

# Indice

<b>1</b>	<b>Transistore bipolare a giunzione</b>	<b>2</b>
1.1	Breve introduzione ai transistori . . . . .	2
1.2	Principio di funzionamento . . . . .	4
1.3	Equazioni di corrente . . . . .	5
1.4	Guadagno di corrente . . . . .	7
1.5	Curve caratteristiche e effetto Early . . . . .	8
1.6	BTJ planare . . . . .	9

# 1 Transistore bipolare a giunzione

## 1.1 Breve introduzione ai transistori

I transistori sono dispositivi a semiconduttore il cui principio di funzionamento si basa sulla fisica delle giunzioni. I transistori vengono usati come amplificatori (in elettronica analogica) e come interruttori comandati (in elettronica digitale). L'invenzione del transistor ha dato il via a una rivoluzione nell'elettronica che ha portato alle tecnologie moderne ad alta integrazione. William Bradford Shockley, John Bardeen, Walter Houser Brattain hanno vinto il Premio Nobel nel 1956 per le loro ricerche sui semiconduttori e la scoperta dell'effetto transistor.

I transistori sono dispositivi a tre terminali, di cui uno in comune, in cui la tensione o corrente tra due terminali controlla la corrente che scorre nel terzo terminale. Si possono quindi usare come generatori controllati per amplificazione. Nel caso in cui il segnale di controllo venga invece utilizzato per far passare la corrente nel terzo terminale rapidamente da zero a un valore elevato, il transistor si comporta come un interruttore comandato.

In questo corso studieremo due tipi di transistori, il transistore bipolare a giunzione e il transistore a effetto di campo metallo-ossido-semiconduttore.

Il transistore bipolare a giunzione (bipolar junction transistor, BJT) è un dispositivo costituito da un cristallo semiconduttore suddiviso in tre regioni. Le regioni laterali, dette emittitore (E) e collettore (C) hanno lo stesso tipo di drogaggio. La regione centrale, detta base (B), ha drogaggio di tipo opposto.

A seconda del drogaggio delle regioni esistono due configurazioni, come mostrato in figura 1: *npn* e *pnp*. In seguito considereremo il transistore bipolare di tipo *npn*. Questa è la configurazione utilizzata più frequentemente per via della maggiore mobilità degli elettroni. La stessa trattazione a polarità invertite si può applicare alla struttura *pnp*.

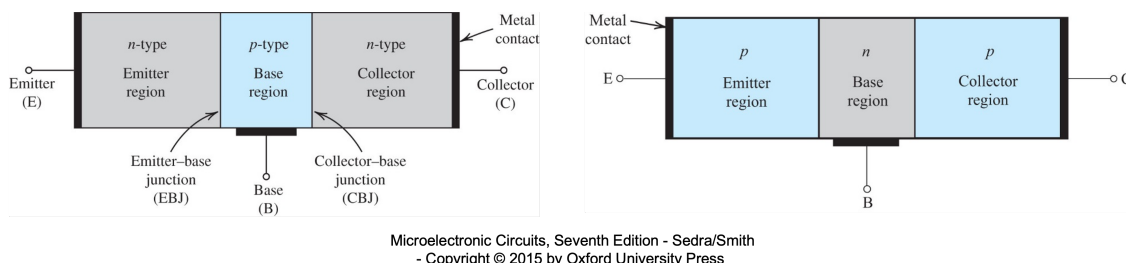


Figura 1: Struttura (semplificata) dei transistori bipolari *npn* e *pnp*.

Come si vede in figura 1, il BJT è formato da due giunzioni *pn*: la giunzione base-emittitore (BE) e la giunzione base-collettore (BC). A seconda della polarizzazione delle due giunzioni esistono diverse modalità di funzionamento, come mostrato in tabella 1. La modalità attiva viene utilizzata per l'amplificazione. Le modalità di interruzione e di saturazione vengono utilizzate per la commutazione (applicazioni digitali). La regione inversa, nella quale i ruoli dell'emettitore e del collettore sono scambiati, nella pratica non viene mai utilizzata. Come vedremo, il principio di funzionamento del BJT prevede che l'emettitore "emetta" elettroni e il collettore li "raccolga"; il principio costruttivo di un transistor planare permette di ottimizzare la raccolta degli elettroni da parte del collettore. Questo però

