

DISPOSITIVI A SEMICONDOTTORE

Il diodo è un componente passivo non lineare la cui caratteristica principale è quella di presentare una ridottissima resistenza quando la tensione ai suoi capi ha una polarità ed invece una elevatissima resistenza quando la tensione ai suoi capi ha polarità opposta. Questa proprietà viene sfruttata in numerose applicazioni quali i raddrizzatori e i moltiplicatori di tensione, i circuiti limitatori e fissatori gli stabilizzatori di tensione (diodi Zener).

I diodi a semiconduttore hanno sostituito i diodi a vuoto, rispetto ai quali presentano enormi vantaggi per dimensioni, dissipazione, tensioni di lavoro, durata.

Anche sotto l'aspetto concettuale e didattico il diodo a semiconduttore riveste grande importanza in quanto consente di acquisire informazioni e metodi di analisi che troveranno sviluppo ed applicazione in relazione ad altri componenti più complessi.

1 I semiconduttori

I materiali usati nella realizzazione di componenti a semiconduttore sono il *silicio* (Si), largamente prevalente, il *germanio* (Ge), impiegato oggi solo in rari casi, l'*arseniuro di gallio* (AsGa), composto utilizzato per applicazioni particolari.

Le proprietà di un materiale dipendono, come è noto, dalla struttura atomica ed elettronica degli elementi che lo compongono e dal legame chimico esistente fra i suoi atomi. Gli atomi, secondo il modello di Bohr e Rutherford, sono costituiti da un nucleo, formato da protoni e neutroni, e da una nuvola elettronica ovvero da un certo numero di elettroni che ruotano con energie e orbite diverse intorno al nucleo.

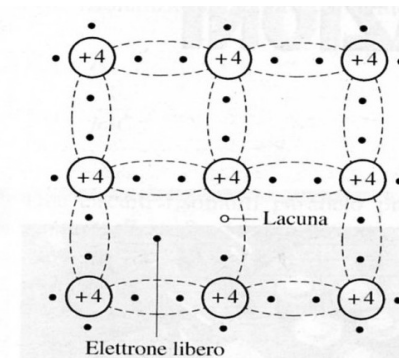


Fig. 1 Cristallo di silicio con un elettrone libero ed una lacuna.

Gli elettroni più esterni, precisamente quelli dell'ultima orbita (elettroni di valenza), risentono fortemente delle interazioni con gli atomi circostanti e quindi determinano le caratteristiche elettriche e chimiche dei materiali. Quelli più interni, con energie più basse, sono invece saldamente legati al nucleo ed hanno perciò scarsa influenza.

Gli atomi dei semiconduttori puri, *Si* e *Ge*, presentano quattro elettroni di valenza (*tetravalenti*) e una struttura cristallina in cui ciascun atomo mette in comune un elettrone di valenza con quattro atomi circostanti formando *legami covalenti*. Ciò fa sì che gli elettroni risultino saldamente vincolati nel reticolo cristallino. I livelli di energia di tutti gli elettroni sono compresi nella banda di valenza e la conduttività del materiale è nulla. A temperature molto basse in effetti i materiali semiconduttori si comportano come isolanti.

Fornendo però energia termica, o un altro tipo di energia, è possibile spezzare qualche legame covalente; in questo caso si avranno *elettroni liberi*, con livelli di energia compresi nella banda di conduzione, e una certa conduttività. In fig. 1 è illustrato un cristallo di *Si*; ciascun atomo è rappresentato dal nucleo con gli elettroni più interni (ione con carica +4) e dagli elettroni esterni che formano i legami covalenti. Si nota la presenza di un elettrone libero e di un legame

covalente incompleto; la mancanza di un elettrone nel legame covalente costituisce una *lacuna*.

L'importanza della lacuna consiste nel fatto che l'esistenza di un legame incompleto rende probabile il trasferimento di un elettrone di un altro atomo alla lacuna stessa. Questo processo può ripetersi a catena perché l'elettrone che si muove lascia a sua volta una lacuna. Il flusso degli elettroni procede quindi in verso opposto a quello delle lacune.

In un semiconduttore puro il numero delle lacune è uguale al numero di elettroni liberi e aumenta al crescere della temperatura. Pertanto, ad es. a temperatura ambiente, si ha una debole conduttività, dovuta alle lacune e agli elettroni liberi generatisi per effetti termici, nota come *conduttività intrinseca*.

1.1 Semiconduttori drogati

Per sfruttare le caratteristiche dei materiali semiconduttori, aumentandone sensibilmente la conduttività così da ottenere correnti apprezzabili anche con l'applicazione di campi elettrici piuttosto deboli, si ricorre al drogaggio del semiconduttore. Questo processo consiste nell'inserire nella struttura cristallina di Si o Ge, tetravalenti, atomi di materiali *pentavalenti* o *trivalenti* e quindi creare una sovrabbondanza di elettroni liberi o di lacune.

Il materiale in cui sono stati introdotti atomi pentavalenti (o *donatori*, in quanto, disponendo ciascuno di cinque elettroni di valenza, presentano un elettrone libero da legami covalenti e quindi disponibile a muoversi nel cristallo) diventa di tipo *n*. In esso la conduttività è principalmente dovuta alla presenza di elettroni liberi, pertanto gli elettroni sono i *portatori di carica maggioritari* mentre le lacune, sono i *portatori minoritari*.

Il materiale in cui sono stati introdotti atomi trivalenti (o *accettori*, in quanto l'esistenza di un legame incompleto comporta la disponibilità ad accogliere un elettrone esterno all'atomo) diventa di tipo *p*. In esso la conduttività è principalmente dovuta alla presenza di lacune, pertanto le lacune sono i *portatori maggioritari* e gli elettroni sono i *portatori minoritari*.

Fra gli elementi che vengono usati come impurità per il drogaggio si possono citare: fosforo (P), arsenico (As), ... come donatori; boro (B), gallio (Ga), alluminio (Al), ... come accettori.

1.2 La giunzione pn

Se in un cristallo di materiale semiconduttore vengono introdotte da un lato impurità di tipo *p*, dall'altro impurità di tipo *n*, si viene a creare fra le due zone una *giunzione pn*.

La presenza di lacune in eccesso nella zona *p* e di elettroni liberi nella zona *n* determina un'interazione fra gli atomi in prossimità della giunzione. Alcuni elettroni della zona *n* si diffondono attraverso la giunzione e si ricombinano con le lacune della zona *p*; analogamente alcune lacune della zona *p* si diffondono ricombinandosi con gli elettroni presenti nella zona *n*. Ciò crea una regione che, a causa delle ricombinazioni elettrone-lacuna, è priva di portatori liberi. Inoltre, nelle vicinanze della giunzione, gli atomi che hanno acquisito per ricombinazione un elettrone diventano ioni negativi, mentre quelli che hanno acquisito una lacuna diventano ioni positivi. Come è illustrato in figg. 2a 2b, si crea una *zona detta di svuotamento o di carica spaziale*, che presenta una certa carica negativa dal lato *p* e una certa carica positiva dal lato *n*. Si può osservare che tale regione, che ha uno spessore dell'ordine di 0,5 μm , si presenta come una porzione di dielettrico e determina un effetto capacitivo ai capi della giunzione. La carica che a causa della diffusione si accumula in prossimità della giunzione genera un campo elettrico; questo si oppone a un'ulteriore diffusione di portatori maggioritari (elettroni verso sinistra e lacune verso destra nel disegno di fig. 2a) e favorisce invece un flusso di portatori minoritari in verso opposto. In fig. 2c è illustrata la barriera di potenziale che si viene a creare, la cui

altezza V_0 vale pochi decimi di volt. In definitiva si creano due flussi di portatori e quindi due correnti di verso opposto e precisamente:

la *corrente di diffusione*, costituita da portatori maggioritari;

la *corrente di deriva* costituita da portatori minoritari che si formano per effetti termici.

