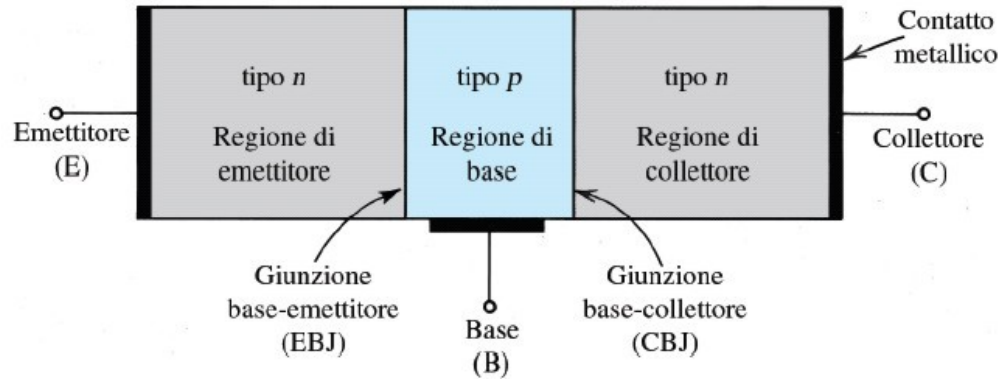

Transistore Bipolare a Giunzione BJT

Transistore Bipolare: Struttura Fisica



Il Transistor Bipolare, detto anche BJT cioè Bipolar Junction Transistor, è costituito da due giunzioni p-n affiancate.

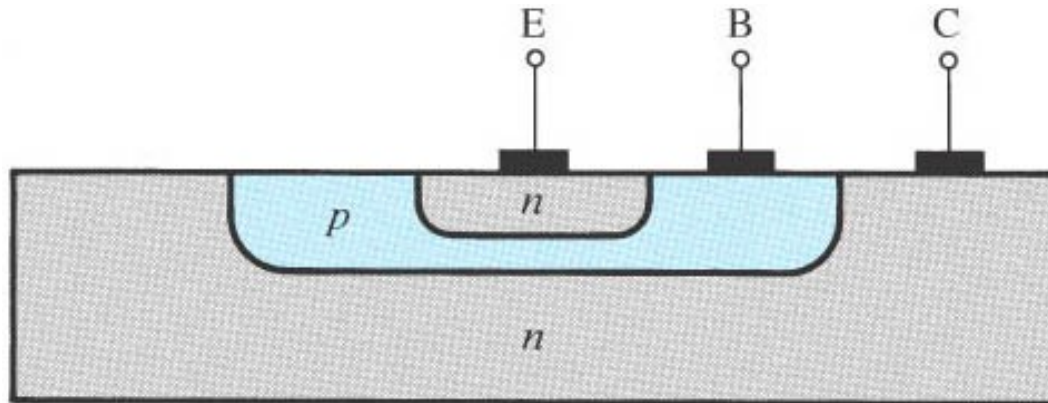
La figura mostra un dispositivo n-p-n

La regione intermedia prende il nome di **base**, le altre due sono dette **emettitore** e **collettore**.

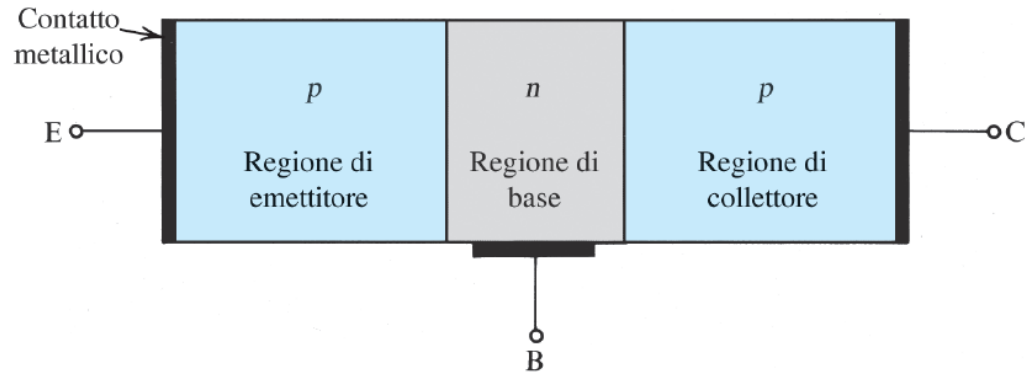
Il funzionamento del dispositivo richiede che la regione di base sia molto sottile (le due giunzioni base-emettitore e base-collettore devono interagire fra loro)

Transistore *npn*

A prima vista il dispositivo sembra simmetrico; in effetti l'emettitore è molto più drogato del collettore



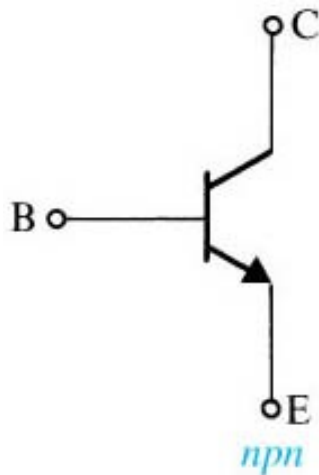
Transistore Bipolare pnp



E' la versione complementare del dispositivo npn

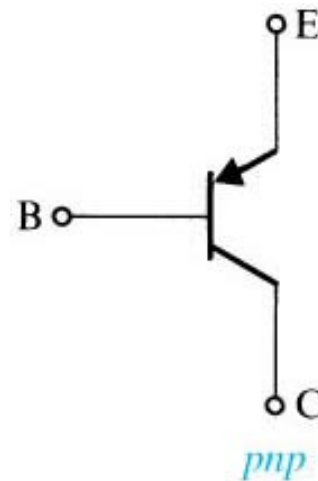
Simboli

N-P-N



(a)

P-N-P

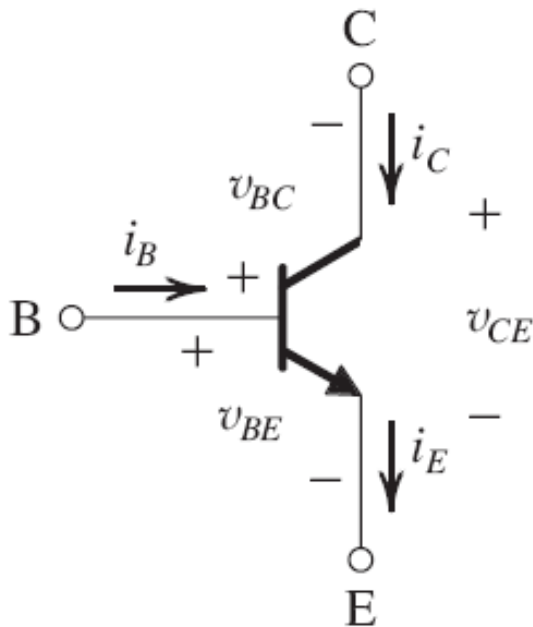


(b)

In questo corso avremo modo di utilizzare solo transistori
nnp

Convenzioni per tensioni e correnti

Transistor *npn*



Una v_{BE} positiva polarizza direttamente la giunzione base-emettitore.

