

# 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)

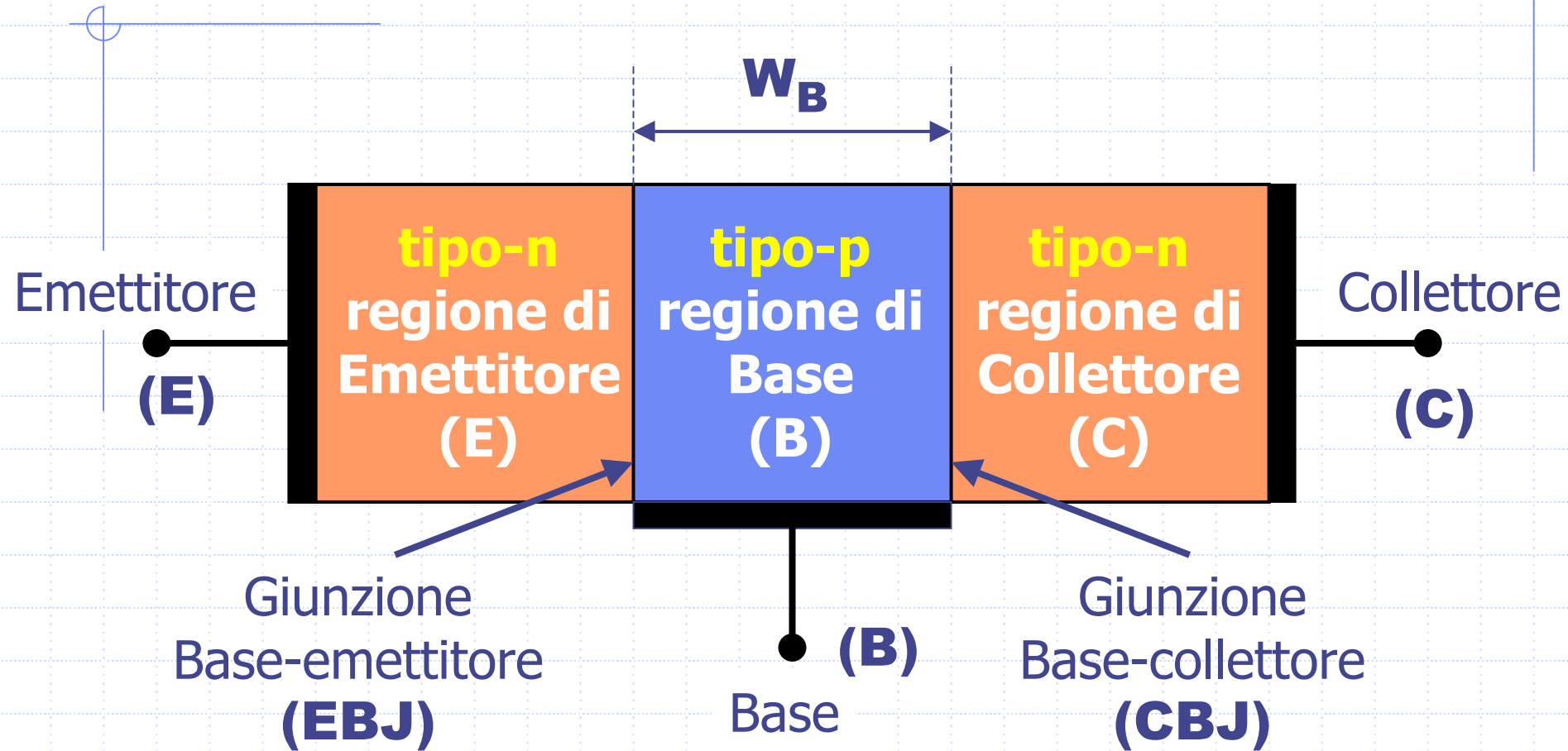
effetto transistor ( $W_B \ll L_{n,p}$ )

effetto di amplificazione ( $N_E \gg N_B$ )

.....

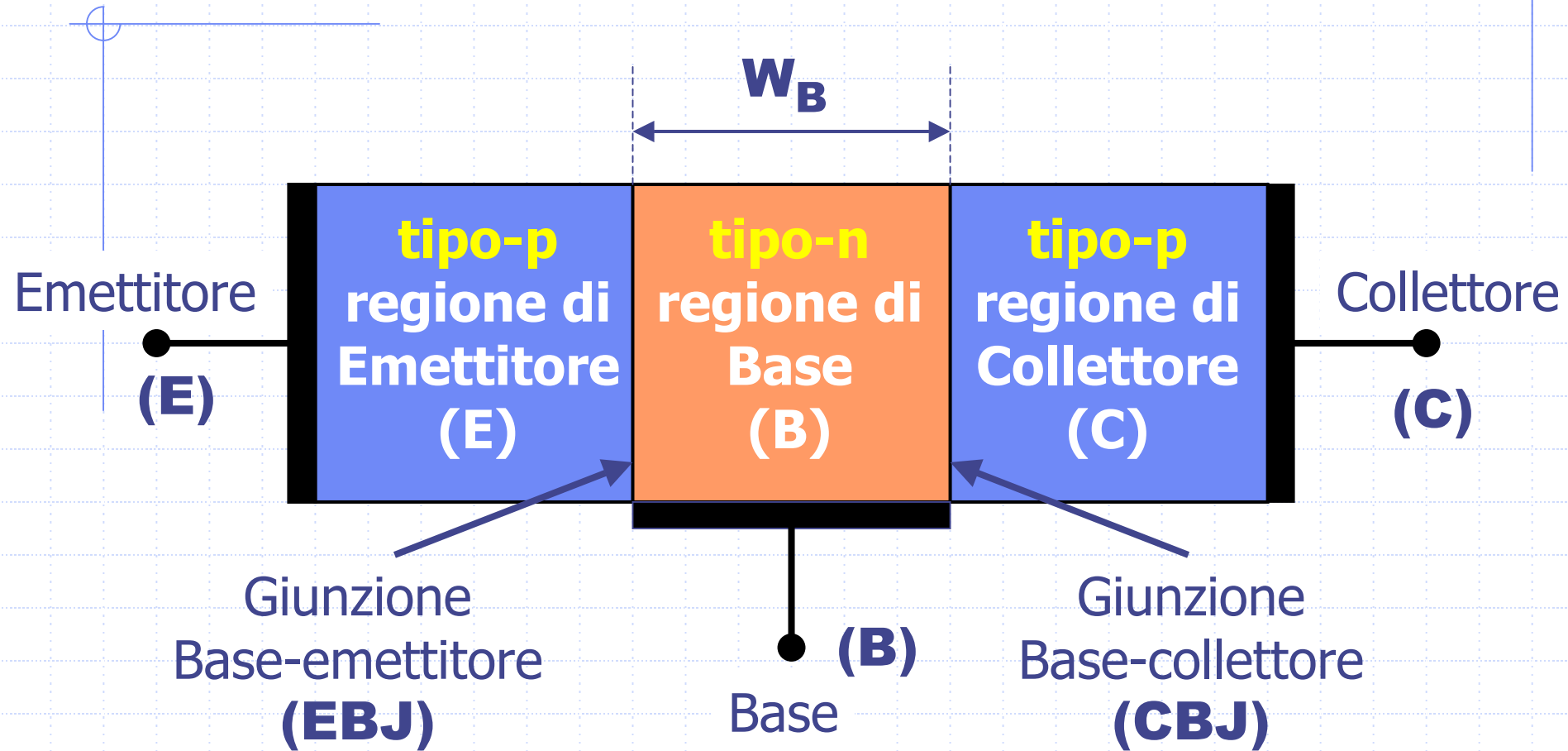
# nnp – bjt

(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**):

$$W_B \ll L_B$$

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

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

# Transistor bipolare a giunzione

## Principio di Funzionamento

(trascuriamo lo spessore delle RCS)

