# Appunti delle lezioni
# Tecnologia dei semiconduttori

24 maggio 2002

**Sommario**

Questo documento è stato redatto per spiegare alle classi quarte e quinte degli istituti tecnici industriali come sono realizzati internamente i semiconduttori, in quanto solo la conoscenza intrinseca dei dispositivi elettronici consente poi di poter sintetizzare e analizzare circuiti elettronici.

Gli autori del documento sono:

- Ing. Paolo Subiaco - docente di TDP all'Istituto Tecnico Industriale G.Galilei - Conegliano

Il documento è stato scritto grazie al wordprocessor LyX ed il programma di disegno Xfig, ed è liberamente scaricabile, in formato PDF e PostScript, dal sito *http://corsi.ir3ip.net* ed utilizzabile a patto di mantenere inalterate le informazioni sugli autori. Eventuali correzioni, segnalazioni o richieste di collaborazione possono essere inoltrate in email a *paolo@ir3ip.net*

## Indice

# Elenco delle figure

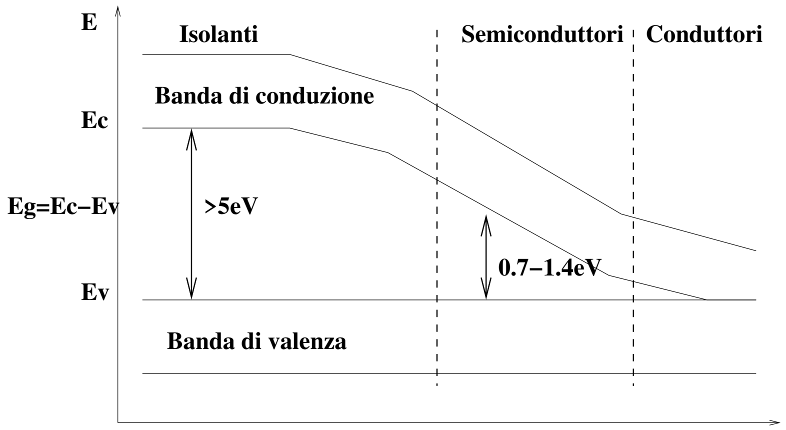


Figura 1: Bande di conduzione e di valenza nei diversi tipi di materiale

# 1 I dispositivi semiconduttori

I semiconduttori sono elementi o composti che hanno la peculiarità di comportarsi da isolanti oppure da conduttori in funzione dell'energia a cui si trovano gli elettroni di valenza, ed il passaggio dalla banda di valenza alla banda di conduzione risulta facilitata dal livello di energia $E_g$ che distingue le due bande.

Nei conduttori la banda di conduzione è sovrapposta alla banda di valenza, per cui tutti gli elettroni dei conduttori possono contribuire al passaggio di carica; al contrario, negli isolanti le due bande sono molto distanti, ed il gap esistente è tale che solo un campo elettrico molto forte può portare un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

Nei semiconduttori, l'energia necessaria al passaggio di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione è fortemente dipendente dalla temperatura, ed in condizioni ambientali risulta di circa 0.7eV per il germanio, 1.1eV per il silicio e 1.4eV per l'arseniuro di gallio.

Aumentando la temperatura aumenta l'energia degli elettroni, e quindi aumenta il limite superiore della banda di valenza.

I semiconduttori maggiormente utilizzati hanno 4 elettroni di valenza, per cui gli atomi formano un reticolo cristallino condividendo i 4 elettroni secondo una struttura tetraedrica.

I portatori di carica all'interno di un semiconduttore sono realmente rappresentati dagli elettroni che hanno acquisito una energia tale da raggiungere la banda di conduzione; in questa condizione l'elettrone non è piú vincolato al reticolo cristallino attraverso il legame covalente), e sarà libero di muoversi lasciando alle spalle uno ione positivo (il protone ad esso associato).

Per migliorare la conduttività del semiconduttore, ed introdurre delle proprietà enunciate in seguito, si introduce un *materiale drogante* nel reticolo cristallino del semiconduttore, in modo da privilegiare un tipo di carica: introducendo atomi del terzo gruppo, quali il boro e il gallio, si ottiene un *drogaggio di tipo P* poichè per ogni atomo drogante rimane libera una posizione nel reticolo riservata ad un elettrone: tale posizione si chiama *lacuna,* ad indicare quindi la mancanza di un elettrone, ed il materiale drogante si chiamerà *accettore* in quanto tende a richiamare elettroni verso di se. Viceversa, utilizzando atomi del quinto gruppo, quali il fosforo e l'arseniuro, nel reticolo cristallino per ogni atomo di drogante vi sarà un elettrone in piu' che non effettuerà legami covalenti e quindi non sarà vincolato al cristallo, ma sarà facilmente disponibile alla conduzione: questo si chiamerà *drogaggio di tipo N,* ed il materiale utilizzato come drogante si dirà *donatore.*

Nella situazione in cui il semiconduttore sia stato drogato, verrà pertanto fissato il tipo di carica (elettrone o lacuna) che maggiormente contribuirà al trasporto complessivo di carica (corrente).

Volendo indicare con $n$ la concentrazione di portatori liberi di carica negativa e con $p$ la concentrazione di portatori liberi di carica positiva, ed indicando con $n_i$ la concentrazione intrinseca (concentrazione dei portatori di carica nel semiconduttore intrinseco, ovvero non drogato), in condizioni di equilibrio la legge di Fermi ci dice che $np = n_i^2$.

Per il silicio, a temperatura ambiente $n_i \simeq 10^{10}$ atomi su centimetro cubo, la quantità di impurezze può arrivare a circa $10^{10}/cm^3$ , mentre la quantità di drogante inserita solitamente varia fra $10^{14} \div 10^{20}/cm^3$.

