

# Capitolo 1

## I dispositivi per l'elettronica di potenza

### 1.1 Introduzione - parametri caratteristici dei dispositivi di potenza

I dispositivi più importanti per l'elettronica di potenza sono senza dubbio gli interruttori controllati elettricamente: dispositivi in grado di emulare un circuito aperto o un corto circuito, a seconda della tensione applicata su di un terminale di controllo. Le problematiche insite dietro questi dispositivi sono sostanzialmente legate alla qualità dei medesimi, qualità in termini di durabilità o di prestazioni dei dispositivi; per questo motivo risulta fondamentale l'introduzione di alcuni parametri in grado di quantificare le prestazioni di questi dispositivi, al fine di capire, a seconda dell'applicazione, quale sia indicato e quale invece no.

Esistono diversi modi di classificare questi dispositivi; proviamo ad analizzarne alcuni.

- Una classificazione è quella secondo la **modalità di controllo della commutazione**; infatti, si può avere:
  - un interruttore passivo (per esempio un diodo): sistemi con un comportamento rettificante;
  - un interruttore attivo (come un transistor).
- Un'altra classificazione può essere funzione della direzione della corrente all'interno dell'interruttore:

- la corrente può essere unidirezionale, ossia può scorrere solo in un preciso verso: da un terminale a un altro, ma non viceversa (esempi sono i BJT o gli IGBT);
  - la corrente può anche essere bidirezionale (come nei MOSFET), ossia scorrere in entrambi i versi.
- Un terzo criterio può essere funzione del segno della tensione di blocco, ossia della massima tensione che il transistor può sopportare ai propri capi quando esso è trattato come un circuito aperto; in altre parole, si può pensare come a una sorta di *qualità del circuito aperto*, essendo il circuito aperto una condizione per cui, indipendentemente dal livello di tensione presente, non passa corrente. Il segno è discriminante nel senso che:
    - la tensione potrebbe avere solo una certa polarità, solo un particolare segno (cosa che capita negli interruttori a singolo transistor);
    - la tensione potrebbe essere sopportata indipendentemente dalla polarità (caso di interruttori multi-device).

Una volta presentate queste classificazioni, si vuole introdurre una serie di parametri per la qualificazione della bontà del transistor.

- Un parametro è il tempo di commutazione del transistor: si tratta di un parametro dinamico, dal momento che interessa il tempo che il transistor impiega per passare dallo stato ON allo stato OFF o viceversa dallo stato OFF allo stato ON. Le transizioni più fastidiose sono quelle dallo stato ON allo stato OFF: di fatto il tempo di commutazione è regolato dalla presenza di eventuali portatori minoritari in lati del circuito: nel caso in cui il dispositivo sia *controllato dai minoritari*, cosa che capita per esempio nel caso di un transistor bipolare (in cui tutte le correnti sono correnti di diffusione), il tempo di spegnimento sarà strettamente collegato al tempo di vita dei minoritari nei vari lati, tempo piuttosto lungo rispetto a quello di rilassamento dielettrico.
- Un secondo parametro molto importante è la resistenza equivalente che si vede all'interno del circuito: come detto, l'interruttore, in un certo stato, deve emulare un corto circuito; nella realtà esso però si comporterà come una resistenza, dal momento che vi possono essere, nella fisica del sistema, elementi in grado di provocare una caduta di tensione nel canale.

- Un terzo problema, da cui nasce un terzo parametro, è il breakdown: un parametro molto importante infatti è la massima tensione applicabile prima che *capitino guai*, ossia prima che il dispositivo vada in breakdown. Quando il campo elettrico supera un certo valore critico, infatti, si ha effetto valanga/Zener.

Concentriamoci per un attimo sul terzo punto: un modo è abbassare la tensione, un altro è fare in modo che il campo elettrico si *svolga*, si *sviluppi* su di una regione più lunga, in modo da poter applicare una tensione più elevata e ottenere campi più bassi; le dimensioni, tuttavia, dovranno essere elevate. Quando si parla di campo critico si parla di **rigidità dielettrica**: esso è il massimo valore del campo elettrico di fatto accettabile.