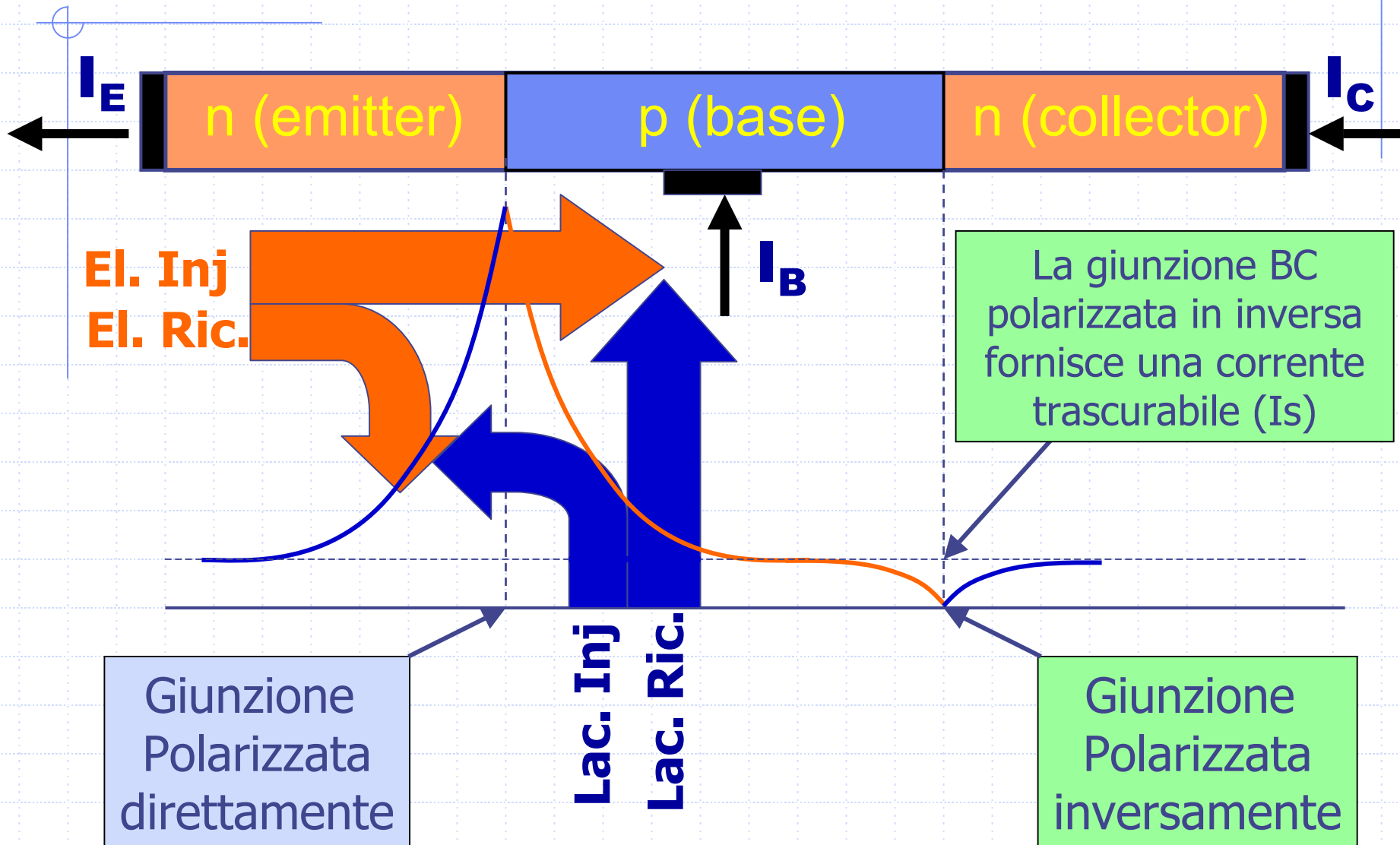
- Considero un bjt **npn**
- In polarizzazione **attiva diretta**
- Nel quale non siano soddisfatte le due condizioni precedentemente descritte.

Sia quindi:  $W_B \gg L_B, N_E = N_B$

# Transistor bipolare a giunzione

Cosa succede se

$$W_B \gg L_B, N_E = N_B$$



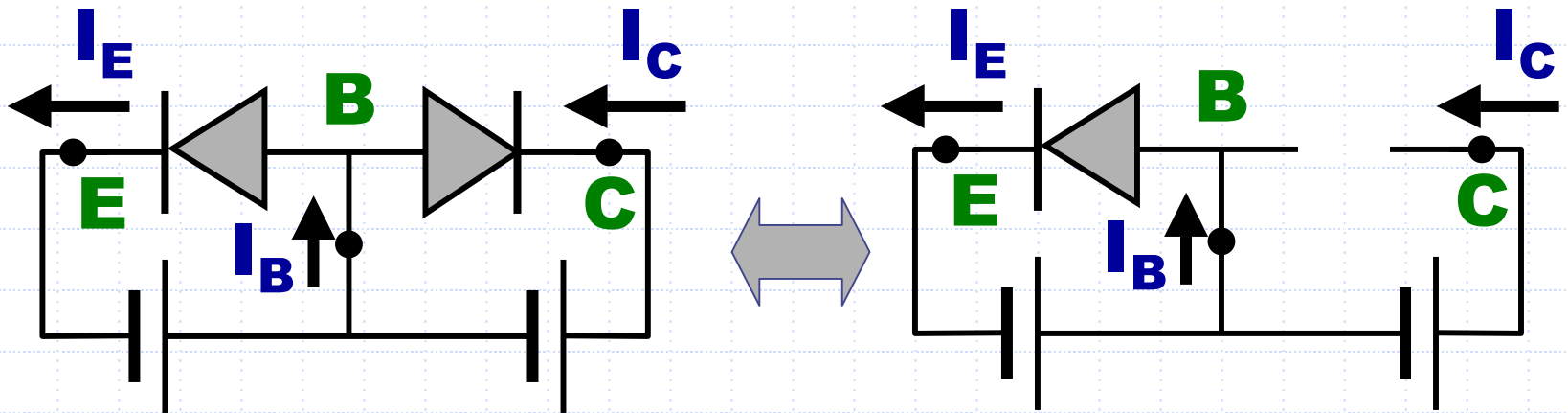


# Transistor bipolare a giunzione

Cosa succede se

$$W_B \gg L_B, N_E = N_B$$

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

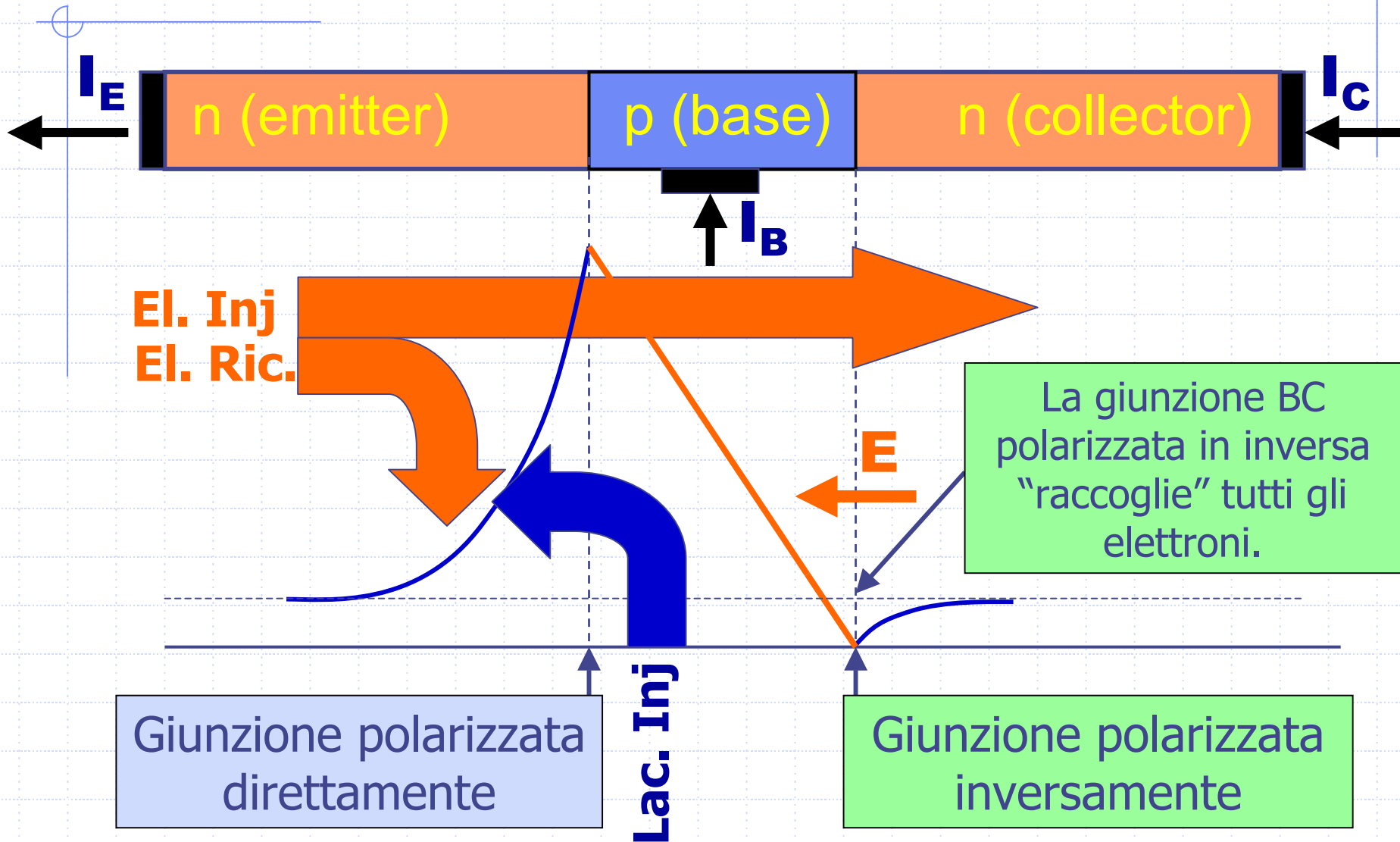
## Principio di funzionamento

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

# Transistor bipolare a giunzione

Base stretta

$$W_B \ll L_B, N_E = N_B$$



# Transistor bipolare a giunzione

## Base stretta

$$W_B \ll L_B, N_E = N_B$$

**Se la base del transistor è "stretta"**, (quasi) tutti gli elettroni 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 "raccolge" tutti gli elettroni e li spinge (grazie al campo elettrico favorevole) verso il collettore dando così luogo ad una corrente di collettore. Tuttavia essendo  $N_E = N_B$  la corrente di collettore è uguale a quella di base.

