

Diodo come interruttore

La **figura 3a** mostra il livello di approssimazione più grossolano, in essa il tratto di curva esponenziale che descrive il comportamento in *polarizzazione diretta* ($V_{AK} > 0$) viene sostituito da un pezzo di retta coincidente con l'asse verticale ($V_{AK} = 0$). Questo vuol dire che, quando è polarizzato direttamente, il diodo si comporta come un corto circuito (*interruttore chiuso*) e quindi fa passare qualunque valore di corrente senza provocare alcuna caduta di tensione. Per tensioni negative (*polarizzazione inversa*) la caratteristica diventa un pezzo di retta coincidente con l'asse orizzontale che rappresenta il comportamento di un circuito aperto ($I = 0$); per cui il diodo si comporta come un *interruttore aperto*.

Diodo con tensione costante

Nella **figura 3b** l'approssimazione è meno grossolana e la polarizzazione diretta è descritta mediante una retta verticale corrispondente a una tensione costante V_γ . Questa retta rappresenta il comportamento di un generatore ideale di tensione, per cui si ipotizza che il diodo produca una caduta di tensione costante. Solitamente il valore di tale tensione è $V_\gamma = 0,6$ V. Questa approssimazione tiene conto del fatto che, per valori di tensione inferiori a V_γ , la corrente aumenta molto poco mantenendo valori molto piccoli e si comporta come un circuito aperto. Per $V_{AK} > V_\gamma$ la corrente assume valori molto alti e quindi per qualunque valore di corrente il diodo produce sempre la stessa caduta di tensione.

Diodo con tensione variabile

Considerando il comportamento in polarizzazione diretta come descritto in **figura 3b** si nota come non si tiene conto che con l'aumentare della corrente aumenta la caduta di tensione ai capi del diodo. Questa imprecisione può essere ridotta ipotizzando che con tensioni $V_{AK} > V_\gamma$ la caduta di tensione aumenti in modo proporzionale alla corrente; come rappresentato in **figura 3c** in cui la caratteristica reale viene sostituita con una retta inclinata e non verticale. Tale comportamento può essere rappresentato mediante un generatore di tensione con una resistenza in serie. Questa ultima approssimazione del diodo pur rappresentando il comportamento più vicino alla realtà viene usata meno delle altre due perché porta a una maggiore complicazione dei calcoli.

2 Diodo Zener e diodo a valanga



I **diodi Zener** e i **diodi a valanga** hanno una giunzione realizzata in modo tale da poter lavorare bene in condizioni di breakdown.

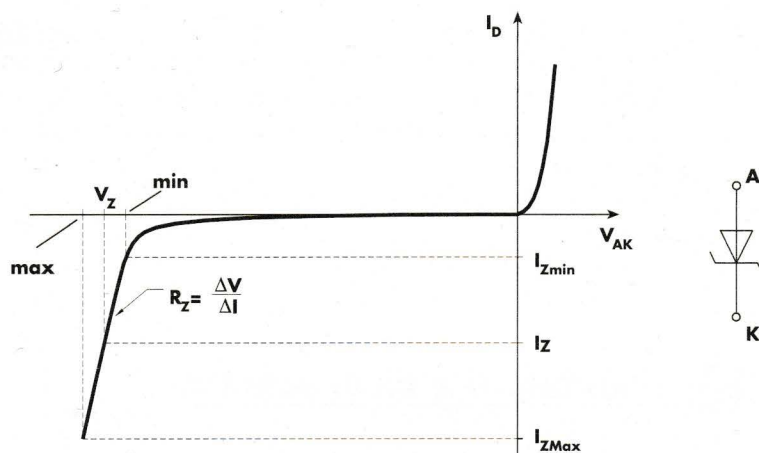
Applicazioni

I diodi Zener vengono comunemente utilizzati come *stabilizzatori di tensione*; in essi si sfrutta il fatto che, in zona di breakdown, la tensione ai loro capi è quasi costante e indipendente dalla corrente. Un diodo Zener, quindi, si comporta come un generatore quasi ideale di tensione.

Nella **figura 4** è riportata graficamente la caratteristica I - V di un diodo Zener. In essa si può vedere come, per valori di tensione inversa uguali al valore V_Z (tensione di Zener), la caratteristica diventa una retta quasi verticale, cioè a tensione costante; tipica del generatore di tensione ideale.

La **tensione di Zener** rappresenta il principale parametro di un diodo Zener; essa assume valori che vanno da pochi volt a qualche decina di volt per i più comuni Zener, ma può raggiungere anche i 200 V. Per ottenere tensioni di Zener basse si effettuano forti drogaggi, almeno da una parte della giunzione. In questo modo la zona di svuotamento è più stretta e quindi si possono ottenere sulla giunzione valori di campo elettrico abbastanza elevati per poter innescare il breakdown.

Figura 4
Caratteristica
I-V di un diodo
Zener



La tensione di Zener è influenzata dalla temperatura secondo un coefficiente che, per alcuni Zener è positivo mentre per altri è negativo. Nei diodi Zener con tensione di Zener inferiore a 5 V il breakdown è predominato dall'effetto Zener, ma con l'aumentare della tensione di Zener aumenta il contributo della moltiplicazione a valanga. Per tensioni intorno ai 5 V i due effetti sono presenti in uguale misura, mentre per tensioni superiori tende a predominare sempre di più la valanga. Per questa ragione i diodi Zener con tensione superiore a 8 V vengono chiamati *diodi a valanga*.

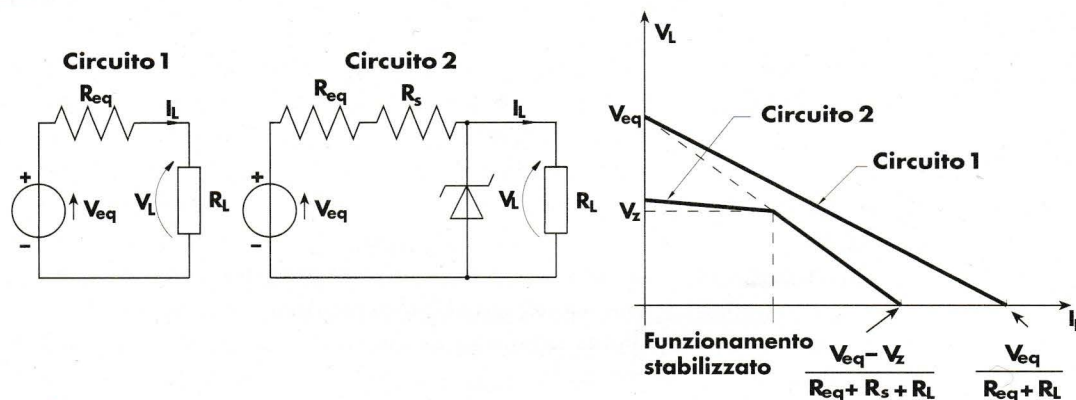
**Influenza della
temperatura**

La temperatura influisce in maniera diversa sui due meccanismi; in particolare facilita l'effetto Zener e riduce la valanga.

Un aumento di temperatura equivale a una maggiore agitazione termica; in tali condizioni il campo elettrico necessario per rompere i legami covalenti risulta minore e quindi la tensione di Zener diminuisce. I diodi con tensione di Zener inferiore a 5 V sono caratterizzati da una predominanza dell'effetto Zener, ed è per questa ragione che i diodi Zener con tensioni di Zener inferiori a 5 V hanno un coefficiente di temperatura negativo (se aumenta la temperatura diminuisce la tensione di Zener e viceversa). Al contrario, l'aumento dell'agitazione termica conseguente a un aumento di temperatura rende più frequenti le collisioni dei portatori (elettroni liberi o lacune). In questo modo il percorso dei portatori si accorcia ed essi non riescono, fra un urto e il successivo, ad acquistare energia sufficiente per rompere un legame. Occorre, perciò, un campo elettrico maggiore che, imponendo una maggiore accelerazione, consente di raggiungere la stessa velocità in minore spazio. Per innescare la moltiplicazione a valanga, in caso di aumento di temperatura, occorre una tensione maggiore ed è per questa ragione che i diodi Zener con tensioni di Zener superiori a 5 V hanno un coefficiente di temperatura positivo.

Figura 5

Confronto fra circuito stabilizzato e circuito non stabilizzato



I diodi Zener con tensioni comprese fra 5 V e 6 V sono i più stabili in temperatura. Se occorrono tensioni di Zener più elevate, ma con coefficiente di temperatura basso, è preferibile disporre in serie più diodi da 5 V, anche se il costo è più elevato.

Nella figura 5 è riportato il più semplice schema di stabilizzazione a Zener. In essa sono riportate: la caratteristica del generatore non stabilizzato e quella del generatore con la stabilizzazione. Si può vedere come quest'ultima, meno inclinata, è più vicina a quella del generatore ideale di tensione (orizzontale).