Si raggiunge l'equilibrio quando la corrente di diffusione eguaglia quella di deriva.

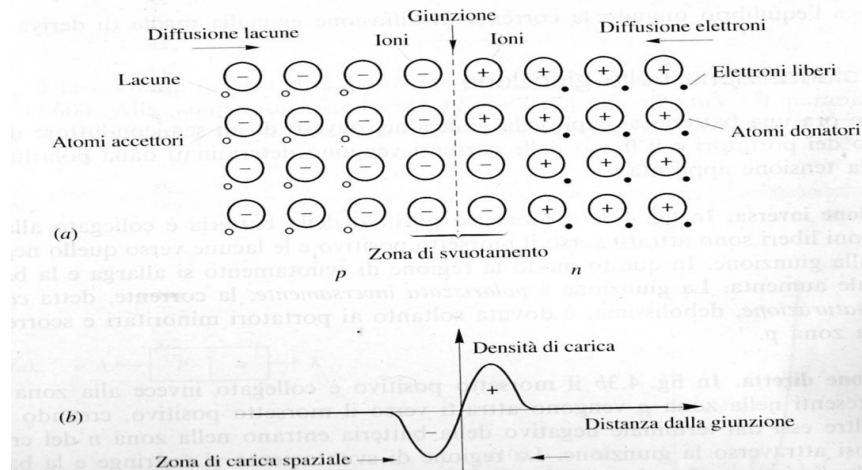


Fig. 2 (a) Diagramma schematico di una giunzione pn ; (b) andamento della densità di carica; (c) I barriera di potenziale in prossimità della giunzione.

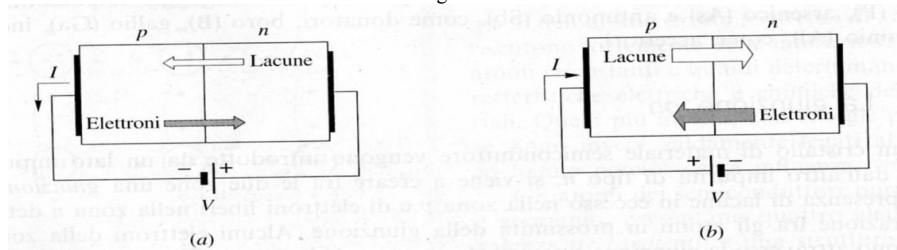


Fig. 3 Giunzione pn polarizzata (a) inversamente; (b) direttamente.

1.3 Polarizzazione della giunzione

Applicando ora una batteria ai capi della giunzione pn , il moto dei portatori e il flusso delle correnti vengono determinati dalla polarità e dal valore della tensione applicata.

Polarizzazione inversa. In fig. 3a il morsetto positivo della batteria è collegato alla zona n ; gli elettroni liberi sono attratti verso il morsetto positivo e le lacune verso quello negativo, lontano dalla giunzione. In questo modo la regione di svuotamento si allarga e la barriera di potenziale aumenta. La giunzione è *polarizzata inversamente*: la corrente, detta *corrente inversa di saturazione*, è dovuta soltanto ai portatori minoritari e scorre dalla zona n alla p .

Polarizzazione diretta. In fig. 3b il morsetto positivo è collegato invece alla zona p ; gli elettroni presenti nella zona p vengono attratti verso il morsetto positivo, creando nuove lacune; inoltre essi dal terminale negativo della batteria entrano nella zona n del cristallo diffondendosi attraverso la giunzione. La regione di svuotamento si restringe e la barriera di potenziale diminuisce. La giunzione è *polarizzata direttamente*: la corrente, detta *corrente diretta*, è dovuta ai portatori maggioritari e scorre dalla zona p alla zona n .

2 Il diodo

Il cristallo con la giunzione pn in fig.4a rappresenta il diodo, il cui simbolo circuitale è illustrato in fig.4b, dove si notano i due terminali A(*anodo*) e K(*catodo*), corrispondenti alle zone p ed n . La funzionalità del diodo, già esaminata qualitativamente considerando la giunzione, viene

descritta dalla *curva caratteristica* illustrata in fig. 4c. Questa esprime graficamente l'andamento della corrente I al variare della tensione fra anodo e catodo V per un generico diodo al Si. Per tensioni V positive la giunzione è polarizzata direttamente e la corrente diretta fluisce dall'anodo al catodo. Per valori di V compresi fra 0 e V_γ , tuttavia la corrente assume valori trascurabili; V_γ che rappresenta la *tensione di soglia* oltre la quale la corrente diretta assume valori apprezzabili, vale circa 0,5 V per diodi al Si. Per valori di V superiori a V_γ la corrente cresce esponenzialmente.

Per tensioni V negative la giunzione è polarizzata inversamente: la corrente inversa di saturazione I_0 fluisce dal catodo all'anodo e presenta valori piccolissimi.

Per un dato valore di tensione negativa, (decine o centinaia di volt), si verifica la *rottura* della giunzione (*breakdown*): il forte campo elettrico generato dalla d.d.p. applicata ai capi del diodo libera molti elettroni dai legami covalenti; gli elettroni, così accelerati, urtano atomi vicini fornendo energia ad altri elettroni, che a loro volta si liberano, causando una moltiplicazione a valanga di portatori liberi.

La relazione fra la tensione applicata ai capi del diodo e la corrente circolante è espressa dall'equazione

$$I = I_0(e^{(V/\eta V_T)} - 1) \quad [1a]$$

dove I_0 è la corrente inversa di saturazione mentre V_T dipende dalla temperatura e vale $T/11600$.

Alla temperatura ambiente ($T=300^\circ\text{C}$), $V_T = 26$ mV. Il parametro η per diodi al Si vale circa 2 per normali valori di corrente mentre si avvicina a 1 per correnti molto elevate.

Per tensioni V molto superiori a V_γ , risulta $e^{(V/\eta V_T)} \gg 1$ e si ha:

$$I = I_0 e^{(V/\eta V_T)} \quad [1b]$$

La corrente nel diodo varia con la temperatura anche a causa della variazione di I_0 . Infatti I_0 , costituita da portatori minoritari che si generano per effetti termici, cresce esponenzialmente con la temperatura; si può considerare approssimativamente che I_0 raddoppi per ogni 10°C di aumento della temperatura. A sua volta la tensione V corrispondente ad un certo valore I della corrente diretta diminuisce al crescere della temperatura con un coefficiente termico negativo $\Delta V/\Delta T = -2.5$ mV/ $^\circ\text{C}$.