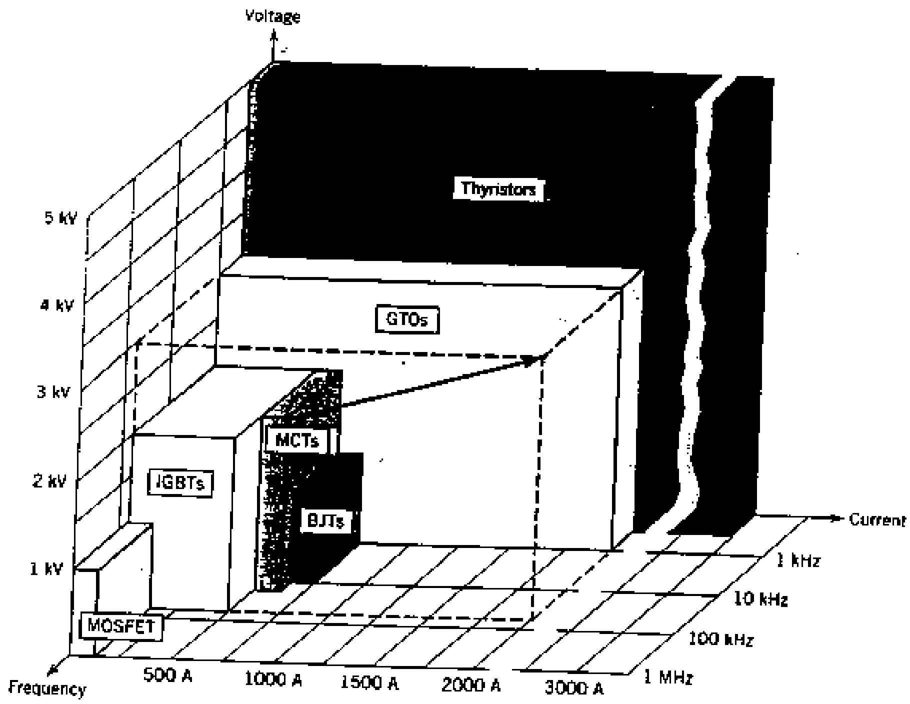


Figura 2: Dispositivi a semiconduttore di potenza

## 1.1 Il diodo

Il diodo, normalmente, è costituito da semiconduttore suddiviso in due zone: una zona drogata N (*catodo)* ed una zona drogata P (*anodo*).

La presenza di due zone con portatori di carica di segno opporto determinerà inizialmente una diffusione di carica: gli elettroni della zona N diffonderanno nella zona P, e le lacune della zona P di consequenza diffonderanno in zona N, creando una zona di svuotamento: in tale zona di svuotamento si creerà pertanto un campo elettrico tale per cui, cortocircuitando le estremità del diodo, il potenziale ai capi della zona di svuotamento $\psi_0$, *potenziale di barriera,* risulterà di circa 0.7V nel caso di silicio, 0.2V nel caso del germanio, 1.5 volt nel caso dell'arseniuro di gallio.

Polarizzando inversamente il diodo, ovvero applicando alla zona P un potenziale negativo rispetto alla zona N, la zona di svuotamento si estenderà aumentando quindi la caduta di potenziale ai capi della regione svuotata, ed impedendo quindi ulteriore passaggio di carica.

Al contrario, polarizzando direttamente, la regione svuotata si ridurrà sino alla completa eliminazione, quando la differenza di potenziale sarà uguale al potenziale di barriera $\psi_0$, consentendo la piena iniezione di portatori attraverso la giunzione.

La corrente che attraversa il diodo, nelle ipotesi di giunzione brusca, assenza di generazione elettrone-lacuna nella zona di svuotamento e giunzione in condizione di equilibrio (secondo la legge di Fermi), ha l'espressione

$$I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \tag{1}$$

in cui $I_s$è la corrente di saturazione inversa (che può avere valori dell'ordine del $nA \div mA$) e $V_T = \frac{kT}{q}$è la tensione termica, che a temperatura ambiente vale circa 25mA.

Si noti pertanto come la corrente cresce esponenzialmente, aumentando la tensione di polarizzazione diretta, mentre polarizzando inversamente si assesti intorno al valore di saturazione inversa. In realtà la corrente inversa, in modulo, sarà leggermente superiore (non è vero che non esiste la generazione di coppie elettroni-lacune nella zona di svuotamento, soprattutto quando la sua larghezza risulta non trascurabile), cosiccome polarizzando direttamente la corrente tende ad essere inferiore rispetto a quella calcolata a causa della resistività delle regioni neutre (a distanza dalla giunzione) e perchè il semiconduttore si troverà in un regime di forte iniezione di carica, e non certo in equilibrio (secondo Fermi).

Dal punto di vista dinamico, la giunzione PN può essere vista come due capacità distinte a seconda del regime di funzionamento:

- *capacità di transizione $C_T$,* dovuta alla carica presente a ridosso della zona di svuotamento quando la giunzione è polarizzata inversamente: è dell'ordine del pF per diodi di segnali, e varia secondo la legge
$$C_T = \frac{C_0}{(1 - \frac{V}{\Psi_o})^m} \tag{2}$$
in cui V e' la tensione inversa applicata ed $m$ e' un coefficiente variabile fra 0 e 1.
Si presenta pertanto quando il diodo è polarizzato inversamente.

- *capacità di diffusione,* dovuta alle cariche minoritarie presenti quando il diodo risulta polarizzato direttamente: elettroni in zona P e lacune in zona N. Quando si vuole spegnere il diodo è necessario provvedere a riportare la carica minoritaria nella propria zona (riportare gli elettroni diffusi in zona P nella zona N, e viceversa) e riformare la zona di svuotamento.
Pertanto il valore della capacità di diffusione è proporzionale alla quantità di carica da spostare per poter spegnere il diodo, la quale varia esponenzialmente con la tensione applicata (ovvero varia proporzionalmente con la corrente); inoltre varia anche tra diodo e diodo, sebbene questi siano nominalmente uguali.
Il suo valore risulta molto superiore rispetto alla capacità di transizione, e difficile da controllare; è questa la capacità che limita maggiormente la frequenza di commutazione del diodo.