3 Diodi tunnel e diodi Schottky

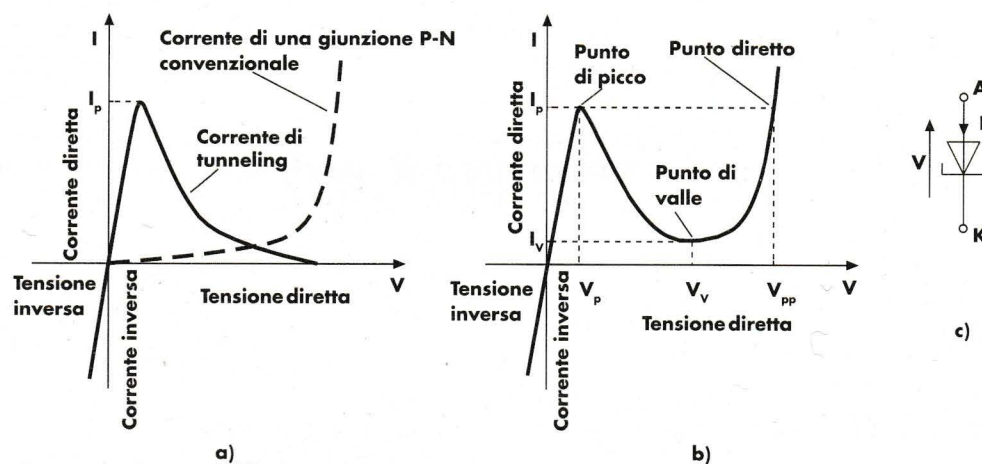
Il **diodo tunnel** sfrutta l'effetto tunnel, fenomeno che si verifica sulla giunzione PN quando questa ha una zona di svuotamento estremamente piccola (ottenuta con altissimi livelli di drogaggio). Nel diodo rettificatore la corrente diretta incomincia ad assumere valori consistenti solo per tensioni superiori a 0,6 V.



L'effetto tunnel consiste nel fatto che, quando lo spessore della barriera è molto sottile, i portatori riescono a superarla perforandola.

Questo significa che gli elettroni attraversano la giunzione anche se la loro energia non è sufficiente a superare la barriera di potenziale. Il fenomeno è particolarmente evidente per polarizzazioni inverse, mentre per polarizzazioni dirette risulta evidente solo per valori di tensione inferiori a qualche millivolt ($40 \div 110$ mV). Il fenomeno trova giustificazione nella meccanica quantistica.

Figura 6
Diodo tunnel:
caratteristica
I-V (a) e
(b); simbolo
elettrico (c)



Nella figura 6a vengono messe a confronto la caratteristica di un diodo raddrizzatore e quella del diodo tunnel. Come si può vedere, nel diodo tunnel la corrente assume valori rilevanti anche per piccole tensioni, sia per polarizzazione diretta che inversa. Nella figura è messo in particolare rilievo il comportamento per polarizzazione diretta in quanto rappresenta la condizione tipica di funzionamento di un diodo tunnel. Nella figura 6b è riportata la tipica caratteristica V-I del diodo tunnel. Come si può vedere, per piccoli valori di tensione diretta, la corrente aumenta fino alla I_p (punto di picco), poi vi è un tratto a pendenza negativa fino al punto di valle quando la corrente assume il valore minimo I_v . Poi la caratteristica diventa simile a quella del diodo rettificatore. La tensione di valle per diodi al silicio è di 0,6 V.

Proprietà e applicazioni

Le principali proprietà dei diodi tunnel sono: *alta velocità di commutazione*, *resistenza differenziale negativa* nel funzionamento fra il punto di picco e quello di valle. Sfruttando queste proprietà, il diodo tunnel trova applicazione come *elemento di commutazione molto veloce* (per correnti fino a 50 mA), come *oscillatore* e come *amplificatore* (sfruttando la resistenza negativa).



Il **diodo Schottky** viene realizzato mediante un *contatto metallo-semiconduttore* di tipo rettificante.

Applicazioni del diodo Schottky

In virtù della loro velocità di commutazione i diodi Schottky trovano frequente applicazione nei circuiti a microonde fino a 100 GHz e nei circuiti logici quando sono richieste alte velocità di commutazione.

I diodi Schottky hanno tensioni di soglia, in conduzione diretta, di circa 0,3 V contro gli 0,7 V dei diodi rettificatori al silicio, pertanto il loro comportamento è più vicino a quello del diodo ideale. Per contro, essi hanno tensioni di breakdown piuttosto basse, inferiori a 40 V.

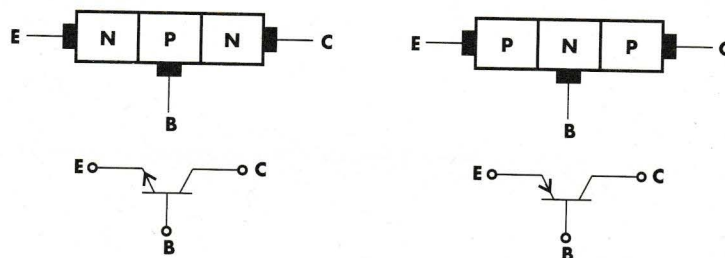
4 Transistor bipolari a giunzione BJT



Il **transistor bipolare a giunzione BJT** (*Bipolar Junction Transistor*) è un dispositivo a semiconduttore costituito da due giunzioni PN.

Vi sono due tipi di BJT, denominati rispettivamente *tipo N-P-N* e *tipo P-N-P*. Nella **figura 7** sono riportati i simboli elettrici dei due tipi assieme alla rispettiva geometria costruttiva.

Figura 7
Geometria e simboli elettrici dei BJT NPN e PNP



Applicazione del BJT

Il BJT è un dispositivo tripolare, in quanto possiede tre terminali per mezzo dei quali può essere collegato a un circuito. Essi sono denominati rispettivamente: **emettitore (E)**, **base (B)**, **collettore (C)**. Le applicazioni del BJT prevedono due suoi possibili usi: come **interruttore** e come **amplificatore**.

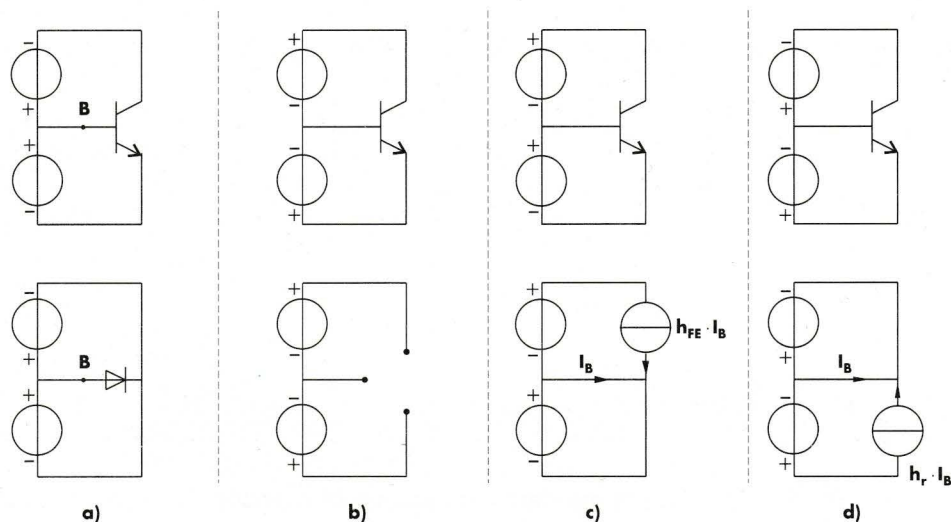
Quando un BJT è inserito all'interno di un circuito, a seconda di come sono polarizzate le sue giunzioni, si possono verificare quattro possibili condizioni di funzionamento, come indicato nella **figura 8**.

Polarizzazioni

Nella **figura 8a** si hanno entrambe le giunzioni polarizzate direttamente; in tal caso il transistor funziona in **saturazione** e il suo comportamento è assimilabile a un corto circuito. Nella **figura 8b** entrambe le giunzioni sono polarizzate inversamente, il BJT è **interdetto** e si comporta come un circuito aperto. Nella **figura 8c** la giunzione

base collettore è polarizzata inversamente, mentre la giunzione base emettitore lo è direttamente; in tali condizioni il BJT si comporta come amplificatore e il collettore si comporta come generatore di corrente comandato dalla corrente di base. In questo caso si dice che il BJT lavora in **zona attiva diretta**. Quando le condizioni di polarizzazione sono quelle riportate nella **figura 8d**, si dice che il dispositivo lavora in **zona attiva inversa**; in questo caso, però, il generatore di corrente sull'emettitore ha un valore molto basso quindi le condizioni risultano sconvenienti; per questo motivo tale tipo di polarizzazione non viene mai utilizzata.

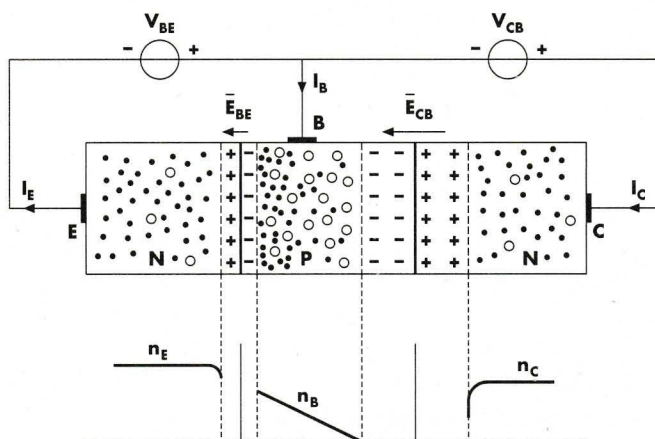
Figura 8
Condizioni di polarizzazione di un BJT: saturazione (a); interdizione (b); zona lineare diretta (c); zona lineare inversa (d)



Funzionamento del BJT come amplificatore

Per capire il funzionamento del BJT in **zona attiva diretta**, cioè quando funziona come amplificatore, esaminiamo il comportamento dei portatori di carica di un transistor NPN come descritto in **figura 9**.