**QUINDI:**

$$I_C = I_B$$
$$I_E = 2 I_C$$

**C'È EFFETTO  
TRANSISTOR MA NON  
C'È AMPLIFICAZIONE**

# Transistor bipolare a giunzione

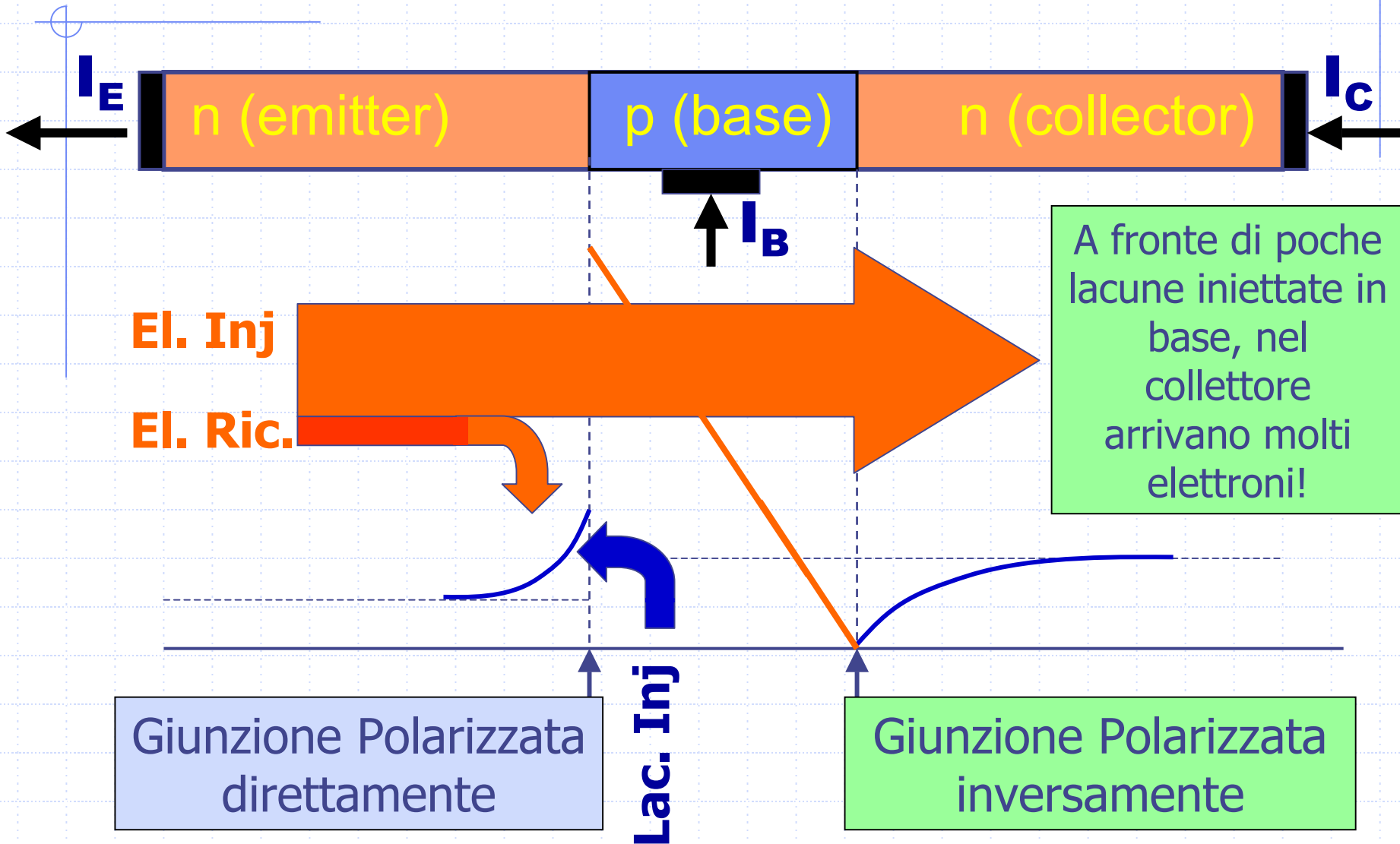
## Principio di funzionamento

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

# Transistor bipolare a giunzione

Condizioni ideali

$$W_B \ll L_B, N_E \gg N_B$$



# Transistor bipolare a giunzione

Condizioni ideali:

$$W_B \ll L_B, N_E \gg N_B$$

**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:**

$$I_C \gg I_B$$
$$I_E \approx I_C$$

**C'È EFFETTO  
TRANSISTOR E ANCHE  
AMPLIFICAZIONE**

# Transistor bipolare a giunzione

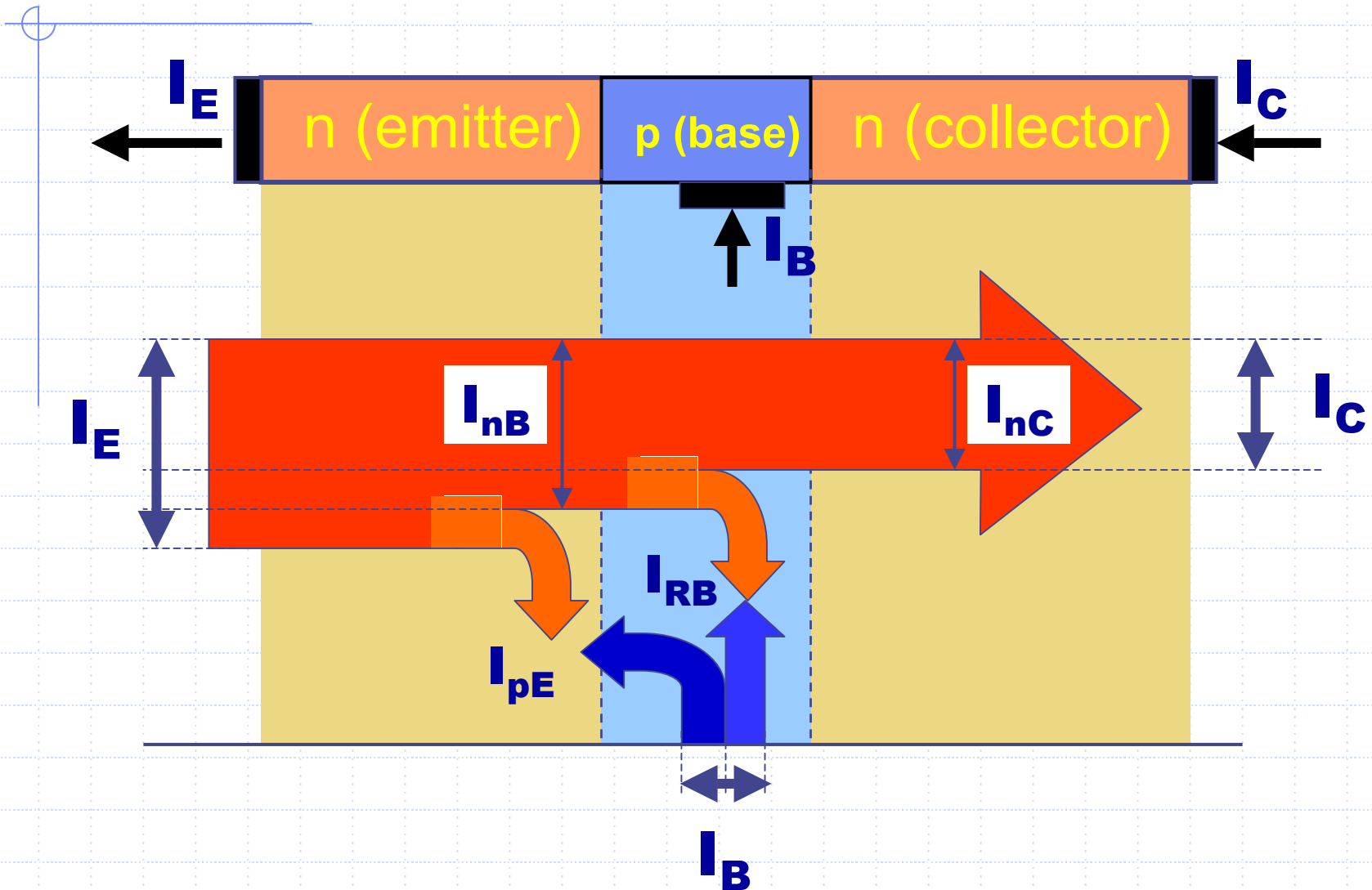
## Analisi semplificata

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



# Transistor bipolare a giunzione

## Analisi semplificata



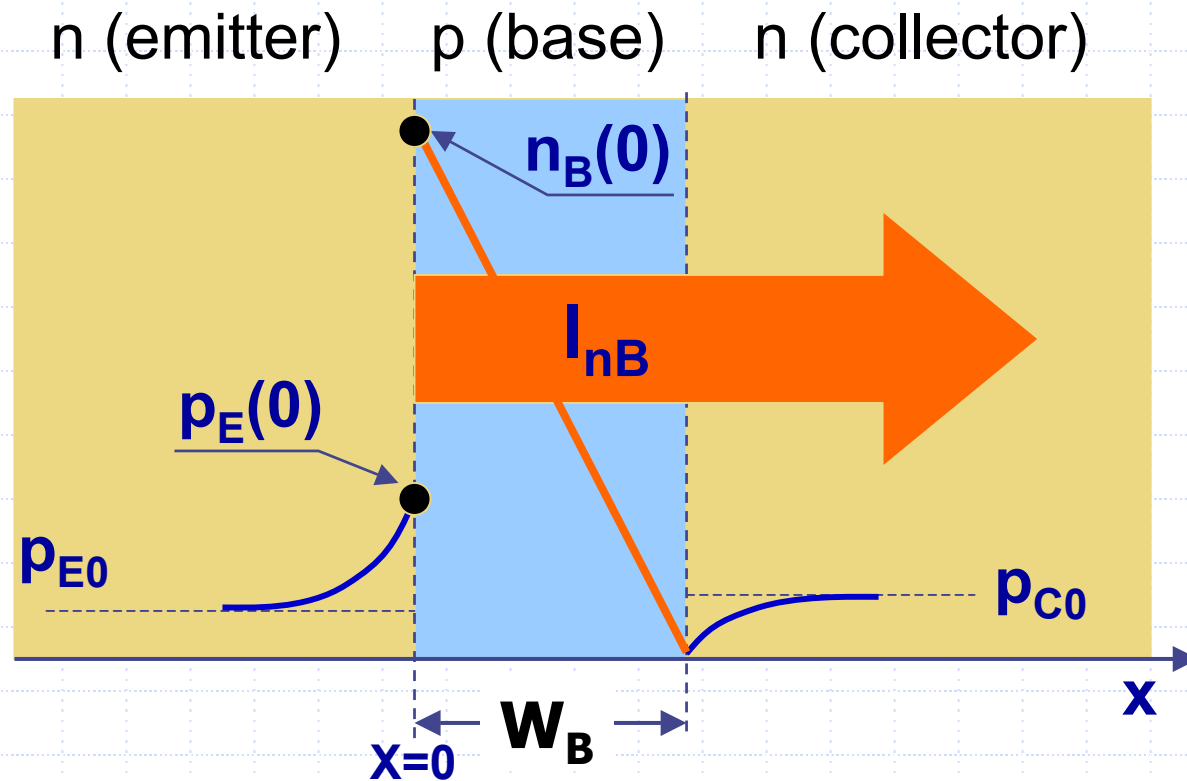
# Transistor bipolare a giunzione

## 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 ( $I_{nB}$ )

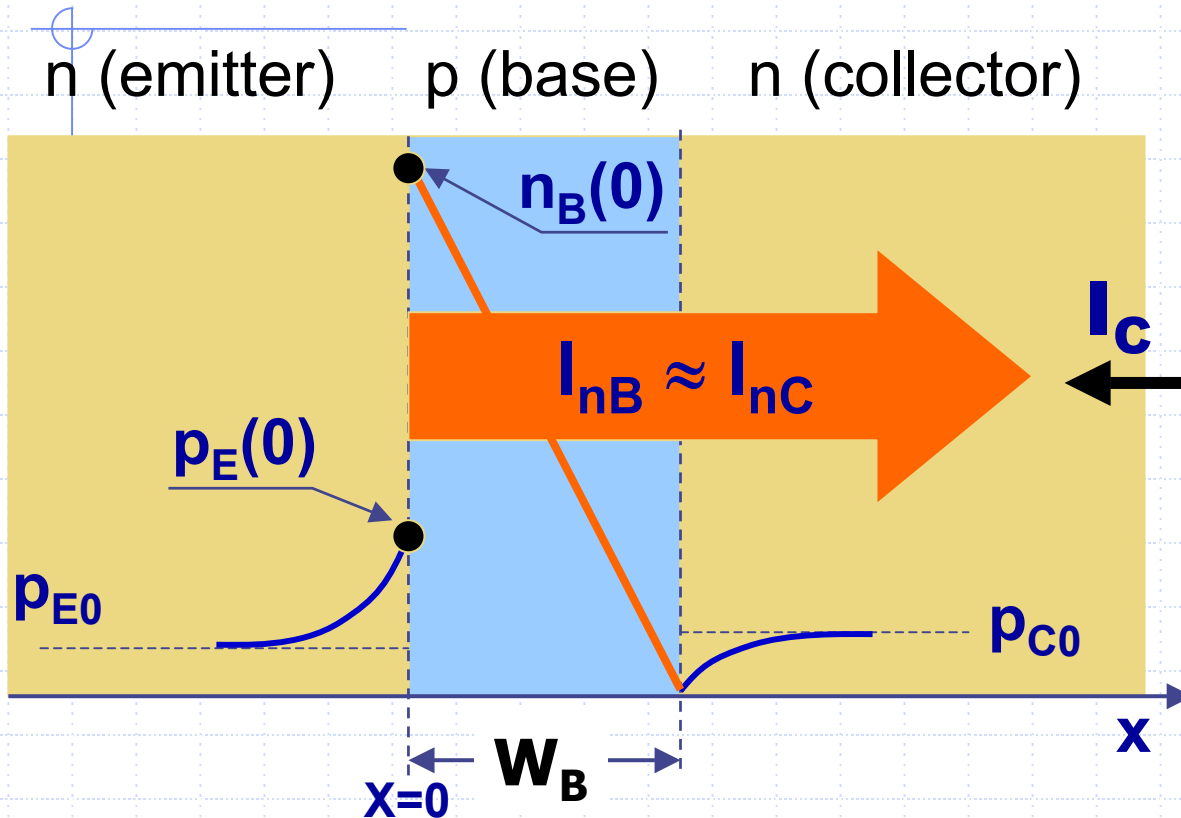


$$n_B(0) = n_{B0} e^{\frac{V_E}{V_T}}$$

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

# Transistor bipolare a giunzione

## Analisi semplificata ( $I_C$ )

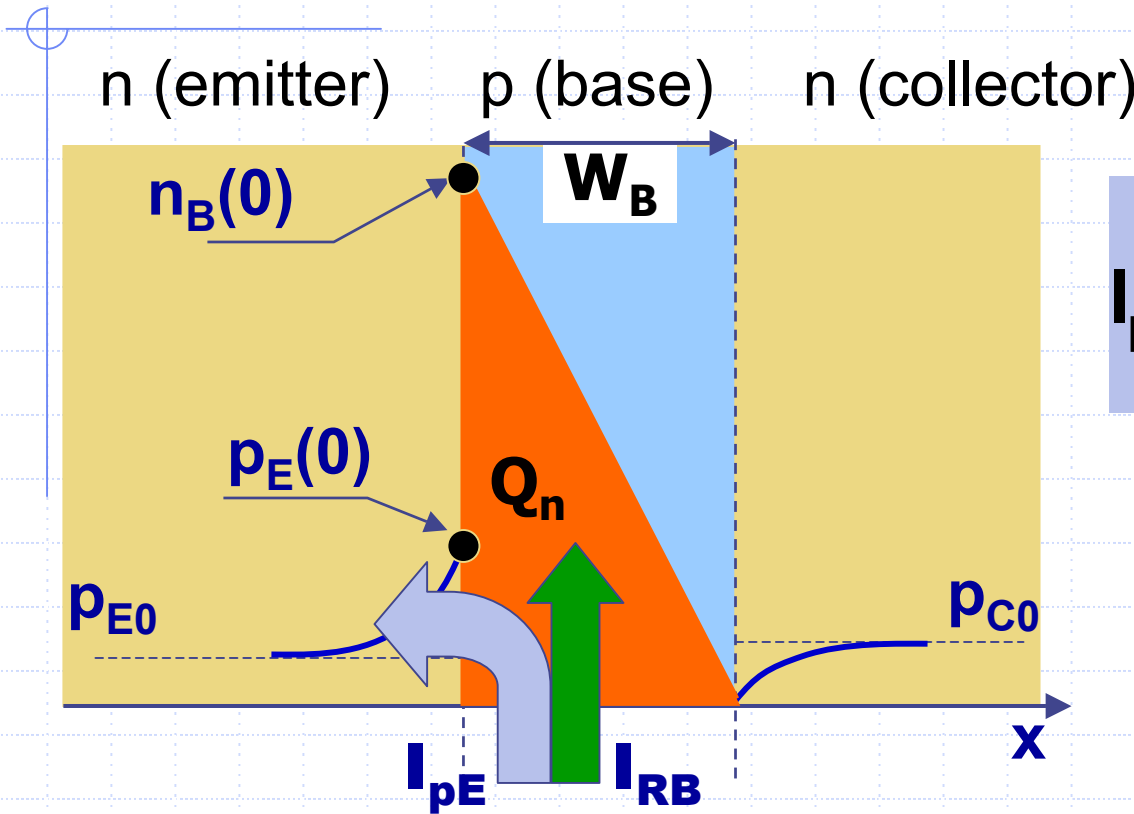


NOTA:  
non ho  
considerato la  
 $I_{RB}$  in quanto  
 $I_{nC} \gg I_{RB}$   
e quindi  
 $I_{nB} \cong I_{nC} = -I_C$

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

# 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 ( $I_B$ )

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

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

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

# Transistor bipolare a giunzione

## Analisi semplificata ( $I_B$ )

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

$\beta$  = Guadagno di corrente ad emettitore comune

Per avere valori di  $\beta$  elevati bisogna 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

