# Dispositivi elettronici

## *Il transistor bipolare a giunzione (bjt)*

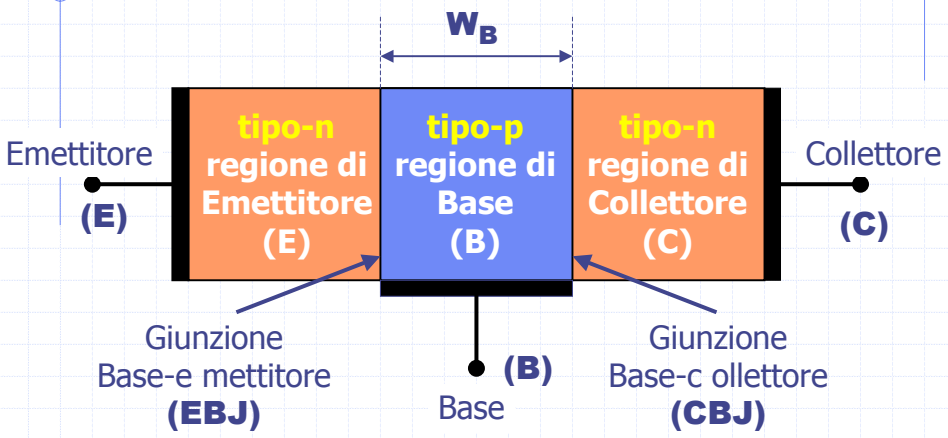
## Sommario

**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

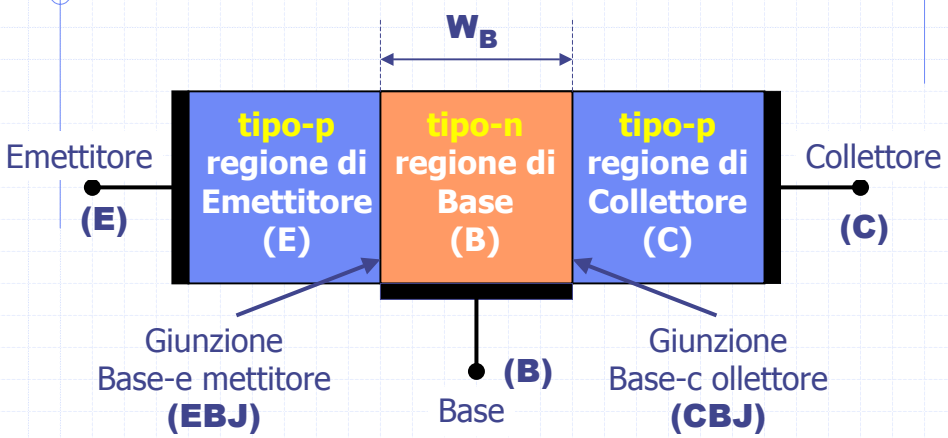
# npn – bjt

**(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

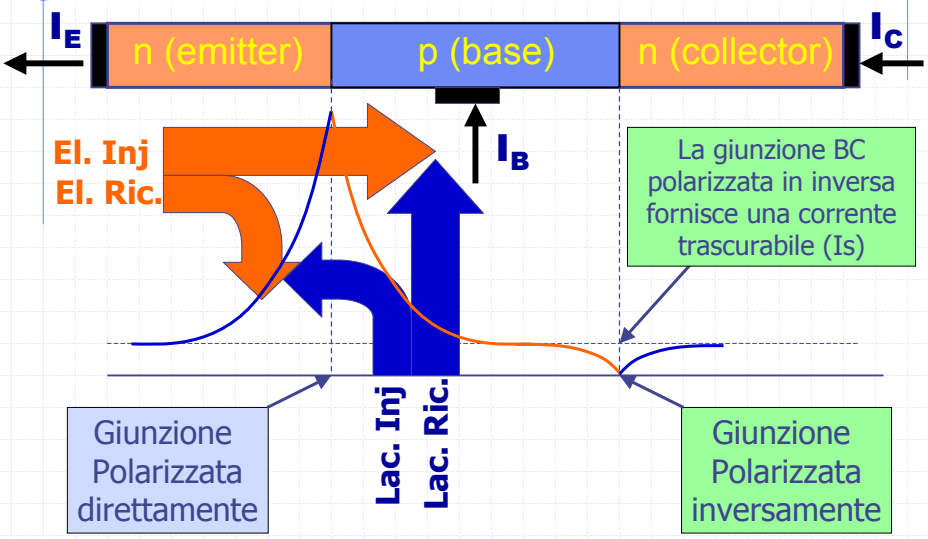
## Principio di Funzionamento

**(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

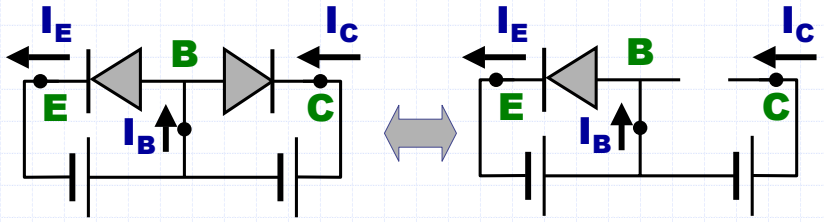
## Cosa succede se $W_B >> L_B$, $N_E = N_B$



