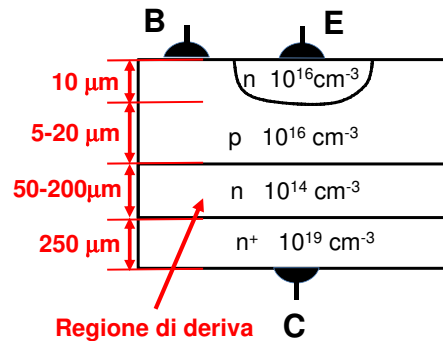


## Transistori bipolari di potenza

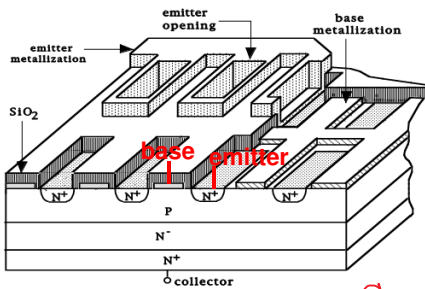
## BJT verticali di potenza



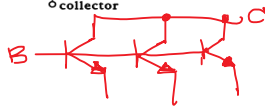
- La struttura verticale permette massima area per la sezione trasversale → minima  $R_{ON}$  e minima resistenza termica
- La regione di deriva del collettore (n-) determina  $V_{BD}$
- La regione di base non può essere troppo sottile (5-20  $\mu\text{m}$  vs 0.1  $\mu\text{m}$  per BJT di segnale) →  $\beta_f \sim 5-10$ .

## Emettitori multipli

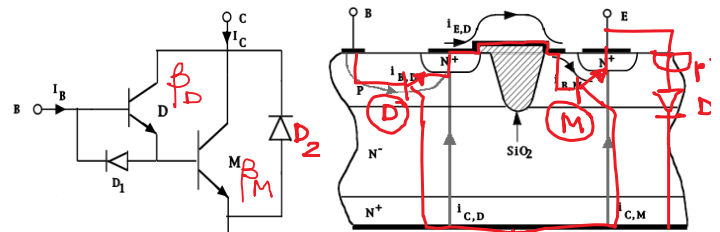
Base e emettitore interdigitati



- Riduce l'effetto di incremento locale della densità di corrente ("current crowding") responsabile del 2° breakdown (vedi piu' avanti).



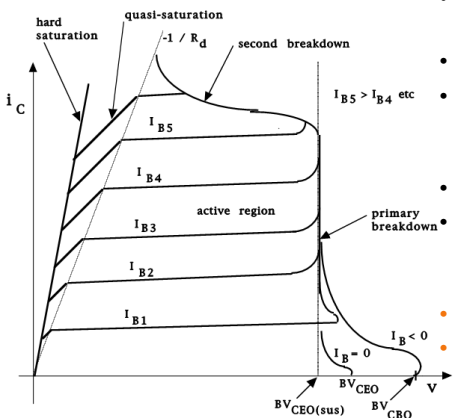
## BJT Darlington



$$I_C = \beta_D I_B + (\beta_D + 1) \beta_M I_B = \beta_D \beta_M I_B$$

- Il  $\beta$  totale può arrivare a  $\sim 100$
- D1 riduce il tempo di spegnimento del transistor M
- D2 serve per circuiti a ponte (diode di ricircolo)
- I due transistori sono isolati dalla protrusione dell'ossido attraverso lo strato p

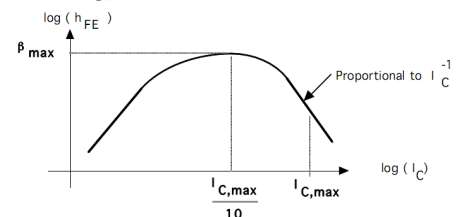
## Caratteristiche I-V di un BJT di potenza



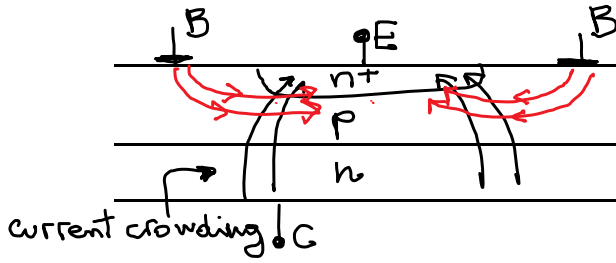
- $BV_{sus}$ : max  $V_{CE}$  in presenza di notevole  $I_C$
- $BV_{CEO}$ : max  $V_{CE}$  per  $I_B = 0$ .
- $BV_{CBO}$ : max  $V_{CE}$  per  $I_E = 0$  (si sfrutta nei circuiti open-emitter)
- Due tipi di breakdown:
  - Breakdown primario: moltiplicazione a valanga della giunzione B-C
  - Breakdown secondario
  - Regione di quasi-saturazione (dovuta alla regione di deriva n-)