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

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

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

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

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

$$I_C = \alpha I_E$$

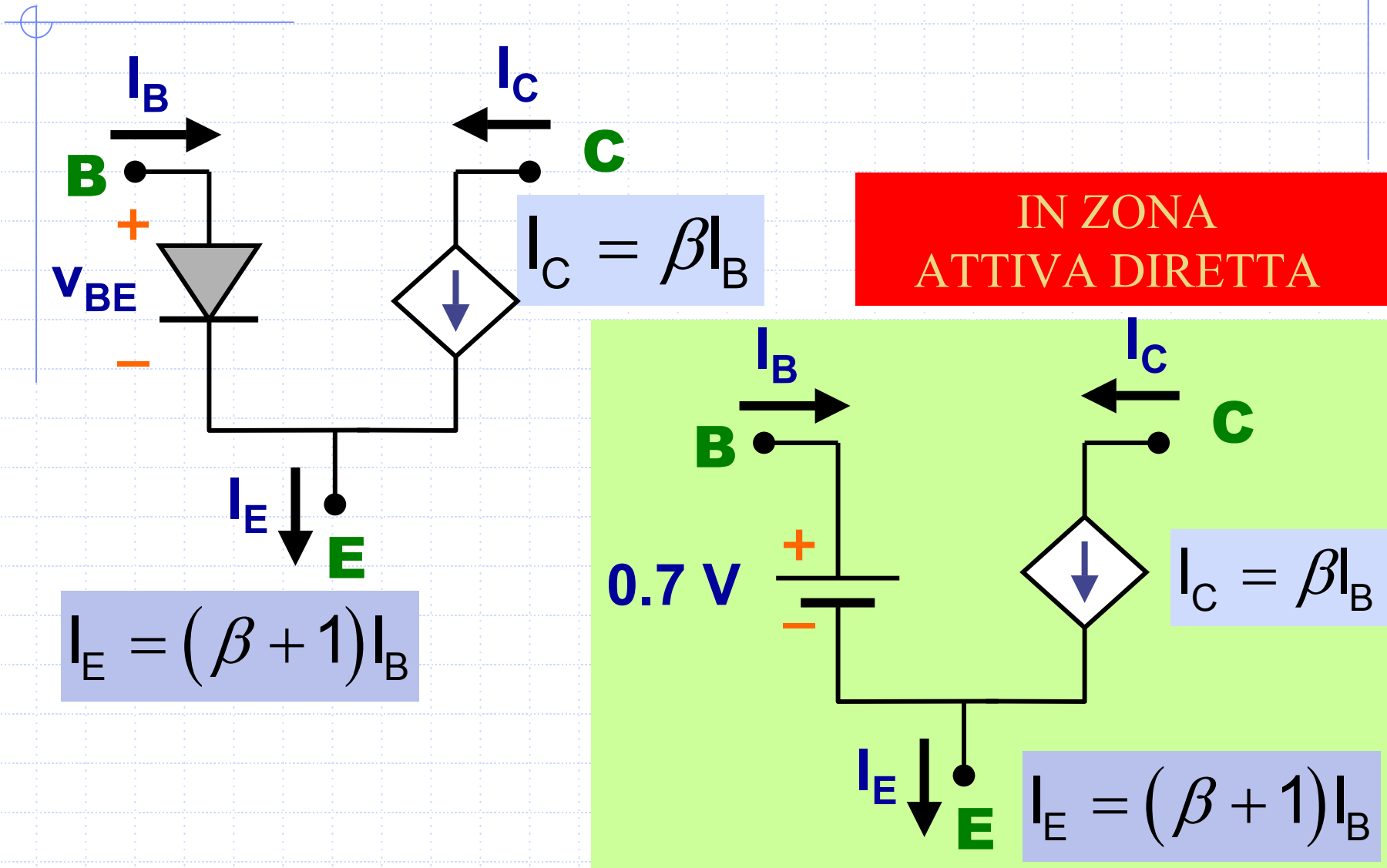
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$\alpha$  = Guadagno di corrente a base comune



# Transistor bipolare a giunzione

## Modello circuitale



# Transistor bipolare a giunzione

## Funz. in zona di SATURAZIONE

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

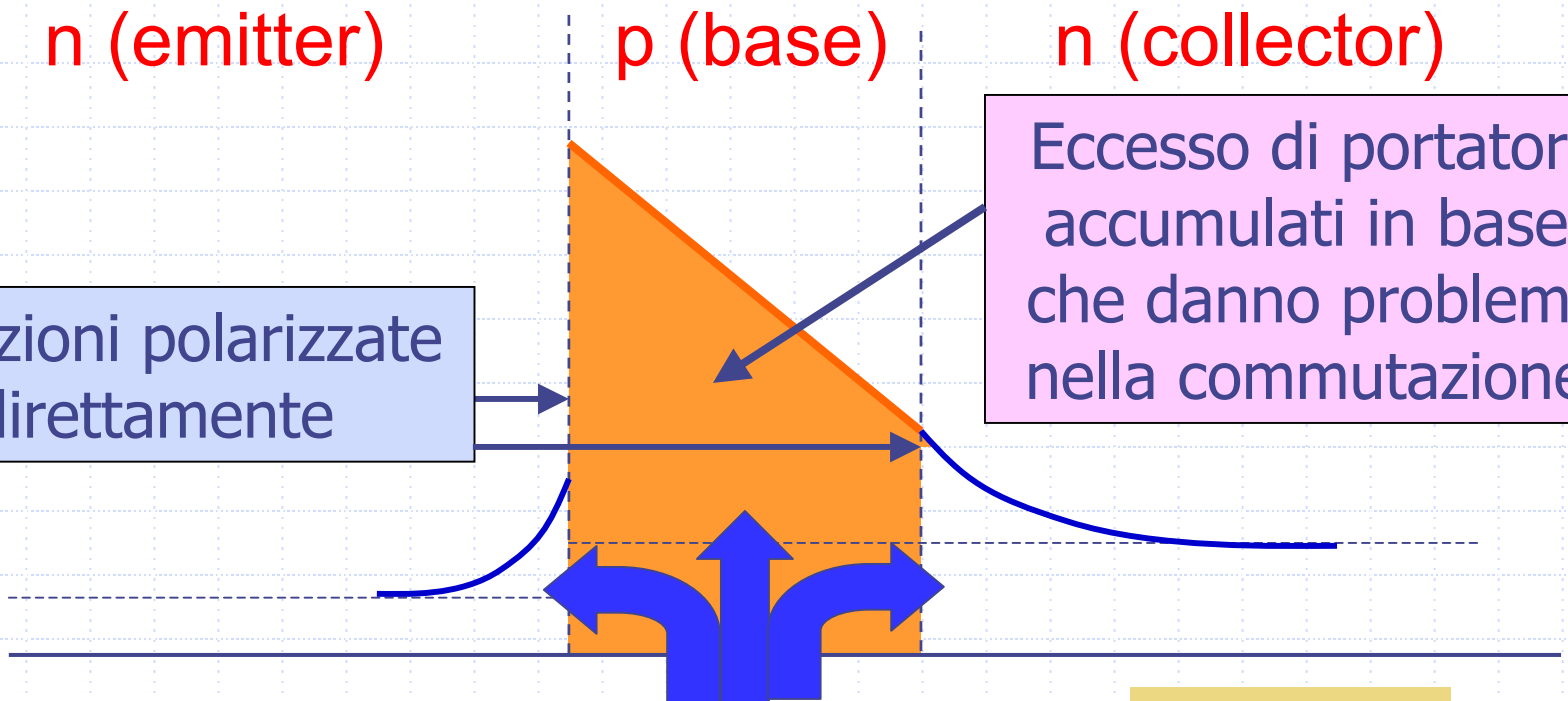
n (emitter)

p (base)

n (collector)

Giunzioni polarizzate direttamente

Eccesso di portatori accumulati in base che danno problemi nella commutazione

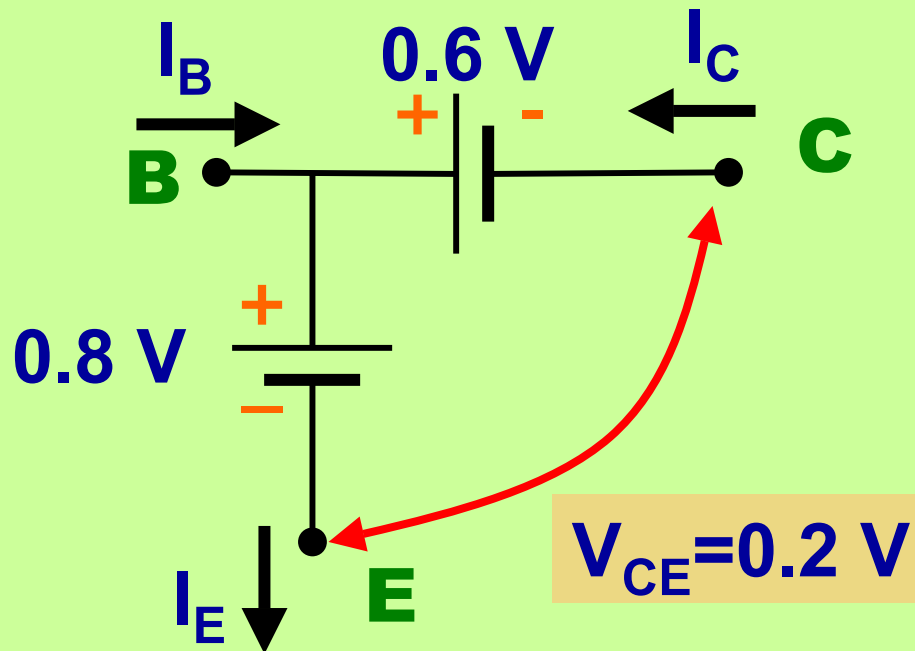


$$I_C < \beta I_B$$

# 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

n (emitter)

p (base)

n (collector)

