Dispositivi elettronici

Il transistor bipolare a giunzione (bjt)

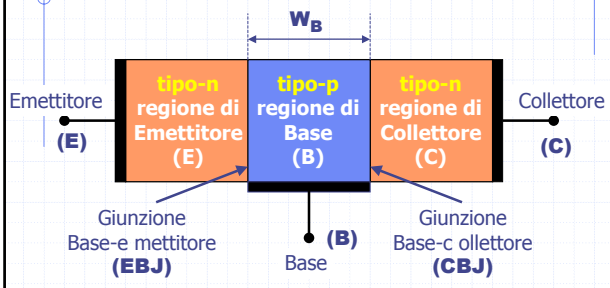
Sommario

Il transistor bipolare a giunzione (bjt)

- come è fatto un bjt
- principi di funzionamento
  - (giunzione a base corta)
  - effetto transistor ($W_B << L_B$)
  - effetto di amplificazione ($N_E >> N_B$)
- calcolo delle correnti ai tre terminali
- modelli equivalenti
- caratteristiche di uscita
- effetto Early
- struttura di un bjt moderno

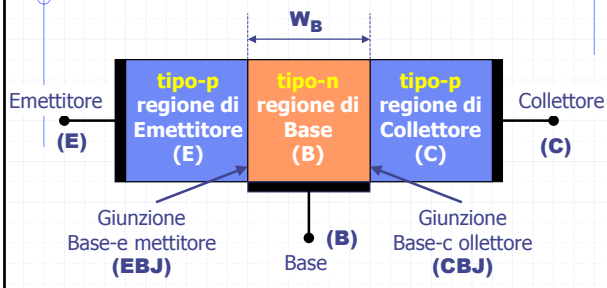
npn – bjt

(bipolar junction transistor)



pnp – bjt

(bipolar junction transistor)



Transistor bipolare a giunzione
modi di funzionamento

Giunzione Base-emettitore (EBJ)	Giunzione Base-collettore (CBJ)	MODO
Inversa	Inversa	SPENTO
Diretta	Diretta	SATURAZIONE
Diretta	Inversa	ATTIVA Diretta
Inversa	Diretta	ATTIVA Inversa

Transistor bipolare a giunzione

Il **bjt** per avere un corretto funzionamento deve avere due caratteristiche principali:

Spessore di base molto sottile se confrontato con la lunghezza di diffusione dei portatori minoritari nella base (**per avere effetto transistor**):

$$W_B << L_B$$

Drogaggio di emettitore molto maggiore del drogaggio di base (**per avere amplificazione**):

$$N_E >> N_B \ (> N_C)$$

Transistor bipolare a giunzione

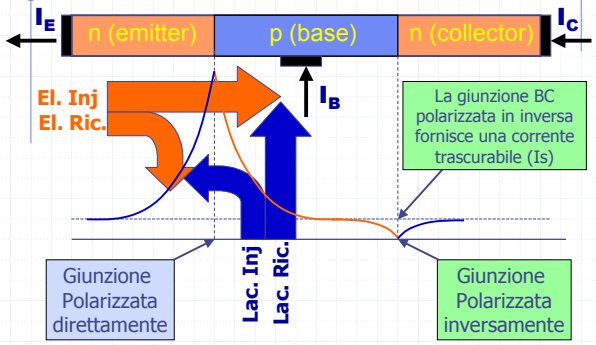
Principio di Funzionamento

(trascuriamo lo spessore delle RCS)

- Considero un bjt **npn**
- In polarizzazione **attiva diretta**
- Nel quale non siano soddisfatte le due condizioni precedentemente descritte. Sia quindi: $W_B >> L_B$, $N_E = N_B$

Transistor bipolare a giunzione

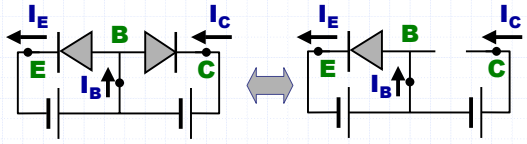
Cosa succede se $W_B >> L_B$, $N_E = N_B$



Transistor bipolare a giunzione

Cosa succede se $W_B >> L_B$, $N_E = N_B$

Quindi **se la base del transistor non è "stretta"**, tutti gli elettroni iniettati dall'emettitore si ricombinano in base e la giunzione BC polarizzata in inversa non dà nessun contributo (quasi). È come se fosse:



QUINDI: $I_E = I_B$, $I_C = 0$ — **NON HO NESSUN EFFETTO TRANSISTOR**

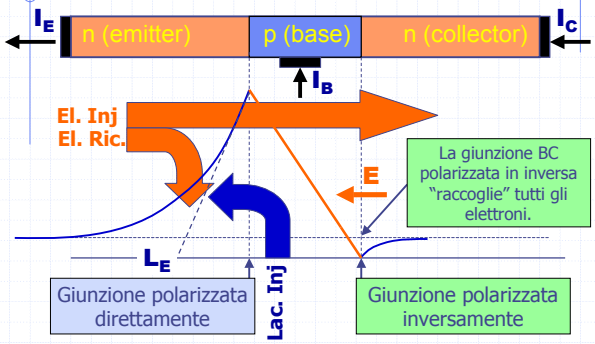
Transistor bipolare a giunzione

Principio di funzionamento

- Considero un bjt **npn**
- In polarizzazione **attiva diretta**
- **Che sia a base stretta $W_B << L_B$** (considero nulla la ric. in base)
- Con drogaggio di emettitore e base uguali: $N_E = N_B$

Transistor bipolare a giunzione

Base stretta $W_B << L_B$, $N_E = N_B$



Transistor bipolare a giunzione

Base stretta $W_B << L_B$, $N_E = N_B$

Se la base del transistor è "stretta", tutti gli elettroni (quasi) iniettati dall'emettitore raggiungono la giunzione BC polarizzata in inversa (il loro tempo di permanenza in base è molto minore del loro tempo medio di ricombinazione).

La giunzione BC polarizzata in inversa "raccoglie" tutti gli elettroni e li spinge (grazie al campo elettrico favorevole) verso il collettore dando così luogo ad una corrente di collettore.

C'È EFFETTO TRANSISTOR

Transistor bipolare a giunzione

Base stretta $W_B << L_B$, $N_E = N_B$

Tuttavia essendo $N_E = N_B$ la corrente di base (lacune iniettate in emettitore) è dello stesso ordine di grandezza degli elettroni che, iniettati dall'emettitore in base, raggiungono il collettore (sono uguali nel caso in cui $W_B=L_E$).

QUINDI: $I_C \cong I_B$ — C'È EFFETTO TRANSISTOR C'È POCA AMPLIFICAZIONE

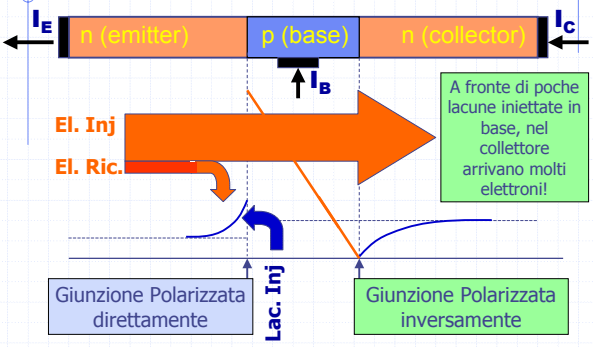
Transistor bipolare a giunzione

Principio di funzionamento

- Considero un bjt **npn**
- In polarizzazione **attiva diretta**
- Che sia a base stretta $W_B << L_B$ (considero nulla la ric. in base)
- Con drogaggio di emettitore maggiore (molto) del drogaggio di base: $N_E >> N_B$

Transistor bipolare a giunzione

Condizioni ideali $W_B << L_B$, $N_E >> N_B$



Transistor bipolare a giunzione

Condizioni ideali: $W_B << L_B$, $N_E >> N_B$

Se il drogaggio di emettitore è molto maggiore del drogaggio di base, a fronte di una piccola quantità di lacune iniettate in base (**per la legge della giunzione**) si ha un gran numero di elettroni iniettati dall'emettitore che raggiungono il collettore (continua a esserci la base stretta).