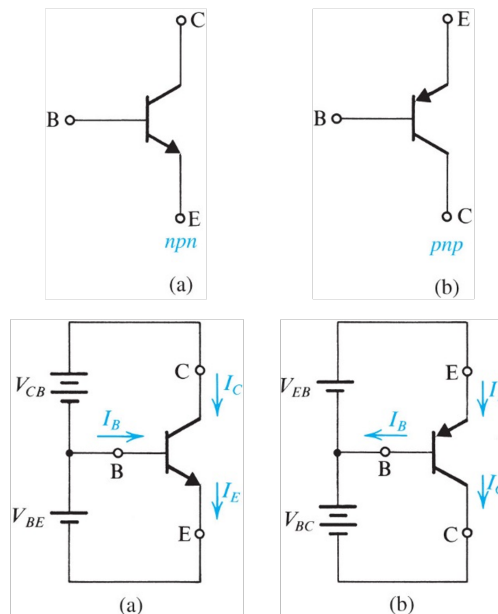
comporta che i ruoli dell'emettitore e del collettore non siano più interscambiabili, quindi la regione attiva inversa non è il modo più efficiente di utilizzare il BJT.

Polarizzazione BE	Polarizzazione BC	Regione di funzionamento
Inversa	Inversa	Interdizione
Diretta	Diretta	Saturazione
Diretta	Inversa	Attiva
Inversa	Diretta	Attiva inversa

Tabella 1: Regioni di funzionamento per un transistor BJT.

Questo dispositivo è detto bipolare perché i portatori di carica di entrambe le polarità (cioè elettroni e lacune) partecipano al processo di conduzione della corrente.

La figura 2 mostra i simboli circuitali del BJT *npn* e *pnp* e i circuiti in cui questi sono polarizzati in regione attiva.



Microelectronic Circuits, Seventh Edition - Sedra/Smith  
- Copyright © 2015 by Oxford University Press

Figura 2: Simboli circuitali dei transistori bipolari *npn* e *pnp*. Polarità delle tensioni e flussi di corrente nei transistor funzionanti in modalità attiva.

A seconda del terminale in comune ci sono tre possibili configurazioni: a base comune; a emettitore comune; a collettore comune.

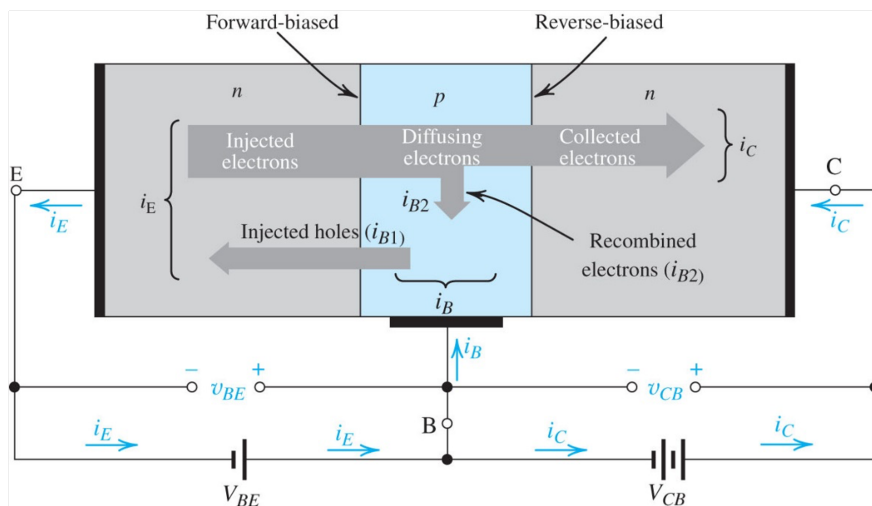
Per ottenere l'effetto transistor

- La base è leggermente drogata mentre l'emettitore è fortemente drogato;
- La base è stretta rispetto alla lunghezza di diffusione dei portatori di carica.

## 1.2 Principio di funzionamento

Studiamo il principio di funzionamento del transistor BJT considerando il dispositivo polarizzato nella regione attiva. La giunzione BE è polarizzata direttamente con  $V_{BE} > 0$ . La giunzione BC è polarizzata inversamente con  $V_{BC} < 0$ . La figura 3 mostra il verso delle tensioni e delle correnti, e i flussi di corrente tramite frecce con spessore proporzionale all'entità della corrente.