Giunzioni polarizzate  
inversamente

$$I_C = 0$$

$$I_B = 0$$

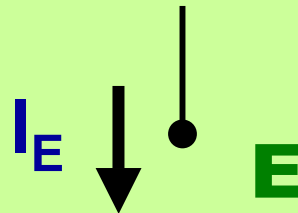
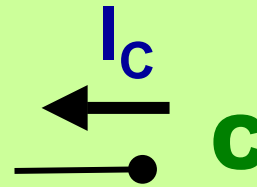
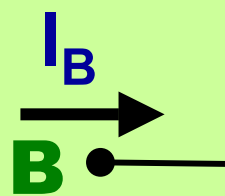
$$I_E = 0$$

Trascurando la corrente di saturazione inversa

# Transistor bipolare a giunzione

## Modello circuitale

IN INTERDIZIONE



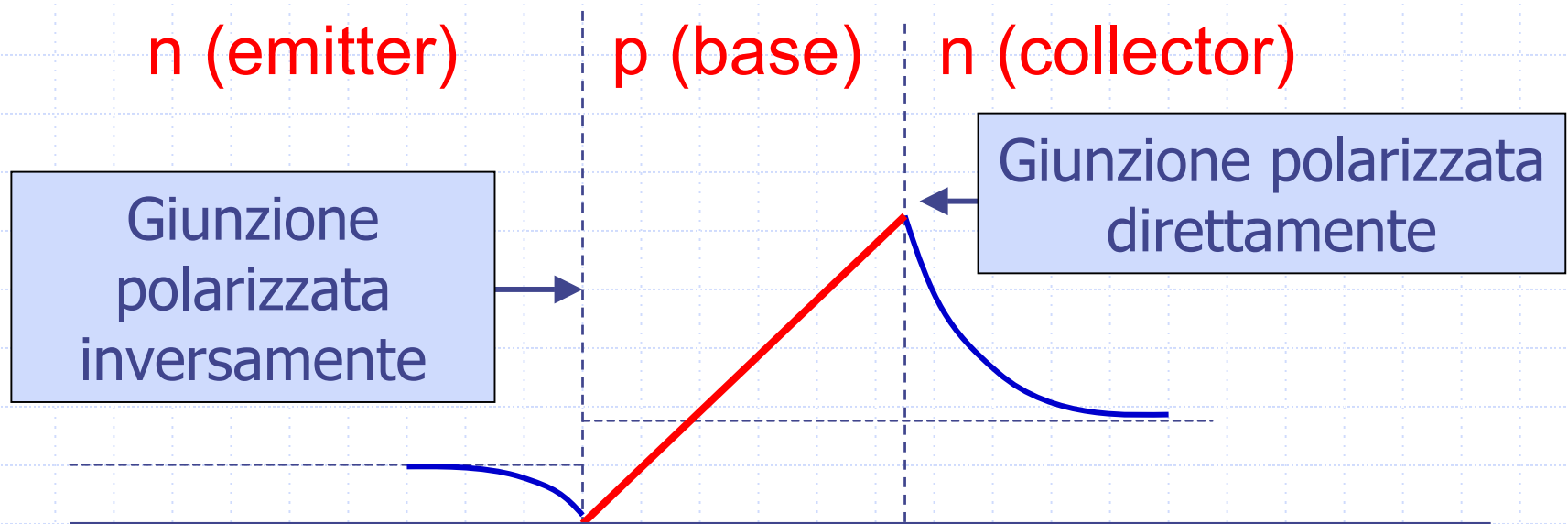
$$\begin{aligned} I_C &= 0 \\ I_B &= 0 \\ I_E &= 0 \end{aligned}$$

# Transistor bipolare a giunzione

## Funz. in ATTIVA INVERSA

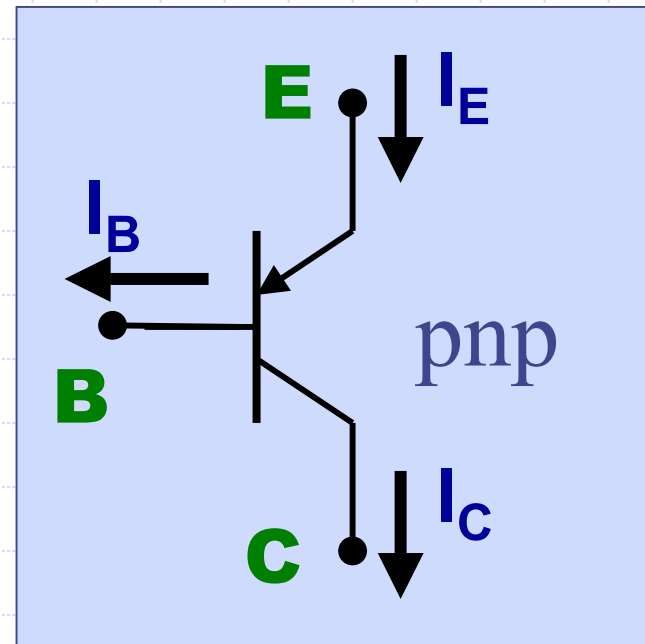
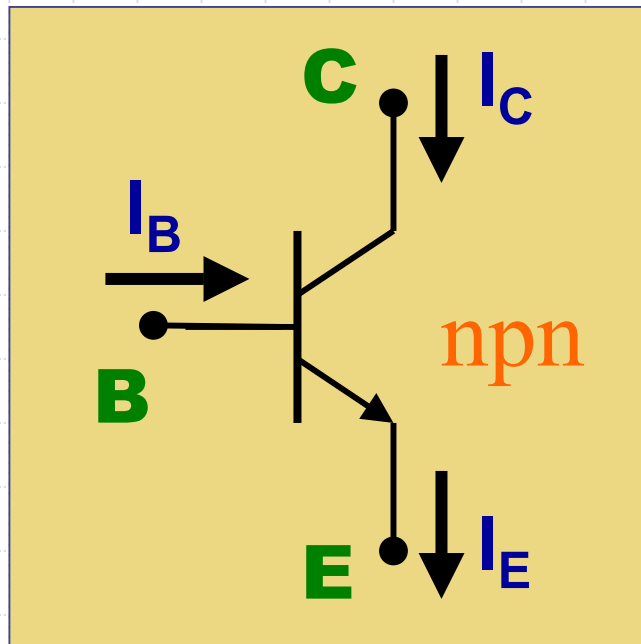
Giunzione Base-emettitore	Giunzione Base-collettore	MODO
Inversa	Diretta	ATTIVA Inversa

Vedremo dopo che il bjt non e' simmetrico, c'è ancora effetto transistor, ma c'è poca (anche  $< 1$ ) amplificazione!!  
**NON VIENE MAI USATA!**