Figura 9
Correnti in un BJT funzionante come amplificatore



La zona di emettitore, drogata N, contiene una gran quantità di elettroni liberi e poche lacune. In essa sono presenti anche molti ioni positivi non indicati nella figura; situazione analoga si presenta nella zona di collettore, anch'essa drogata N. Invece nella zona centrale, che rappresenta la base ed è drogata P, gli elettroni sono in piccola quantità

rispetto alle lacune. La concentrazione degli elettroni nella base non è uniforme, infatti in prossimità della giunzione emettitore-base, polarizzata direttamente, vi sono molti elettroni arrivati dall'emettitore; mentre vicino alla giunzione base-collettore che è polarizzata inversamente la concentrazione di elettroni è molto bassa. Va inoltre osservato che la zona di svuotamento della giunzione emettitore-base è piuttosto stretta e al suo interno c'è un campo elettrico di valore limitato; viceversa la zona di svuotamento della giunzione base-collettore è molto più larga con un campo elettrico di valore elevato. Il fatto che nella zona di base la concentrazione di elettroni sia molto elevata a sinistra e bassa a destra, crea una corrente di diffusione legata proprio al gradiente di concentrazione. Pertanto una gran quantità di elettroni parte dal lato sinistro e diffonde verso destra fino a raggiungere la zona di svuotamento della giunzione base-collettore; qui essi trovano un forte campo elettrico che li spinge fino al collettore. Poiché in questo processo viene coinvolta una gran quantità di portatori di carica ne consegue una corrente elettrica di valore elevato. La zona di *emettitore* emette i portatori che producono la corrente, mentre la zona di *collettore* li raccoglie.

Riprendiamo l'esame della zona di base: in essa sono presenti molte lacune che tendono a catturare gli elettroni liberi che arrivano dall'emettitore. Gli elettroni hanno un tempo di vita medio che li mantiene liberi prima di ricombinarsi, per cui la maggior parte di essi riesce ad attraversare la stretta zona di base e raggiungere il lato opposto dove trovano un forte campo elettrico che li spinge fino al collettore.

Per favorire il passaggio degli elettroni verso la zona di base, questa ha una larghezza molto piccola, leggermente inferiore rispetto alla lunghezza di diffusione. Sulla superficie esterna del collettore vi è un collegamento elettrico attraverso il quale i due generatori esterni prendono gli elettroni che arrivano nel collettore e li portano all'emettitore consentendo un flusso continuo di cariche.

Il verso delle correnti di collettore I_C e di emettitore I_E è contrario al verso in cui si muovono gli elettroni perché le due correnti sono prodotte da cariche negative. Attraverso il terminale esterno di base fluisce una piccola corrente I_B costituita da un piccolo numero di elettroni che esce dalla base per ricreare le poche lacune che si sono ricombinate con gli elettroni. Anche la corrente I_B ha verso opposto al verso in cui si muovono gli elettroni.

Equazione fondamentale del BJT

Quanto è stato detto sulle tre correnti che interessano i terminali del BJT può essere riassunto analiticamente mediante la formula seguente

$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CBO} \quad 2$$

in cui I_{CBO} è la corrente inversa di saturazione della giunzione base-collettore e α è la frazione di portatori che, partendo dall'emettitore, raggiungono il collettore. Il suo valore è circa 0,99. Applicando l'equazione delle correnti al nodo formato dal BJT possiamo scrivere: $I_E = I_C + I_B$. Sostituendo si ottiene:

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CBO}$$

Sostituendo $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ si può scrivere:

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{CBO} \quad 3$$

che rappresenta l'equazione fondamentale del BJT.

**Equazione
fondamentale**

β rappresenta il guadagno di corrente statico e può assumere valori compresi fra 40 e 400. Il termine $(\beta + 1) \cdot I_{CB0}$ viene trascurato quando il valore di I_C è abbastanza elevato. Esso riveste, invece, particolare importanza quando si vuole analizzare l'influenza della temperatura sul funzionamento del BJT. Infatti il termine I_{CB0} è fortemente influenzato dalla temperatura e aumenta con l'aumentare di essa. Pertanto occorre tenerlo in considerazione quando il BJT viene utilizzato come amplificatore; risulta, invece, di scarsa importanza quando il BJT è utilizzato come interruttore. Spesso, al posto dell'equazione 3 viene utilizzata la seguente:

$$I_C = h_{FE} \cdot I_B \quad 4$$

in cui h_{FE} prende il nome di *guadagno di corrente statico* e sostituisce β nell'ipotesi di trascurare il termine $(\beta + 1) \cdot I_{CB0}$.

Nella figura 10 è riportato un tipico circuito di polarizzazione per un BJT di tipo NPN assieme alla famiglia di caratteristiche V - I del bipolo collettore-emettitore. Le condizioni di funzionamento in saturazione e in interdizione rappresentano due casi estremi del funzionamento in zona attiva diretta. Se analizziamo il tipico circuito di polarizzazione riportato nella figura 11 osserviamo che la corrente di collettore ha un limite massimo che non può essere superato e che si presenta quando il BJT è **in saturazione**. In tale situazione la tensione $V_{CE} = 0,2$ V e prende il nome di *tensione di saturazione*. Il massimo valore della corrente che può circolare nel circuito di collettore può essere ricavato mediante la seguente formula:

$$I_{CMax} = \frac{V_{CC} - 0,2}{R_C} \quad 5$$

Figura 10
Il BJT come
amplificatore:
circuito (a);
caratteristica
 $I_C - V_{CE}$ (b)

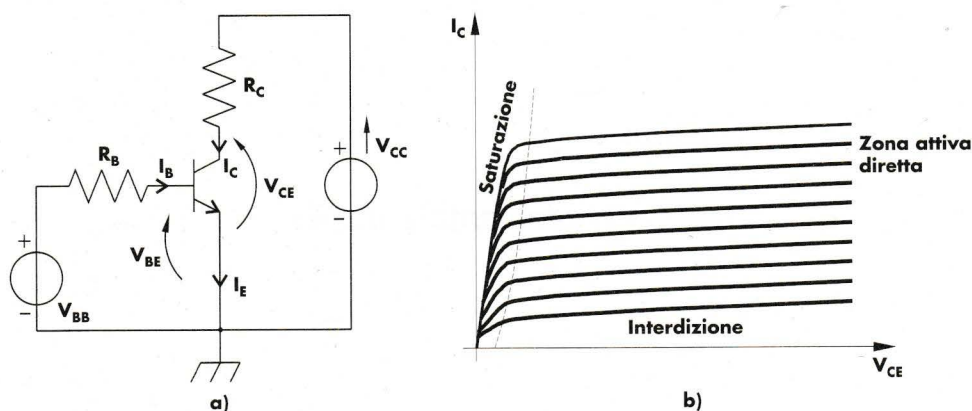
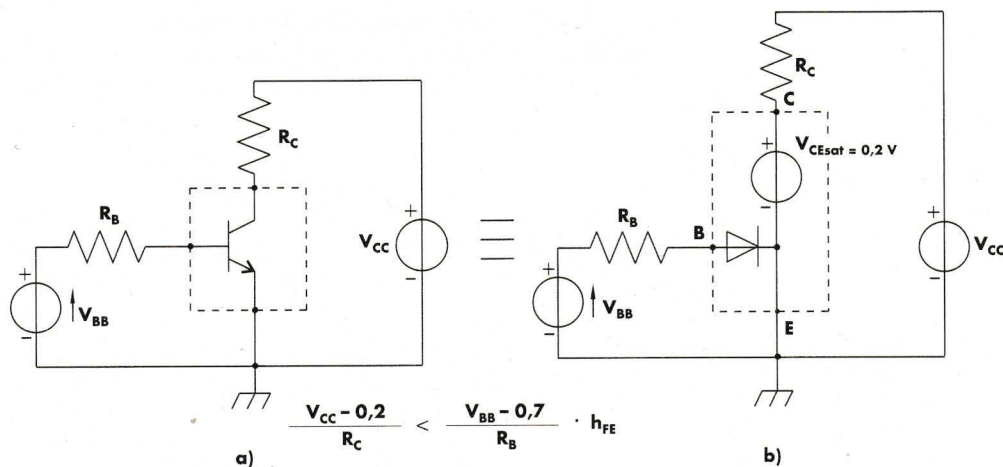


Figura 11
Schematizza-
zione del BJT
in saturazione



Notare che se $V_{CE} = 0,2 \text{ V}$ le due giunzioni del BJT sono polarizzate direttamente e quindi esso è in saturazione. Nella **figura 11b** è riportato il circuito equivalente del BJT quando questo è in saturazione.

Per verificare o per imporre le condizioni di saturazione del BJT si usa la seguente relazione:

$$I_B > \frac{I_{C\text{Max}}}{h_{FE\text{min}}}$$

6

Interdizione del BJT

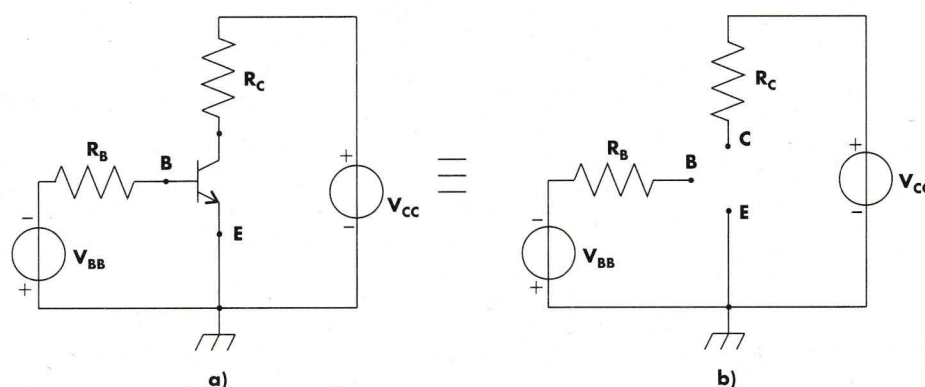
Per ottenere l'interdizione del transistor normalmente si interviene sul generatore che polarizza la giunzione B-E. Quando la tensione di questo generatore è nulla oppure negativa la giunzione B-E risulta non polarizzata o polarizzata inversamente; per cui la corrente di base è nulla, o trascurabile, e di conseguenza lo è anche la corrente di collettore.

