

## 4 Transistor bipolari

I transistor bipolari (fig. 24) sono costituiti da due giunzioni  $pn$  accostate, separate tra loro da una certa distanza e polarizzate in maniera opposta, in maniera da ottenere una struttura di tipo  $npn$  (o  $pnp$ ), in cui il primo e l'ultimo elemento assumono comunemente i nomi di *emettitore* e *collettore*, e quello centrale di *base*.

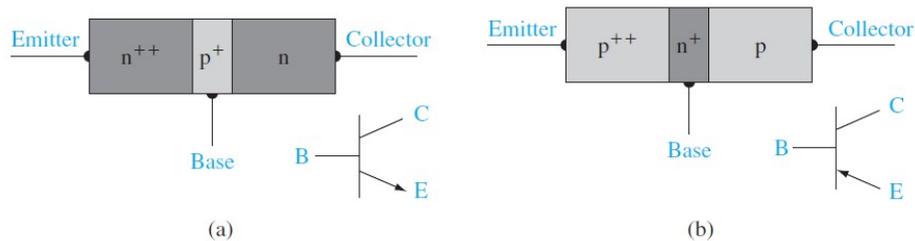


Figura 24: Schema semplificato dei transistor bipolari  $npn$  e  $pnp$

Nella trattazione seguente, considereremo un transistor bipolare  $npn$ . La stessa trattazione a polarità invertite si può applicare alla struttura  $pnp$ .

### 4.1 Principio di funzionamento

Le giunzioni  $J_1$  e  $J_2$  vengono implementate in un unico cristallo di sezione trasversale uniforme ( $A$ ) e a una distanza  $w$  tra di loro che è mantenuta ridotta in modo da favorire il passaggio senza ricombinazione degli elettroni iniettati attraverso  $J_1$  quando la differenza di potenziale tra base e emettitore è  $V_{BE} > 0$  si trovano subito nella regione di influenza della polarizzazione inversa di  $J_2$  e vengono trasferiti velocemente per deriva all'emettitore. In questa maniera:

- la perdita per ricombinazione nella base è piccola
- indica una polarizzazione diretta per  $J_1$

Inoltre si assume che il flusso di lacune (portatori maggioritari nella base) sia trascurabile attraverso le due giunzioni, dato che il flusso da  $n$  a  $p$  rappresenta un flusso di minoritari nel caso delle lacune.

Per descrivere il funzionamento di un transistor bipolare consideriamo la densità di corrente dei portatori, cominciando dalle lacune, e imponiamo la condizione di annullamento:

$$J_p = q\mu_p p E_x - qD_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad (38)$$

da cui, applicando la relazione di Einstein su  $D_p$

$$E_x = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = \frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad (39)$$

Nella base, a componente del campo elettrico  $E_x$  perpendicolare alle giunzioni dipende dalla concentrazione dei maggioritari e dal suo gradiente. Se la base e' drogata uniformemente, il campo risulta nullo.

Per quanto riguarda gli elettroni, qui maggioritari, essi possono essere forniti dall'emettitore  $n$  alla base  $p$  in abbondanza nella giunzione direttamente polarizzata. La densita' di corrente che ne deriva e' descritta dall'equazione:

$$J_n = q\mu_n n E_x + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (40)$$

Sostituendo il campo elettrico  $E_x$  noto dall'equazione precedente, e usando la relazione di Einstein per  $\mu_n$  si ottiene:

$$J_n = \frac{qD_n}{p} \left( n \frac{dp}{dx} + p \frac{dn}{dx} \right) = \frac{qD_n}{p} \frac{d(pn)}{dx} \quad (41)$$

Dall'equazione:

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{q(\phi_p - \phi_n)}{kT}\right) = n_i^2 \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \quad (42)$$

ove  $V_a$  e' la tensione applicata, si ottiene il valore del prodotto delle concentrazioni  $np$  nelle coordinate  $x_0$  e  $x_B$ , estremi della base:

$$p(0)n(0) = n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \quad (43)$$

$$p(x_B)n(x_B) = n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \quad (44)$$

Portando  $pD_n/q$  a sinistra dell'uguaglianza nell'equazione 41 e integrando su  $x$  entrambi i membri dell'uguaglianza tra  $x = 0$  e  $x_B$ , otteniamo:

$$J_n \int_0^{x_B} \frac{p}{D_n q} dx = p(x_B)n(x_B) - p(0)n(0) \quad (45)$$

ove abbiamo considerato  $\frac{d(np)}{dx}$  come differenziale esatto. Dunque:

$$J_n = \frac{qn_i^2 \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \right]}{\int_0^{x_B} \frac{p}{D_n} dx} \quad (46)$$

