

comportamento statico dell' HBT

- Consideriamo un BJT con base sottile $WB \ll L_nB$ e con I_{cb0} trascurabile, in questo caso il guadagno di corrente diventa:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \simeq \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_{neb}}{I_{pbe}}$$

- Ricordandosi che

$$I_{neb} = I_C = qAD_{nB} \frac{d}{dx} \left(\frac{n_i^2}{N_{AB}} e^{-x/L_{nB}} \right) e^{V_{be}/V_T} \approx \frac{D_{nB} n_i^2}{W_B N_{AB}} e^{V_{be}/V_T}$$

$$I_{pbe} = I_B = qAD_{pE} \frac{d}{dx} \left(\frac{n_i^2}{N_{DE}} e^{-x/L_{pE}} \right) e^{V_{be}/V_T} \approx \frac{D_{pE} n_i^2}{W_E N_{DE}} e^{V_{be}/V_T}$$

$$\beta = \frac{W_E N_{DE} D_{nB}}{D_{pE} W_B N_{AB}}$$



comportamento statico dell' HBT

- i portatori intrinseci sono:

$$n_{iB} = (N_{CB}N_{VB})^{1/2} e^{-E_{GB}/2kT} \quad n_{iE} = (N_{CE}N_{VE})^{1/2} e^{-E_{GE}/2kT}$$

- ricalcolandoci il valore del guadagno di corrente nel caso di semiconduttori diversi per BASE ed EMETTITORE, tenendo conto che i valori di n_i sono diversi per i due semiconduttori si ha:

$$\beta = \frac{I_{neb}}{I_{pbe}} = \frac{W_E N_{DE} D_{nB}}{D_{pE} W_B N_{AB}} \frac{N_{CB} N_{VB}}{N_{CE} N_{VE}} \exp\left(\frac{\Delta E_G}{kT}\right)$$

- con

$$\Delta E_G = E_{GE} - E_{GB}$$

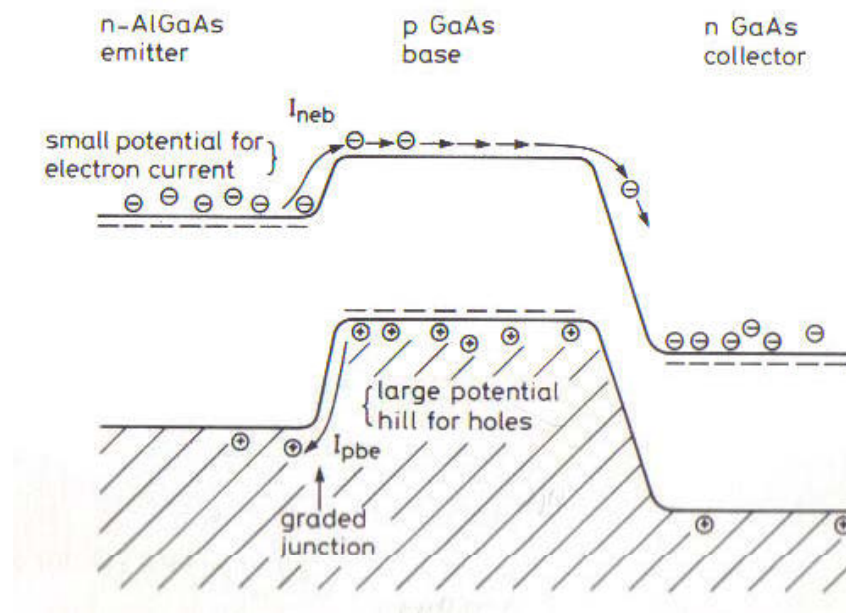


comportamento statico dell' HBT

- dalla precedente relazione si ha:

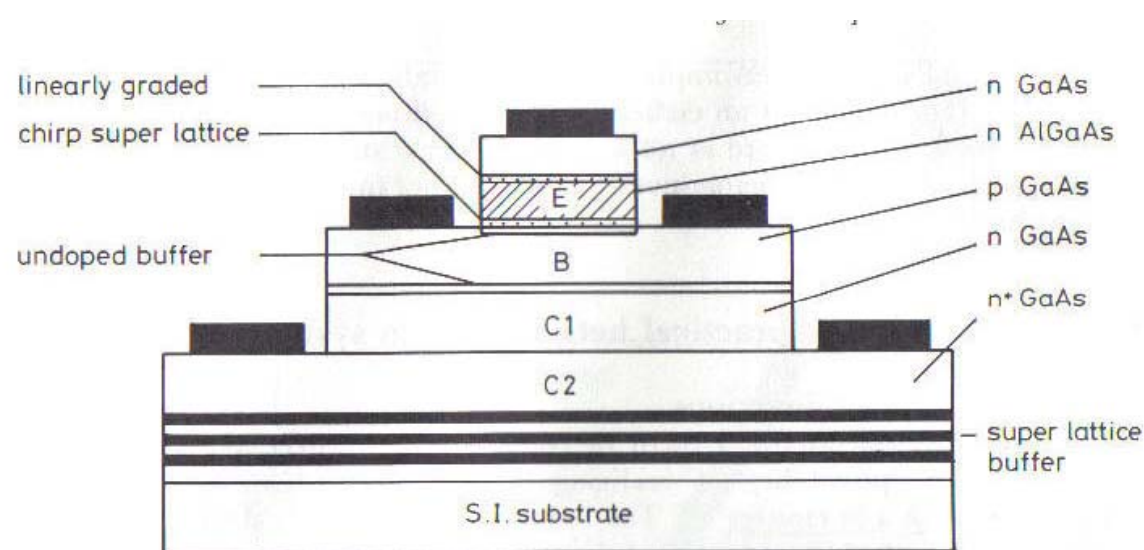
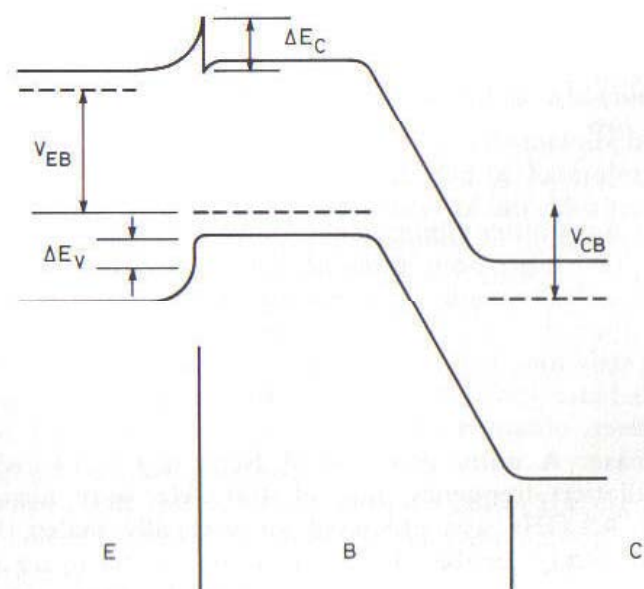
$$\frac{\beta_{hetero}}{\beta_{homo}} = \frac{N_{CB} N_{VB}}{N_{CE} N_{VE}} \exp\left(\frac{\Delta E_G}{kT}\right)$$

