_B + i_C \end{cases}$$

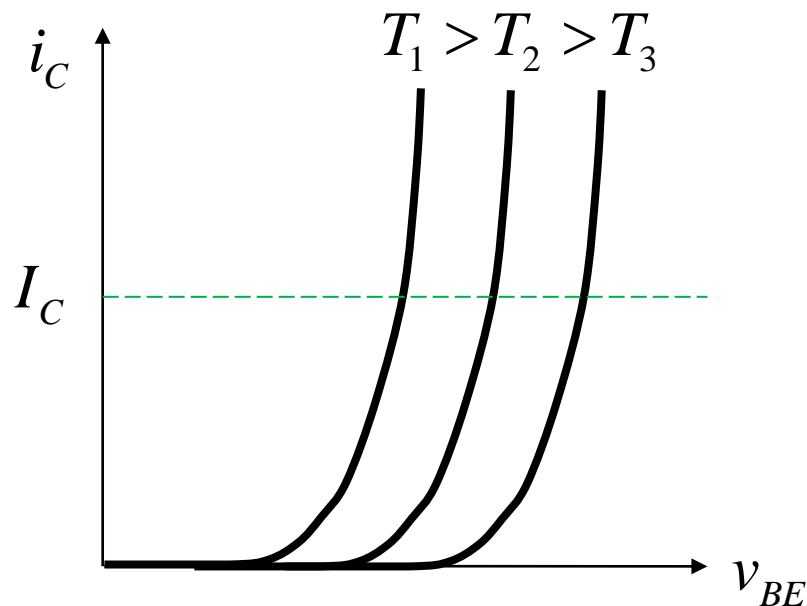


EMETTITORE COMUNE

Rappresentazione Grafica delle Caratteristiche I-V



$$i_C - v_{BE}$$



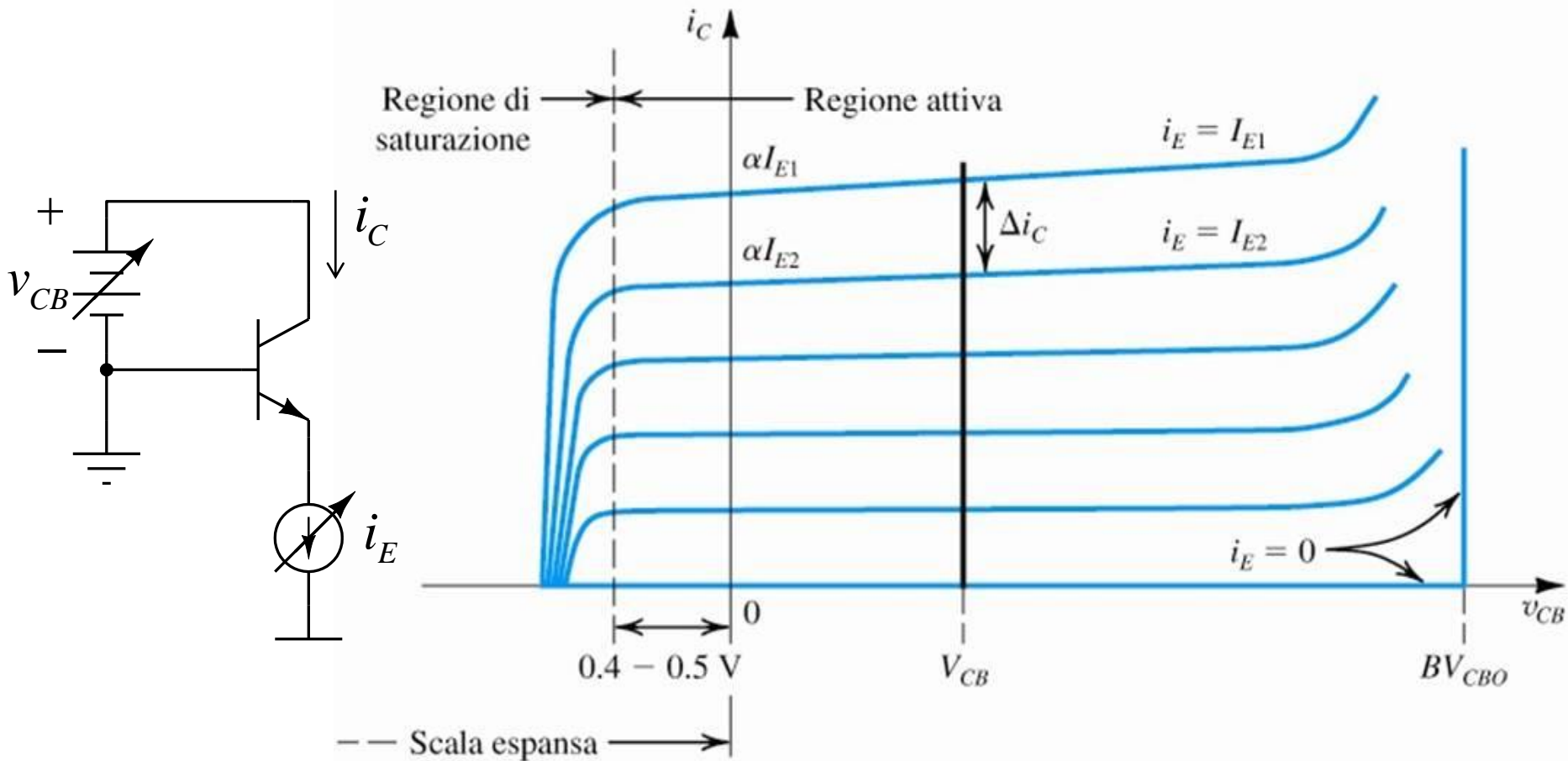
Effetto della temperatura
a corrente costante

$$T_C \cong -2 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$$

Rappresentazione Grafica delle Caratteristiche I-V

npn

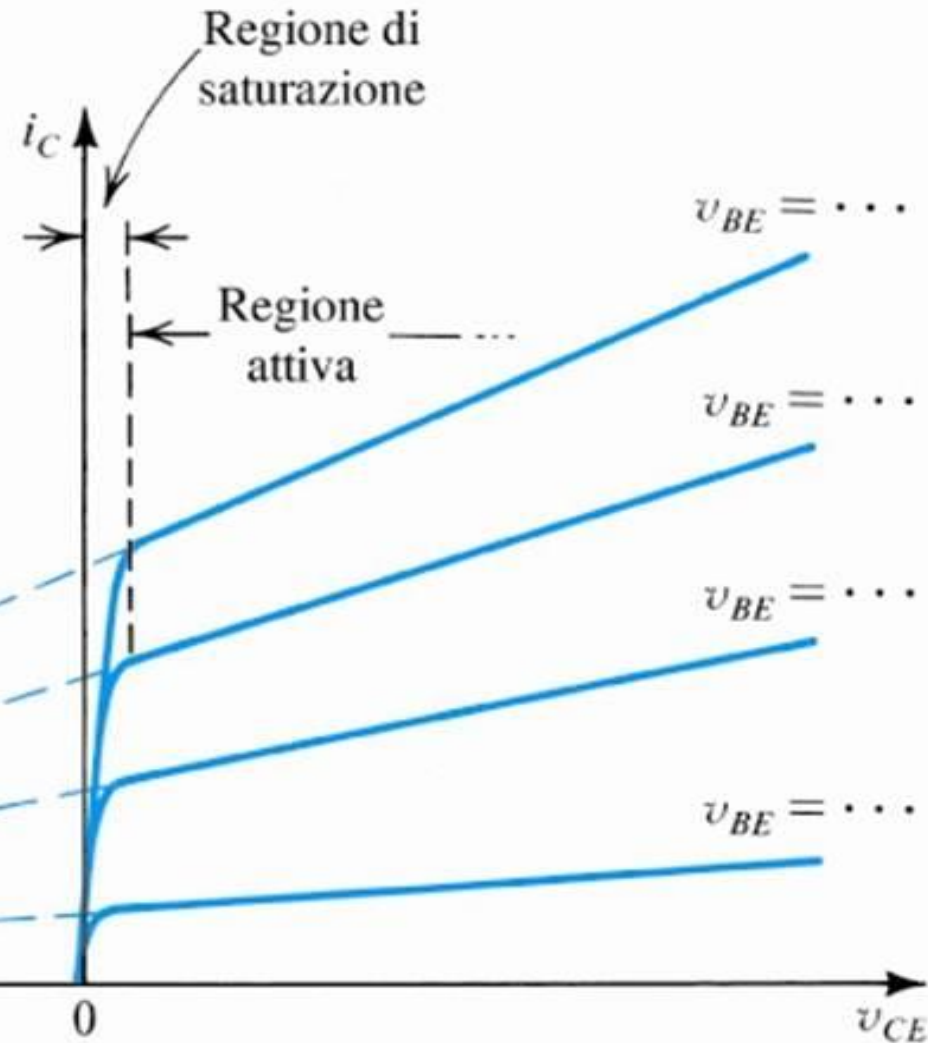
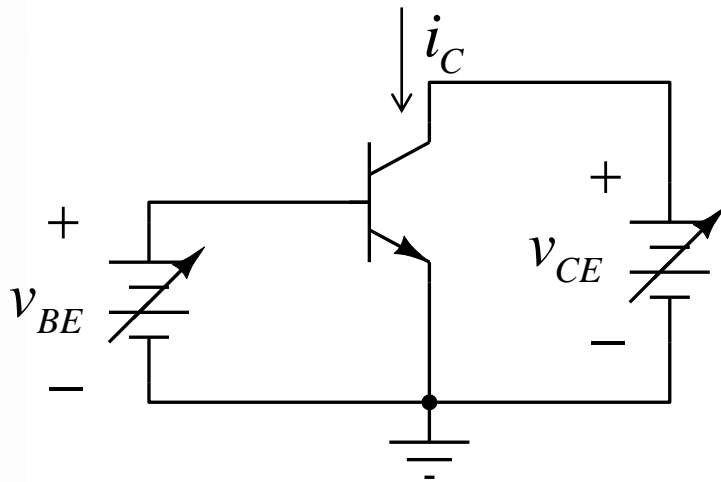
$$i_C - v_{CB}$$



Rappresentazione Grafica delle Caratteristiche I-V

$$i_C - v_{CE}$$

npn



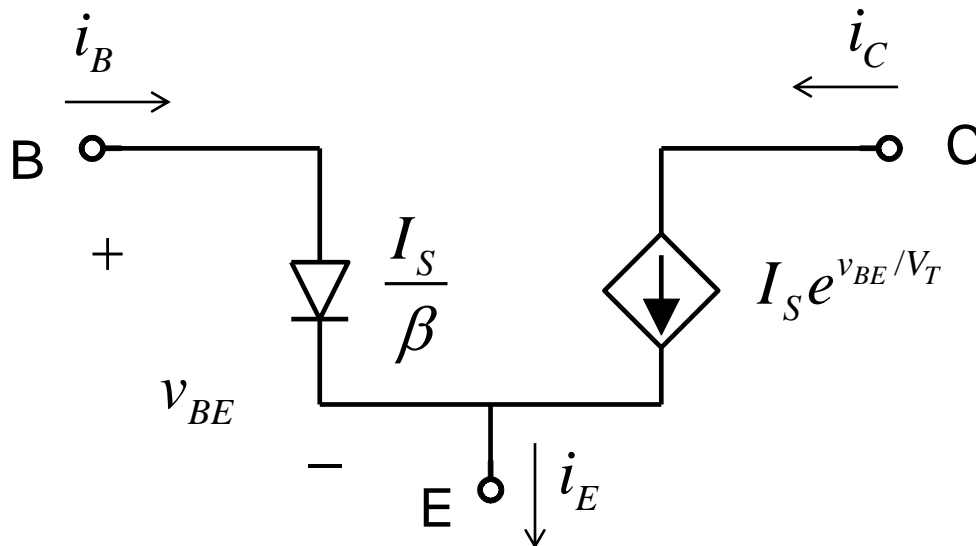
$$i_C = I_C e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

V_A : tensione di Early

$$r_o = \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \bigg|_{v_{BE}=\text{cost.}} \right]^{-1} \cong \frac{V_A}{I_C}$$

Modello per Piccoli Segnali: a "Pi Greco" o a Emettitore Comune

Partendo dal modello per grandi segnali di Ebers-Moll :



$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{BE}/V_T}$$

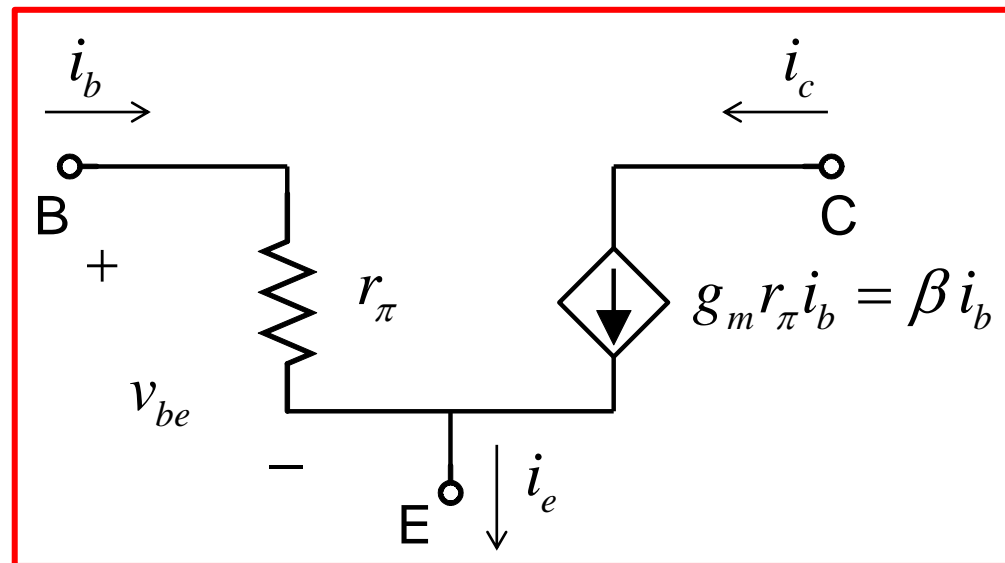
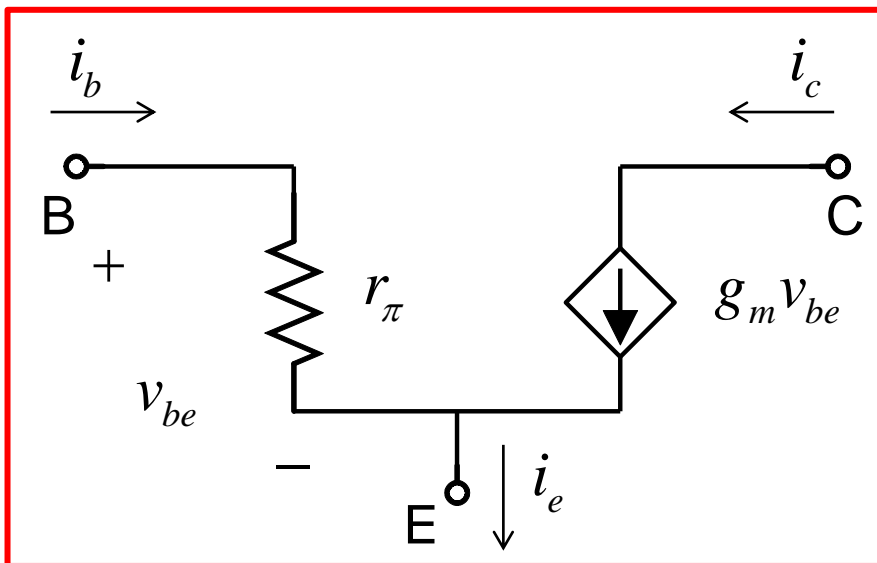
Linearizzando:

$$i_c = g_m v_{be}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$i_b = \frac{g_m}{\beta} v_{be} = \frac{v_{be}}{r_\pi}$$

