

# **ELETTRONICA**

**CdS Ingegneria Biomedica**

## **LEZIONE A.05**

**Il transistor bipolare**

**Funzionamento del BJT**

**Caratteristiche del BJT**

**Polarizzazione del BJT**

**Modello del BJT per piccoli segnali**

**Potenza nei transistori bipolari**

Parte 1

# Funzionamento dei BJT

Come è fatto un BJT

Regioni di funzionamento

Il modello di Ebers-Moll

# Com'è fatto un BJT

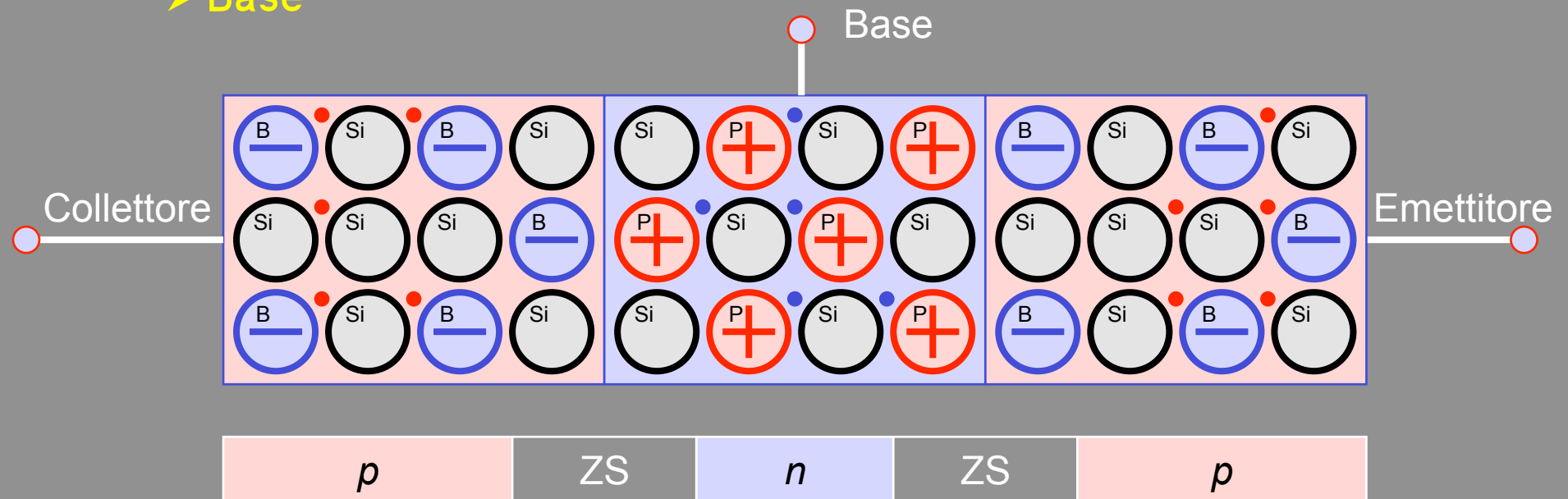
## ➤ Struttura a semiconduttori

➤ Composta da due regioni dello stesso tipo (*n* o *p*)

➤ Collettore, Elettore

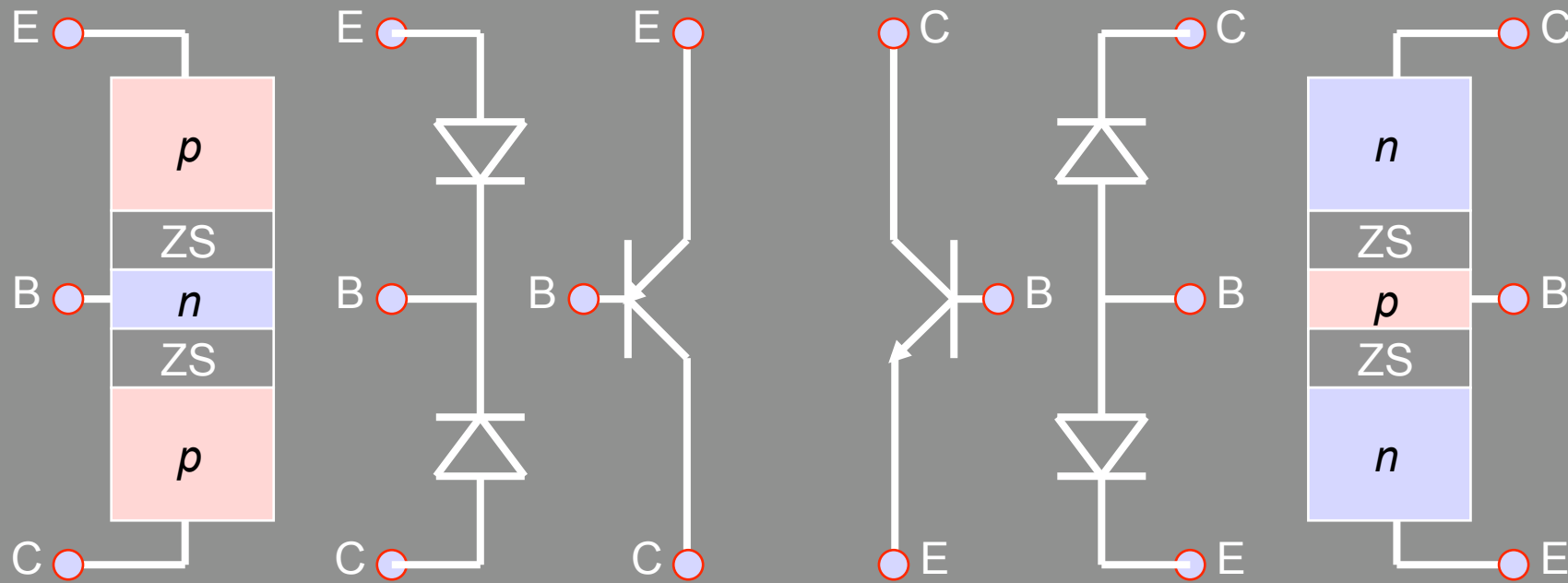
➤ Separate da una sottile regione del tipo opposto