Il problema del breakdown è tra i più importanti nell'elettronica di potenza; ciò ha portato allo studio, già a livello tecnologico, di soluzioni in grado di aumentare al massimo le tensioni di breakdown, con un occhio alle dimensioni. Punto critico per i campi elettrici sono gli spigoli dei dispositivi: come noto le soluzioni delle equazioni hanno la *forma* del dominio in cui si calcola, dunque sullo spigolo si avranno discontinuità, e picchi di campo elettrico; per questo motivo conviene modificare questa struttura, facendo in modo da ridurre il picco, progettando idoneamente le terminazioni. Si parla di terminazioni dal momento che, per esempio in una giunzione Schottky, nel metallo tutti i punti sono equipotenziali, ma prima o poi il metallo finisce; si deve per questo motivo trovare un metodo per trattare meglio le terminazioni, i punti in cui il metallo (o un altro materiale) termina.

- Un'idea è usare il **field plate**: si allontana lo spigolo interponendo sotto il metallo uno strato di isolante, in modo da mandare su di esso parte del campo elettrico; si può anche aggiungere una regione drogata  $n^+$  non contattata, ma introdotta in modo da distribuire ulteriormente il campo, alzando ancora la tensione di breakdown.
- Miglioramento della precedente idea può essere quello di introdurre un **anello di guardia**, ossia una struttura in grado di spalmare ulteriormente il campo elettrico. Immaginando di guardare da sopra la struttura, sapendo che il contatto Schottky è sostanzialmente rettangolare, si aggiunge un anello  $p^+$  che lo circonda interamente. La struttura Schottky si comporta sempre alla stessa maniera, ma spalma ulteriormente il campo elettrico grazie alla regione di svuotamento che si forma tra l'anello di guardia e la parte drogata  $n$ . Si possono anche introdurre tanti anelli di guardia, nelle strutture molto ottimizzate.
- Allargare in ogni modo possibile la regione di svuotamento, passando magari da giunzioni  $p - n$  (in questo caso si parla dunque di diodi)

a giunzioni  $p - i - n$ . Se però una soluzione di questo tipo migliora notevolmente il breakdown, essa peggiora notevolmente la  $R_{on}$ : essa infatti aumenta a causa della presenza del materiale intrinseco, attraverso il quale la corrente deve comunque passare.

Tutti questi accorgimenti permettono di ottenere interruttori con tensioni di breakdown dell'ordine di 1200 V; purtroppo però le dimensioni non giocano a favore della loro integrazione: si parla di diversi  $\text{mm}^2$ .

## 1.2 Double-diffusion MOSFET

Passiamo a questo punto all'analisi di una prima struttura spesso utilizzata nell'ambito dell'elettronica di potenza: il double-diffusion MOSFET.

L'idea è quella di cambiare la direzione del flusso di corrente: sarebbe infatti bello avere un transistor in grado di trasportare una corrente molto elevata, ma ciò non si può fare senza ricorrere a dimensioni fisiche molto elevate; volendo avere lunghezze di gate dell'ordine dei micron, è necessario ricorrere a una struttura non-planare, come questa.

Di fatto in questa struttura da una parte si anno gate e source, dall'altra il drain, dunque il flusso di corrente in questo caso è verticale, è ortogonale ai vari piani che costituiscono gli strati. Si parla di *verticalmente diffuso* (VD-MOSFET) o di *doppiamente diffuso* (double-diffused). Si forma un'inversione sullo strato  $p^+$ , dunque si va dal source al drain, passando per la regione  $n^-$ . Quest'ultima è fondamentale dal momento che permette di *spalmare* il campo, riducendo la tensione di breakdown. Il canale si forma all'interfaccia tra ossido e silicio, nel  $p$ . Si noti che si hanno regioni  $p - n$  tra le vasche e i substrati collegati al drain, dunque bisogna fare attenzione, dal momento che, se  $V_{DS} < 0$ , entrano in gioco le giunzioni. Si suol dire che nel dispositivo vi sia un JFET parassita. Per questo motivo, purtroppo, questa struttura è *dissimmetizzata*: si può applicare una tensione  $V_{DS}$  solo positiva.