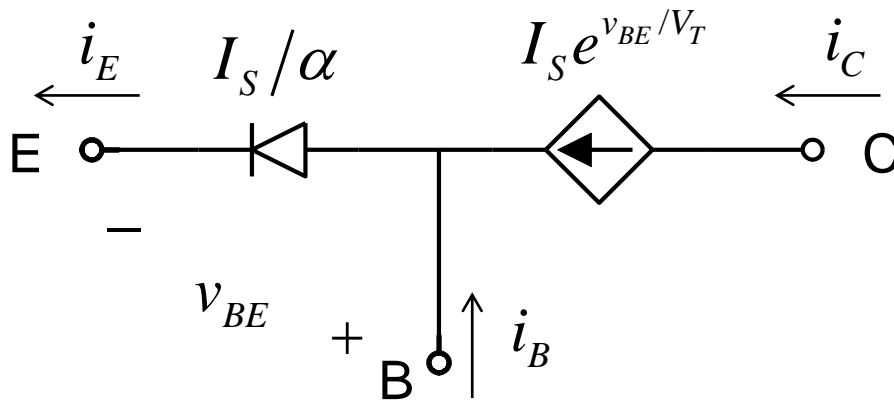
$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{V_T}{I_B}$$



Modello per Piccoli Segnali a "Pi Greco"

Modello per Piccoli Segnali: a " I " o a Base Comune

Partendo dal modello per grandi segnali di Ebers-Moll :



$$i_E = \frac{I_S}{\alpha} e^{v_{BE}/V_T}$$

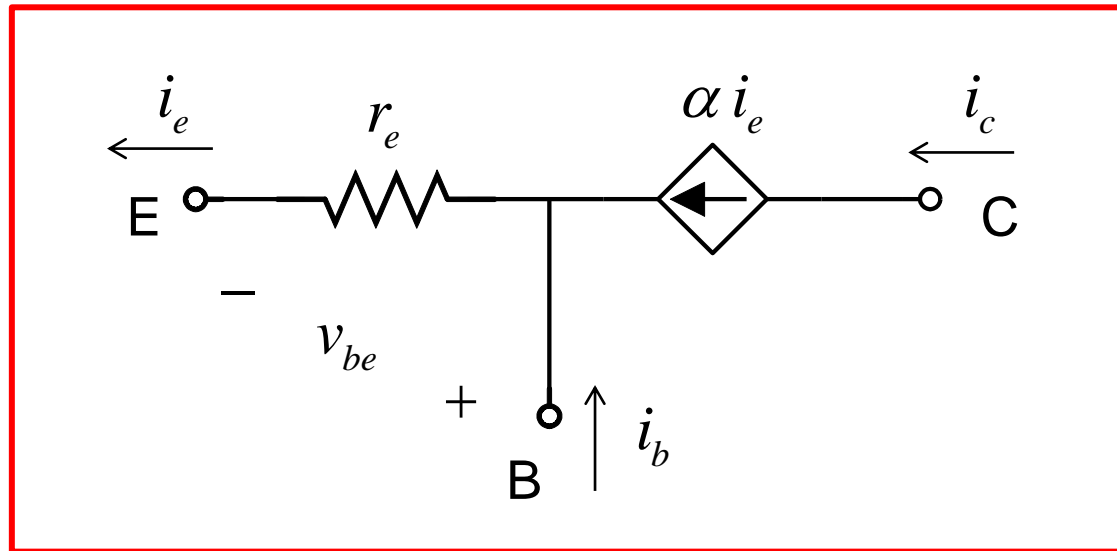
$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

Linearizzando:

$$i_e = \frac{1}{r_e} v_{be}$$

$$\frac{1}{r_e} = \frac{I_E}{V_T} = \frac{I_C}{\alpha V_T} = \frac{g_m}{\alpha}$$

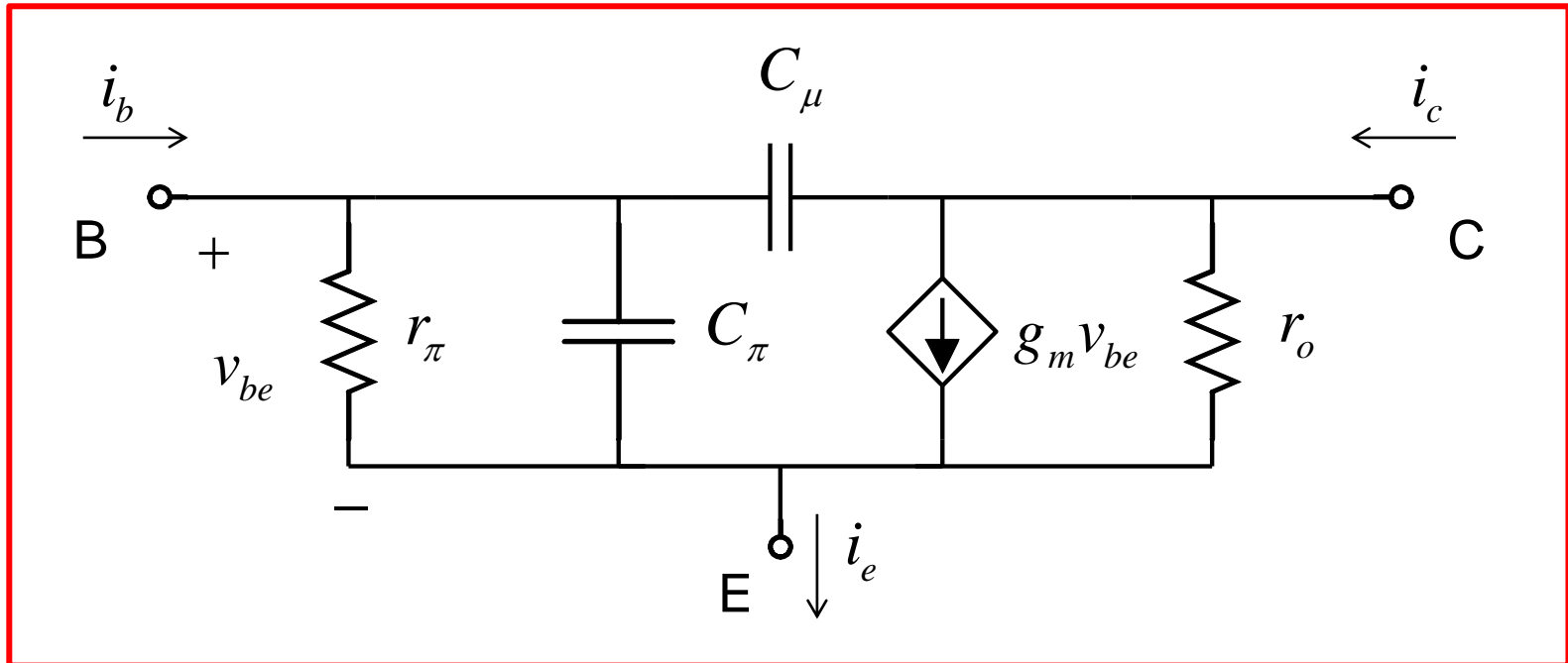
$$i_c = g_m v_{be} = \alpha i_e$$



Modello per Piccoli Segnali a " T "

$$r_e = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{\beta}{g_m (1 + \beta)} = \frac{r_\pi}{1 + \beta}$$

Circuito per Piccoli Segnali Completo

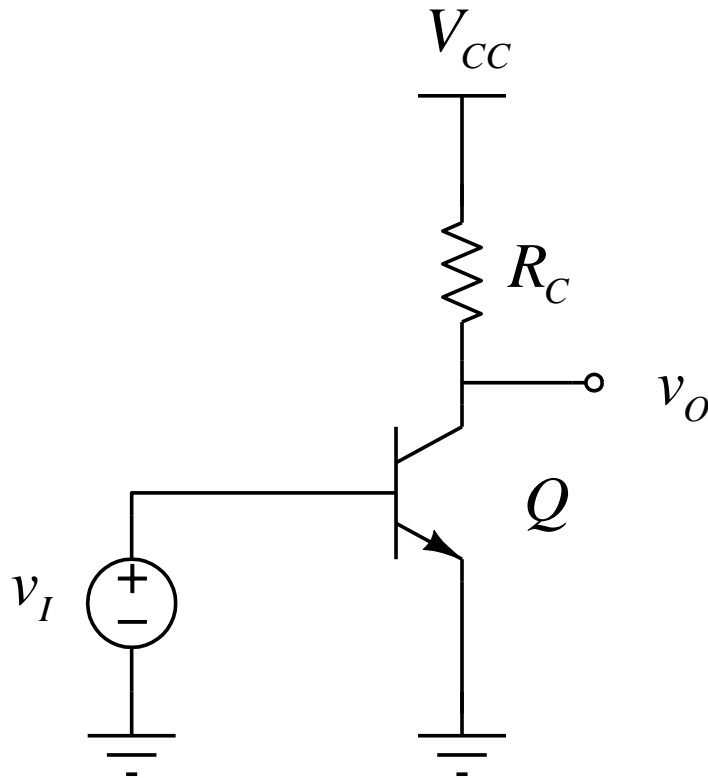


Modello di Giacoletto

$$r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

- Si è trascurata la r_{bb} ,

Il BJT come Amplificatore: Le Configurazioni Fondamentali



$$v_O = v_O(v_I)$$

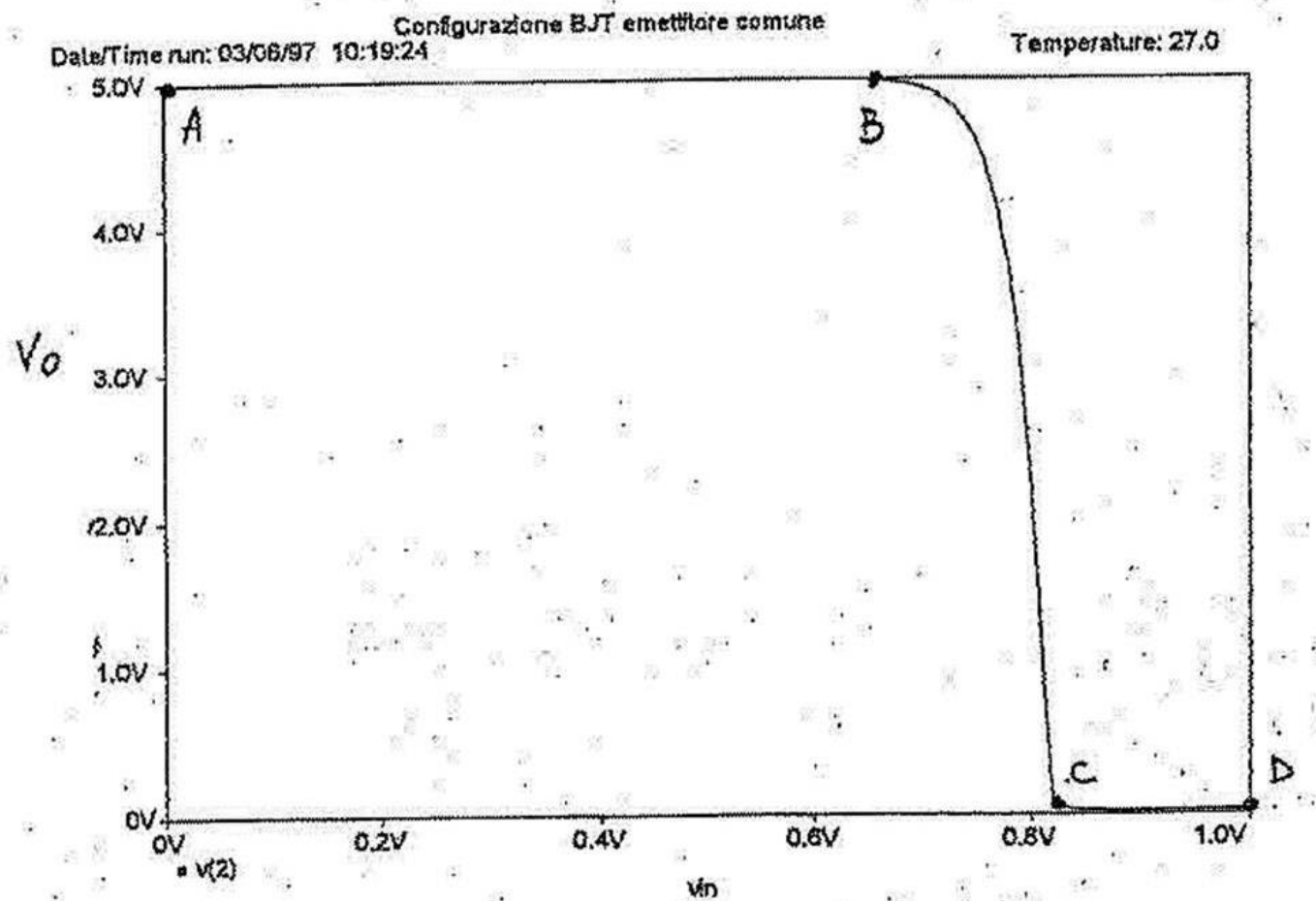
$$\begin{cases} V_{CC} = R_C i_C + v_O \\ i_C = I_S \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{I_S}{\alpha_R} \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right) \end{cases}$$

$$v_{CE} = v_O, \quad v_{BE} = v_I, \quad v_{BC} = v_I - v_O$$

Combinando le due equazioni:

$$V_{CC} = R_C \left\{ I_S \left(e^{v_I/V_T} - 1 \right) - \frac{I_S}{\alpha_R} \left[e^{(v_I - v_O)/V_T} - 1 \right] \right\} + v_O$$