➤ Base



# Tipi di BJT: *npn* e *pnp*

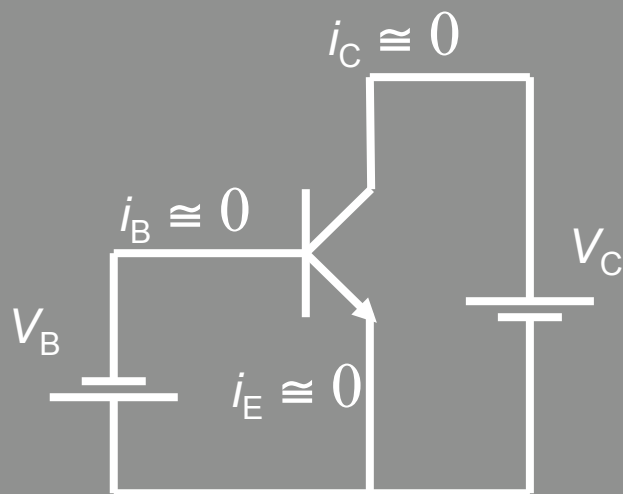
- **Esistono quindi due tipo di BJT**
  - Si parla di transistori *pnp* e *npn*
  - Si può pensare di modellare le due giunzioni con diodi
    - Ma nella regione di base c'è interferenza tra i due diodi





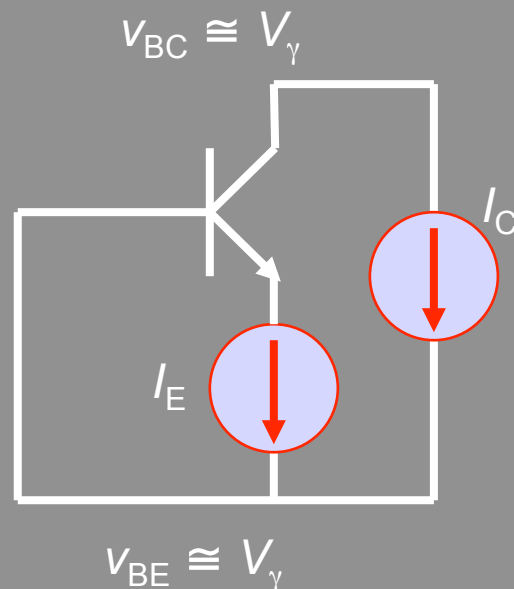
# Interdizione

- **Entrambe le giunzioni sono interdette**
  - Prendiamo per esempio il transistor *npn*
    - La base è a un potenziale inferiore a quello di collettore ed emettitore
  - **Il modello a diodi sembra funzionare**
    - È tutto spento, le correnti in gioco sono irrilevanti



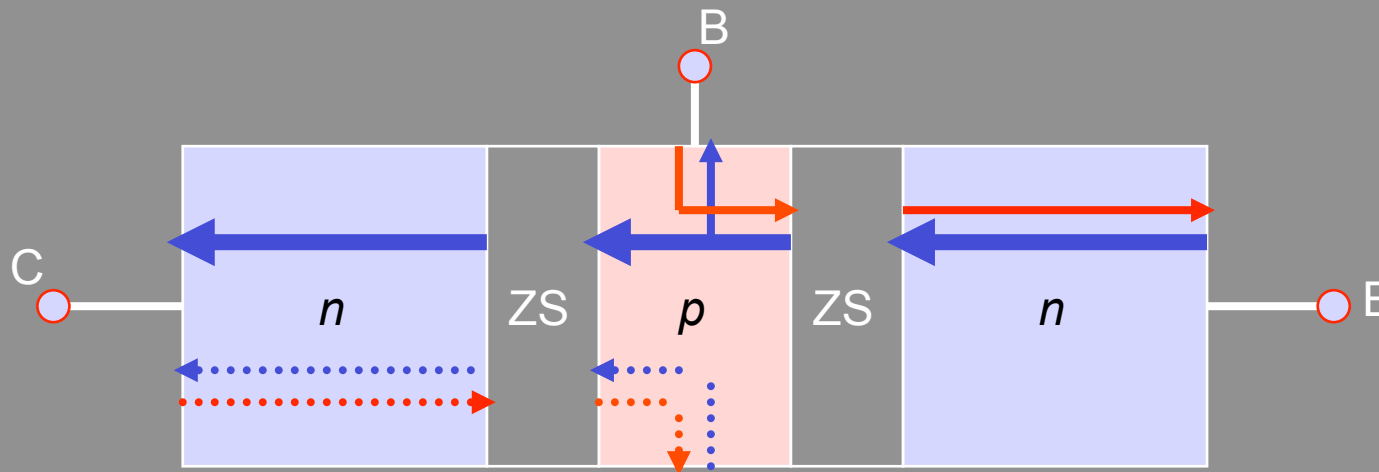
# Saturazione

- **Entrambe le giunzioni conducono**
  - **Sempre nel transistor *n*pn**
    - Dalla base scorre corrente verso collettore ed emettitore
  - **Il modello a diodi sembra ancora funzionare**
    - È tutto acceso, le giunzioni sono quasi un cortocircuito ( $V_\gamma$ )



