

# MOSFET

Da Wikipedia, l'enciclopedia libera.

In elettronica, il **MOSFET**, abbreviazione del termine inglese *metal–oxide–semiconductor field-effect transistor*, ovvero **transistor metallo-ossido-semiconduttore a effetto di campo**, anche chiamato **transistor MOS**, **MOS-FET** o **MOS FET**, è una tipologia di transistor ad effetto di campo largamente usata nel campo dell'elettronica digitale, ma diffusa anche nell'elettronica analogica.

Il principio di funzionamento del transistor ad effetto di campo è stato ideato da Julius Edgar Lilienfeld nel 1925, mentre il MOSFET fu introdotto da Dawon Kahng nel 1960.<sup>[1]</sup>

Il MOSFET è composto da un substrato di materiale semiconduttore drogato, solitamente il silicio, al quale sono applicati tre terminali: *gate*, *source* e *drain*. L'applicazione di una tensione al gate permette di controllare il passaggio di cariche tra il source e il drain, e quindi la corrente elettrica che attraversa il dispositivo. A seconda che il drogaggio del semiconduttore sia di tipo *n* o di tipo *p* il transistor prende rispettivamente il nome di nMOSFET e pMOSFET, abbreviati spesso in nMOS e pMOS.



Due MOSFET di potenza

## Indice

### 1 Struttura

- 1.1 Il condensatore MOS
- 1.2 La regione di canale
- 1.3 Distribuzione delle cariche all'interno del condensatore MOS
  - 1.3.1 Regione di accumulazione
  - 1.3.2 Regione di svuotamento
  - 1.3.3 Regione di Inversione

### 2 Funzionamento

- 2.1 Regioni di funzionamento
  - 2.1.1 Regione di interdizione
  - 2.1.2 Regione lineare
  - 2.1.3 Regione di saturazione
- 2.2 L'effetto body

### 3 Il MOSFET nell'elettronica digitale

- 3.1 La tecnologia CMOS

### 4 Il MOSFET nell'elettronica analogica

### 5 Miniaturizzazione del MOSFET

- 5.1 Ragioni per la miniaturizzazione dei MOSFET
- 5.2 Problematiche della miniaturizzazione dei MOSFET
  - 5.2.1 Saturazione della velocità dei portatori
  - 5.2.2 Corrente di sottosoglia
  - 5.2.3 Capacità di interconnessione
  - 5.2.4 Produzione di calore
  - 5.2.5 La corrente di gate
  - 5.2.6 Cambiamenti nel processo di produzione

### 6 Simbolo circuitale

### 7 Capacità parassite

- 7.1 Capacità  $C_{gb}$
- 7.2 Capacità associate alle giunzioni PN
- 8 Tipologie particolari di MOSFET
  - 8.1 MOSFET a svuotamento
  - 8.2 DMOS
  - 8.3 Mosfet di potenza
- 9 Note
- 10 Altri progetti
- 11 Voci correlate

## Struttura

Il cuore del MOSFET è il condensatore MOS, al quale si applicano i due terminali drain e source.

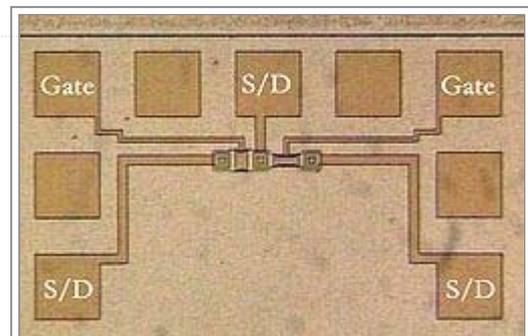
### Il condensatore MOS

Il condensatore MOS è composto da due elettrodi. L'elettrodo inferiore è il **substrato** (detto anche *body*, il "corpo" del transistor) di materiale semiconduttore drogato, solitamente il silicio, anche se alcuni produttori di circuiti elettronici, in particolare la IBM, hanno cominciato a usare una miscela di silicio e germanio. Diversi altri semiconduttori caratterizzati da migliori proprietà elettroniche rispetto al silicio, come l'arseniuro di gallio, non formano buoni ossidi e quindi non sono adatti per i MOSFET.