Configurazione a Emittitore Comune (EC)



AB) $0 \leq v_I < V_\gamma$, $i_C \cong 0$, $v_O \cong V_{CC}$ Q in interdizione

Configurazione a Emittitore Comune (EC)

BC) $v_I \cong V_\gamma = 0.6 \text{ V}$ Q in regime normale diretto

$$v_O > v_I$$

$$V_{CC} \cong R_C I_S \left(e^{v_I/V_T} - 1 \right) + v_O$$

CD) $v_I > v_O$ Q in saturazione

$$v_O = v_{CE\text{ sat}} = 0.2 \div 0.3 \text{ V}$$

Nella regione quasi-lineare (BC), derivando,

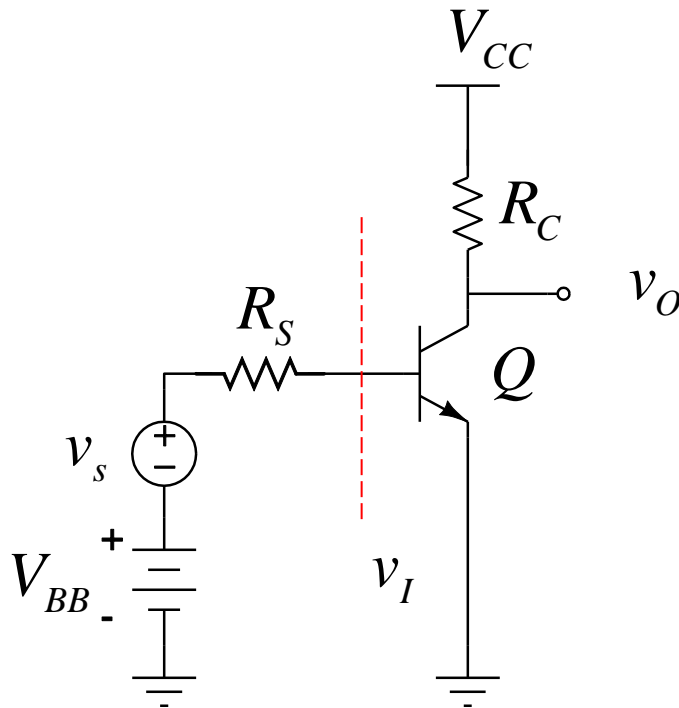
$$0 \cong R_C \frac{I_S}{V_T} e^{v_I/V_T} + \frac{dv_O}{dv_I}$$

$$A_v = \frac{dv_O}{dv_I} \cong -R_C \frac{I_C}{V_T} = -g_m R_C$$

Configurazione a Emittitore Comune (EC)

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

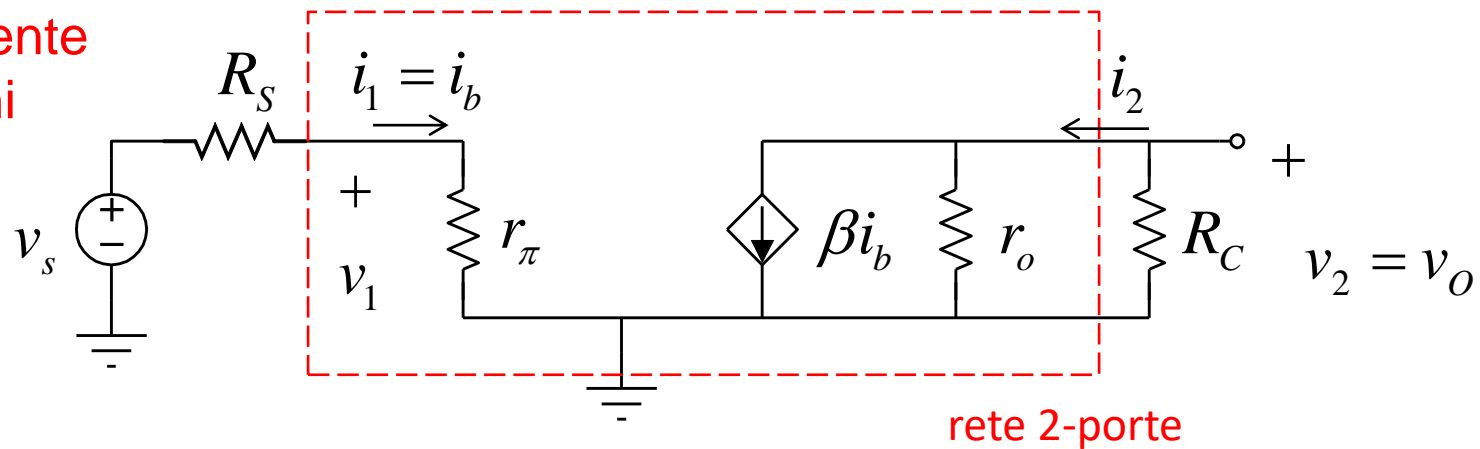
Affinché il BJT operi nella regione quasi-lineare BC con la g_m desiderata è necessario fissare la I_C e quindi il punto di riposo



Circuito equivalente
alle variazioni

Configurazione a Emittitore Comune (EC)

Circuito equivalente
alle variazioni



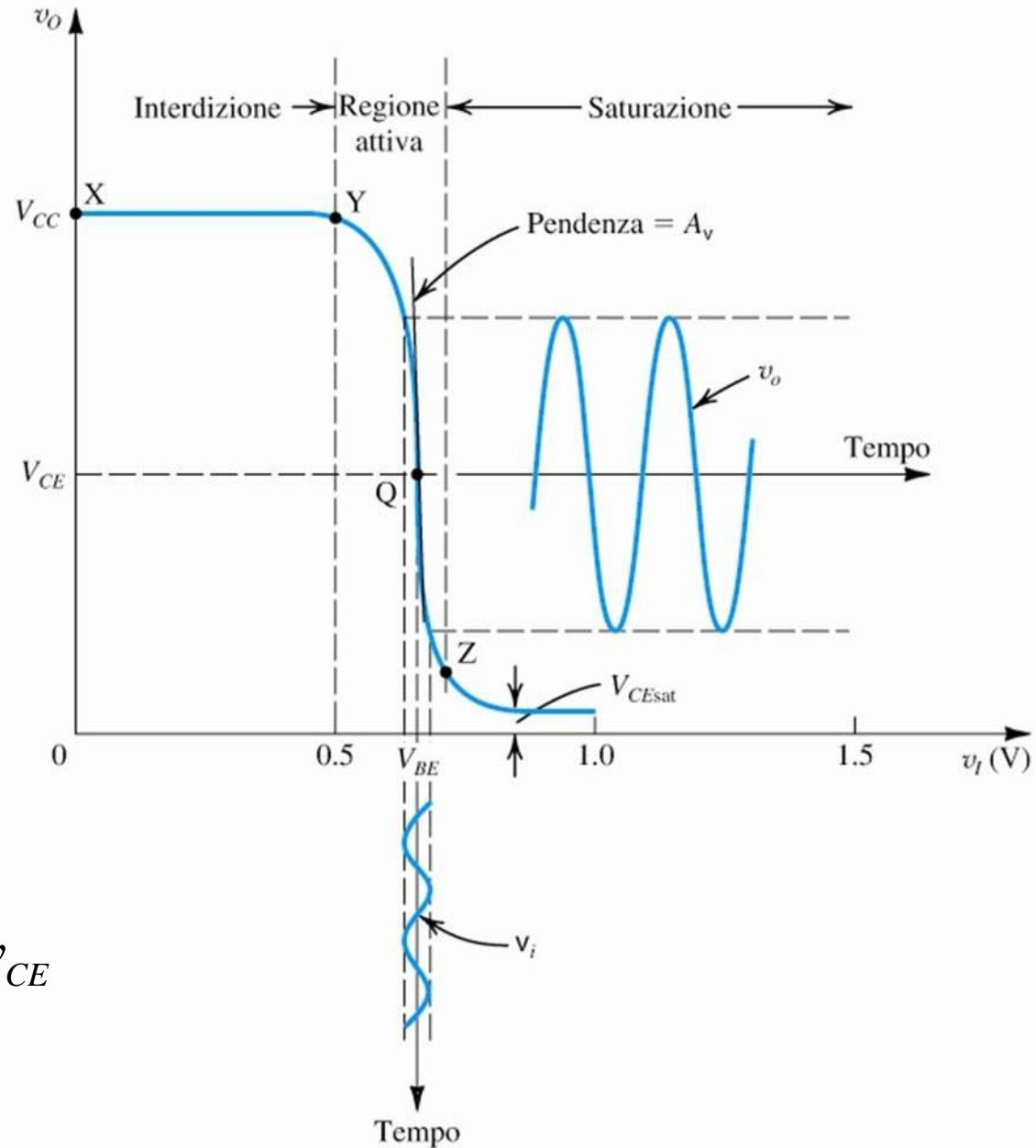
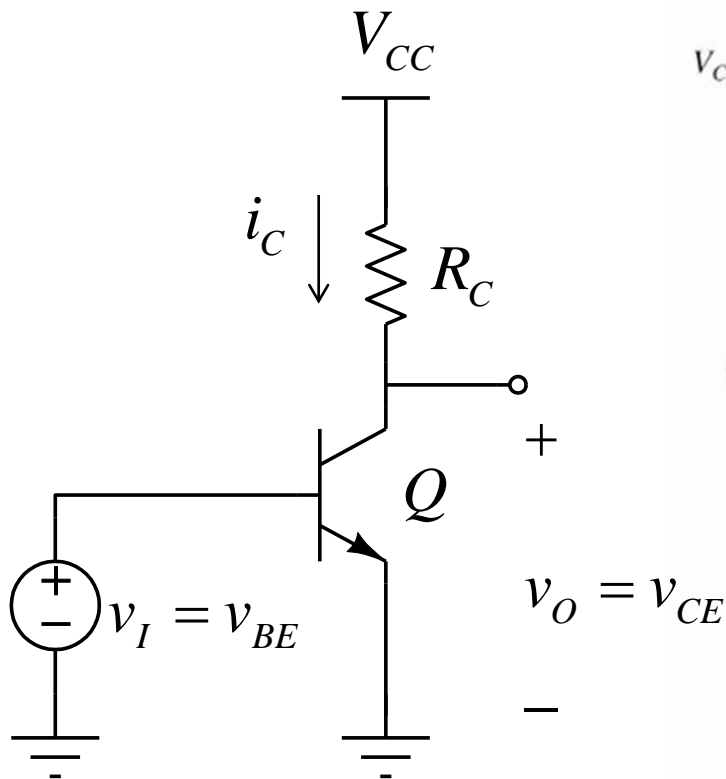
$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{\beta i_b}{i_b} = \beta \quad (\text{si trascura } r_o)$$

$$R_i = \frac{v_1}{i_1} = r_\pi$$

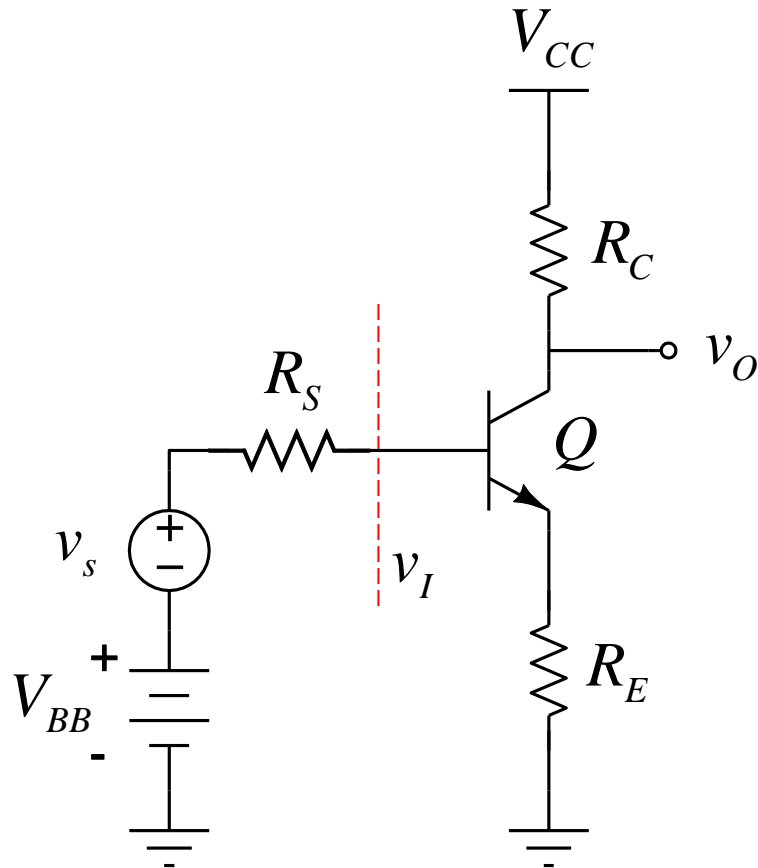
$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{i_2}{i_1} \frac{R_C}{R_i} = -A_i \frac{R_C}{R_i} = -\beta \frac{R_C}{r_\pi} = -g_m R_C$$

$$R_o' = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{v_s=0} = r_o \quad R_o = r_o \parallel R_C \cong R_C$$