Polarizzando la giunzione inversamente, aumenta il campo elettrico all'interno della zona di svuotamento che contrasta il passaggio di carica. Tuttavia, aumentando ulteriormente la polarizzazione inversa, si verifica uno dei seguenti fenomeni:

- *effetto tunnel,* ovvero in presenza di elevato drogaggio, e quindi con una regione di svuotamento poco estesa, la meccanica quantistica ci dice che la probabilità che una carica transiti attraverso la giunzione, nonostante il suo campo elettrico tenda ad impedirlo, è non nulla: questo effetto viene sfruttato per la realizzazione di diodi zener a bassa tensione (tipicamente minore di 10 volt)

- *ionizzazione da impatto,* che interviene per valori di tensione generalmente superiori a 10 volt, consiste nell'accelerazione degli elettroni che, in seguito a collisioni con il reticolo, non perdono tutta l'energia acquisita grazie al campo elettrico: in tal modo gli elettroni riescono ad oltrepassare la zona di svuotamento (*elettroni caldi).*

La differenza di potenziale al quale si verificano questi fenomeni si chiama *tensione di breakdown.*

### 1.1.1 Utilizzo di materiali diversi dal silicio

Oltre al silicio vi sono altri materiali utilizzabili come semiconduttore; riassumendo brevemente le loro caratteristiche possiamo dire che

- il *germanio* (Ge) ha un potenziale di barriera di circa 0.2 volt, ma una corrente di saturazione inversa piú elevata del silicio e soprattutto non è utilizzabile al di sopra dei 60 gradi centigradi per via della bassa energia di gap;
- l'*arseniuro di gallio* (GaAs) ha un potenziale di barriera di circa 1.5 volt, e può essere utilizzato anche come ottimo isolante: molti dispositivi in microonde fanno uso di questo materiale proprio per la possibilità di realizzare induttori su supporto isolante.
  Inoltre consente di operare a 250 gradi centigradi
- il *carburo di silicio* (SiC) è un nuovo materiale in fase di sperimentazione, che consente di avere tensioni di breakdown dieci volte superiori a quelle del silicio e temperature di esercizio di 450 gradi centigradi: per questo motivo potrà in futuro essere utilizzato per dispositivi di potenza fin'ora impensabili
- il *fosfuro d'indio* (InP) è ancora in fase di studio, e consente una alta mobilità elettronica che consentirà pertanto di produrre dispositivi operanti a frequenze superiori a 100 GHz.

### 1.1.2 Diodi varicap

I diodi varicap, o varactor, sono dispositivi che non si prefiggono lo scopo di rettificare la corrente (farla passare solo in una determinata direzione) bensì di costituire una capacità variabile a seconda della tensione applicata: una applicazione tipica di questo diodo è il *VCO (Voltage Controlled Oscillator)* ovvero un oscillatore LC in cui la capacità viene realizzata grazie al diodo varicap.

Il varicap non sfrutta la capacità di diffusione, ben piú grande di quella di transizione, in quanto difficilmente controllabile; sfrutta quindi la capacità di transizione, e pertanto viene polarizzato inversamente; aumentando la tensione inversa, si estende la zona di svuotamento, e quindi diminuisce la capacità (cfr. condensatore a facce piane parallele).

### 1.1.3 Diodi zener

Sfruttano uno dei meccanismi sopra esposti: effetto tunnel o ionizzazione da impatto.

Possono essere utilizzati sia per la realizzazione di riferimenti di tensione (alla loro tensione di breakdown) sia per la limitazione di un segnale nel range $V_{BD} \div 0.6V$.

### 1.1.4 Diodi Schottky

Anzichè una giunzione PN, sfruttano una giunzione metallo-semiconduttore.

Il semiconduttore può essere drogato N oppure P, la caratteristica principale è il dimezzamento del potenziale di barriera $\psi_0$ e l'elevata conduttività (grazie al metallo); l'elevata conduttività e l'assenza di portatori di carica minoritaria (solo gli elettroni concorrono alla generazione di corrente) porta inoltre a velocità di commutazioni del diodo schottky ben superiori a quelle del diodo in silicio.

Si noti che ogni diodo fra quelli sopra elencati presenta al suo interno almeno due diodi schottky, ovvero le giunzioni fra il semiconduttore e la metallizzazione dei terminali. In questo caso, si dovrà aumentare la concentrazione di drogante nella zona di metallizzazione al fine di ridurre la zona svuotata e quindi facilitare la conduzione anche per effetto tunnel: in questo modo la giunzione metallo-semiconduttore non voluta condurrà in entrambi i sensi, lasciando alla giunzione PN il compito di rettificare.

Generalmente si utilizza il metallo alluminio insieme a silicio leggermente drogato N, in modo che sia il semiconduttore a generare i portatori di cariche negative. Il metallo fungerà pertanto da anodo, il semiconduttore da catodo.

### 1.1.5 Diodi PIN

In questi diodi si interpone, fra la zona N e la zona P, uno strato di silicio intrinseco (e quindi a bassa conduttività). Questo tipo di diodo ha pertanto una bassa capacità di transizione (la zona di svuotamento risulta piú ampia essendoci anche lo strato intrinseco), ed inoltre può essere sfruttata la forte dipendenza della concentrazione di cariche del semiconduttore intrinseco al variare dell'energia dello stesso per stabilire il livello di corrente che attraverserà il diodo: in altre parole basta un innalzamento della temperatura o meglio una irradiazione elettromagnetica per generare delle coppie elettrone-lacuna all'interno del silicio intrinseco, che possono portare alla conduzione il diodo.

Questo tipo di diodo viene pertanto utilizzato come fotorivelatore, oppure nei commutatori in radiofrequenza in cui si vuole una buona conduttivita‘ quando polarizzato direttamente, ed un buon isolamento se polarizzato inversamente (il buon isolamento è dato dalla bassa capacità di transizione).

### 1.1.6 Diodi LED

LED è l'acronimo di Light Emitter Diode: i LED sono generalmente realizzati in GaAs (Arseniuro di Gallio) in quanto, avendo una $E_g$ maggiore rispetto a quella del silicio e germanio, nel momento in cui un elettrone passa dalla banda di conduzione alla banda di valenza genera una irradiazione elettromagnetica nel campo del visibile; al contrario il silicio genera una irradiazione a frequenza inferiore, nella gamma dell'infrarosso, poiché l'energia che l'elettrone cede passando in banda di valenza risulta inferiore.