# 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

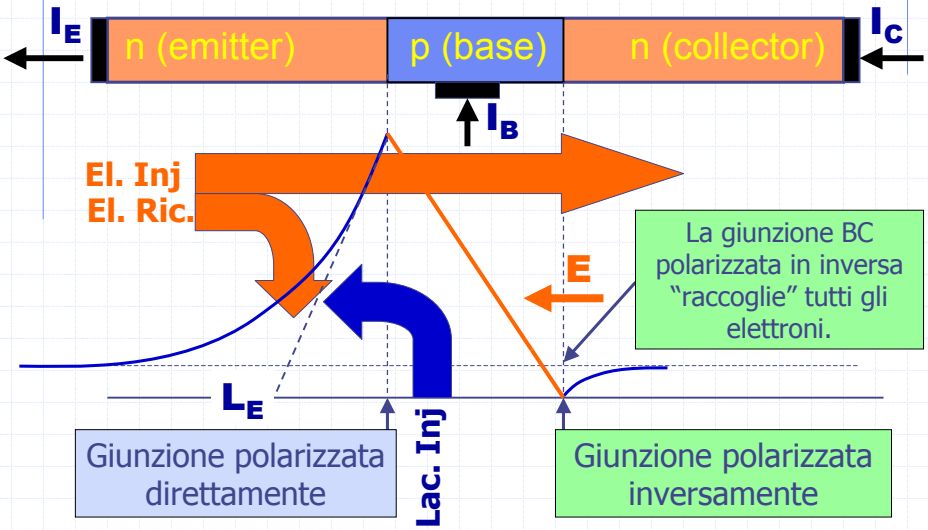
## Principio di funzionamento

- 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

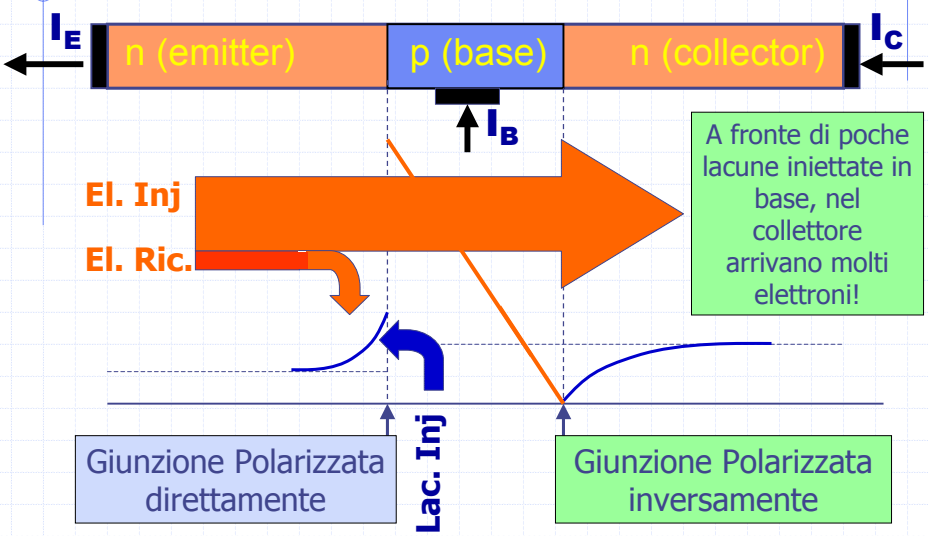
## Transistor bipolare a giunzione

### 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).