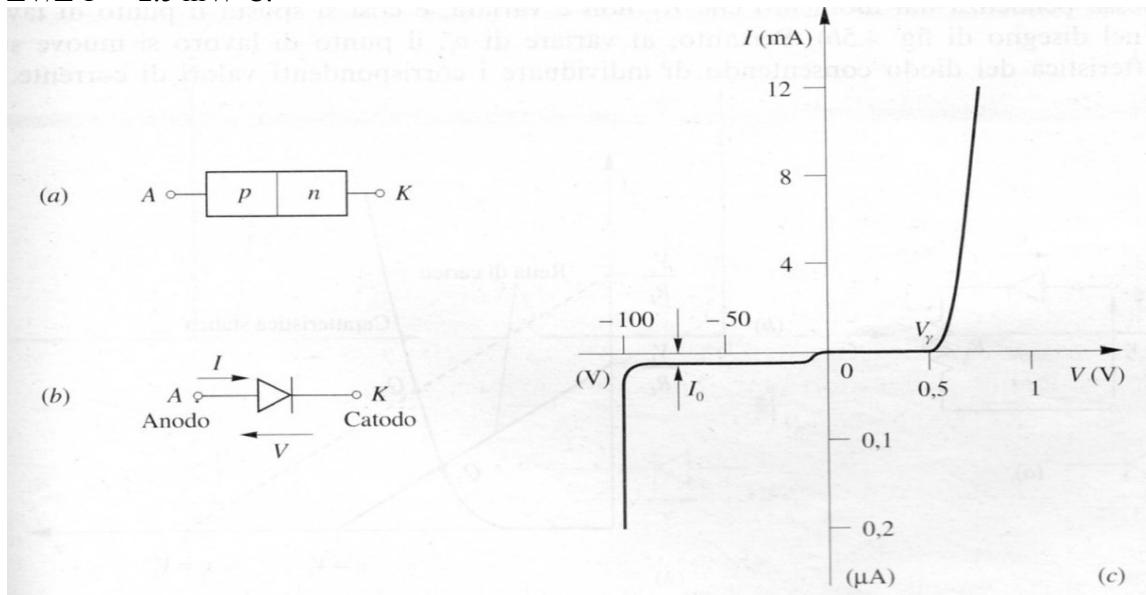


Fig. 4 (a) Giunzione pn. (b) Simbolo circuitale del diodo. (c) Caratteristica di un diodo al Si.

3 Il diodo come elemento circuitale

Il circuito illustrato in fig. 5a. in cui il diodo è posto in serie ad un carico R , rappresenta la più semplice e comune applicazione di questo dispositivo. Per ricavare i valori istantanei della corrente i e della tensione v ; quando all'ingresso è applicato un dato segnale v_i , si può utilizzare l'equazione alla maglia

$$v = v_i - iR \quad [2]$$

Essa rappresenta una retta nel piano i, v , nota come *retta di carico*, che interseca gli assi per $v=0$ e per $i = 0$, con pendenza $-1/R$, dove R , è la resistenza di carico.

Se la tensione di ingresso v_i , assume il valore costante V_1 , dall'eq. [2] si ottiene la retta di carico rappresentata a tratto pieno in fig.5b.

Una seconda relazione fra i e v è espressa ovviamente dalla caratteristica del diodo, riprodotta in fig.5b solo per la parte relativa alla polarizzazione diretta. Infatti quando il diodo è polarizzato inversamente, per qualsiasi valore della tensione applicata, la corrente assume valori trascurabili e quindi si può considerare $i = 0$.

L'intersezione fra la caratteristica del diodo e la retta di carico individua il *punto di lavoro statico* (corrispondente a Q_1 , nel disegno di fig.5b ovvero fornisce i valori di i e v per quel particolare diodo, in quel circuito, con quel valore di R e con una data tensione $v_i = V_1$.

Se v_i , varia, supponiamo dal valore V_1 , al valore V_2 , la retta di carico si sposta, mantenendo la stessa pendenza dal momento che R , non è variata, e così si sposta il punto di lavoro (Q_2 nel disegno di fig.5b). Pertanto, al variare di v_i , il punto di lavoro si muove sulla caratteristica del diodo consentendo di individuare i corrispondenti valori di corrente.

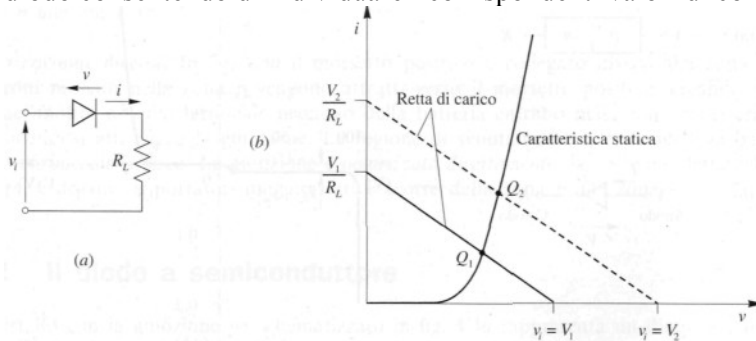


Fig. 5 (a) Circuito con diodo; (b) metodo grafico per la determinazione del punto di lavoro.

3.1 Modelli approssimati del diodo

L'uso della caratteristica del diodo per la soluzione di circuiti è decisamente poco pratico, anche perché non sono sempre disponibili le caratteristiche dei diodi reali. Comunemente si ricorre quindi a modelli circuitali del diodo introducendo approssimazioni più o meno drastiche a seconda del tipo di applicazione. In questo modo anche la curva caratteristica si riduce ad una spezzata che interpola la caratteristica reale. Si può osservare che queste semplificazioni non comportano in genere errori sostanziali trattando segnali ampi ossia, riferendosi al circuito di fig. 5a quando v_i , compie ampie escursioni.

Una approssimazione valida nella quasi totalità dei casi è quella che considera il diodo polarizzato inversamente come una resistenza R_r di valore infinito ossia un circuito aperto.

Diodo come interruttore. Dovendo valutare qualitativamente il funzionamento di un circuito comprendente uno o più diodi, spesso si utilizza il modello più semplice, che considera il diodo in polarizzazione inversa come un interruttore aperto e il diodo in polarizzazione diretta come un interruttore chiuso ovvero un cortocircuito. In fig. 6a sono illustrati i modelli rappresentativi e la corrispondente caratteristica approssimata mentre la curva a tratteggio indica la caratteristica reale.

Diodo come batteria V_F . Mentre, come si è detto, è lecito considerare il diodo in polarizzazione

inversa come un circuito aperto, in molti casi è necessario tenere conto della caduta di tensione non nulla sul diodo in polarizzazione diretta. È quindi spesso utilizzato il modello illustrato in fig. 6b insieme alla relativa caratteristica diretta. Il diodo in conduzione è rappresentato da una batteria V_F con i terminali positivo e negativo corrispondenti rispettivamente all'anodo e al catodo. Il valore di V_F viene assunto pari a 0,7V

Diodo come batteria V_g e resistenza R_f . Un modello più preciso, che consente di considerare anche la variazione della tensione ai capi del diodo al variare della corrente circolante, è illustrato in fig. 6c. Il diodo in polarizzazione diretta è visto come una batteria V_g in serie ad una resistenza R_f . Considerando, per diodi al Si. $V_g = 0,5$ V ad R_f viene assegnato un valore ridotto (da pochi ohm a poche decine di ohm); su questa si avrà una caduta di tensione che dipenderà dalla corrente diretta.