# Zona attiva (diretta)

- Una giunzione è “in diretta” e una “in inversa”
  - Scorre corrente dalla base verso l'emettitore
  - C'è interferenza con la situazione dell'altra giunzione
    - I portatori minoritari che entrano dall'emettitore e arrivano alla zona di svuotamento base-collettore, proseguono verso il collettore

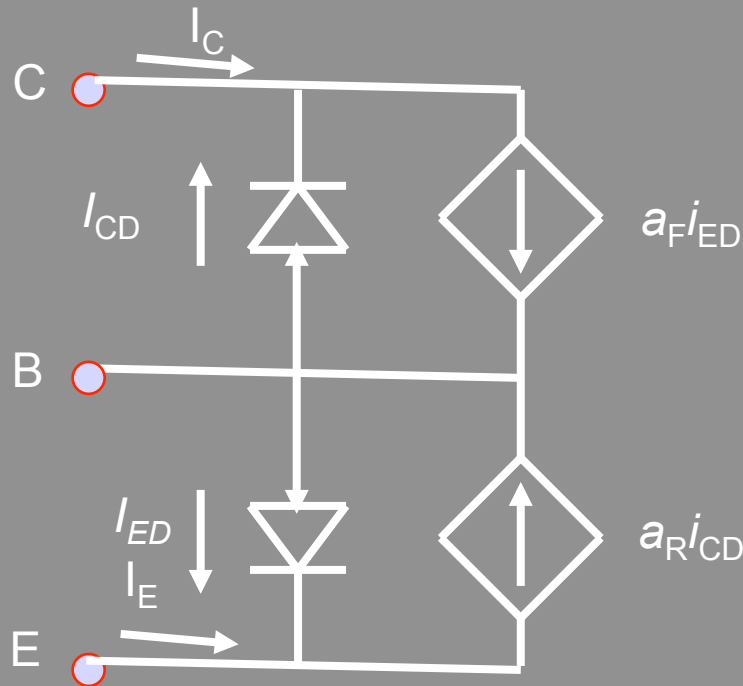


# Conseguenza

- **La corrente inversa nella giunzione C-B è molto superiore a quella di interdizione**
  - Non dipende dalla  $v_{CB}$
  - La corrente  $i_B$  è una piccola frazione della  $i_C$ 
    - Tra  $i_C$  e  $v_{BE}$  vale approssimativamente la legge di Schokley
- **Il dispositivo si comporta come un amplificatore di corrente**
  - La resistenza di ingresso è bassa
  - La resistenza di uscita elevata
  - La corrente di uscita proporzionale a quella di ingresso

# Modello di Ebers e Moll

- Occorre introdurre in parallelo ai diodi dei generatori di corrente
  - Proporzionali alla corrente nella giunzione opposta
    - I diodi seguono la legge di Schokley
    - Nel caso ideale si ha  $a_R I_{SCB} = a_F I_{SEB}$



$$I_E = -I_{SEB} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) + a_R I_{SCB} \left( e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right)$$

$$I_C = -I_{SCB} \left( e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right) + a_F I_{SEB} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

