

Transistore bipolare a giunzione (BJT)

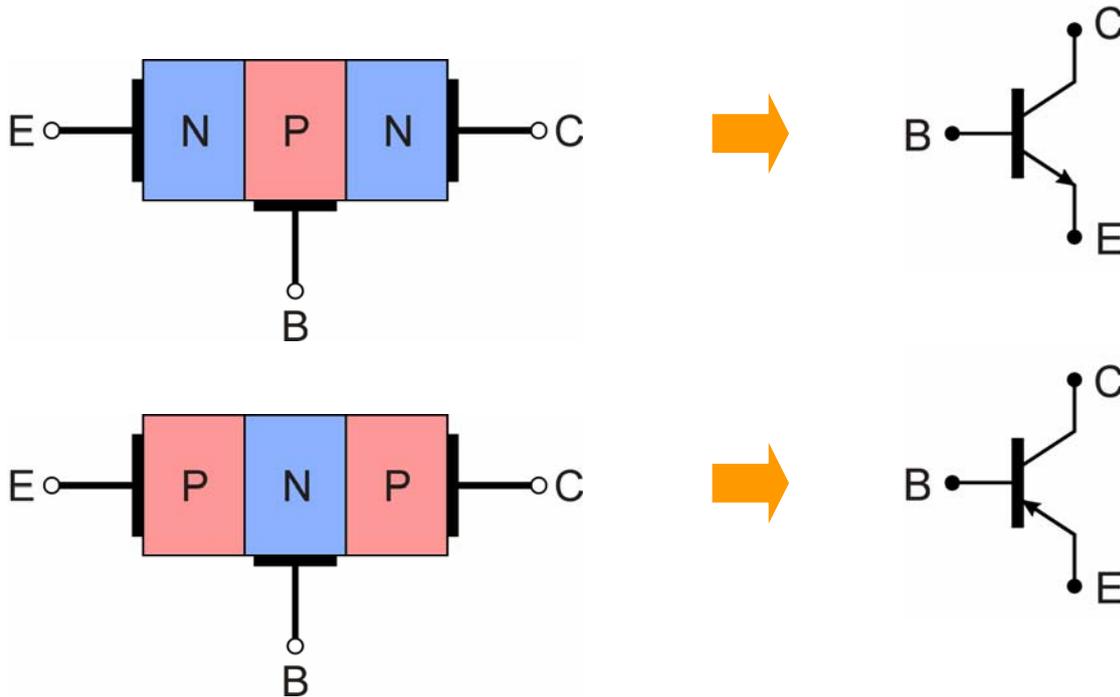
www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 30-4-2018)

Transistore bipolare a giunzione (BJT)

- Il **transistore bipolare a giunzione** è un dispositivo costituito da un cristallo semiconduttore suddiviso in tre regioni
 - ◆ Il dispositivo è detto *bipolare* perché il suo funzionamento si basa su portatori di carica di entrambe le polarità, mentre sono detti *unipolari* i dispositivi nei quali la corrente è dovuta a portatori di carica di un solo tipo
- Nelle due regioni alle estremità opposte del cristallo, dette **emettitore** (E) e **collettore** (C), vengono introdotti droganti dello stesso tipo
- Nella regione centrale, detta **base** (B), vengono introdotti droganti del tipo opposto
- In questo modo si formano due giunzioni pn
 - ◆ base-emettitore (BE)
 - ◆ base-collettore (BC)

Transistori npn e pnp

- La struttura può essere realizzata in due modi, che corrispondono ai transistori di tipo **npn** e di tipo **pnp**

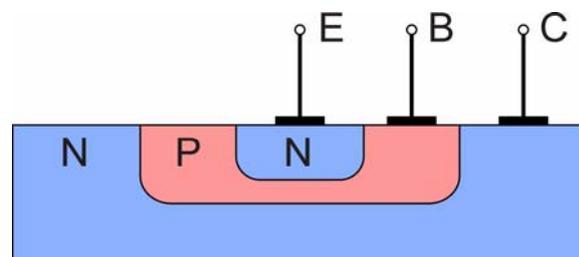


3

Note

- In seguito si farà riferimento prevalentemente ai transistori di tipo npn, dato che questa è la configurazione utilizzata più frequentemente
- I risultati relativi ai transistori npn possono essere facilmente estesi ai transistori pnp modificando opportunamente i versi di riferimento delle tensioni e delle correnti
- Nella pratica i transistori non hanno una struttura simmetrica come indicato negli schemi di principio
- Attualmente i transistori vengono realizzati prevalentemente in forma planare

Struttura semplificata di un transistore planare



4

Regioni di funzionamento

- In relazione ai possibili stati di conduzione delle due giunzioni si possono distinguere quattro regioni di funzionamento

Polarizzazioni delle giunzioni		Regione di funzionamento
BE	BC	
Inversa	Inversa	Interdizione
Diretta	Inversa	Normale
Diretta	Diretta	Saturazione
Inversa	Diretta	Inversa

- La regione inversa, nella quale i ruoli dell'emettitore e del collettore sono scambiati, nella pratica non viene mai utilizzata

5

Principio di funzionamento

- Si assegnano versi entranti alle correnti di collettore e di base e verso uscente alla corrente di emettitore
- Si considera il dispositivo polarizzato nella regione normale
 - ◆ tra i terminali B ed E viene applicata una tensione $V_{BE} > 0$
 - ◆ tra i terminali B e C viene applicata una tensione $V_{BC} < 0$
- Se lo spessore della regione di base è elevato non si hanno interazioni tra le due giunzioni e il dispositivo si comporta come una coppia di diodi
- In particolare, gli elettroni iniettati dall'emettitore nella regione di base si ricombinano con le lacune, contribuendo alla corrente di base, quindi in prossimità della giunzione BC la concentrazione di elettroni è praticamente nulla
- In queste condizioni, dato che la corrente attraverso la giunzione BC, polarizzata in inversa, è trascurabile, si ha

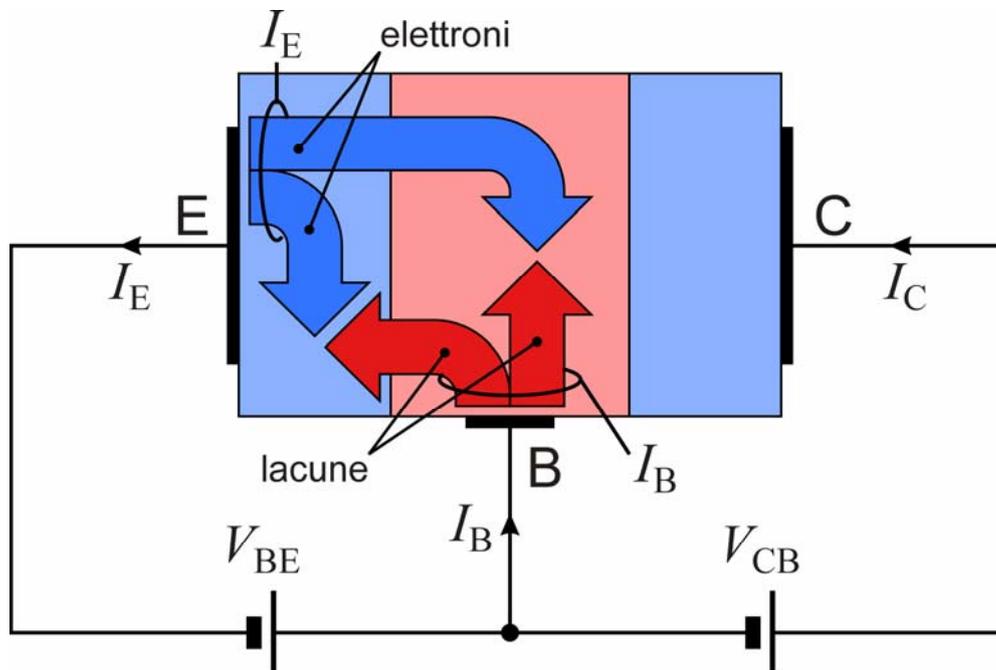
$$I_E \approx I_B$$

$$I_C \approx 0$$

6

Principio di funzionamento

Base "larga" → nessuna interazione tra le giunzioni BE e BC



7

Principio di funzionamento

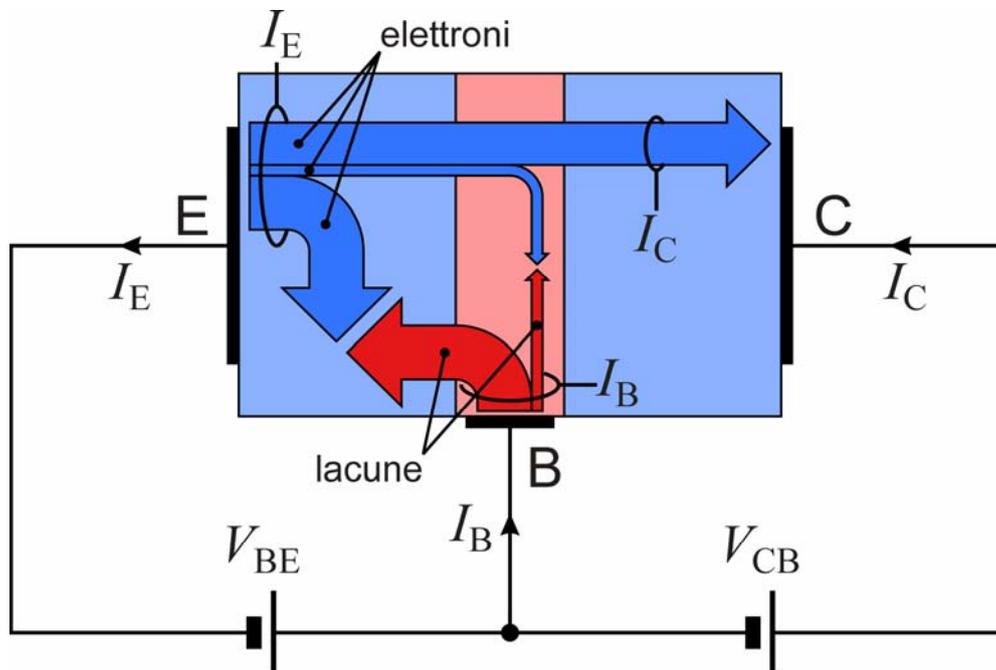
- Riducendo lo spessore della regione di base a valori sufficientemente piccoli (frazioni di μm) aumenta la probabilità che gli elettroni iniettati nella regione di base riescano a portarsi in prossimità della giunzione BC prima di ricombinarsi
- Dato che la giunzione BC è polarizzata in inversa, in prossimità della giunzione è presente un campo elettrico con verso tale da spingere gli elettroni presenti nella regione p (cariche minoritarie) ad attraversare la giunzione
- ➔ Al diminuire dello spessore della regione di base, una parte sempre più consistente degli elettroni iniettati nella regione di base viene attirata dal collettore, dando origine ad una corrente di collettore progressivamente crescente, mentre si riduce la corrente di base (**effetto transistor**)

