

CAPITOLO 8

IL TRANSISTOR BIPOLARE (BJT)

Affrontiamo adesso il secondo dispositivo attivo a semiconduttore, il *transistor bipolare a giunzione*, o *BJT* (in inglese, *bipolar junction transistor*), storicamente il transistor più “celebre” (spesso indicato semplicemente come “IL transistor”), sebbene oggi sia meno utilizzato dei transistor FET; infatti, all’interno di un circuito integrato esso occupa maggiori dimensioni di quelle di un FET, pertanto la minore densità d’integrazione lo ha relegato in secondo piano rispetto ai FET. Inoltre, la sua resistenza d’ingresso è assai inferiore a quella di un MOSFET e ciò – come vedremo quando tratteremo gli amplificatori nel dettaglio – può costituire uno svantaggio in fase di progetto.

8.1 Considerazioni generali sui BJT

Il funzionamento del transistor bipolare a giunzione non è troppo dissimile da quello del transistor ad effetto di campo, perlomeno se ci si limita al principio di base. Esso può essere ancora pensato come la valvola mostrata nel precedente capitolo in Fig. 7.1: vi è dunque una corrente che scorre tra due terminali che viene controllata da una *corrente* o da una *tensione* associate al terzo terminale. In realtà, già in questa definizione è possibile trovare un’importante differenza tra i BJT e i FET: mentre nei FET la corrente che scorre tra drain e source è controllata dalla *tensione* sul gate, nei BJT la corrente che scorre tra due terminali – che chiameremo *collettore* ed *emettitore* – può essere controllata sia dalla *tensione* applicata al terzo elettrodo – che chiameremo *base* – che dalla *corrente* che scorre in esso. In pratica, sulla base del BJT non si ha alcun dielettrico, né una barriera energetica, come invece si ha nel gate dei FET. Ovviamente, poiché nel gate non può scorrere corrente, la resistenza d’ingresso del FET è molto elevata; viceversa nel BJT, a causa della presenza di una corrente circolante sul terminale di base, la resistenza d’ingresso risulta più bassa. Non si pensi, tuttavia, che la corrente di base sia molto elevata: essa anzi è dell’ordine delle decine di μA in buona parte dei dispositivi commerciali e risulta tipicamente 100 volte più piccola della corrente che scorre tra collettore ed emettitore.

Una seconda peculiarità che differenzia il BJT dal FET risiede nell’aggettivo “bipolare”; questi evidenzia un processo di conduzione che coinvolge contemporaneamente i portatori maggioritari e minoritari.

Se si escludono queste differenze sostanziali (ve ne sono anche altre, beninteso...), i due tipi di transistor possono svolgere le stesse funzioni, anche se con prestazioni diverse. Le loro applicazioni principali vanno dall’amplificazione di segnali ai circuiti a commutazione. E proprio l’amplificazione di segnale era lo scopo che si prefiggeva il primo transistor (la cui foto è riportata in Fig. 8.1a) inventato presso i *Bell Laboratories*, da John Bardeen, Walter Houser Brattain e William Bradford Schokley nel 1947 (e vincitori del premio Nobel), ritratti in Fig. 8.1b. La parola *transistor*, infatti, è la sincreasi di *transfer resistor* (*resistore di trasferimento*), indicando cioè l’attitudine del dispositivo a trasferire, sostanzialmente immutata, una variazione di corrente da una resistenza bassa ad una di valore più elevato, ricavandone così un’amplificazione di tensione.