Una v_{BC} positiva polarizza direttamente la giunzione base-collettore.

Le correnti di base e collettore si assumo positive se entranti.

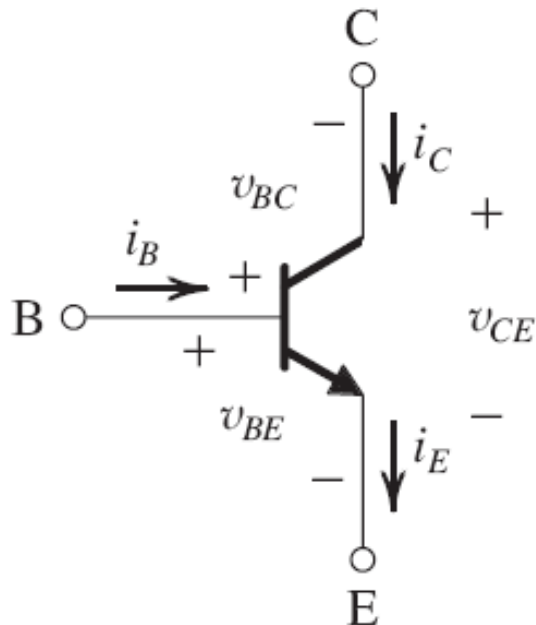
La i_E è positiva quando esce.

La differenza principale fra BJT e MOS è che i_B non è trascurabile, mentre $i_G = 0$ in condizioni stazionarie.

Regioni di funzionamento di un Transistore Bipolare

		Giunzione base-collettore	
		Polarizzazione inversa	Polarizzazione diretta
Giunzione base-emettitore	Polarizzazione diretta	Regione attiva diretta (buon amplificatore)	Regione di saturazione (interruttore chiuso)
	Polarizzazione inversa	Regione di interdizione (interruttore aperto)	Regione attiva diretta (cattivo amplificatore)

Caratteristiche del transistor bipolare

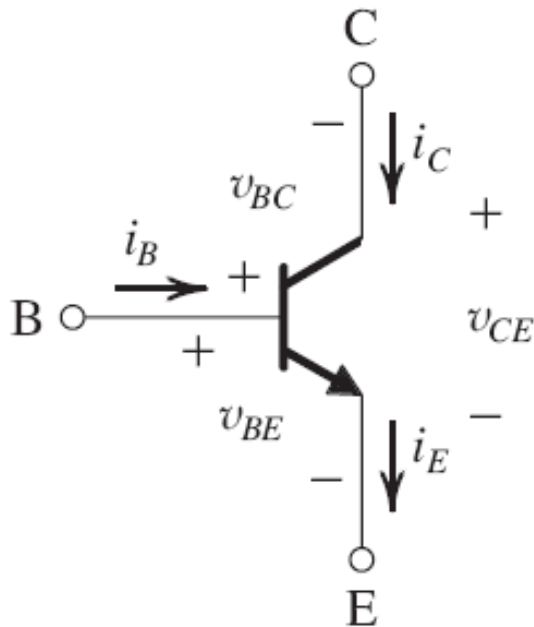


Supponiamo che il dispositivo operi in regione attiva diretta.

La giunzione Base-Elettore è polarizzata direttamente: **c'è un flusso di elettroni che vengono iniettati dall'emettitore nella base; gli elettroni sono raccolti al collettore** (la giunzione base-collettore è polarizzata inversamente)

Il flusso di corrente è diretto in direzione opposta rispetto agli elettroni: **il flusso di corrente principale entra dal collettore ed esce dal terminale di emettitore.**

Caratteristiche del transistoro bipolare



Il flusso principale di corrente si instaura fra collettore ed emettitore.

Questa corrente può essere controllata agendo sulla corrente di base: con una debole corrente di base si può controllare una corrente molto più ampia che fluisce fra collettore ed emettitore.

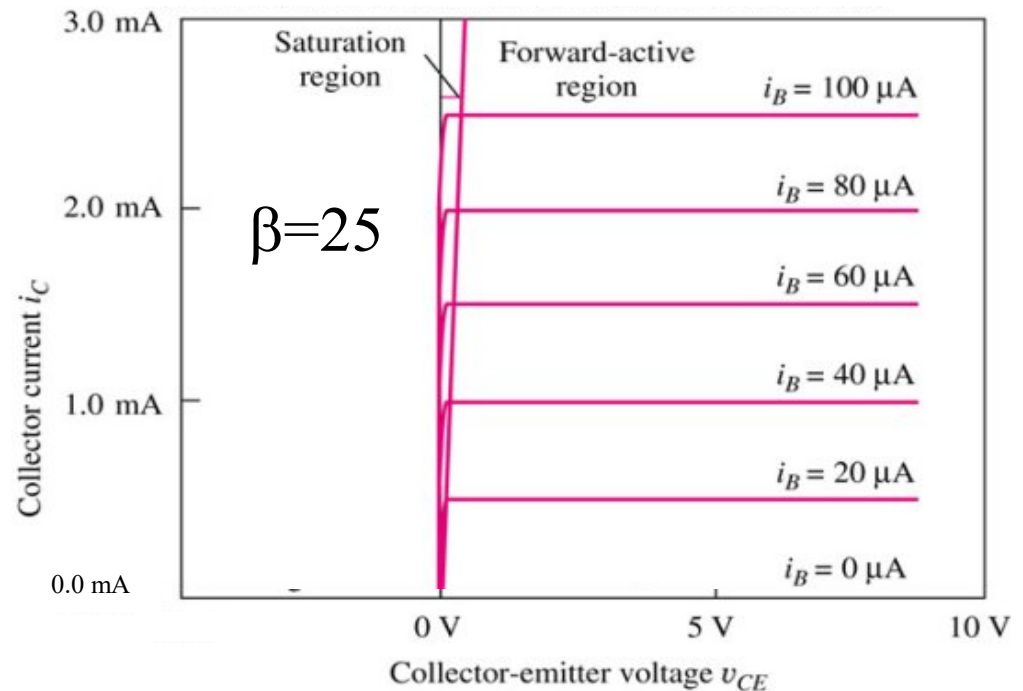
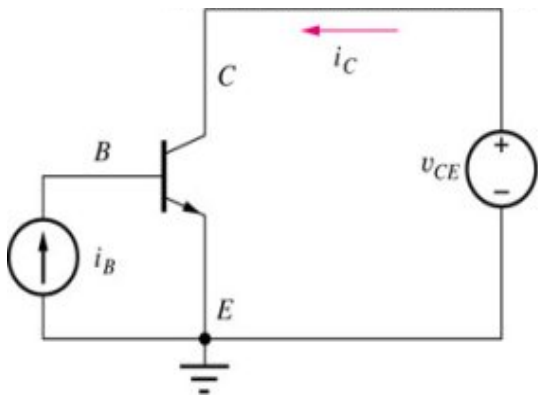
Il BJT è pilotato in corrente.