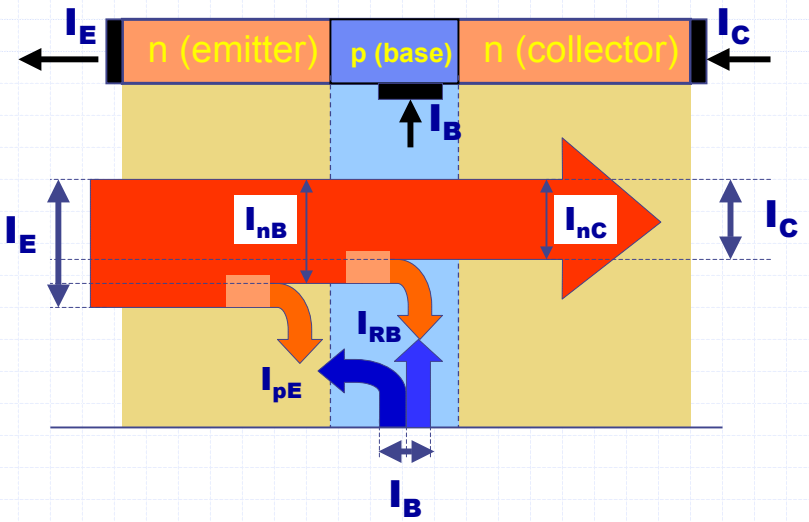
**QUINDI:** $I_C >> I_B$, $I_E \cong I_C$

**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)

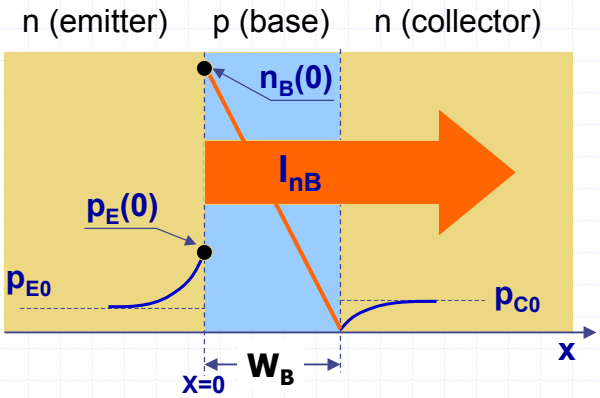
# Transistor bipolare a giunzione
## Analisi semplificata