QUINDI: $I_C >> I_B$, $I_E \cong I_C$ — C'È EFFETTO TRANSISTOR E ANCHE AMPLIFICAZIONE

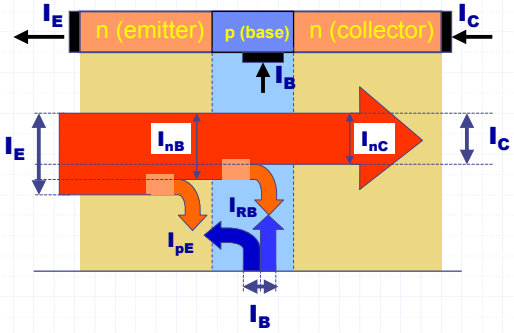
Transistor bipolare a giunzione

Analisi semplificata

- Considero un bjt **npn**
- In polarizzazione **attiva diretta**
- Che sia a base stretta $W_B << L_B$ (non trascuro la ricombinazione in base)
- Con drogaggio di emettitore maggiore (molto) del drogaggio di base: $N_E >> N_B$
- Trascuro il contributo della BCJ (polarizzata in inversa)
- Trascuro la Gen/Ric nelle RCS (peraltro mai considerate)

Transistor bipolare a giunzione

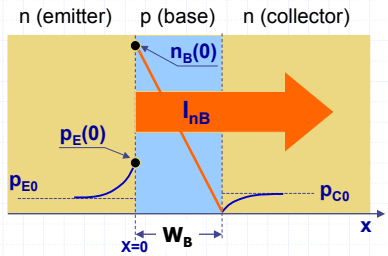
Analisi semplificata



Transistor bipolare a giunzione
Analisi semplificata

- Indichiamo con V_E e V_C le tensioni applicate alle giunzioni Base_Emettitore e Base-Collettore rispettivamente, con la convenzione che tali tensioni si intendono positive in caso di polarizzazione diretta e negative in caso di polarizzazione inversa
- In polarizzazione **attiva diretta** sarà quindi: $V_E > 0$, $V_C < 0$.

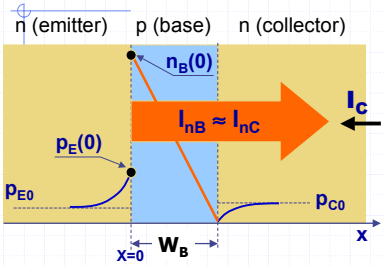
Transistor bipolare a giunzione
Analisi semplificata (I_{nB})



$$n_B(0) = n_{B0} e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

$$I_{nB}(x) = A_E q D_B \frac{dn_B(x)}{dx} = -A_E q D_B \left(\frac{n_B(0)}{W_B}\right)$$

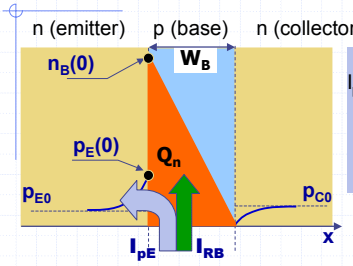
Transistor bipolare a giunzione
Analisi semplificata (I_C)



NOTA:
non ho considerato la I_{RB} in quanto $I_{nC} >> I_{RB}$ e quindi $I_{nB} \cong I_{nC} = -I_C$

$$I_C = -I_{nC} = -I_{nB} = \left(\frac{A_E q D_B n_i^2}{N_B W_B}\right) e^{\frac{V_E}{V_T}} = I_S e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

Transistor bipolare a giunzione
Analisi semplificata (I_B)



$$I_{pE} = \left(\frac{A_E q D_E n_i^2}{N_E L_E}\right)\left(e^{\frac{V_E}{V_T}} - 1\right) \cong \left(\frac{A_E q D_E n_i^2}{N_E L_E}\right) e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

Dalla legge della giunzione

$$I_{RB} = \frac{Q_n}{\tau_b}$$

Q_n=carica di minoritari in base
τ_b=tempo di vita dei minoritari

Transistor bipolare a giunzione
Analisi semplificata (I_B)

$$Q_n = A_E q \frac{n_B(0) W_B}{2} = A_E q \frac{n_i^2 W_B}{2N_B} e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

$$I_{RB} = A_E q \frac{n_i^2 W_B}{2N_B \tau_b} e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

$$I_B = I_{pE} + I_{RB} = I_S \left(\frac{D_E}{D_B}\frac{N_B}{N_E}\frac{W_B}{L_E} + \frac{W_B^2}{2D_B\tau_b}\right) e^{\frac{V_E}{V_T}} = \frac{I_C}{\beta}$$

$$\frac{W_B^2}{D_B \tau_b} = \left(\frac{W_B}{L_B}\right)^2$$

Transistor bipolare a giunzione
Analisi semplificata (I_B)

$$\beta = \frac{1}{\frac{D_E}{D_B}\frac{N_B}{N_E}\frac{W_B}{L_E} + \frac{W_B^2}{2D_B\tau_b}}$$