Il diodo LED al GaAs viene quindi utilizzato per la generazione di luce.

### 1.1.7 Diodi di potenza

Affinchè un diodo possa far transitare un valore elevato di corrente, bisognerà certamente aumentarne la sezione; tuttavia questa procedura non puó essere estesa a piacere in quanto, non essendo il wafer di silicio uniforme, vi saranno delle zone maggiormente conduttive interessate quindi da una maggiore densità di corrente. Un aumento locale della densità di corrente porta ad un locale surriscaldamento, con un conseguente aumento della concentrazione dei portatori minoritari in quella zona (dovuta all'aumento del limite superiore della banda di valenza), ed il diodo diverrà maggiormente conduttivo,

riscaldandosi ulteriormente fino alla rottura.
Questo è uno dei grossi limiti dei semiconduttori bipolari (diodo, transistor, tiristore), il suo effetto viene chiamato *breakdown secondario* ed è un fenomeno molto pericoloso all'accensione/spegnimento del dispositivo, ovvero in condizione di non uniformità.

Ma aumentando la sezione, aumentano anche le capacità parassite, in particolare la capacità di diffusione, responsabile dell'elevato *Tempo di recupero inverso* $T_{RR}$.

Un diodo di potenza deve non solo consentire il passaggio di una corrente elevata, ma deve garantire una tensione di breakdown considerevole (3000÷5000 Volt) in modo da poter essere utilizzato con tensioni di alimentazioni notevoli (vedi azionamenti motori elettrici per trazione).
Affinché un diodo possa sopportare alte tensioni di breakdown è necessario allungarne la struttura (aumenta però la resistenza delle regioni di drift), e diminuire il drogaggio nella zona di svuotamento per contenere il valore del campo elettrico ad un valore accettabile.
Chiaramente entrambi questi accorgimenti portano ad una diminuzione della conduttività del diodo, tant'è vero che in un diodo di potenza la corrente cresce proporzionalmente alla tensione applicata al diodo, non esponenzialmente!
Inoltre, il basso drogaggio non favorisce la ricombinazione delle cariche minoritarie quando spengo il diodo, con un conseguente allungamento del tempo di recupero inverso.

Generalpurpose $T_{RR} = 25\mu s$
$V_{BD} = 6000V$ $I = 8000A$ Utilizzati a 50-60 Hz

Fastrecovery $T_{RR} < 5\mu s$ $V_{BD} = 1000V$ $I = 1000A$Convertitori switching

Schottky $T_{RR} < 1\mu s$ $V_{BD} = 100V$ $I = 100A$Applicazioni switching veloci

## 1.2 Applicazioni del diodo

- Rivelatore di picco
- Raddrizzatore a singola semionda (soluzione problematica per il trasformatore)
- Raddrizzatore a doppia semionda (con due diodi e trasformatore duale, oppure con ponte di graetz)
- Duplicatore di tensione (quadruplicatore, ecc) e invertitore di tensione (girando i diodi)
- Limitatore di tensione con zener
- VCO

## 1.3 Il BJT

BJT è l'acronimo di Bipolar Junction Transistor, ovvero transistore bipolare a giunzione; inoltre, transistor deriva da *trans-resistor* poiché il dispositivo si comporta come una resistenza fra emettitore e collettore controllabile attraverso la corrente di base.

L'attributo *bipolare* indica che anche in questo dispositivo, come nel diodo, vi è un meccanismo di trasporto di carica che interessa entrambi i tipi: elettroni e lacune, pertanto sarà privilegiata la corrente di diffusione anzichè la corrente di deriva.

In figura 3 è indicata la struttura fisica di un transistor NPN, in cui N+ indica una forte concentrazione di drogante mentre N- una bassa concentrazione.

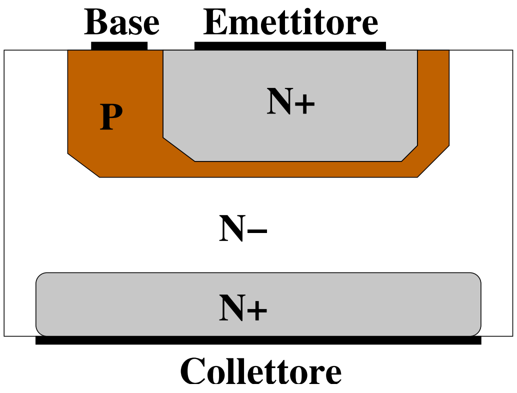


Figura 3: Transistor NPN

Il funzionamento del transistor NPN è il seguente: polarizzando direttamente la giunzione PN base-emettitore, le cariche maggioritarie dell'emettitore (zona fortemente drogata) vengono accelerate dal campo elettrico verso la regione di base, che risulta molto sottile.
Se applichiamo al collettore un potenziale superiore a quello di base (e quindi anche al potenziale di emettitore), la giunzione collettore-base risulterà polarizzata inversamente; rendendo piccola la distanza fra emettitore e collettore (ovvero la regione di base fra emettitore e collettore), la probabilità che gli elettroni emessi dall'emettitore, accelerati dal campo elettrico, oltrepassino la regione di svuotamento della giunzione base-collettore raggiungendo la zona di collettore risulta molto alta: gli elettroni, anziché ricombinarsi con le poche lacune presenti nella zona di base fra E e C o mutare direzione per raggiungere la base, preferiscono oltrepassare la giunzione polarizzata inversamente in virtú dell'effetto tunnel. Al contrario, se realizzassimo il transistor con uno spessore di base notevole, tutti gli elettroni che arrivano dall'emettitore si ricombinerebbero nella zona di base senza arrivare nella regione di collettore.

Si noti inoltre che, aumentando la tensione al collettore, la giunzione B-C risulterà polarizzata maggiormente inversamente, e pertanto aumenterà la regione di svuotamento: estendendosi, la regione di svuotamento ridurrà lo spesso della regione di base compresa fra E e C con una conseguente diminuzione della probabilità di ricombinazione degli elettroni provenienti da E. In altre parole, a parità di corrente $I_B$ avremo un aumento della corrente $I_C$ all'aumentare della tensione $V_{CE}$, e questo fenomeno si chiama *Effetto Early*.