A questo punto si puo' assumere che  $D_n$  vari lentamente con  $x$  e se ne puo' definire un valore medio  $\widetilde{D}_n \equiv \int_0^{x_B} p dx / \int_0^{x_B} \frac{p}{D_n} dx$ . Si puo' anche definire una concentrazione di carica per unita' di superficie nella base:

$$Q_B = q \int_0^{x_B} p dx \quad (47)$$

A questo punto risulta:

$$J_n = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \right] \quad (48)$$

con

$$J_s = \frac{q^2 n_i^2 \widetilde{D}_n}{Q_B} \quad (49)$$

L'equazione mostra l'effetto transistor, in cui la corrente di elettroni è attivata o interrotta controllando  $V_{BC}$  e  $V_{BE}$ . Si può notare come essa non sia funzione del profilo di drogaggio della base, ma solo della carica integrata di portatori maggioritari nella base (rappresentata da  $Q_B$ ).

## 4.2 Condizioni di polarizzazione

Per studiare il funzionamento del transistor bipolare è utile utilizzare il modello di *transistore prototipo*, che prevede brusche giunzioni a gradino e drogaggio uniforme della base. Analizziamo le varie condizioni di polarizzazione raffigurate in Fig. 25.

- (a) Condizione di equilibrio: in assenza di polarizzazione, il movimento di e- è molto limitato dalla scarsa concentrazione e dalle barriere built-in presenti alla giunzione.
- (b) Condizione di interdizione: entrambe le giunzioni sono polarizzate inversamente, le barriere si alzano e la base risulta svuotata dagli e-.
- (c) Condizione di saturazione: entrambe le giunzioni sono polarizzate direttamente, le barriere si abbassano favorendo l'iniezione di e- nella regione di base e instaurando un flusso di e- tra le due giunzioni.
- (d) Condizione di polarizzazione in zona attiva: una giunzione è polarizzata direttamente e l'altra inversamente. Questa condizione risulta la più interessante per l'utilizzo del transistor come amplificatore.

### 4.2.1 Polarizzazione in zona attiva

Quando le due giunzioni sono polarizzate in maniera opposta e si crea la condizione di zona attiva, la giunzione polarizzata direttamente inietta e- nella base grazie alla ridotta barriera; quella polarizzata inversamente invece raccoglie gli e- che giungono nella regione della giunzione e li accelera verso la regione *n* all'estremità. Ne risulta un flusso di portatori minoritari nella base dalla giunzione polarizzata direttamente (*di emettitore*) a quella inversa (*di collettore*).

Questa configurazione ripropone il diodo a base corta, ove la distribuzione degli elettroni è uniforme nella base e risulta in una ricombinazione trascurabile, e la densità di drogaggio è costante: la densità di elettroni risulta quindi lineare in  $x$  (si veda pannello (c) in Fig. 25).

Osservando che per il transistor prototipo la carica diventa  $Q_B = qA N_A x_B$ , la densità di corrente di e- che attraversa la base in zona attiva, con i potenziali  $V_{BE} > 0$  e  $V_{BC} < 0$ , diventa:

$$J_n = \frac{-q D_n n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)}{N_A x_B} \quad (50)$$

ove  $N_A$  è la concentrazione di droganti accettori nella base.

