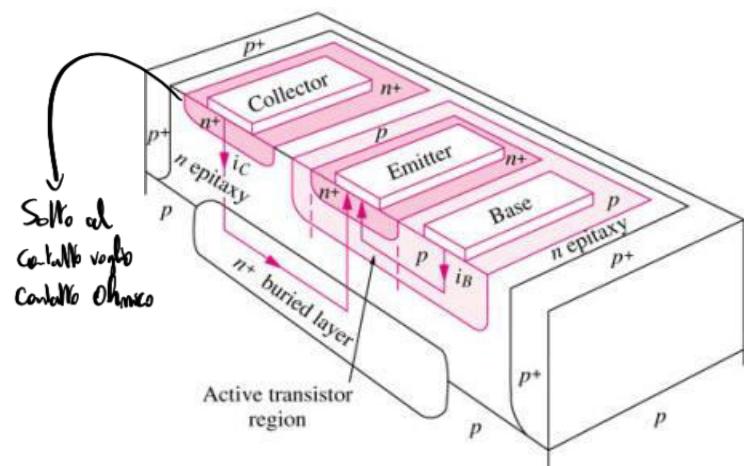
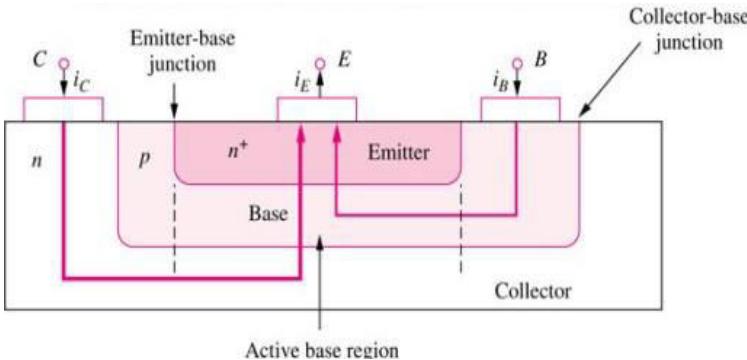


Il transistore bipolare: struttura fisica



- E' formato da 3 regioni alternate di materiale semiconduttore di tipo p e di tipo n chiamate emettitore (E), base (B) e collettore (C)
- La maggior parte della corrente entra dal collettore, attraversa la regione di base ed esce dall'emettitore. Una piccola corrente entra dalla base, attraversa la giunzione base-emettitore ed esce dall'emettitore.
- Il flusso dei portatori nella regione di base, situata sotto la regione molto drogata (n^+) di emettitore, definisce le caratteristiche i-v del BJT.

Bipolar Junction Transistor:

Comportamento basato sullo spostamento degli elettroni.

3 Regioni:

- Emissore
- Base
- Collettore

Una dentro l'altra.

Differenza: Non è simmetrico. Se scambio p-n-p in modo diverso.

• Si parla di substrato di tipo n (collettore: zione concreta). Al suo interno di droga di tipo p. Dovendo un'altra inversione. Drogaggio in maggioranza di portata. Sarà n^+ .

Drogaggi a scala. Base + drogata del substrato.

Si possono vedere come 2 diodi. Un diodo np collegato a un diodo pn anche se non p-n-p.

Confronto di collettore ed emettitore sono molto vicini

Dispositivo a 3 terminali in cui è possibile controllare il flusso di carica attraverso 2 terminali con un terzo terminale.

⇒ Substrato n non molto drogato (corrisponde a due), all'interno regione p base e poi una regione n^+ molto drogata, emettitore.

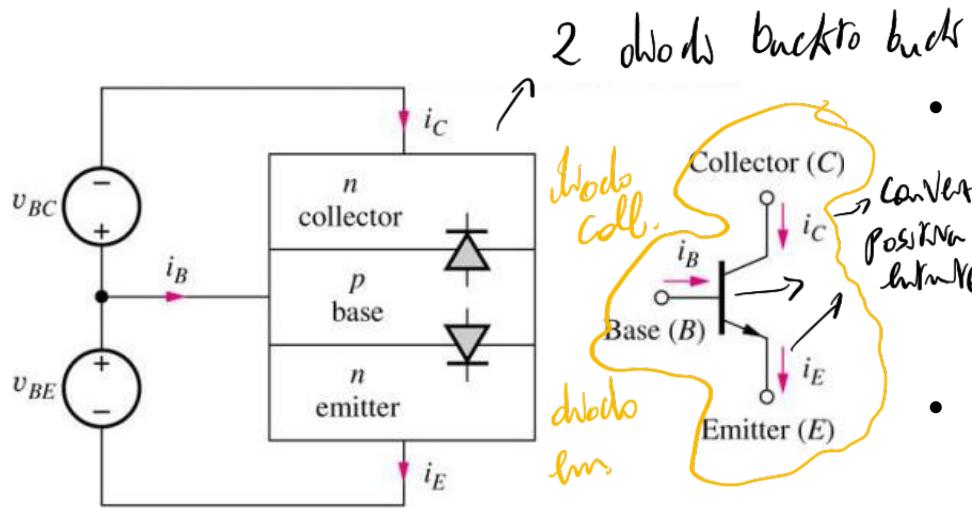
Buried Layer diminuisce resistenza.

Base deve essere abbastanza sottile per consentire inversione di cariche e il trasporto verso il collettore.

NOTA: Oggetto non è simmetrico (se scambio connettore e emettitore cambia) (non come drain e source)

Il modello del trasporto nel

transistore npn (base n, P emettitore...)



- La piccola larghezza della regione di base determina l'accoppiamento delle due giunzioni pn opposte.
- L'emettitore inietta elettroni nella regione di base, quasi tutti passano attraverso la sottile regione di base e sono poi raccolti dal collettore

- Le tensioni base-emettitore v_{BE} e base-collettore v_{BC} determinano le correnti nel transistore e se positive polarizzano direttamente le rispettive giunzioni pn
- Le correnti ai terminali sono la corrente di collettore (i_C), la corrente di base (i_B) e la corrente di emettitore (i_E).
- La differenza principale tra BJT e FET è che i_B è significativa, mentre $i_G = 0$.

nel mosfet

→ Tempo di transito degli elettroni nella base (dove sono portatori minoritari) dipende.

⇒ Area elettron $\Rightarrow \mu_n > \mu_p$. Anelli velocità comuni

Modello diodo back to back: diodo di emissione \Rightarrow base emissione
e diodo base collettore. \rightarrow le due regioni sono separate.

Se saldassi 2 diodi così non ci sarebbe effetto della base. Parlano

Differenza MOSFET: terminale di controllo (base) assorbe corrente (MOSFET: condensatore \Rightarrow $O=n$)

Bipolar Junction Transistor.

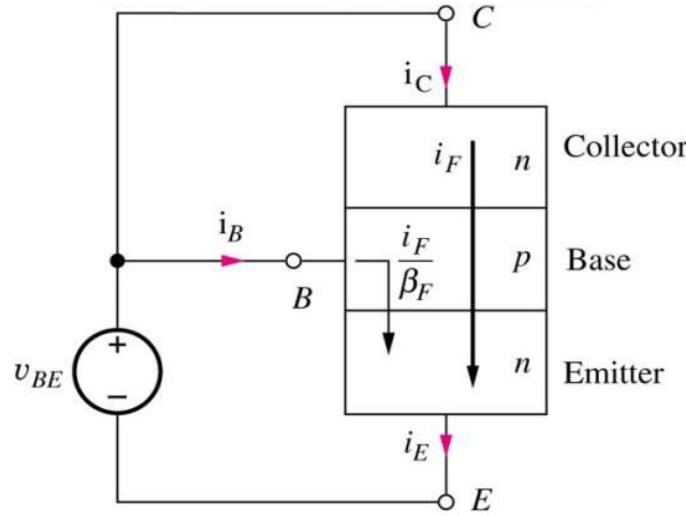
Convenzione simbolo: freccia uscente per indicare emettitore.