8

Principio di funzionamento

Base "stretta" → effetto transistor

$$N_E \approx N_B \rightarrow I_B \approx I_C$$



9

Principio di funzionamento

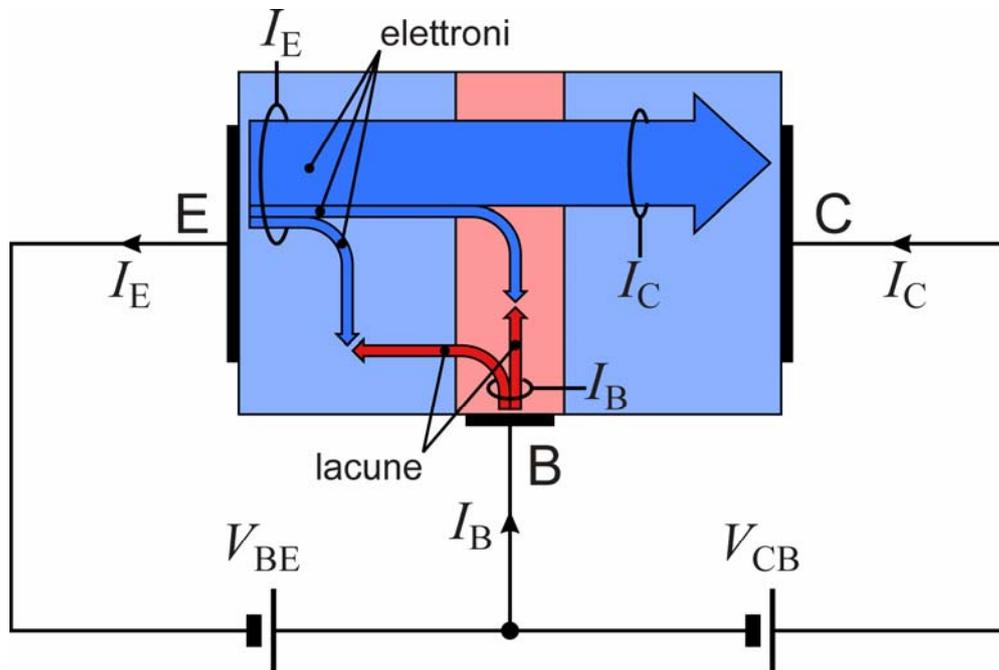
- Se lo spessore della regione di base è molto piccolo, la maggior parte degli elettroni iniettati dall'emettitore raggiunge il collettore
- In queste condizioni, la corrente di base è dovuta prevalentemente alle lacune iniettate dalla base verso l'emettitore
- Se le concentrazioni dei droganti nelle regioni di emettitore, N_E , e di base, N_B , sono uguali anche le correnti dovute agli elettroni e alle lacune che attraversano la giunzione BE sono uguali
 - ➔ La corrente di base e la corrente di collettore sono dello stesso ordine di grandezza
- Se $N_E \gg N_B$, le lacune iniettate dalla base danno un contributo molto piccolo alla corrente attraverso la giunzione BE
 - ➔ La corrente di collettore assume valori prossimi a quelli della corrente di emettitore
 - ➔ La corrente di base è molto piccola rispetto alla corrente di collettore

10

Principio di funzionamento

Base "stretta" → effetto transistor

$N_E \gg N_B \rightarrow I_B \ll I_C \quad I_C \approx I_E$



11

Principio di funzionamento

- Nelle realizzazioni pratiche
 - ♦ la regione di base ha uno spessore molto piccolo ($< 1 \mu\text{m}$)
 - ♦ la regione di emettitore è fortemente drogata mentre la regione di base è debolmente drogata, inoltre, per motivi che saranno chiariti in seguito (effetto Early), la regione di collettore è drogata più debolmente della base

- Nella regione normale, trascurando il contributo della corrente di saturazione della giunzione BC, si ha

$$I_C = \alpha_F I_E \quad \alpha_F = \text{guadagno di corrente diretto a base comune} \\ \text{(valori tipici 0.99-0.995)}$$

- Se si invertono i ruoli dell'emettitore e del collettore si ha ugualmente l'effetto transistor

$$I_E = \alpha_R I_C \quad \alpha_R = \text{guadagno di corrente inverso a base comune}$$

però, dato che il dispositivo è fortemente asimmetrico, il valore di α_R risulta molto minore di α_F

12

Modello di Ebers e Moll

- In condizioni generali, le relazioni tra le tensioni delle giunzioni e le correnti sono espresse dalle **equazioni di Ebers e Moll**

$$I_E = I_F - \alpha_R I_R$$

$$I_C = \alpha_F I_F - I_R$$

dove

$$I_F = I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right)$$

$$I_R = I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

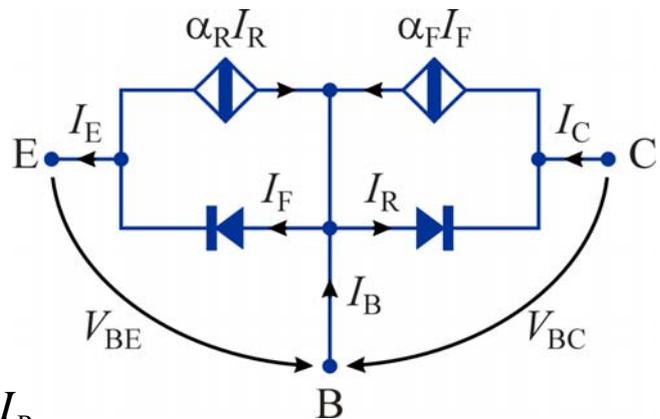
- Quindi la corrente di base è

$$I_B = I_E - I_C = (1 - \alpha_F) I_F + (1 - \alpha_R) I_R$$

- I parametri α_F , α_R , I_{ES} e I_{CS} sono legati dalla relazione

$$\alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS} = I_S \quad (I_S = \text{corrente di saturazione})$$

- Queste equazioni possono essere interpretate mediante un circuito equivalente formato da due diodi e due generatori dipendenti



13

Modello di Ebers e Moll

- La corrente di base è data dalla somma di un termine dipendente da V_{BE} e uno dipendente da V_{BC}

$$I_B = I_{BE} + I_{BC}$$

- Le espressioni di questi termini si possono porre nella forma

$$I_{BE} = (1 - \alpha_F) I_F = \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F} I_S \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) = \frac{I_S}{\beta_F} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right)$$

$$I_{BC} = (1 - \alpha_R) I_R = \frac{1 - \alpha_R}{\alpha_R} I_S \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) = \frac{I_S}{\beta_R} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

dove

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \quad \text{guadagno di corrente diretto a emettitore comune}$$

(valori tipici dell'ordine di 10^1 - 10^2)

$$\beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R} \quad \text{guadagno di corrente inverso a emettitore comune}$$

(valori tipici dell'ordine di 10^{-1} - 10^0)

14

Modello di Ebers e Moll

- Isolando i termini I_{BE} e I_{BC} nelle espressioni di I_E e I_C si ottiene

$$I_E = (1 - \alpha_F)I_F + \alpha_F I_F - \alpha_R I_R = I_{BE} + I_{CE}$$

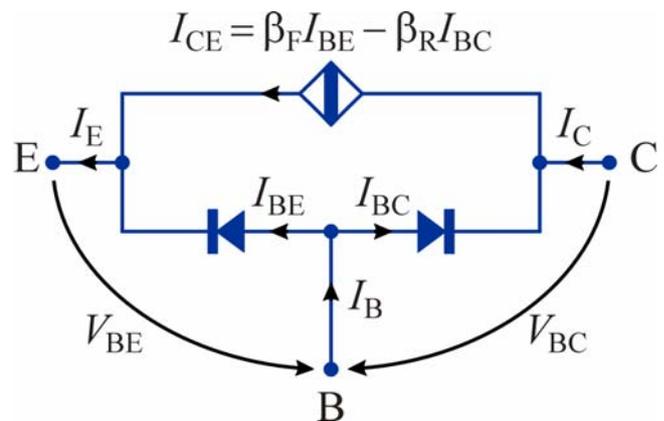
$$I_C = -(1 - \alpha_R)I_R + \alpha_F I_F - \alpha_R I_R = -I_{BC} + I_{CE}$$

dove

$$I_{CE} = \alpha_F I_F - \alpha_R I_R = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_{BE} - \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R} I_{BC} = \beta_F I_{BE} - \beta_R I_{BC} =$$

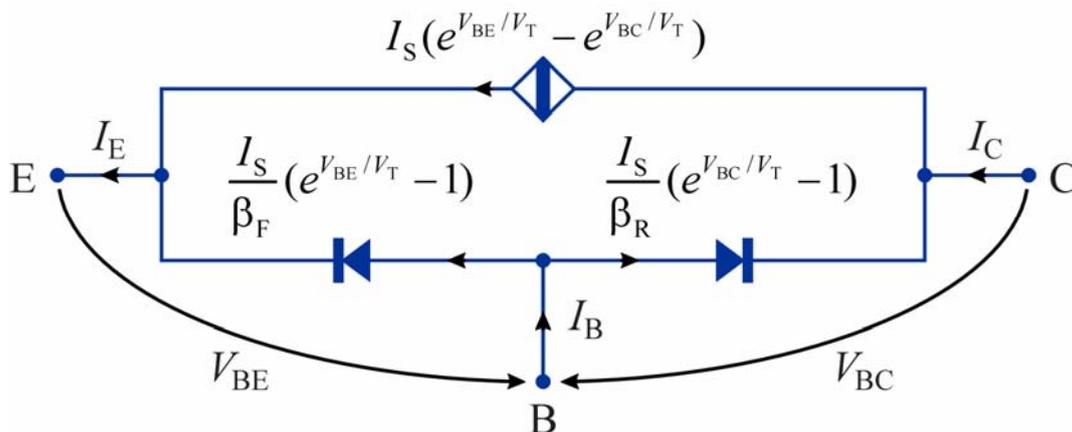
$$= I_S (e^{V_{BE}/V_T} - e^{V_{BC}/V_T})$$

- Queste equazioni possono essere interpretate mediante un circuito equivalente semplificato nel quale compare un unico generatore dipendente



15

Modello di Ebers e Moll



$$I_E = I_S (e^{V_{BE}/V_T} - e^{V_{BC}/V_T}) + \frac{I_S}{\beta_F} (e^{V_{BE}/V_T} - 1)$$

$$I_C = I_S (e^{V_{BE}/V_T} - e^{V_{BC}/V_T}) - \frac{I_S}{\beta_R} (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + \frac{I_S}{\beta_R} (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

16

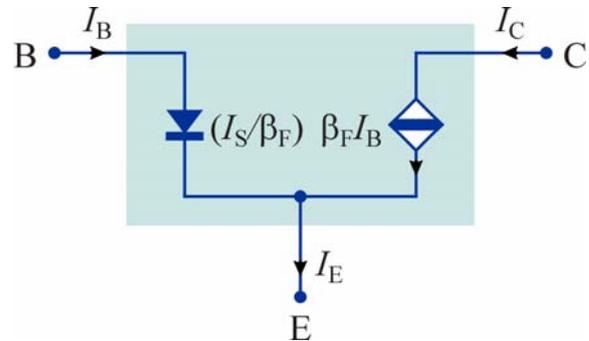
Regione normale

- Nella regione normale, dato che la giunzione BC è interdotta, le espressioni delle correnti si riducono a

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_C = \beta_F I_B = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_E = (\beta_F + 1) I_B = \frac{\beta_F + 1}{\beta_F} I_C = \frac{I_S}{\alpha_F} e^{V_{BE}/V_T}$$



- Queste equazioni possono essere interpretate mediante un circuito equivalente formato da un diodo con corrente di saturazione I_S/β e un generatore dipendente pilotato dalla corrente I_B (o, in alternativa, un generatore dipendente non lineare pilotato dalla tensione V_{BE})

17

Saturazione

- Le relazioni precedenti indicano che nella regione normale la corrente di collettore è determinata unicamente dalla corrente di base (o in modo equivalente dalla tensione V_{BE}) e non dipende dalla tensione V_{BC}
- Quando la giunzione BC entra in conduzione si ha una riduzione della corrente di collettore, che tende ad annullarsi, ed un incremento della corrente di base

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R} \right) e^{V_{BC}/V_T}$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} e^{V_{BE}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_R} e^{V_{BC}/V_T}$$

- ➔ Il rapporto tra la corrente di collettore e la corrente di base, che nella regione normale vale β_F , nella regione di saturazione è minore di β_F

18

Saturazione

- Per definire convenzionalmente il confine tra la regione di saturazione si può utilizzare il valore del rapporto tra le correnti I_C e I_B

$$\frac{I_C}{I_B} \cong \frac{I_S e^{V_{BE}/V_T} - I_S \left(1 + \frac{1}{\beta_R}\right) e^{V_{BC}/V_T}}{\frac{I_S}{\beta_F} e^{V_{BE}/V_T} - \frac{I_S}{\beta_R} e^{V_{BC}/V_T}} = \frac{e^{V_{CE}/V_T} - 1 - \frac{1}{\beta_R}}{\frac{e^{V_{CE}/V_T}}{\beta_F} - \frac{1}{\beta_R}} \quad \left(\frac{e^{V_{BE}/V_T}}{e^{V_{BC}/V_T}} = e^{V_{CE}/V_T} \right)$$