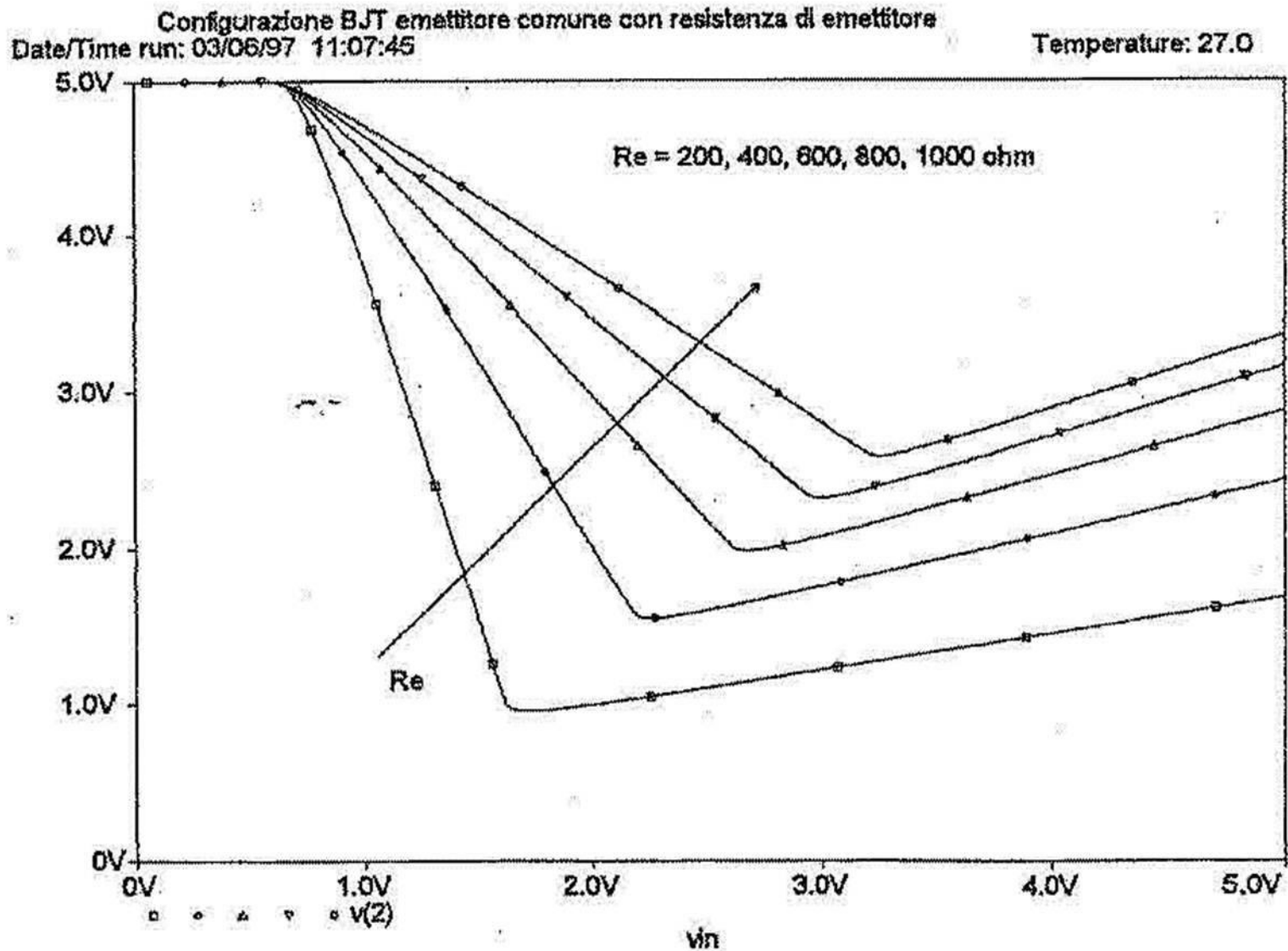
Emettitore Comune (EC)



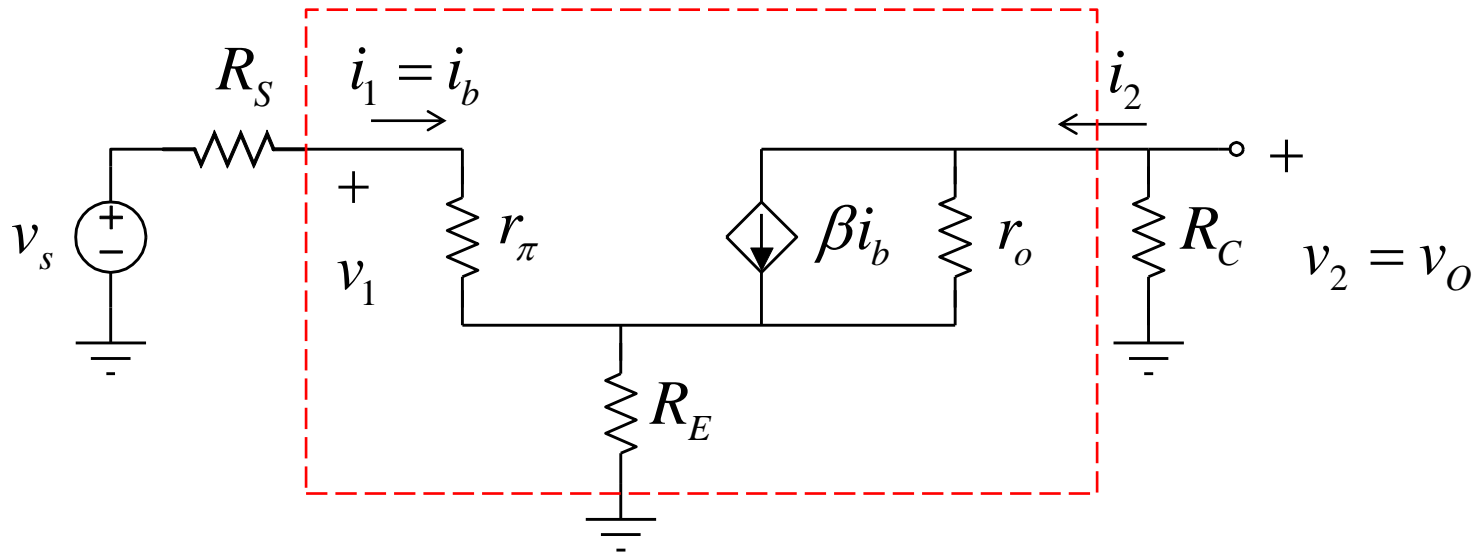
Configurazione a Emittitore Comune (EC) con Degenerazione di Emittitore (R_E)



Configurazione a Emittore Comune (EC) con Degenerazione di Emittore



Configurazione a Emittitore Comune (EC) con Degenerazione di Emittitore

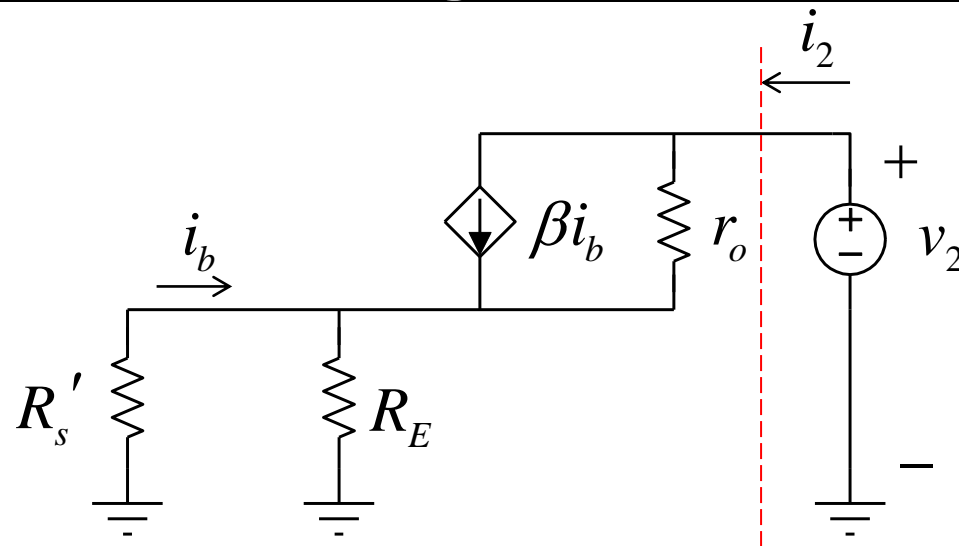


$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{\beta i_b}{i_b} = \beta \quad (\text{si trascura } r_o)$$

$$v_1 = r_\pi i_1 + (1 + \beta) i_1 R_E \quad R_i = \frac{v_1}{i_1} = r_\pi + (1 + \beta) R_E$$

$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{i_2}{i_1} \frac{R_C}{R_i} = -A_i \frac{R_C}{R_i} = -\beta \frac{R_C}{r_\pi + (1 + \beta) R_E} = -\frac{g_m R_C}{1 + g_m R_E / \alpha}$$

Configurazione a Emittitore Comune (EC) con Degenerazione di Emittitore



$$R'_s = R_s + r_\pi$$

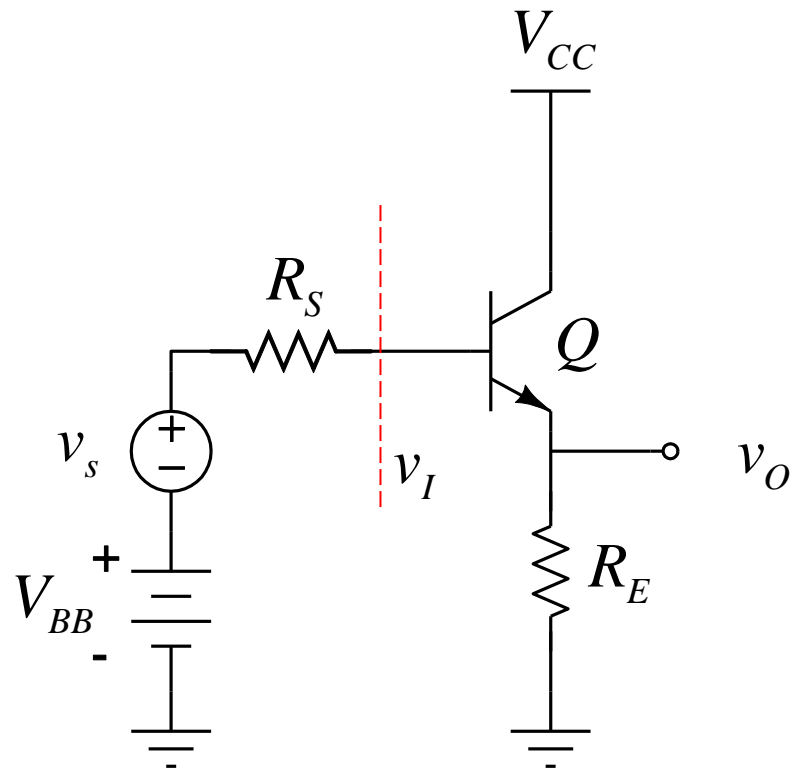
$$v_2 = (i_2 - \beta i_b) r_o - R'_s i_b$$

$$(i_2 + i_b) R_E = -R'_s i_b$$

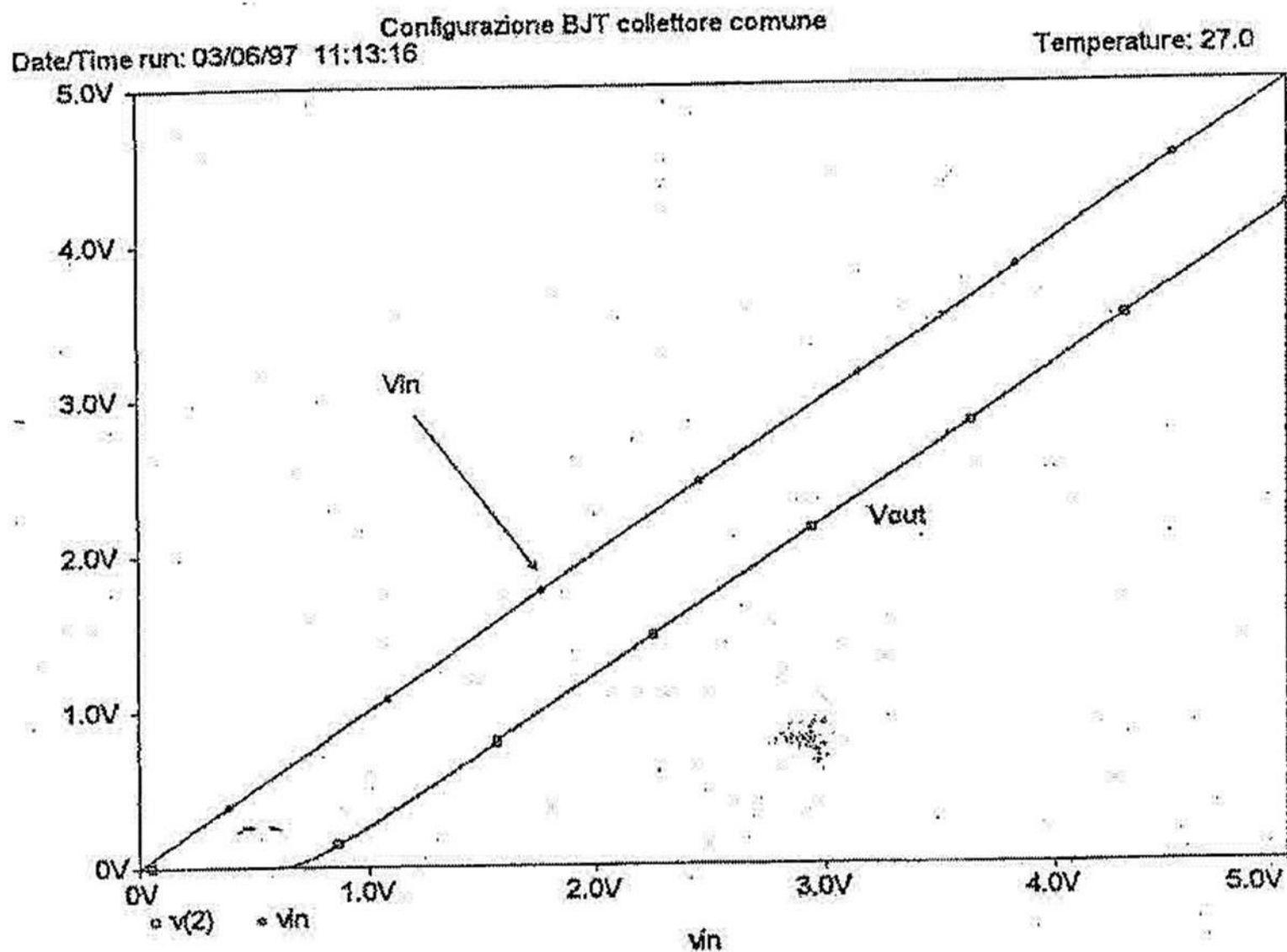
$$v_2 = i_2 r_o + \left(\beta r_o + R'_s \right) \left(\frac{i_2 R_E}{R'_s + R_E} \right)$$

$$R'_o = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{v_s=0} = r_o + \left(\beta r_o + R'_s \right) \frac{R_E}{R'_s + R_E} \cong r_o \left(1 + \frac{\beta R_E}{R_s + r_\pi + R_E} \right)$$