Si intuisce che uno dei parametri più importanti del dispositivo è il parametro: $\beta = i_B / i_C$

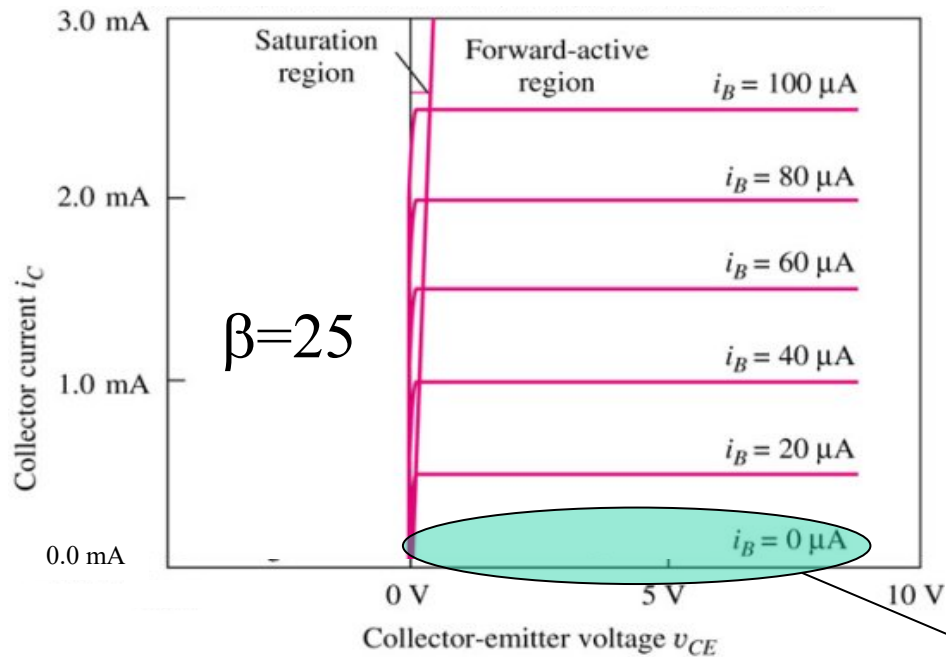
Più è grande β , migliore è il dispositivo. Tipicamente $10 < \beta < 500$

Caratteristiche i - v del Transistore Bipolare

Le caratteristiche di uscita del transistor bipolare riportano $i_C = f(v_{CE})$ per diversi valori di i_B (ricordiamo che le caratteristiche del MOS riportano $i_D = f(v_{DS})$ per diversi valori di v_{GS})