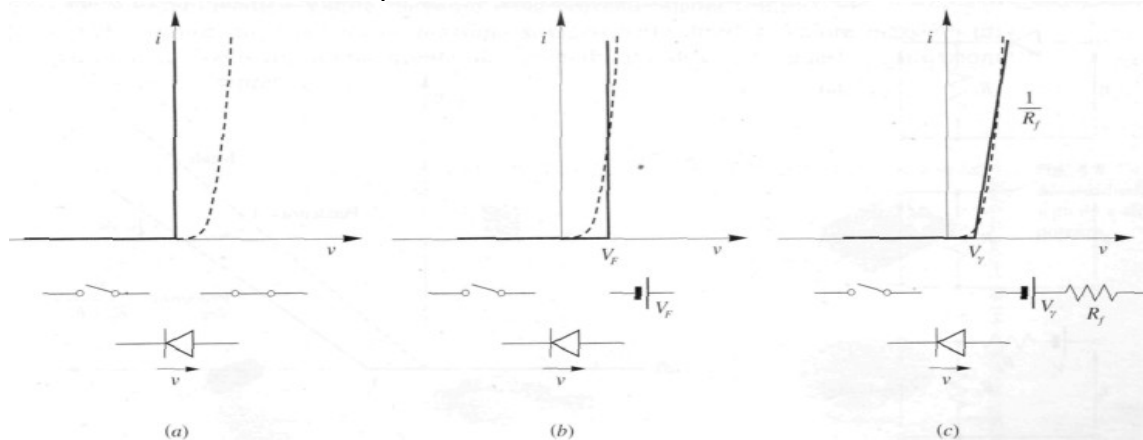


Fig. 6 Modelli e caratteristiche del diodo considerato (a) come interruttore; (b) come batteria; (c) come batteria in serie ad R_f .

3.2 Parametri dei diodi reali

La scelta del modello con cui rappresentare il diodo dipende dal grado di precisione che si vuole raggiungere nell'analisi di un circuito, dagli elementi circuitali presenti, dalle tensioni e dai segnali applicati. In fase di progettazione è però necessario prendere in considerazione i parametri reali specificati dai costruttori per il diodo che si utilizza.

Diodi per usi generici, adatti per segnali di limitata entità e in applicazioni che non richiedono prestazioni particolari.

Diodi per commutazione, impiegati in circuiti che richiedono commutazioni veloci fra gli stati ON e OFF.

Diodi raddrizzatori, specificamente adatti per il raddrizzamento di tensioni anche di elevata entità e con vari livelli di potenza.

I fogli tecnici forniscono sia dati relativi ai limiti di funzionamento, sia dati relativi alle caratteristiche elettriche di ciascun diodo. Non tutte le indicazioni sono sempre strettamente necessarie. Si possono elencare i parametri principali con i relativi simboli.

V_F : Tensione continua ai capi del diodo in conduzione, specificata per un dato valore di I_F .

$I_{F(AV)}$: Valore massimo della corrente diretta in media.

I_{FSM} : Valore di picco; sovracorrente di breve durata dovuta a guasti o situazioni impreviste.

I_R : Massimo della corrente inversa.

V_{RRM} : Massimo della tensione inversa, compresi i transitori ripetitivi. Assume in genere lo stesso valore della massima tensione inversa di lavoro.

V_{RSM} : Valore massimo della tensione inversa di picco non ripetitivo.

V_{BR} : Tensione a cui si verifica il breakdown.

T_J : Temperatura massima che può sopportare la giunzione, di solito da 100 a 150°C.

P : Potenza dissipabile, in genere a temperatura ambiente 25°C; diminuisce al crescere della T .

C_T : Capacità totale (ordine pF) con giunzione polarizzata inversamente interessa le applicazioni

con segnali di frequenza elevata.

trr Tempo di recupero inverso. Tempo impiegato dal diodo, sottoposto ad una commutazione istantanea del segnale applicato, per passare dallo stato ON allo OFF. Esso deriva dal fatto che, in polarizzazione diretta, in prossimità della giunzione si accumulano portatori minoritari in eccesso; quando la tensione si inverte, le cariche minoritarie mantengono per un certo tempo una sensibile corrente inversa, che si esaurisce a poco a poco. Il parametro **trr** assume particolare importanza trattando segnali di frequenza elevata. Vengono perciò prodotti diodi di commutazione che presentano valori di **trr** molto limitati, dell'ordine di qualche ns.

4 Modello del diodo per piccoli segnali

I modelli considerati nel par.3 si adattano all'analisi di circuiti in cui il segnale applicato compie ampie escursioni, che portano il diodo a lavorare alternativamente nei due stati on e off. Nel circuito illustrato in fig. 7a, alla tensione continua V_{AA} , che mantiene in polarizzazione diretta il diodo, è sommato un segnale $v_s(t) = V_{SM} \text{sen}\omega t$ la cui ampiezza $V_{SM} \ll V_{AA}$. Il diodo è sempre in stato ON e la tensione $v_i(t)$ complessiva applicata all'anodo risulta:

$$v_i(t) = V_{AA} + v_s(t) = V_{AA} + V_{SM} \text{sen}\omega t \quad [4]$$

con i rispettivi valori estremi $V_{AA} + V_{SM}$ e $V_{AA} - V_{SM}$ ed un valore medio V_{AA} . Si può dunque tracciare sulla curva caratteristica del diodo la retta di carico, che interseca gli assi nei punti $v = V_{AA}$ e $i = V_{AA}/R$ individuando il punto di lavoro statico Q. Come si vede in fig.7b, la variazione della tensione applicata o consente di tracciare altre rette di carico, in particolare quelle che individuano i punti di lavoro estremi Q1 e Q2 corrispondenti rispettivamente ai valori massimo e minimo della tensione di ingresso. Graficamente si ricavano l'andamento della corrente nel diodo e quello della tensione ad esso applicata. La corrente è costituita da una componente continua I_Q a cui è sovrapposto il segnale sinusoidale $i_s(t)$ cosicché si ottiene

$$i = I_Q + i_s(t) = I_Q + I_{SM} \text{sen}\omega t \quad [5]$$

L'eq. [5] deriva dal fatto che la caratteristica del diodo nel tratto compreso fra i punti Q1 e Q2. Può essere approssimata con una retta con pendenza uguale a quella della caratteristica stessa nel punto Q. Infatti in questo tratto limitato il diodo si comporta in modo lineare e si verifica la sovrapposizione degli effetti di $V_{AA} + v_s(t)$.