L'interesse nell'aver una struttura verticale risiede nel fatto che, in questo modo, è possibile introdurre molti dispositivi in parallelo: tanti dispositivi in parallelo significa sostanzialmente avere tanti portatori di corrente e dunque, con dispositivi dalle dimensioni relativamente ridotte, molta corrente.

Studiamo a questo punto rapidamente gli stati del dispositivo in questione:

- Nello stato OFF, i canali conduttivi sono inesistenti; la  $V_{DS}$  deve sempre essere positiva, e se così è tutte le varie giunzioni  $p - n$  sono polarizzate inversamente, e le regioni svuotate si estendono nei vari semiconduttori; a seconda dei drogaggi, le regioni saranno più o meno estese, e a seconda della loro estensione il campo sarà più o meno *spalmato*.

- Nello stato ON, sempre ricordando che  $V_{DS} > 0$ , si formano i canali, che mettono in comunicazione le *pozze* di source con la regione drogata  $n^-$ ; il potenziale elevato al drain chiamerà a sè gli elettroni, e così il flusso di corrente sarà diretto verticalmente, come già detto.

Si ricordi che la dimensione della regione poco drogata  $n^-$  regola due dei parametri fondamentali: se da un lato più essa è estesa e maggiore sarà la tensione di breakdown, dal momento che i campi elettrici saranno spalmati *meglio*, dall'altro aumenterà anche la resistenza  $R_{on}$  al momento della conduzione.

La tensione di soglia di queste strutture è intorno ai 3 V, ma ciò non è problematico, dal momento che le tensioni alte sono solitamente a disposizione, nei sistemi di potenza.

### 1.3 IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

Per quanto riguarda il transistor bipolare a giunzione (BJT) di potenza, il discorso è abbastanza simile, sotto il punto di vista dell'analisi, a quanto già conosciamo; anche in questo caso tuttavia si introduce una struttura verticale, dal momento che in questa maniera si può ancora una volta facilitare la parallelizzazione, e così introdurre molti dispositivi che portano corrente. Ancora una volta si introduce, questa volta nel collettore, una regione poco drogata  $n, n^-$ .

Ciò è necessario come al solito al fine di ampliare la regione di svuotamento, permettendo di aumentare le tensioni di breakdown. Il comportamento sarà migliore sotto il punto di vista della resistenza  $R_{on}$  dal momento che quando il transistor è in stato ON si trova in stato di saturazione, dunque si iniettano lacune nella regione  $n^-$ ; ciò permette di ridurre la resistività del sistema, dal momento che aumenta il numero di portatori in grado di portare corrente, dunque di condurre, dunque la conducibilità. Si tratta, a differenza di prima, di dispositivi decisamente più lenti: se prima l'iniezione era sempre di maggioritari (prodotti dall'inversione e dal passaggio nei canali creati di conseguenza), ora essa è di minoritari, portatori che sopravvivono per tempi ben più lunghi di quelli di rilassamento dielettrico. Per questo motivo, al bipolare si preferisce una struttura alternativa: l'IGBT.

Si tratta di una struttura quasi identica a quella del DMOSFET, ma con una differenza sostanziale: il **collettore** di questa è una regione drogata  $p$  anzichè  $n$ . Ciò porta ad un compromesso tra il DMOSFET e il BJT: si avrà una commutazione più veloce di quella del BJT, accoppiata ai vantaggi del BJT in uscita (per quanto la velocità di commutazione del DMOSFET

resti comunque migliore, dal momento che comunque si ha una parte controllata dai portatori minoritari). Sostanzialmente la struttura è identica, dunque il processo è quasi identico a quello del DMOSFET (cosa che ha fatto apprezzare notevolmente la struttura alle aziende).

Sotto il punto di vista del funzionamento tuttavia il dispositivo cambia notevolmente, dal momento che cambiare il drogaggio di quella regione cambia tutto.

In questa maniera si riesce ad avere da un lato una commutazione più veloce (in quanto quasi tutto è controllato dal MOSFET), ma aggiungendo i vantaggi dell'uscita del transistor bipolare, ossia minore  $R_{on}$  e tensione di blocco (dal momento che, in un bipolare, la regione  $n^-$  può essere molto più spessa che nel DMOSFET, a parità di  $R_{on}$ ).