β=Guadagno di corrente ad emettitore comune

Per avere valori di β elevati bisogne avere:

Base stretta (**W_B piccolo**) e poco drogata rispetto all'emettitore (**N_B/N_E piccolo**)

Transistor bipolare a giunzione

Funz. in zona ATTIVA DIRETTA

$$I_C = I_S e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \left(\frac{I_S}{\alpha}\right) e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

$$I_E = I_B + I_C = \frac{\beta+1}{\beta} I_C$$

$$I_E = \frac{\beta+1}{\beta} I_S e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

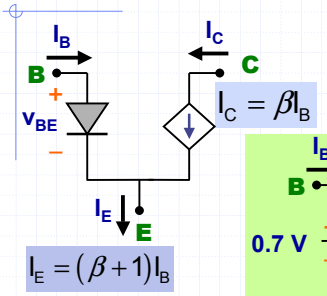
$$I_C = \alpha I_E$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1} \qquad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

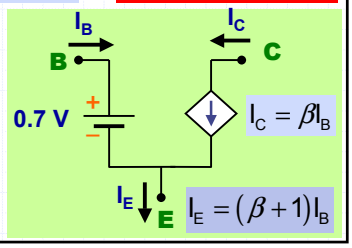
α=Guadagno di corrente a base comune

Transistor bipolare a giunzione

Modello circuitale



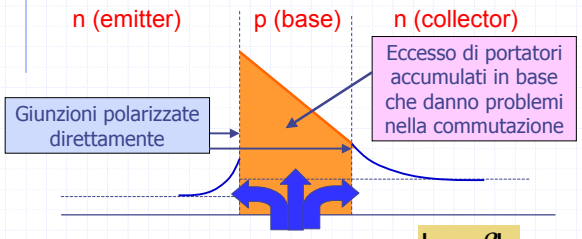
IN ZONA ATTIVA DIRETTA



Transistor bipolare a giunzione

Funz. in zona di SATURAZIONE

Giunzione Base-emettitore	Giunzione Base-collettore	MODO
Diretta	Diretta	SATURAZIONE