- Per esempio nel caso di AlGaAs\GaAs si ha ΔE_G 0.3eV con $kT=25meV$



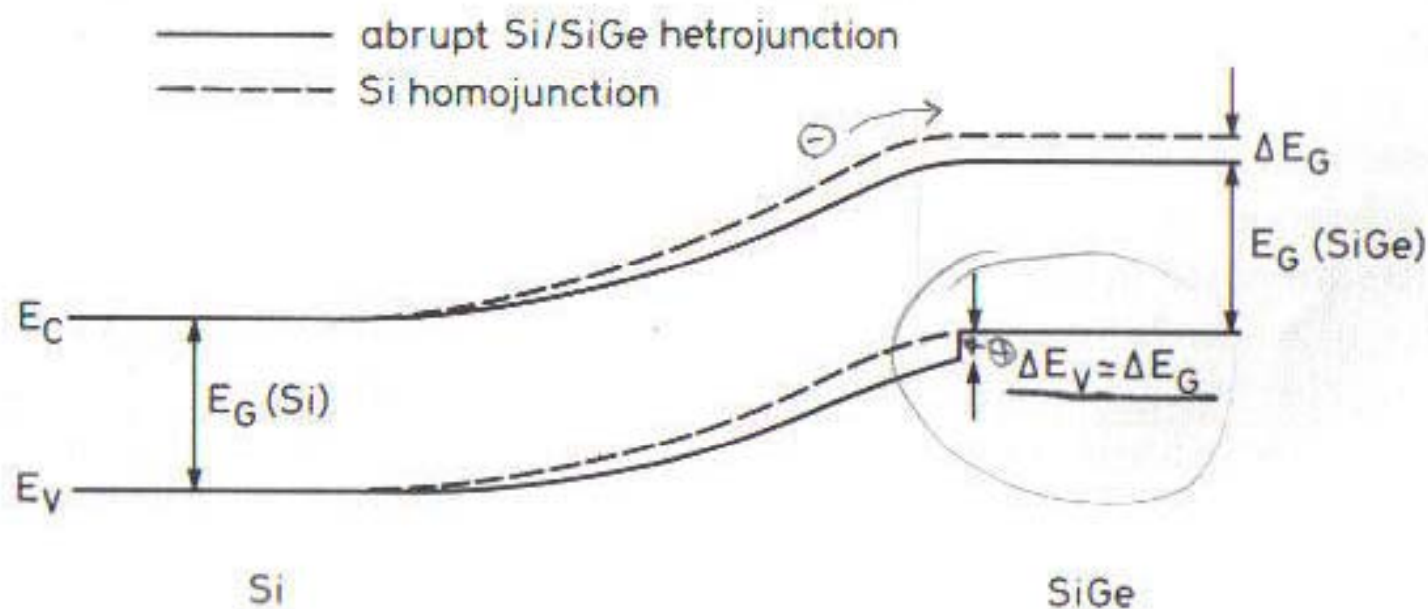
comportamento statico dell' HBT

- struttura tecnologica di un HBT npn in AlGaAs\GaAs\GaAs
- spike in banda di conduzione, viene rimosso introducendo una concentrazione di AlGaAs graduale