Con riferimento alla **figura 12** la condizione per avere l'interdizione del BJT è:

$$V_{BE} \leq 0$$

7

Figura 12
Schematizzazione del BJT in interdizione



Nella **figura 12b** è riportato il circuito equivalente del BJT quando è in interdizione.

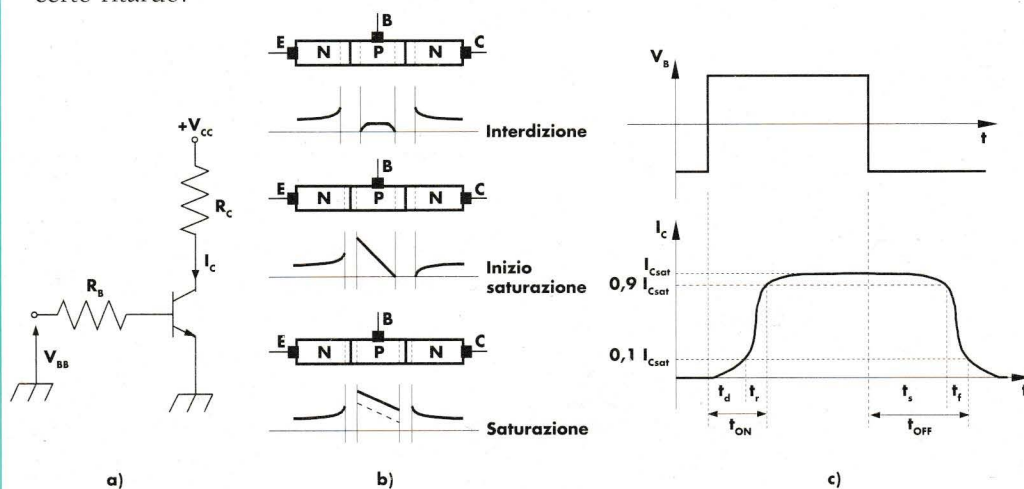
Il BJT come interruttore



Il BJT può funzionare da **interruttore**: quando è saturo equivale a un interruttore chiuso mentre se è interdetto equivale a un interruttore aperto.

L'interdizione e la saturazione vengono generalmente ottenute variando opportunamente la V_{BB} . Occorre osservare che, se V_{BB} cambia istantaneamente, il passaggio dall'interdizione alla saturazione e viceversa non è ugualmente rapido, ma avviene con un certo ritardo.

Figura 13
Comportamento del BJT nel transitorio dall'interdizione alla saturazione



Per capire cosa avviene nel transistor quando commuta, osserviamo la **figura 13b**: vi è riportato l'andamento dei portatori minoritari nella zona di base nelle tre possibili condizioni di funzionamento. Si nota che in condizioni di saturazione la base contiene una gran quantità di portatori minoritari mentre in interdizione ne contiene pochissimi. Pertanto quando V_{BB} passa dal valore negativo a quello positivo si ha una prima fase in cui i portatori provenienti dall'emettitore servono a riempire la base e quindi la corrente I_C ha un valore trascurabile; successivamente la I_C aumenta fino a raggiungere il suo valore $I_{C\text{sat}}$.

Tempi di commutazione

I tempi che caratterizzano il passaggio dall'interdizione alla saturazione sono:

- t_d = **tempo di ritardo** (*delay-time*); da quando commuta V_{BB} a quando $I_C = 10\%$ di $I_{C\text{sat}}$;
- t_r = **tempo di salita** (*rise-time*); da quando $I_C = 0,1 \cdot I_{C\text{sat}}$ a quando I_C raggiunge il valore $I_C = 0,9 \cdot I_{C\text{sat}}$;
- $t_{\text{ON}} = t_d + t_r$ = **tempo totale di accensione** (*turn-on time*).

Nella commutazione inversa, quando V_{BB} passa dal valore positivo a quello negativo, si susseguono due fasi: nella prima la base si svuota di portatori minoritari e nella seconda la I_C diminuisce fino al 10% di $I_{C\text{sat}}$.

I tempi caratteristici del passaggio dall'interdizione alla saturazione sono:

- t_s = **tempo di immagazzinamento** (*storage-time*); dalla commutazione di V_{BB} a quando $I_C = 0,9 \cdot I_{C\text{sat}}$;
- t_f = **tempo di caduta** (*fall-time*); impiegato da I_C a scendere dal valore $I_C = 0,9 \cdot I_{C\text{sat}}$ al valore $I_C = 0,1 \cdot I_{C\text{sat}}$;
- $t_{\text{OFF}} = t_s + t_f$ = **tempo totale di spegnimento** (*turn-off*).

Parametri di un BJT

I principali parametri di un BJT sono:

- V_{CBO} = massima tensione fra collettore e base tenendo aperto l'emettitore;
- V_{CEO} = massima tensione fra collettore ed emettitore tenendo aperta la base;
- V_{BEO} = massima tensione fra base ed emettitore tenendo aperto il collettore;
- $I_{C\text{Max}}$ = massima corrente di collettore;
- $I_{B\text{Max}}$ = massima corrente di base;
- P_d = massima potenza dissipabile;
- T_j = massima temperatura raggiungibile dalla giunzione;
- R_{thJA} = resistenza termica fra giunzione e ambiente;
- $h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$ = guadagno di corrente statico;
- $h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ = guadagno di corrente dinamico nella configurazione a emettitore comune;
- f_T = frequenza di taglio del guadagno di corrente dinamico;
- tempi di commutazione (già descritti in precedenza).

Oltre ai precedenti parametri, il costruttore fornisce, in opportuni data sheets, anche grafici che riportano le variazioni di detti parametri.

I valori di $I_{B\text{Max}}$, $I_{C\text{Max}}$ e P_d sono limitati dalla necessità di impedire che le giunzioni raggiungano una temperatura troppo alta e tale da restare danneggiate.

La V_{CE} è limitata dalla necessità di impedire il breakdown; il quale può essere causato da due fenomeni concettualmente diversi: la *valanga* e il *punch-through*.

Breakdown per valanga

L'effetto **valanga** si verifica sulla giunzione polarizzata inversamente quando la tensione ai suoi capi raggiunge un valore tale da generare nella zona di carica spaziale un gran numero di portatori di carica. In questo modo la zona di carica spaziale assume un comportamento a bassa resistività. Normalmente, nel BJT la tensione V_{CE} polarizza direttamente la giunzione B-E e inversamente la giunzione C-B, pertanto il breakdown per valanga si verifica quando sulla giunzione C-B si innesca il meccanismo della valanga. In tale situazione la giunzione entra in forte conduzione e la corrente di collettore assume valori molto alti e tali da provocare il surriscaldamento del dispositivo. In tale condizione il BJT si trova con la giunzione B-E polarizzata direttamente e la giunzione C-B che si comporta come un corto circuito.

Punch-through

L'effetto **punch-through** si verifica quando la zona di svuotamento della giunzione B-C si allarga fino a toccare quella della giunzione B-E provocando un forte aumento della corrente di collettore.

5 BJT per piccoli segnali e BJT di potenza

I **BJT per piccoli segnali** sono destinati a essere utilizzati nei circuiti in cui il livello dei segnali va da poche decine di mV a poche decine di V. La corrente massima di collettore è generalmente inferiore a 100 mA e solo in pochissimi casi raggiunge i 200 mA. I principali requisiti richiesti sono:

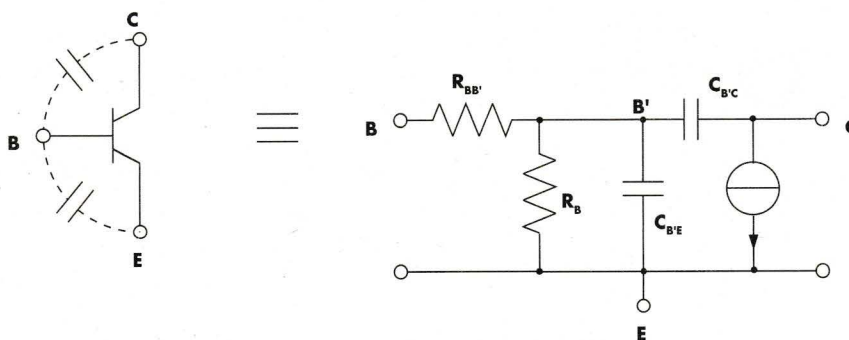
Requisiti

- elevato guadagno di corrente;
- elevata frequenza di taglio del guadagno di corrente;
- bassa figura di rumore.

Per ottenere un **elevato guadagno di corrente** lo spessore della zona di base deve essere molto sottile, a scapito della V_{CEMax} .

La **frequenza di taglio** del guadagno di corrente nasce dal fatto che a cavallo delle due giunzioni si verificano effetti capacitivi. Nella **figura 14** è riportato il circuito equivalente dinamico del BJT alle alte frequenze. Le capacità di giunzione hanno un valore che è tanto più elevato quanto maggiore è la loro area; pertanto, per avere piccole capacità, è necessario che le giunzioni abbiano piccola superficie. Nella **figura 15** è riportata la geometria di un tipico transistor per alte frequenze.

Figura 14
Comportamento del BJT alle alte frequenze



Nella **figura 16** sono riportati alcuni tipici contenitori di BJT per piccoli segnali. Analizzando il data sheet di un BJT per piccoli segnali si può notare come, oltre alle informazioni di carattere generale, tipiche dei BJT, viene dato ampio spazio a informazioni riguardanti la corretta elaborazione dei segnali. In particolare vengono fornite informazioni approfondite sui parametri del circuito equivalente dinamico a parametri h : (h_{ie} , h_{re} , h_{fe} , h_{oe}),

Dati tecnici

e sulla loro variazione al variare delle condizioni di polarizzazione o della temperatura. Nei data sheets di BJT per alte frequenze vengono fornite informazioni sulle capacità parassite delle giunzioni, e sui tempi di commutazione.