# Transistor bipolare a giunzione

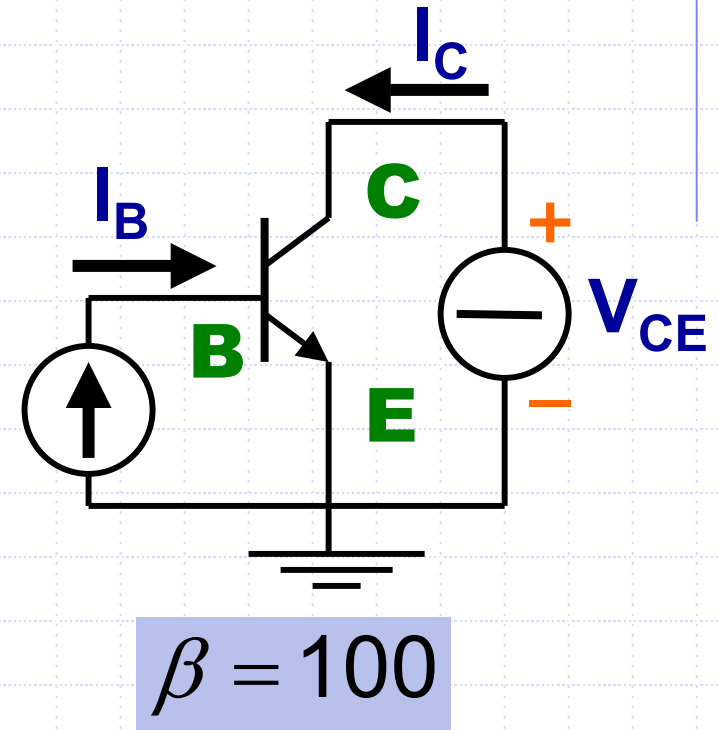
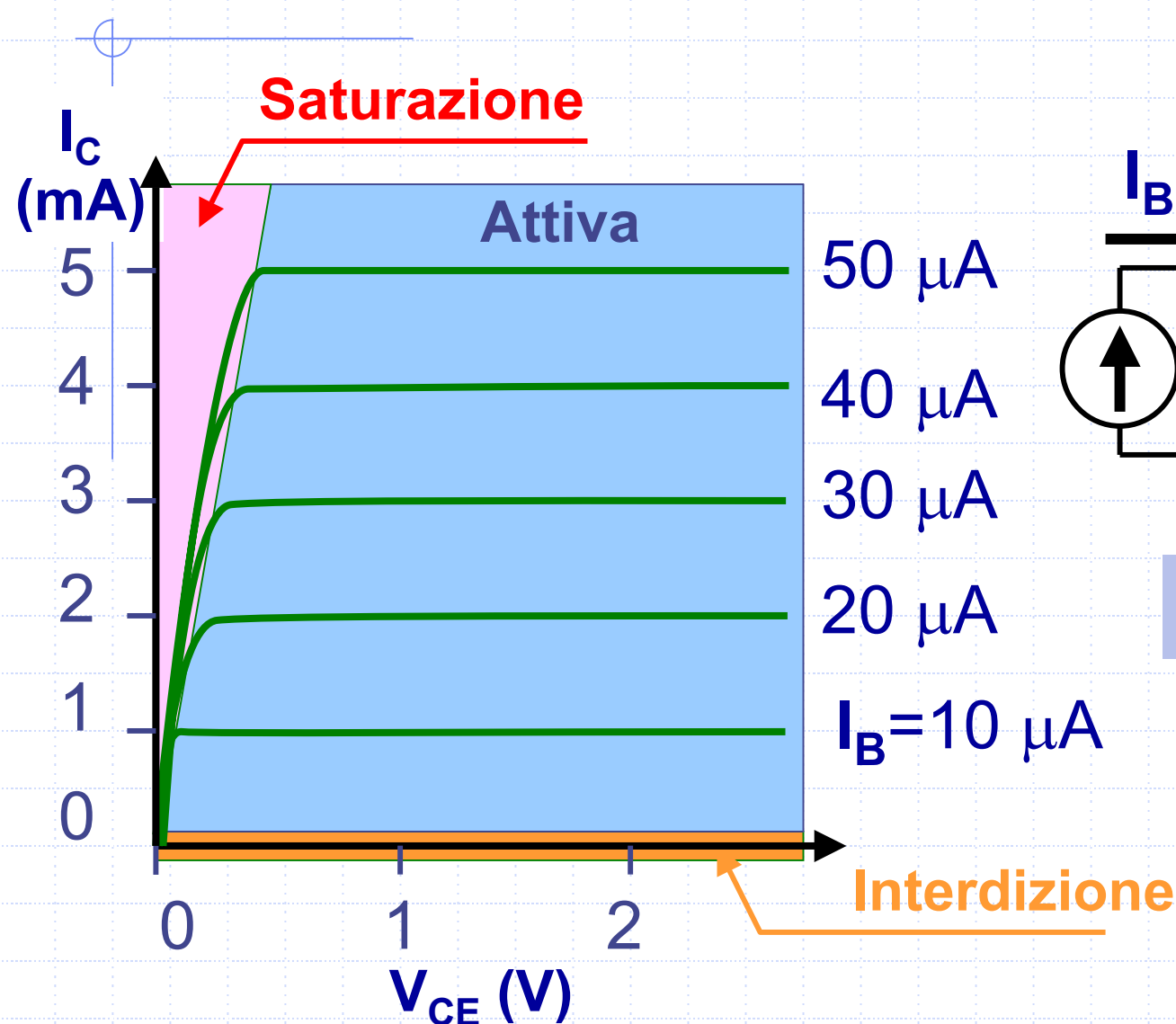
## Simboli circuitale e convenzioni



**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

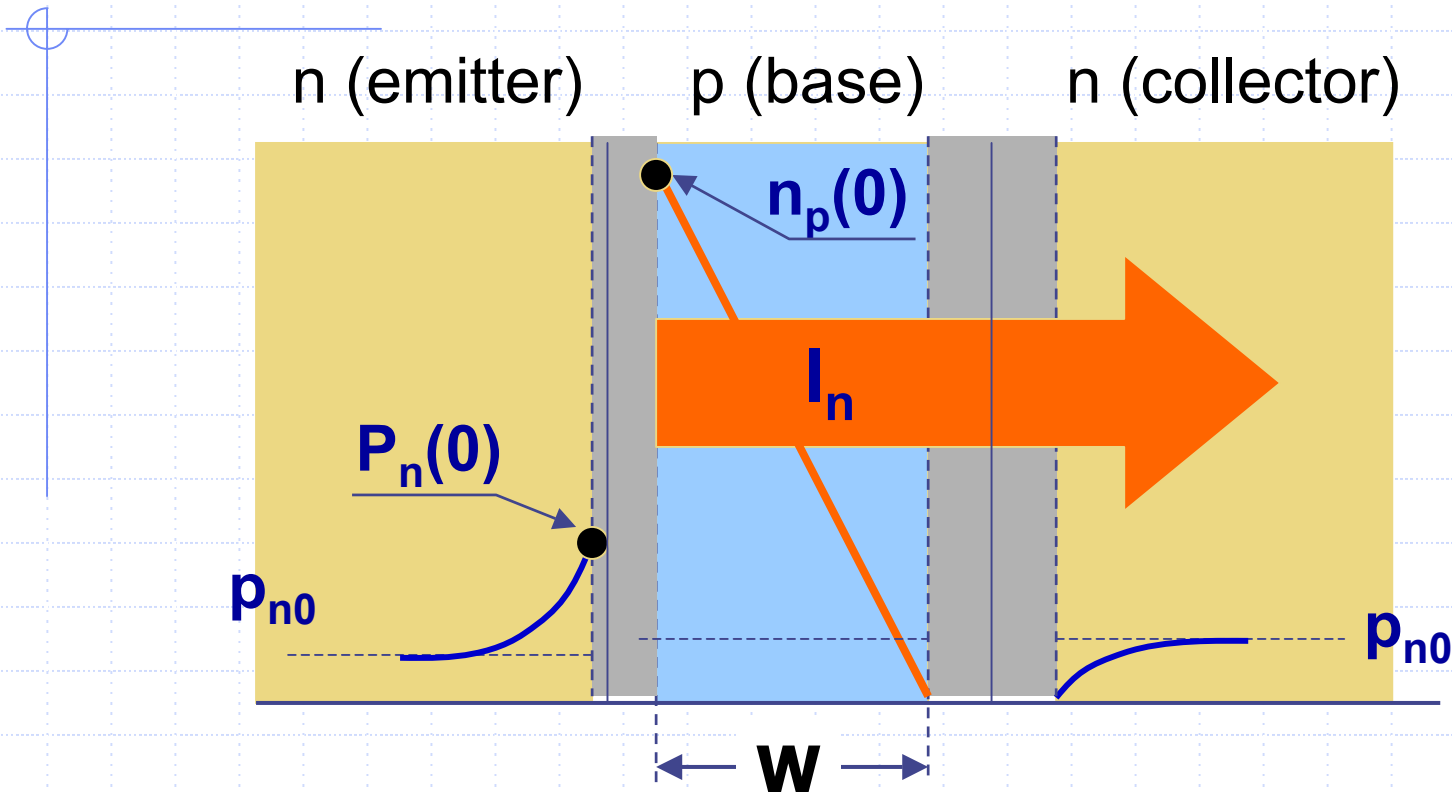


Dalla trattazione Semplificata, non c'è Dipendenza da  $V_{CE}$  (V)