# 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 ($I_{nB}$)

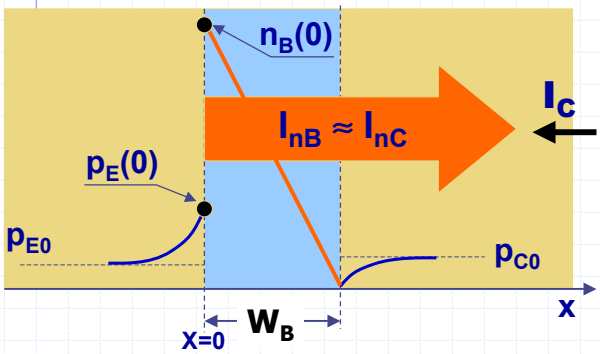



$$n_B(0) = n_{B0} e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

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

# Transistor bipolare a giunzione

## Analisi semplificata ($I_C$)

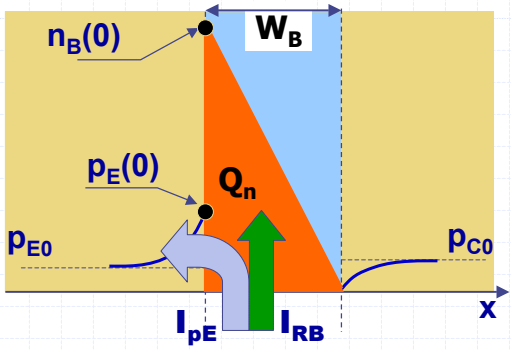



NOTA:
non ho considerato la $I_{RB}$ in quanto $I_{nC} >> I_{RB}$ e quindi $I_{nB} \cong I_{nC} = -I_C$

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

# Transistor bipolare a giunzione

## Analisi semplificata ($I_B$)




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

Dalla legge della giunzione

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

$Q_n$=carica di minoritari in base

$\tau_b$=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

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

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

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

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

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

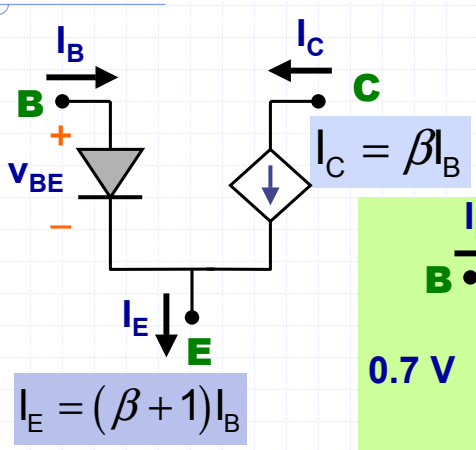
$$I_C = \alpha I_E$$

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

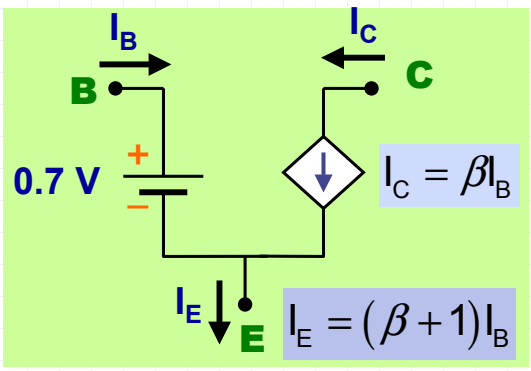
$\alpha$=Guadagno di corrente a base comune