Figura 15

BJT per alte frequenze

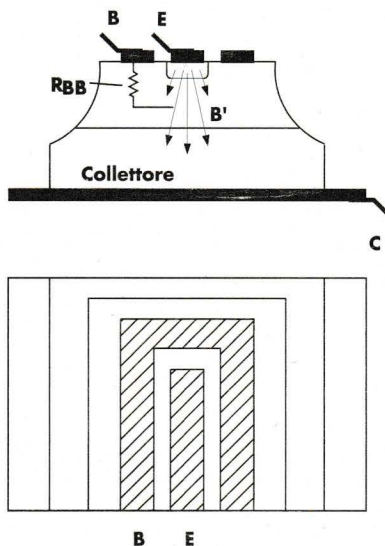
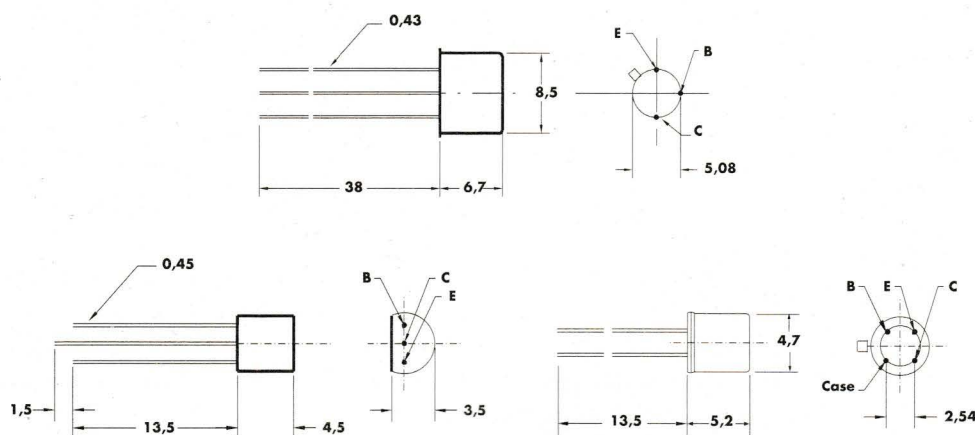


Figura 16

Contenitori per BJT



I **BJT di potenza** vengono realizzati in modo da poter sopportare correnti elevate (fino a qualche decina di ampere) e tensioni elevate (fino a qualche centinaio di volt).

Requisiti del BJT di potenza

I principali requisiti richiesti a un BJT di potenza sono:

- elevata potenza dissipabile;
- bassa resistenza termica;
- elevata tensione di breakdown;
- elevata corrente di collettore;
- elevato guadagno di corrente.

Per poter consentire una **elevata dissipazione di potenza**, i contenitori sono di dimensioni decisamente maggiori rispetto a quelli usati nei BJT per piccoli segnali. La **resistenza termica** viene ridotta mediante un apposito dissipatore di calore costituito da una aletta

metallica o da un involucro metallico; questo dissipatore può, a sua volta, essere fissato a un altro dissipatore per poter diminuire ulteriormente la resistenza termica.

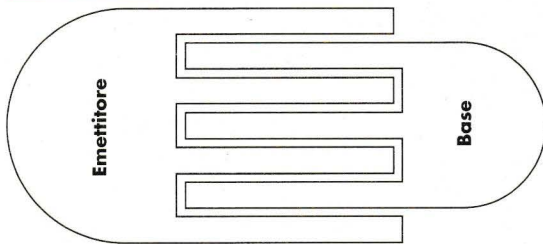
Per avere elevata **tensione di breakdown** e per evitare il punch-through si realizza la base con drogaggio più elevato rispetto a quello di collettore.

L'elevato valore della **corrente di collettore** richiede che le giunzioni abbiano grande area anche se questo comporta maggiori capacità di giunzione. Per realizzare la giunzione B-E con superficie elevata si utilizzano strutture interdigitate come quella riportata nella **figura 17**.

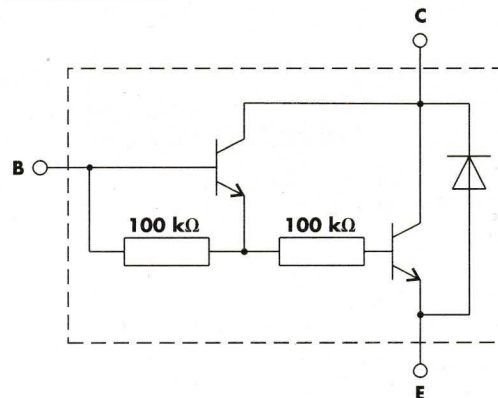
Per ottenere **elevati guadagni di corrente**, molto spesso si ricorre al collegamento di due BJT in connessione Darlington come riportato nella **figura 18**.

Figura 17

Strutture interdigitate

**Figura 18**

Connessione Darlington

**Dati tecnici**

Nei data sheets di BJT di potenza, oltre alle informazioni di carattere generale, viene dato ampio spazio a informazioni riguardanti le condizioni limite di funzionamento in termini di tensione massima applicabile, di corrente massima sopportabile e di potenza massima dissipabile.

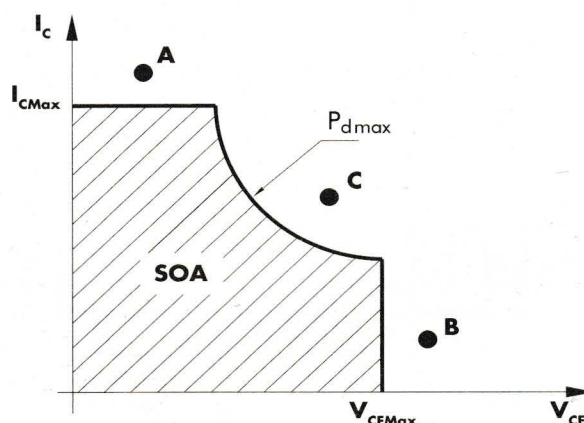
Safe Operating Area

Un dato di particolare interesse è l'**area di funzionamento sicuro** (SOA, *Safe Operating Area*).

Come si può vedere nella **figura 19**, la SOA è l'area delimitata dalle tre condizioni limite: I_{CMax} , V_{CEMax} , P_{dMax} . Se il punto di funzionamento del BJT è esterno a tale area, il componente viene danneggiato a causa del superamento di almeno una delle condizioni limite: punto A, perché $I_C > I_{CMax}$; punto B, perché $V_{CE} > V_{CEMax}$; punto C perché $P_d > P_{dMax}$.

Figura 19

Zona di funzionamento sicuro per un BJT (SOA)



Un altro dato di particolare interesse nei BJT di potenza è la **resistenza termica** (*Thermal Resistance*) fra giunzione e contenitore, indicata con R_{thJC} .

6 Transistor JFET

Il transistor a effetto di campo (*Junction-Field-Effect-Transistor*, JFET) è un transistor avente una geometria costruttiva come quella riportata nella **figura 20**, la quale viene riproposta in forma semplificata nella **figura 21**.

Figura 20 Geometria costruttiva del JFET

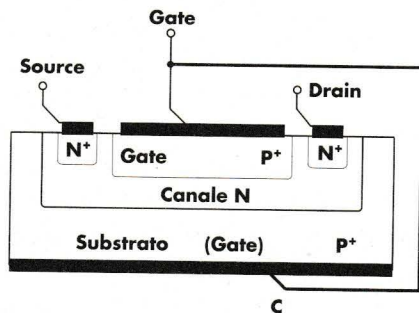


Figura 21 Schematizzazione del funzionamento del JFET

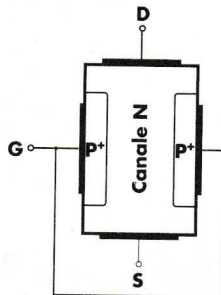


Figura 22 Simboli elettrici del JFET

JFET a canale P



JFET a canale N



Il JFET è un dispositivo a tre terminali denominati rispettivamente: **gate (G)**, **source (S)** e **drain (D)**.

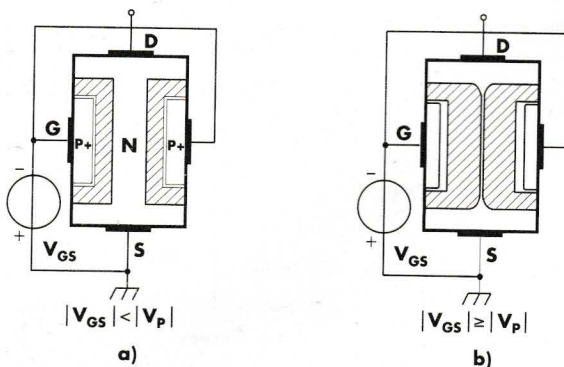
Geometria del JFET

Con riferimento alla **figura 20**, notiamo che il JFET è costituito da un pezzo di semiconduttore drogato di tipo N ai cui estremi sono collegati, mediante opportune metallizzazioni, i reofori di drain e di source. Sui lati vi sono due zone drogate fortemente di tipo P, collegate elettricamente fra di loro e che costituiscono il gate.

La parte di semiconduttore compresa fra le due zone di gate si chiama *canale*. A seconda del tipo di drogaggio del canale si possono avere due tipi di JFET: il tipo a **canale N** e il tipo a **canale P**. I rispettivi simboli elettrici sono riportati nella **figura 22**.

Se colleghiamo un generatore a basso valore di tensione fra i morsetti di drain e di source, abbiamo un passaggio di corrente attraverso il canale, il quale si comporta come una resistenza il cui valore dipende dal livello di drogaggio e dalle dimensioni del canale stesso.