Lui è più veloce del pnp perché si muovono elettroni.

Emissione inversa elettronica. Quasi tutti passano e vengono raccolti da collettore.

Transistor bipolare: sia elettroni che buame.

Transistore *npn*: Caratteristiche di funzionamento diretto



La corrente di base è data da

$$i_B = \frac{i_F}{\beta_F} = \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$20 \leq \beta_F \leq 500$ È il guadagno di corrente diretto a emettitore comune

La corrente di emettitore è data da

$$i_E = i_C + i_B = \frac{I_S}{\alpha_F} \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$0.95 \leq \alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} \leq 1.0$ È il guadagno di corrente diretto a base comune
 ↳ Pedice: Forward

Nella regione attiva diretta,

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

$$\frac{i_C}{i_E} = \alpha_F$$

La corrente diretta di trasporto è

$$i_C = i_F = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

I_S è la corrente di saturazione

$$10^{-18} \text{ A} \leq I_S \leq 10^{-9} \text{ A}$$

$V_T = kT/q = 0.025 \text{ V}$ a temperatura ambiente

Rispetto al mosfet, visto che abbiamo diodi, questo modello segue leggi esp.

$\beta_{\text{FORWARD}} \neq \beta_{\text{REVERSE}}$ quanto cambiamo regime di lavoro. Se β alto, $\alpha \rightarrow 1$.

Tutto regolato da Tensione Base-Emettitore.

Equazioni valgono in FUNZ. DIRETTO.

BC controllata e BE accesa: polo positivo su P.
↳ Controllato
↳ DIODO SPENTO
DIODO ACCESO

Scambio Ruoli;

Equat. complesse perché i diodi non sono veri appolarizzatori.
↳ regioni di funzionamento. 3 possibilità se poniamo 2 gerazioni.

FUNZIONAM. DIRETTO: base-emettitore direttamente polarizzata, base-collettore inverso polarizz.

$\delta_B = \dots$ ↑
Fattore β_{FORWARD} dipende da tensione \Rightarrow EMETTITORE SOLISAMENTE A MASSA

Se è proprio equazione di un diodo, perché la gerazione Collettore-base è proprio un diodo.
Vive diodo base emettitore?

NOTA: $\chi_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} \Rightarrow$ GUADAGNO DI CORRENTE DIRETTO A BASE COMUNA
↳ Molte vicine a 1 ($\alpha \rightarrow 1$ se $\beta \rightarrow \infty$)

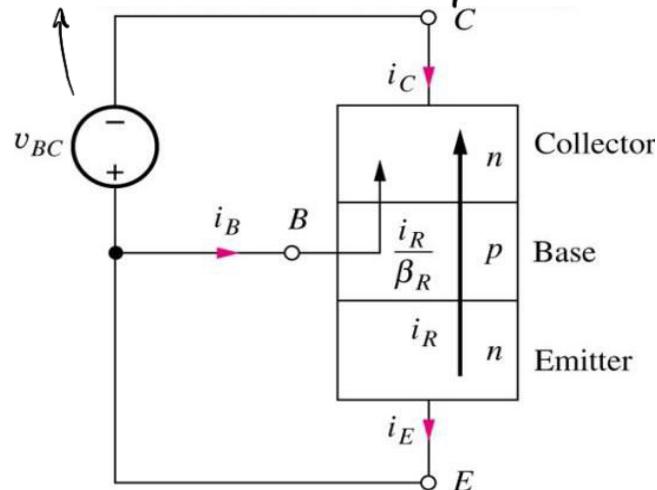
I_S molto piccolo ma variabile

RICORDA: Nella regione ATTIVA DIRETTA le eq. sono quelle e $\frac{\partial I_C}{\partial V_B} = \beta_F$

Transistore *npn* : Caratteristiche

di funzionamento inverso

Funz. inverso: batteria sopra.



La corrente inversa di trasporto è

$$i_R = -i_E = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

La corrente di base è data da

$$i_B = \frac{i_R}{\beta_R} = \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$0 \leq \beta_R \leq 20$$

Piccolo

È il guadagno di corrente inverso a emettitore comune

Le correnti di base nei modi di funzionamento diretto e inverso sono differenti a causa dell'asimmetria nei livelli di drogaggio nelle regioni di emettitore e collettore

La corrente di emettitore è data da

$$i_C = -\frac{I_S}{\alpha_R} \left[\exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$0 \leq \alpha_R = \frac{\beta_R}{\beta_R + 1} \leq 0.95$$

grande allegra om

V_{base com.} e non base emettore

È il guadagno di corrente inverso a base comune

Funzionamento inverso: Base collezione direttamente polarizzata e base emettitore inversa

\Rightarrow Valgono espr. simili cambiando il segno delle coneh.

β_R nuovo parametro. Non simmetria $\Rightarrow \beta$ molto più piccolo di $\beta_C \Rightarrow 0 \leq \beta_R \leq 20$

Transistore *npn* : Equazioni per il modello del trasporto completo per ogni polarizzazione

accesa offerta diretta, allora sarà negativa e massimale

$$i_C = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left(\exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right)$$
$$i_E = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \left(\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right)$$
$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] + \frac{I_S}{\beta_R} \left(\exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Il primo termine presente sia nell'espressione della corrente di collettore che di emettitore rappresenta la corrente trasportata attraverso la regione di base

Esiste una simmetria tra le tensioni base-emettitore e base-collettore nel definire la corrente principale del dispositivo

MODELLO DEL TRASPORTO

esponentiale negativo in caso.

Metto insieme i 2 modi di funzionamento per avere equazioni più generali

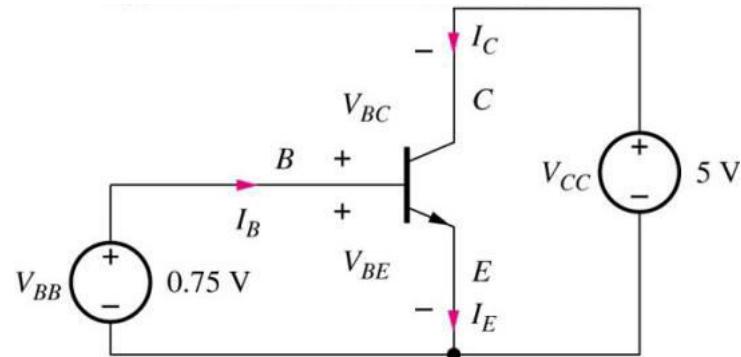
NOTA: Se diodi sono tutti e due access \Rightarrow Regime di saturazione: tutti e due pompano corrente nella base.

4^ condizione: diodi spenti; Regime di interdizione: possono correre molto trascurabili nel BST.