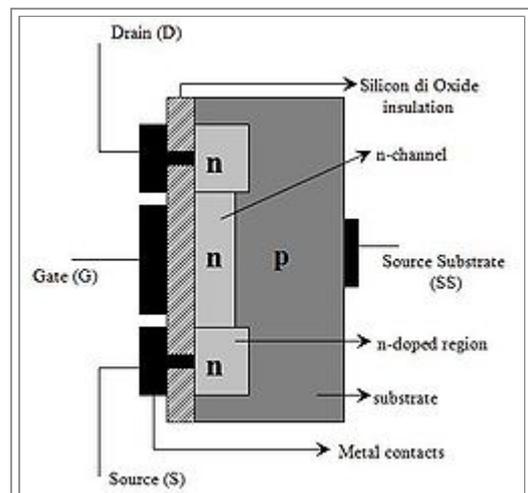
L'elettrodo superiore è il **gate**: il materiale di gate deve essere un buon conduttore elettrico: a causa dell'assenza di processi tecnologici in grado di allineare con buona precisione un gate metallico alla struttura MOS e a causa dell'elevata contaminazione che l'alluminio introduceva durante i processi di *annealing* termico, si è per diversi anni usato il polisilicio, silicio policristallino ad alto drogaggio, che non gode di eccezionali proprietà conduttive.

Con la riduzione dello spessore dell'ossido di gate è stata introdotta la tecnologia *metal gate*, ovvero si è cominciato ad usare un materiale metallico per la costruzione del terminale. I due principali fattori che hanno portato all'introduzione di questa tecnologia sono:

- Con la riduzione delle dimensioni dei transistor, la riduzione dello spessore dell'ossido di gate rende non più trascurabile lo spessore della regione svuotata sul polisilicio, ciò porta a dover considerare uno spessore di ossido equivalente. Questo genera ripercussioni sulle tensioni di soglia e sulle correnti di drain che, in generale, contribuiscono ad una riduzione delle performance del dispositivo.
- L'aumento del drogaggio del polisilicio volto a ridurre la resistività e la profondità di svuotamento crea problemi di contaminazione dell'ossido, oltre al fatto che il silicio fortemente drogato presenta una scarsa mobilità per elettroni e lacune.



Microfotografia di due MOSFET a gate metallico in un test



Sezione di un MOSFET a canale N

Si sono di conseguenza cercati processi tecnologici che permettono di mantenere l'allineamento del gate con drain e source e che utilizzano metallo al posto del polisilicio. Una delle tecniche più avanzate per ottenere MOS con tecnologia metal gate è il processo *damascene*, che prevede la costruzione di un gate fittizio in polisilicio e la sua successiva rimozione per far posto al vero gate metallico, solitamente di alluminio o tungsteno. Uno strato di nitrato di titanio viene interposto tra gate metallico e ossido (quest'ultimo viene ricreato quando si rimuove il gate in polisilicio) sia per evitare che il metallo contamini l'ossido, sia per migliorarne l'adesione.

Gate e substrato sono separati da un sottile strato isolante detto *ossido di gate*, composto da biossido di silicio o dielettrici ad elevata permittività elettrica. Tale strato è necessario al fine di ridurre la perdita di potenza, causata principalmente dalla perdita di corrente dal gate.

## La regione di canale

Il MOSFET viene realizzato aggiungendo al condensatore MOS due regioni di silicio drogate in maniera opposta al substrato, che costituiscono i terminali di drain ("pozzo") e source ("sorgente"). Tali diffusioni costituiscono una giunzione p-n, un contatto tra i blocchi di tipo P e di tipo N ed è priva di portatori liberi. Ai due lati della giunzione vi è una differenza di potenziale costante, chiamata tensione di built-in, che deve mantenere una polarizzazione inversa per il funzionamento del dispositivo.