Una delle qualità del transistor bipolare è la grandezza
$\beta = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$
che indica il guadagno in corrente del transistor, nel caso in cui sia visto come un quadripolo in cui la base rappresenta la porta d'ingresso ed il collettore la porta d'uscita: valori tipici di $\beta$ variano intorno a 15÷50 per transistor di potenza, 100÷300 per transistor di segnale, e circa 1000 per transistor darlington (due transistor in cascata inseriti in un unico package).

In figura 4 sono riportati i simboli utilizzati per i transistori bipolari.

I BJT si usano generalmente in 3 condizioni operative:

- *zona attiva diretta*, quando la giunzione base-emettitore è polarizzata direttamente e la giunzione base-collettore inversamente
- *saturazione*, quando entrambe le giunzioni sono polarizzate direttamente ($V_{CE}$ sarà circa uguale a 0.2V per i transistor di segnale, 0.8÷2 V per i transistor di potenza)

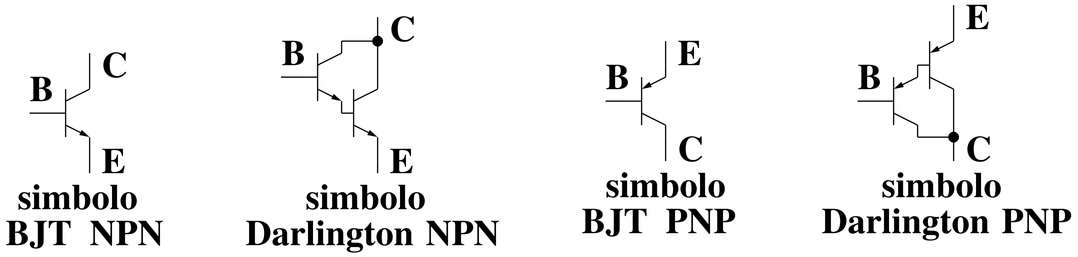


Figura 4: Simboli del transistor bipolari

- *interdizione*, quando entrambe le giunzioni sono polarizzate inversamente ($V_{BE} < 0.6V$ e quindi il transistor non conduce).

In saturazione il transistor NON verifica la condizione $I_C = \beta\, I_B$, ma si avrà un rapporto $\frac{I_C}{I_B} < \beta$.

### 1.3.1 BJT di potenza

I BJT di potenza sono solitamente realizzati in modo NPN, essendo la mobilità degli elettroni migliore rispetto a quella delle lacune.

Anche il BJT, come il diodo, presenta il problema del *breakdown secondario*, in parte risolvibile attraverso una *struttura multiemettitore* ed inserendo una piccola resistenza distribuita sull'emettitore, in modo da introdurre una retroazione negativa sulla corrente. Infatti aumentando la corrente localmente, aumenta la caduta di tensione $V_{BE}$ localizzata per cui diminuisce $I_B$ e quindi $I_C$.

Le caratteristiche dei BJT di potenza sono:

BJTsingoli $_{V_{CE}=400V \quad I_C=200A}$ $f_c = 25KHz$

Darlington $V_{CE} = 1200V \quad I_C = 400A \quad f_c = 10KHz$

Curiosità: il darlington, a prima vista, dovrebbe essere piú veloce in commutazione in quanto il BJT principale non può andare in saturazione, ovvero la sua giunzione base-collettore rimarrà sempre polarizzata inversamente senza quindi che entri in gioco la capacità. Perché invece risulta piú lento?

## 1.4 JFET

È un transistor ad effetto di campo, il cui canale in cui transita la corrente può essere di tipo N o di tipo P. Le estremità del canale sono collegate a due terminali: il source ed il drain. Per contraddistinguere questi due terminali, possiamo paragonare il source all'emettitore del BJT, ed il drain al collettore.

L'elemento di controllo (analogo alla base del BJT) si chiama gate, e viene realizzato attraverso una giunzione che, polarizzata inversamente, ostruirà il passaggio di carica nel canale.

Il gate viene collegato con il bulk e polarizzato ad un potenziale inferiore al source (ed al drain).

Si crea pertanto una zona di svuotamente, e poiché il drain è il potenziale al valore piú alto, la zona di svuotamento creatasi avrà l'andamento schematizzato in figura 5, indicato in colore ciano. Diminuendo ulteriormente la tensione di gate rispetto al source, la zona di svuotamente si estenderà ulteriormente fino a produrre uno strozzamento del canale: in tal caso, l'applicazione di una differenza di potenziale fra drain e source non comporterà alcun passaggio di carica, ed il dispositivo risulterà interdetto.

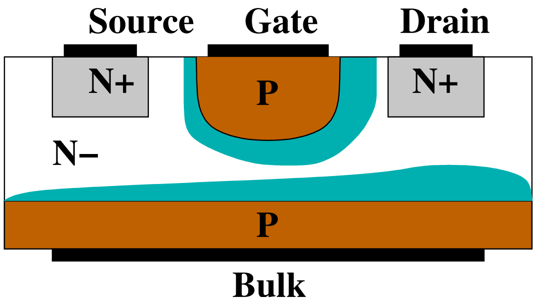


Figura 5: JFET a canale N

Al contrario del transistor bipolare, la cui grandezza di controllo è la corrente di base, i FET sono pertanto controllati in tensione e la corrente assorbita dal gate risulta pertanto molto bassa.

È inoltre possibile realizzare JFET con due gate: sono questi dispositivi molto utilizzati per la realizzazione di *mixer a transconduttanza,* utilizzabili per conversione di frequenza anche in microonde.

## 1.5 Mesfet

Significa MEtal-Semiconductor FET ad indicare che, al posto di una giunzione gate-canale di tipo PN come nel JFET, viene ora utilizzata una giunzione metallo-semiconduttore (Schottky) su substrato di arseniuro di gallio: il risultato è un miglioramento della mobilità elettronica e quindi la possibilità di operare a frequenze di svariate decine di GHz.