Nota: info del transistor dipendono molto da caratteristiche della base: spessore e drogaggio

RICORDA: differenza fra I_c e I_o è sempre molto piccola (legati da parametro α) mentre quella fra I_c, I_E e I_b è molto grande; B_F è grande

Calcoli con il modello di trasporto: Esempio



- Problema:** Determinare le tensioni e le correnti ai terminali
- Dati noti:** $V_{BB} = 0.75 \text{ V}$, $V_{CC} = 5.0 \text{ V}$, $I_S = 10^{-16} \text{ A}$, $\beta_F = 50$, $\beta_R = 1$
- Ipotesi:** Funzionamento a temperatura ambiente, $V_T = 25.0 \text{ mV}$.
- Analisi:** $V_{BE} = 0.75 \text{ V}$,
 $V_{BC} = V_{BB} - V_{CC} = 0.75 \text{ V} - 5.00 \text{ V} = -4.25 \text{ V}$

Utilizzando le espressioni per le correnti ai terminali,

$$I_C = 1.07 \text{ mA}$$

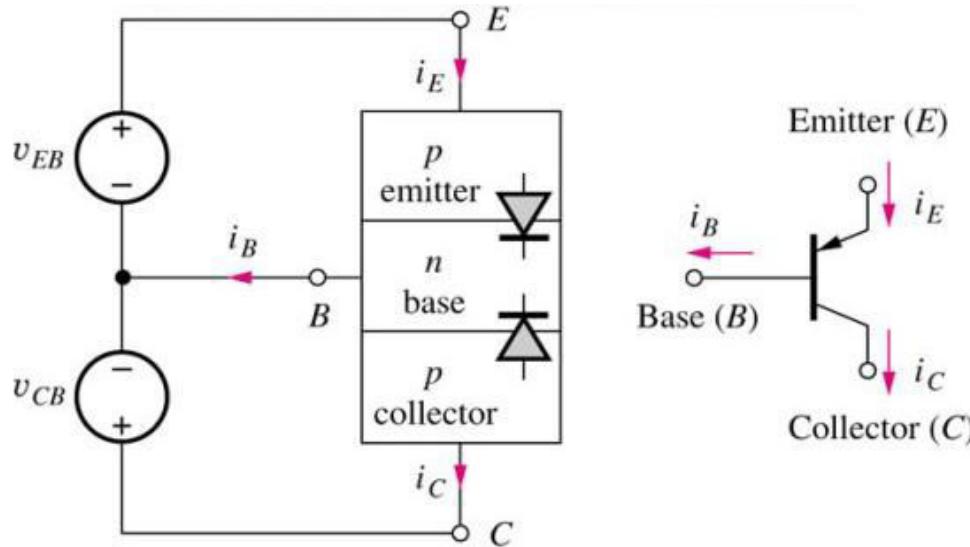
$$I_E = 1.09 \text{ mA}$$

$$I_B = 21.4 \mu\text{A}$$

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.07 \text{ mA}}{0.0214 \text{ mA}} = 50$$

$$\alpha_F = \frac{I_C}{I_E} = \frac{1.07 \text{ mA}}{1.09 \text{ mA}} = 0.982$$

Transistore *pnp* : Struttura



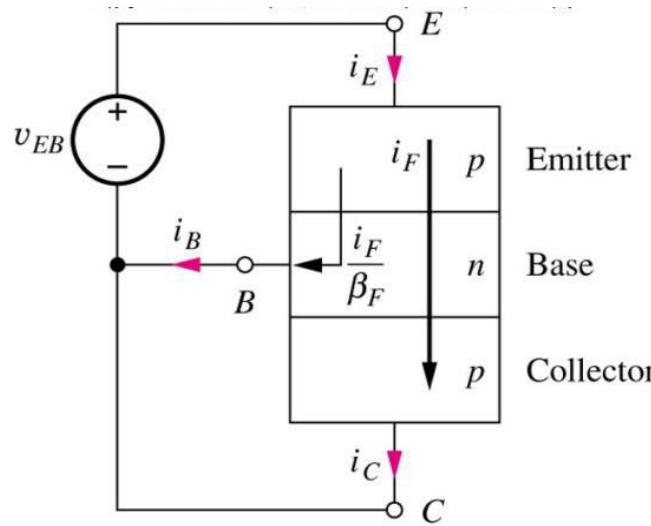
- Le tensioni v_{EB} e v_{CB} sono positive quando polarizzano direttamente le rispettive giunzioni pn.
- La corrente di collettore e la corrente di base escono dal transistore, mentre la corrente di emettitore entra nel dispositivo.

Molto simile: Simbolo ha freccia bidirezionale per connessione.

Su sinistra per connessione: per indicare flussi di corrente: entra in emettitore, esce dalla base e este da emettitore.

Equazioni sempre uguali. Tensioni con pedici invertiti: V_{BB} vs $V_{B\bar{B}}$.

Transistore *pnp* : Caratteristiche di funzionamento diretto



La corrente di trasporto diretta è

$$i_C = i_F = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Non lo usiamo

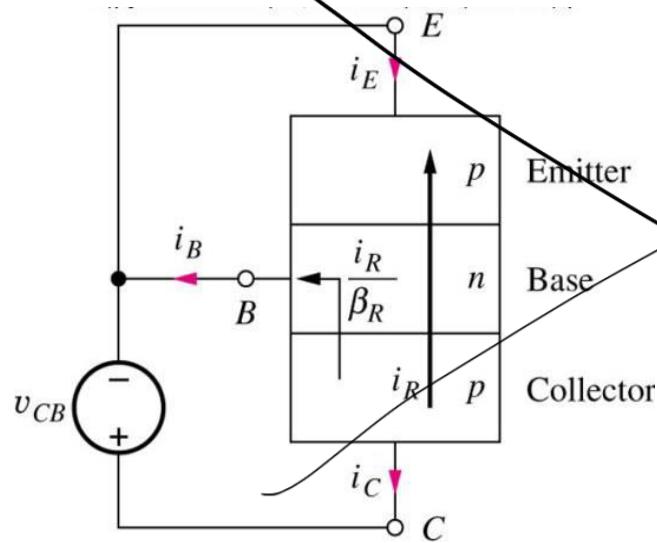
La corrente di base è data da

$$i_B = \frac{i_F}{\beta_F} = \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

La corrente di emettitore è data da

$$i_E = i_C + i_B = I_S \left[1 + \frac{1}{\beta_F} \right] \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Transistore *pnp* : Caratteristiche di funzionamento inverso



La corrente di base è data da

$$i_B = \frac{i_F}{\beta_R} = \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp\left(\frac{v_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

La corrente di emettitore è data da

$$i_E = -I_S \left[1 + \frac{1}{\beta_R} \right] \exp\left(\frac{v_{CB}}{V_T}\right) - 1$$

La corrente di trasporto inversa è

$$i_R = -i_E = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Transistore *pnp* : Equazioni per il modello del trasporto completo per ogni polarizzazione

$$i_C = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{v_{CB}}{V_T}\right) \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp\left(\frac{v_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

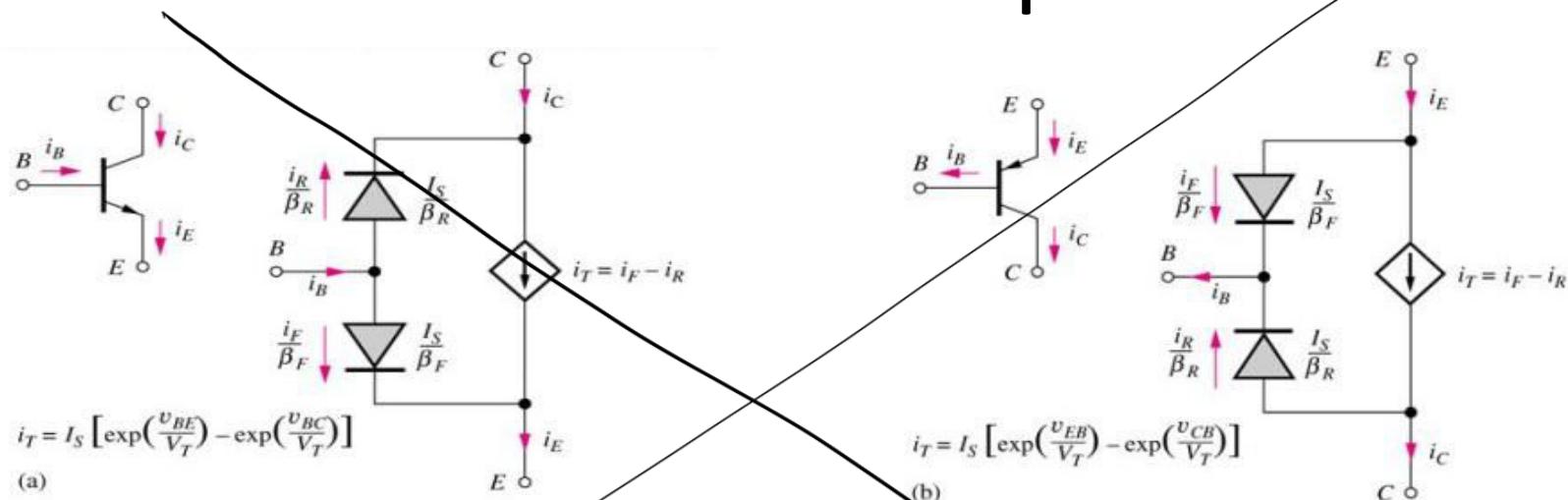
$$i_E = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{v_{CB}}{V_T}\right) \right] - \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp\left(\frac{v_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] + \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp\left(\frac{v_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Il primo termine presente sia nella corrente di emettitore che in quella di collettore rappresenta la corrente che passa attraverso la regione di base