- Si assume che il dispositivo sia in saturazione quando il rapporto diviene inferiore ad una frazione prefissata, σ , di β_F
- Questo comporta che la tensione V_{CE} scenda al di sotto di un valore V_{CEsat} definito dalla relazione

$$\frac{I_C}{I_B} = \sigma \beta_F \Rightarrow V_{CE} = V_{CEsat} = V_T \ln \left[\frac{\sigma \beta_F + \beta_R + 1}{(1 - \sigma) \beta_R} \right]$$

- Per $\sigma = 0.9$ con i valori tipici di β_F e β_R si ottengono valori di V_{CEsat} tra 0.15 e 0.3 V

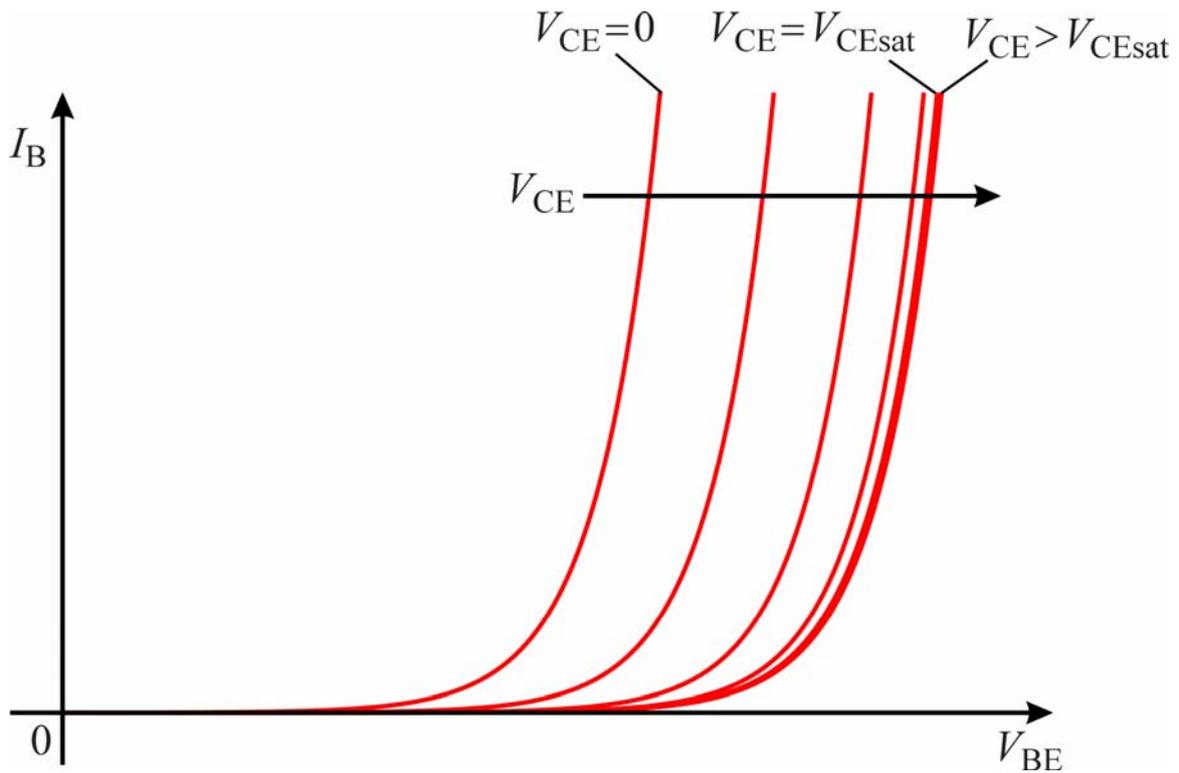
19

Curve caratteristiche

- Normalmente le caratteristiche dei transistori sono rappresentate mediante famiglie di curve che riportano gli andamenti di
 - ◆ I_B in funzione di V_{BE} con V_{CE} trattato come parametro (**caratteristiche di ingresso ad emettitore comune**)
 - ◆ I_C in funzione di V_{CE} con I_B trattato come parametro (**caratteristiche di uscita ad emettitore comune**)
- Caratteristiche di ingresso:
 - ◆ Nella regione normale sono praticamente indipendenti da V_{CE} e sono simili alla curva caratteristica di un diodo
 - ◆ In saturazione si ha un forte aumento di I_B al diminuire di V_{CE}
- Caratteristiche di uscita:
 - ◆ Nella regione normale sono rette orizzontali
 - ◆ Nella regione di saturazione I_C diminuisce rapidamente, mentre si hanno piccole variazioni di V_{CE}

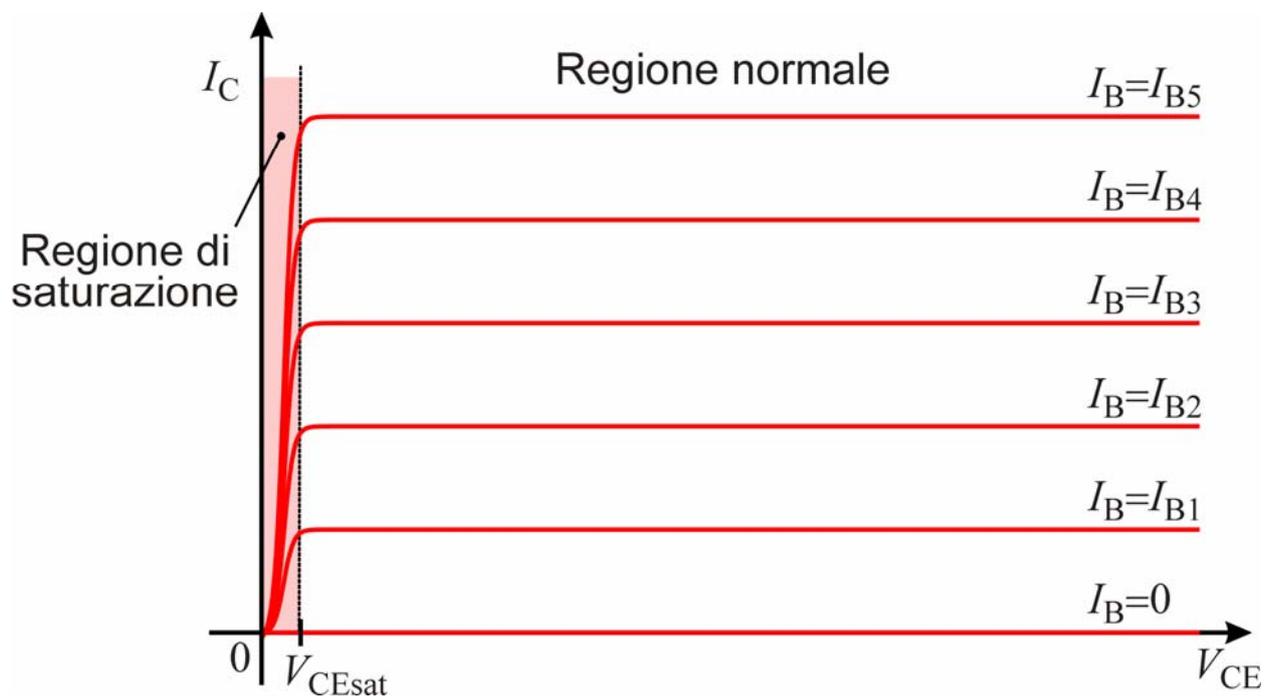
20

Caratteristiche di ingresso



21

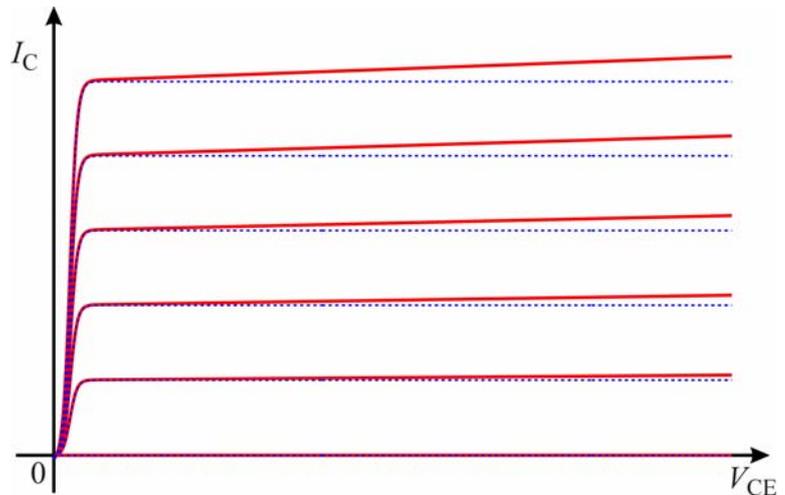
Caratteristiche di uscita



22

Effetto Early

- Nella regione normale le curve caratteristiche di un transistor reale non sono esattamente orizzontali, come previsto dal modello di Ebers e Moll, ma I_C aumenta con V_{CE}
- Questo è dovuto al fatto che all'aumentare di V_{CE} (e quindi di V_{CB}) si ha un allargamento della regione svuotata in corrispondenza della giunzione BC e quindi una riduzione della larghezza efficace della regione di base (**effetto Early**)
- L'entità dell'effetto può essere ridotta rendendo il collettore più debolmente drogato della base
(In questo modo la regione svuotata si estende prevalentemente dal lato del collettore)

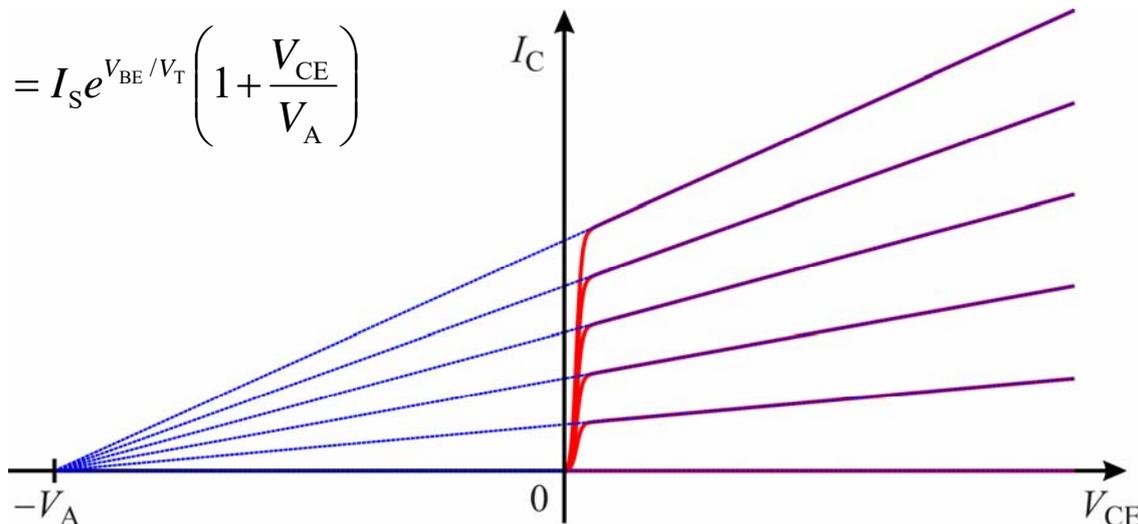


23

Effetto Early

- Nella regione normale le caratteristiche non sono parallele, ma, se prolungate, convergono in un punto sull'asse delle ascisse corrispondente a $V_{CE} = -V_A$ ($V_A =$ **tensione di Early**)
- L'effetto Early può essere rappresentato modificando, nella regione normale, l'espressione di I_C nel modo seguente