Sotto l'azione della tensione di polarizzazione diretta  $V_{BE}$ , gli elettroni vengono iniettati dall'emettitore alla base formando la corrente dell'emettitore,  $i_E$ .



Microelectronic Circuits, Seventh Edition - Sedra/Smith  
- Copyright © 2015 by Oxford University Press

Figura 3: Flusso di corrente in un transistor *npn* polarizzato per funzionare in modalità attiva.

Se lo spessore della regione di base è elevato non si hanno interazioni tra le due giunzioni e il dispositivo si comporta come una coppia di diodi. In particolare, gli elettroni iniettati dall'emettitore nella regione di base si ricombinano con le lacune, contribuendo alla corrente di base ( $i_{B2}$ ), quindi in prossimità della giunzione BC la concentrazione di elettroni è praticamente nulla. In queste condizioni, dato che la corrente attraverso la giunzione BC, polarizzata in inversa, è trascurabile, si ha  $i_E \approx i_B$  e  $i_C \approx 0$ .

Riducendo lo spessore della regione di base a valori sufficientemente piccoli (frazioni di  $\mu\text{m}$ ) aumenta la probabilità che gli elettroni iniettati nella regione di base riescano a portarsi in prossimità della giunzione BC prima di ricombinarsi. Dato che la giunzione BC è in polarizzata inversa, in prossimità della giunzione è presente un campo elettrico con verso tale da spingere gli elettroni presenti nella regione *p* (cariche minoritarie) ad attraversare la giunzione. Al diminuire dello spessore della regione di base, una parte sempre più consistente degli elettroni iniettati nella regione di base viene attirata dal collettore, dando origine ad una corrente di collettore,  $i_C$  progressivamente crescente, mentre si riduce la corrente di base (effetto transistor).

Se lo spessore della regione di base è molto piccolo, la maggior parte degli elettroni iniettati dall'emettitore raggiunge il collettore. In queste condizioni, la corrente di base

è dovuta prevalentemente alle lacune iniettate dalla base verso l'emettitore ( $i_{B1}$ ). Se le concentrazioni dei droganti nelle regioni di emettitore,  $N_{D,E}$ , e di base,  $N_{A,B}$ , sono uguali anche le correnti dovute agli elettroni e alle lacune che attraversano la giunzione BE sono uguali. La corrente di base e la corrente di collettore sono dello stesso ordine di grandezza. Se invece  $N_E \gg N_B$ , le lacune iniettate dalla base danno un contributo molto piccolo alla corrente attraverso la giunzione BE. La corrente di collettore assume valori prossimi a quelli della corrente di emettitore,  $i_E \approx i_C$  mentre la corrente di base è molto piccola rispetto alla corrente di collettore e  $i_B \ll i_C$ .

In regione di funzionamento attiva, la base e l'emettitore quindi fungono da elettrodi di controllo della corrente di collettore. Il BJT si comporta quindi come un generatore di corrente controllato in corrente. Minimizzando la corrente di base a parità di differenza di potenziale  $V_{BE}$ , il transistor è un amplificatore più efficiente, con una potenza in ingresso data ( $V_{BE}i_B$ ) bassa.

### 1.3 Equazioni di corrente

Deriviamo ora le equazioni di corrente per un BJT di tipo *npn*. Facciamo le seguenti ipotesi:

- Le regioni di carica spaziale risultano svuotate di portatori liberi, si trascurano la generazione e ricombinazione di coppie elettrone-lacuna in tali regioni, e il loro spessore;
- In caso di polarizzazione diretta delle giunzioni, la concentrazione di cariche minoritarie iniettate è di alcuni ordini di grandezza inferiore rispetto alla concentrazione delle cariche maggioritarie, condizione che prende il nome di basso livello di iniezione;
- Le regioni esterne alle regioni di svuotamento si considerano neutre, quindi si trascura la caduta di tensione ad esse associata causata dal passaggio della corrente (ipotesi verificata per bassi livelli di corrente);
- La larghezza della regione di base,  $W_B$ , risulta molto minore della lunghezza di diffusione dei minoritari in base, i.e. possiamo trascurare la ricombinazione nella regione di base;
- I drogaggi sono tali per cui  $N_{D,E} \gg N_{A,B} \gg N_{D,C}$ .