Esiste una simmetria tra le tensioni base-emettitore e base-collettore nel definire la corrente principale del dispositivo

Rappresentazioni circuitali del modello di trasporto



In un transistore *npn* (analoghe espressioni si trovano per i transistori *pnp*), la corrente totale che attraversa la regione di base è rappresentata da un generatore di corrente dato da:

$$i_T = i_F - i_R = I_S \left| \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{v_{RC}}{V_T}\right) \right|$$

Le correnti relative ai diodi corrispondono alle due componenti della corrente di base

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left| \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right| + \frac{I_S}{\beta_R} \left| \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right|$$

Regioni di funzionamento dei transistori bipolari

Ma non è saturazione

Giunzione Base-Emettore	Giunzione Base-Collettore	
	Polarizzazione inversa	Polarizzazione diretta
Polarizzazione diretta	Regione attiva diretta (buon amplificatore) ①	Regione di saturazione (interruttore chiuso) ②
Polarizzazione inversa	Regione di interdizione (Interruttore aperto) ③	Regione attiva inversa (scarsa amplificazione) ④

2 giunzioni;

4 configurazioni

Saturaz. di mosfet:
 ⇒ Regime attivo di un NPN
 di bipolare

Stati logici

Switch $\rightarrow \beta_R$
 α_R

↳ Possibilità che tra i 2 punti ci sia una tensione molto bassa: passa tutto in concreto Aperto, resistenza alta.

0-1 logico: Passaggio del transistor bipolare tra due stati

②-③ Passano dall'una all'altra.

② → Passa molta corrente. Diretta polarità

③ → Tutto e due inverso. Non arriva niente nelle basi. Regioni di connessione e smistatore separate.

① Amplificatore: funzione B amplifica la corrente di base portandola sul connettore

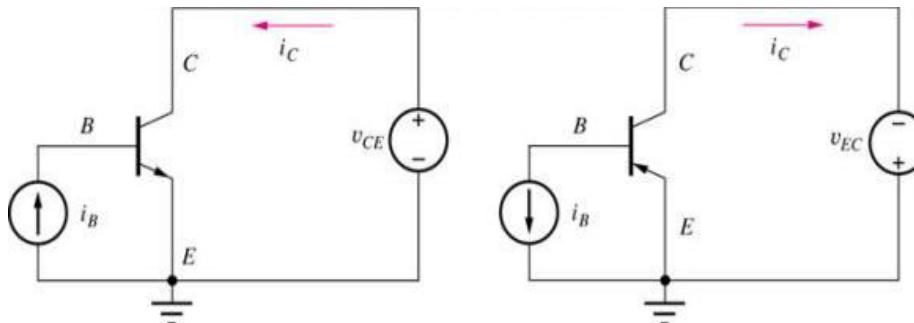
~~EMETTORE VS BASE COMUNE!~~

(Massa)

Potenziale comune
fra le 2
metà

Caratteristiche $i-v$ del transistore bipolare:

Caratteristiche di uscita a emettitore comune



Per $i_B = 0$, il transistore è in interdizione. Se $i_B > 0$, anche i_C cresce.

$$V_C > V_B > V_E \Rightarrow \text{Polarizz. inversa}$$

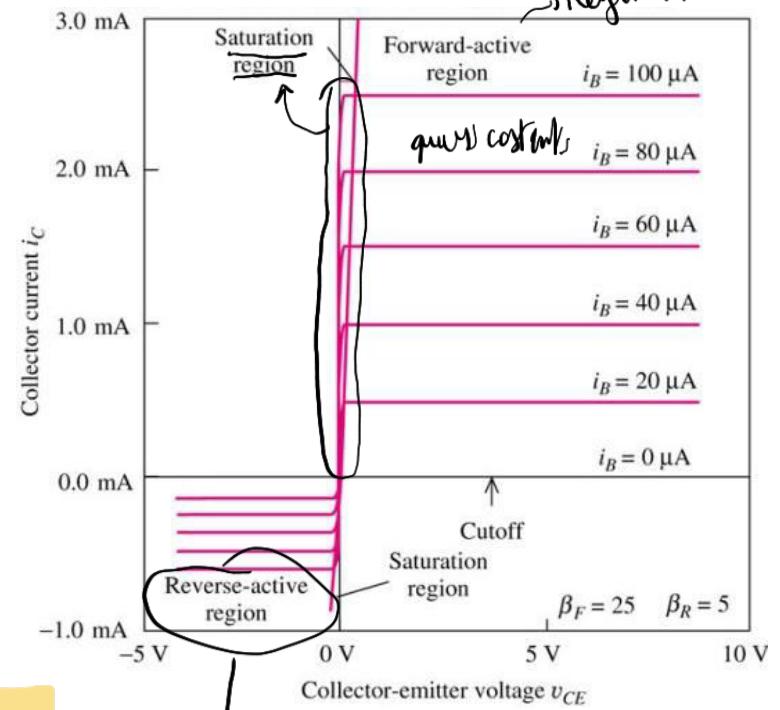
Per $v_{CE} > v_{BE}$, un transistore npn è in regione attiva diretta, $i_C = \beta_F i_B$ è debolmente dipendente da v_{CE} (effetto Early).

Per $v_{CE} < v_{BE}$, il transistore è in saturazione

$$V_B > V_C \quad V_E > V_C \Rightarrow \text{Polarizz. diretta}$$

Per $v_{CE} < 0$, i ruoli di collettore e emettitore si invertono

$$V_E > V_B > V_C$$



Tensione sulla
maggior parte della
caratteristica
sia che sia insieme
dovute alla maggior parte
della maggior parte

Tensione CE sulla maglia di uscita

N₃ parametri di base.

Regione attiva diretta: se quasi costante, effetto Early, aumento della
condensazione diminuisce dimensione base.

EMETTORE COMUNE: Potenziale comune tra le due maglie.

2 quant. come se fossero due.

4 regioni di funzionamento possibili del bussola.

Negli stadi alto e basso usiamo diayode.

Egnati sono esponenziali, c'è modello del bussola con cui si calcola tutto

Tipi come non si usano eganti per il calcolo esponenziale.

Parametri β e γ legati da relazione vista

DA RICORDARE

Simile a mosfet: Tensione tra connettore ed emettore (drain e source)

Su y ha come la collezione. Parametro di controllo (Mosfet Tensione V_{GS}) \Rightarrow qui come la base.

Rispetto al mosfet: Simile. Zona di cui cresce e curva a giri costante. Ma qui zona inversa che esiste perché componente non è simmetrico. Comandi con automa più facile.