Parte 2

# Caratteristiche dei BJT

Scelta dei riferimenti

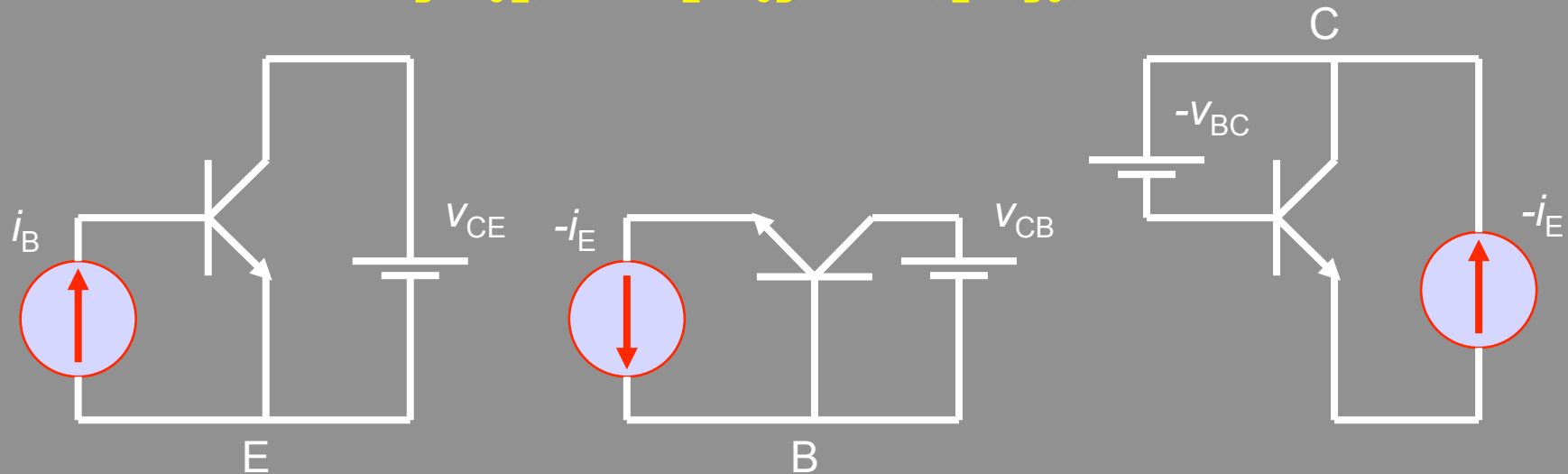
Caratteristiche a emettitore comune

Caratteristica di ingresso

Caratteristiche di uscita

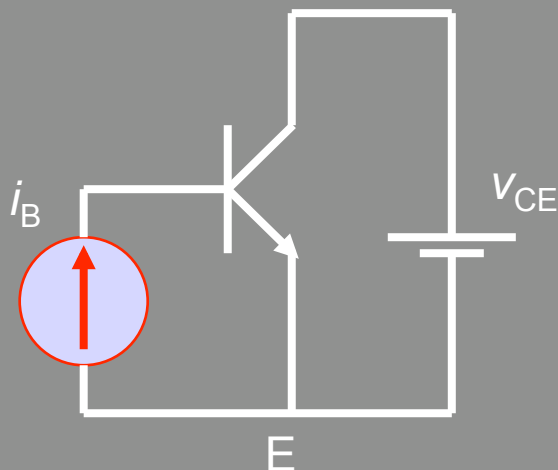
# Scelta dei riferimenti

- Il BJT è un dispositivo a 3 terminali: E, B, C
  - Per descrivere il componente se ne sceglie uno come riferimento in modo arbitrario
  - Gli altri due costituiscono col riferimento la porta di ingresso e quella di uscita
    - Modello CE ( $i_B, v_{CE}$ ), CB ( $i_E, v_{CB}$ ), CC ( $i_E, v_{BC}$ )