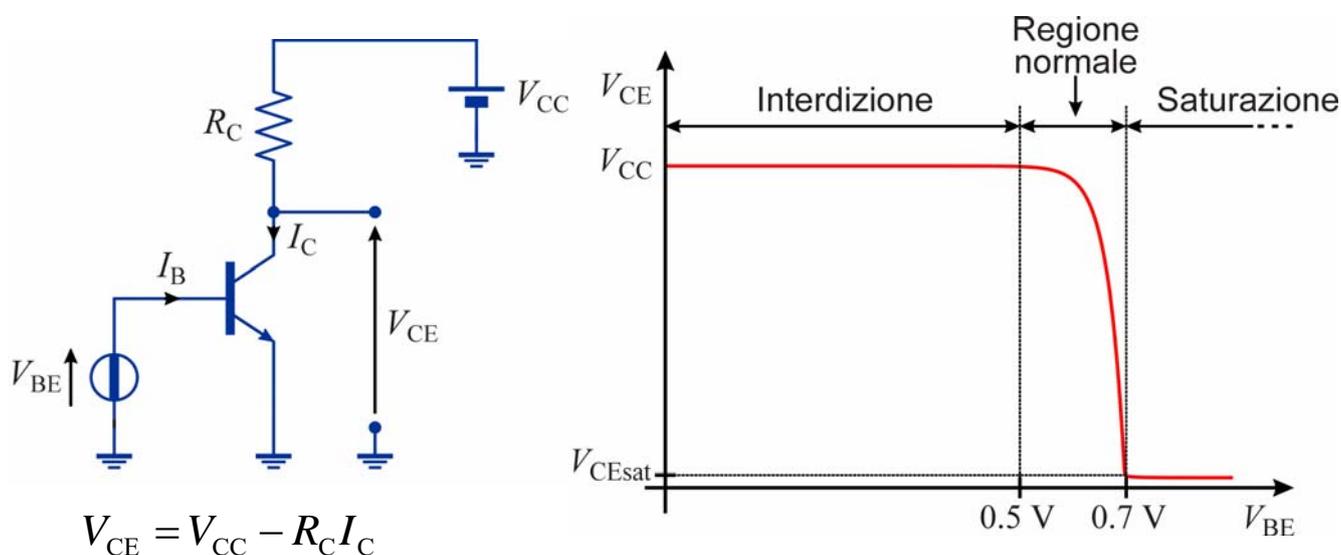
$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$



24

Impiego del transistor come amplificatore

- Collegando una resistenza al collettore si ottiene una tensione V_{CE} dipendente dalla tensione V_{BE}

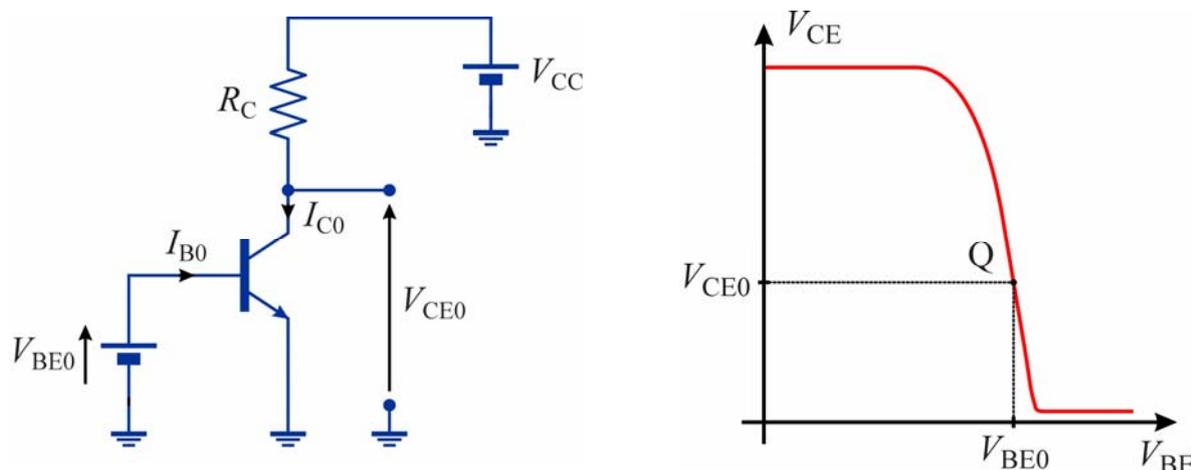


- Nella regione normale la caratteristica di trasferimento $V_{BE}-V_{CE}$ contiene un tratto con andamento approssimativamente lineare

25

Impiego del transistor come amplificatore

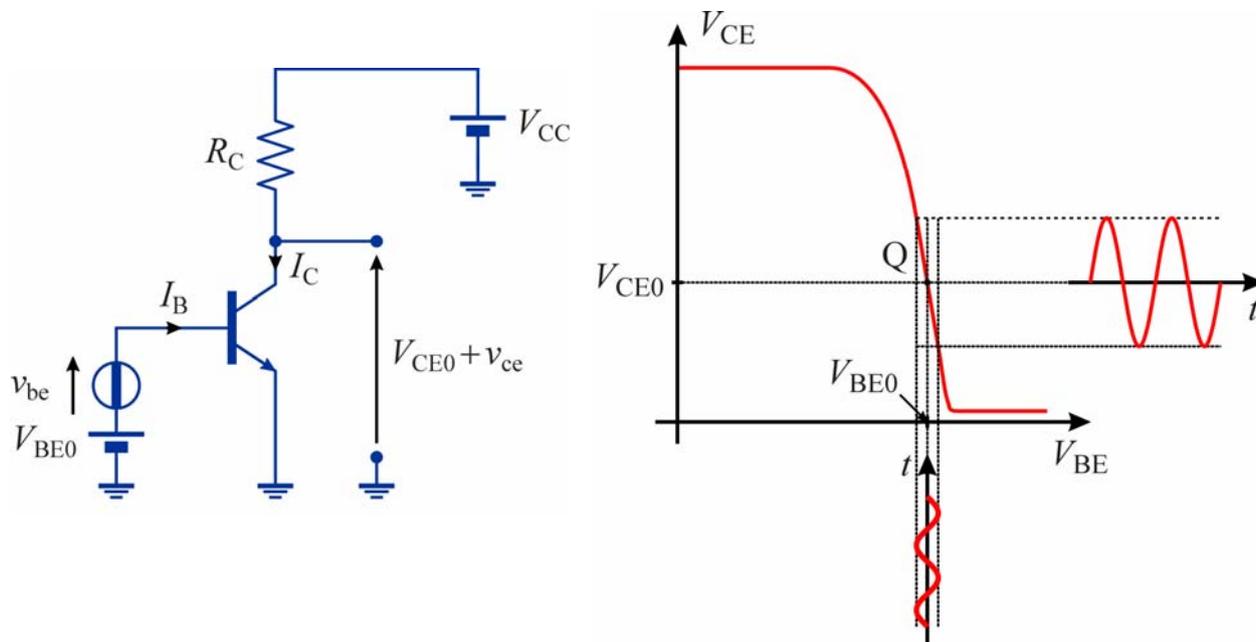
- E' possibile ottenere un amplificatore lineare polarizzando il transistor mediante un generatore costante V_{BE0}
- Il punto Q sulla caratteristica è detto **punto di polarizzazione** o **punto di riposo**



26

Impiego del transistor come amplificatore

- Se il punto Q si trova nel tratto lineare, sovrapponendo a V_{BE0} un piccolo segnale $v_{be}(t)$, si ottiene in uscita la tensione $V_{CE0} + v_{ce}(t)$, con $v_{ce}(t)$ praticamente proporzionale a $v_{be}(t)$



27

Analisi per piccoli segnali

- La relazione tra $v_{be}(t)$ e $v_{ce}(t)$, può essere ottenuta linearizzando le equazioni del transistor nell'intorno del punto di riposo Q

$$I_B(V_{BE0} + v_{be}) \approx I_B(V_{BE0}) + \left. \frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} \right|_0 v_{be}$$

$$I_C(V_{BE0} + v_{be}, V_{CE0} + v_{ce}) \approx I_C(V_{BE0}, V_{CE0}) + \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right|_0 v_{be} + \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_0 v_{ce}$$

- Quindi si ottiene

$$i_b = \left. \frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} \right|_0 v_{be} = g_{be} v_{be}$$

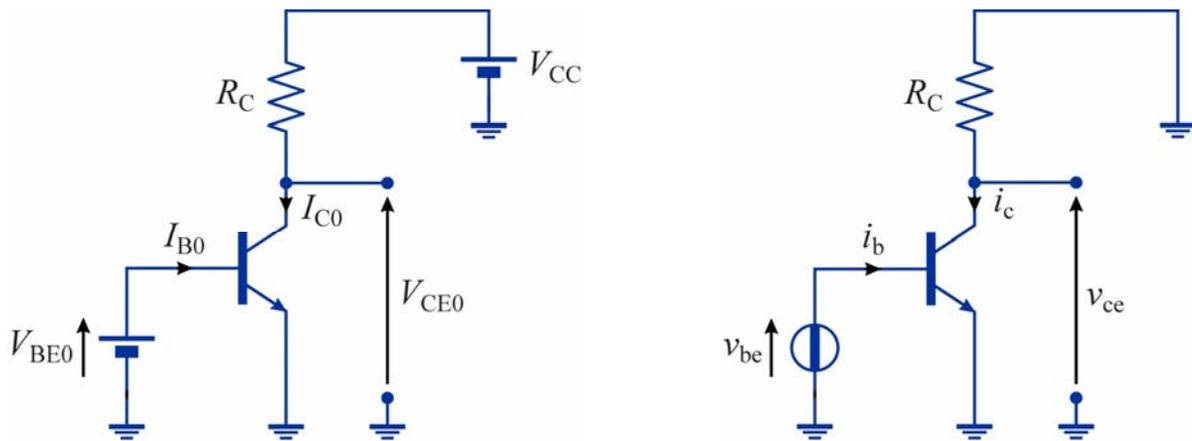
0 indica che le derivate sono calcolate nel punto di riposo

$$i_c = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right|_0 v_{be} + \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_0 v_{ce} = g_m v_{be} + g_{ce} v_{ce}$$

28

Analisi per piccoli segnali

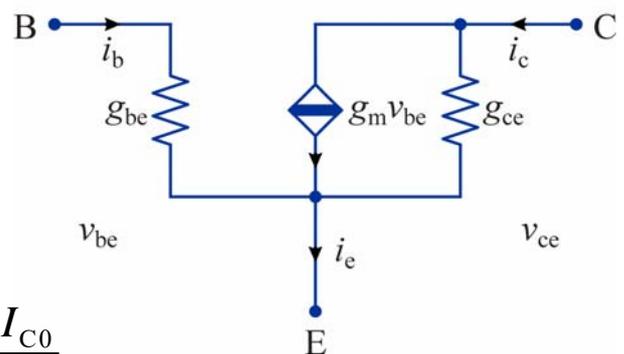
- L'analisi del circuito può essere svolta in tre fasi
 - ◆ Determinazione del punto di riposo, in assenza del segnale $v_{be}(t)$
 - ◆ Linearizzazione nell'intorno del punto di riposo
 - ◆ Analisi del circuito linearizzato, in cui è presente il solo generatore $v_{be}(t)$ e i generatori di polarizzazione sono azzerati (**circuito equivalente per piccoli segnali**)



29

Modello per piccoli segnali

- Le equazioni linearizzate possono essere interpretate mediante il seguente circuito equivalente
- Le espressioni dei parametri sono



$$g_m = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right|_0 = \frac{I_S}{V_T} e^{V_{BE0}/V_T} \left(1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = \frac{I_{C0}}{V_T}$$

$$g_{ce} = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_0 = \frac{I_S}{V_A} e^{V_{BE0}/V_T} = \frac{I_{C0}}{V_A + V_{CE0}}$$

$$g_{be} = \left. \frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} \right|_0 = \frac{I_S}{\beta_F V_T} e^{V_{BE0}/V_T} = \frac{I_{C0}}{\beta_F V_T} \frac{V_A}{V_A + V_{CE0}}$$

30

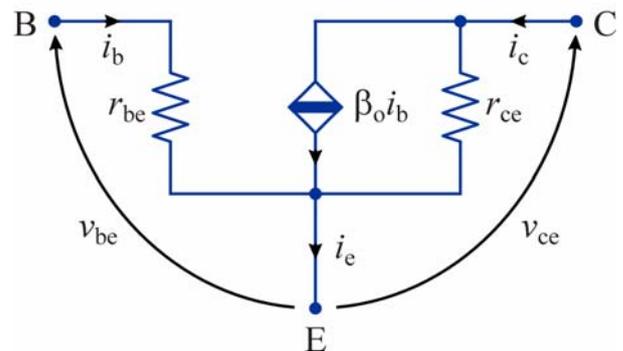
Modello per piccoli segnali

- Il circuito equivalente per piccoli segnali può essere ridisegnato nel modo seguente
- I parametri sono definiti dalle relazioni

$$r_{be} = \frac{1}{g_{be}} = \frac{\beta_F V_T}{I_{C0}} \left(1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right)$$

$$g_m v_{be} = \frac{g_m}{g_{be}} i_b = \beta_o i_b \quad \Rightarrow \quad \beta_o = \frac{g_m}{g_{be}} = \beta_F \left(1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right)$$