Regione di Cut-off $\Rightarrow V_B = 0$ e le 2 zone sono divergenti poli opposte.

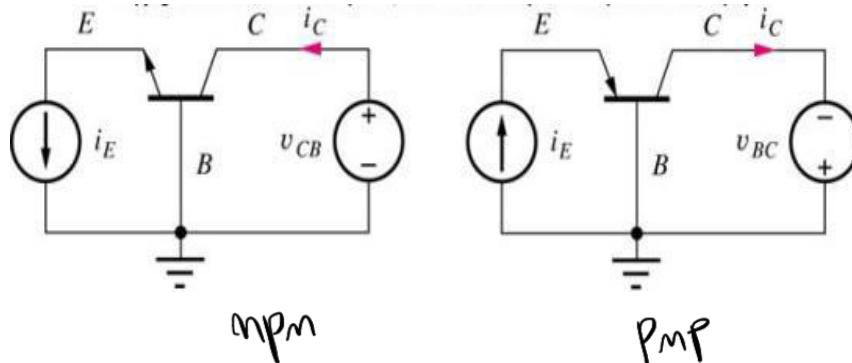
Regione di saturazione = Tensione molto piccola e cresce la regione di corrente. (V_{DS} piccolo)

Regione attiva diretta \Rightarrow corrente costante, regione attiva inversa \rightarrow saturazione del mosfet.

SIMILITUDINE: Regione attiva diretta cresce prima; Tensione inversa alla gittone base-collettore
Fanno ad allungare la regione di saturazione e ridurre la tensione della base. Più
facile che le corde passino \Rightarrow leggero incremento di corrente. **EFFETTO EARLY**

Caratteristiche $i-v$ del transistore bipolare:

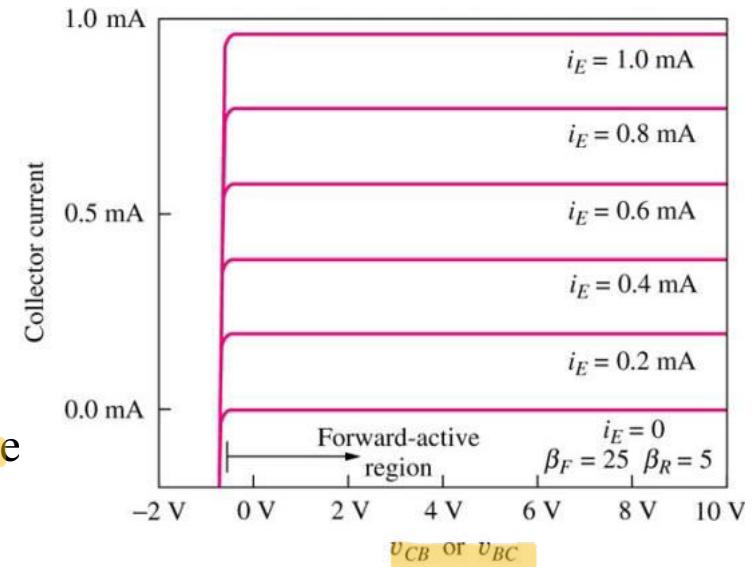
Caratteristiche di uscita a base comune (Massa usually)



Per $v_{CB} > 0$, un transistore npn si trova nella regione attiva diretta, $i_C = i_E$ è indipendente dalla tensione.

Per $v_{CB} < 0$, il diodo base collettore viene polarizzato direttamente e i_C cresce esponenzialmente (in direzione negativa) non appena il diodo base-collettore entra in conduzione.

$$\textcircled{1} \quad V_c > V_B \rightarrow \text{condizone non attivo} \\ > V_E$$



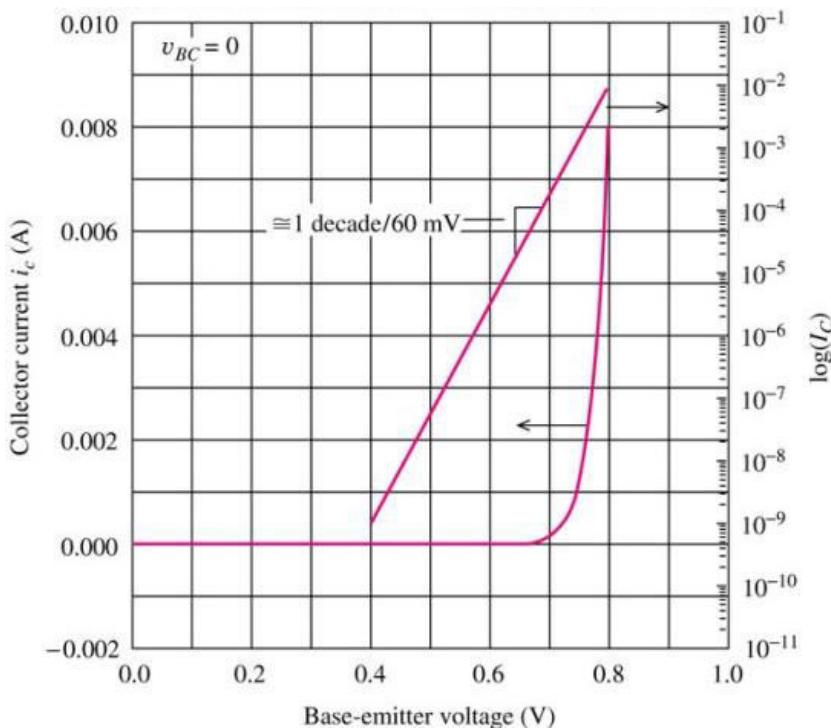
$$\downarrow \quad \downarrow \\ \text{MPM} \quad \text{PMP} \\ e^{-\frac{v_{CB}}{V_T}}$$

$$\textcircled{2} \quad V_C < V_B < V_E \\ \text{emettore non polarizzato.}$$

Se metto la base come invece dell'emettore \Rightarrow nello circuito di emettore e controllo le V_{CB} e V_{BC} e ho come soluz.

GIRO E MISTO A BASE COMUNE: V_{CB} e N_B . Parametri
N.E.

Caratteristiche i - v del transistore bipolare: Caratteristiche di uscita a emettitore comune



Tensione sulla maglia di ingresso è non sulla maglia di uscita (V_{CE})

Rappresenta la relazione tra la corrente di collettore e la tensione base-emettitore del transistore.

Risulta praticamente identica alla caratteristica di trasferimento di un diodo a giunzione pn

Impostando $v_{BC} = 0$ nell'espressione della corrente di collettore si ottiene

$$i_C = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

L'espressione della corrente di collettore ha la stessa forma dell'equazione di un diodo

Se devono ho la resistività,

Tensione base-emettitore = tensione di catodo con EMETTORE IN COMUNE

Maggior ingresso, base e masso (emettore a massa) e maggiore uscita da collettore e emettitore (a massa).

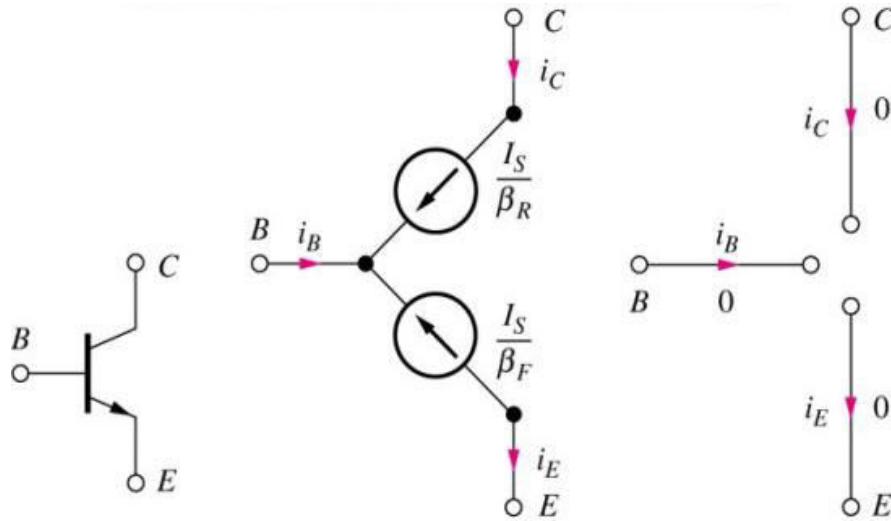
Andamento concave del collettore in funz. dell'uscita base-emettitore.