Figura 23
Variazione del canale al variare di V_{GS} : restringimento (a); strozzamento (b)



Se, invece, colleghiamo fra gate e source un generatore avente una tensione V_{GS} tale da polarizzare inversamente le due giunzioni fra gate e canale, otteniamo un allargamento delle zone di svuotamento. Questo allargamento risulta più accentuato nella zona del canale in quanto meno drogata rispetto alle zone di gate. Il risultato che si ottiene è un

restringimento del canale e quindi un aumento della sua resistenza (**figura 23a**). In tali condizioni il canale si comporta come un resistore variabile controllato dalla

Pinch-off

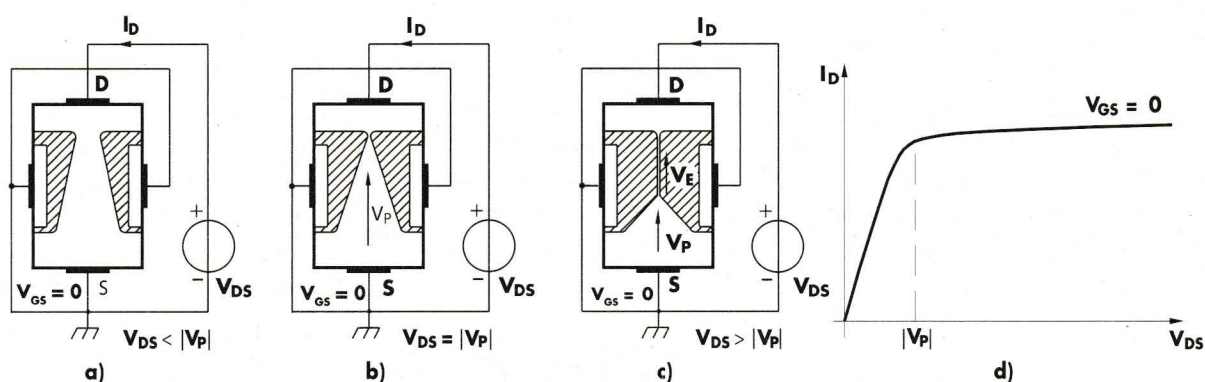
tensione di gate V_{GS} . Aumentando la tensione di polarizzazione inversa V_{GS} il canale si restringe sempre di più fino a scomparire.

Si definisce **tensione di pinch-off**, V_p , la tensione di polarizzazione inversa fra gate e canale per la quale si ha la scomparsa del canale causata dall'allargamento della zona di svuotamento.

La **figura 23b** mostra la situazione del canale strozzato per effetto di una $V_{GS} \geq V_p$.

Nella **figura 24** è descritto il comportamento del JFET a canale N quando $V_{GS} = 0$ e fra drain e source è applicata una tensione V_{DS} tale da polarizzare inversamente le giunzioni gate-canale. In questa situazione le due giunzioni si trovano polarizzate inversamente con un valore di tensione che varia gradualmente passando da zero, in prossimità del source, a un massimo pari alla tensione V_{DS} del generatore, in prossimità del drain. Di conseguenza, le zone di svuotamento sono più larghe in prossimità del drain, dove maggiore è il valore di tensione, e più strette in prossimità del source dove la tensione di polarizzazione è nulla ($V_{GS} = 0$). Pertanto il canale risulta più stretto in prossimità del drain, dove la zona di svuotamento è più ampia mentre vicino al source il canale è decisamente più largo. Se la V_{DS} aumenta fino a raggiungere il valore V_p di pinch-off, il canale si strozza completamente nella parte alta come evidenziato nella **figura 24b**. Aumentando ulteriormente la V_{DS} la strozzatura del canale prosegue verso il basso come evidenziato nella **figura 24c**.

Figura 24 Variazione del canale al variare di V_{DS} : comportamento ohmico (a); pinch-off (b); corrente costante (c)



**Funzionamento
del JFET con
 $V_{GS} = 0$**

Quando la tensione V_{DS} è inferiore alla tensione di pinch-off, il canale si comporta come un resistore la cui resistenza aumenta leggermente con l'aumentare della tensione; di conseguenza, il valore della corrente aumenta con andamento quasi proporzionale all'aumento di tensione. La non precisa proporzionalità è legata al fatto che la resistenza del canale non è fissa ma aumenta con l'aumentare della tensione.

Per valori di V_{DS} superiori a V_p la corrente rimane quasi costante in quanto resta costante la tensione fra il punto di strozzatura del canale e il source, la tensione mantiene il valore di V_p . Il leggero aumento della corrente è dovuto alla leggera diminuzione della resistenza del canale causata dal suo accorciamento. Come si vede nella **figura 24c**, fra il drain e il pezzo di canale residuo si è formata una zona di carica spaziale ai capi della quale si crea una caduta di tensione $V_E = V_{DS} - V_p$. Nella **figura 24d** è riportata la caratteristica tensione-corrente del bipolo drain-source quando $V_{GS} = 0$. Come si può notare, la corrente aumenta con l'aumentare della V_{DS} fino a quando questa non raggiunge il valore di V_p , situazione corrispondente alla **figura 24a**; per valori superiori

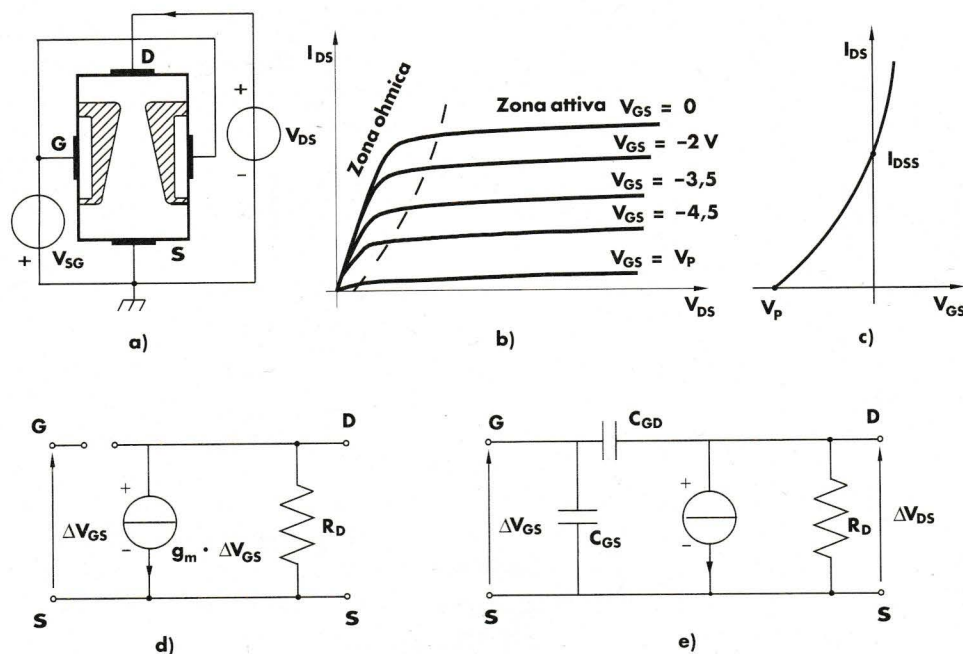
**Funzionamento
del JFET con
 $V_{GS} \neq 0$**

la corrente rimane costante in quanto il JFET si trova nella situazione rappresentata nella **figura 22c**. Il ginocchio della curva corrisponde alla situazione di $V_{DS} = V_p$.

Vediamo ora il comportamento del JFET in presenza di una tensione $V_{SG} < V_p$ che polarizza inversamente la giunzione gate-canale, e contemporaneamente una tensione V_{DS} crescente, applicata fra drain e source come riportato nella **figura 25a**. Quando V_{DS} è zero il canale risulta uniformemente ristretto per l'effetto di V_{GS} ma non completamente strozzato perché V_{GS} è minore di V_p , situazione simile a quella riportata nella **figura 23a**. Aumentando V_{DS} abbiamo un aumento della corrente I_{DS} e, contemporaneamente, un maggiore restringimento del canale nella parte superiore vicino al drain, come si può ben vedere nella **figura 25a**. In tale zona, infatti, la giunzione gate-canale risulta polarizzata inversamente con una tensione $V_{DG} = V_{SG} + V_{DS}$ che aumenta con l'aumentare di V_{DS} , contrariamente alla parte bassa ove la tensione V_{SG} rimane costante. Quando la tensione V_{DG} fra drain e gate raggiunge la tensione V_p di pinch-off si ottiene il completo strozzamento del canale nella parte alta. Se la tensione V_{DS} viene aumentata ulteriormente, tale aumento non produce più aumento della corrente, che invece rimane quasi costante. Infatti, analogamente a quanto descritto nella **figura 24c**, la tensione agli estremi del canale mantiene sempre il valore costante di V_p . Anche in questo caso la corrente subisce un leggerissimo aumento con l'aumentare di V_{DS} a causa dell'accorciamento del canale.

Nella **figura 25b** sono riportate alcune caratteristiche V - I del bipolo drain-source corrispondenti a diversi valori di V_{GS} negativi, tali cioè da polarizzare inversamente le giunzioni gate-canale.

Figura 25
Il JFET come
amplificatore:
schema
circuitale (a);
caratteristiche
di drain (b);
transcaratteristica (c);
circuiti
equivalenti
per basse
frequenze (d);
per alte
frequenze (e)



Per valori di V_{GS} positivi la caratteristica è poco diversa da quella corrispondente a $V_{GS} = 0$.