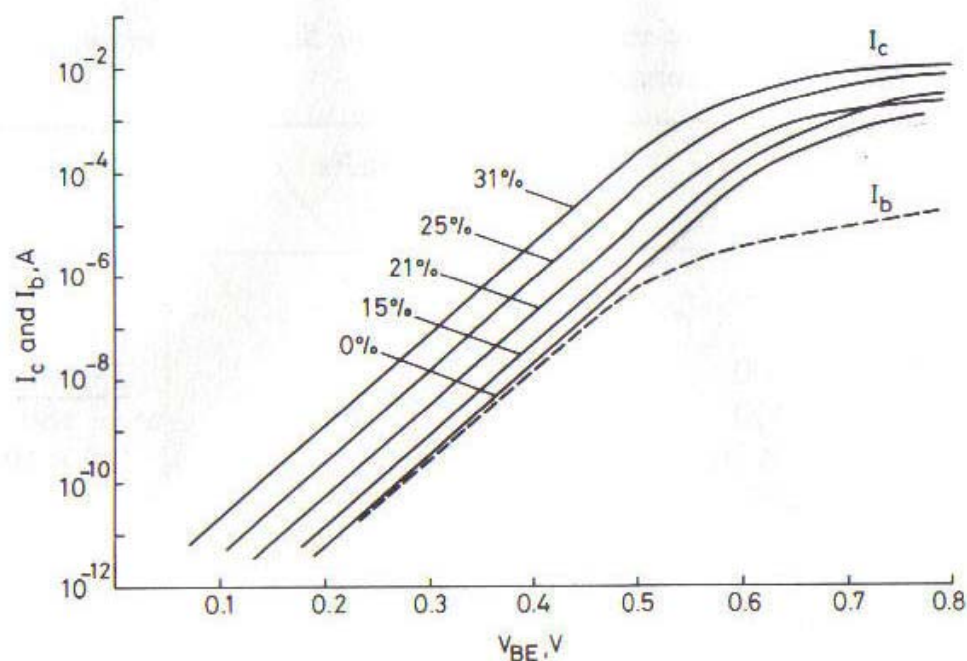
comportamento statico dell' HBT

- struttura tecnologica di un HBT npn SiGe/Si
- narrow bandgap SiGe per la base, in questo caso la maggior parte della ΔE_G si determina nella banda di valenza, determinando uno spike in banda di conduzione di pochi meV



comportamento statico dell' HBT

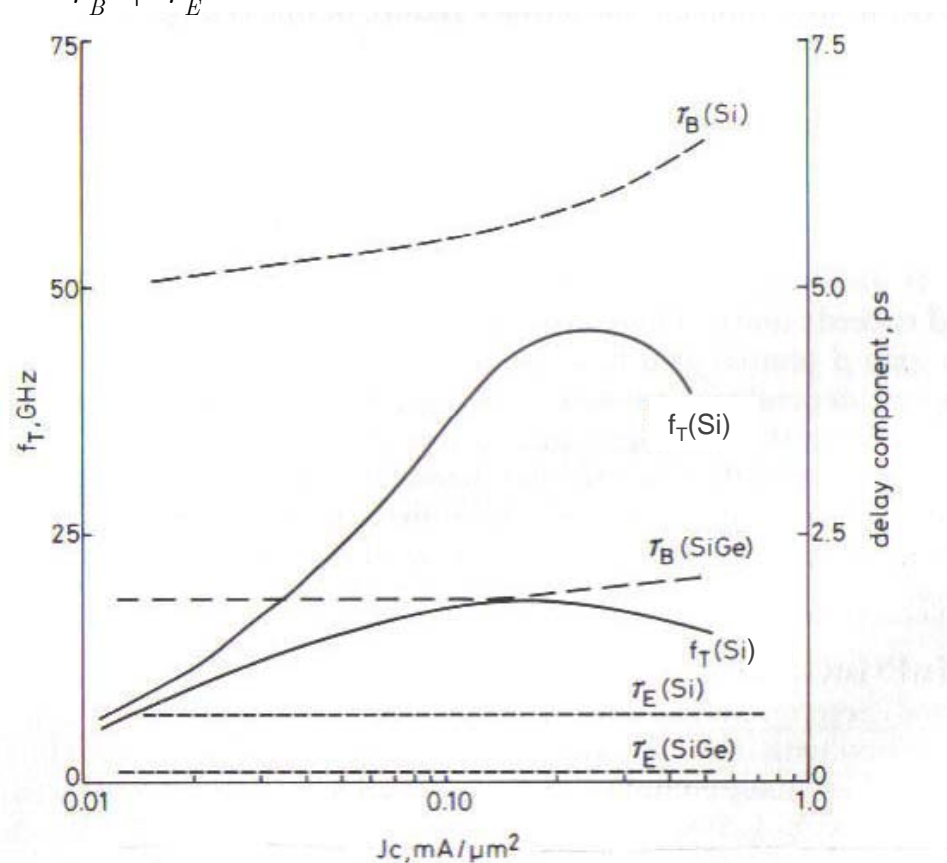
- Gummel plot per un HBT npn SiGe/Si con varie composizioni della lega SiGe
- si nota un aumento della corrente all'aumentare della frazione molare di Ge
- Ed un andamento della corrente di base pressochè ideale con un fattore di idealità pari a 1.03 il quale indica che la ricombinazione all'eterogiunzione non è problema per questo dispositivo.