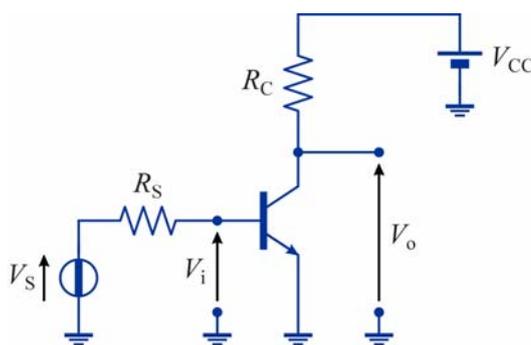
$$r_{ce} = \frac{1}{g_{ce}} = \frac{V_A + V_{CE0}}{I_{C0}}$$



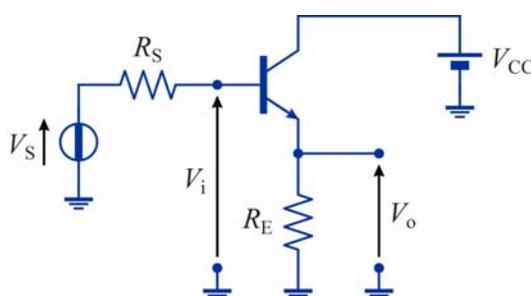
31

Amplificatori ad un transistoro Configurazioni fondamentali

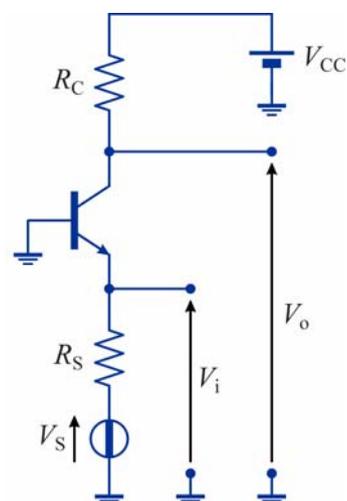
Emettitore comune



Collettore comune



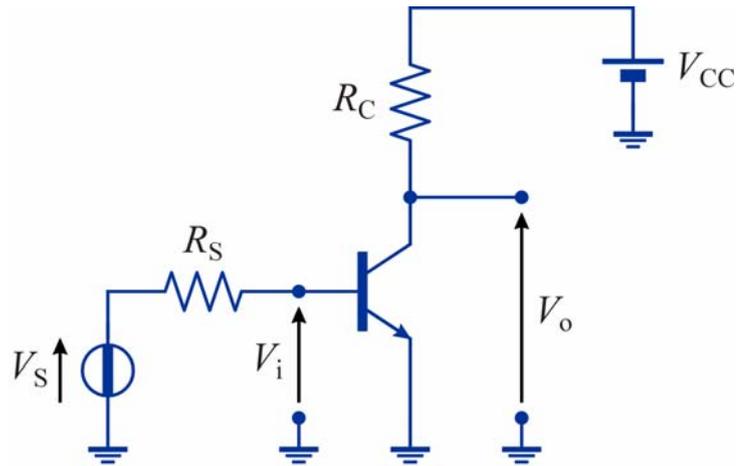
Base comune



32

Amplificatore ad emettitore comune

$$V_S(t) = V_{BB} + v_s(t)$$

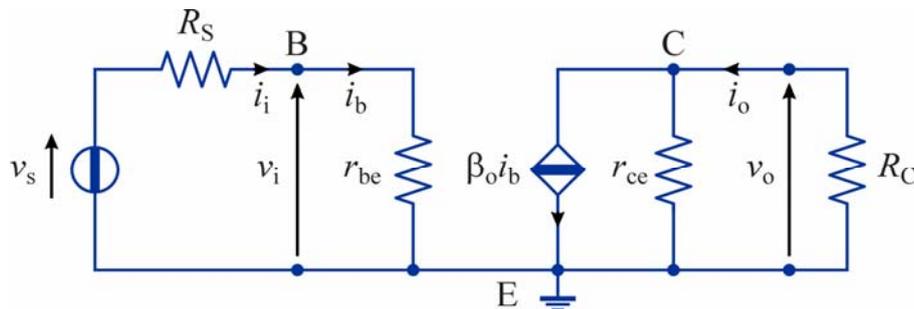


- Ingresso tra base e massa
- Uscita tra collettore e massa
- Nel circuito equivalente per piccoli segnali la tensione di uscita coincide con la tensione di R_C

33

Amplificatore ad emettitore comune

Analisi per piccoli segnali



$$i_i = i_b$$

$$i_o = i_c = \beta_o i_b \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_C}$$

$$v_i = r_{be} i_b$$

$$v_o = -R_C i_o = -\beta_o i_b \frac{r_{ce} R_C}{r_{ce} + R_C}$$

34

Amplificatore ad emettitore comune

- Guadagno di tensione

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta_o}{r_{be}} (R_C // r_{ce})$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \beta_o \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_C}$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = r_{be}$$

- Valori approssimati per $r_{ce} \rightarrow \infty$

$$A_v \approx -\frac{\beta_o R_C}{r_{be}}$$

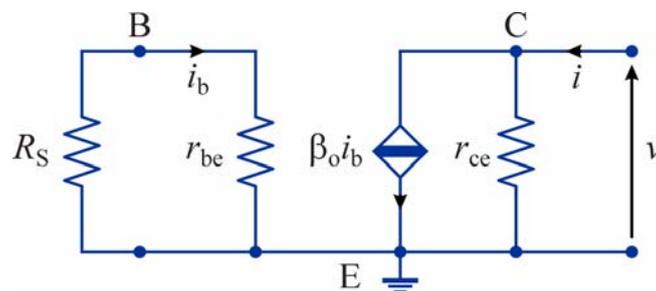
$$A_i \approx \beta_o$$

$$R_{in} = r_{be}$$

35

Amplificatore ad emettitore comune

- Calcolo della resistenza di uscita



$$i_b = 0$$

$$R_{out} = \frac{v}{i} = r_{ce}$$

36

Amplificatore ad emettitore comune

- Il guadagno di tensione A_v è negativo e può essere grande in valore assoluto

→ quindi v_o è in opposizione di fase con v_i

- Il guadagno di corrente A_i è positivo e può assumere valori elevati

→ il guadagno di potenza

$$A_p = \frac{-v_o i_o}{v_i i_i} = -A_v A_i$$

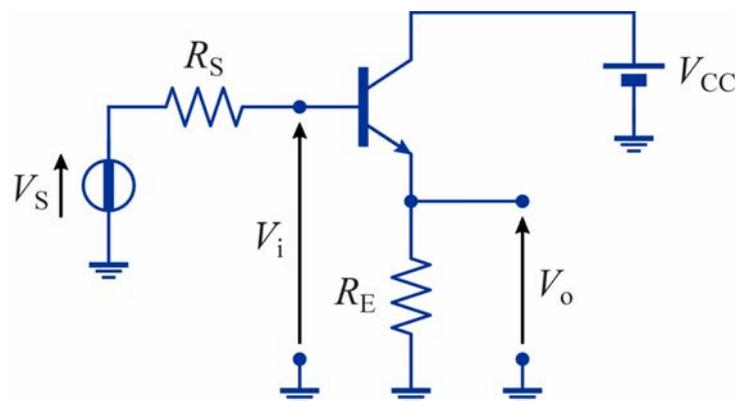
può assumere valori elevati

- La resistenza di ingresso ha valori medio-bassi (tipicamente dell'ordine del $k\Omega$)
 - ◆ è possibile aumentare R_{in} riducendo la corrente di collettore I_{C0} , ma questo comporta anche una riduzione del guadagno di tensione
- La resistenza di uscita ha valori medio-alti (tipicamente dell'ordine delle decine di $k\Omega$)

37

Amplificatore a collettore comune

$$V_S(t) = V_{BB} + v_s(t)$$

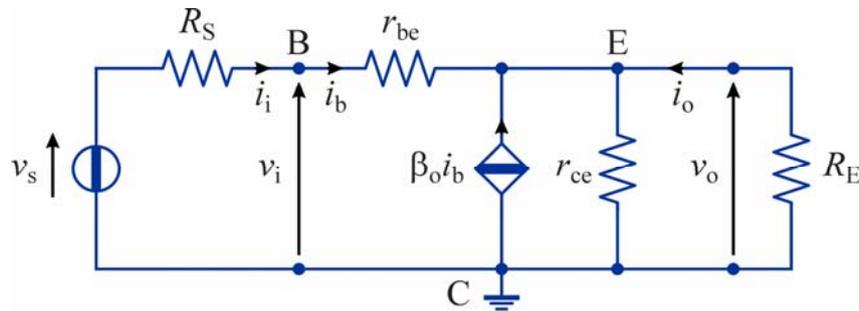


- Ingresso tra base e massa
- Uscita tra emettitore e massa
- Nel circuito equivalente per piccoli segnali la tensione di uscita coincide con la tensione di R_E

38

Amplificatore a collettore comune

Analisi per piccoli segnali



$$i_i = i_b$$

$$i_o = -i_e = -\frac{v_o}{R_E} = -(\beta_o + 1)i_b \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_E}$$

$$v_o = (\beta_o + 1)i_b \frac{r_{ce} R_E}{r_{ce} + R_E}$$

$$v_i = r_{be} i_b + v_o = r_{be} i_b + (\beta_o + 1)i_b \frac{r_{ce} R_E}{r_{ce} + R_E}$$

39

Amplificatore a collettore comune

- Guadagno di tensione

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})}{r_{be} + (\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})}$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = -(\beta_o + 1) \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_E}$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = r_{be} + (\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})$$

- Valori approssimati per $r_{ce} \rightarrow \infty$

$$A_v = \frac{(\beta_o + 1)R_E}{r_{be} + (\beta_o + 1)R_E} \quad A_i \approx -(\beta_o + 1) \quad R_{in} \approx r_{be} + (\beta_o + 1)R_E$$

40

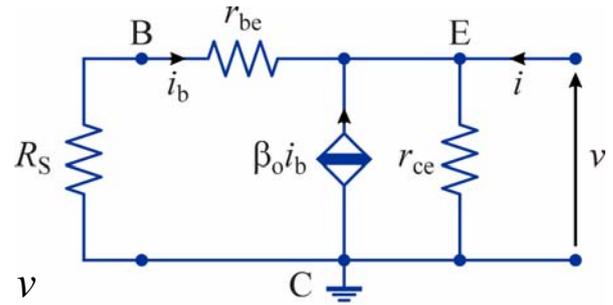
Amplificatore a collettore comune

- Calcolo della resistenza di uscita

$$i_b = -\frac{v}{R_S + r_{be}}$$

$$i = -(\beta_o + 1)i_b + \frac{v}{r_{ce}} = (\beta_o + 1)\frac{v}{R_S + r_{be}} + \frac{v}{r_{ce}}$$

$$R_{out} = \frac{v}{i} = \frac{R_S + r_{be}}{\beta_o + 1} // r_{ce}$$



- Per $r_{ce} \rightarrow \infty$ si ha

$$R_{out} \approx \frac{R_S + r_{be}}{\beta_o + 1}$$

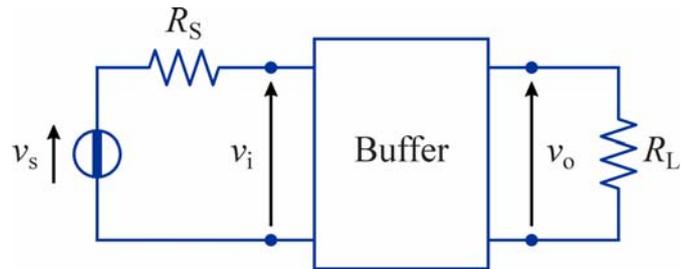
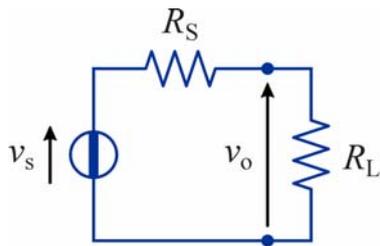
41