Controllo concave del collettore con questi.

Andamento simile a quelli di un diodo (diot base-emettitore) ma concava quello del collettore, non forcante collegato a base e emettitore.

Modello semplificato per la regione di interdizione

no eq. esponenziali



Nella regione di interdizione entrambe le giunzioni sono polarizzate inversamente, si dice quindi che il transistore è spento

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

Se supponiamo che

$$v_{BE} < -\frac{4kT}{q} \quad \text{e} \quad v_{BC} < -\frac{4kT}{q}$$

dove $-4kT/q = -0.1$ V, quindi le equazioni del transistore possono essere scritte nella forma semplificata

nella reg.
di interdizione
Modello

$$i_C = +\frac{I_S}{\beta_R}$$

$$i_E = -\frac{I_S}{\beta_F}$$

$$i_B = -\frac{I_S}{\beta_F} - \frac{I_S}{\beta_R}$$

Molto deboli
da equat. del
transporto con
Vce e Vbc
negative grandi

In waterstone's environment with palm trees, \Rightarrow intermediate species.

Modello semplificato per la regione attiva diretta ($T_{\text{transistor}} \pm 1$)

Nella regione attiva diretta, la giunzione base-emettitore è polarizzata direttamente e la giunzione base-collettore inversamente. $v_{BE} > 0$, $v_{BC} < 0$

Se supponiamo che $v_{BE} \geq 4 \frac{kT}{q} = 0.1V$ e $v_{BC} \leq -4 \frac{kT}{q} = -0.1V$

Allora le equazioni delle correnti ai terminali possono essere semplificate come

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + \frac{I_S}{\beta_R} = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$i_C = \alpha_F i_E$$

$$i_E = \frac{I_S}{\alpha_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + \frac{I_S}{\beta_F} = \frac{I_S}{\alpha_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

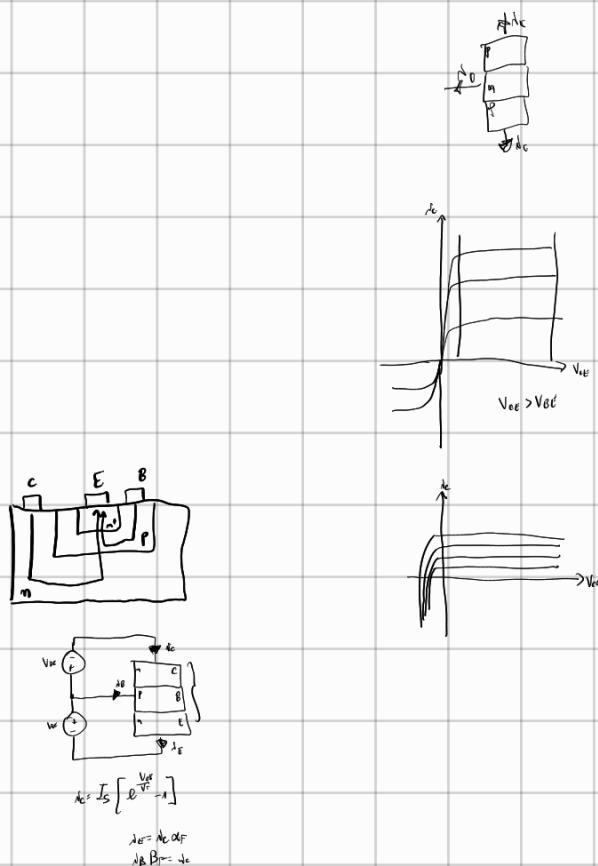
$$i_C = \beta_F i_B$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \frac{I_S}{\beta_F} - \frac{I_S}{\beta_R} = \frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

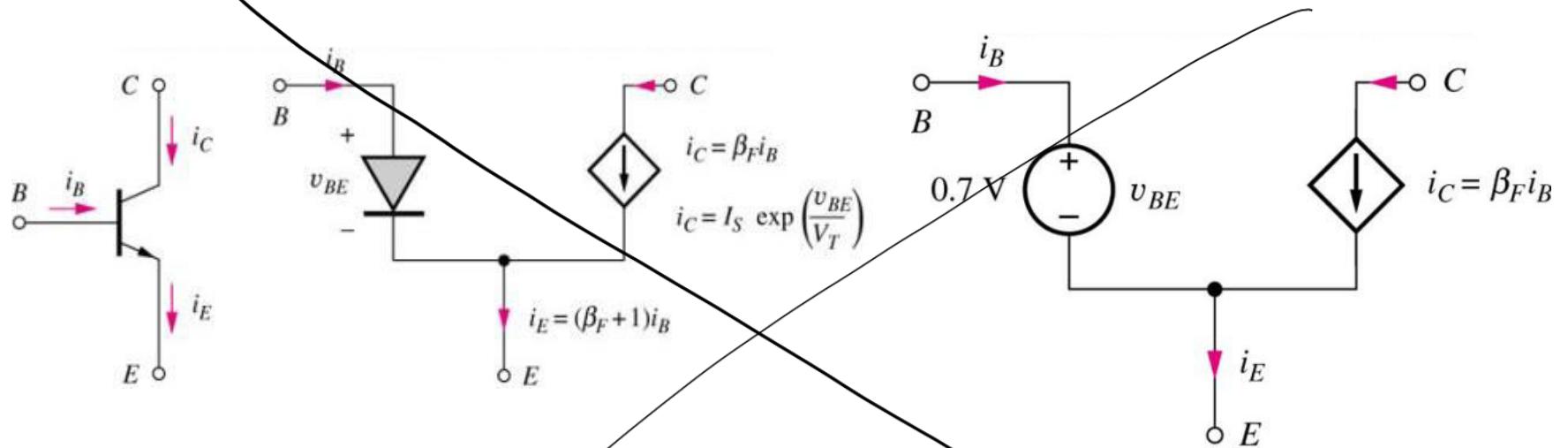
$$i_E = (\beta_F + 1)i_B$$

Il BJT è spesso considerato un dispositivo controllato in corrente, sebbene il comportamento in regione attiva diretta sia quello di un generatore di corrente controllato in tensione.

Nella zona attiva dunque i dopp. poliporti e' una struttura planare.
 esponendo V_{BC} vanno a 0.



Modello semplificato per la regione attiva diretta



- La corrente nel diodo base-emettitore è amplificata dal guadagno di corrente a emettitore comune β_F e appare sul collettore; le correnti di base e di collettore sono legate alla tensione base-emettitore da una relazione esponenziale.
- Il diodo base-emettitore viene rappresentato secondo il modello a caduta di tensione costante ($V_{BE} = 0.7$ V) dato che è polarizzato direttamente in regione attiva diretta.
- In regione attiva diretta le tensioni di base e emettitore differiscono per una caduta di tensione di 0.7-V associata a tale diodo.