HBT comportamento dinamico

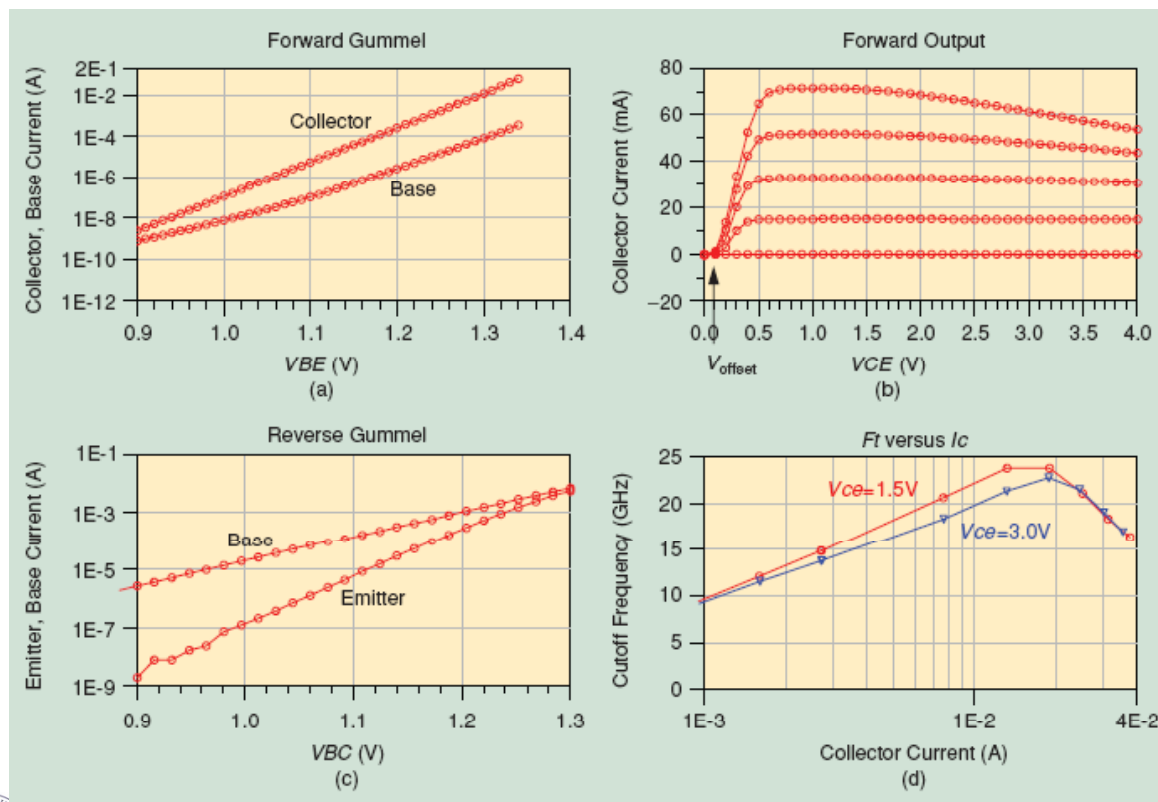
- Confronto tra le caratteristiche dinamiche di un BJT con 50nm di base in Si ed un HBT graded in SiGe

- si stima che: $f_T \approx \frac{1}{\tau_B + \tau_E}$



■ Non idealità nel funzionamento

- Cambio pendenza del grafico di Gummel della I_b : dipende dalle ricombinazioni
- Offset nella caratteristica di uscita: dipende dall'asimmetria delle giunzioni (bandgap offset solo nella BE)
- Self-heating: dissipazione termica



È necessario lo sviluppo di un modello più accurato di quello di Ebers-Moll

- La trattazione di Ebers-Moll porta alla definizione del seguente modello per la corrente (espresso in termini di valori medi)

$$I_{CE} = \frac{qV_T \bar{\mu}_n \bar{n}_i^2 A_E}{W_B \bar{N}_A} \left[e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right]$$
$$\equiv I_s \left[e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right],$$