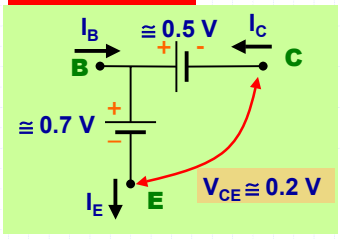


$I_C < \beta I_B$

Transistor bipolare a giunzione

Modello circuitale

IN ZONA DI SATURAZIONE



Le correnti I_B, I_C e I_E sono determinate dal circuito esterno

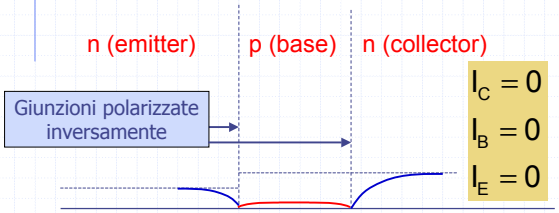
$I_E = I_C + I_B$

$I_C < \beta I_B$

Transistor bipolare a giunzione

Funz. in INTERDIZIONE

Giunzione Base-emettitore	Giunzione Base-collettore	MODO
Inversa	Inversa	SPENTO



$I_C = 0$

$I_B = 0$

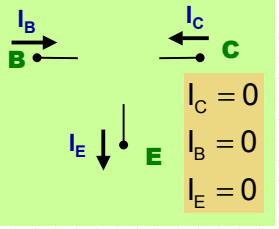
$I_E = 0$

Trascurando la corrente di saturazione inversa

Transistor bipolare a giunzione

Modello circuitale

IN INTERDIZIONE

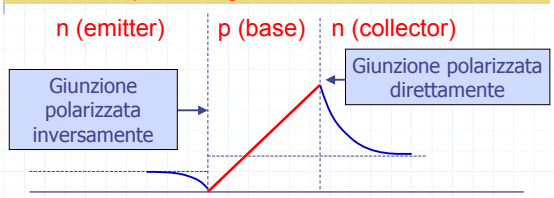


Transistor bipolare a giunzione

Funz. in ATTIVA INVERSA

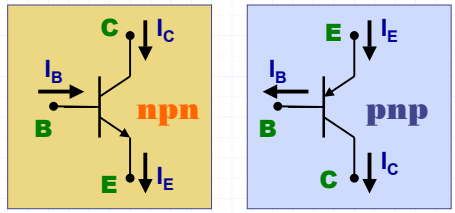
Giunzione Base-emettitore	Giunzione Base-collettore	MODO
Inversa	Diretta	ATTIVA Inversa

In zona attiva inversa, c'è ancora effetto transistor, ma c'è poca amplificazione (anche < 1, vedremo dopo che il bjt non e' simmetrico). Tale configurazione NON VIENE MAI USATA!



Transistor bipolare a giunzione

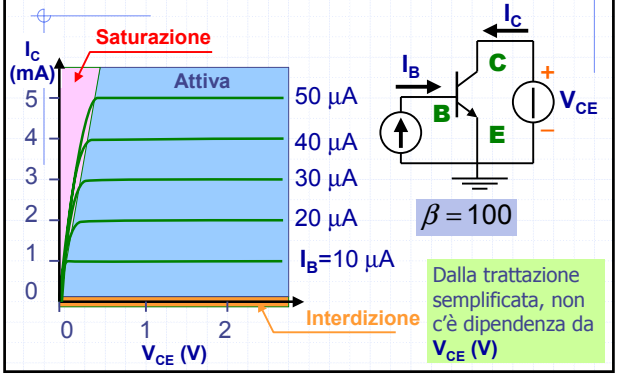
Simboli circuitale e convenzioni



La freccia presente nel terminale di emettitore indica il verso della corrente. Con la convenzione adottata nel verso delle correnti, nel normale funzionamento, si troveranno sempre correnti positive.

Transistor bipolare a giunzione

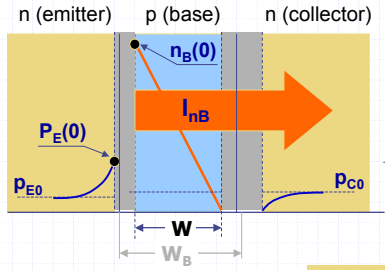
Caratt. ad Emettitore Comune



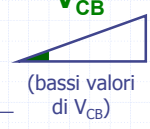
Dalla trattazione semplificata, non c'è dipendenza da V_{CE} (V)

Transistor bipolare a giunzione

EFFETTO EARLY



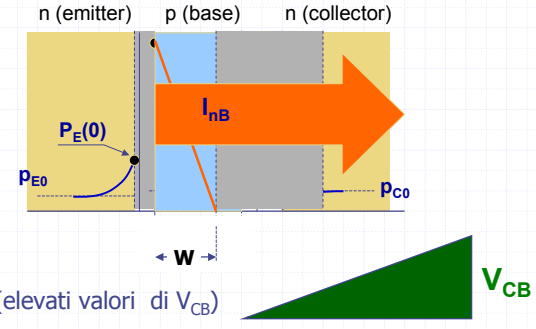
$$I_{nB} = A_E q D_B \frac{dn_B(x)}{dx} = A_E q D_B \left(-\frac{n_B(0)}{W} \right)$$



I_{nB} dipende dal gradiente di concentrazione di elettroni in base

Transistor bipolare a giunzione

EFFETTO EARLY



Transistor bipolare a giunzione

EFFETTO EARLY

Aumentando V_{CE}, aumenta molto la tensione di polarizzazione inversa della giunzione BC, al contrario, la tensione polarizzazione diretta della giunzione BE rimane praticamente invariata a circa 0.7 V.

Si ha quindi un allargamento della RCS della giunzione BC che induce una diminuzione di **W**.