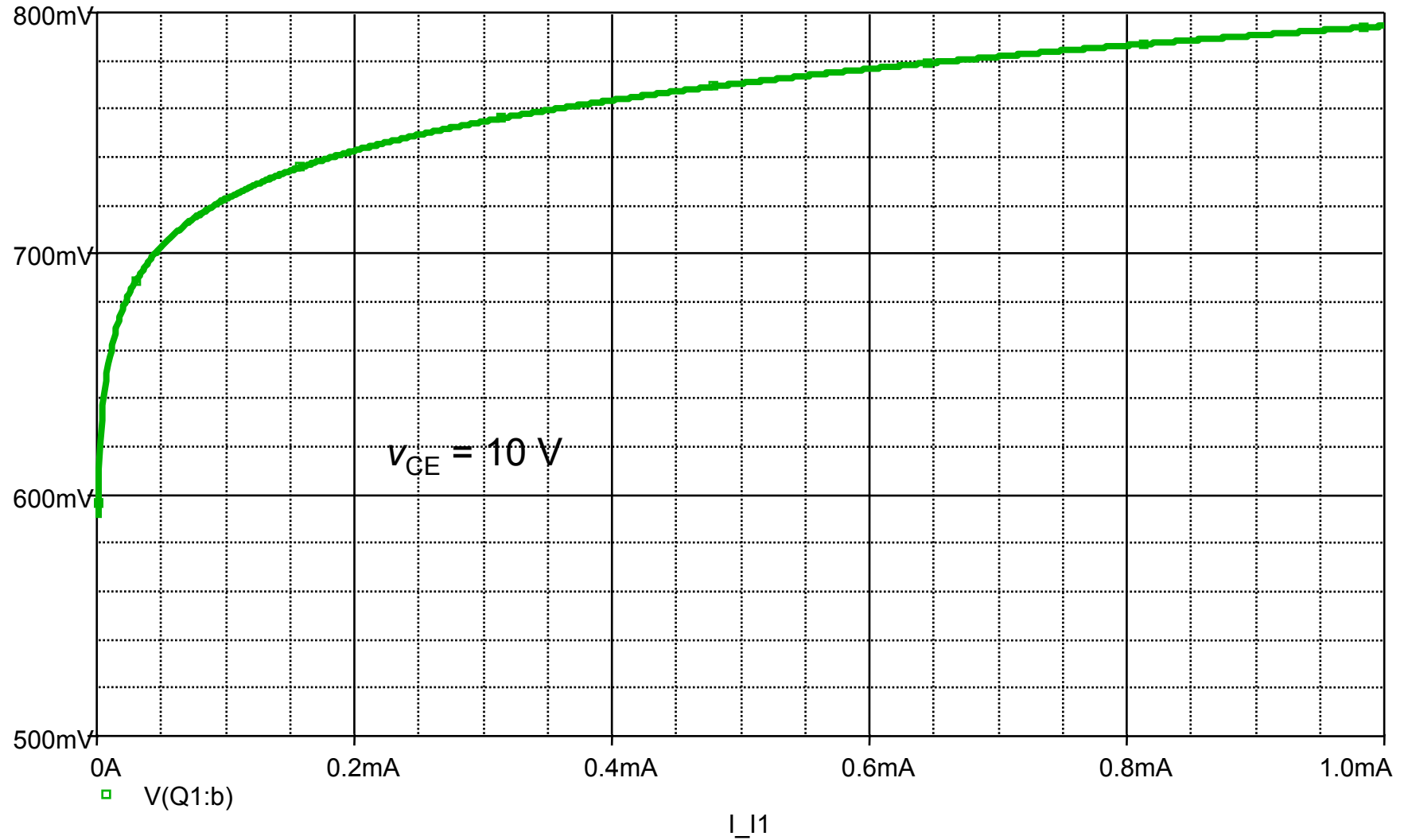
# Caratteristiche a emettitore comune

- Sono le più diffuse
- Amplificatore di corrente
  - Uscita:  $i_C$  in funzione di  $v_{CE}$  al variare di  $i_B$ 
    - Sono una famiglia di curve con parametro  $i_B$
  - Ingresso:  $v_{BE}$  in funzione di  $i_B$  per una data  $v_{CE}$ 
    - La corrente di ingresso varia poco con l'uscita: è data una sola curva