Modello semplificato per la regione attiva inversa

Stessa cosa, con i
Preverse

In regione attiva inversa, il diodo base-collettore è polarizzato direttamente e quello base-emettitore inversamente

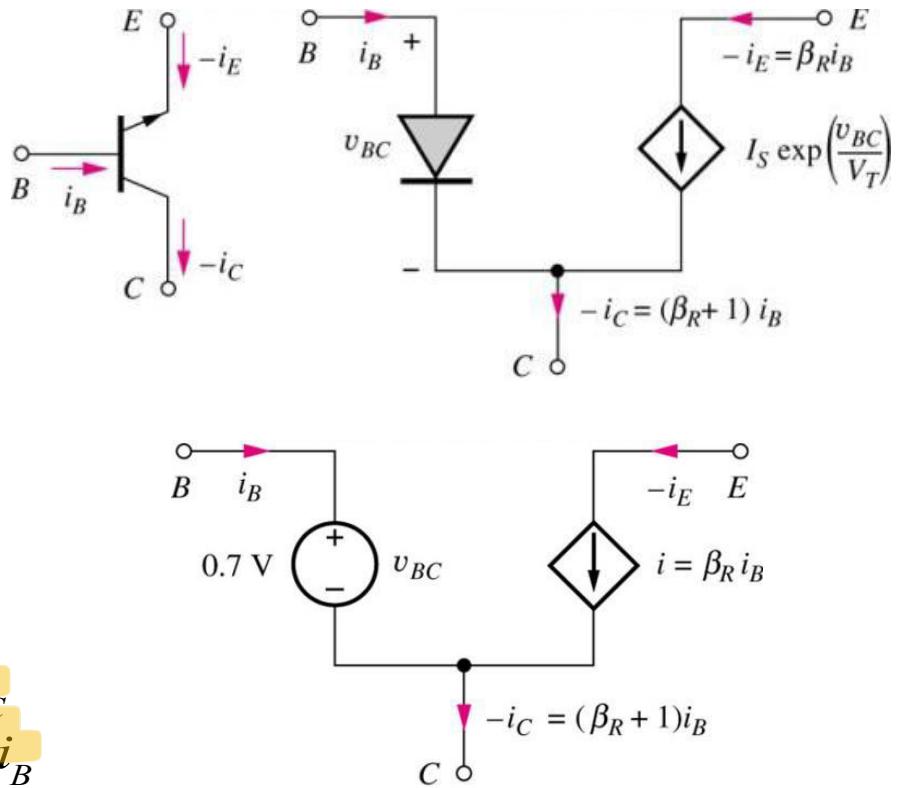
Semplificando, le equazioni sono:

$$i_C = \frac{I_S}{\alpha_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$

$$i_E = -I_S \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$

$$\begin{aligned} i_E &= \alpha_R i_C \\ i_E &= -\beta_R i_B \end{aligned}$$



Modello semplificato per la regione di saturazione

- Nella regione di saturazione, entrambe le giunzini sono polarizzate direttamente, e il transistore lavora con una piccola tensione tra collettore e emettitore. v_{CESAT} è la tensione di saturazione per il BJT npn.

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \frac{I_S}{\alpha_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + \frac{I_S}{\beta_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$

$\therefore v_{CESAT} = V_T \ln \left(\frac{1}{\alpha_R} \cdot \frac{1 + (\beta_R + 1)i_B}{1 - \frac{i_C}{\beta_F i_B}} \right)$

Beta FOR

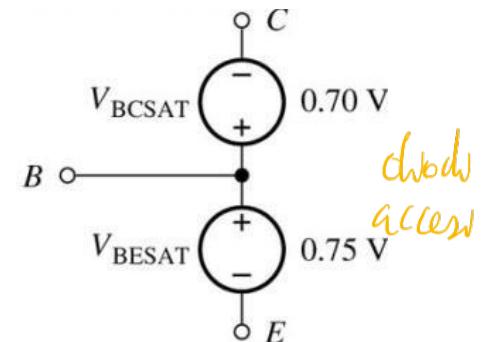
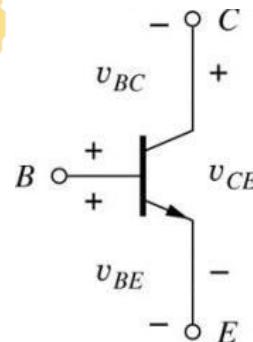
\downarrow
 v_{CE} non SATURAZ.

per

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

Beta FOR, rapporto
fra corrente di base e...

Modello semplificato



Non esistono espressioni semplificate per le correnti ai terminali se non $i_C + i_B = i_E$.

Tutte e 2 le giunzioni sono attive. Trascurano ±1 delle esponenti.

Non sono più legate da β_F

Entrambe polarizzate direttamente e strettamente connessa nella base.
Transistor si comporta come un'elemento chiuso caratterizzato da tensione

V_{CE} (Connessione e emettitore) molto piccola.

RICORDA: in saturaz. non vale più $N_C = \beta_F N_B$. $N_B > \frac{N_C}{\beta_F}$. Dovendo al fatto che c'è doppia inversione. Non c'è più effetto di amplificazione.

Non è più vero che rapporto $\alpha = \beta_F \circ \beta_R$. Rapporto fra le correnti dipende dal circuito e non da parametri fissi del transistor.

$$\frac{N_C}{N_D} \triangleq \beta_{FOR} \quad \text{definito. Dipende dall'ambiente.}$$

\hookrightarrow in saturazione

Effetti non ideali nel BJT: Tensioni di rottura delle giunzioni

\Rightarrow Giunzioni vanno in Breakdown.

U_{ma} va in breakdown
Prima per maggiore durezza.

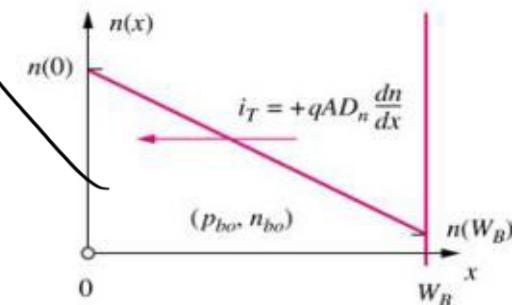
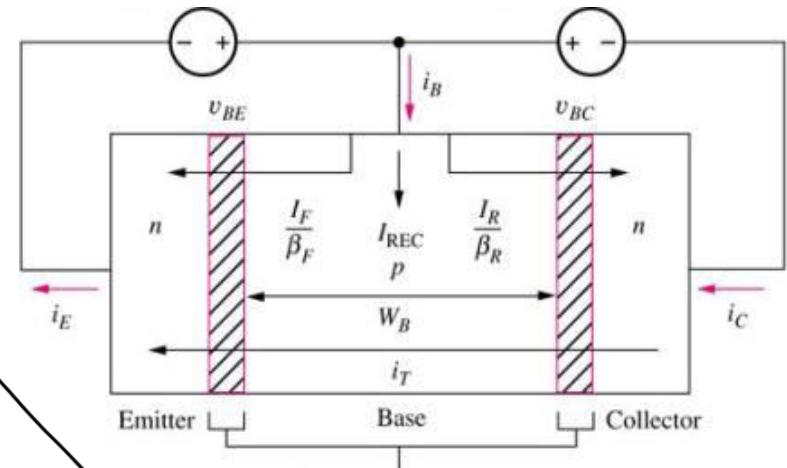
- Se la tensione inversa applicata su una delle due giunzioni pn del transistore è troppo elevata, il diodo corrispondente sarà in zona di rottura.
- L'emettitore è la regione maggiormente drogata, e il collettore la meno drogata.
- A causa delle differenze di droggaggio, il diodo base-emettitore ha una tensione di rottura relativamente bassa (da 3 a 10 V). Il diodo base-collettore può essere progettato per avere tensioni di rottura molto più alte.
→ Molto drogato → giunzione stretta → campo forte
- I transistori devono essere scelti in funzione anche delle possibili tensioni inverse del circuito.