Amplificatore a collettore comune

- Il guadagno di tensione ha tipicamente valori di poco inferiori a 1, dato che r_{be} in genere è trascurabile rispetto a $(\beta_o + 1)(r_E // r_{ce})$
 - per questo l'amplificatore a collettore comune è detto anche **inseguitore di tensione** o **inseguitore di emettitore (emitter follower)**
- Il guadagno di corrente è negativo e in genere prossimo a $-(\beta_o + 1)$
- La resistenza di ingresso ha valori elevati (tipicamente dell'ordine delle centinaia di $k\Omega$ o dei $M\Omega$)
- La resistenza di uscita ha valori piccoli (tipicamente dell'ordine delle decine di Ω)
- Queste caratteristiche rendono l'amplificatore a collettore comune particolarmente adatto ad essere utilizzato come stadio separatore (**buffer**)

42

Stadio separatore (Buffer)



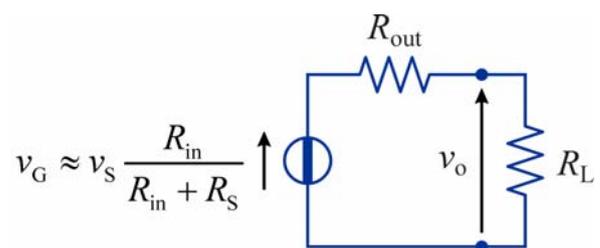
- Si considera un generatore con resistenza interna R_S collegato a una resistenza di carico R_L
- Al diminuire di R_L la tensione v_o
 - ◆ diviene piccola rispetto a v_s
 - ◆ è fortemente dipendente da R_L
- Se si introduce un buffer con elevata impedenza di ingresso $R_{in} \gg R_S$
 - ◆ la tensione v_i all'ingresso del buffer è circa uguale a v_s e praticamente indipendente dalla resistenza di carico
 - ◆ Il generatore è praticamente nella condizione di funzionamento a vuoto

43

Stadio separatore (Buffer)

Circuito equivalente

Si assume che il guadagno a vuoto (cioè per $R_E \rightarrow \infty$) dell'amplificatore sia praticamente unitario



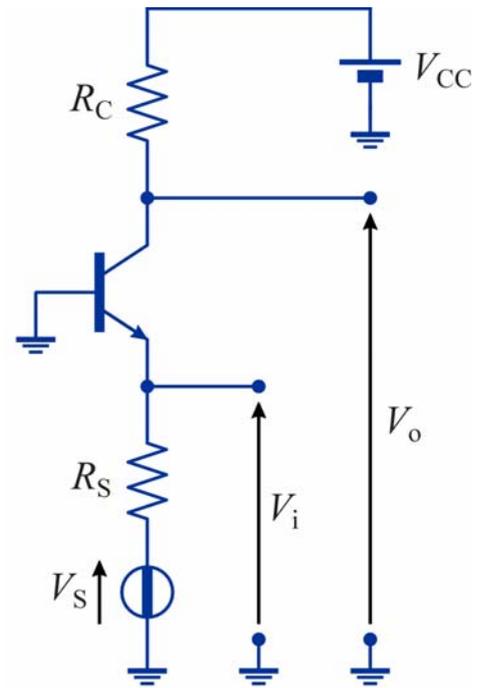
- Se il buffer ha guadagno circa unitario e resistenza di uscita $R_{out} \ll R_L$ la tensione v_o
 - ◆ è di poco inferiore a v_s
 - ◆ è praticamente indipendente da R_L
- ➔ Complessivamente, dal punto di vista del carico, il buffer permette di ridurre la resistenza interna del generatore lasciando praticamente invariata la sua tensione

44

Amplificatore a base comune

- Ingresso tra emettitore e massa
- Uscita tra collettore e massa
- Nel circuito equivalente per piccoli segnali la tensione di uscita coincide con la tensione di R_C

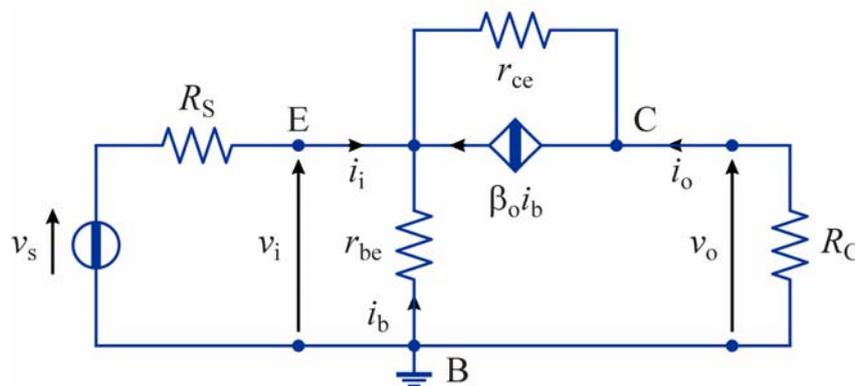
$$V_S(t) = V_{EE} + v_s(t)$$



45

Amplificatore a base comune

Analisi per piccoli segnali



$$v_i = -r_{be} i_b$$

$$r_{be} i_b = r_{ce} (i_o - \beta_o i_b) + R_C i_o \Rightarrow i_o = i_c = \frac{r_{be} + \beta_o r_{ce}}{R_C + r_{ce}} i_b \approx \frac{\beta_o r_{ce}}{R_C + r_{ce}} i_b$$

$$i_i = -i_e = -i_o - i_b = -\frac{R_C + (\beta_o + 1)r_{ce}}{R_C + r_{ce}} i_b \quad v_o = -R_C i_o = -\frac{\beta_o r_{ce} R_C}{R_C + r_{ce}} i_b$$

46

Amplificatore a base comune

- Guadagno di tensione

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\beta_o}{r_{be}} (R_C \parallel r_{ce})$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = -\frac{\beta_o r_{ce}}{R_C + (\beta_o + 1)r_{ce}}$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{r_{be}(R_C + r_{ce})}{R_C + (\beta_o + 1)r_{ce}}$$

- Valori approssimati per $r_{ce} \rightarrow \infty$

$$A_v \approx \frac{\beta_o R_C}{r_{be}} \qquad A_i \approx -\frac{\beta_o}{\beta_o + 1} \qquad R_{in} \approx \frac{r_{be}}{\beta_o + 1}$$

47

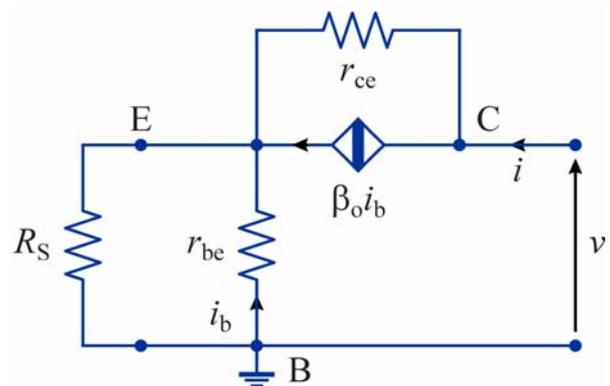
Amplificatore a base comune

- Calcolo della resistenza di uscita

$$i_b = -i \frac{R_S}{r_{be} + R_S}$$

$$v = r_{ce}(i - \beta_o i_b) - r_{be} i_b$$

$$R_{out} = \frac{v}{i} = \left(1 + \frac{\beta_o R_S}{r_{be} + R_S} \right) r_{ce} + r_{be} \parallel R_S$$



- Quindi i valori sono compresi tra r_{ce} e $(1 + \beta_o)r_{ce}$

48

Amplificatore a base comune

- Il guadagno di tensione è positivo e uguale, in valore assoluto, al guadagno dell'amplificatore a emettitore comune
- Il guadagno di corrente è negativo e ha modulo quasi unitario
- ➔ Di conseguenza il guadagno di potenza è sensibilmente inferiore a quello dell'amplificatore a emettitore comune
- La resistenza di ingresso è molto piccola (tipicamente dell'ordine delle decine di Ω)
- La resistenza di uscita è molto grande (tipicamente dell'ordine delle centinaia di $k\Omega$ o dei $M\Omega$)
- ➔ Queste caratteristiche rendono l'amplificatore a base comune adatto ad essere utilizzato come inseguitore di corrente (può fornire una corrente di uscita circa uguale a quella di ingresso, ma associata ad una resistenza più elevata)
- Inoltre la configurazione a base comune è usata come amplificatore di tensione in casi particolari che richiedono adattamento in ingresso con livelli bassi di impedenza (es. cavi a radio frequenza)

49

Confronto tra le configurazioni fondamentali

	Emettitore comune	Collettore comune	Base comune
A_v	$-\frac{\beta_o}{r_{be}}(R_C // r_{ce})$	$\frac{(\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})}{r_{be} + (\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})}$	$\frac{\beta_o}{r_{be}}(R_C // r_{ce})$
A_i	$\beta_o \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_C}$	$-(\beta_o + 1) \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_E}$	$-\frac{\beta_o r_{ce}}{R_C + (\beta_o + 1)r_{ce}}$
R_{in}	r_{be}	$r_{be} + (\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})$	$\frac{r_{be}(R_C + r_{ce})}{R_C + (\beta_o + 1)r_{ce}}$
R_{out}	r_{ce}	$\frac{R_S + r_{be}}{\beta_o + 1} // r_{ce}$	$\left(1 + \frac{\beta_o R_S}{r_{be} + R_S}\right) r_{ce} + r_{be} // R_S$

50

Confronto tra le configurazioni fondamentali

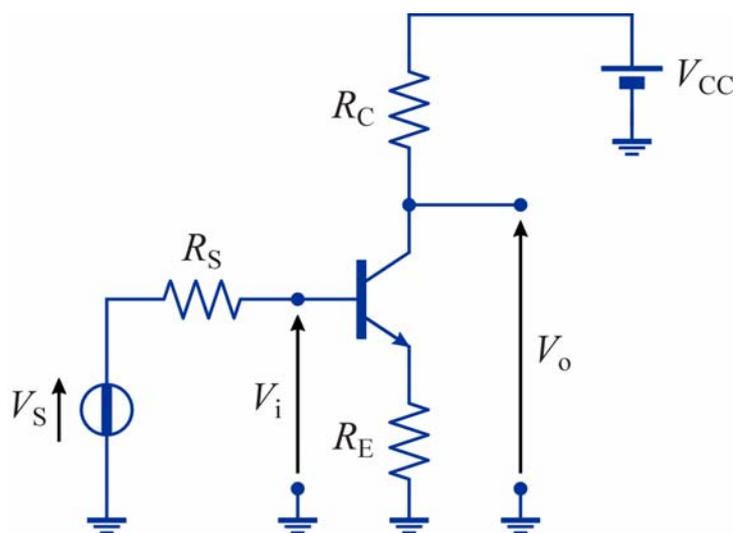
	Emettitore comune	Collettore comune	Base comune
A_v	modulo $\gg 1$ negativo	poco < 1 positivo	$\gg 1$ positivo
A_i	$\gg 1$ positivo	modulo $\gg 1$ negativo	modulo poco < 1 negativo
R_{in}	media ($\sim 10^3 \Omega$)	grande ($\sim 10^5-10^6 \Omega$)	piccola ($\sim 10-10^2 \Omega$)
R_{out}	media ($\sim 10^4-10^5 \Omega$)	piccola ($\sim 10-10^2 \Omega$)	grande ($\sim 10^5-10^6 \Omega$)

(valori tipici)

51

Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore

$$V_S(t) = V_{BB} + v_s(t)$$



- Amplificatore ad emettitore comune modificato con l'inserimento di un resistore in serie all'emettitore