## Alta iniezione di corrente

- Per avere una alto  $\beta_f$  e' necessario avere:
  - Alto drogaggio di E per ridurre la corrente di lacune B→E
  - Lungo tempo di vita dei portatori minoritari in base
  - Base corta
- Nota che  $\beta \sim I_C^{-1}$  per alta  $I_C$ , a causa di maggiori iniezione di lacune per compensare l'iniezione di elettroni in base (aggravato da current crowding) :

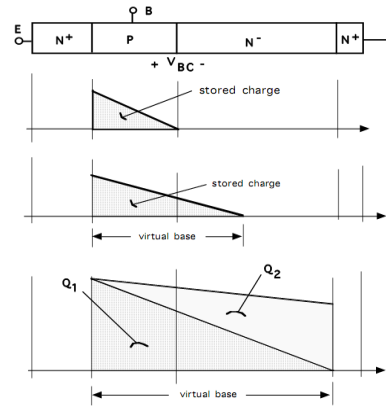


## Incremento della densità di $I_E$ "current crowding"



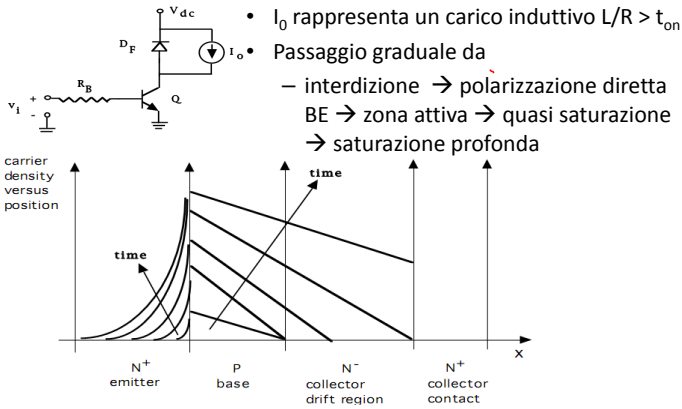
- Caduta di tensione nella resistenza di dispersione della base:  $V_{BE}$  è più alta in periferia che in centro  $\rightarrow$  la densità di corrente  $I_E$  è maggiore in periferia che in centro.
- La regione di alta iniezione comincia a correnti  $I_E$  minori
- La geometria multiemettitori riduce l'effetto.

## Quasi saturazione



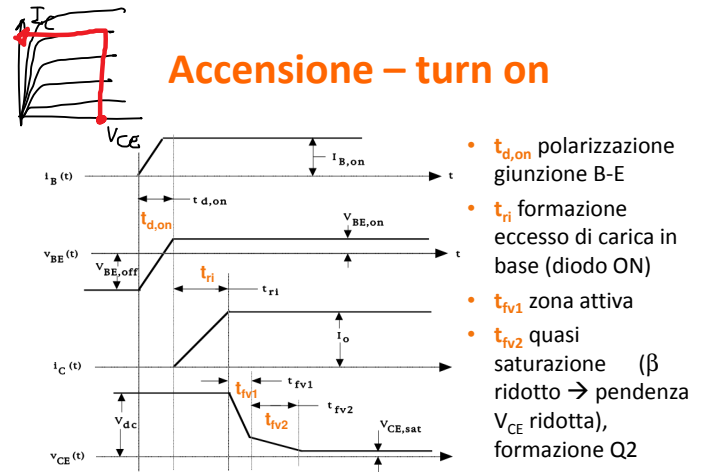
- **Zona attiva**
- **Quasi-saturazione**  
La regione n- e' ricca di elettroni in eccesso in provenienti dal drain  
 $I_C \sim V_{CE}/R_d$
- **Saturazione profonda:**  
Modulazione della conducibilità  $\rightarrow$  piccola  $V_{CE}$

## Accensione – turn on



- $I_0$  rappresenta un carico induttivo  $L/R > t_{on}$
- Passaggio graduale da  
– interdizione  $\rightarrow$  polarizzazione diretta  
BE  $\rightarrow$  zona attiva  $\rightarrow$  quasi saturazione  
 $\rightarrow$  saturazione profonda