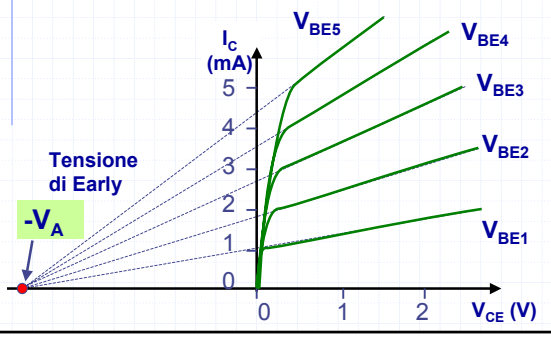
Questo comporta due conseguenze principali:

- Aumento del gradiente di concentrazione di elettroni in base con il conseguente aumento di (I_{nB})
- Riduzione della corrente di ricombinazione in base.

Entrambi questi effetti contribuiscono ad aumentare I_C

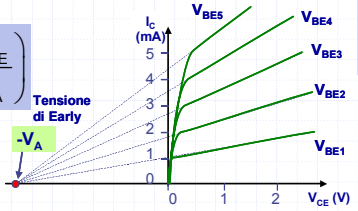
Transistor bipolare a giunzione

EFFETTO EARLY: caratteristiche di uscita ad emettitore comune



Transistor bipolare a giunzione

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



$$r_0 = \left[\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\bigg|_{V_{BE}\ cost}\right]^{-1} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \cong \frac{V_A}{I_C}$$

r_0 ha importanti ripercussioni sul funzionamento del transistor come amplificatore

Transistor bipolare a giunzione

bjt ottimizzato

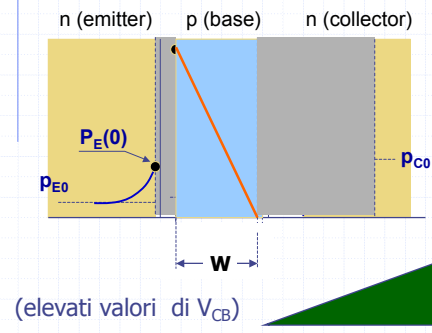
Per ridurre l'effetto Early si deve drogare meno il collettore rispetto alla base. In questo modo, la RCS della giunzione BC si estenderà quasi completamente nel collettore riducendo così l'effetto della modulazione di **W**.

In definitiva, un buon transistor bipolare dovrà soddisfare alla seguente condizione: $N_E >> N_B > N_C$.
Il bjt non è quindi un dispositivo simmetrico.

Domanda: Cosa succede invertendo l'emettitore con il collettore?

Transistor bipolare a giunzione

bjt ottimizzato



Transistor bipolare a giunzione

Limiti di tensione e corrente:

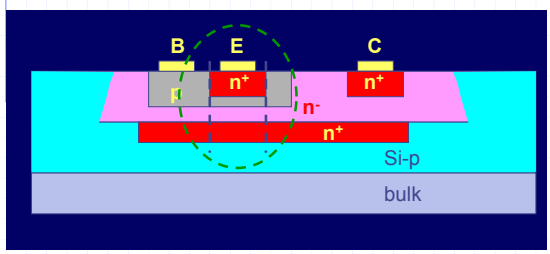
Nella trattazione semplificata fatta, si è sempre trascurato la corrente della giunzione base collettore. Ciò è giustificato dal fatto che, in zona attiva diretta, tale giunzione è sempre polarizzata in inversa.

Bisogna comunque evitare che tale giunzione raggiunga la tensione di rottura (breakdown) ponendo quindi un limite alla massima tensione applicabile al transistor.

Una ulteriore limitazione, sulla massima tensione e corrente, è legata alla massima potenza dissipabile dal transistor. Elevate potenze dissipate danno luogo a fenomeni di autoriscaldamento non trascurabili, che possono portare alla distruzione del dispositivo stesso.

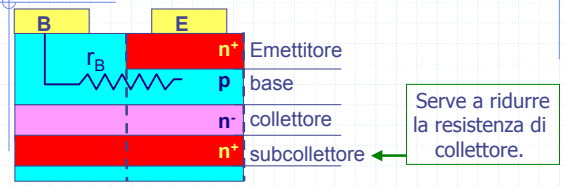
Transistor bipolare a giunzione

Struttura dei transistor attuali



Transistor bipolare a giunzione

Struttura dei transistor attuali



Cosa ci impedisce la realizzazione di una base "molto sottile" che avrebbe ottimi riscontri sia sul guadagno che sulla risposta in frequenza?

Riducendo W:

a) Aumenta la resistenza parassita di base;
b) Aumenta il problema del punch-trough.