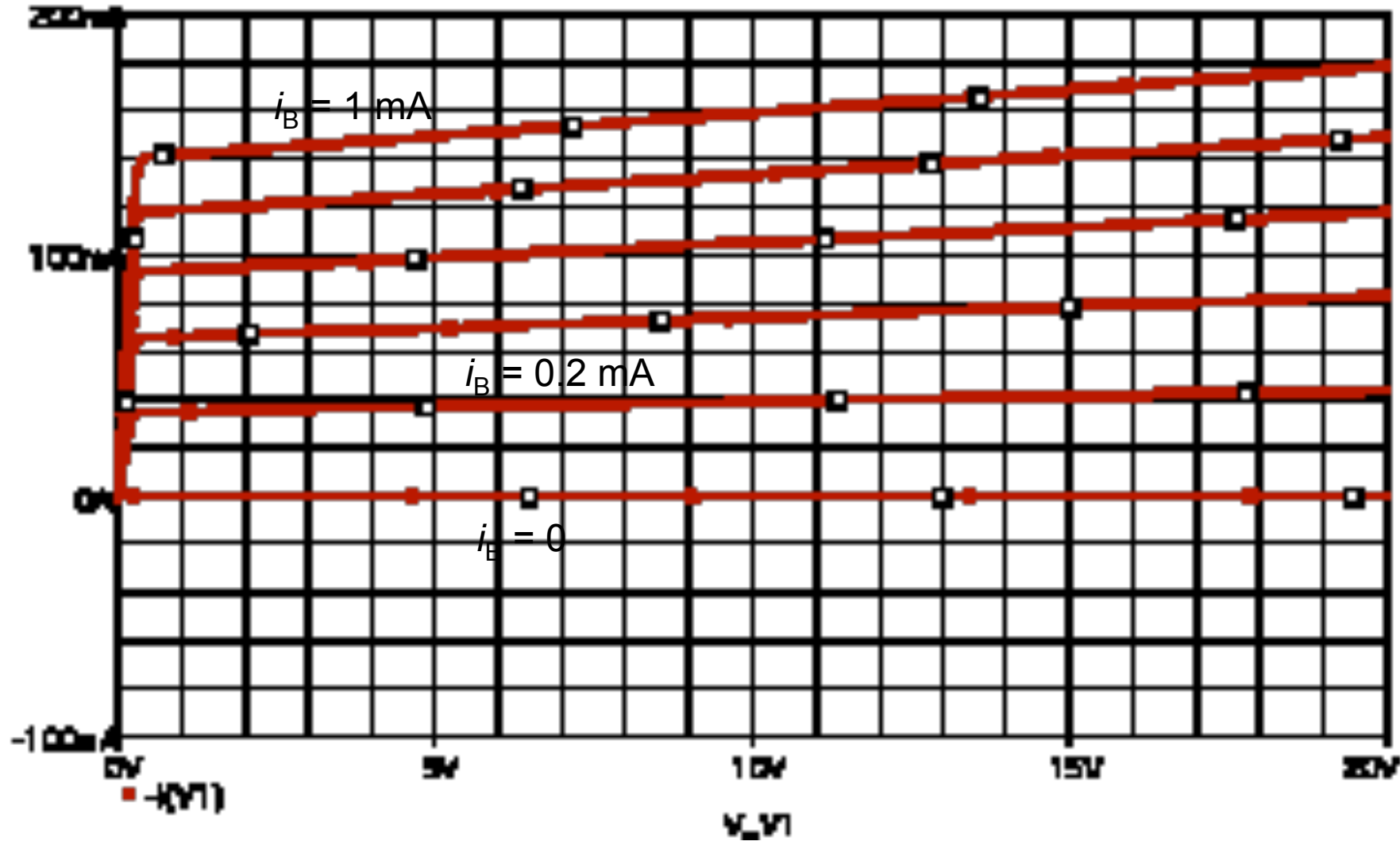




# Caratteristica di ingresso (2N2222)



# Caratteristiche di uscita



**Parte 3**

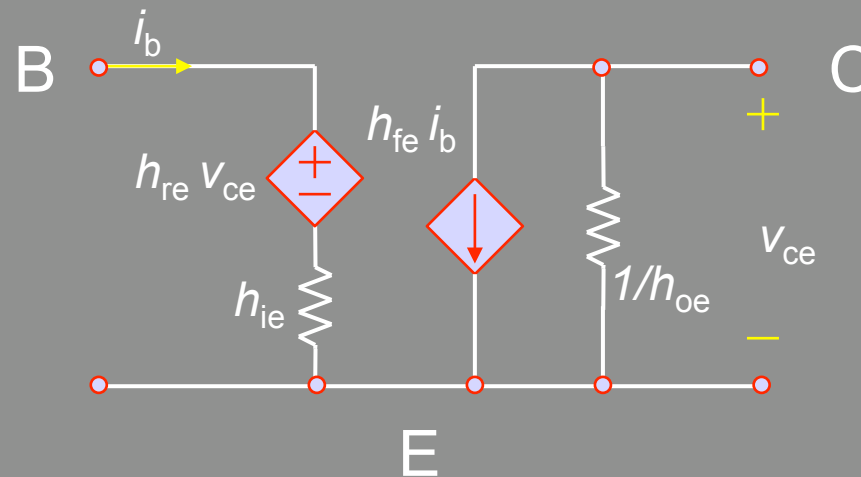
# **Modello per piccoli segnali**

**Parametri ibridi**

**Valutazione dei parametri**

# Modello per piccoli segnali

- **Transistore in zona attiva**
  - In un preciso punto di riposo ( $v_{CE}$ ,  $i_C$ ,  $i_B$ ,  $v_{BE}$ )
- **Configurazione a emettitore comune**
- **Amplificatore di corrente**



# Valutazione dei parametri

## ➤ Ci si pone nel punto di riposo

### ➤ Dalle caratteristiche di uscita

- Si possono ricavare  $h_{fe}$  e  $h_{oe}$
- Spesso, nel circuito equivalente, si può trascurare  $1/h_{oe}$

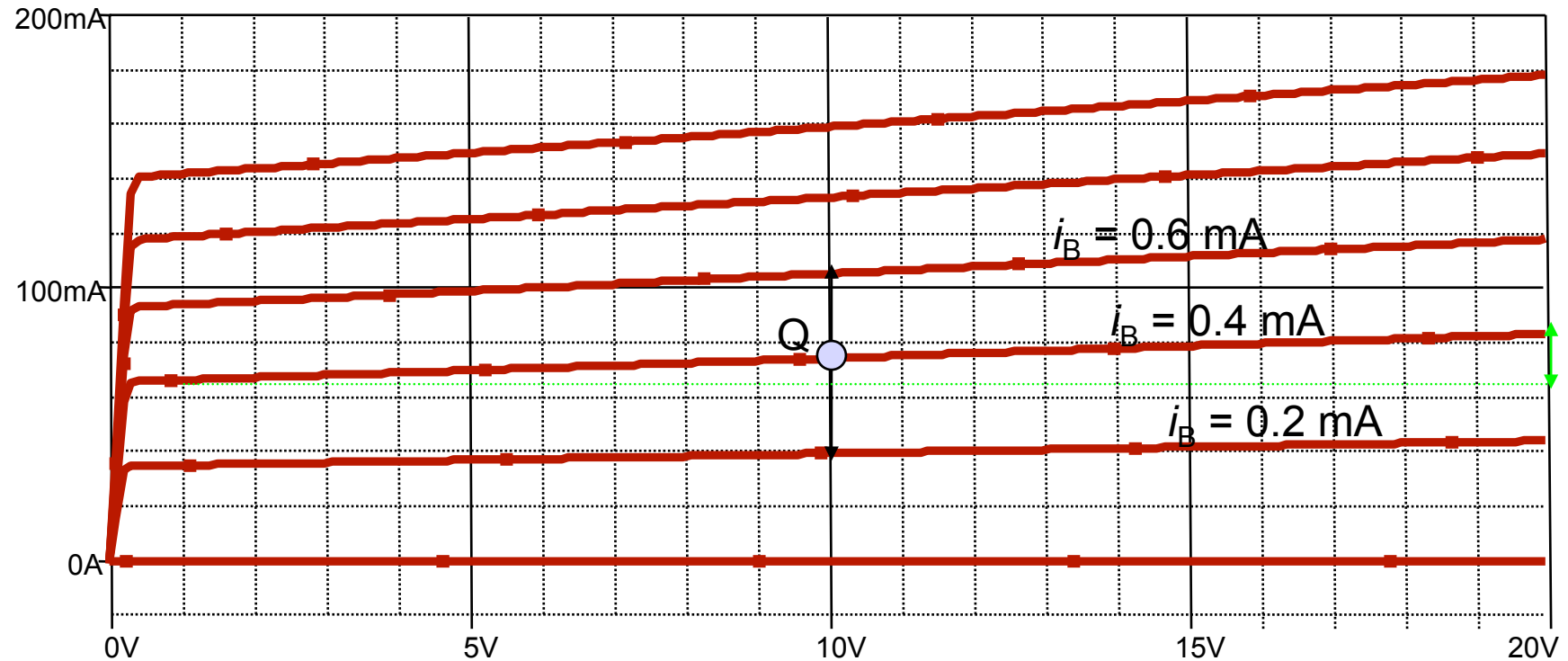
### ➤ Dalle caratteristiche di ingresso

- Dall'equazione di Shockley si ricava  $h_{ie}$
- Si può tenere conto anche della resistenza intrinseca  $r_{bb'}$