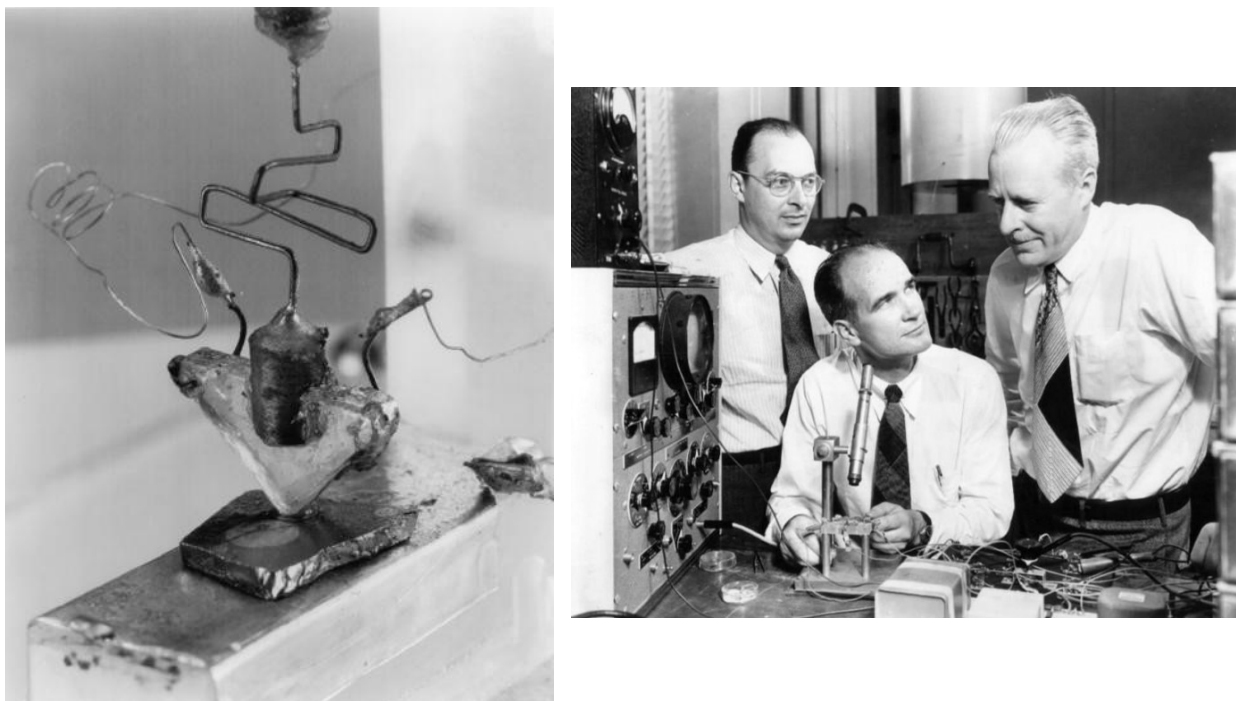


Fig. 8.1 – a) *Il primo transistor a punte di contatto su germanio.* b) *I suoi inventori, da sinistra verso destra: J. Bardeen, W. B. Schokley, W. H. Brattain*

8.2 Struttura fisica e principio di funzionamento del BJT

La Fig. 8.2 mostra la struttura semplificata di un BJT, insieme ai suoi simboli circuitali. Esso è formato da tre regioni di semiconduttore: una di tipo *n* detta di *emettitore* (*E*), una più stretta di tipo

p di base (B), un'altra di tipo n di collettore (C). Un transistor di tale genere è detto nnp ; in maniera analoga si realizzano i transistor $pnnp$, sebbene le loro performance siano inferiori e, per tale motivo, sono praticamente scomparsi. Ogni regione è connessa ad un terminale metallico, in modo avere tre elettrodi per la polarizzazione del dispositivo. Vi sono due giunzioni $p-n$: la giunzione emettitore-base (EB) e la giunzione collettore-base (CB). A seconda delle condizioni di polarizzazioni (diretta o inversa) di ciascuna di queste giunzioni, si ottengono diversi modi di funzionamento del BJT.

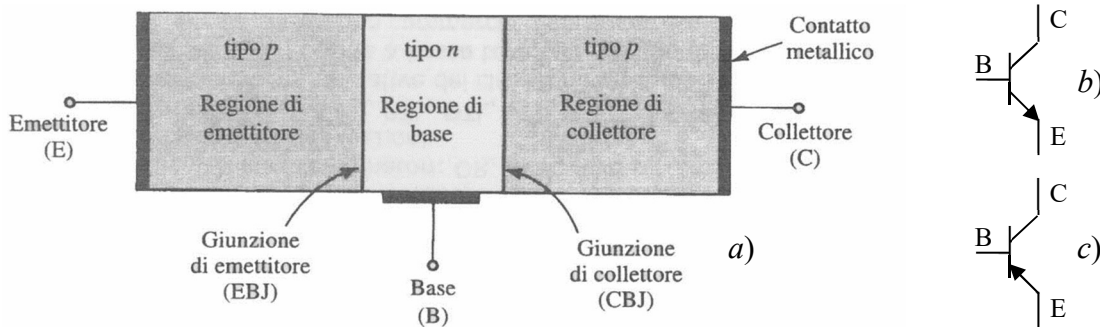


Fig. 8.2 – a) Struttura del transistor npn. b) Simbolo circuitale del tipo npn e c) pnp

Supponiamo di polarizzare il dispositivo come riportato in Fig. 8.3 e cioè con la giunzione EB polarizzata direttamente e la giunzione CB polarizzata inversamente. Un transistor polarizzato in questo modo si dice *in zona attiva*.