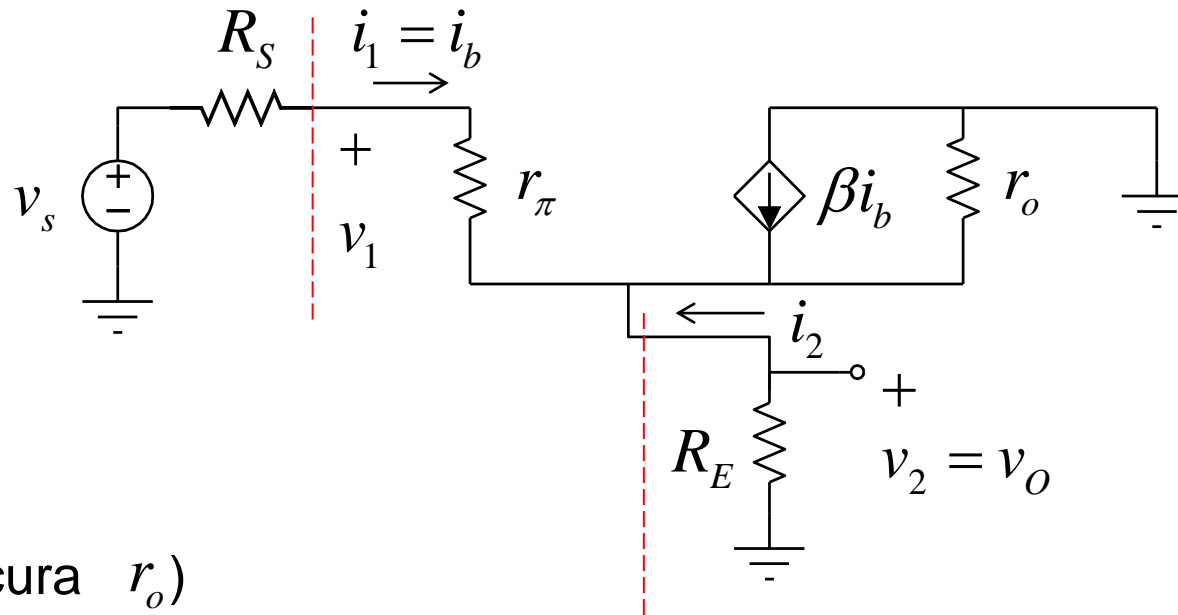
Configurazione a Collettore Comune (CC)



Configurazione a Collettore Comune (CC)



Configurazione a Collettore Comune (CC)



(si trascura r_o)

$$i_2 = -i_e = -(1 + \beta)i_1$$

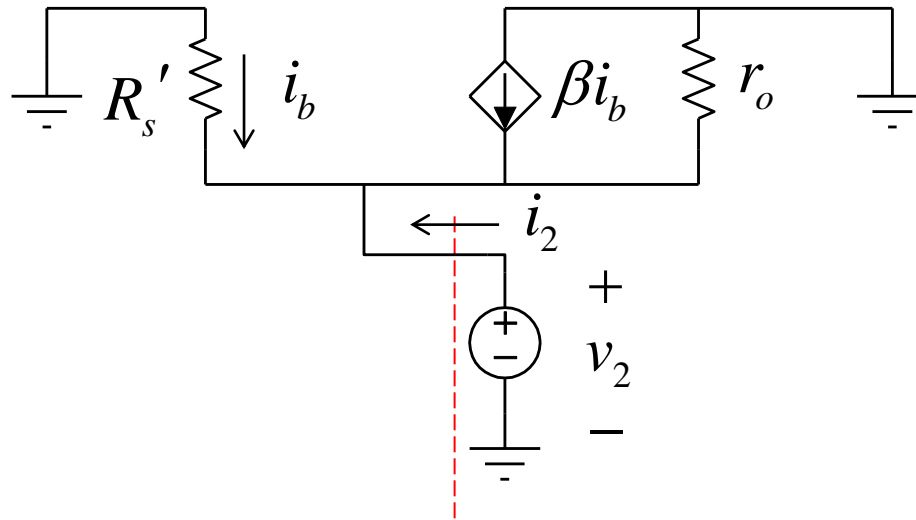
$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-(1 + \beta)i_b}{i_b} = -(1 + \beta)$$

$$v_1 = r_\pi i_1 + (1 + \beta)i_1 R_E$$

$$R_i = \frac{v_1}{i_1} = r_\pi + (1 + \beta)R_E$$

$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{i_2}{i_1} \frac{R_E}{R_i} = -A_i \frac{R_E}{R_i} = (1 + \beta) \frac{R_E}{r_\pi + (1 + \beta)R_E} = \frac{R_i - r_\pi}{R_i} = 1 - \frac{r_\pi}{R_i}$$

Configurazione a Collettore Comune (CC)



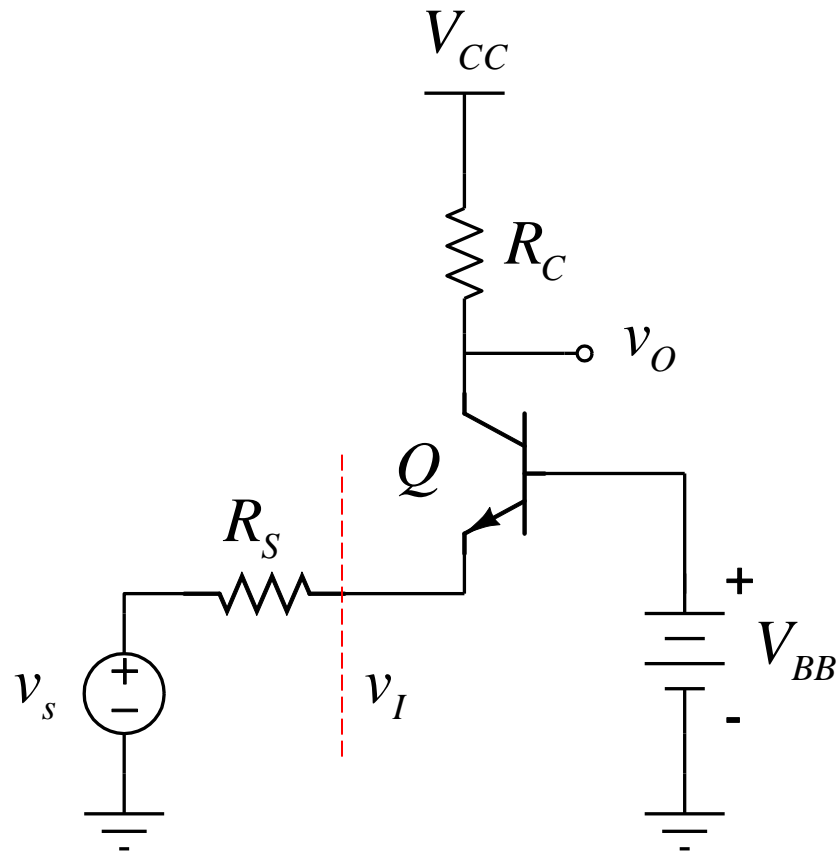
$$(1 + \beta)i_b + i_2 - v_2/r_o = 0 \quad v_2 = -R'_s i_b$$

$$-(1 + \beta)v_2/R'_s + i_2 - v_2/r_o = 0$$

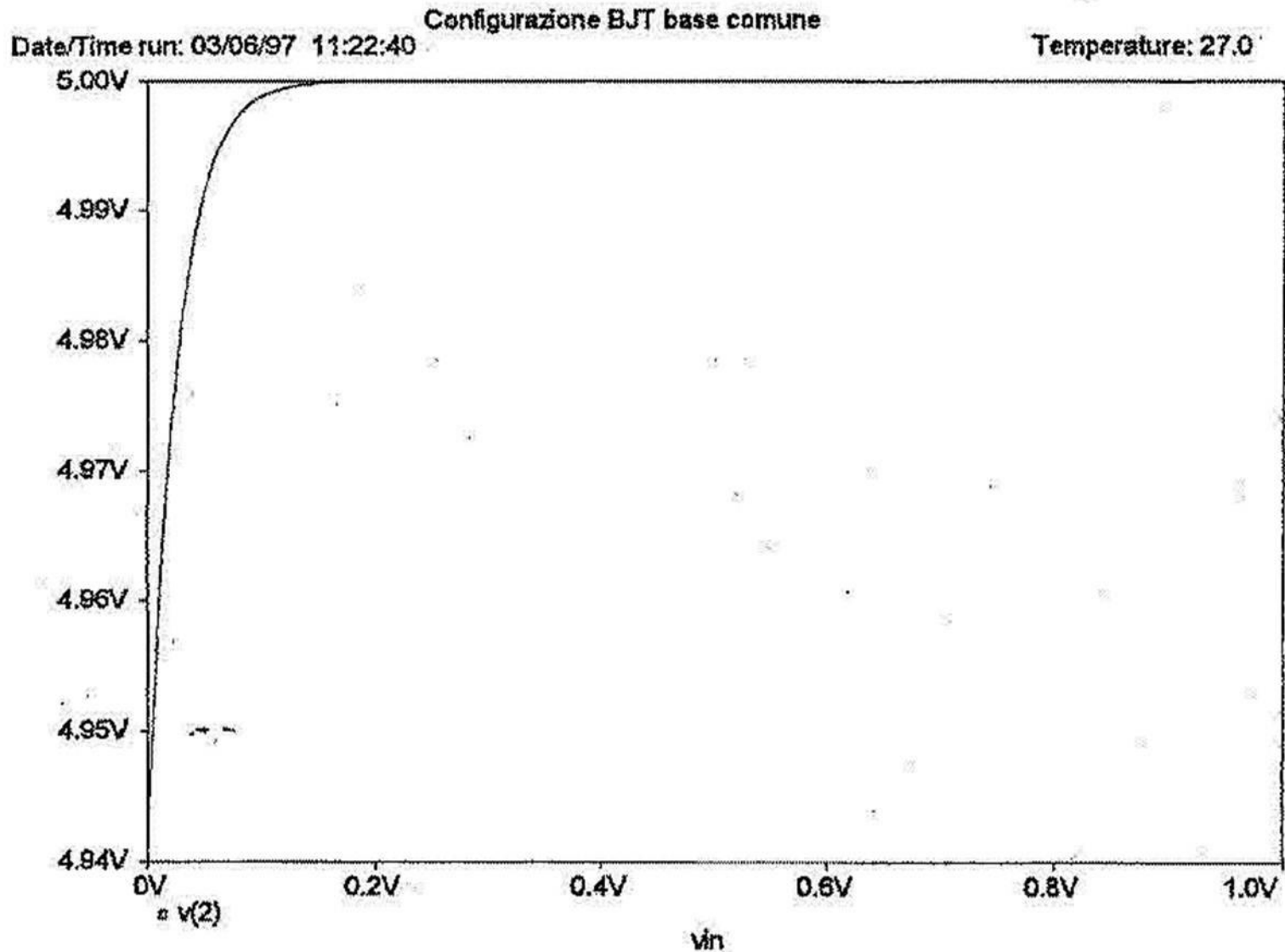
$$i_2 = v_2 \left(\frac{1}{r_o} + \frac{1 + \beta}{R'_s} \right) \cong v_2 \frac{1 + \beta}{R'_s}$$

$$R'_o = \frac{v_2}{i_2} = \frac{r_o + R'_s}{1 + \beta}$$

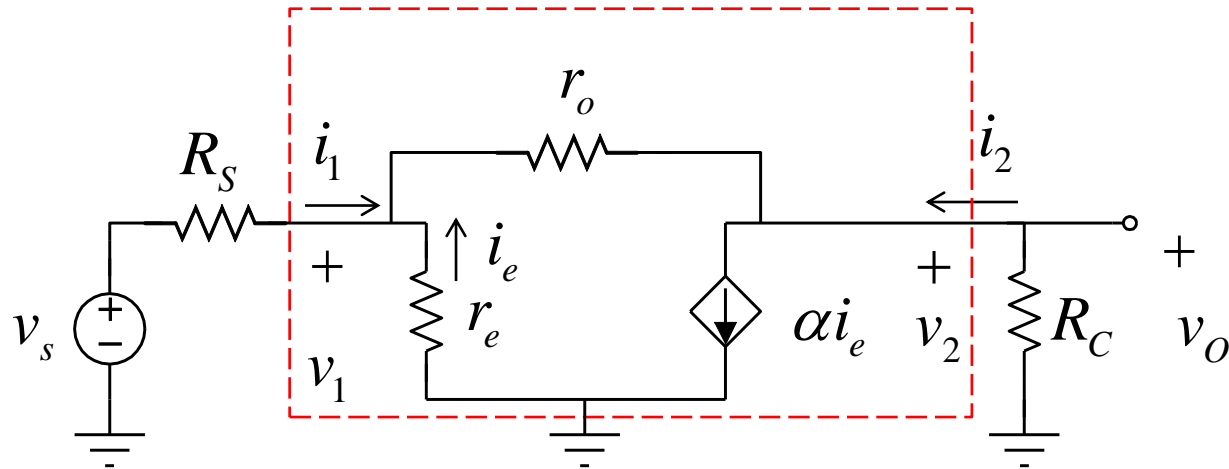
Configurazione a Base Comune (BC)



Configurazione a Base Comune (BC)



Configurazione a Base Comune (BC)



(si trascura r_o)

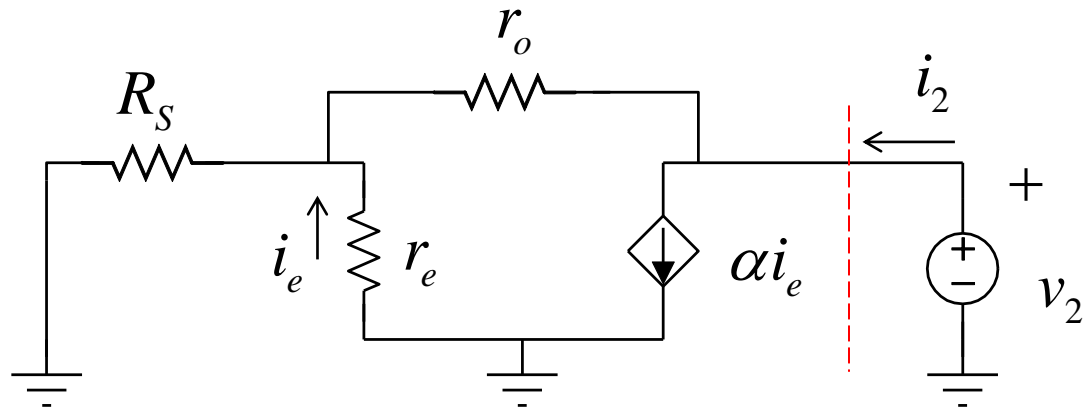
$$i_2 = \alpha i_e \quad i_1 = -i_e$$

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = -\alpha = -\frac{\beta}{1+\beta}$$

$$R_i = \frac{v_1}{i_1} = r_e = \frac{r_\pi}{1+\beta}$$

$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{i_2}{i_1} \frac{R_C}{R_i} = -A_i \frac{R_C}{R_i} = \frac{\beta}{1+\beta} \frac{R_C}{r_e} = \beta \frac{R_C}{r_\pi}$$

Configurazione a Base Comune (BC)



$$v_2 = (i_2 - \alpha i_e) r_o - r_e i_e$$

$$[(i_2 - \alpha i_e) + i_e] R_s = -r_e i_e$$

$$v_2 = i_2 r_o - i_e (r_e + \alpha r_o)$$

$$i_2 R_s = [-r_e - (1 - \alpha) R_s] i_e = -\left(r_e + \frac{R_s}{1 + \beta}\right) i_e$$