### ➤ Approssimazione di unidirezionalità

- I valori tipici per  $h_{re}$  sono molto bassi ( $10^{-5} \div 10^{-4}$ )
- Se si è trascurato  $h_{oe}$ , si può anche trascurare  $h_{re}$

# Calcolo di $h_{fe}$ e $h_{oe}$



$$\Delta i_C = 64 \text{ mA}$$

$$\Delta i_C = 9 \text{ mA}$$

$$\Delta i_B = 0.4 \text{ mA}$$

$$\Delta v_{CE} = 18 \text{ V}$$

$$h_{fe} = 160$$

$$h_{oe} = 0.5 \text{ mS}$$

# Trascurare l'impedenza di uscita

- Di norma, se lo stadio di uscita vede un carico la cui resistenza differenziale è  $r_L < 0.1/h_{oe}$ , la resistenza di uscita  $1/h_{oe}$  può essere omessa
- Nello stesso caso, sia ha quindi  $v_{ce} = h_{fe} i_b r_L$
- La tensione riportata in ingresso è quindi
  - $i_b h_{re} h_{fe} r_L \ll i_b h_{re} h_{fe} / h_{oe}$
- Quest'ultimo termine deve essere confrontato con  $h_{ie}$ : se, come avviene tipicamente, è trascurabile rispetto a questo, l'amplificatore si può considerare unidirezionale

# Calcolo di $h_{ie}$

- Solitamente, il costruttore dichiara il valore  $h_{ie}$  in condizioni tipiche ( $@ v_{CE}^*, i_C^*$ ):  $h_{ie}^*$
- $h_{ie}$  è composto da due termini
  - Un termine costante, dovuto alla resistenza del silicio
  - Un termine non lineare, secondo la legge di Schockley
    - $i_C = I_S \exp(v_{BE}/\eta V_T)$  (tipicamente, per i BJT,  $\eta = 1$ )
    - $i_B = I_S / \beta \exp(v_{BE}/V_T)$
    - $\Delta i_B / \Delta v_{BE} = 1 / (\beta V_T) I_S \exp(v_{BE}/V_T) = i_C / \beta V_T$
    - La resistenza differenziale della giunzione è quindi uguale a  $\beta V_T / i_C$
    - Possiamo trovare il termine costante  $r_{bb'} = h_{ie}^* - \beta V_T / i_C^*$
    - Alla fine si ha  $h_{ie} = r_{bb'} + \beta V_T / i_C$



**Parte 4**

# **Polarizzazione dei BJT**

**Circuiti di polarizzazione**

**Calcolo del punto di lavoro**

**Soluzione di alcuni circuiti tipici**

# Circuiti di polarizzazione

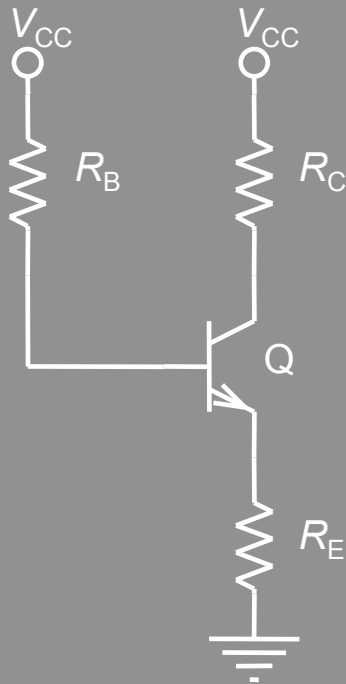
- Per poter sfruttare il BJT occorre garantire il suo funzionamento in un certo punto di riposo
- Polarizzazione con resistenza
  - Direttamente dall'alimentazione
  - Dall'uscita sul collettore
- Polarizzazione con partitore
  - Si impone il potenziale di base con un partitore in cui la  $i_B$  provochi una caduta trascurabile

# Calcolo del punto di riposo

## ➤ Metodo iterativo

- Si parte da un valore approssimato per  $\beta_F$  e  $v_{BE}$
- Si assume, per esempio,  $v_{BE} = 0.7 \text{ V}$  e  $\beta_F = 150$ 
  - Convieni assumere i valori nominali del costruttore
- Si risolve tutto il circuito, trovando tra l'altro  $i_C$ ,  $i_B$ ,  $v_{CE}$
- Si ricava un nuovo valore per  $\beta_F$  e  $v_{BE}$ 
  - Coerente con il punto di lavoro trovato
- Si ripete finché la differenza tra due iterazione è inferiore a una soglia prefissata
  - Il metodo converge perché  $\beta$  e  $v_{BE}$  incidono poco sul risultato
  - Non dovrebbero servire più di due iterazioni