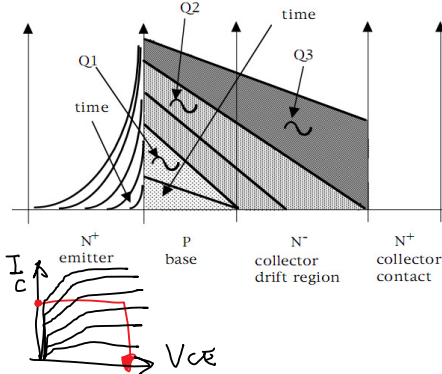
## Accensione – turn on



- $t_{d,on}$  polarizzazione giunzione B-E
- $t_{ri}$  formazione eccesso di carica in base (diode ON)
- $t_{fv1}$  zona attiva
- $t_{fv2}$  quasi saturazione ( $\beta$  ridotto  $\rightarrow$  pendenza  $V_{CE}$  ridotta), formazione Q2

## Spegnimento – turn off

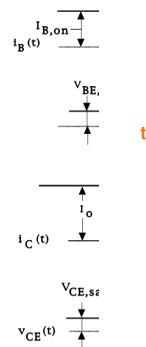
La base si deve svuotare piu' lentamente del collettore



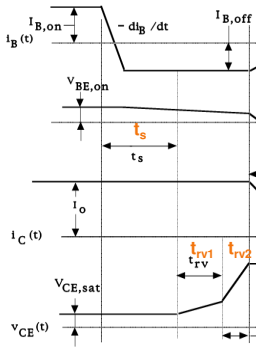
- **Impulso negativo controllato di  $i_B$**
- $t_s$  rimozione Q3 (saturazione profonda)
- $t_{rv1}$  rimozione eccesso di carica Q2 nella regione di deriva (quasi saturazione)
- $t_{rv2}$  zona attiva (incremento VCE)
- $t_{fi}$  rimozione Q1 formazione zona di svuotamento B-E

## Spegnimento – turn off

- **Impulso negativo controllato di  $i_B$**

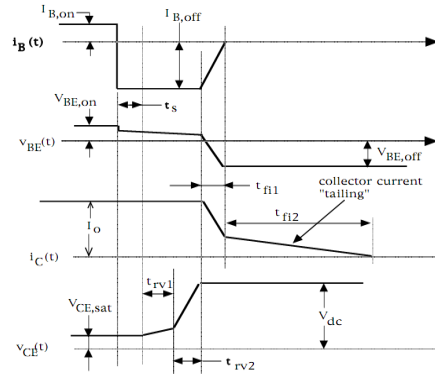


## Spegnimento – turn off



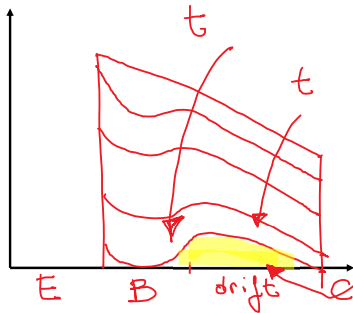
- Impulso negativo controllato di  $i_B$
- $t_s$  rimozione Q3 (saturazione profonda)
- $t_{rv1}$  rimozione eccesso di carica Q2 nella regione di deriva (quasi saturazione)
- $t_{rv2}$  zona attiva (incremento VCE)
- $t_{f1}$  rimozione Q1 formazione zona di svuotamento B-E

## Spegnimento non controllato



- Grande Impulso negativo di  $i_B$
- La carica viene rimossa più velocemente dalla base che dal collettore
- $t_{fi1}$  si forma la zona di svuotamento B-E
- $t_{fi2}$  eliminazione eccesso di carica in B e C (ricombinazione e drenaggio in regione di deriva (eccessivo))

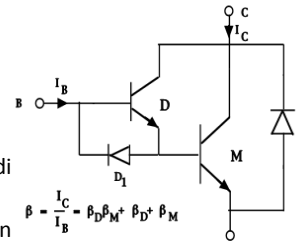
## Spegnimento non controllato



- Dopo che la base è stata completamente svuotata rimane carica in eccesso nella regione di deriva

## Spegnimento di BJT Darlington

1. Il transistor principale (M = Main) non può andare in saturazione (quasi-sat) → dissipazione di potenza maggiore più alta in conduzione
2. Accensione più veloce ( $I_B$  più alta di fattore  $\beta_D$  a parità di  $I_C$ )
3. Spegnimento più lento di un transistor semplice
  - Prima si spegne D (Driver)
  - Entra in conduzione D1 (per svuotare la base di M)
  - Si spegne M (Main)