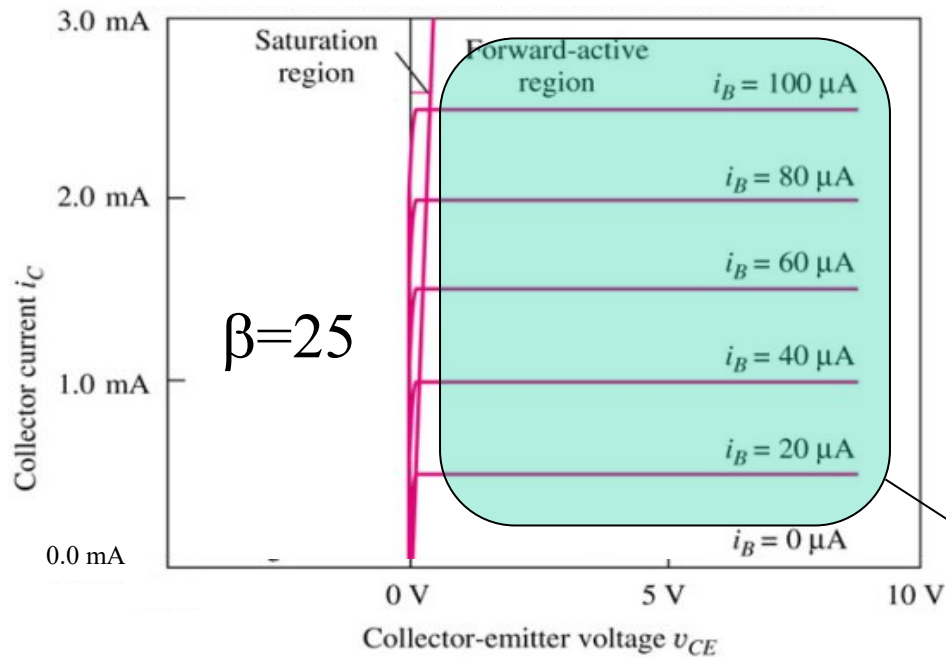


Caratteristiche del Transistore Bipolare: Interdizione



Per $i_B = 0$ non c'è passaggio di corrente. Il BJT è interdito

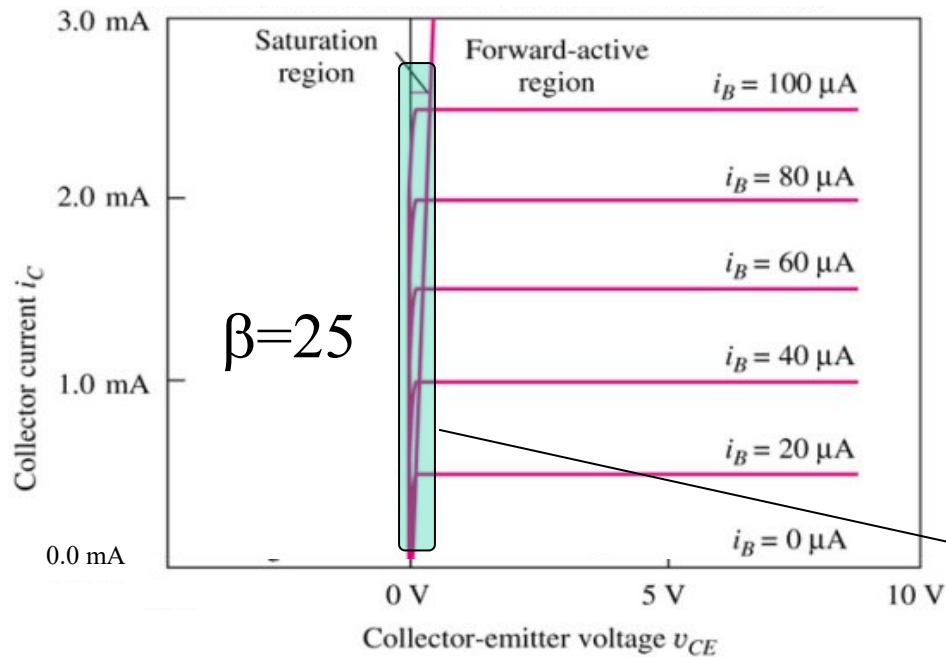
Caratteristiche del Transistore Bipolare: Regione attiva diretta



Per $i_B > 0$ e per v_{CE} sufficientemente grande siamo in regione attiva diretta, con $i_C = \beta i_B$

Caratteristiche del Transistore Bipolare:

Regione di saturazione



Quando la v_{CE} è piccola entriamo in regione di saturazione

Limite fra regione attiva diretta e saturazione

In regione attiva diretta la giunzione Base-Emettitore è polarizzata direttamente, e quindi: $v_{BE} \approx 0.7V$

In regione attiva diretta la giunzione Base-Collettore è polarizzata inversamente. Ricordiamo che la tensione ai capi di una giunzione polarizzata direttamente è all'incirca compresa fra 0.6 V – 0.8 V. Pertanto affinché la giunzione base-emettitore possa essere considerata inversamente polarizzata deve essere: $v_{BC} < 0.5V$.

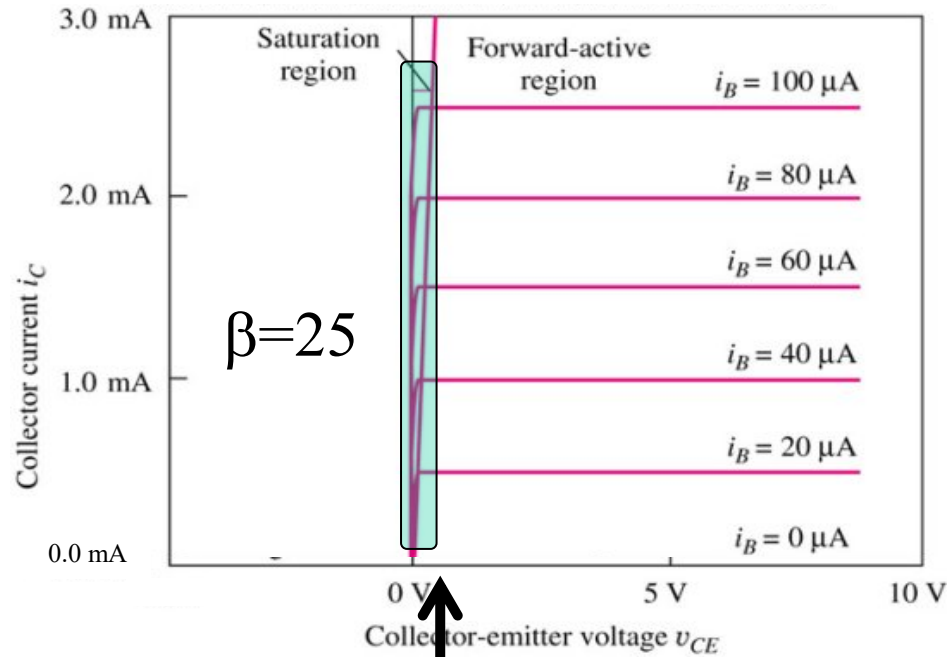
Limite fra regione attiva diretta e saturazione

$$v_{BE} \approx 0.7V; \quad v_{BC} < 0.5V \quad \Rightarrow \quad v_{CE} > 0.2V$$

In definitiva, in regione attiva diretta abbiamo:

$$v_{CE} > V_{CE,sat} \quad \text{con:} \quad V_{CE,sat} \approx 0.2V$$

Regione di saturazione

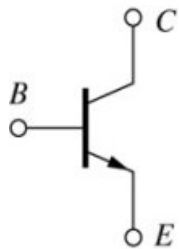


$$V_{CE,sat} \approx 0.2\text{V}$$

Modelli semplificati

Vediamo i modelli semplificati del BJT per le varie regioni di funzionamento.

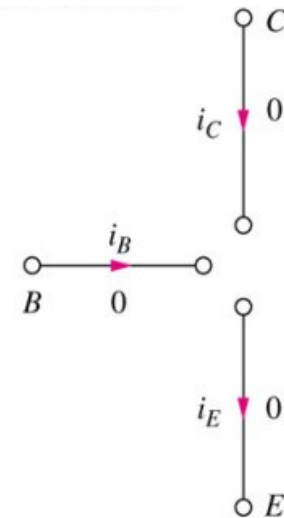
Modello semplificato in regione di interdizione



In regione di interdizione
entrambe le giunzioni sono
inversamente polarizzate ed il
dispositivo non lascia passare
corrente:

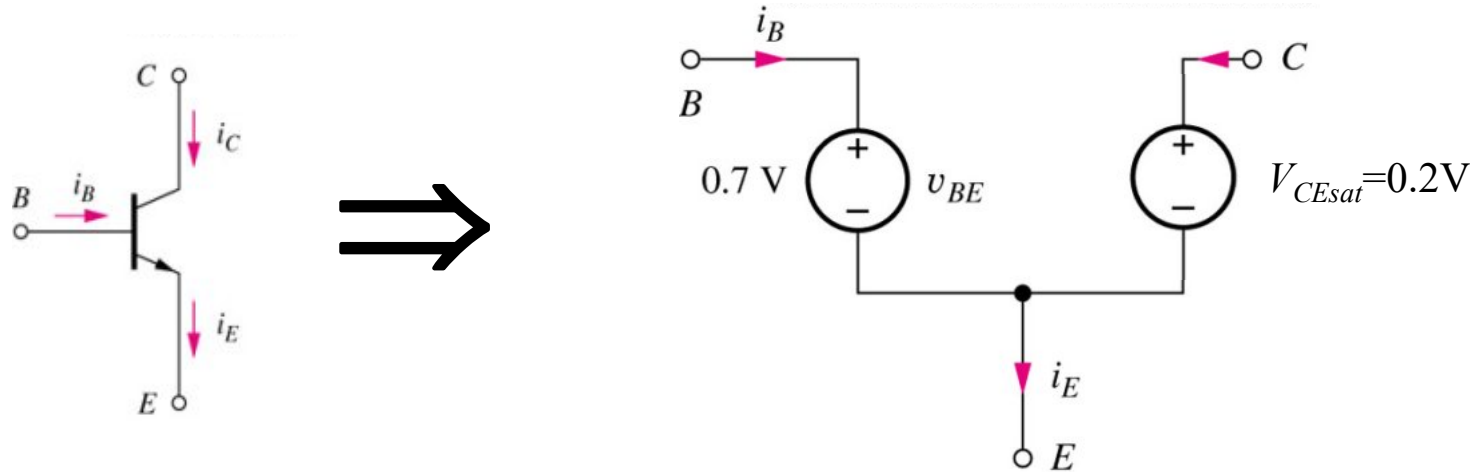
$$v_{BE} < 0, v_{BC} < 0$$

$$i_C \approx 0; i_E \approx 0; i_B \approx 0$$



Modello semplificato in regione di saturazione

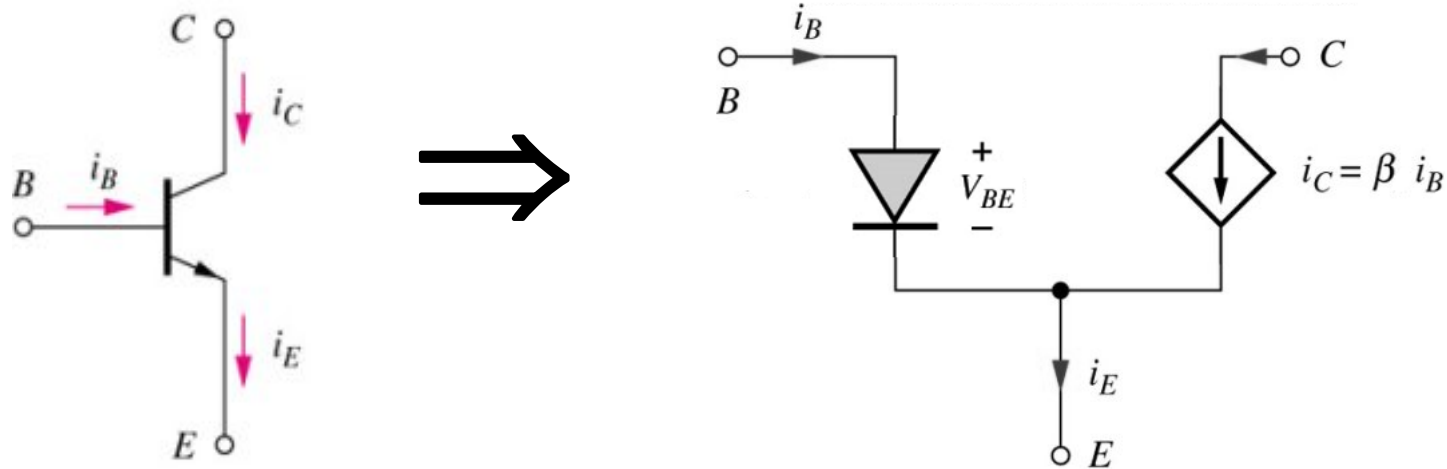
- In regione di saturazione entrambe le giunzioni sono polarizzate direttamente ed il transistor manifesta una piccola tensione, $V_{CEsat} \approx 0.2V$ fra collettore ed emettitore, detta tensione di saturazione.



Per le correnti ai terminali vale sempre il principio di Kirchhoff: $i_C + i_B = i_E$.

Modello in regione Attiva Diretta

Siamo particolarmente interessati al modello in regione attiva diretta, che è la regione in cui viene fatto lavorare il dispositivo quando opera come amplificatore.



- La giunzione base-emettitore, polarizzata direttamente, è rappresentata da un diodo.
- La corrente di collettore è espressa come: $i_C = \beta i_B$

Modello in regione Attiva Diretta

Osserviamo che la corrente che fluisce nel diodo Base-Emettore dipende esponenzialmente dalla v_{BE} , per cui:

$$i_B = I_0 e^{\left(\frac{v_{BE}}{V_{th}}\right)}$$

Ricordiamo che: $V_{th} = kT/q = 25$ mV (temperatura ambiente) è la tensione termica (da non confondere con la tensione di soglia del MOS!).