Le tensioni di polarizzazione delle giunzioni BE e BC determinano la regione di funzionamento del dispositivo. Indichiamo tali tensioni con  $V_{BE}$  e  $V_{BC}$ . Tensioni positive corrispondono al caso di polarizzazione diretta, mentre tensioni negative corrispondono al caso di polarizzazione inversa.

Agli estremi della regione di svuotamento della giunzione BE, che poniamo a  $x = 0$  (trascuriamo lo spessore della zona di svuotamento), la concentrazione di portatori minoritari è:

$$n_{p,B}(0) = n_{po} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad (1)$$

$$p_{n,E}(0) = p_{no} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}. \quad (2)$$

In modo simile, agli estremi della regione di svuotamento della giunzione BC, che poniamo a  $x = W_B$ , la concentrazione di portatori minoritari è:

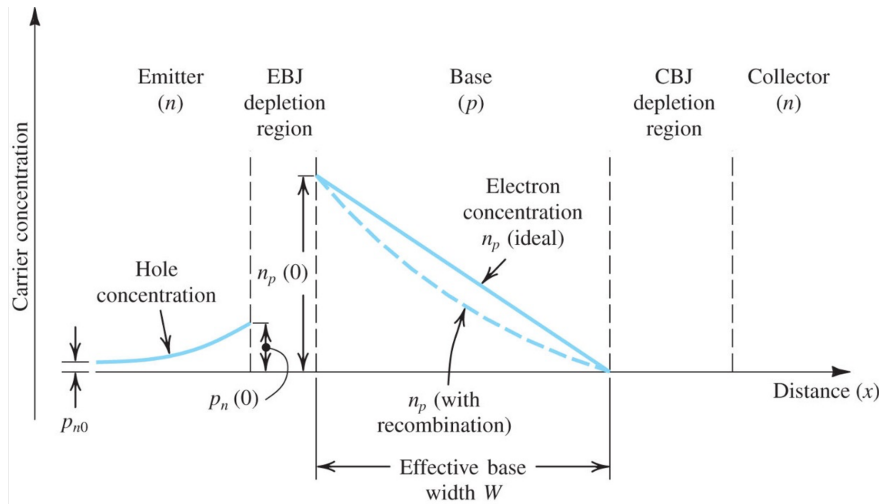
$$n_{p,B}(W_B) = n_{po}e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \quad (3)$$

$$p_{n,C}(W_B) = p_{no}e^{\frac{V_{BC}}{V_T}}. \quad (4)$$

Siccome la larghezza della regione di base,  $W_B$ , risulta molto minore della lunghezza di diffusione dei minoritari in base e si trascura la ricombinazione, il profilo della concentrazione di minoritari in base si può ritenere lineare. Tale situazione è illustrata nella figura 4 che rappresenta il profilo di concentrazione dei minoritari in regime di funzionamento attivo, cioè con  $V_{BE} > 0$  e  $V_{BC} < 0$ . Possiamo quindi scrivere

$$n_{p,B}(x) = n_{p,B}(0) - \left( \frac{n_{p,B}(0) - n_{p,B}(W_B)}{W_B} \right)x. \quad (5)$$

con  $0 < x < W_B$ .



Microelectronic Circuits, Seventh Edition - Sedra/Smith  
- Copyright © 2015 by Oxford University Press

Figura 4: Concentrazione di portatori minoritari nella base e nell'emettitore di un transistor BJT npn polarizzato in regione attiva.

La corrente di diffusione di minoritari in base, che in via del tutto generale possono provenire sia dall'emettitore che dal collettore, risulta, quindi:

$$I_{n,B}(x) = AqD_n \frac{dn_{p,B}(x)}{dx} = -AqD_n \left( \frac{n_{p,B}(0) - n_{p,B}(W_B)}{W_B} \right) = -AqD_n \frac{n_{po}}{W_B} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right) \quad (6)$$

$$I_{n,B} = -I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right) \quad (7)$$

dove  $I_S = AqD_n \frac{n_{po}}{W_B} = AqD_n \frac{n_i^2}{W_B N_{A,B}}$  è la corrente di saturazione del transistor.

Avendo trascurato la ricombinazione in base questa corrente di diffusione risulta indipendente dalla posizione, ed in particolare si ha che  $I_{n,B}(x) = I_{n,B}(W_B)$ , giustificando così l'andamento lineare dato al profilo dei minoritari in base.