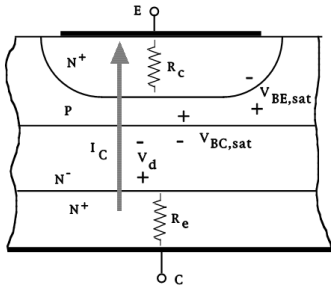
## Tensioni di breakdown

- **Blocco della tensione solo in una direzione** (BC in inversa)
  - Tensione di breakdown B-E solo 5-20 V (alto drogaggio)
- La regione di deriva di collettore viene progettata per sostenere la tensione inversa (come per i diodi).
- Lo svuotamento della base all' aumentare la  $V_{CE}$  deve essere minore della lunghezza di base per **evitare il reach-through**
  - Base corta, basso drogaggio → alto  $\beta$
  - Base lunga, alto drogaggio → piccolo effetto di modulazione della base
  - **Lunghezza base 5-20  $\mu m$  →  $\beta \sim 5-10$**
- $BV_{CEO} < BV_{CBO}$  perché  $I_{CEO} > I_{CBO}$  (provate) quindi il BD a valanga si può innescare più facilmente

## Breakdown secondario

- Dipende da una fuga termica localizzata della giunzione PN tra B ed E (fino a fusione locale del silicio)
- Reazione positiva: aumento T → aumento  $n_i$  → aumento corrente nella giunzione → aumento dissipazione di potenza.
- Stesso problema che con il parallelo di due diodi
- Si distingue dal primario (dovuto a moltiplicazione a valanga perché  $c'$  è una brusca riduzione della  $V_{CE}$ )
- Bisogna ridurre il più possibile disuniformità della densità di corrente della giunzione BE ("emitter current crowding")
  - soluzione multi-emettitore spinge il 2° BD a  $I_C$  più alte
  - Circuiti di protezione per limitare  $di_B/dt$ ,  $di_C/dt$  (causano disomogeneità della densità di corrente)

## Perdite in conduzione



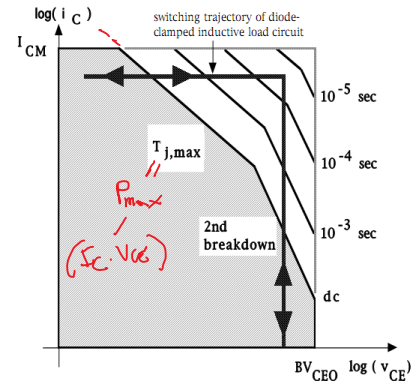
$$P_{on} = I_C V_{CE,sat}$$

$$V_{CE,sat} = V_{BE,sat} - V_{BC,sat} + V_d + I_C(R_c + R_e)$$

- $V_{BE,sat} - V_{BC,sat} \sim 0.1-0.2 \text{ V}$  (dipende soprattutto dal drogaggio differente, poco dalla polarizzazione)
- Situazione simile al caso dei diodi ma a livelli di corrente più bassi, a parità di  $V_{BD} \rightarrow$  perché il  $\beta$  decresce con  $I_C$  e non si vogliono usare  $I_B$  eccessive

## SOA - Safe Operating Area

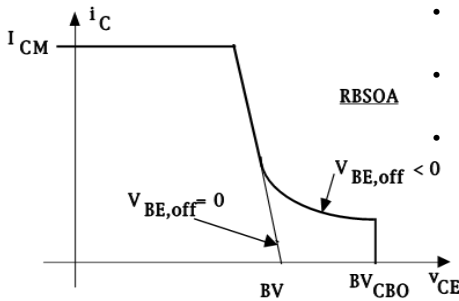
$i_B > 0$  Polarizzazione diretta - FBSOA



- $I_{CM}$  anche a impulso (rottura bonding wires)
- $T_{J,max}$  temperatura della giunzione
- Breakdown secondario
- $BV_{CEO}$
- Se il transistor è commutato velocemente i limiti termici non contano: area rettangolare

## SOA - Safe Operating Area

$i_B < 0$  Polarizzazione inversa - RBSOA



- Funzionamento solo a impulso  $I_{CM}$
- Come FBSOA con piccola estensione:
- Quando  $V_{BE} < 0$  e per basse  $I_C$  la tensione di breakdown si avvicina a  $BV_{CBO}$