Configurazione a Base Comune (BC)

$$v_2 = i_2 r_o + i_2 \frac{R_s}{r_e + \frac{R_s}{1 + \beta}} \alpha r_o$$

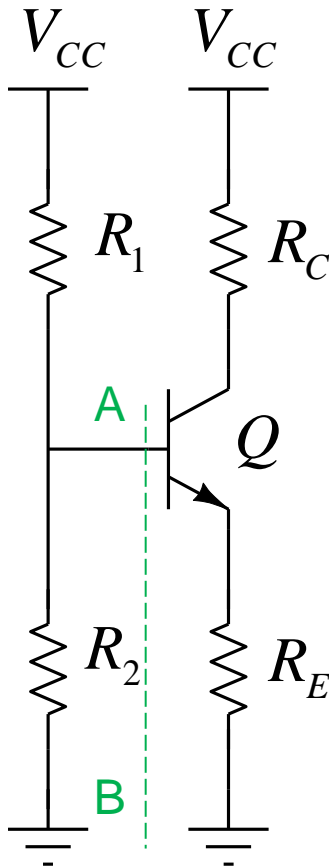
$$R_o' = \frac{v_2}{i_2} = r_o \left(1 + \frac{R_s \frac{\beta}{1 + \beta}}{\frac{r_\pi + R_s}{1 + \beta}} \right) = r_o \left(1 + \frac{\beta R_s}{r_\pi + R_s} \right)$$

Caratteristiche delle Configurazioni Base a BJT

	EC	EC con RE	CC	BC
$A_i = \frac{i_2}{i_1}$	β	β	$-(1 + \beta)$	$-\alpha = -\frac{\beta}{1 + \beta}$
$R_i = \frac{v_1}{i_1}$	r_π	$r_\pi + (1 + \beta)R_E$	$r_\pi + (1 + \beta)R_L$	$r_e = \frac{r_\pi}{1 + \beta}$
$A_v = \frac{v_2}{v_1}$	$-g_m R_C$	$-\frac{g_m R_C}{1 + g_m R_E / \alpha}$	$1 - \frac{r_\pi}{R_i}$	$\alpha \frac{R_C}{r_e} = g_m R_C$
$R_o' = \frac{v_2}{i_2}$	r_o	$r_o \left(1 + \frac{\beta R_E}{R_s + r_\pi + R_E} \right)$	$\frac{r_\pi + R_s}{1 + \beta}$	$r_o \left(1 + \frac{\beta R_s}{r_\pi + R_s} \right)$
R_o	R_C	R_C	$R_o' \parallel R_C$	R_C

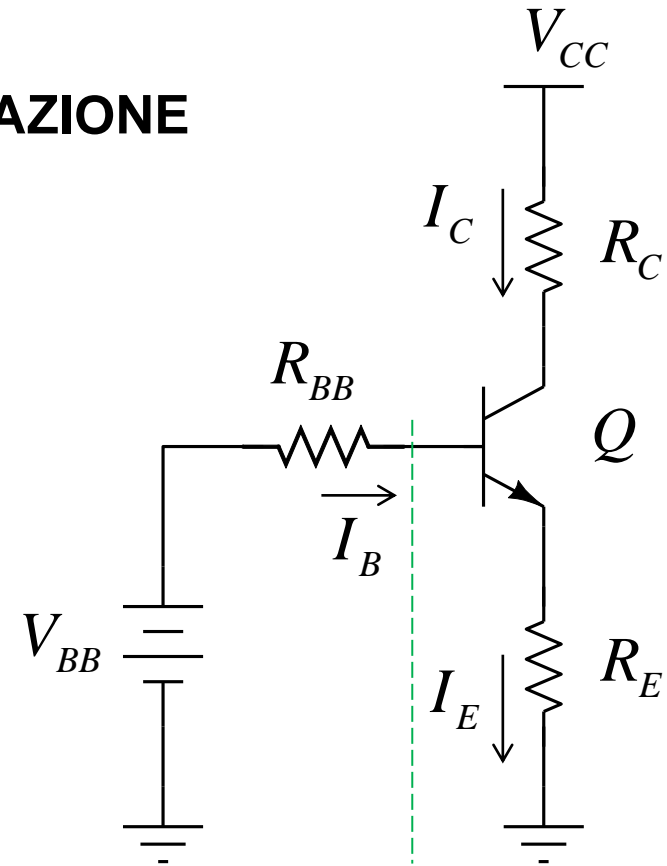
Polarizzazione del BJT Discreto

- La rete di polarizzazione ha il compito di stabilire il punto di lavoro desiderato per il dispositivo
- Deve assicurare l'insensibilità della I_E (I_C) alle variazioni di temperatura e alle tolleranze dei parametri (β)



SINGOLA ALIMENTAZIONE

applicando Thevenin:



Applicando Thevenin tra A e B :

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \qquad R_{BB} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

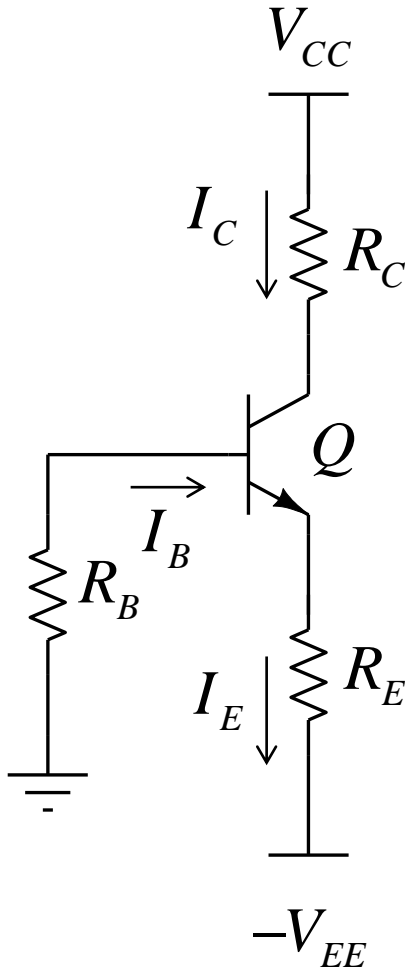
$$V_{BB} = R_{BB} I_B + V_{BE} + R_E I_E = R_{BB} \frac{I_E}{1 + \beta} + V_{BE} + R_E I_E$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + R_{BB} / (1 + \beta)}$$

Per rendere I_E insensibile alle variazioni di T e β :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{BB} \gg V_{BE} \\ R_E \gg \frac{R_{BB}}{(1 + \beta)} \end{array} \right. \qquad I_E \cong \frac{V_{BB}}{R_E}$$

DOPPIA ALIMENTAZIONE



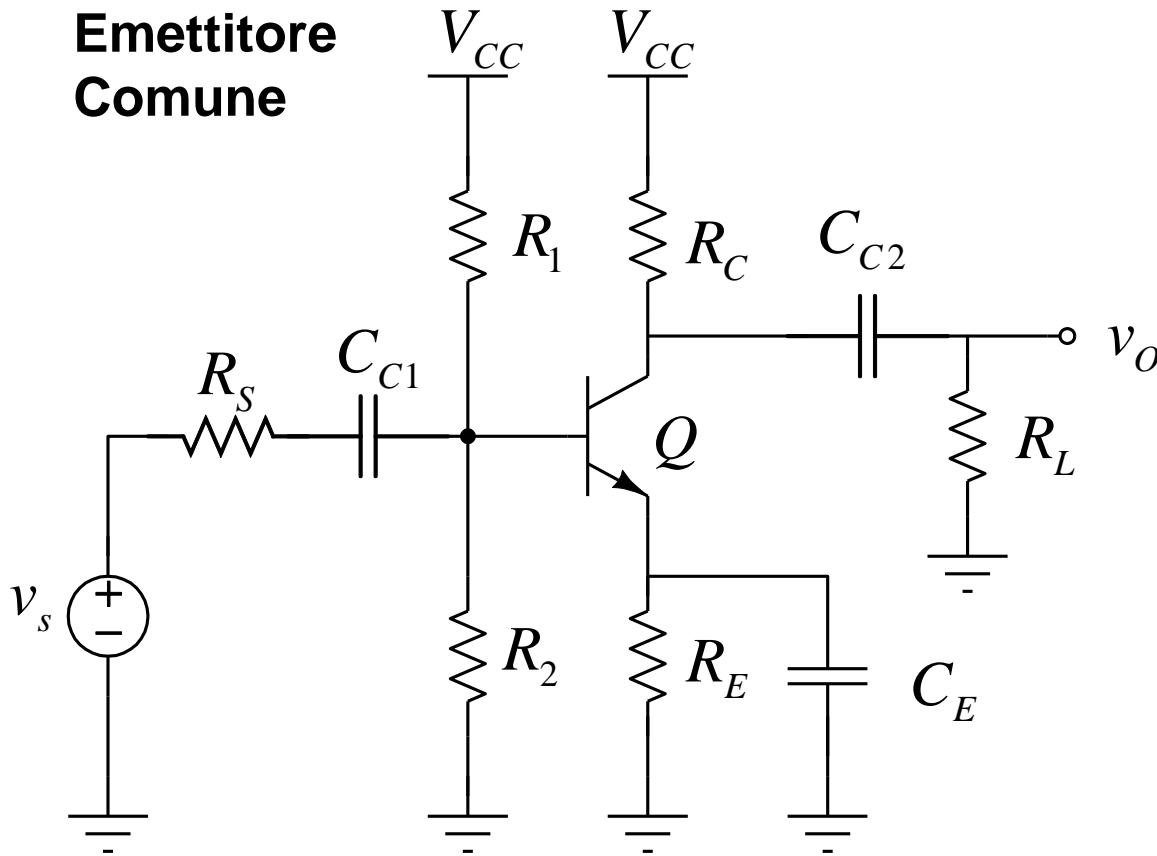
$$V_{EE} = R_B \frac{I_E}{1 + \beta} + V_{BE} + R_E I_E$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + R_B / (1 + \beta)}$$

$$\begin{cases} V_{EE} \gg V_{BE} \\ R_E \gg \frac{R_{BB}}{(1 + \beta)} \end{cases}$$

Amplificatori a Singolo Stadio: Emettitore Comune (EC)

Emettitore Comune



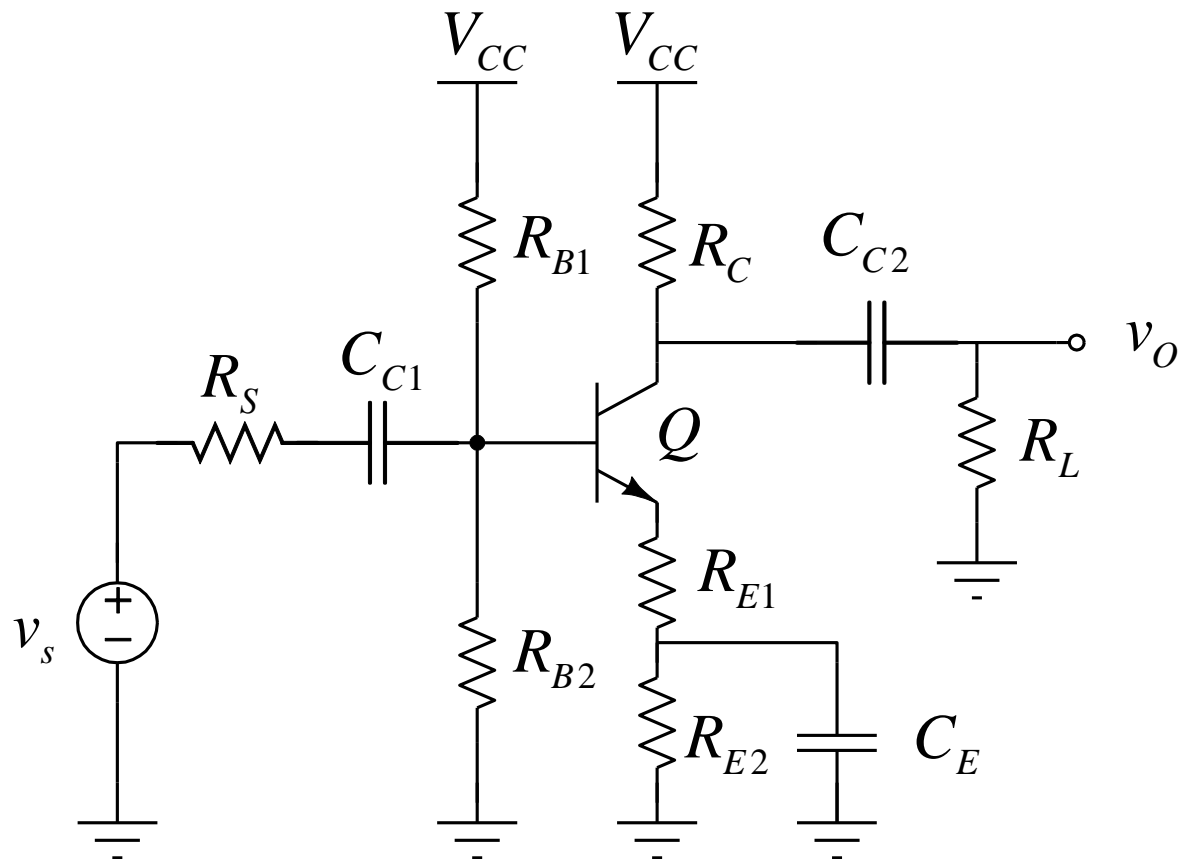
C_{C1} C_{C2} Capacità di disaccoppiamento: bloccano la componente continua cosicché il punto di lavoro non dipende dal generatore di segnale e dal carico

C_E Capacità di bypass: serve a cortocircuitare la R_E cosicché il guadagno risulta più elevato

C_{C1} C_{C2} C_E devono essere sufficientemente elevate cosicché possono essere considerate dei cortocircuiti alle frequenze di interesse (medie frequenze)