# Transistor bipolare a giunzione

## EFFETTO EARLY

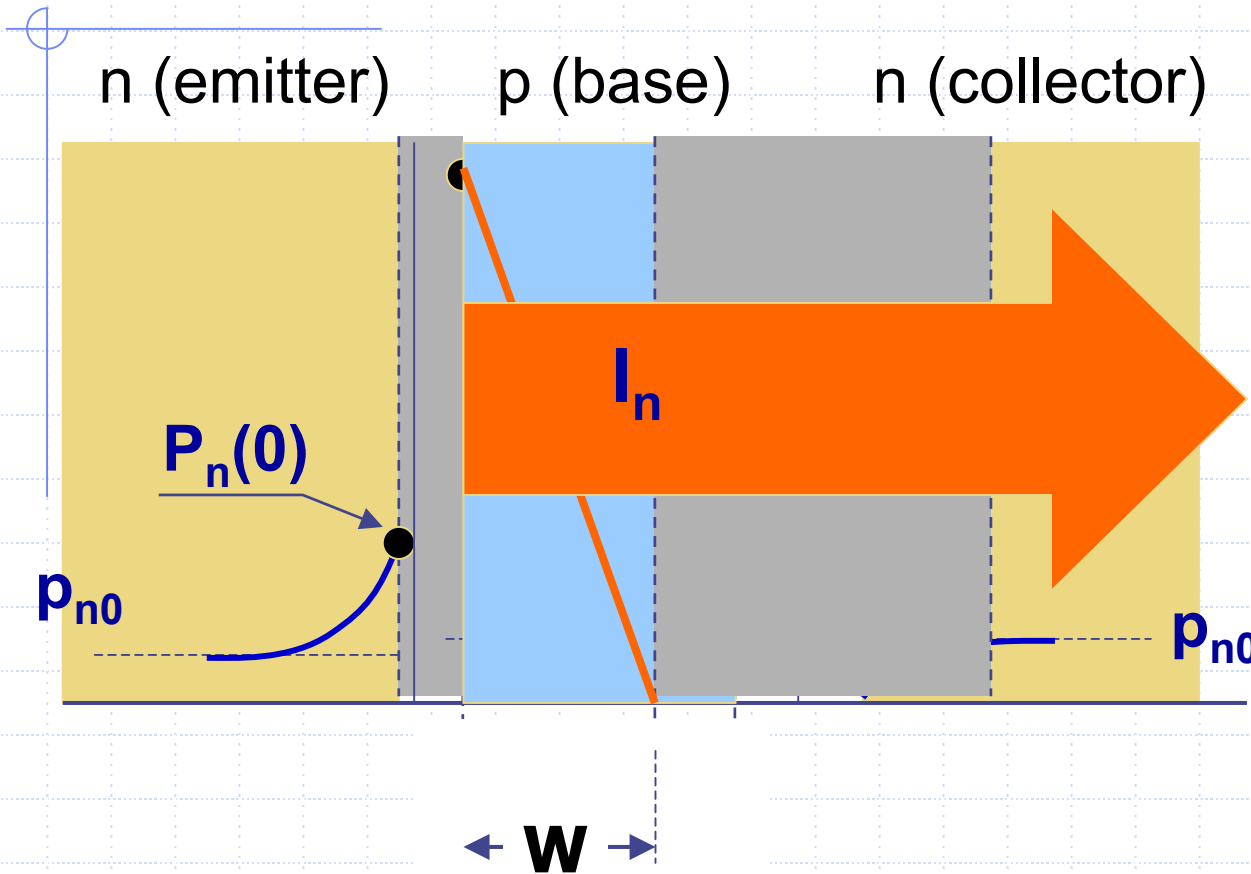


$$I_n = A_E q D_n \frac{\partial n_p(x)}{\partial x} = A_E q D_n \left( -\frac{n_p(0)}{W} \right)$$

$I_n$  dipende dal gradiente di concentrazione di elettroni in base

# Transistor bipolare a giunzione

## EFFETTO EARLY



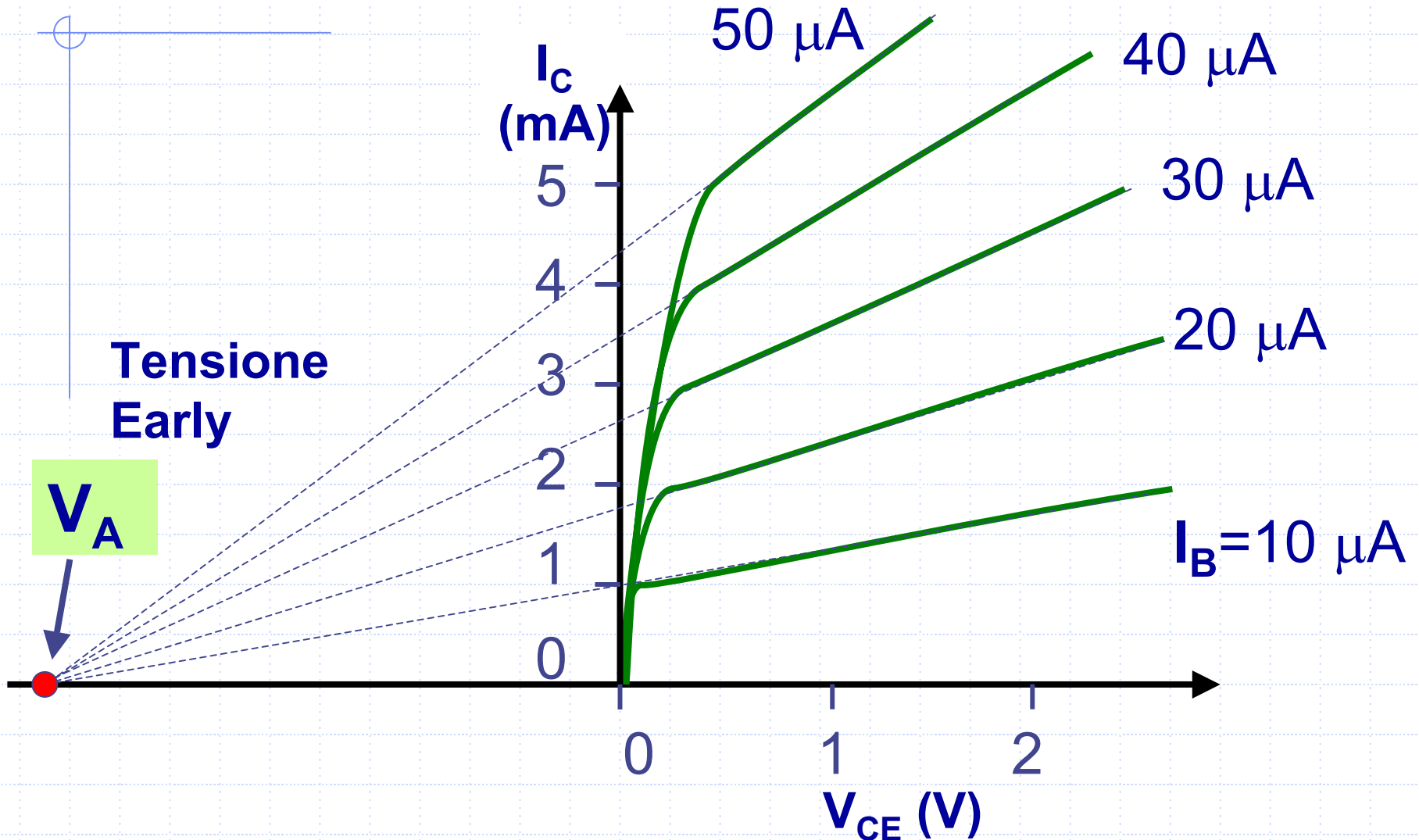
Aumentando  $V_{CE}$ ,  
aumenta anche la  
polarizzazione  
inversa della BCJ

Si ha un  
allargamento  
della RCS e  
diminuzione di  $W$

Questo comporta un aumento del gradiente di concentrazione di elettroni in base con il conseguente aumento di  $I_n$

# Transistor bipolare a giunzione

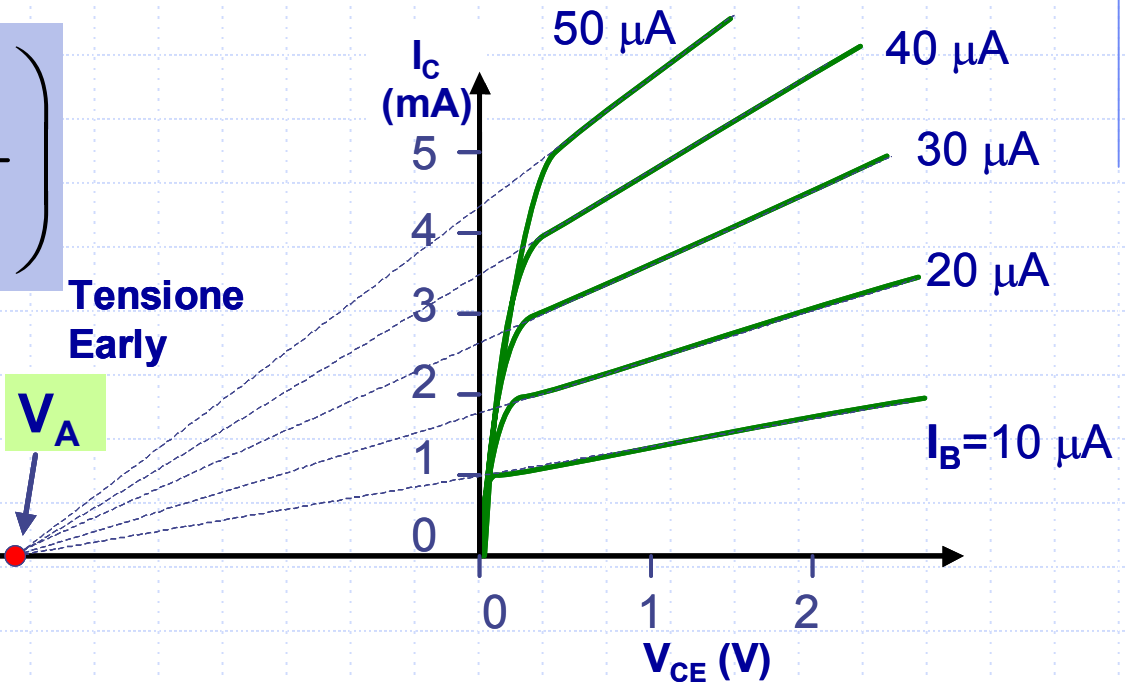
## EFFETTO EARLY – caratt. uscita



# Transistor bipolare a giunzione

## EFFETTO EARLY – caratt. uscita

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



$$r_o = \left[ \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \Big|_{I_B, V_{BE} \text{ cost}} \right]^{-1}$$
$$\approx \frac{V_A}{I_C}$$

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

# Transistor bipolare a giunzione

## Struttura dei transistor attuali