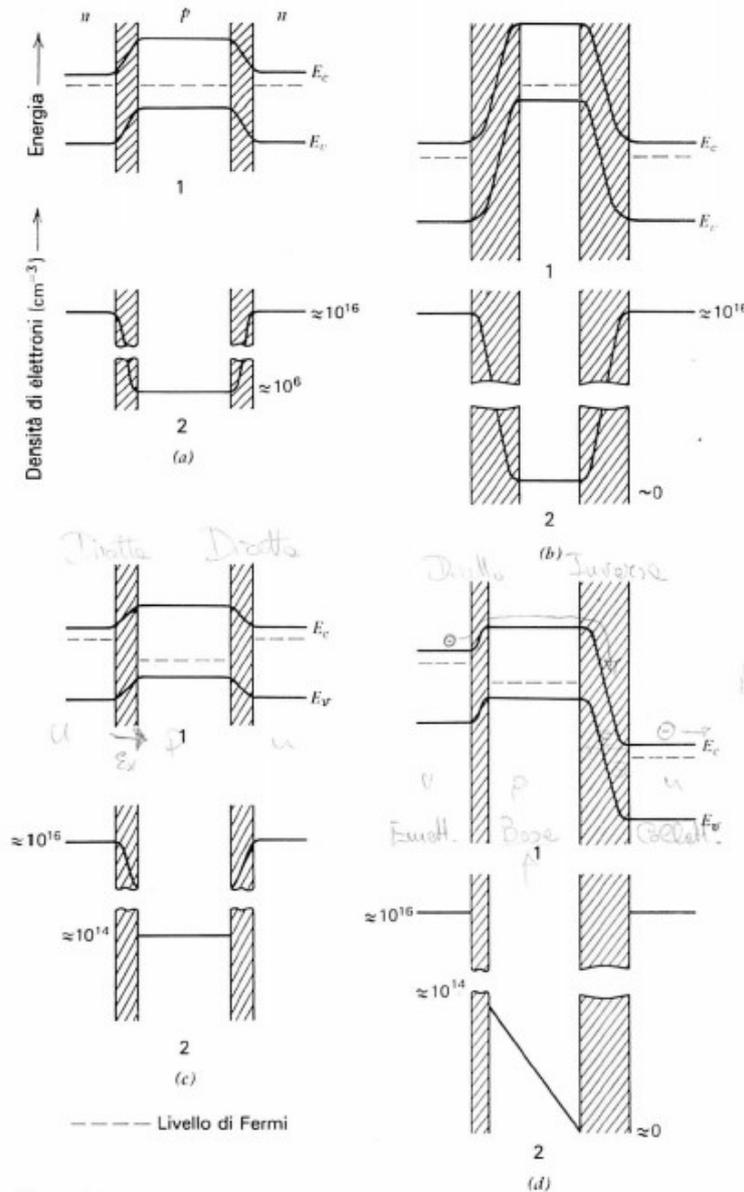


Figura 25: Bande energetiche (in alto) e concentrazione di e- nelle diverse condizioni di polarizzazione di equilibrio (a), di interdizione (b), di saturazione (c) e di zona attiva (d) per un transistor bipolare prototipo npn.

In sostanza, con una  $V_{BE}$  positiva e una  $V_{BC}$  negativa o nulla, abbiamo una corrente di collettore  $J_C$  positiva che dipende fortemente dalla tensione applicata tra base ed emettitore:

$$J_C \equiv J_n = J_s \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \quad (51)$$

La dipendenza esponenziale da  $V_{BE}$  nei dispositivi reali ha un andamento molto regolare su un ampio intervallo, tanto da poter essere facilmente usato come termometro: e' sufficiente visualizzare  $J_n$  su asse logaritmica e estrarre la dipendenza a questo punto lineare da  $q/kT$  (Fig. 26).  $J_s$  e' ricavabile dall'intercetta, ponendo  $V_{BE} = 0$ .

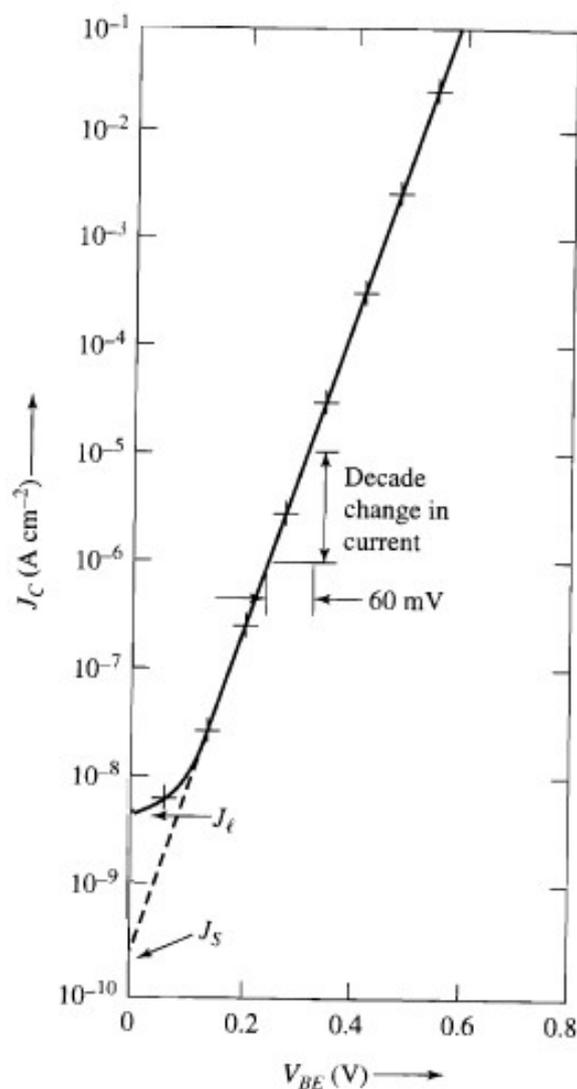


Figura 26: Dipendenza della densita' di corrente di emettitore  $J_E$  (in scala logaritmica) dalla differenza di potenziale applicata tra base ed emettitore ( $V_{BE}$ )