52

Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore

- Applicando la LKV si ottiene

$$R_E i_e + r_{ce} (i_o - \beta_o i_b) + R_C i_o = 0$$

- Di regola vale l'approssimazione

$$i_e = i_b + i_o \approx i_o$$

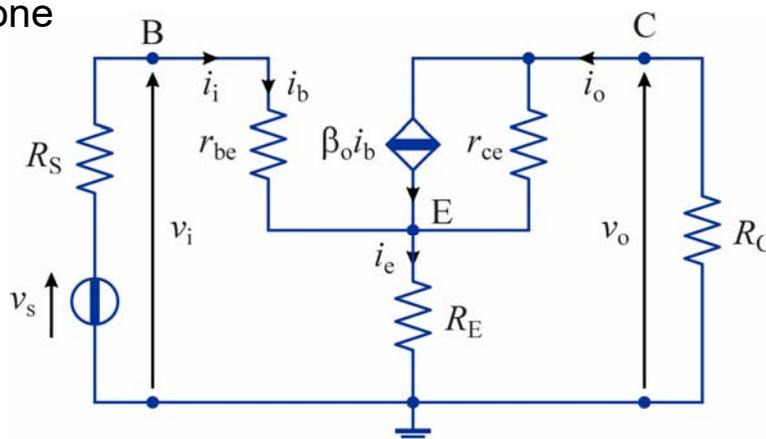
- Quindi

$$i_o = \frac{r_{ce} \beta_o i_b}{R_E + R_C + r_{ce}}$$

- Inoltre si ha

$$i_i = i_b$$

$$v_o = -R_C i_o = -\frac{R_C r_{ce} \beta_o i_b}{R_E + R_C + r_{ce}} \quad v_i = r_{be} i_b + R_E i_o = \left(r_{be} + \frac{R_E r_{ce} \beta_o}{R_E + R_C + r_{ce}} \right) i_b$$



53

Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore

- Guadagno di tensione

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta_o r_{ce} R_C}{r_{be} (R_E + R_C + r_{ce}) + \beta_o r_{ce} R_E}$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{r_{ce} \beta_o}{R_E + R_C + r_{ce}}$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = r_{be} + \frac{R_E r_{ce} \beta_o}{R_E + R_C + r_{ce}}$$

- Valori approssimati per $r_{ce} \rightarrow \infty$ (assumendo anche $r_{be} \ll \beta_o R_E$)

$$A_v \approx -\frac{R_C}{R_E} \quad A_i = \beta_o \quad R_{in} = R_E \beta_o$$

54

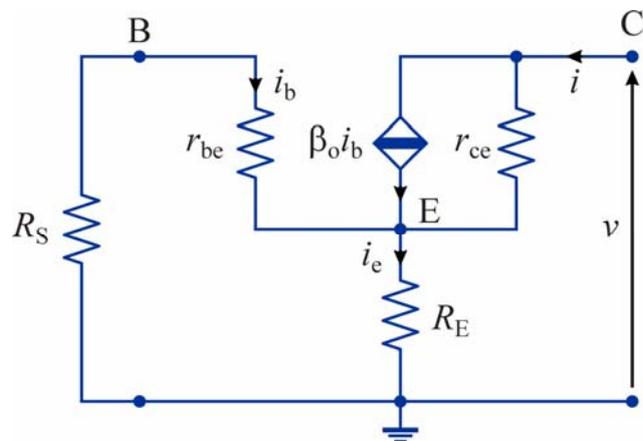
Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore

- Calcolo della resistenza di uscita

$$i_b = -i \frac{R_E}{R_E + R_S + r_{be}}$$

$$v \approx R_E i + r_{ce} (i - \beta_o i_b)$$

$$R_{out} = \frac{v}{i} = R_E + r_{ce} + \frac{\beta_o r_{ce} R_E}{R_E + R_S + r_{be}}$$



- Quindi i valori sono compresi tra r_{ce} e $(1+\beta_o)r_{ce}$

55

Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore

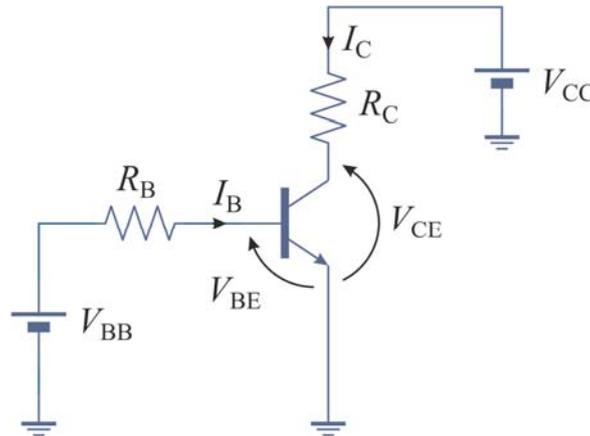
- Complessivamente gli effetti dell'introduzione della resistenza di emettitore sono
 - ◆ Aumento della resistenza di ingresso, che è approssimativamente determinata dal prodotto $\beta_o R_E$
 - ◆ Diminuzione del guadagno di tensione, che però, dipende in modo meno sensibile da β_o , ed è praticamente determinato dal rapporto tra R_C e R_E
 - ◆ Aumento della resistenza di uscita

56

Polarizzazione del transistor

- In pratica non è conveniente utilizzare un generatore di tensione per fissare il valore di V_{BE} nel punto di lavoro
 - ◆ A causa della relazione esponenziale che lega I_B e V_{BE} , piccoli errori su V_{BE} possono dare luogo a grandi variazioni di I_B e, di conseguenza, di I_C e di V_{CE}
- Quindi è preferibile fissare il valore della corrente di base

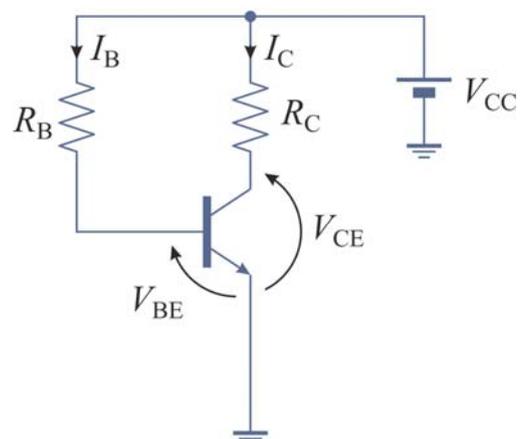
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$



57

Polarizzazione del transistor

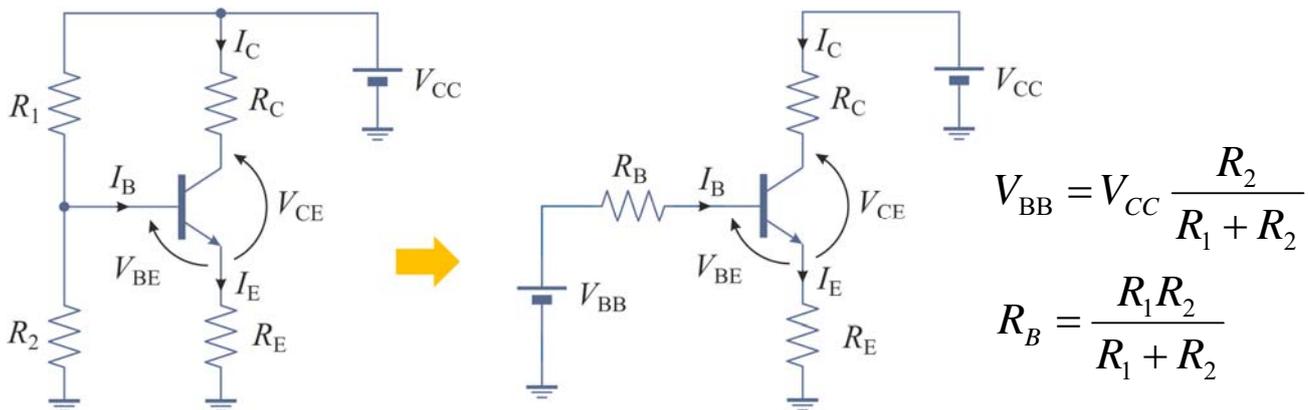
- Di solito si utilizza un solo generatore per polarizzare sia il collettore che la base
- Il comportamento di questo circuito non è soddisfacente perché
- La caratteristica $I_B - V_{BE}$ dipende dalla temperatura, quindi anche I_C e V_{CE} variano con la temperatura
- Il valore di I_C dipende β_F , che può variare in modo sensibile anche tra esemplari diversi di transistor dello stesso tipo



58

Stabilizzazione del punto di lavoro

- Per rendere più stabile il punto di lavoro del transistor si può utilizzare il seguente circuito di polarizzazione
 - La tensione di base è fissata mediante il partitore formato da R_1 e R_2
 - Viene inserita la resistenza R_E in serie all'emettitore
- Il circuito di polarizzazione di base può essere rappresentato mediante il bipolo equivalente di Thévenin



59

Stabilizzazione del punto di lavoro

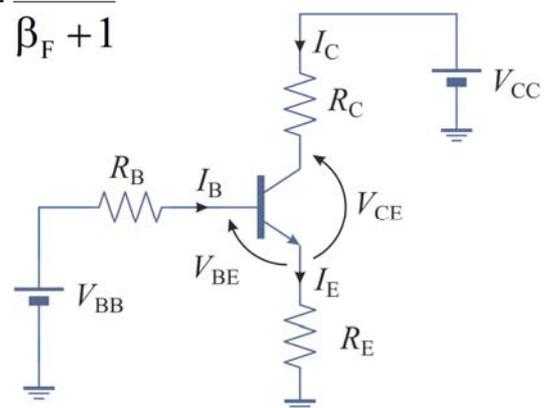
- Facendo uso del circuito equivalente di Thévenin, la corrente di emettitore può essere ottenuta nel modo seguente

$$V_{BB} = R_B \frac{I_E}{\beta_F + 1} + V_{BE} + R_E I_E \Rightarrow I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta_F + 1}}$$

- Se sono verificate le condizioni

$$V_{BB} \gg V_{BE} \quad R_E \gg \frac{R_B}{\beta_F + 1}$$

la corrente I_E , e quindi anche I_C , risulta praticamente indipendente dalle variazioni di V_{BE} e di β_F



60

Stabilizzazione del punto di lavoro

- Per scegliere i valori di R_1 e R_2 si deve tenere conto di due opposte esigenze

- ◆ Per avere

$$R_E \gg \frac{R_B}{\beta_F + 1}$$

occorre che R_1 e R_2 abbiano valori relativamente piccoli

- ◆ Al diminuire di R_1 e R_2 aumentano le loro correnti e quindi la potenza dissipata