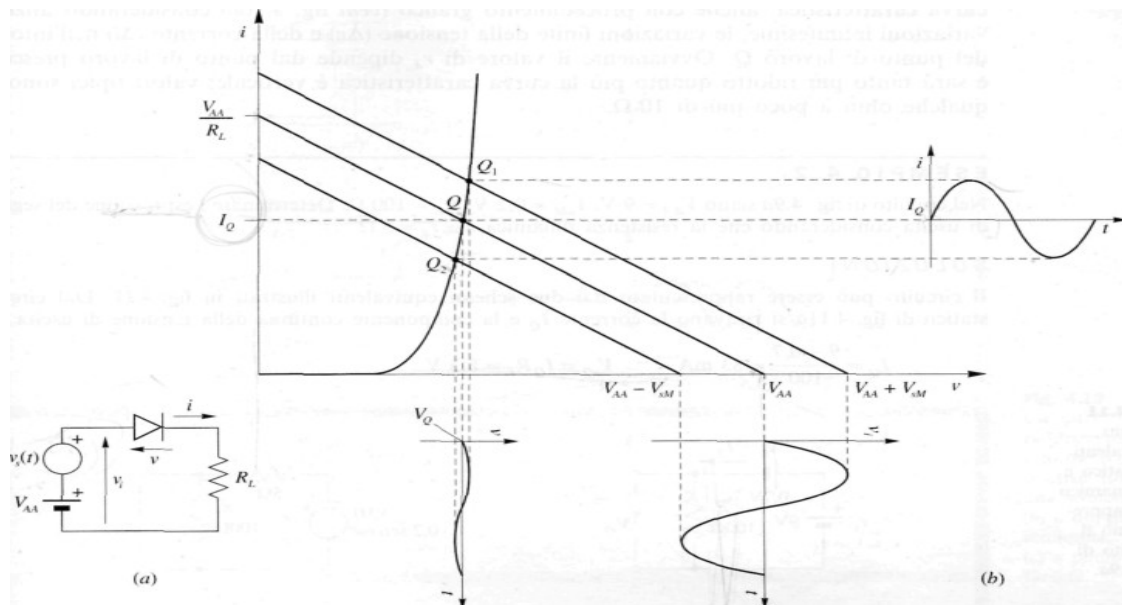


Fig. 7 (a) Circuito a cui è applicato un segnale sovrapposto ad una componente continua, (b) Determinazione grafica della corrente nel diodo.

La componente $i_s(t)$ dovuta al generatore $v_s(t)$ può essere determinata, anziché graficamente, anche analiticamente utilizzando il circuito equivalente di fig. 8; qui il generatore che fornisce la componente continua è stato annullato ed è presente solo il generatore di segnale. Il diodo è stato sostituito dalla resistenza r_d (resistenza dinamica o differenziale). Essa rappresenta l'inverso della pendenza ($1/\text{tg}\alpha$) della caratteristica nel punto di lavoro Q

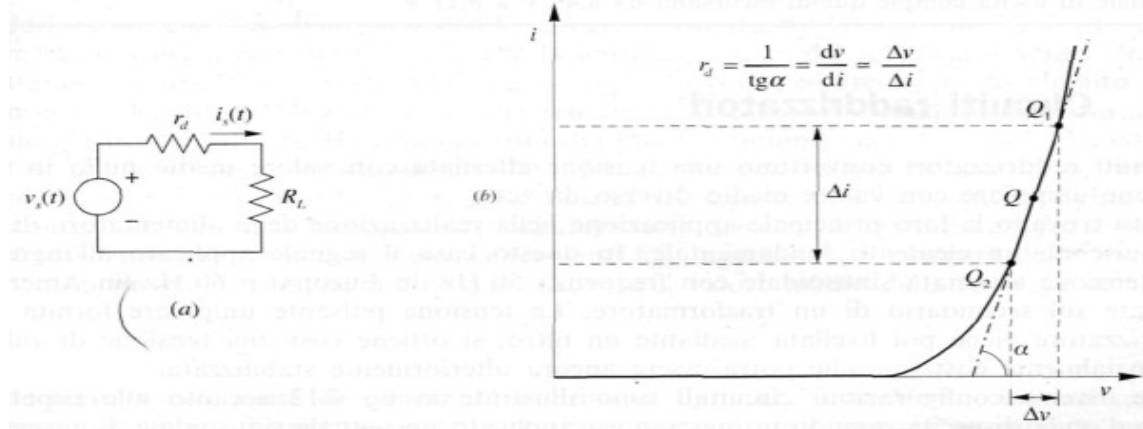


Fig. 8 (a) Circuito equivalente per piccoli segnali. (b) Determinazione grafica della resistenza dinamica.

Il valore di r_d può essere ricavato, oltre che analiticamente derivando della curva caratteristica, anche con procedimento grafico fig. 8b. Ovviamente il valore di r_d dipende dal punto di lavoro prescelto e sarà tanto più ridotto quanto più la curva caratteristica è verticale; valori tipici sono da qualche ohm a poco più di 10Ω .

ESEMPIO 4.2

Nel circuito di fig. 8a siano $V_{AA} = 9\text{ V}$, $V_{sM} = 0,2\text{ V}$, $R_L = 100\Omega$. Determinare l'espressione del segnale di uscita considerando che la resistenza dinamica sia $r_d = 5\Omega$.

SOLUZIONE

Il circuito può essere rappresentato dai due schemi equivalenti illustrati in fig. 9. Dal circuito statico di fig.9a si ricavano la corrente I_Q e la componente continua della tensione di uscita V_{0Q}

$$I_Q = 9 - 0,7 / 100 = 83\text{ mA}$$

$$V_{0Q} = I_Q R_L = 8,3\text{ V}$$

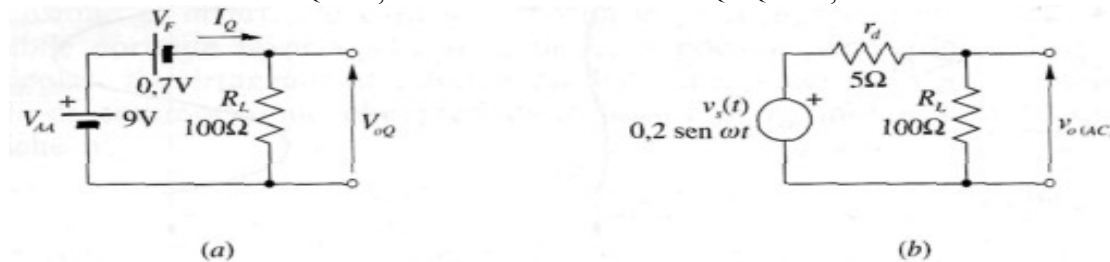


Fig. 9 Circuiti equivalenti (a) statico e (b) dinamico che rappresentano il circuito di fig. 8a.

Dal circuito dinamico di fig.9b si ottiene la componente alternata del segnale di uscita

$$v_{o(AC)} = 0,2 \text{ sen } \omega t \left(\frac{100}{100+5} \right) = 0,19 \text{ sen } \omega t \text{ [V]}$$

Sommando le componenti continua ed alternata si ottiene

$$v_o(t) = V_{0Q} + v_{o(AC)} = 8,3 + 0,19 \text{ sen } \omega t \text{ [V]}$$

Il segnale di uscita compie quindi escursioni da $8,49\text{ V}$ a $8,11\text{ V}$

4.9 Il diodo Zener

I diodi Zener vengono costruiti con caratteristiche adatte al funzionamento nella regione di breakdown. Essi sono caratterizzati da una tensione inversa di breakdown, detta tensione di Zener e indicata con V_z , particolarmente stabile e definita, in corrispondenza della quale la

caratteristica corrente-tensione diventa quasi verticale. Per questo motivo vengono tipicamente impiegati come elementi di stabilizzazione della tensione al valore V_Z .

In fig.10 è illustrata la Caratteristica I-V di un diodo Zener. Mentre la curva relativa alla polarizzazione diretta è simile a quella di un normale diodo, la zona di polarizzazione inversa assume un andamento particolare. Per tensioni $|V| < V_Z$ la corrente è ridottissima e raggiunge il valore I_{ZK} (corrente di ginocchio) solo nell'intorno di $|V| = V_Z$, crescendo poi con andamento quasi verticale. In quest'ultimo tratto della caratteristica inversa la resistenza dinamica è piccolissima e una variazione sostanziale della corrente determina una variazione molto contenuta della tensione ai capi dello Zener.