Effetti non ideali nel BJT: Trasporto dei portatori minoritari nella regione di base

- La corrente nel BJT è associata ai fenomeni di trasporto di portatori minoritari (elettroni negli *npn* e lacune nei *pnp*) nella regione di base.
- La corrente di base è data dalla somma di due componenti associate alle lacune iniettate nell'emettitore e nel collettore e una piccola corrente necessaria per rimpiazzare le lacune perse per ricombinazione con gli elettroni nella regione di base.
- Le concentrazioni dei portatori di carica agli estremi della regione di base sono:

$$n(0) = n_{bo} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \text{ e } n(W_B) = n_{bo} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$

n_{bo} è la concentrazione di elettroni all'equilibrio termodinamico nella regione di base di tipo p



Come si ricomincia: inietto elettroni (accende base - mettore)

(Base deve consentire diffusione)

Se ho base solida esponendo approssimabile a nulla.

Durante l'ugello si perdono carri che si recontano dalle carte morte. Effetto qualitativo da segnalare.

Trasporto dei portatori minoritari nella regione di base (cont.)

- Per dispositivi con una base di spessore ridotto, la densità dei portatori minoritari decresce linearmente all'interno della base, e la corrente di diffusione è:

$$I_S = qAD_n \frac{n_{bo}}{W_B} = \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB} W_B}$$

N_{AB} = concentrazione di droggaggio nella regione di base

n_i^2 = concentrazione intrinseca dei portatori ($10^{10}/\text{cm}^3$)

$$n_{bo} = n_i^2 / N_{AB}$$

- La corrente di saturazione per un transistor pnp è

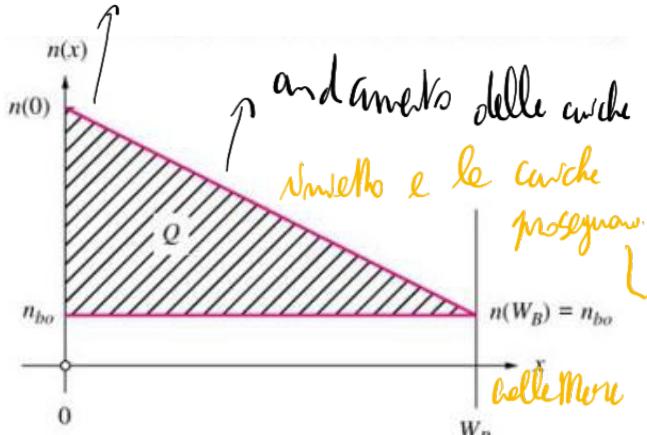
$$I_S = qAD_p \frac{p_{bo}}{W_B} = \frac{qAD_p n_i^2}{N_{DB} W_B}$$

- A causa della maggiore mobilità degli elettroni rispetto alle lacune, il transistor npn conduce una corrente maggiore rispetto al pnp per specifici valori delle tensioni applicate.

Effetti non ideali nel BJT: Tempo di

escesso degli elettroni

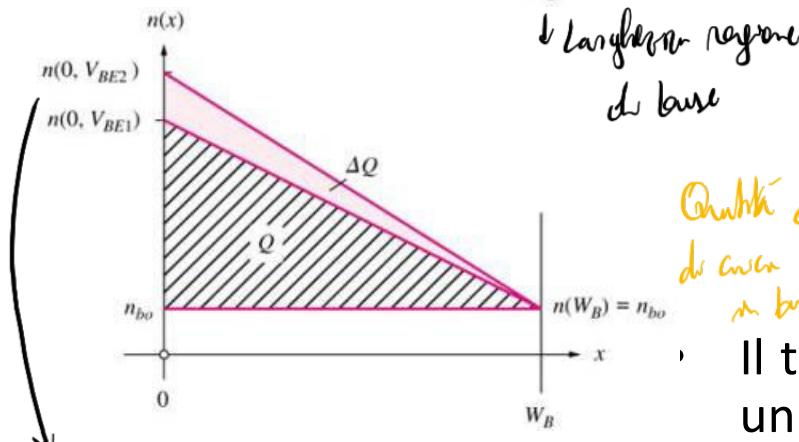
transito in base



Il tempo di transito diretto rappresenta la costante di tempo associata all'immagazzinamento della carica minoritaria Q necessaria a stabilire il gradiente di concentrazione nella regione di base

$$Q = qAn_{bo} \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \frac{W_B}{2}$$

$$i_T = \frac{qAD}{W_B} n_{bo} \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right)$$



$$\tau_F = \frac{Q}{I_T} = \frac{W_B^2}{2Dn_{base}} = \frac{W_B^2}{2V_T \mu_n}$$

Il tempo di transito diretto rappresenta quindi un limite superiore alla frequenza di funzionamento del transistor.

Vari tensione. Cambio punto di

ingresso. Cambio pendente, cambio gradiento

e quindi come si raccorda da controllore

Luigi Zeni DII-SUN

Fondamenti di Elettronica Digitale

* Massima frequenza

con frequenze maggiori

→ Le cariche non passano in tempo

Influsso sulla velocità di camminata dei camini digitali legati al campo di
trivello in base

Effetti non ideali nel BJT: Capacità di

diffusione *Come quella del diodo.*

- Per variazioni di v_{BE} e quindi di i_C , anche la carica presente nella regione di base cambia.
- La capacità di diffusione posta in parallelo al diodo base-emettitore polarizzato direttamente rappresenta la variazione della carica associata a variazioni di v_{BE} .

$$C_D = \frac{dQ}{dv_{BE}} \Big|_{Q-\text{point}} = \frac{1}{V_T} \frac{qA n_{bo} W_B}{2} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) = \frac{I_T}{V_T} \tau_F$$

- Dato che la corrente di trasporto normalmente rappresenta la corrente di collettore in regione attiva diretta,

$$C_D = \frac{I_C}{V_T} \tau_F$$



Frequenza di taglio, transconduttanza e tempo di transito

- A causa della presenza di capacità di diffusione e giunzione, il guadagno di corrente del BJT risulta dipendente dalla frequenza.
- La frequenza di transizione è la frequenza per cui il modulo del guadagno di corrente risulta pari a uno

$$\beta(f) = \frac{\beta_F}{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta_F f}{f_T}\right)^2}} = \frac{\beta_F}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_B}\right)^2}} \quad f_\beta = f_T / \beta_F \text{ è la frequenza di taglio}$$

- La transconduttanza è definita da:

$$g_m = \left. \frac{di_C}{dV_{BE}} \right|_{Q-point} = \left. \frac{d}{dV_{BE}} \left[I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \right] \right|_{Q-point} = \frac{I_C}{V_T}$$

- Il tempo di transito è dato da: $\tau_F = \frac{C_D}{g_m}$

C'è una copia di diffusore

Se avete la frequenza

Effetto Early e tensione di Early

- Al crescere della polarizzazione inversa sulla regione collettore-base, lo spessore della regione di svuotamento aumenta e lo spessore della base diminuisce (modulazione dello spessore di base) *↳ legge di aumento della corrente*
- Nei BJT reali, le caratteristiche di uscita hanno una pendenza positiva nella regione attiva diretta; la corrente di collettore non è indipendente da v_{CE} .
- Effetto Early: Quando le caratteristiche di uscita sono estivate fino al punto in cui i_C è uguale a zero, le curve si intersecano (approssimativamente) in un punto comune $v_{CE} = -V_A$ che si trova tra 15 V e 150 V. (V_A è detta tensione di Early)
- Equazioni semplificate (che includono l'effetto Early):

$$i_C = I_S \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \right] \left[1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right]$$

$$\beta_F = \beta_{FO} \left[1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right]$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_{FO}} \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \right]$$

Tensione di early.