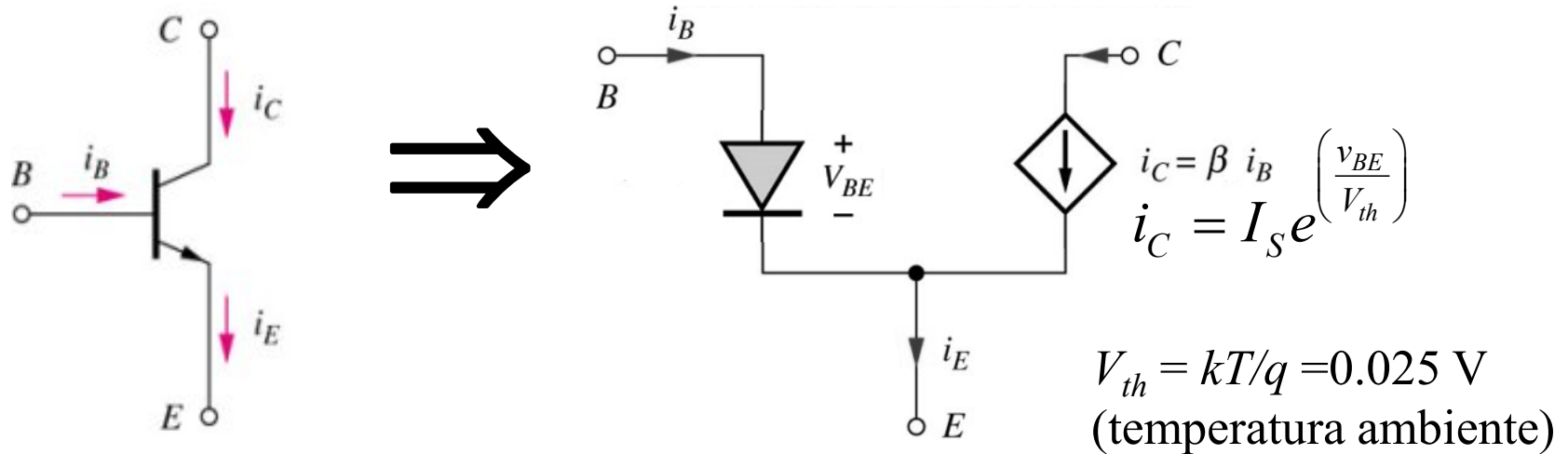
Poiché $i_c = \beta i_B$ risulta anche:

$$i_C = I_S e^{\left(\frac{v_{BE}}{V_{th}}\right)}$$

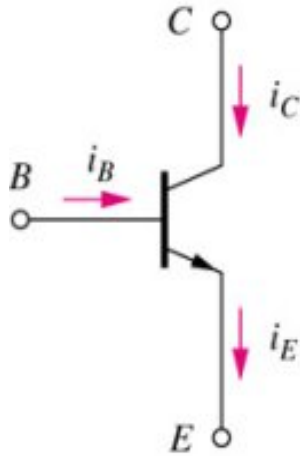
con: $I_S = \beta I_0$

Modello in regione attiva diretta

In definitiva, nel modello del transistor in regione attiva diretta la i_C può essere scritta in due modi equivalenti:



I parametri α e β



In regione attiva diretta

abbiamo: $i_C = \beta i_B$

Poiché, per il principio di

Kirchhoff, $i_E = i_C + i_B$ possiamo

scrivere:

$$i_E = (\beta + 1) i_B$$

Si ha, dunque: $i_C = \frac{\beta}{\beta + 1} i_E$

Posto: $\alpha \triangleq \frac{\beta}{\beta + 1}$ si ha: $i_C = \alpha i_E$

I parametri α e β

$$i_C = \beta i_B; \quad i_C = \alpha i_E$$

β guadagno di corrente a emettitore comune

α guadagno di corrente a base comune

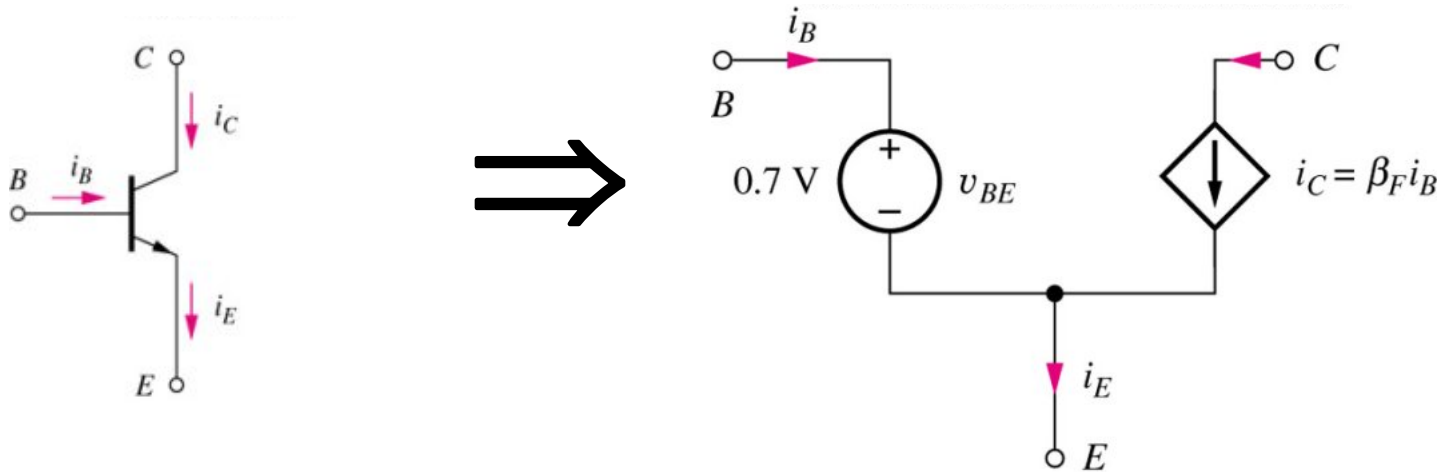
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}; \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$10 < \beta < 500 \Rightarrow 0.95 < \alpha < 1.0$$

Si noti che α è prossimo ad uno e quindi si può spesso adoperare l'espressione semplificata: $i_C \approx i_E$

Modello semplificato in regione Attiva Diretta

Un modello estremamente semplificato, valido in regione attiva diretta, si può ottenere utilizzando il modello a caduta costante per il diodo base-emettitore



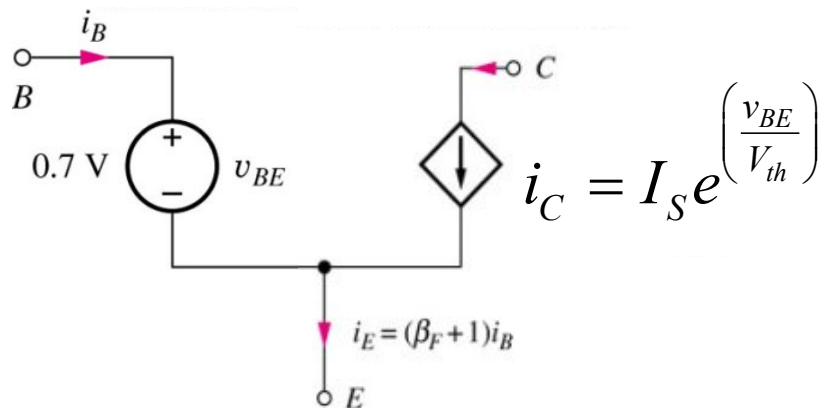
Nota importante: in questo modello semplificato la i_C DEVE essere espressa come: $i_C = \beta i_B$

Attenzione all'uso dei modelli!