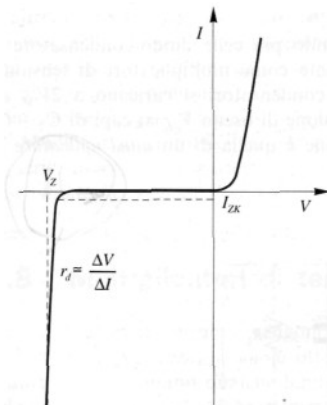


Fig. 10 Caratteristica I-V di un diodo Zener.

Il valore di V_Z dipende dalla resistività del materiale delle due zone p ed n per cui, regolando opportunamente i drogaggi, è possibile realizzare diodi Zener con V_Z compreso fra qualche volt e il centinaio di volt. La resistenza dinamica dei diodi Zener a bassa tensione è più elevata rispetto ai diodi normali.

La tensione di Zener dipende anche dalla temperatura di lavoro. Di solito viene riportato il coefficiente di temperatura, che esprime la variazione di V_Z per ogni grado di variazione della temperatura. In particolare risulta che, per tensioni di Zener inferiori a circa 5 V, il coefficiente termico $\alpha = DV_Z/DT$ è negativo; per V_Z superiore a 6 V, il coefficiente è positivo. Per valori intermedi, α può essere sia positivo sia negativo. Questo fenomeno è dovuto a due differenti meccanismi fisici che determinano la conduzione inversa.

Per $V_Z < 5$ V si ha un breakdown di tipo Zener propriamente detto: il drogaggio molto intenso comporta una giunzione molto stretta e quindi un campo elettrico assai forte, in grado di rompere numerosi legami covalenti e di determinare una corrente considerevole anche con basse tensioni applicate; l'aumento della temperatura facilita la rottura dei legami e di conseguenza V_Z diminuisce al crescere di T.

Per $V_Z > 6$ V, si ha un breakdown con effetto valanga: la tensione esterna applicata accelera i portatori provocando collisioni con gli atomi circostanti ed una moltiplicazione a valanga di portatori liberi; l'aumento della temperatura fa diminuire la probabilità che le cariche libere acquistino energia a sufficienza per innescare il processo a valanga e quindi V_Z aumenta con T. Nonostante queste differenze il termine Zener viene comunemente usato anche per indicare diodi con V_Z maggiore di 6 V.

5 IL TRANSISTOR BIPOLARE

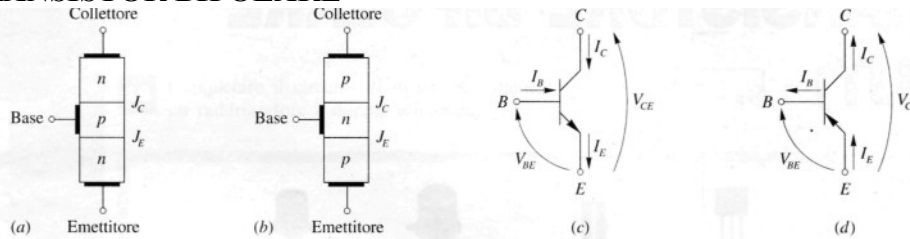


Fig. 1 Struttura del BJT (al di tipo npn e (a) di tipo pnp (b) Simbolo del BJT npn (c) e di quello pnp (d)

Il transistor bipolare è costituito da 3 regioni adiacenti di semiconduttore drogate alternativamente n e p. In fig.1 a e b sono rappresentate le due possibili versioni del BJT: il tipo npn e quello pnp. La regione centrale viene chiamata base e le due laterali rispettivamente emettitore e collettore. Sono pertanto presenti due giunzioni, la giunzione base-emettitore J_E e la giunzione base-collettore J_C .

In fig.1 e d sono indicati i simboli rispettivamente del BJT npn e di quello pnp insieme con le correnti che interessano i tre terminali e le tensioni riferite all'emettitore. Come si nota, l'emettitore è contrassegnato da una freccia, che indica la giunzione base-emettitore e quindi il verso della corrente che la percorre.

In realtà la struttura del transistor bipolare non è simmetrica come potrebbe apparire; L'emettitore occupa la zona più interna del chip ed è fortemente drogato (n^+). La base è molto sottile e poco drogata rispetto all'emettitore; il collettore infine occupa quasi l'intero corpo del chip in modo da avvolgere le altre due zone e presenta un drogaggio intermedio fra le due.

1 Polarizzazione e correnti

Per la spiegazione del funzionamento si farà riferimento al tipo pnp.

Si tenga presente innanzi tutto che nel BJT la giunzione di comando è la giunzione base-emettitore J_E . Polarizzandola direttamente mediante una tensione V_{EB} positiva, come è indicato in fig.2 si provoca attraverso ad essa il passaggio di una corrente di diffusione I_E ; questa è costituita prevalentemente da lacune che penetrano dalla zona di emettitore in quella di base e in misura molto minore a causa del basso drogaggio della base, da elettroni che diffondono dalla base all'emettitore.

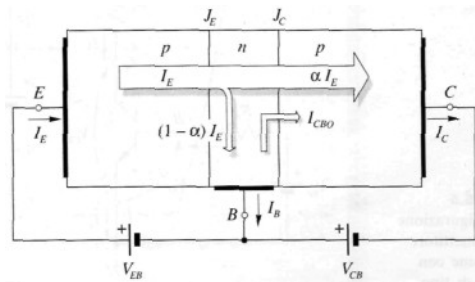


Fig. 2 Andamento delle correnti all'interno di un BJT pnp.

Giunte nella base, le lacune provenienti dall'emettitore si ricombinano solo in piccola parte con gli elettroni liberi qui presenti in bassa concentrazione (es. può ricombinarsi 1 lacuna su 100). Questa ricombinazione dà luogo alla componente principale della corrente di base I_B che risulta pertanto di intensità molto più piccola rispetto a quella di emettitore.

A causa della sottigliezza della base, la maggior parte delle lacune (99 su 100), prosegue verso la giunzione J_C , che essendo polarizzata inversamente dalla tensione V_{CB} negativa, favorisce il loro passaggio nella zona di collettore. La componente principale della corrente di collettore I_C risulta pertanto costituita da una frazione a molto prossima a 1 (nell'esempio $\alpha = 0.99$) della corrente di emettitore I_E (vedi fig.2).

Una seconda componente di I_C , di intensità molto minore, ma che in particolari condizioni manifesta i suoi effetti, è costituita dalla corrente inversa di saturazione I_0 della giunzione J_C ,

indicata nei transistori con I_{CB0} , proveniente dalla base e dovuta ai portatori minoritari. Per il BJT di tipo npn il principio di funzionamento è identico, anche se il verso delle correnti, dovute essenzialmente al movimento di elettroni, è contrario a quello ora descritto.

2 Comportamento circuitale del BJT

Si consideri un BJT di tipo npn, inserito in un circuito come quello illustrato in fig.3. La giunzione di comando base-emettitore J_E risulta allora polarizzata direttamente dalla batteria V_{BB} mentre la giunzione base-collettore J_C è polarizzata inversamente da V_{CC} .