Dall'equazione 7 vediamo che la corrente di diffusione di minoritari in base può essere accesa o spenta a seconda delle polarità delle tensioni. Se entrambe sono negative e molto più grandi di  $V_T$ , questa corrente sarà molto piccola. Nel caso in cui una delle due sia positiva e una negativa, e molto più grandi di  $V_T$ ,  $I_{n,B}$  sarà determinata dalla tensione più positiva.

Nel caso della regione di funzionamento attiva, possiamo scrivere

$$I_{n,B} = -I_S(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}). \quad (8)$$

Siccome abbiamo trascurato la ricombinazione nella regione di base, abbiamo che

- $I_{n,B} = I_E \approx I_C$ . Per la convezione sul verso della corrente, dato dalla direzione delle cariche positive, otteniamo  $I_C = I_S(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}})$  che è l'equazione della corrente di collettore in un transistor BJT di tipo  $npn$  polarizzato in regione attiva.
- La corrente di base è circa pari alla diffusione di lacune attraverso l'emettitore, di larghezza  $W_E$  quindi

$$I_B = AqD_p \frac{p_{no}}{W_E} (e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}) = AqD_p \frac{n_i^2}{W_E N_{D,E}} (e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}) \quad (9)$$

## 1.4 Guadagno di corrente

Nella regione attiva, trascurando il contributo della corrente di saturazione della giunzione BC polarizzata inversamente, si può definire il guadagno di corrente a base comune,  $\alpha$ , come

$$I_C = \alpha I_E \quad (10)$$

In un buon transistor  $\alpha$  ha un valore molto prossimo all'unità. I valori tipici di  $\alpha$  sono 0.99-0.995.

Nella configurazione a emettitore comune si definisce il guadagno di corrente a emettitore comune,  $\beta$ , come

$$I_C = \alpha I_E = \alpha(I_C + I_B) \quad (11)$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B \quad (12)$$

Siccome  $\alpha$  è prossimo a 1 in un buon transistor,  $\beta$  è molto grande (tipicamente  $10^1 - 10^2$ ). Pertanto il BJT a emettitore comune in regione attiva è usato come amplificatore.

Usando le equazioni 6 e 9, otteniamo

$$\beta = \frac{D_n N_{D,E} W_E}{D_p N_{A,B} W_B} \quad (13)$$

da cui vediamo che per una buona amplificazione è necessario massimizzare il drogaggio dell'emettitore e minimizzare la larghezza della base.

In ultimo si può definire il guadagno di corrente a collettore comune,  $\gamma$ , come

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (\beta + 1)I_B = \gamma I_B \quad (14)$$

Si noti che con  $I_E = (\beta + 1)I_B$  un piccolo aumento in  $I_B$  risulta in un grande aumento in  $I_E$  e quindi  $I_C$ .

Ricapitolando quindi abbiamo

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{guadagno di corrente a base comune} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{guadagno di corrente a emettitore comune} \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{I_E}{I_B} \quad \text{guadagno di corrente a collettore comune} \quad (17)$$

$$(18)$$

con

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (19)$$

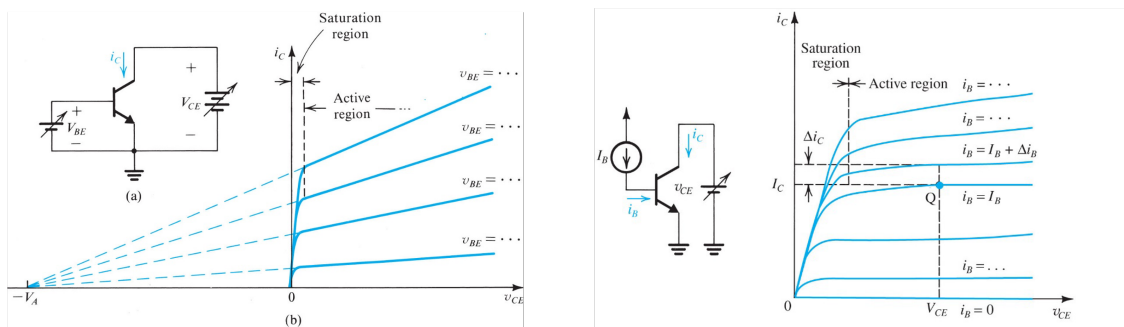
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (20)$$

$$\gamma = 1 + \beta = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (21)$$

$$(22)$$

## 1.5 Curve caratteristiche e effetto Early

Consideriamo un BJT di tipo *npn* in configurazione a emettitore comune e esaminiamo la caratteristica di uscita, ovvero  $i_C$  in funzione di  $v_{CE}$  con  $v_{BE}$  (o  $i_B$ ) come parametro. Tale caratteristica è mostrata in figura 5. Nella regione attiva la corrente di collettore aumenta linearmente con  $i_B$ , perchè  $i_C = \beta i_B$ , e  $v_{CE} > v_{BE}$ .