È un grave errore utilizzare il modello a caduta costante del diodo

base-emettitore e poi assumere $i_C = I_S e^{\left(\frac{v_{BE}}{V_{th}}\right)}$

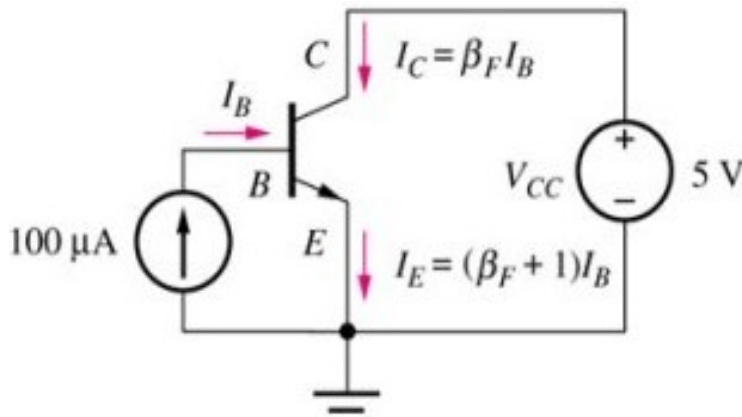
Lo schema nella figura seguente **è completamente errato:**



Se si approssima con un valore costante la tensione base-emettitore, non ha senso utilizzare la relazione esponenziale fra i_C e v_{BE} che porterebbe al risultato, privo di senso fisico, che la i_C è anch'essa costante!

Modello semplificato in regione Attiva Diretta (esempio)

- **Problema:** Stimare correnti e tensioni nel circuito riportato in basso.
- **Dati:** $\alpha = 0.95$, $V_{CC} = +5 \text{ V}$, $I_B = 100 \mu\text{A}$
- **Ipotesi:** Utilizzeremo il modello semplificato del transistor bipolare
- **Analisi:** Il generatore di corrente polarizza direttamente la giunzione base-emettitore, $V_{BE} > 0$, $V_{BC} < 0$, ed il transistor è in regione attiva diretta



$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0.95}{0.05} = 19$$

$$I_C = \beta I_B = 19 \times 100 \mu\text{A} = 1.90 \text{ mA}$$

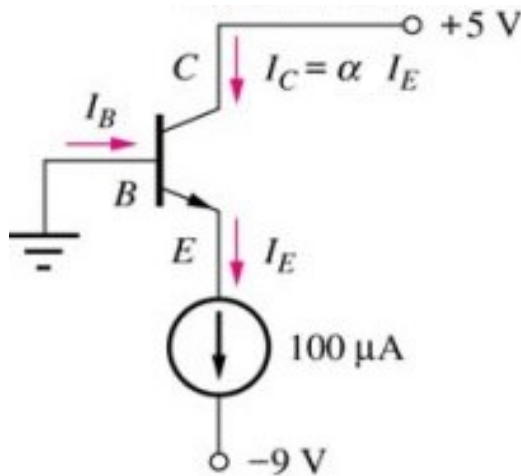
$$I_E = (\beta + 1) I_B = 20 \times 100 \mu\text{A} = 2.00 \text{ mA}$$

$$V_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = V_{BE} - V_C = -4.3 \text{ V}$$

Modello semplificato in regione Attiva Diretta (esempio 2)

- **Problema:** Stimare tensioni e correnti nel circuito riportato in basso
- **Dati:** $\alpha = 0.95$, $V_C = 5 \text{ V}$, $I_E = 100 \mu\text{A}$
- **Ipotesi:** Utilizzeremo il modello semplificato del transistor bipolare
- **Analisi:** Il generatore di corrente polarizza direttamente la giunzione base-emettitore, $V_{BE} > 0$, $V_{BC} < 0$, ed il transistor è in regione attiva diretta.



$$I_C = \alpha I_E = 0.95 \times 100 \mu\text{A} = 95 \mu\text{A}$$

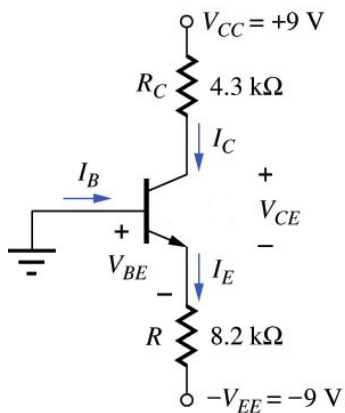
$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{0.95}{1-0.95} = 19$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta+1} = \frac{100 \mu\text{A}}{20} = 5 \mu\text{A}$$

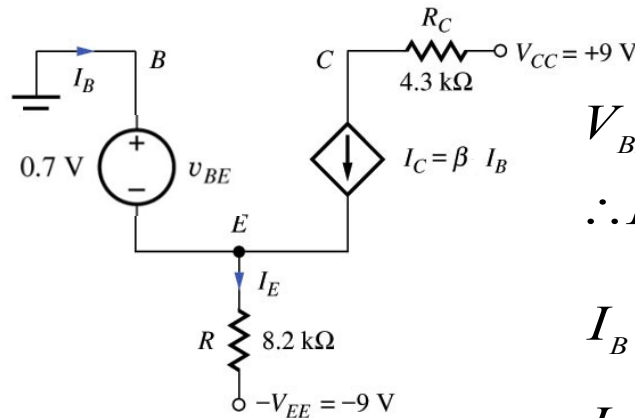
$$V_{BE} \approx 0.7 \text{ V} \Rightarrow V_E \approx -0.7 \text{ V}$$

Modello semplificato in regione Attiva Diretta (esempio 3)

- **Problem:** Stimare tensioni e correnti nel circuito riportato in basso
- **Dati:** $\beta = 50$
- **Ipotesi:** Il dispositivo opera in regione attiva diretta, con: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$
- **Analisi:**



(a)



(b)

$$V_{BE} + 8200I_E - V_{EE} = 0$$

$$\therefore I_E = \frac{8.3\text{V}}{8200\Omega} = 1.01 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = \frac{1.02\text{mA}}{51} = 19.8 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 0.990 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - (-V_{BE}) =$$