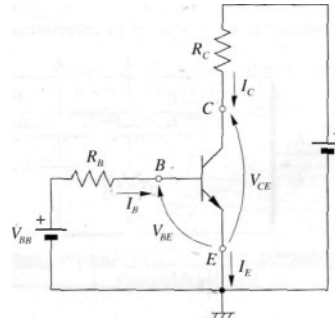


Fig.3 configurazione emettitore comune con BJT npn

La corrente I_E , costituita prevalentemente da elettroni è uscente dal BJT e produce una corrente $I_C = \alpha I_E$ entrante e di intensità leggermente inferiore. La base a sua volta è interessata da una corrente entrante dovuta alla ricombinazione degli elettroni e di intensità molto inferiore $I_B = (1-\alpha)I_E$

Tenendo conto anche della corrente inversa di saturazione I_{CB0} della giunzione J_C si ha:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} \quad [1]$$

dove α assume valori prossimi ad 1 (tra 0,9 e 0,999). Per il 1° principio di Kirchhoff

$$I_E = I_C + I_B \quad [2]$$

si ricava

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CB0} \quad [3]$$

A questo punto, introducendo il parametro $\beta = \alpha/(1-\alpha)$, si ottiene

$$I_C = \beta I_B + (\beta+1) I_{CB0} \quad [4]$$

In realtà, considerando il basso valore di I_{CB0} , i costruttori forniscono un altro parametro indicato con h_{FE} , intendendo con esso il rapporto fra I_C e I_B (*guadagno di corrente in continua*).

$$I_C = h_{FE} I_B \quad [5]$$

In pratica l'approssimazione $h_{FE} \sim \beta$ è sostanzialmente lecita. Per i transistori commerciali h_{FE} è compreso fra 10 e 1000; un valore piuttosto comune è 100.

In definitiva secondo l'eq. [5], che rappresenta la relazione fondamentale del BJT.

ESEMPIO 5.1

Nel circuito di fig.3, in cui il BJT presenta una $h_{FE}=100$, si misura una $I_B=100\mu A$. Sapendo che $R_C=1k\Omega$ e $V_{CC}=18V$ si determini il valore delle correnti I_C e I_E , della tensione V_{CE} e delle tensioni che si localizzano ai capi delle due giunzioni J_E e J_C .

SOLUZIONE

Applicando l'eq. [5] si ottiene

$$I_C = h_{FE} I_B = 100 \times 100 \times 10^{-6} = 10 \text{ mA}$$

e quindi

$$I_E = I_C + I_B = 10 + 0.1 = 10.1 \text{ mA}$$

Dalla maglia contenente V_{CC} si ricava

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 18 - 1 \times 10 = 8 \text{ V}$$

La tensione V_{BE} ai capi della giunzione J_E è quella di una giunzione polarizzata direttamente;

pertanto $V_{BE} = 0.7V$

Infine la tensione V_{BC} ai capi della giunzione J_c risulta dalla relazione

$$V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = 0,7 - 8 = -7,3V$$

da cui si nota che la giunzione J_c è polarizzata negativamente.

3 Curve caratteristiche del BJT

Si consideri nuovamente la configurazione di fig.3; in essa si può considerare I_B come corrente di ingresso e I_C come corrente di uscita. Questa configurazione, che riveste il maggior interesse applicativo, è detta ad emettitore comune (CE) in quanto l'emettitore risulta comune sia alla maglia di ingresso che a quella di uscita. Il funzionamento del BJT può essere studiato più approfonditamente considerando le relazioni e le curve caratteristiche che legano fra di loro le correnti e le tensioni di ingresso e di uscita I_B , V_{BE} , I_C , e V_{CE} .

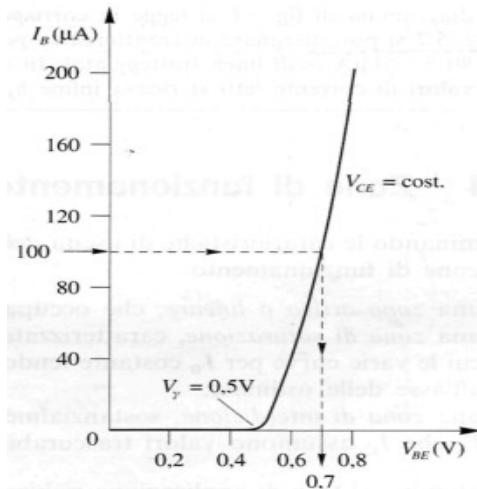


Fig. 6 Caratteristica di ingresso di un BJT npn.

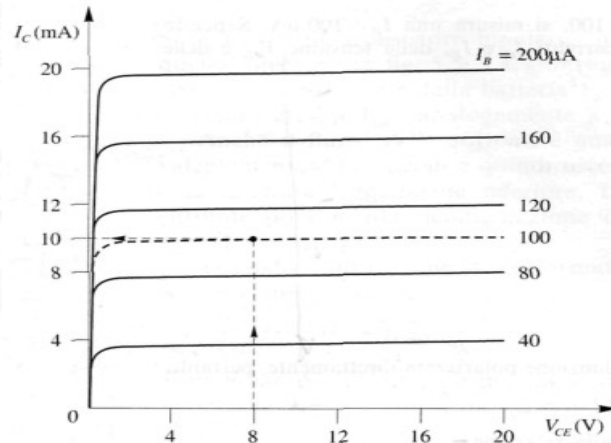


Fig. 7 Caratteristiche di uscita di un BJT npn

3.1 Caratteristiche di ingresso

Rappresentano l'andamento della corrente di ingresso I_B in funzione della tensione V_{BE} per valori costanti di V_{CE} . Queste caratteristiche tendono a confluire in un'unica curva, come è rappresentato in fig.6, dove per I_B sono riportati valori puramente indicativi. Trattandosi del legame fra la corrente e la tensione di una giunzione (J_E) polarizzata direttamente, la curva è sostanzialmente simile a quella di un diodo, con una tensione di soglia $V = 0,5 V$ e una tensione di lavoro V_{BE} compresa fra 0,6 e 0,8 V, a seconda del valore di I_B . In linea di massima si può assumere per V_{BE} il valore di 0,7V.

A differenza dei comuni diodi, si deve assolutamente evitare di polarizzare la giunzione J_E con una tensione inversa troppo elevata infatti la sua tensione di rottura V_{EB0} è intorno ai 7 V.

3.2 Caratteristiche di uscita

Rappresentano l'andamento della corrente e uscita I_C al variare di V_{CE} per valori costanti di I_B fig.7. Se il guadagno $h_{FE} = I_C/I_B$ si mantenesse perfettamente costante, le curve dovrebbero presentare andamento orizzontali ed equidistanti per uguali variazioni di I_B . In realtà le curve tendono ad addensarsi nella parte alta e in quella bassa del diagramma, indice del fatto che h_{FE} tende a diminuire sia per correnti alte che per correnti basse. Per valori e I_C dell'ordine di I_{CB0} , h_{FE} assume addirittura valori prossimi ad 1. Le curve inoltre, presentando una sia pur contenuta pendenza, indicano che h_{FE} aumenta con V_{CE} per I_B costante. Questo comportamento, noto come effetto Early, può essere spiegato nel seguente modo: l'aumento di V_{CE} e quindi della polarizzazione inversa della giunzione J_c , provoca un'espansione della zona di transizione all'interno della base poco drogata ne consegue la riduzione della larghezza della zona di base in cui avvengono le ricombinazioni e perciò un aumento di α , di β e quindi di h_{FE} .

ESEMPIO 5.2

Sapendo che la corrente di ingresso di un BJT è $I_B = 100 \mu\text{A}$, si legga dalle caratteristiche di fig.6 il valore della tensione V_{BE} e dalle caratteristiche di fig.7 il valore di I_C per $V_{CE}=8\text{V}$; si determini poi il valore di h_{FE} .