# Transistor bipolare a giunzione

## Modello circuitale



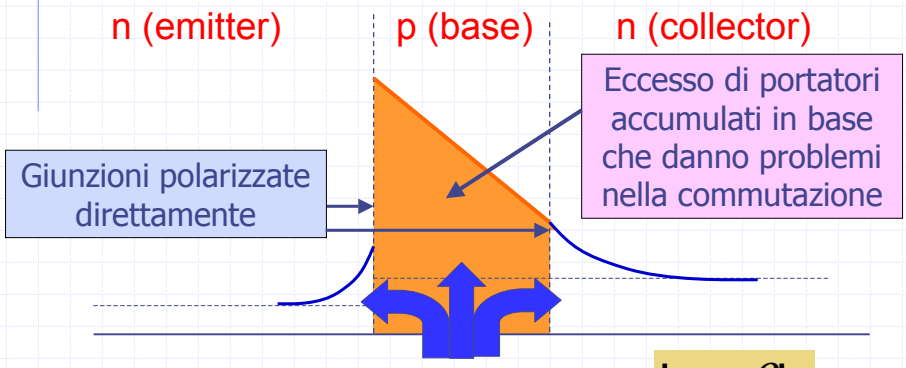

IN ZONA ATTIVA DIRETTA



# Transistor bipolare a giunzione

## Funz. in zona di SATURAZIONE

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

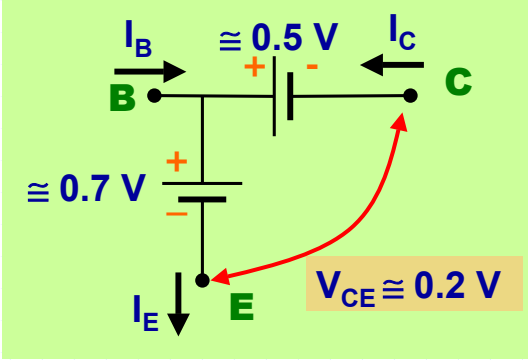



$I_C < \beta I_B$

# Transistor bipolare a giunzione

## Modello circuitale

**IN ZONA DI SATURAZIONE**



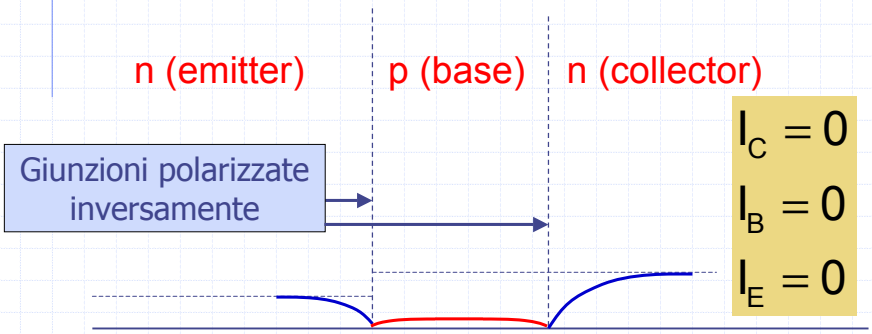

Le correnti $I_B$, $I_C$ e $I_E$ sono determinate dal circuito esterno

$I_E = I_C + I_B$ $\qquad$ $I_C < \beta I_B$

# Transistor bipolare a giunzione

## Funz. in INTERDIZIONE

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




$I_C = 0$

$I_B = 0$

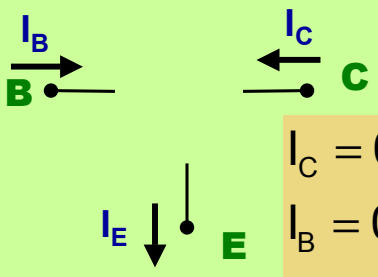
$I_E = 0$

**Trascurando la corrente di saturazione inversa**

# Transistor bipolare a giunzione

## Modello circuitale

**IN INTERDIZIONE**




$I_C = 0$

$I_B = 0$

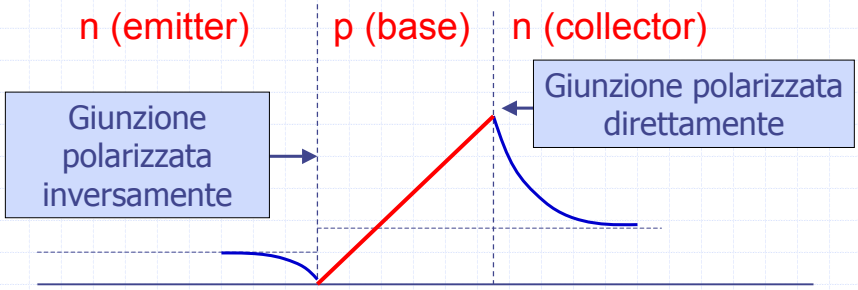
$I_E = 0$

# Transistor bipolare a giunzione

## Funz. in ATTIVA INVERSA

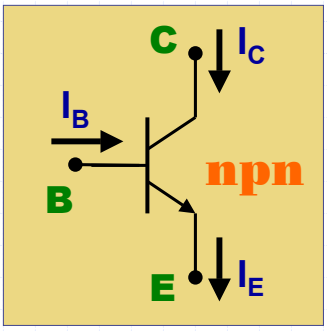
| Giunzione Base-emettitore | Giunzione Base-collettore | MODO |
|---|---|---|
| Inversa | Diretta | ATTIVA Inversa |