### 4.3 Guadagno di corrente

In zona attiva, la base e l'emettitore fungono dunque da elettrodi di controllo della corrente di collettore. L'idea e' che minimizzando la corrente tra base e emettitore a parita di differenza di potenziale si puo' rendere piu' efficiente l'amplificazione, mantenendo piu' bassa la potenza assorbita.

I contributi alla corrente di emettitore visualizzati in Fig. 27 sono:

- e- da emettitore a collettore, ovvero la corrente che rimane in uscita
- e- da emettitore a base che si ricombinano con le lacune della base. Essi sono quan-

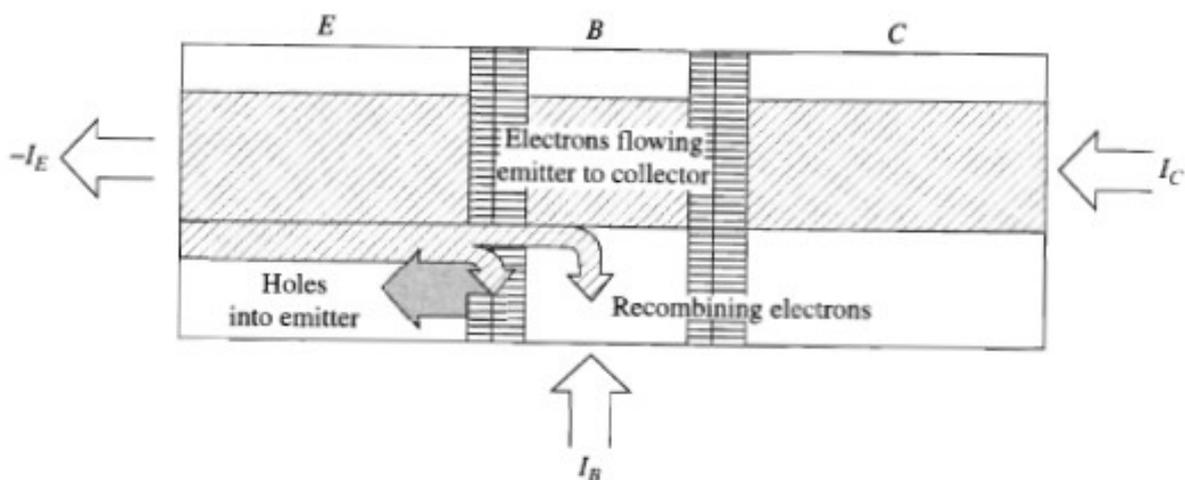


Figura 27: Contributi alla corrente in un transistor bipolare.

tificati dal fattore di trasporto: una base corta e uniformemente drogata favorisce un buon fattore di trasporto ( $\alpha_T \simeq 1$ )

- e- da emettitore che si ricombinano nella sottile zona svuotata della giunzione tra base ed emettitore, di solito un contributo trascurabile
- $h^+$  iniettate nell'emettitore dalla base. Questo contributo e' quantificato dal parametro di efficienza della giunzione di emettitore, funzione della corrente di iniezione di e- ( $I_{nE}$ ), di lacune ( $I_{pE}$ ) e della loro somma ( $I_E$ ):

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{1}{1 + I_{pE}/I_{nE}} \quad (52)$$

ovvero  $I_{nE} = \gamma I_E$ . Un emettitore pesantemente drogato fa tendere  $\gamma$  a 1 e  $I_{nE}$  a  $I_E$

#### 4.3.1 Requisiti per una buona amplificazione

In conclusione, un transistor bipolare a giunzione utilizzato con giunzione emettitore-base polarizzata direttamente e giunzione base-collettore polarizzata inversamente trae vantaggio dalle seguenti caratteristiche:

- concentrazione di drogaggio dell'emettitore maggiore di quella della base, per favorire il contributo di corrente di e- in polarizzazione diretta ( $\gamma \sim 1$ )
- base sottile, per sopprimere la ricombinazione degli e-
- piccola concentrazione di drogaggio nel collettore, in modo da favorire un allargamento della regione svuotata, diminuendo il contributo alla capacita' tra base e collettore, e da alzare il potenziale di rottura.