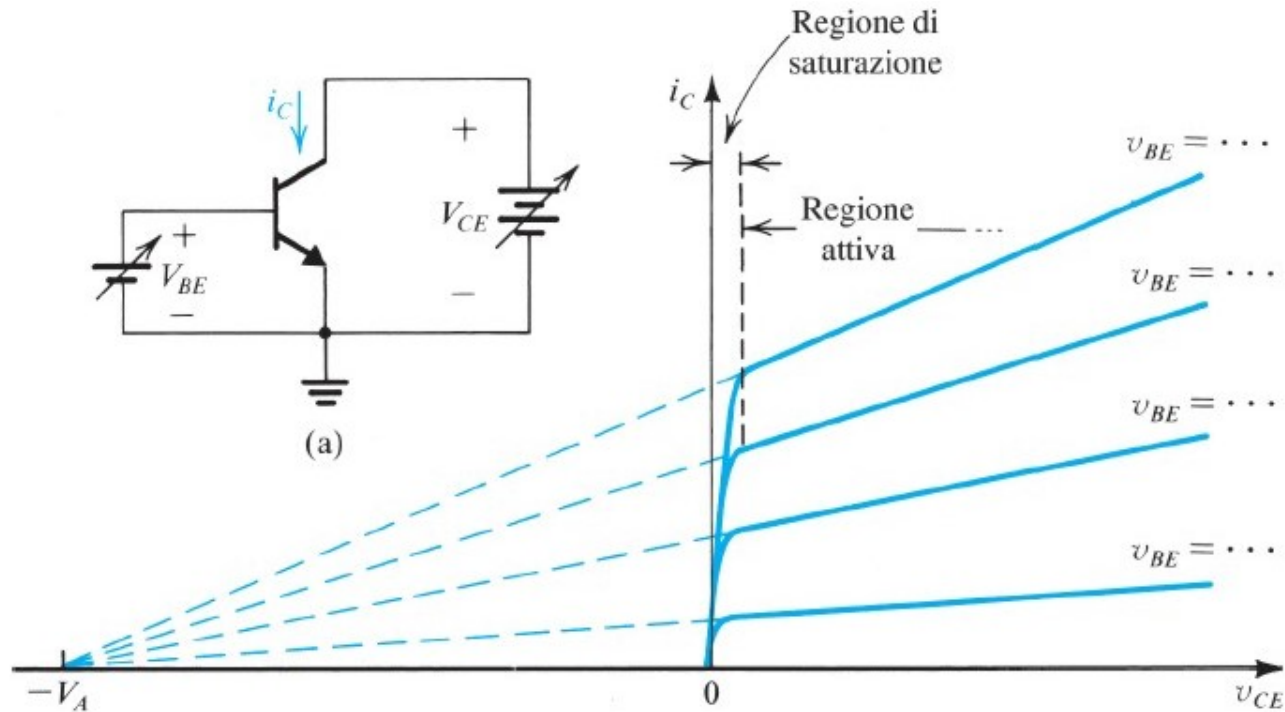
$$9 - 0.99\text{mA}(4.3\text{K}) + 0.7 = 5.44 \text{ V}$$

Tensione di Breakdown

- Se la tensione inversa applicata ad una delle due giunzioni del transistor bipolare è troppo grande, il diodo corrispondente entra in regione di breakdown
- Il diodo base-emettitore ha una tensione di breakdown relativamente ridotta (tipicamente compresa fra 3 e 10 V); il diodo base-collettore può essere progettato in modo da poter sostenere tensioni inverse molto maggiori.

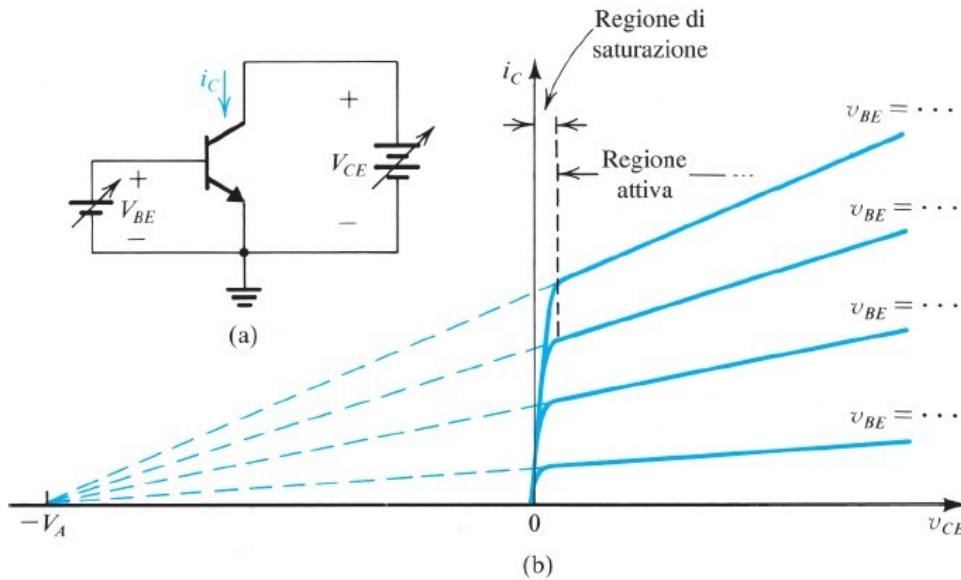
Effetto Early

- Le caratteristiche di uscita dei transistori bipolari mostrano una seppur debole dipendenza della i_C dalla v_{CE} in regione attiva diretta; questo fenomeno è denominato effetto Early:



Tensione di Early

- Effetto Early: Se le caratteristiche di uscita di un transistor bipolare sono estrapolate per tensioni v_{CE} negative, le curve si intersecano (approssimativamente) in un punto comune caratterizzato da $v_{CE} = -V_A$
- La tensione V_A è denominata tensione di Early ed è tipicamente compresa fra 15 V e 150V.



$V_A \gg v_{CE}$: la correzione sulla corrente è modesta. Più rilevante è l'effetto sull'amplificazione che il dispositivo può fornire, come vedremo più avanti.

Capacità interne del dispositivo

Il dispositivo mostra due capacità parassite: C_{μ} è relativa alla giunzione base-collettore, mentre C_{π} è relativa alla giunzione base-emettitore.

In regione attiva diretta risulta $C_{\mu} \ll C_{\pi}$ in quanto la giunzione base-collettore è polarizzata inversamente, mentre la giunzione base-emettitore è polarizzata direttamente