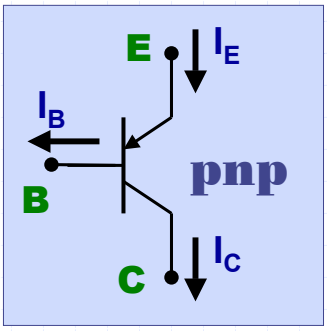
In zona attiva inversa, c'è ancora effetto transistor, ma c'è poca amplificazione (anche < 1, vedremo dopo che il bjt non e' simmetrico). Tale configurazione NON VIENE MAI USATA!




# Transistor bipolare a giunzione

## Simboli circuitale e convenzioni

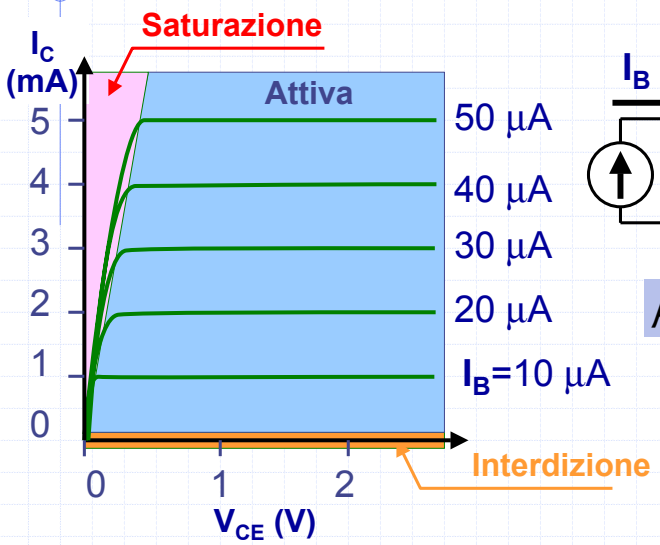


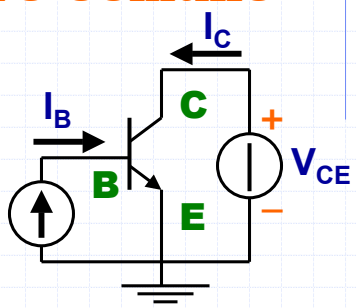




La freccia presente nel terminale di emettitore indica il verso della corrente. Con la convenzione adottata nel verso delle correnti, nel normale funzionamento, si troveranno sempre correnti positive.