Amplificatori a Singolo Stadio: Emettitore Comune (EC) con R_E

Emettitore Comune con resistenza di emettitore non cortocircuitata

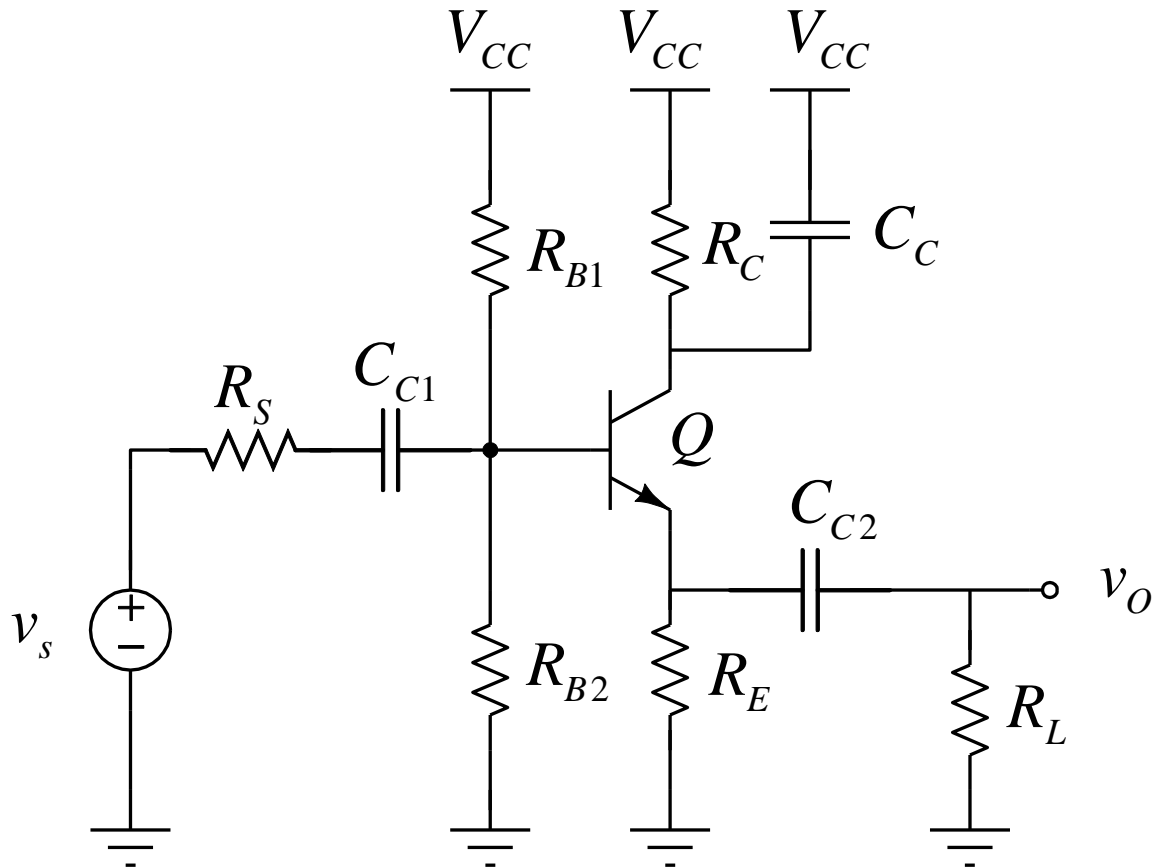


C_{C1} C_{C2} : capacità di disaccoppiamento

C_E : capacità di cortocircuito di R_{E2} all'emettitore

Amplificatori a Singolo Stadio: Collettore Comune (CC)

Collettore Comune (CC) o Emitter Follower (Inseguitore di Emittitore)

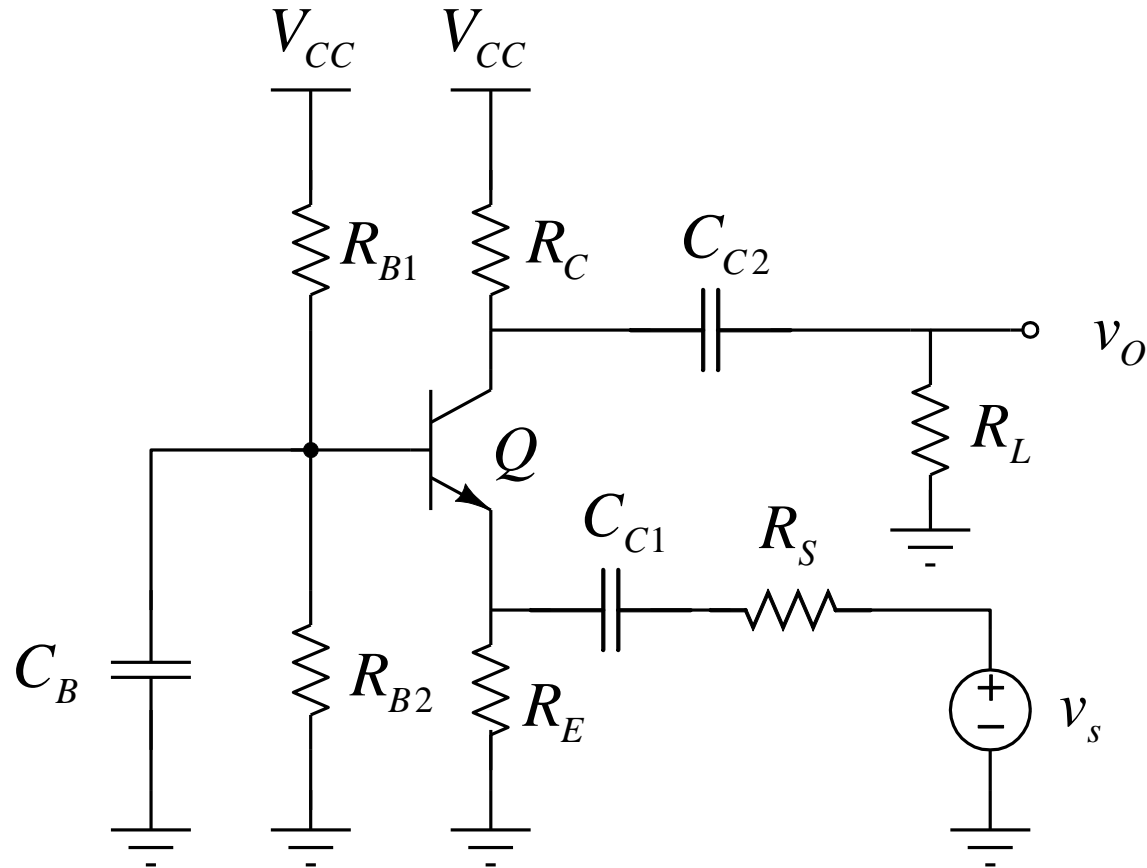


C_{C1} C_{C2} : capacità di disaccoppiamento

C_C : capacità di cortocircuito del collettore

Amplificatori a Singolo Stadio: Base Comune (BC)

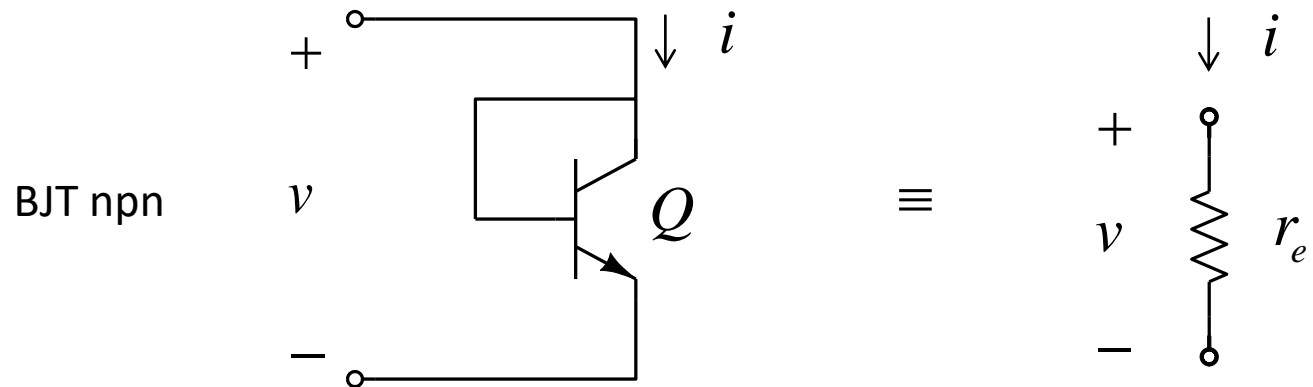
Base Comune (BC)



C_{C1} C_{C2} : capacità di disaccoppiamento

C_B : capacità di cortocircuito della base

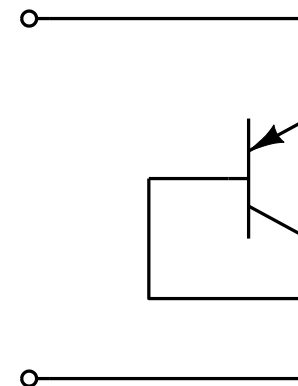
Connessione a diodo



$$v_{CB} = v_{CE} + v_{EB} = 0$$

- Il dispositivo lavora in funzionamento normale
- Alle variazioni è equivalente a r_e

BJT pnp



Specchio di corrente (current mirror)

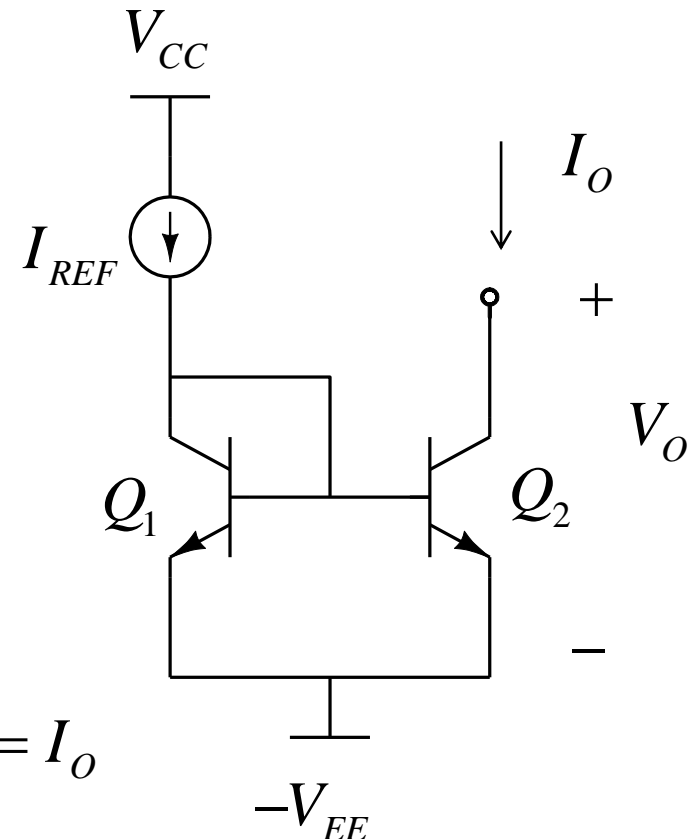
- Realizza un generatore di corrente indipendente quasi ideale, che eroga una corrente proporzionale ad una corrente di riferimento I_{REF}

$$Q_1 \equiv Q_2$$

questa condizione è ben verificata nei circuiti integrati

$$I_{REF} = I_{B1} + I_{B2} + I_{C1}$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_{C1}}{\beta} \quad I_{C1} = I_{C2} = I_O$$

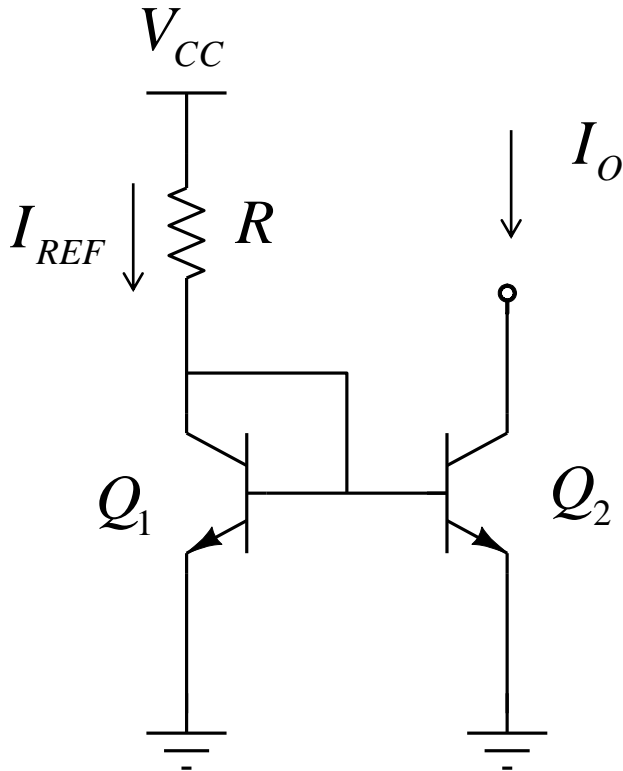


Polarizzazione del BJT nei Circuiti Integrati

da cui:

$$I_{REF} = \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) I_{C_1} = \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) I_o$$

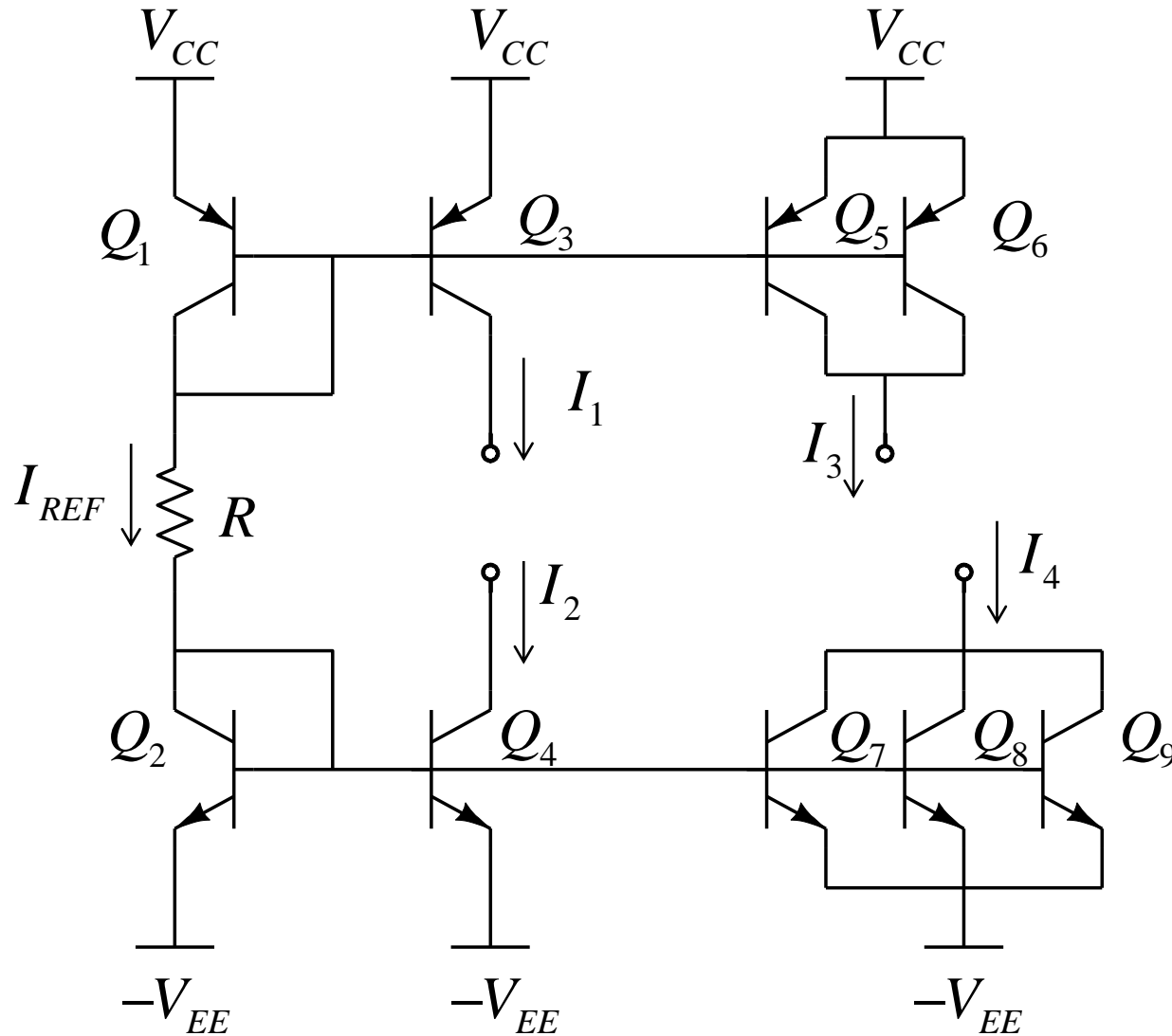
$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{1}{1 + 2/\beta} \cong 1$$