Inoltre, dal momento che lavorando ad alte frequenze risulta indispensabile operare nella condizione di adattamento di impedenza, per avere il massimo trasferimento di potenza, risulta molto comodo il substrato GaAs in quanto, essendo un buon dielettrico, è possibile costruirvi sopra degli ottimi elementi reattivi (capacità ed induttanze) per la realizzazione delle reti di adattamento d'impedenza (in gergo Input/Output Matching Network).

Altri transistori utilizzabili ad alte frequenze (microonde e millimetriche) sono gli HEMT e HBT.

## 1.6 Mosfet

Mosfet è l'acronimo di *Metal-Oxyde Semicondutor - Field Effect Transistor:* è analogo al JFET in cui, anziché utilizzare una giunzione polarizzata inversamente per il gate, si utilizza un condensatore.

Facendo riferimento ad un dispositivo a canale N, aumentando il potenziale di gate saranno richiamate delle cariche negative dal bulk verso l'interfaccia semiconduttore-ossido: in questo modo aumenta la densità di carica dando luogo alla formazione di un canale cosicché, applicando al drain un potenziale superiore a quello del source, inizierà lo spostamento di carica originando una corrente.

Analoghe considerazioni valgono per il mosfet a canale P, in cui il source è il terminale al potenziale piú alto, ed il gate deve essere polarizzato ad un potenziale inferiore al source, affinchè siano richiamate delle cariche P nell'interfaccia semiconduttore-ossido di gate e quindi si crei il canale attraverso cui avverrà il passaggio di carica.

Vi sono due regioni di funzionamento del dispositivo: facendo riferimento ad un MOS a canale N

*regionetriodo:* $I_{DS} = \frac{\beta}{2}[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$ *in cui* $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

*saturazione:* $\mathrm{I}_{DS} = \frac{\beta}{2}[V_{GS} - V_T]^2$ in cui $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

in cui $V_T$ è la tensione di soglia che deve essere applicata al gate rispetto al source affinché il dispositivo inizi a condurre.

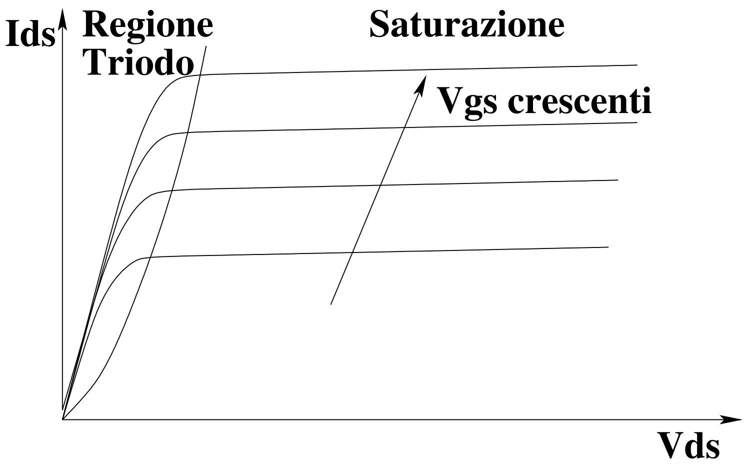


Figura 6: Caratteristica d'uscita del MOSFET a canale N

Si noti che nel caso del mosfet, la "saturazione" ha un significato diverso rispetto al BJT: con saturazione si indica il fenomeno per cui, aumentando $V_{DS}$ il canale tende a strozzarsi in prossimità del drain, ed in questa condizione si ha la massima conduttività del dispositivo: in saturazione, aumentando $V_{DS}$ si riduce la lunghezza del canale e di conseguenza la corrente, a parità di $V_{GS}$, aumenta leggermente di un fattore $(1+\lambda)$ in cui $\lambda$ rappresenta il *coefficiente di modulazione di canale* e questo fenomeno si chiama *effetto di canale corto*.
Quando il canale si strozza, la conduzione verso il drain avverrà grazie alla componente diffusiva della corrente.

L'effetto di canale corto diventa problematico quando si realizzano dispositivi con una lunghezza di canale molto corto, al fine di aumentare la conducibilità e quindi la velocità di funzionamento: in tal caso, aumentando $V_{DS}$ si verifica il fenomeno *drain induced barrier lowering* ovvero il mosfet conduce anche sottosoglia $(V_{GS} < V_T)$: per evitare questo problema, ed inoltre per ridurre la potenza dissipata, i dispositivi logici che operano ad alta frequenza dovranno utilizzare tensioni di alimentazione via via piú basse.

Il mosfet risulta molto interessante per la possibilità di impostare facilmente la tensione di soglia $V_T$ voluta, attraverso il processo di *impiantazione ionica* di drogante nello strato superficiale del drogante; si usa l'impiantazione ionica proprio per la precisione ottenibile nel stabilire la profondità in cui inserire il materiale drogante.
Prendendo sempre come riferimento un mosfet a canale N, aumentando la concentrazione di materiale accettore nel canale aumenterà di conseguenza il potenziale $V_{GS}$ che si dovrà applicare affinché si formi il canale; in tal caso il mosfet sarà del tipo *enhancement*.
Impiantando invece materiale donatore, si avrà la conduzione del dispositivo anche per $V_{GS} = 0$, e per interdire il mosfet sarà necessario applicare al gate una tensione negativa: il mosfet sarà del tipo *depletion*, e spesso si usano mosfet con tensioni di soglia $V_T = -2 \div -3$ Volt per la realizzazione di pull-up (in cui il mosfet di pull-up avrà il gate collegato con il source).

La tensione di soglia $V_T$ è legata anche alla tensione $V_{SB}$ (differenza di potenziale fra source e bulk): quando il potenziale di source aumenta, anche la soglia $V_T$ aumenta: questo si chiama *effetto body*.

Al fine di non ridurre la vita del mosfet, sarà necessario non applicare differenze di potenziale $V_{DS}$

troppo elevate, altrimenti il campo elettrico instaurato, unitamente alla riduzione della lunghezza del canale, potrebbe cedere agli elettroni una energia tanto elevata (circa 3eV) da farli entrare nell'ossido di gate, producendo una variazione della tensione di soglia e quindi un degrado del dispositivo.