- In genere si scelgono i valori delle resistenze imponendo che

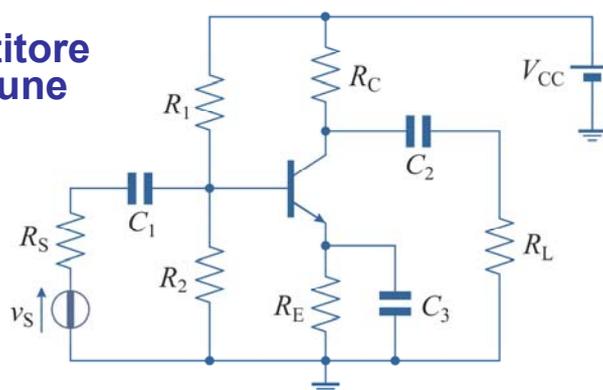
$$I_1 \cong I_2 = \frac{I_E}{a}$$

con a normalmente compreso tra 5 e 10

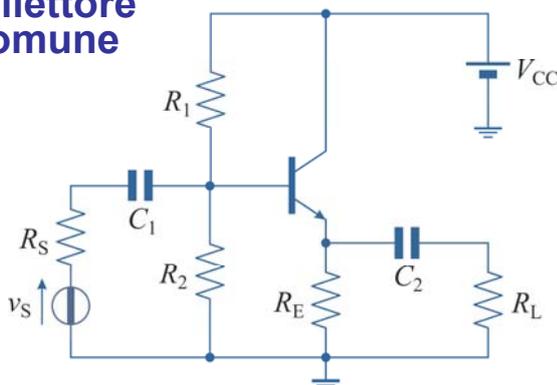
61

Configurazioni fondamentali

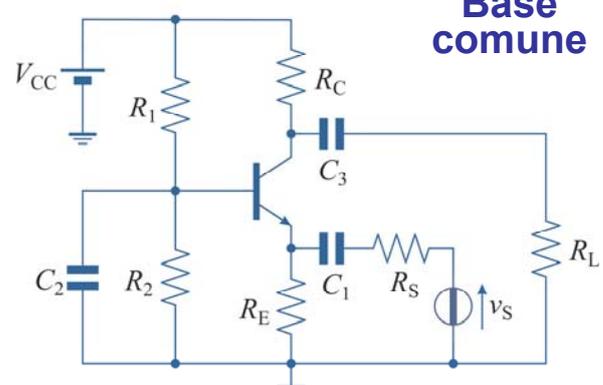
Emettitore comune



Collettore comune



Base comune



32

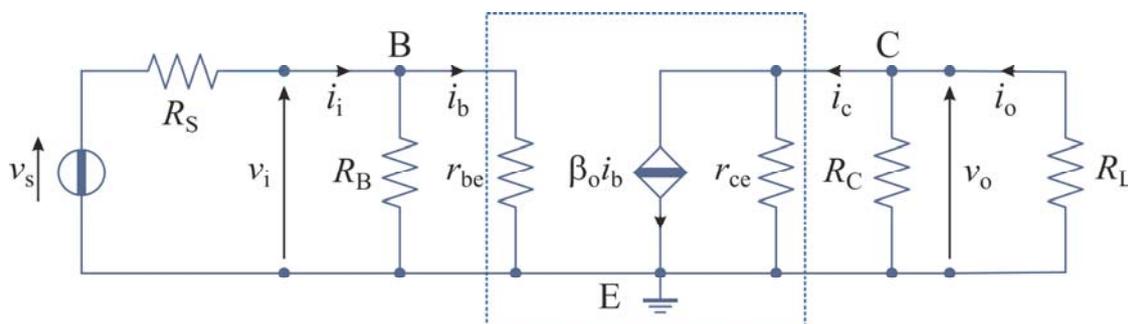
Configurazioni fondamentali

- E' possibile realizzare i tre amplificatori fondamentali come indicato negli schemi della diapositiva precedente
- I valori dei condensatori C_1 , C_2 e C_3 sono scelti in modo che la loro impedenza alle frequenze del segnale di ingresso sia trascurabile
- Negli amplificatori a emettitore e base comune il terminale comune è collegato a massa mediante un condensatore, che alla frequenza del segnale agisce come un cortocircuito in parallelo, rispettivamente, a R_E o a R_B
- Nell'amplificatore a collettore comune viene eliminata la resistenza R_C
- La presenza dei condensatori limita inferiormente la banda passante degli amplificatori
- La banda passante, inoltre, è limitata superiormente dagli effetti reattivi del transistor (quindi complessivamente gli amplificatori hanno un comportamento di tipo passa-banda)

63

Amplificatore ad emettitore comune

Circuito equivalente per piccoli segnali



- Nel circuito equivalente per piccoli segnali l'emettitore può essere considerato praticamente collegato a massa (quindi non compare R_E)
- Si indicano con A'_v , A'_i , R'_{in} , R'_{out} i guadagni e le resistenze di ingresso e di uscita dell'amplificatore completo e con A_v , A_i , R_{in} , R_{out} i guadagni e le resistenze di ingresso e di uscita dell'amplificatore elementare (racchiuso dalla linea tratteggiata)

64

Amplificatore ad emettitore comune

- Facendo uso dei risultati ottenuti per l'amplificatore elementare, e tenendo conto del fatto che R_C ora è sostituito da $R_C // R_L$ si ha

$$A'_V = \frac{v_o}{v_i} = A_V = -\frac{\beta_o}{r_{be}} (R_C // r_{ce} // R_L)$$

$$A'_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \frac{i_c}{i_b} \frac{i_o}{i_c} = \frac{i_b}{i_i} A_i \frac{i_o}{i_c} = \frac{R_B}{R_B + r_{be}} \beta_o \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_C // R_L} \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

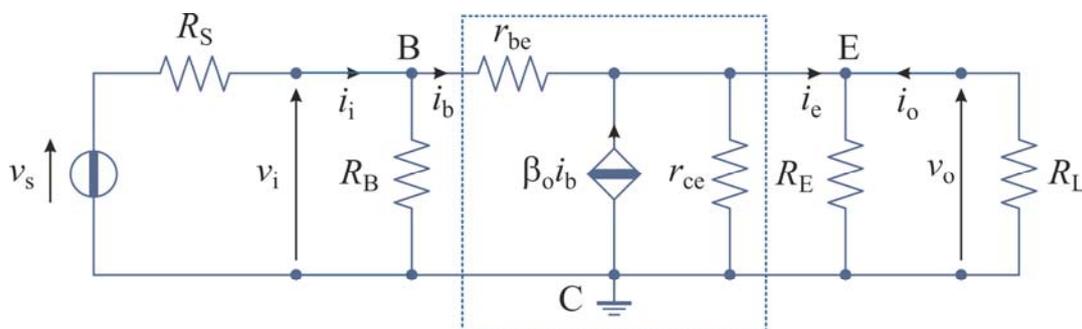
$$R'_{in} = R_{in} // R_B = r_{be} // R_B$$

$$R'_{out} = R_{out} // R_C = r_{ce} // R_C$$

65

Amplificatore a collettore comune

Circuito equivalente per piccoli segnali



- I guadagni e le resistenze di ingresso e uscita dell'amplificatore possono essere ottenuti a partire da quelli relativi all'amplificatore elementare racchiuso dalla linea tratteggiata, nei quali si deve sostituire R_E con $R_E // R_L$ e R_S con $R_S // R_B$

66

Amplificatore a collettore comune

- Tenendo conto dei risultati ottenuti per l'amplificatore elementare, si ha

$$A'_V = \frac{v_o}{v_i} = A_V = \frac{(\beta_o + 1)(R_E // R_L // r_{ce})}{r_{be} + (\beta_o + 1)(R_E // R_L // r_{ce})}$$

$$\begin{aligned} A'_i &= \frac{i_b}{i_i} \frac{-i_e}{i_b} \frac{i_o}{-i_e} = \frac{i_b}{i_i} A_i \frac{i_o}{-i_e} = -\frac{R_B}{R_B + R_{in}} (\beta_o + 1) \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_E // R_L} \frac{R_E}{R_E + R_L} = \\ &= -\frac{R_B}{R_B + R_{in}} (\beta_o + 1) \frac{r_{ce} // R_E}{r_{ce} // R_E + R_L} \end{aligned}$$

$$R'_{in} = R_{in} // R_B$$

$$R'_{out} = R_{out} // R_E$$

dove

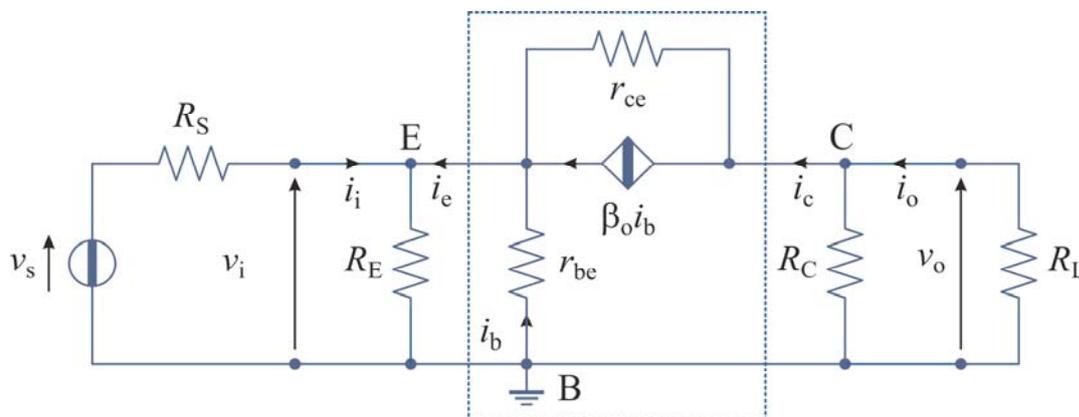
$$R_{in} = r_{be} + (\beta_o + 1)(r_{ce} // R_E // R_L)$$

$$R_{out} = \frac{R_S // R_B + r_{be}}{\beta_o + 1} // r_{ce}$$

67

Amplificatore a base comune

Circuito equivalente per piccoli segnali



- I guadagni e le resistenze di ingresso e uscita dell'amplificatore possono essere ottenuti a partire da quelli relativi all'amplificatore elementare racchiuso dalla linea tratteggiata, nei quali si deve sostituire R_C con $R_C // R_L$ e R_S con $R_S // R_E$

68

Amplificatore a base comune

- Tenendo conto dei risultati ottenuti per l'amplificatore elementare, si ha

$$A'_V = \frac{v_o}{v_i} A_V = \frac{\beta_o}{r_{be}} (R_C // R_L // r_{ce})$$

$$A'_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-i_e}{i_i} \frac{i_c}{-i_e} \frac{i_o}{i_c} = \frac{-i_e}{i_i} A_1 \frac{i_o}{i_c} = - \frac{R_E}{R_E + R_{in}} \frac{\beta_o r_{ce}}{R_C // R_L + (\beta_o + 1) r_{ce}} \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

$$R'_{in} = R_{in} // R_E$$

$$R'_{out} = R_{out} // R_C$$

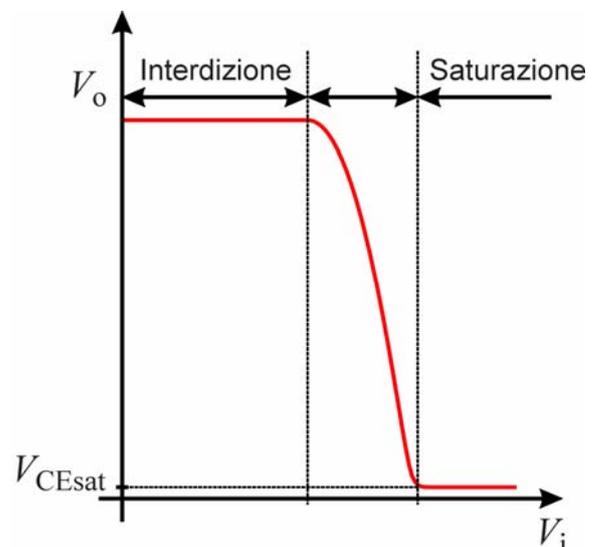
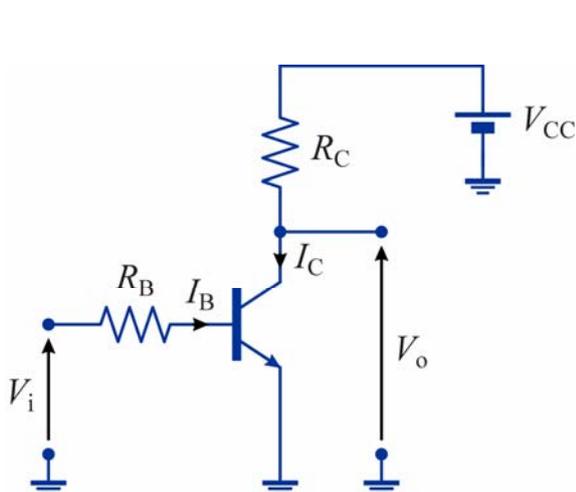
dove

$$R_{in} = \frac{r_{be} (R_C // R_L + r_{ce})}{R_C // R_L + (\beta_o + 1) r_{ce}} \quad R_{out} = \left[1 + \frac{\beta_o (R_S // R_E)}{r_{be} + R_S // R_E} \right] r_{ce} + r_{be} // R_S // R_E$$

69

Il transistoro come interruttore comandato

- Nell'impiego come amplificatore il transistoro viene fatto funzionare nella regione normale
- Nell'impiego come interruttore comandato il transistoro lavora nella regione di interdizione e nella regione di saturazione



70

Il transistoro come interruttore comandato

- Il transistoro è in interdizione se

$$V_i < V_\gamma$$

- In queste condizioni si comporta come un interruttore aperto

$$I_C = 0 \Rightarrow V_o = V_{CC}$$

- Il transistoro è in saturazione se

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} < \beta_F I_B = \beta_F \frac{V_i - V_\gamma}{R_B}$$

- In queste condizioni si comporta come un interruttore chiuso

$$V_C = V_{CEsat} \approx 0$$

- L'uscita è a livello basso quando l'ingresso è a livello alto e viceversa quindi il circuito svolge la funzione di inverter