Occorre infatti notare che valori di V_{GS} positivi polarizzano direttamente la giunzione e quindi tale tensione non può essere superiore a 0,8 V per evitare un elevato passaggio di corrente. Con riferimento alla generica curva della **figura 25b** possiamo suddividere il funzionamento del JFET in due zone. La prima, in cui la corrente aumenta con l'aumentare di V_{DS} , viene denominata **zona ohmica** e il dispositivo si comporta come un resistore variabile comandato da V_{GS} . La seconda, denominata **zona attiva**, in cui

le caratteristiche sono orizzontali e il dispositivo si comporta come un generatore di corrente comandato dalla V_{GS} .

Il comportamento del JFET quando funziona in zona attiva viene definito dalla relazione:

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 \quad \mathbf{8}$$

Essa è rappresentata graficamente nella **figura 25c**.

Il termine I_{DSS} rappresenta la corrente di saturazione nel canale, cioè il valore di corrente che scorre quando $V_{GS} = 0$, quando cioè il suo strozzamento è provocato solo dalla V_{DS} .

Applicazioni del JFET

Il JFET trova applicazione frequente sia come *amplificatore* sia come *interruttore*.

Il funzionamento come **interruttore** si ottiene facendo assumere a V_{SG} valori superiori alla tensione V_p , e quindi tali da strozzare il canale impedendo il passaggio di corrente (*interruttore aperto*), oppure un valore nullo in modo da tenere il canale completamente aperto e consentire un facile passaggio di corrente (*interruttore chiuso*).

Il funzionamento come **amplificatore** si ha quando la V_{GS} assume valori compresi fra la tensione V_p di pinch-off e zero modulando la larghezza del canale e quindi la corrente I_{DS} . Il funzionamento come amplificatore è governato principalmente dalla relazione **8**. Possiamo facilmente riassumere che nel JFET la corrente di drain è comandata dalla tensione V_{SG} . Per questa ragione si dice che il JFET è un dispositivo *comandato in tensione* distinguendolo dal BJT, che è un dispositivo comandato in corrente, come si vede dalle relazioni **3** e **4**.

Circuito dinamico

Il comportamento dinamico del JFET è rappresentato dal circuito equivalente riportato nella **figura 25d** dal quale si può facilmente notare come l'amplificatore a JFET è caratterizzato da un elevatissimo valore della resistenza di ingresso. Per il comportamento in alta frequenza si deve tener conto della capacità di giunzione come indicato nella **figura 25e**.

Confronto tra JFET e BJT

Le principali caratteristiche di un JFET sono:

- *impedenza di ingresso elevata*; essa è rappresentata dalla resistenza di una giunzione polarizzata inversamente, mentre nel BJT tale impedenza è piuttosto bassa poiché si riferisce a una giunzione polarizzata direttamente;
- *alta frequenza di taglio* poiché la corrente di drain I_{DS} è una corrente di deriva di portatori maggioritari. Nel BJT la corrente di collettore è costituita da portatori che, partendo dall'emettitore, attraversano la base prima di arrivare al collettore. Nell'attraversare la base essi diventano minoritari e si muovono per diffusione, perciò sono più lenti;
- *basso rumore*, poiché esso è dovuto solo alla resistenza del canale mentre nel BJT esso nasce nel passaggio delle cariche attraverso due giunzioni;
- *tecnologia di realizzazione più semplice*.

Parametri del JFET

I principali parametri elettrici di un JFET sono:

- R_{DS} (ON) = resistenza del canale in condizioni di saturazione (canale aperto);
- V_{GS} (OFF) = tensione che provoca lo strozzamento del canale = V_p ;
- I_{DSMax} = massima corrente che può circolare nel canale;
- P_d = massima potenza dissipabile;
- $g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}}$ = transconduttanza.

7 Transistor MOSFET



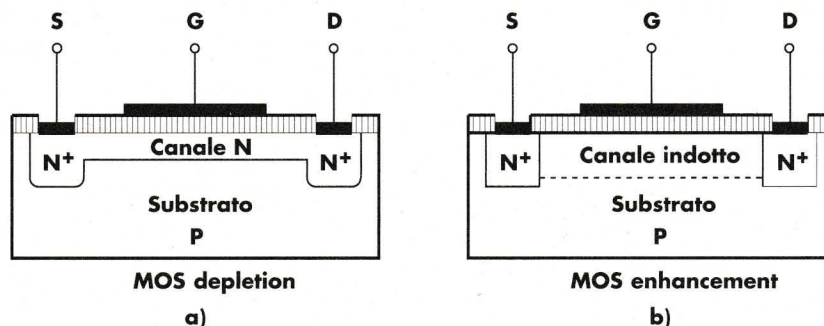
Il MOSFET è un transistor a effetto di campo in cui il gate è separato dal canale mediante uno strato di ossido di silicio che si comporta da ottimo isolante.

MOS sta a indicare la successione *Metallo, Ossido, Semiconduttore*.

A seconda che il canale sia drogato di tipo P o di tipo N si possono avere: MOSFET a canale N, detti anche NMOS, e MOSFET a canale P, detti anche PMOS.

Nella figura 26 è riportata la geometria di un NMOS.

Figura 26
Geometria di un MOSFET: depletion (a); enhancement (b)



In essa si nota un substrato di tipo P, nella parte superiore del quale vengono realizzate due zone di tipo N⁺ che costituiscono il *source* S e il *drain* D. Fra le due zone viene poi realizzato il *canale*.

Contrariamente al JFET il canale del MOSFET può essere realizzato in fase di costruzione del dispositivo, oppure può essere ottenuto successivamente mediante un opportuno circuito di polarizzazione.

A seconda di come viene formato il canale, i transistor MOSFET possono essere di due tipi:

- MOSFET depletion;
- MOSFET enhancement.

Si definiscono MOSFET in **depletion-mode** quelli in cui il canale viene realizzato alla costruzione del transistor; il loro funzionamento è simile a quello del JFET.

I MOSFET in **enhancement-mode** sono quelli in cui il canale viene ottenuto applicando un opportuno circuito di polarizzazione.

Nella figura 26b è riportata la tipica geometria di un MOSFET enhancement a canale N.

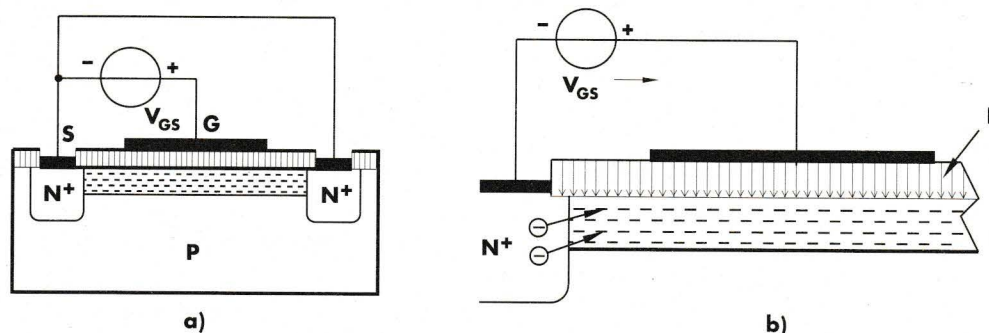
Funzionamento del MOSFET

Per descrivere il funzionamento del MOSFET enhancement supponiamo di applicare una tensione V_{GS} fra gate e source come indicato nella figura 27a. Questa tensione genera nello strato di isolante un campo elettrico E la cui intensità è proporzionale al valore di V_{GS} (figura 27b).

Il campo elettrico in esame produce una forza di attrazione sugli elettroni liberi presenti nel semiconduttore, i quali si accumulano nella zona sottostante lo strato di ossido. Di questi elettroni, una piccola quantità proviene dal substrato drogato di tipo P e una gran quantità proviene dalla zona di source drogata di tipo N⁺.

I primi elettroni che arrivano si ricombinano con le lacune presenti nel semiconduttore sotto lo strato di ossido, e questo fino a quando la tensione V_{GS} non raggiunge un valore tale da provocare il riempimento di tutte le buche che si trovano sotto lo strato di ossido. Questo valore di tensione prende il nome di *tensione di soglia* (threshold) V_T .

Figura 27
Formazione
del canale
nel MOSFET
enhancement



**Valori della
tensione
di soglia**

La tensione di soglia assume valori compresi fra 1 V e 5 V; il valore di questa tensione dipende da molti fattori, di cui elenchiamo i principali:

- tipo di cariche presenti nello strato di ossido e all'interfaccia fra ossido e silicio;
- tipo di isolante usato al posto dell'ossido di silicio;
- metallo utilizzato per la realizzazione del gate.

**Formazione
del canale
enhancement-
mode**

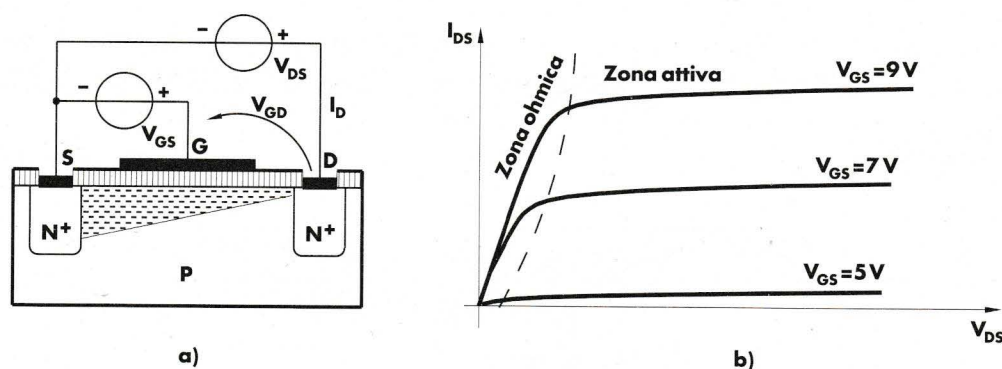
Per valori di V_{GS} superiori a V_T si forma uno strato di elettroni liberi che forma un canale di collegamento fra la zona di source e la zona di drain. Lo spessore del canale aumenta con l'aumentare della tensione V_{GS} e conseguentemente diminuisce il valore della sua resistenza.