### 1.6.1 MOSFET di potenza

Gli accorgimenti adottati per ottenere dei mosfet di potenza coincidono con la necessità di avere una corrente non superficiale bensì assiale: due sono le tecnologie utilizzate, illustrate di seguito.

Nei mosfet esiste sempre almeno un transistore bipolare parassita, il quale può accendersi durante le commutazioni, ovvero megli istanti in cui non siamo in regime stazionario (distribuzione della corrente non uniforme, quindi presenza di cadute di tensioni localizzate): questo fenomeno si chiama *latch-up*.

Inoltre, a seconda di come viene realizzato il mosfet, vi può essere uno o piú diodi, che eventualmente potrebbero essere anche utili (*diodo di free-wheeling*): nei dispositivi moderni il diodo parassita interno risulta abbastanza veloce, quindi utile, tuttavia non risulta del tipo low-barrier pertanto a volte conviene aggiungere un diodo schottky esterno.

Una nota importante: l'andamento della corrente nei mosfet di potenza, per tensioni $V_{GS} > V_T$ non risulta avere un andamento quadratico, bensì lineare a causa della resistenza di canale non nulla ed inoltre alla diminuzione della mobilità delle cariche all'aumentare del campo elettrico.

**VMOS** Sono mosfet in cui viene incisa una V nel semiconduttore al fine di avere un doppio transistore il cui gate ha una direzione obliqua. Questa tecnologia, che risale ai primi anni 70 poiché consentiva di ottenere dei canali molto corti non realizzabili a quel tempo con tecnologia superficiale, presenta tuttavia due difetti: gli alti campi elettrici presenti nella zona di convergenza del gate non consentono di controllare bene il breakdown, ed inoltre vi è la contaminazione del semiconduttore da parte delle soluzioni usate per incidere la V.

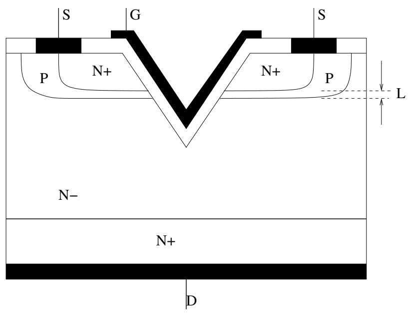


Figura 7: VMOS

L'esigenza di operare ad alte velocità di commutazione ha fatto rinascere la necessità di sperimentare un mosfet simile al VMOS, con il gate inciso peró a forma di U.

**VDMOS** È l'acronimo di Vertical-Diffused MOS e presenta una doppia diffusione al disotto del gate: la lunghezza di canale è, come nel VMOS, submicrometrica. Per ridurre la possibilità di latch-up (accensione del transistor parassita) durante le commutazioni, si cortocircuita il source con il bulk ($V_{BE} = 0$ del transistor parassita).

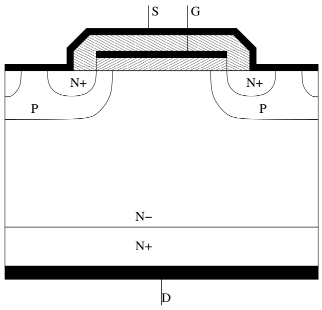


Figura 8: VDMOS

Questa tecnologia consente di creare dispositivi contenenti migliaia di dispositivi in parallelo, con una ampia regione di gate; è questa la struttura utilizzata dalla International Rectifier denominata *hexfet*.

## 1.7 BiCMOS

La tecnologia BiCMOS, nata nei primi anni 90, prevede la realizzazione di integrati la cui parte logica è realizzata con tecnologia CMOS (veloce e compatta), mentre l'interfaccia con l'esterno in tecnologia bipolare (consente di ottenere alte correnti di uscita).

Secondo le previsioni, questa tecnologia avrebbe, già intorno al 95÷96, soppiantare la tecnologia CMOS per le sue possibilità di avere una velocità e compattezza comparabile con quest'ultima, ma di poter gestire uscite a minor impedenza; tuttavia la tecnologia si evolve per tutte le famiglie, ed i CMOS di oggi riescono comunque a soddisfare le esigenze impensabili nei primi anni 90.

Questa tecnologia è tutt'ora in uso.

## 1.8 IGBT

Analogo al transistore darlington, l'*Insulated Gate Bipolar Transistor* risulta essere un transistore bipolare pilatato questa volta da un mosfet: unisce pertanto i vantaggi del BJT a quello del MOS:

| | |
|---|---|
| BJT | alte tensioni<br>alte correnti<br>tempi di commutazione alti (sigh!)<br>richiedono driver di potenza |
| MOS | tempi di commutazione bassi<br>alta impedenza d'ingresso<br>basse correnti<br>resistenza di canale alta se si vogliono alte tensioni |

La struttura dell'IGBT presenta al suo interno un tiristore parassita, per cui deve essere arginato il problema del suo possibile innesco (latchup distruttivo!).

Vi sono inoltre due tipologie diverse di IGBT:

- *punch-through:* molto veloce, ma con tensione inversa massima $V_{RM}$ molto bassa, quindi adatto al funzionamento con tensione di alimentazione continua

- *non-punch-through:* piú lento, ma simmetrico, quindi utilizzabile anche in regime alternato

Inoltre l'IGBT risulta stabile con la temperatura, in quando vi è una sorta di compensazione fra la retroazione positiva del BJT e quella negativa del MOS: si possono pertanto mettere tranquillamente in parallelo, creando dei moduli integrati capaci di sopportare correnti di 1000÷1500A.

## 1.9 TIRISTORI

Sono dispositivi a semiconduttore caratterizzati basati sull'SCR (Silicon Controlled Rectifier), il quale è caratterizzato da 3 giunzioni del tipo NPNP.

L'SCR è caratterizzato dai terminali anodo e catodo, attraverso cui transita tutta la corrente, ed un terminale di controllo pilotato in corrente chiamato gate, che consente l'accensione del dispositivo. Lo spegnimento avverrà spontaneamente quando la tensione di alimentazione (o comunque la tensione fra anodo e catodo) si annulla.