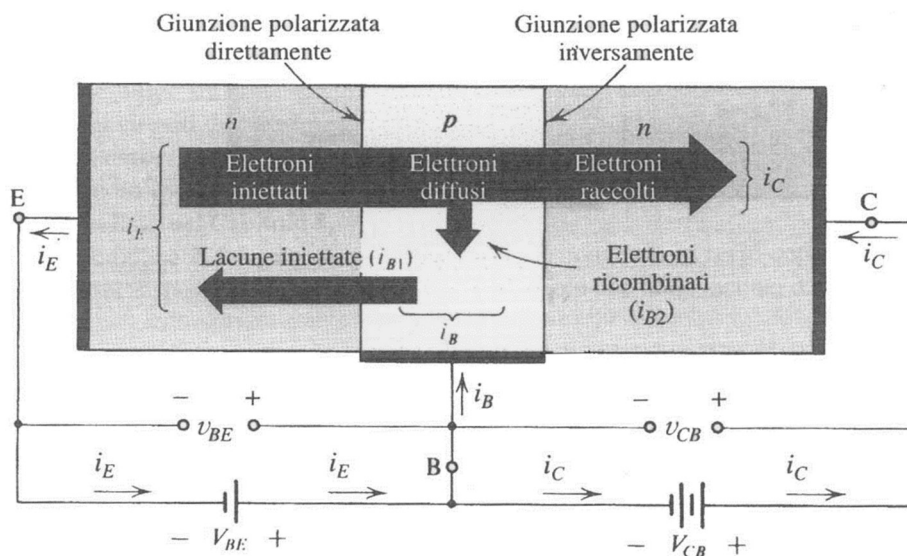


Fig. 8.3 – Flusso di corrente in un transistor npn polarizzato in zona attiva

La polarizzazione diretta della giunzione EB fa scorrere la corrente attraverso tale giunzione (si suppone ovviamente che V_{BE} sia maggiore del valore di soglia $0,6 \div 0,7$ V). In particolare, si ha un flusso di elettroni che vengono iniettati dall'emettitore nella base ed un flusso di lacune iniettate dalla base nell'emettitore. Poiché normalmente l'emettitore è fortemente drogato, mentre la base è debolmente drogata si ha un'alta densità di elettroni nell'emettitore e una bassa densità di lacune nella base. Le due componenti di corrente sono pertanto differenti e ovviamente la corrente di elettroni è molto maggiore della corrente di lacune. Dunque la corrente di emettitore sarà dominata dalla componente associata agli elettroni.

Vediamo adesso cosa succede a questa corrente non appena è iniettata nella regione di base. Gli elettroni diventano *portatori minoritari* nella regione di tipo *p*. Tuttavia, di norma la base è molto stretta per cui gli elettroni non hanno il tempo di ricombinarsi, dunque la percentuale di elettroni “persi” in questo processo di ricombinazione è piuttosto esigua (i pochi elettroni che si ricombinano contribuiscono poi alla corrente di base).

Successivamente, si ha la *diffusione* degli elettroni dalla giunzione EB verso la giunzione CB, a causa della differenza di concentrazione fra queste due zone. Non appena gli elettroni raggiungono la prossimità della giunzione CB, essi vengono immediatamente rimossi via e raccolti dal terminale di collettore. Non bisogna infatti dimenticare che la giunzione CB è polarizzata inversamente, per cui la zona di svuotamento è piuttosto ampia e occupa una parte della regione di base; inoltre il verso del campo elettrico impresso è tale da spazzare via gli elettroni dalla base verso il collettore.

8.3 Caratteristiche del BJT

Riassumiamo i fenomeni fisici descritti, analizzando più in dettaglio le tre correnti *di collettore*, *di base* e *di emettitore*.

La *corrente di collettore* i_C è data dal flusso di elettroni che attraversa la giunzione EB e che viene successivamente spazzata via dal campo elettrico presente nella zona di svuotamento della giunzione CB a causa della polarizzazione inversa. Se si esclude quella piccola percentuale di elettroni che si ricombinano nella regione di base, possiamo dire che la corrente di collettore coincide con la corrente (di elettroni) del diodo *base-emettitore* polarizzato direttamente, la cui espressione è data dalla equazione (6.1). In altri termini, possiamo dire che i_C è proporzionale a e^{V_{BE}/V_T} .