$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \cong \frac{V_{CC}}{R}$$

è indipendente dai transistori

Generazione di Diversi Valori di Corrente



Generazione di Diversi Valori di Corrente

$$I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{EB1} - V_{BE2}}{R} \cong \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R}$$

Se

$$Q_1 \equiv Q_3 \equiv Q_5 \equiv Q_6$$

$$I_1 \cong I_{REF}$$

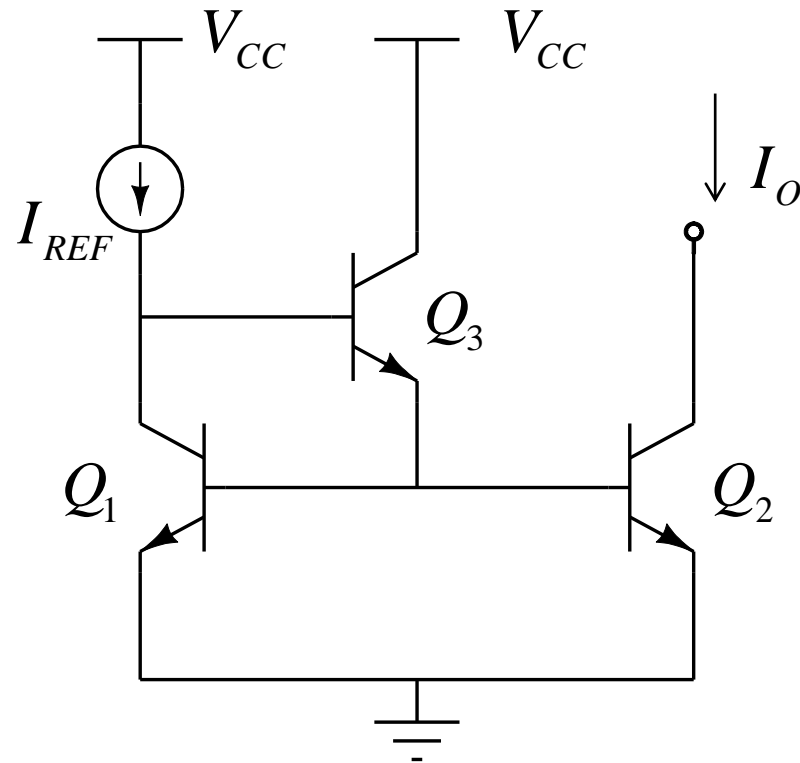
$$I_3 \cong 2I_{REF}$$

$$Q_2 \equiv Q_4 \equiv Q_7 \equiv Q_8 \equiv Q_9$$

$$I_2 \cong I_{REF}$$

$$I_4 \cong 3I_{REF}$$

Sorgente di Corrente Migliorata



$$Q_1 \equiv Q_2 \equiv Q_3$$

$$I_O = \beta I_{B_2} = \beta (I_{E_3} - I_{B_1})$$

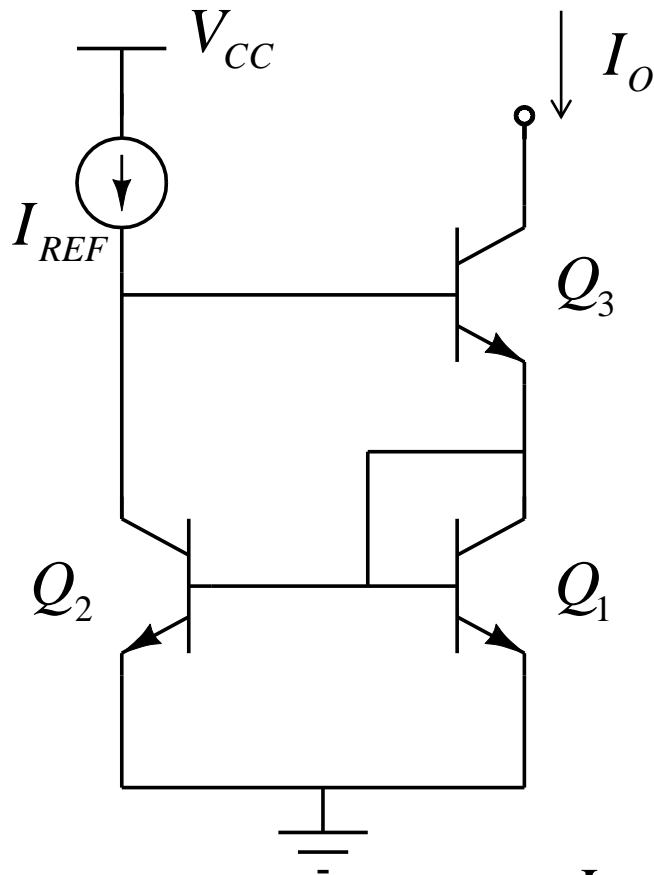
$$= \beta \left[(1 + \beta) I_{B_3} - \frac{I_{C_1}}{\beta} \right]$$

$$= \beta \left[(1 + \beta) (I_{REF} - I_{C_1}) - \frac{I_{C_1}}{\beta} \right]$$

$$I_{C_1} = I_{C_2} = I_O \quad \Rightarrow \quad I_O [\beta(1 + \beta) + 2] = \beta(1 + \beta) I_{REF}$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{\beta(1 + \beta)}{\beta(1 + \beta) + 2} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(1 + \beta)}} \cong \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2}} \cong 1$$

Generatore di Wilson



$$Q_1 \equiv Q_2 \equiv Q_3$$

$$I_O = I_{C_3} = \beta I_{B_3} = \beta (I_{REF} - I_{C_2})$$

$$I_{C_2} = \beta I_{B_2} = \beta (I_{E_3} - I_{C_1} - I_{B_1})$$

$$I_{B_1} = I_{B_2} \quad , \quad I_{C_1} = I_{C_2} \quad \Rightarrow$$

$$I_{C_1} = \beta \left(I_{E_3} - I_{C_1} - \frac{I_{C_1}}{\beta} \right)$$

$$I_{C_1} (2 + \beta) = \beta I_{E_3}$$

$$I_{C_1} = \frac{\beta}{2 + \beta} \frac{I_O}{\beta} (1 + \beta)$$

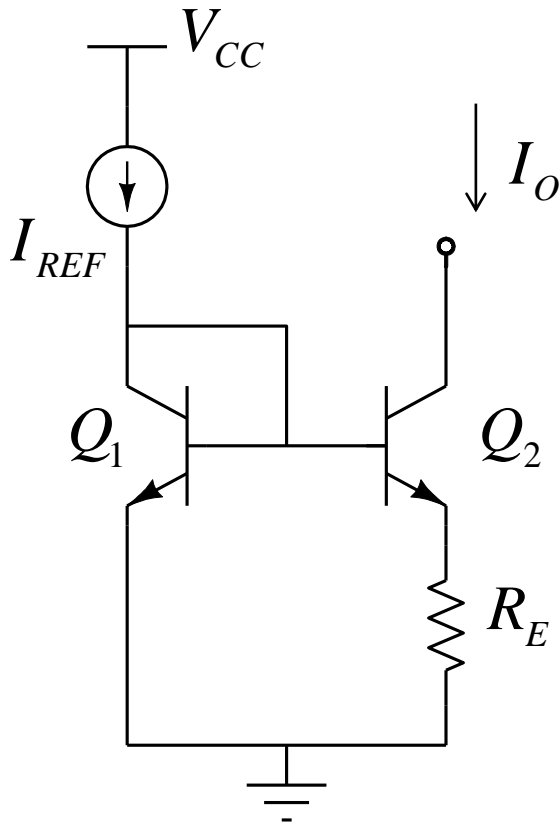
$$I_o = \beta \left(I_{REF} - \frac{1 + \beta}{2 + \beta} I_o \right)$$

$$I_o \left(1 + \frac{\beta(1 + \beta)}{2 + \beta} \right) = \beta I_{REF}$$

$$I_o = \frac{\beta}{1 + \frac{\beta(1 + \beta)}{2 + \beta}} I_{REF} = \frac{\beta(2 + \beta)}{2 + \beta + \beta + \beta^2} I_{REF} = \frac{\beta(2 + \beta)}{2 + \beta(2 + \beta)} I_{REF}$$

$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(2 + \beta)}} \cong 1$$

Generatore di Widlar



$$V_{BE1} = V_T \ln \left(\frac{I_{REF}}{I_S} \right)$$

$$V_{BE2} = V_T \ln \left(\frac{I_O}{I_S} \right)$$

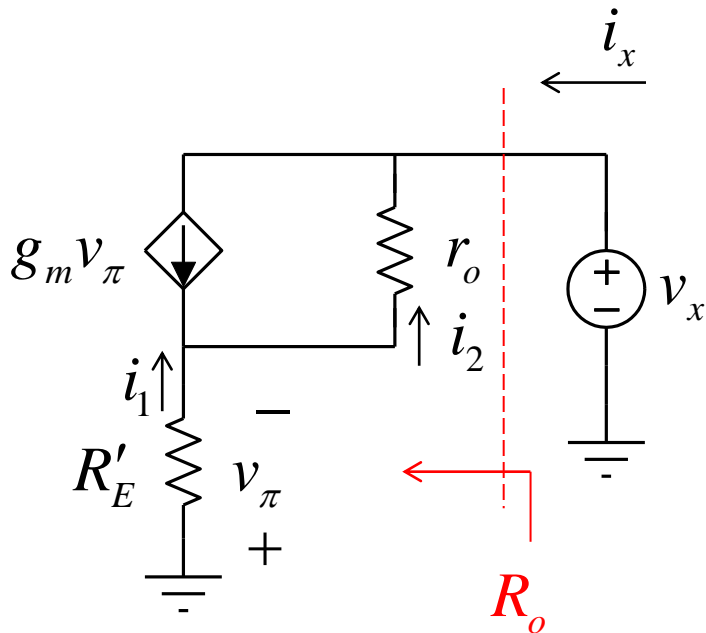
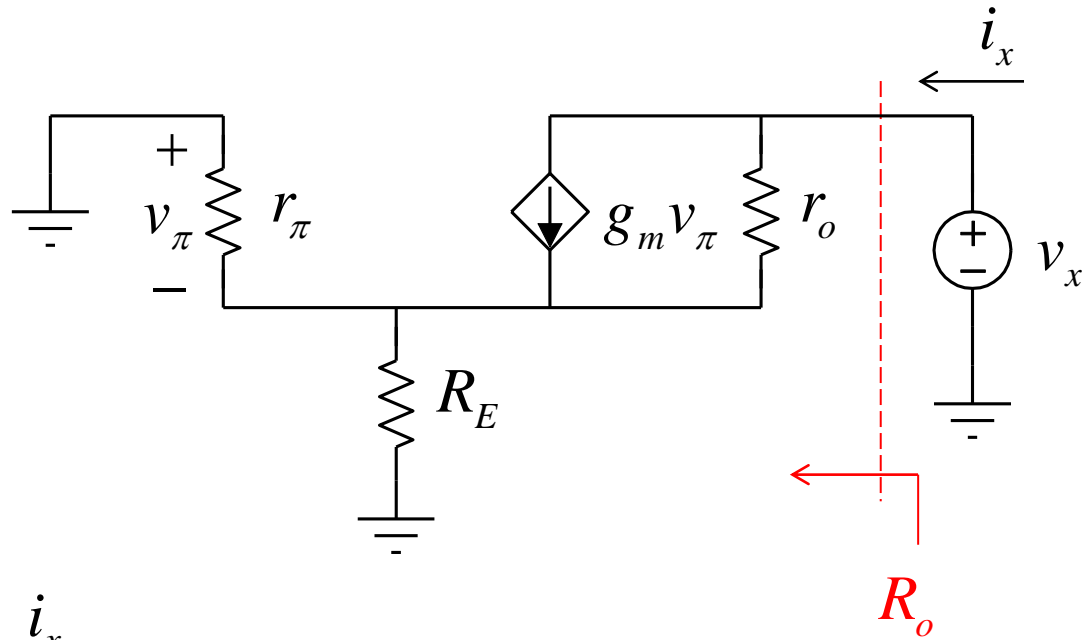
$$\begin{cases} V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln \left(\frac{I_{REF}}{I_O} \right) \\ V_{BE1} \cong V_{BE2} + R_E I_O \end{cases}$$

$$I_O R_E = V_T \ln \left(\frac{I_{REF}}{I_O} \right)$$

- Consente di ottenere una $I_O \ll I_{REF}$

Generatore di Widlar

- Resistenza di uscita



$$R'_E = r_\pi \parallel R_E$$

Generatore di Widlar

$$i_1 = \frac{v_\pi}{R'_E} \quad i_2 = g_m v_\pi + i_1 = \left(g_m + \frac{1}{R'_E} \right) v_\pi$$

$$\begin{cases} i_x = g_m v_\pi - i_2 = g_m v_\pi - \left(g_m + \frac{1}{R'_E} \right) v_\pi = -\frac{v_\pi}{R'_E} \\ v_x = -r_o i_2 - v_\pi = -\left(g_m + \frac{1}{R'_E} \right) v_\pi r_o - v_\pi \end{cases}$$

$$R_o = \frac{v_x}{i_x} = \frac{1 + \left(g_m + \frac{1}{R'_E} \right) r_o}{\frac{1}{R'_E}} = R'_E + (1 + g_m R'_E) r_o$$

$$R_o \cong (1 + g_m R'_E) r_o$$

- La resistenza di uscita è molto alta, il generatore è quasi ideale