Se contemporaneamente alla V_{GS} , necessaria a formare il canale, viene applicata una V_{DS} fra drain e source, si avrà nel canale un passaggio di corrente, il cui valore aumenta con l'aumentare della V_{DS} .

Occorre tuttavia osservare che l'applicazione della V_{DS} provoca una diminuzione della tensione che determina la formazione del canale nelle vicinanze del drain (figura 28a). Infatti la tensione fra gate e canale in prossimità del drain assume il valore $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$, che diminuisce con l'aumentare di V_{DS} . Quando la tensione V_{GD} diminuisce fino a raggiungere il valore di soglia V_T , il canale viene strozzato e la corrente rimane costante e indipendente dalla V_{DS} .

Nella figura 28b sono riportate alcune caratteristiche V - I corrispondenti a diversi valori di V_{GS} superiori alla tensione di soglia V_T che è ipotizzata pari a 5 V.

Figura 28
Il MOSFET
depletion
come
amplificatore:
schematizza-
zione (a);
caratteristiche
di drain (b)



**Zone di
funzionamento**

I MOSFET di tipo **enhancement**, come tutti gli altri transistor, possono lavorare in saturazione, in interdizione e in zona attiva e quindi trovano applicazione sia come **interuttori** sia come **amplificatori**. Il funzionamento in zona attiva è caratterizzato

da una corrente I_{DS} costante il cui valore dipende dalla V_{GS} , come è evidenziato dalla seguente relazione:

$$I_{DS} = \frac{I_{DSS}}{V_T^2} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

9

Il **MOSFET depletion**, contrariamente al MOSFET enhancement, può funzionare sia in depletion-mode (linee ② di figura 29) sia in enhancement-mode (linee ③ di figura 29). Nel primo caso la tensione V_{GS} sarà tale da restringere il canale mentre nel modo enhancement sarà tale da allargarlo.

Nella figura 29b sono riportate le caratteristiche di drain per un MOSFET enhancement a canale N corrispondenti a diversi valori di V_{GS} .

Figura 29
Comportamento del MOSFET depletion

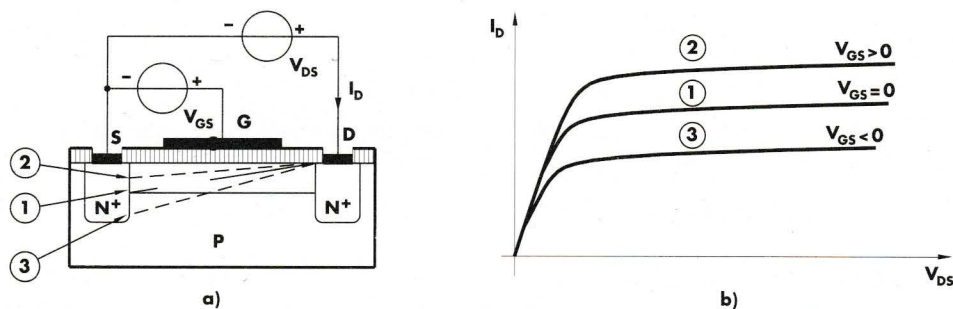
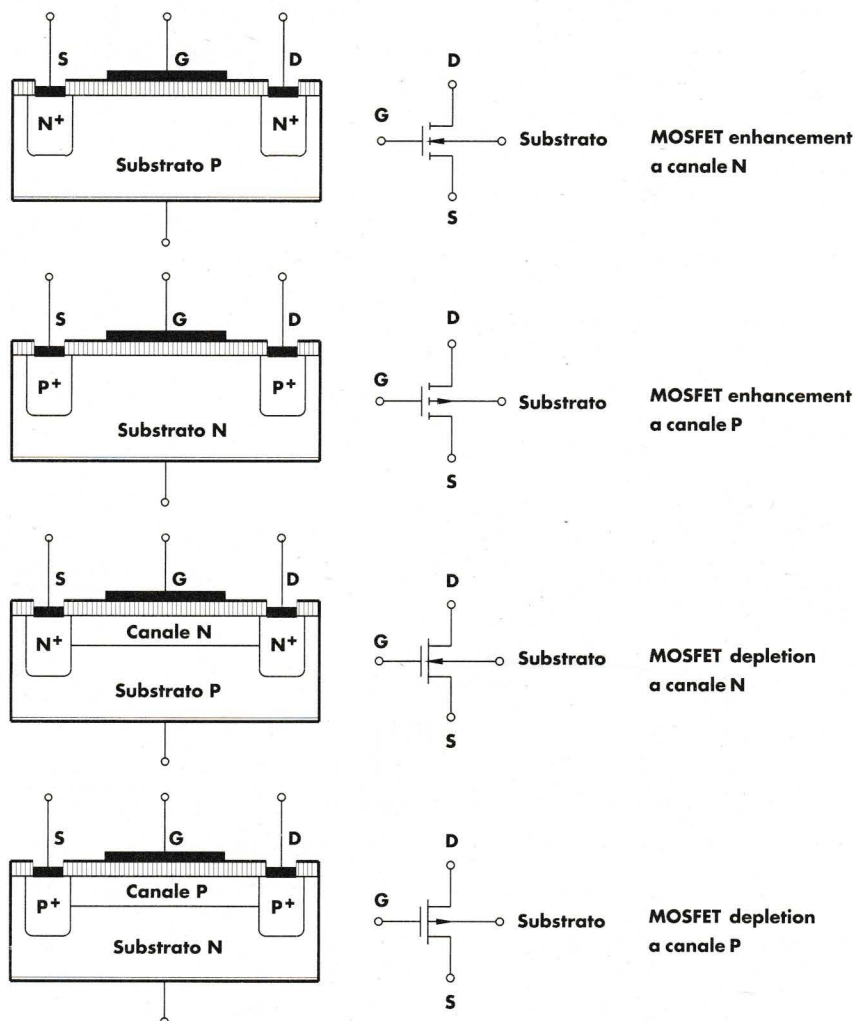


Figura 30
Schema riepilogativo sui MOSFET



Applicazioni del MOSFET

I MOSFET trovano sempre maggiore applicazione sia come interruttori sia come amplificatori con particolare riguardo ai circuiti di potenza.

Essi presentano caratteristiche simili a quelle dei JFET, rispetto ai quali presentano un più elevato valore della impedenza d'ingresso.

La **figura 30** mostra un riepilogo dei vari tipi di MOSFET.

8 La scelta del diodo

La scelta del diodo più idoneo a ogni particolare applicazione può essere effettuata sulla base delle seguenti considerazioni:

- tipo di funzione che deve essere svolta;
- campo di frequenze di lavoro;
- valori di tensione, di corrente, di potenza.

In base alla **funzione** svolta possiamo avere diodi: *rettificatori*, *stabilizzatori* (Zener), per funzioni speciali (*oscillatori*, *modulatori*, *miscelatori* ecc.).

In base alla **frequenza** di lavoro abbiamo diodi: per basse frequenze, per alte frequenze, per commutazione (switching).

In base alla **tensione**, **corrente** e **potenza** abbiamo: diodi per *piccoli segnali*, diodi per *alte tensioni*, diodi di *potenza*.

In base al tipo di applicazione a cui il diodo è destinato, il costruttore fornisce i parametri elettrici, termici e meccanici più importanti.

Vengono di seguito elencati alcuni diodi raggruppati per categoria.

Parametri caratteristici

Diodi rettificatori

General purpose rectifiers (glass package)

Device	V_{Rmin} [V]	I_{RMax} [μ A]	V_{FMax} [V]	I_{FMax} [A]	Package
1N4001	50	10	1,1	1	DO-41
1N4002	100	10	1,1	1	DO-41
1N4005	600	10	1,1	1	F126

Fast recovery rectifiers

Device	V_{Rmin} [V]	I_{RMax} [μ A]	V_{FMax} [V]	I_{FMax} [A]	t_{rr} [ns]	Package
1N4934	100	5	1,2	1	200	DO-41
1N4935	200	5	1,2	1	200	DO-41
1N4936	400	5	1,2	1	200	Do-41

Diodi Zener

Zener diode (glass package)

Device	V_z [V]	ΔV_z [%]	Z_z [Ω]	I_z [mA]	T.C. [%/°C]	P_d [mW] $T_a = 25^\circ\text{C}$	Package
1N5221B	2,4	5	30	20	- 0,085	500	DO-35
1N5225B	3,0	5	29	20	- 0,075	500	DO-35
1N5228B	3,9	5	23	20	- 0,06	500	DO-35
BZX85C3V9	3,9	5	15	60	- 0,045	500	DO-41
1N5230B	4,7	5	19	20	$\pm 0,03$	500	DO-35

In cui:

- V_{Rmin} [V] = tensione inversa (*reverse voltage*) minima;
- I_{RMax} [μ A] = corrente inversa (*reverse current*) massima;
- V_{FMax} [V] = tensione diretta (*forward voltage*) massima;
- I_{FMax} [A] = corrente diretta (*forward current*) massima;
- t_{rr} [ns] = tempo di recupero inverso (*reverse recovery time*);
- Package = contenitore;
- V_z [V] = tensione di Zener;

- ΔV_z [%] = tolleranza sulla tensione di Zener;
- Z_z [Ω] = resistenza dinamica di Zener $Z_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$;
- I_z [mA] = corrente nominale di Zener;
- T.C. [%/°C] = coefficiente di temperatura (*temperature coefficient*);
- P_d [mW] = potenza dissipata a temperatura ambiente di 25°C . ($T_a = 25^\circ\text{C}$)