La *corrente di base* i_B è composta da due componenti: la prima è data dal flusso di lacune iniettate dalla base verso l'emettitore, la seconda dal flusso di lacune fornite dal circuito esterno per rimpiazzare quelle perse durante la ricombinazione. La prima componente costituisce un flusso di cariche maggioritarie che attraversa la giunzione di un diodo polarizzato direttamente; pertanto essa è sempre una componente della corrente del diodo espressa dalla (6.1), quindi anche in questo caso

proporzionale a e^{v_{BE}/V_T} . La seconda componente dipende dalle lacune perse durante la ricombinazione; intuitivamente si comprende che tale numero di lacune è proporzionale al numero di elettroni che ha appena attraversato la giunzione EB (maggiore è il numero di elettroni che si ritrova all'inizio della regione di base, maggiore sarà il numero di ricombinazioni e di lacune perse). Il numero di tali elettroni che hanno attraversato la giunzione EB nell'unità di tempo coincide proprio con la corrente del diodo polarizzato direttamente, quindi anche in questo caso essa è proporzionale a e^{v_{BE}/V_T} . Tirando le somme di questo ragionamento, possiamo dire che la corrente di base è formata da due componenti entrambe proporzionali ad una stessa quantità, la corrente di collettore è anch'essa proporzionale alla stessa quantità, pertanto i_C e i_B sono proporzionali tra loro. La costante di proporzionalità viene indicata con β e si ha:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} . \quad (8.1)$$

Poiché β è in genere compreso tra 100 e 200, la (8.1) conferma che la corrente di base è molto più piccola di quella di collettore, di circa due ordini di grandezza.

La corrente di emettitore i_E , infine, può essere facilmente calcolata considerando che la corrente che entra in un transistor deve anche uscirne. Osservando la Fig. 8.3 risulta pertanto evidente che

$$i_E = i_C + i_B . \quad (8.2)$$

Sostituendo la (8.2) nella (8.1), si ottiene

$$i_C = \frac{\beta}{\beta + 1} i_E \quad (8.3)$$

e ponendo

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} , \quad (8.4)$$

si ha infine:

$$i_C = \alpha i_E . \quad (8.5)$$

Poiché è evidente che $\alpha \approx 1$, allora dalla (8.5) si ha che $i_C \approx i_E$, come già ci aspettavamo dato che la corrente di base è piccola e la corrente proveniente dall'emettitore che attraversa la giunzione EB viene poi spazzata via dal campo elettrico della giunzione CB e interamente raccolta dal collettore.

Siamo adesso in grado di visualizzare le *caratteristiche* del dispositivo. Per rilevarle sperimentalmente si può utilizzare il circuito di Fig. 8.4. Questo schema circuitale prende il nome di configurazione *ad emettitore comune*, poiché l'emettitore è comune sia al circuito d'ingresso che a quello d'uscita. Per inciso, si noti che questa non è l'unica configurazione possibile: avremo ad esempio una configurazione *a base comune* nel caso in cui sia la base ad essere comune ad ingresso

e uscita, inoltre i_E costituisca la corrente d'ingresso e i_C la corrente d'uscita. Questo è il motivo per il quale il parametro $\alpha = i_C/i_E$ prende il nome di *guadagno di corrente a base comune*. Allo stesso modo, in un emettitore comune i_B costituisce la corrente d'ingresso e i_C quella d'uscita: il parametro $\beta = i_C/i_B$ prende allora il nome di *guadagno di corrente a emettitore comune*.

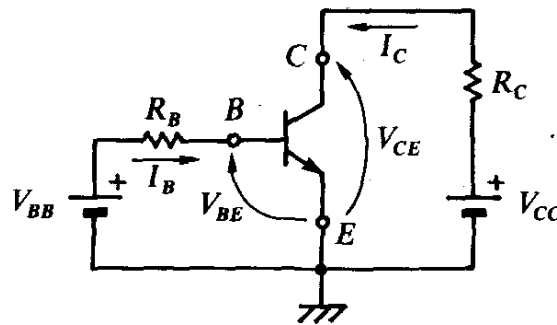


Fig. 8.4 – Configurazione circuitale ad emettitore comune per il rilievo sperimentale delle caratteristiche

Riguardo la *caratteristica d'ingresso* i_B-v_{BE} questa coincide – per quanto detto prima – con la caratteristica di un diodo al silicio con tensione di soglia $v_{BE} = 0,6 \div 0,7$ V. Essa è riportata in Fig. 8.5 ed è valida per tensioni v_{CE} superiori a pochi decimi di volt. La caratteristica è praticamente indipendente da v_{CE} . La tensione di soglia v_{BE} varia lievemente con la temperatura (diminuisce di circa 2 mV per ogni aumento di 1°C).