# Polarizzazione con resistenza a $V_{CC}$



$$R_E i_E + v_{BE} + R_B i_B = V_{CC}$$

$$i_C = \beta i_B$$

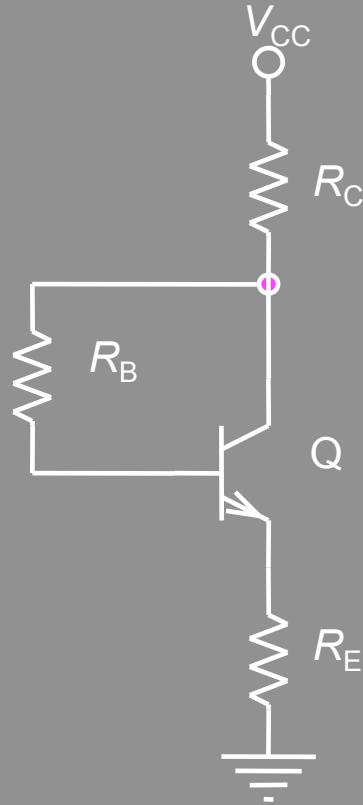
$$i_E = (\beta + 1) i_B$$

$$i_B = \frac{V_{CC} - v_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C i_C - R_E i_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (\beta R_C + (\beta + 1) R_E) i_B$$

# Polarizzazione con resistenza a C



$$(R_C + R_E)i_E + v_{BE} + R_B i_B = V_{CC}$$

$$i_C = \beta i_B$$

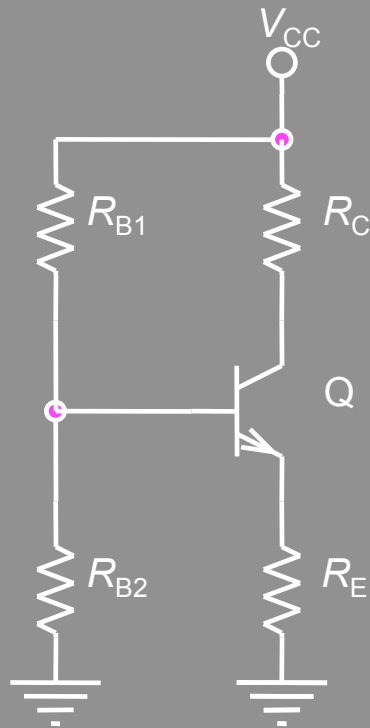
$$i_E = (\beta + 1)i_B$$

$$i_B = \frac{V_{CC} - v_{BE}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)i_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (\beta + 1)(R_C + R_E)i_B$$

# Polarizzazione con partitore



$$R_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_B = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$R_E i_E + v_{BE} + R_B i_B = V_B$$

$$i_C = \beta i_B$$

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

$$i_B = \frac{V_B - v_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C i_C - R_E i_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (\beta R_C + (\beta + 1) R_E) i_B$$

**Parte 5**

# **Aspetti energetici**

**Potenza dissipata in un transistor  
Il problema della fuga termica**

# Potenza dissipata nei BJT

## ➤ Potenza istantanea

$$P_D = V_{CE} I_C + V_{BE} I_B$$

➤ In interdizione e saturazione la potenza dissipata è minore che in zona attiva

➤ La potenza dissipata in base è trascurabile in zona attiva

## ➤ Potenza media dissipata

$$P_{Dm} \cong V_{ce} I_C + V_{ce} I_{ce}$$

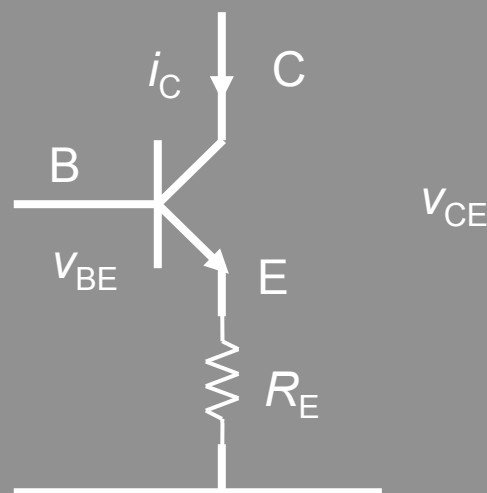


# La fuga termica

- **Effetti della temperatura sul transistor**
  - Sono gli stessi che si hanno sulle singole giunzioni
  - Aumenta la corrente inversa di saturazione
  - Diminuisce la tensione di accensione delle giunzioni
- **Il transistor in applicazioni di potenza**
  - Dissipa energia, scalda
  - Diminuisce la tensione di accensione, aumenta la corrente
  - Aumenta la potenza dissipata e quindi la temperatura
- **Perdita di controllo della polarizzazione**
  - Si rischia di superare la  $T_{Jmax}$

# Provvedimenti anti-fuga

- La potenza è legata alla  $i_C$ , che dipende dalla  $v_{BE}$ 
  - Occorre ridurre la  $v_{BE}$  quando cresce la  $i_C$
  - Può essere fatto in modo automatico
    - Tramite una piccola resistenza collegata tra emettitore e massa
    - Ci scorre la stessa corrente del BJT
    - Se la corrente aumenta, aumenta la  $v_E$
    - Quindi diminuisce la  $v_{BE}$



Parte 6

# Caratteristiche di un transistor

Il BJT per usi generali 2N2222



# Fatto & Da fare

- **Funzionamento del BJT**
- **Caratteristiche del BJT**
- **Polarizzazione**
- **Modello del BJT per piccoli segnali**
- **Potenza nei BJT**
- **Applicazioni dei BJT**
- **Amplificatore a emettitore comune**
- **Inseguitore di emettitore**