# Transistor bipolare a giunzione

## Caratt. ad Emettitore Comune



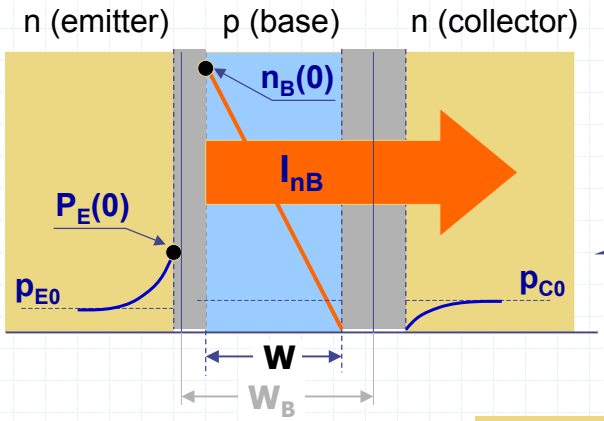



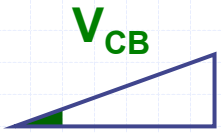

$\beta = 100$

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

# Transistor bipolare a giunzione

## EFFETTO EARLY



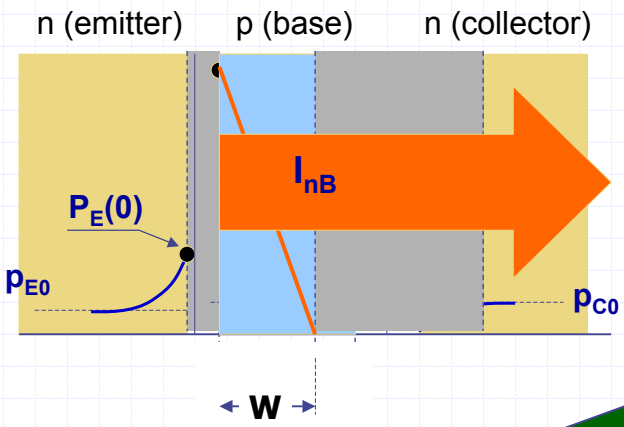

(bassi valori di $V_{CB}$)

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

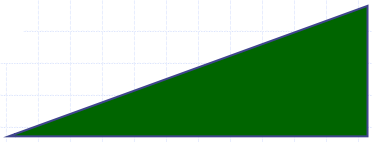
$I_{nB}$ dipende dal gradiente di concentrazione di elettroni in base

# Transistor bipolare a giunzione

## EFFETTO EARLY




(elevati valori di $V_{CB}$)



$V_{CB}$

# 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.**

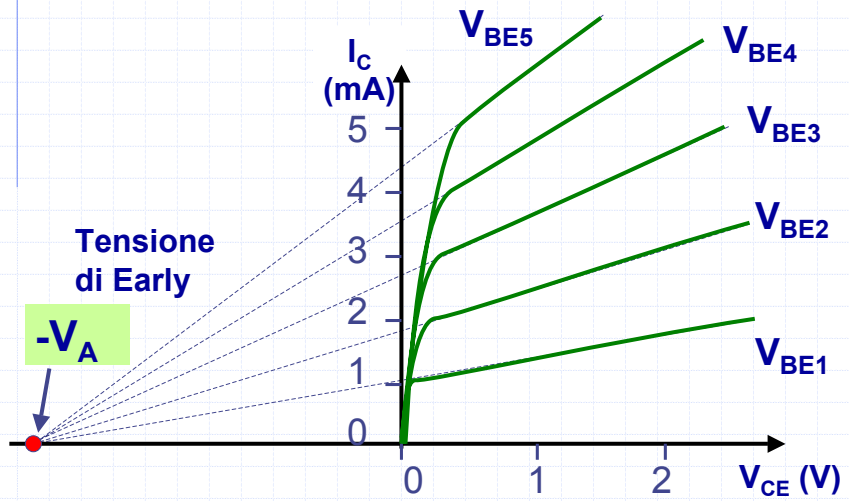
Questo comporta due conseguenze principali:

- 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 $I_C$**

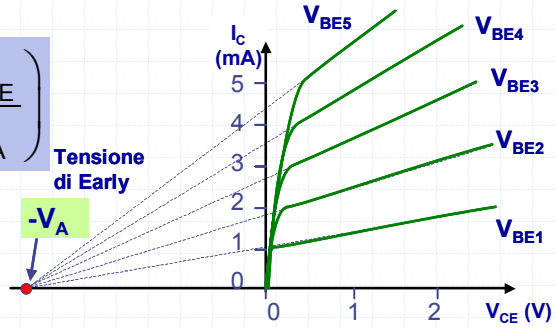
# Transistor bipolare a giunzione

## EFFETTO EARLY: caratteristiche di uscita ad emettitore comune




# Transistor bipolare a giunzione

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




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

$r_0$ ha importanti ripercussioni sul funzionamento del transistor come amplificatore