- Questo modello ha comunque varie inaccurattezze:
 - W_B non è costante al variare del potenziale; effetto Early
 - Ad alte iniezioni, le lacune in base sono richiamate per mantenere la neutralità, quindi diminuisce il guadagno
 - Per alte I_c , la regione svuotata della J_{bc} tende a ridursi aumentando lo spessore della W_B effettiva, con conseguente riduzione del guadagno; effetto Kirk
 - La presenza di parassiti nel collettore determina una depolarizzazione della J_{BC}



■ Alcune variazioni a questo modello sono introdotte

- Si introduce la quantità totale di lacune in base:

$$Q_B \equiv qA_E \int p(x) dx,$$

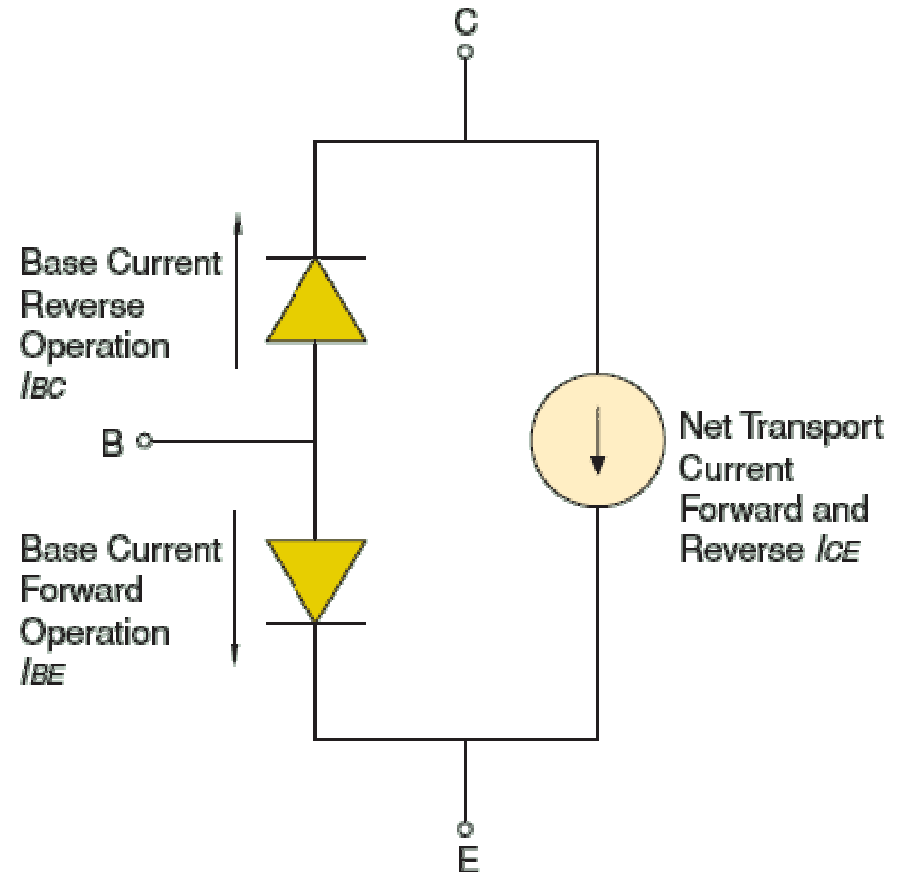
- Che differisce da quella a zero-bias:

$$Q_{B0} \equiv qA_E W_{B0} \bar{N}_A,$$

- La carica normalizzata è $q_B = Q_B / Q_{B0}$

- Si riformula dunque al Ice:

$$I_{CE} = \frac{I_S}{q_B} \left[e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right]$$