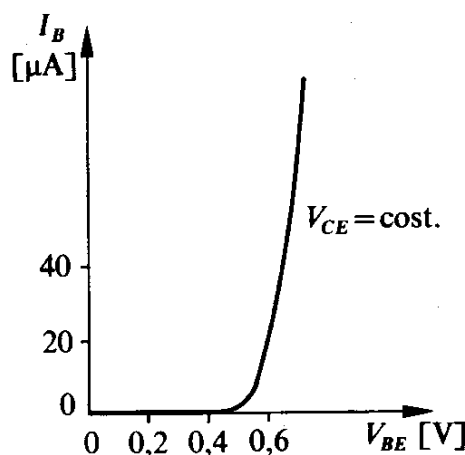


Fig. 8.5 – Caratteristica d'ingresso di un transistor npn ad emettitore comune

La Fig. 8.6 mostra la *caratteristica di trasferimento*, o *transcaratteristica*, che rappresenta l'andamento di i_C in funzione di i_B , per valori di v_{CE} costanti. In zona attiva (che – ricordiamolo –

significa che la giunzione EB è polarizzata direttamente, mentre la giunzione CB è polarizzata inversamente) si ha una sola caratteristica rettilinea per un'ampia gamma di valori di i_C , il cui coefficiente angolare è ovviamente β . Per valori di v_{CE} sufficientemente elevati la caratteristica tende ad incurvarsi: tale effetto risulterà più chiaro analizzando le caratteristiche d'uscita. Si noti che la caratteristica non passa esattamente per l'origine, ma si ha $i_C = I_{CE0}$ per $i_B = 0$. Infatti, in questo caso significa che la giunzione EB è polarizzata con un valore di v_{BE} al di sotto della soglia, quindi l'unica corrente che può circolare nel transistor è quella dei due diodi *base-emettitore* e *base-collettore* polarizzati inversamente, indicata per l'appunto con I_{CE0} . Nella figura essa è volutamente maggiorata per evidenziarla, ma il suo valore è sempre molto piccolo, dell'ordine delle decine di nA.

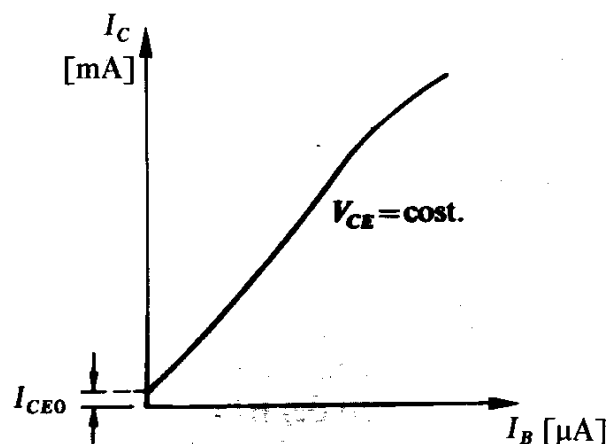


Fig. 8.6 – *Trascurata caratteristica di un transistor npn ad emettitore comune*

Sicuramente più interessanti sono le *caratteristiche d'uscita* i_C - v_{CE} , al variare della tensione d'ingresso v_{BE} (o della corrente d'ingresso i_B). Si noti che la possibilità di potere scegliere tra due possibili variabili “di controllo” d'ingresso è un'ulteriore differenza rispetto ai FET. Infatti, nei FET la corrente d'uscita può essere controllata soltanto dalla tensione sul gate, mentre ovviamente non vi può essere alcuna corrente di gate a causa dell'elevata impedenza d'ingresso. Nei BJT, invece, la corrente d'uscita può essere pilotata sia agendo sulla tensione d'ingresso che sulla corrente d'ingresso. Evidentemente le due variabili d'ingresso, i_B e v_{BE} , non sono indipendenti ma sono legate tra loro dalla relazione espressa dalla caratteristica d'ingresso i_B - v_{BE} (cfr. Fig. 8.5). Analizziamo allora le caratteristiche d'uscita i_C - v_{CE} , al variare della corrente d'ingresso i_B , riportate in Fig. 8.7.