# Transistor bipolare a giunzione

## bjt ottimizzato

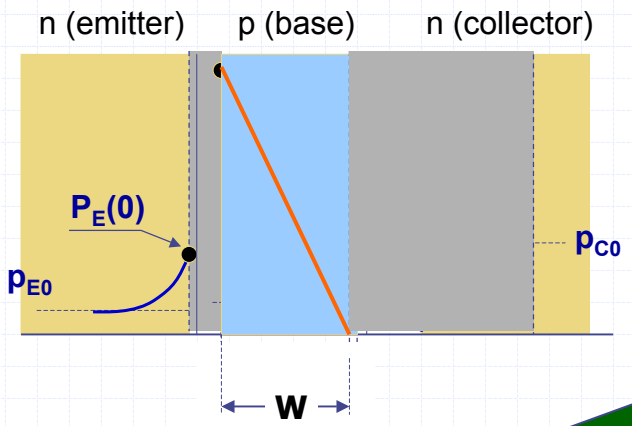
Per ridurre l'effetto Early si deve drogare meno il collettore rispetto alla base. In questo modo, la RCS della giunzione BC si estenderà quasi completamente nel collettore riducendo così l'effetto della modulazione di **W**.

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.

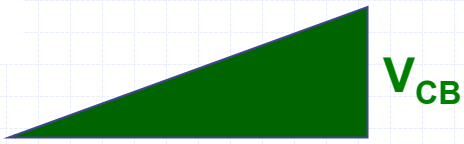
**Domanda:** Cosa succede invertendo l'emettitore con il collettore?

# Transistor bipolare a giunzione

## bjt ottimizzato




(elevati valori di $V_{CB}$)



# Transistor bipolare a giunzione

## Limiti di tensione e corrente:

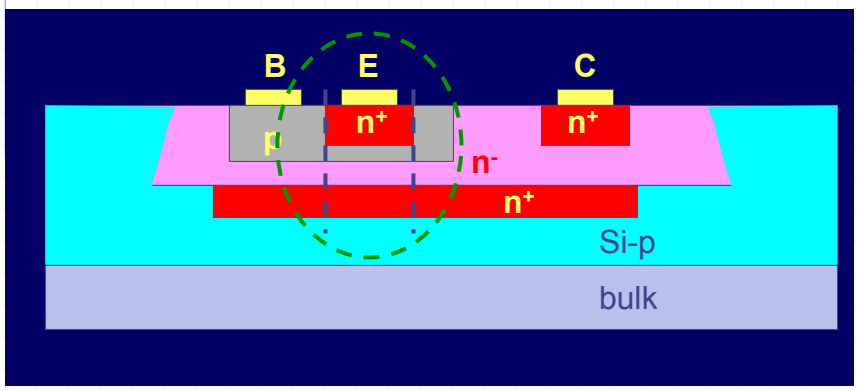
Nella trattazione semplificata fatta, si è sempre trascurato la corrente della giunzione base collettore. Ciò è giustificato dal fatto che, in zona attiva diretta, tale giunzione è sempre polarizzata in inversa.

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.

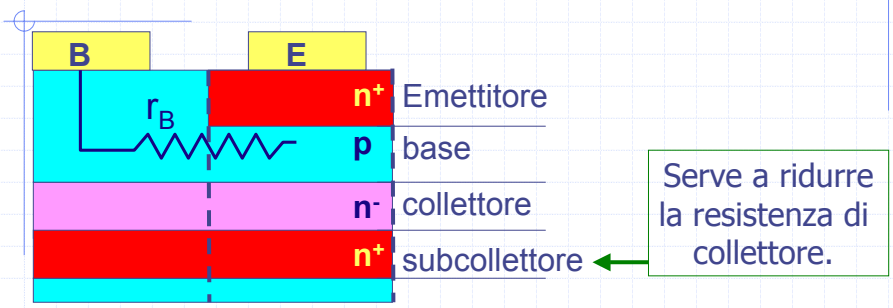
# Transistor bipolare a giunzione

## 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.