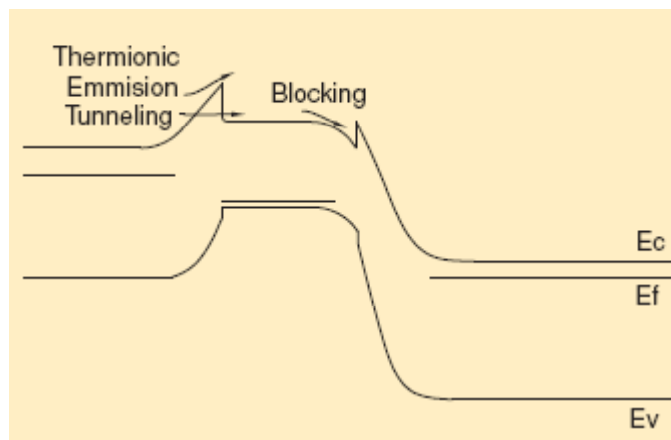
- Per basse polarizzazioni:
 - $q_B \approx 1$, e l'espressione della corrente ritorna quella originale
- Per polarizzazioni dirette
 - La regione attiva di base si riduce, $Q_B < Q_{B0}$ e la corrente di collettore aumenta
- Ad alte iniezioni
 - $p(x)$ aumenta e dunque anche $Q_B, q_B > 1$ e la corrente diminuisce con il guadagno

la carica normalizzata di base può scriversi come: $q_B = q_1 + \frac{q_2}{q_B}$,

$$q_1 = 1 + \frac{V_{BE}}{V_R} + \frac{V_{BC}}{V_F}, \quad q_2 = \tau_F \frac{I_S}{Q_{B0}} \left[e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right] + \tau_R \frac{I_S}{Q_{B0}} \left[e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right]$$



- La riduzione dell'offset nella Vce richiede una doppia eterogiunzione;



- In fig. si vedono i meccanismi di trasporto e blocking. Questi sono modellati mediante una formulazione un po' diversa da quella di EM:

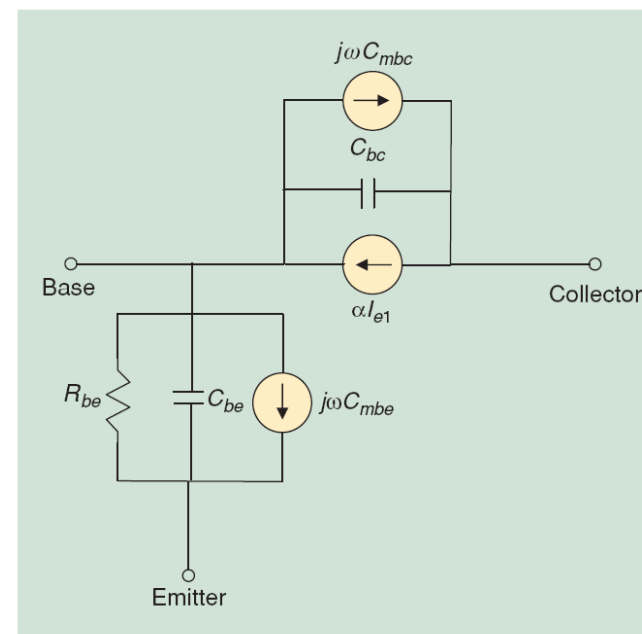
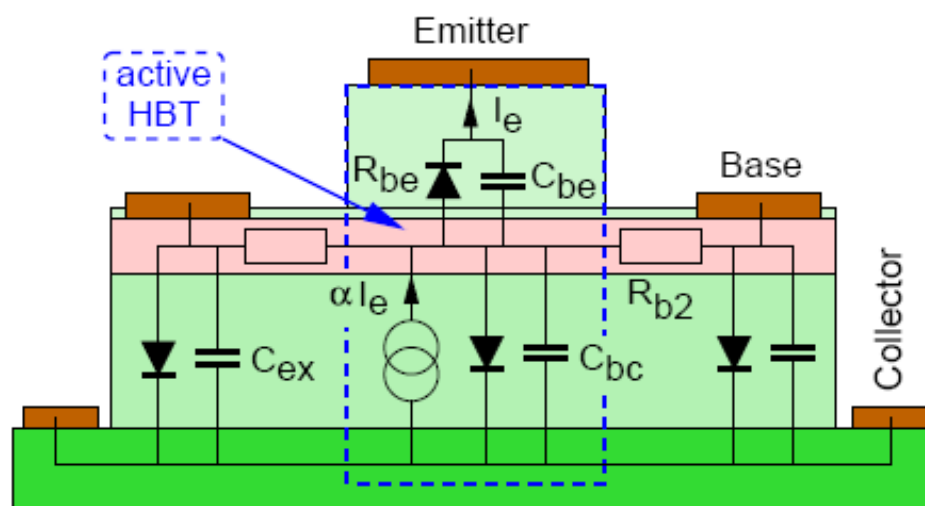
$$I_{CF} = \frac{I_{SF}}{q_B} \left[e^{\frac{V_{BE}}{N_F V_T}} - 1 \right]$$