SOLUZIONE

Dal diagramma di fig.6 si legge in corrispondenza di $I_B= 100\mu\text{A}$ un valore $V_{BE}=0,7 \text{ V}$. In fig.7 si può disegnare la caratteristica per $I_B = 100\mu\text{A}$ linea tratteggiata. In corrispondenza di $V_{CE}=8\text{V}$ si legge $I_C=10\text{mA}$. Dai valori di corrente letti si ricava infine $h_{FE}=I_C/I_B=10/0,1=100$.

4 Zone di funzionamento del BJT

Esaminando le caratteristiche di uscita del BJT, riproposte in fig.8a, è possibile distinguere tre zone di funzionamento:

- una zona lineare, che occupa la maggior parte del piano delle caratteristiche
- una zona di saturazione, caratterizzata da bassi valori di V_{CE} , il cui le varie curve per I_B costante tendono a confondersi in un'unica linea molto prossimi all'asse delle ordinate;
- una zona di interdizione, in cui sia I_B che I_C assumono valori trascurabili.

Agendo sulla corrente di ingresso I_B è possibile portare il BJT a lavoro zona desiderata.

Si consideri lo schema generale di fig.8b, in cui la corrente I_B può essere variata tramite la resistenza R_B . La corrente e la tensione di uscita sono legate dall'equazione alla maglia di uscita

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0 \quad \text{da cui} \quad I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad [5.6]$$

Questa relazione è rappresentata graficamente sul piano delle caratteristiche da una retta fig.8a le cui intersezioni con gli assi sono rispettivamente

$$\begin{aligned} I_C = 0 & \quad V_{CE} = V_{CC} \\ V_{CE} = 0 & \quad I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \end{aligned} \quad [5.7]$$

Questa retta, la cui pendenza è data da $-1/R_C$, è chiamata retta di carico statica. I valori di I_C e V_{CE} del BJT per una data I_B saranno dati dal punto di intersezione Q fra questa e la curva relativa al valore di I_B . Tale punto prende il nome di punto di lavoro a riposo ed è caratterizzato da ben precisi valori (fig.8a).

4.1 Zona attiva

Quando si vuole far funzionare il BJT come amplificatore di segnale, occorre portare il punto di lavoro in zona attiva; in essa variazioni sinusoidali della corrente di ingresso I_B producono variazioni sostanzialmente sinusoidali delle grandezze di uscita I_C e V_{CE} .

In questa zona il BJT funziona esattamente come è stato già spiegato, la giunzione base-emettitore J_E risulta polarizzata direttamente con una tensione tipica $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ mentre la giunzione base-collettore J_C è polarizzata inversamente. Inoltre il legame fra I_B e I_C è quello fondamentale del BJT $I_C = h_{FE} I_B$ (tab.1).

Tab. 1 Il BJT nelle tre zone di funzionamento.

Zona di funzionamento	Polarizzazione di J_E	Polarizzazione di J_C	Legame fra I_C e I_B	Valori tipici di V_{BE}	Valori tipici di V_{CE}
attiva o lineare	diretta	inversa	$I_C = h_{FE} I_B$	$V_{BE} = 0,7 \text{ V}$	—
saturazione	diretta	diretta	$I_C < h_{FE} I_B$	$V_{BE(sat)} = 0,8 \text{ V}$	$V_{CE(sat)} = 0,2 \text{ V}$
interdizione	inversa	inversa	$I_B = 0$ $I_C = 0$	$V_{BE} \leq 0$	—

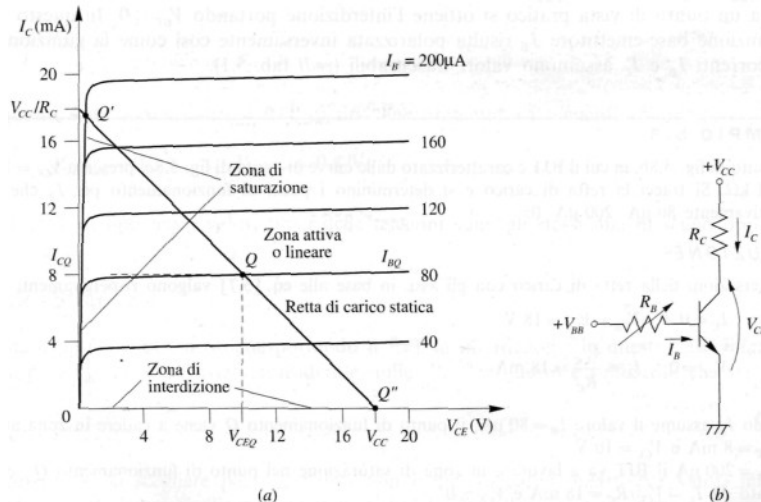


Fig.8 Zone di funzionamento del BJT, retta di carico statica e punto di funzionamento a riposo.

4.2 Zona di saturazione

In fig.8a si vede che aumentando I_B , il punto di funzionamento Q si sposta verso l'alto, con valori di I_C sempre più elevati e valori di V_{CE} sempre più bassi. Ad un certo punto però, allorché si arriva nella zona di saturazione, si nota che, per quanto I_B aumenti, I_C cessa di crescere ed il suo valore, non più controllato da I_B , risulta limitato dalla sola R_C . In questa zona non è più valida l'equazione fondamentale del transistor, invece $I_C < h_{FE}I_B$. La V_{CE} è di qualche decimo di V (0,2 V); la V_{BE} , essendo più elevata la corrente I_B , è un po' più alta di prima (0,8 V) e le giunzioni J_E e J_C risultano polarizzate entrambe direttamente, come è indicato in tab.1.

4.3 Zona di interdizione

Diminuendo invece il valore di I_B , il punto di funzionamento Q si sposta verso valori di I_C sempre più bassi finché non giunge nella zona di interdizione. Un BJT è interdetto quando $I_E = 0$; pertanto in base alla eq. [1],

$$I_C = I_{CBO} \quad \text{e} \quad I_B = -I_C = -I_{CBO}$$

Da un punto di vista pratico si ottiene l'interdizione portando $V_{BE} \leq 0$. In questo caso la giunzione base-emettitore J_E risulta polarizzata inversamente così come la giunzione J_C e le correnti I_B e I_C assumono valori trascurabili (tab.1).

ESEMPIO 5.3

Il circuito di fig.8 in cui il BJT è caratterizzato dalle curve di uscita di, presenta $V_{CC} = 18$ V. $R_C = 1k\Omega$. Si tracci la retta di carico e si determinino i punti di funzionamento per I_B che vale rispettivamente $80\mu A$, $200\mu A$, 0.

SOLUZIONE

Le intersezioni della retta di carico con gli assi, in base alle eq. [7] valgono rispettivamente

$$I_C = 0 \quad V_{CE} = V_{CC} = 18 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 0 \quad I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = 18 \text{ mA}$$

Quando I_B assume il valore $80\mu A$, il punto di funzionamento Q viene a cadere in zona attiva con $I_C = 8$ mA e $V_{CE} = 10$ V.

Per $I_B = 200\mu A$ il BJT va a lavorare in zona di saturazione nel punto di funzionamento Q' , caratterizzato da $I_C = V_{CC}/R_C = 18$ mA e $V_{CE} \sim 0$.

Infine per $I_B = 0$ il punto di funzionamento Q'' cade in zona di interdizione, con $I_C = 0$ e $V_{CE} = V_{CC}$.