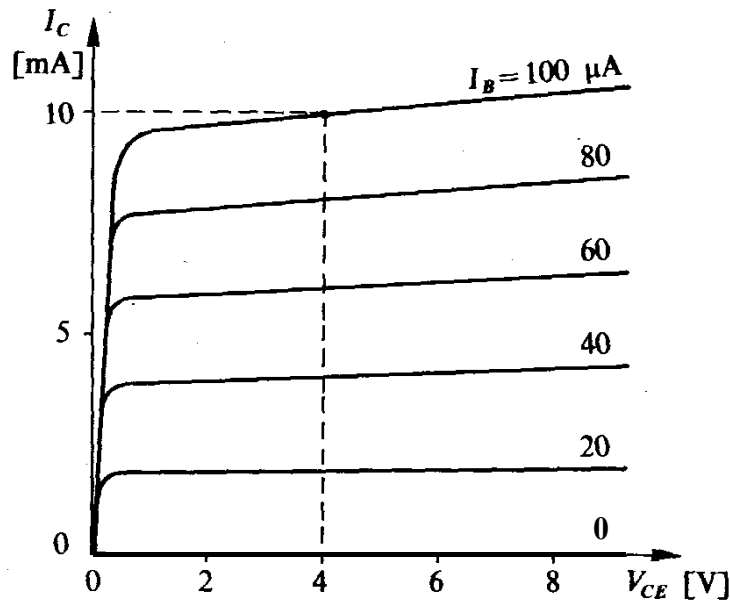


Fig. 8.7 – Caratteristiche d'uscita (al variare della corrente i_B) di un transistor npn ad emettitore comune

Quando v_{CE} è maggiore di qualche decimo di volt, le caratteristiche sono quelle di un generatore di corrente pilotato in corrente; infatti per un'ampia gamma di valori di v_{CE} , si ha una corrente costante i_C che non dipende da v_{CE} ma soltanto da i_B . Al variare di i_B , varia anche i_C (e quindi il ramo di caratteristica) in modo che il rapporto tra i_C e i_B sia β . Questo comportamento è facilmente spiegabile considerando innanzitutto che la tensione v_{CE} è la somma della tensione base-emettitore più quella collettore-base, cioè $v_{CE} = v_{CB} + v_{BE}$; la tensione v_{BE} non può variare molto essendo la tensione di soglia del diodo base-emettitore (vedi caratteristica d'ingresso), pertanto essa è pari a circa $0,6 \div 0,7$ V. Dunque un aumento della tensione v_{CE} corrisponde quasi interamente ad un aumento della tensione v_{CB} : questa essendo una tensione inversa applicata ad un diodo non va a incrementare la corrente ma semplicemente aumenta la larghezza della zona di svuotamento collettore-base. In sostanza, gli elettroni che attraversano la base e si dirigono verso la giunzione CB, all'aumentare di v_{CB} (e quindi di v_{CE}) vengono accelerati ancora prima verso il collettore ma il loro numero non viene incrementato. Questo è il motivo per il quale le caratteristiche sono orizzontali e indipendenti da v_{CB} . In realtà, analogamente a quanto accade nei FET, vi è una piccola dipendenza della corrente i_C da v_{CE} : un aumento di v_{CE} , infatti, produce un piccolo aumento della corrente i_C , quindi le caratteristiche hanno una lieve inclinazione, poiché la regione di svuotamento essendo più larga "cattura" qualche elettrone supplementare della base. Questo fenomeno prende il nome di *effetto Early* e le sue conseguenze sono le stesse già discusse a proposito dei FET: è possibile pertanto definire allo stesso modo una *tensione di Early* V_A negativa ed una *resistenza d'uscita* $r_o = V_A/I_C$, dove I_C è la corrente del punto di riposo.

Tornando alle caratteristiche di Fig. 8.7, oltre un certo valore di v_{CE} , la corrente aumenta rapidamente (non mostrato in figura). In questa zona la giunzione CB entra in breakdown e il transistor non funziona più normalmente.