$$I_{CR} = \frac{I_{SR}}{q_B} \left[e^{\frac{V_{BC}}{N_R V_T}} - 1 \right]$$

$$I_{CE} = I_{CF} - I_{CR} .$$

$$q_B = \frac{q_1}{2} + \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + q_2} + \frac{I_S}{I_{SA}} e^{\frac{V_{BE}}{N_A V_T}} + \frac{I_S}{I_{SB}} e^{\frac{V_{BC}}{N_B V_T}}$$

- Circuito equivalente dell'HBT includente i parassiti a piccoli segnali; modello a topologia 'T'
- I diodi rappresentano i resistori nonlineari .



- Dai parametri Y si ricavano I parametri del modello per ogni punto di lavoro

$$Y_{11} = j\omega [C_{be} + C_{mbe} + C_{bc} + C_{mbc}] + \frac{(1 - \alpha_0)}{R_{be}},$$

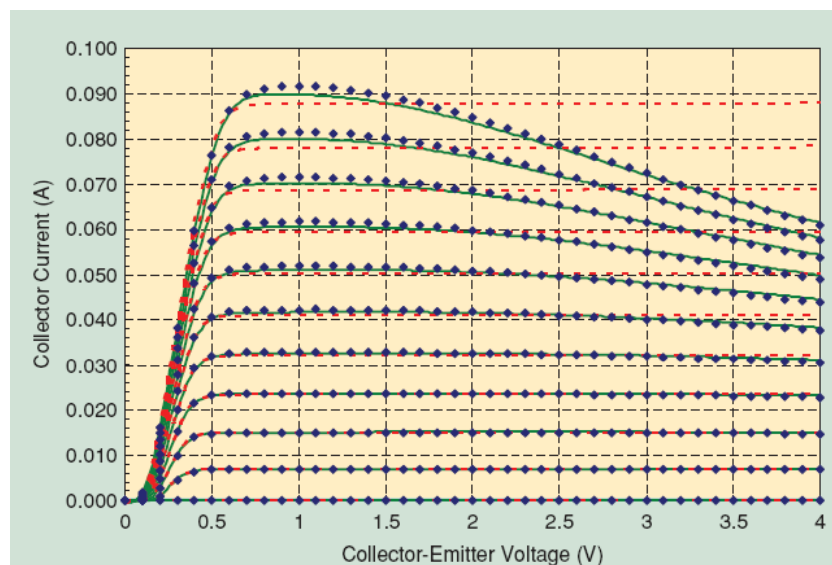
$$Y_{12} = -j\omega [C_{bc} + C_{mbe}],$$

$$Y_{21} = \frac{\alpha_0}{R_{be}} - j\omega [C_{bc} + C_{mbc}],$$

$$Y_{22} = j\omega C_{bc}.$$

■ HBT self-heating

- La conducibilità termica dei materiali in uso e l'efficienza del dispositivo durante l'operazione, determina un riscaldamento ed una degrado delle caratteristiche



$$\nabla \cdot \kappa \nabla T - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -P.$$

- κ : conducibilità termica $\text{W/cm}^{\circ}\text{C}$
- ρ : densità di massa g/cm^3
- C_p : capacità termica $\text{J/g}^{\circ}\text{C}$
- P : potenza dissipata W/cm^3