Microelectronic Circuits, Seventh Edition - Sedra/Smith  
- Copyright © 2015 by Oxford University Press

Figura 5: Circuiti per misurare la caratteristica di uscita di un BJT *npn*. Famiglie di curve caratteristiche di  $i_C$  in funzione di  $v_{CE}$  con  $v_{BE}$  o  $i_B$  come parametro.



Idealmente,  $i_C$  non dipende da  $v_{CE}$  ma questo non è vero in pratica. Questo è dovuto al fatto che all'aumentare di  $v_{CE}$  (e quindi di  $v_{CB}$ ), per  $v_{BE}$  fisso, si ha un allargamento della regione svuotata in corrispondenza della giunzione BC e quindi una riduzione della larghezza efficace della regione di base,  $W_B$  diminuisce (effetto Early). Questo risulta in un aumento di  $I_S$  e quindi di  $i_C$ . L'entità dell'effetto può essere ridotta rendendo il collettore più debolmente drogato della base. In questo modo la regione svuotata si estende prevalentemente dal lato del collettore. Nel BJT quindi il collettore è drogato meno della base e quindi molto meno dell'emettitore. Questo rende la regione di funzionamento attiva inversa poco utile.

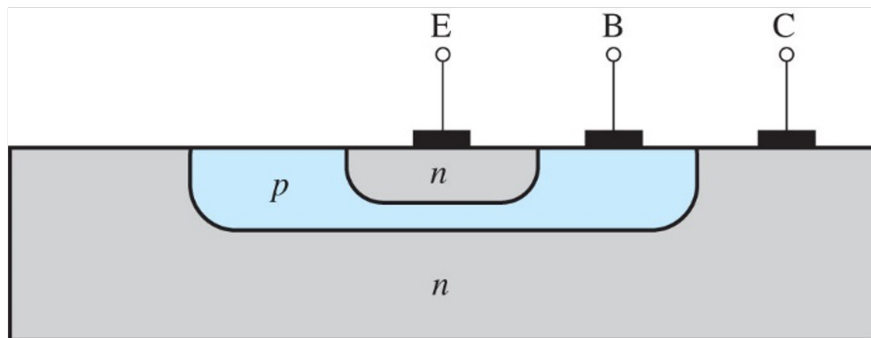
Nella regione attiva le caratteristiche non sono parallele, ma, se prolungate, convergono in un punto sull'asse delle ascisse corrispondente a  $v_{CE} = -V_A$ , dove  $V_A$  è la tensione di Early. L'effetto Early può essere rappresentato modificando, nella regione attiva, l'espressione di  $i_C$  nel modo seguente

$$i_c = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right) \quad (23)$$

Le caratteristiche in figura 5 mostrano anche la regione di saturazione in cui  $i_C$  diminuisce rapidamente. In questa regione di funzionamento la giunzione BC è anche essa polarizzata direttamente. La corrente di polarizzazione diretta di questa giunzione scorre in senso opposto a quella delle giunzione BE, facendo quindi diminuire  $i_C$ . In saturazione  $i_C \ll \beta i_B$ .

## 1.6 BTJ planare

Nella pratica i transistori non hanno una struttura simmetrica come indicato nello schema di principio di figura 1. I transistori vengono realizzati prevalentemente in forma planare come mostrato in figura 6. Il collettore circonda le regioni di base e di emettitore. Questa configurazione consente una raccolta più completa di elettroni iniettati dall'emettitore alla base;  $\alpha$  è vicina all'unità e  $\beta$  è molto grande. Dalla figura si vede chiaramente che il BJT è un dispositivo non simmetrico. Emettitore e collettore non possono essere scambiati. Non solo la geometria, ma anche i livelli di drogaggio sono diversi.



Microelectronic Circuits, Seventh Edition - Sedra/Smith  
- Copyright © 2015 by Oxford University Press

Figura 6: sezione trasversale di un BJT *n**p**n*.