### 1.9.1 Phase-Control Thyristors

$V_{AK} = 6000V$ $I_A = 5000A$ $t_q = 100 \div 200\mu sec$ $R_{ON} = 2m\Omega$
Applicazioni a frequenze di rete

### 1.9.2 Fast-Switching Thyristors

$V_{AK} = 1500V$ $I_A = 1500A$ $t_q = 20\mu sec$ $f_c = 10KHz$
Utilizzati per la realizzazione di chopper/inverter.

### 1.9.3 Light-Activated SCR

È una combinazione di un fotodiodo ed un SCR.

### 1.9.4 Reverse-Conducting Thyristors

Possiede al suo interno un diodo di free-wheeling per la conduzione inversa: utile nella realizzazione di chopper.

### 1.9.5 Bidirectional triode thyristors (TRIAC)

Doppio SCR che pertanto conduce in entrambe le direzioni attraverso un comando di accensione. Può essere visto come due SCR in antiparallelo, con un unico ingresso di controllo, e viene utilizzato per bassi livelli di potenza: le sue prestazioni sono inferiori a due tiristori in parallelo!

### 1.9.6 Gate-Assisted Turn-Off Thyristors (GATT)

In un unico semiconduttore sono inclusi un SCR main pilotato da un altro SCR di comando: in questo modo basta una corrente $I_G$ inferiore per il controllo. Il GATT dispone della possibilità di spegnimento, applicando una corrente $I_G < 0$, ma solo quando la tensione $V_{AK}$ risulta già in parte ridotta.

Le caratteristiche possono essere del tipo $V_{AK} = 1000V$ $I_A = 1000A$ $t_q = 10\mu sec$ $f_c = 20KHz$.

### 1.9.7 Considerazioni generali

Anche in questo caso possono avvenire fenomeni di latch-up distruttivi durante i transitori (accensione e spegnimento del dispositivo), ovvero nei momenti in cui la distribuzione di corrente attraverso il dispositivo non è uniforme (zone piú o meno conduttive).

Per ridurre questa eventualità risulta necessario l'inserimento di reti di limitazione di $\frac{dv_{ak}}{dt}$, che prendono il nome di *snubber,* come visibile in figura 9.All'accensione, la differenza di potenziale

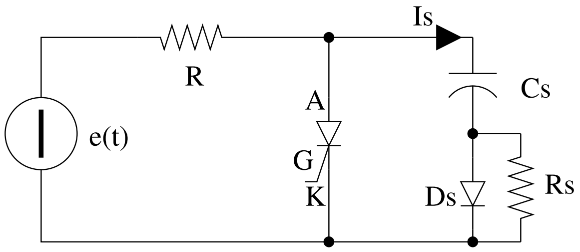


Figura 9: Esempio di snubber da applicare all'SCR

$v_{AK}$ diminuirà lentamente perché oltre all'assorbimento di corrente dal generatore $e(t)$ anche il condensatore $C_s$ dovrà scaricarsi (attraverso la resistenza $R_s$): pertanto avremo una corrente $I_s < 0$ durante il transitorio.

Allo spegnimento, inizia a diminuire la corrente $I_A$ e la differenza di potenziale $v_{AK}$ sale lentamente perché l'SCR si trova direttamente in parallelo con la capacità $C_s$.

È chiaro che lo snubber deve, possibilmente, essere non dissipativo, quindi si fa uso di capacità per immagazzinare carica durante il turn-off e cederla durante il turn-on; inoltre lo snubber, limitando la velocità di commutazione, introduce una dissipazione aggiuntiva nell'SCR.

Poiché gli SCR si spengono soltanto quando la tensione $V_{ak}$ si annulla (ok nel caso di regime alternato), esistono degli snubber piú complessi che consentono proprio di spegnere l'SCR anche se la sorgente di alimentazione è in regime continuo.

## 1.10 GTO

Si chiama *Gate Turn-OFF Thyristor* ed altro non è che un SCR con possibilità di spegnimento: a tal fine viene realizzato con una struttura fortemente interdigitata (gate distribuito) affinché la distribuzione della corrente, durante lo spegnimento, sia il piú omogenea possibile.

Per rendere lo spegnimento veloce, vi sono delle zone drogate n+ all'interno dell'anodo (*anode short)* che in questo modo funzionano da drenaggio per i portatori minoritari. Questo accorgimento però limita la capacità del GTO di operare con tensioni inverse elevate (solo 20÷30 volt per questo tipo di GTO) che potranno essere utilizzati solo in continua.

Per avere una corrente di comando piccola, devo rendere il dispositivo asimmetrico, ovvero ridurre il $\beta$ del transistore PNP (aumento lo spessore della sua base ed aumento la velocità di ricombinazione dopando con oro): di conseguenza aumenterà $R_{ON}$ cosicché il GTO sopporterà correnti inferiori rispetto all'SCR.

Per applicazioni a bassa potenza, il GTO risulta migliore del BJT in quanto

- sopporta tensioni piú alte
- il rapporto fra la corrente di picco sopportata e la corrente medio è piú alto

- richiede una bassa potenza per il controllo.

Per applicazioni ad alta potenza, il GTO risulta migliore dell'SCR poiché, in regime non alternato, può essere spento anche quando la tensione di alimentazione non è zero (mentre l'SCR richiederebbe sofisticati snubber per lo spegnimento).

In ogni caso anche nel GTO devono essere utilizzati degli snubber per limitare la variazione di tensione $v_{AK}$, ed inoltre perchè i diodi di free-wheeling eventualmente presenti nel circuito non avranno una velocità molto superiore rispetto a quella del GTO.

Oltre allo snubber visto in figura 9, si dovrà inserire anche un ulteriore snubber per la limitazione della corrente (induttanza in serie all'anodo) durante l'accensione.

Per proteggere il dispositivo da sovracorrenti, si inserisce in serie al circuito un fusibile seguito, a valle, da un ulteriore SCR che verrà acceso proprio per bruciare il fusibile ed interrompere quindi il circuito (salvaguardia del GTO).