Diminuendo invece la tensione v_{CE} si raggiunge un valore di “ginocchio”, al di sotto del quale la corrente i_C diminuisce rapidamente sino a zero, indipendentemente dal valore di i_B . Questo avviene quando la giunzione CB non è più polarizzata inversamente. Diminuendo ulteriormente la v_{CE} , si restringe ancora di più la zona di svuotamento collettore-base (diminuisce v_{CB}), il campo elettrico non riesce più a spingere gli elettroni verso il collettore e la corrente i_C si annulla. In pratica, ciò si ha per $v_{CE} \approx 0$, cioè per $v_{BE} \approx 0,7$ V e $v_{CB} = -v_{BC} \approx -0,7$ V, cioè quando *entrambe* le giunzioni EB e CB sono *polarizzate direttamente*.

La corrente i_C è invece sempre uguale a zero, qualunque sia il valore di v_{CE} , se $i_B = 0$, che corrisponde alla caratteristica più in basso della Fig. 8.7. Affinché $i_B = 0$, la tensione d’ingresso v_{BE} deve essere inferiore a circa 0,7 V, cioè alla tensione di soglia, come si osserva immediatamente dalle caratteristiche d’ingresso (cfr. Fig. 8.5). Questa condizione corrisponde ad avere *entrambe* le giunzioni EB e CB *polarizzate inversamente*.

Ricapitolando, la Fig. 8.7 con le sue caratteristiche d’uscita evidenzia bene le *tre regioni di funzionamento* del BJT:

1. *regione (o zona) attiva*, corrispondente alla zona centrale delle caratteristiche d’uscita a i_C costante; tale condizione si ottiene *polarizzando direttamente* la giunzione EB e *inversamente* la giunzione CB.
2. *regione di saturazione*, corrispondente a valori di v_{CE} inferiori a qualche decimo di volt per cui la corrente i_C tende rapidamente a zero; tale condizione si ottiene *polarizzando direttamente* entrambe le giunzioni.
3. *regione di interdizione*, corrispondente alla caratteristica $i_C = 0$ che si ottiene per $i_B = 0$; tale condizione si ottiene *polarizzando inversamente* entrambe le giunzioni.

8.4 Fogli tecnici (data sheets) di BJT

I *data sheets* dei BJT sono strutturati in modo simile a quelli dei FET, di cui si è parlato nel capitolo precedente. Vale pertanto quanto già detto a proposito dei FET (con la differenza ovviamente di scambiare i terminali di *source*, *gate* e *drain* con quelli di *emettitore*, *base* e *collettore*). I diagrammi più interessanti vengono in genere riportati dopo i *maximum ratings* e le *caratteristiche elettriche* del dispositivo. Tipicamente sono riportate le caratteristiche d’uscita, mentre non sono più riportate le caratteristiche d’ingresso e la transcaratteristica. Al posto di quest’ultima viene invece riportata la variazione di β con i_C , che fornisce le stesse informazioni in modo più evidente. Comunque, come

per i FET, anche nei BJT i diagrammi riportati sui *data sheets* hanno elevate dispersioni (e infatti la tendenza è di non riportarli più). Conviene invece riferirsi ai *valori massimi e minimi* delle varie grandezze riportati nella sezione “*Electrical Characteristics*”. Si noti che in questa sezione viene sempre fornito almeno il valore minimo di β : quest’ultimo viene sempre indicato come h_{FE} .

Sulla base della potenza dissipabile, i BJT possono essere classificati sostanzialmente in tre gruppi: *di piccola potenza* (*low power*, oppure *small signal transistors*), corrispondenti a potenze che non superano le poche centinaia di mW, con correnti i_C fino a 100 mA; *di media potenza* (*medium power transistors*), corrispondenti a potenze sino a $1 \div 1,5$ W solo con l’uso di un dissipatore, con correnti i_C fino a 1 A; *di potenza* (*power transistors*), concepiti per potenze superiori al watt e correnti maggiori di 1 A. I costruttori ne fanno quasi sempre l’oggetto di un catalogo specifico.

Un’altra distinzione riportata nei cataloghi è quella tra BJT *npn* e *pnp*. Sebbene nel campo delle basse frequenze vengono riportati esemplari sia dell’uno che dell’altro tipo, nella pratica viene maggiormente utilizzato il tipo *npn*. Per le frequenze di lavoro più elevate prevalgono nettamente i transistor *npn*, decisamente *più veloci* grazie alla più alta mobilità degli elettroni liberi rispetto a quella delle lacune.

In genere i cataloghi, al fine di facilitare la scelta di un dispositivo più idoneo per una determinata applicazione, classificano i BJT secondo categorie tipiche:

- *General purpose transistors*, per uso generale, in grado di fornire discrete prestazioni in molti settori applicativi (amplificatori di piccoli segnali, oscillatori, interruttori).
- *Low-level amplifier transistors*, specifici per l’amplificazione di segnali deboli (spesso inferiori al mV). Della massima importanza risultano in questo caso i parametri riguardanti il rumore generato dal dispositivo, in particolar modo la *cifra di rumore*, indicata con NF , che deve assumere il valore più basso possibile.
- *High-voltage amplifier transistors*, per applicazioni che richiedono tensione elevata con corrente di collettore relativamente bassa, utili ad esempio in circuiti inseriti direttamente sulla rete elettrica a 220 V. Importanti in questo caso sono le *massime tensioni* applicabili tra i terminali, in particolare quella tra collettore ed emettitore, indicata con BV_{CEO} .
- *Switching transistors*, adatti a funzionare come interruttori veloci. Molto importanti sono, in questo caso, i *tempi di commutazione* e in particolare t_{off} che scende comunemente a valori di poche decine di ns.
- *RF transistors*, per il funzionamento alle *radiofrequenze*, che trovano impiego nel campo delle telecomunicazioni come amplificatori, mixer, oscillatori. Le frequenze di lavoro vanno dalle centinaia di kHz (radio AM) ai GHz (comunicazioni via satellite). In questo caso, è caratterizzante il valore della *frequenza di transizione* f_T .

Per la classificazione dei BJT di potenza si può, in linea di massima, fare riferimento alle ultime tre categorie elencate, alle quali si deve aggiungere quella dei *low-frequency power transistors*, impiegati in applicazioni di bassa frequenza (amplificatori audio, alimentatori, ecc.).

Si può osservare che non di rado BJT con sigle diverse differiscono soltanto di qualche parametro non significativo per una data applicazione e sono quindi intercambiabili.

Infine, a proposito delle sigle che identificano il transistor (sia BJT che FET), quelli commercialmente più diffusi sono contrassegnati da sigle *standardizzate* secondo accordi presi dalle industrie. I tre sistemi principali d'identificazione sono il *JEDEC* (statunitense), il *PRO ELECTRON* (europeo) e il *JIS* (giapponese). Secondo il *JEDEC*, la sigla 1N seguita da 2 a 4 cifre contraddistingue un diodo, mentre 2N seguita da 2 a 4 cifre contraddistingue un transistor. Secondo il *JIS* invece, le sigle iniziano con 2S seguito da una lettera e da diverse cifre. La lettera che segue la "S" ha il seguente significato: "A" transistor *pnp* per alta frequenza, "B" transistor *pnp* per bassa frequenza, "C" transistor *npn* per alta frequenza, "D" transistor *npn* per bassa frequenza. Infine, l'associazione *PRO ELECTRON* usa il seguente standard: due o tre lettere, seguite da due o tre cifre contraddistinguono un vasto spettro di componenti a semiconduttore. Le cifre non hanno un particolare significato tecnico, mentre le lettere definiscono il tipo di componente e le sue caratteristiche applicative e tecnologiche, secondo lo schema riportato in Tab. 8.1

Tab. 8.1 – *Significato delle lettere nelle sigle dei semiconduttori secondo lo standard europeo (PRO ELECTRON)*

<p><i>Prima lettera (materiale)</i></p>	<p>A Germanio B Silicio C Arseniuro di gallio D Antimoniuro di indio R Materiali per fotoconduttori e generatori di Hall</p>
<p><i>Seconda lettera (impiego)</i></p>	<p>A Diodo di segnale B Diodo a capacità variabile C Transistore per bassa frequenza D Transistore di potenza per bassa frequenza E Diodo tunnel F Transistore per alta frequenza L Transistore di potenza per alta frequenza N Fotoaccoppiatori P Dispositivo sensibile alle radiazioni Q Dispositivo generatore di radiazioni R Dispositivo di commutazione controllato ad impulsi S Transistori per commutazione T Dispositivo di commutazione di potenza controllato ad impulsi U Transistore di potenza per commutazione Y Diodo raddrizzatore Z Diodo Zener</p>
<p><i>Terza lettera</i></p>	<p>Z } Y } tipi professionali X }</p>