La regione di substrato compresa tra i due terminali drain e source è detta **regione di canale**, ed è caratterizzata da una *lunghezza di canale*  $L$  e da una *larghezza di canale*  $W$ , misurate rispettivamente lungo la direzione parallela e perpendicolare rispetto al verso della corrente che percorre il canale. Tale regione fornisce un percorso conduttivo tra i due terminali ed è separata dal gate da un sottile strato solitamente composto da biossido di silicio.

## Distribuzione delle cariche all'interno del condensatore MOS

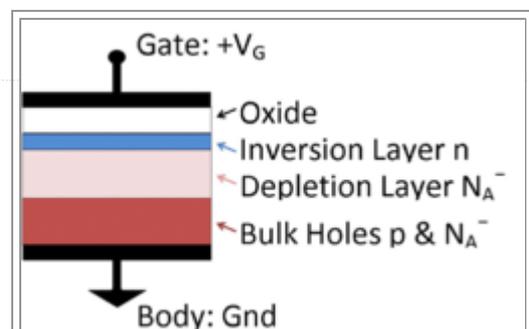
A seconda della tensione applicata ai capi del condensatore MOS si verificano tre diverse configurazioni di carica all'interno del dispositivo, riportate di seguito nel caso di un substrato con drogaggio di tipo  $p$ :

### Regione di accumulazione

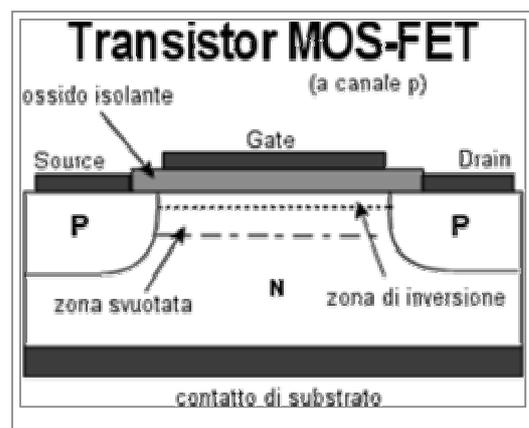
La regione di accumulazione si verifica quando all'elettrodo di gate viene imposta una tensione  $v_G$  negativa rispetto all'elettrodo di substrato, generalmente posto a massa. In questa configurazione le lacune del substrato si accumulano in un piccolo strato in prossimità del gate: questa è la condizione di accumulazione.

### Regione di svuotamento

La regione di svuotamento si verifica quando all'elettrodo di gate viene imposta una tensione positiva



Regioni di polarizzazione nel MOSFET



rispetto all'elettrodo di substrato. In questa configurazione le lacune del substrato si allontanano dal gate, lasciando una regione di svuotamento in prossimità di esso.

Sezione di un MOSFET a canale p

### Regione di Inversione

La regione di inversione si verifica quando all'elettrodo di gate viene imposta una tensione positiva superiore ad una certa tensione, detta tensione di soglia  $V_{th}$ . In questa configurazione gli elettroni presenti nel substrato vengono attratti dal gate, e se la tensione supera la tensione di soglia la concentrazione di elettroni in prossimità del gate è maggiore di quella delle lacune: si forma così uno strato di inversione nel quale il silicio è diventato drogato di tipo  $n$ .

Lo strato di inversione è molto sottile e l'elevata concentrazione di elettroni è spiegata dal processo di generazione elettrone-lacune nella regione di svuotamento.

## Funzionamento

Il MOSFET è un capacitore MOS al quale sono stati aggiunti due terminali foratamente drogati in maniera opposta al substrato: il drain e il source. Nel caso di un nMOSFET, la regione di substrato che collega drain e source, la regione di canale, può essere o ricca di lacune, o vuota, o ricca di elettroni a seconda che sia rispettivamente di accumulazione, di svuotamento o di inversione. Quando si applica una tensione superiore alla tensione di soglia  $V_{th}$  tra i terminali di gate e source vi è quindi un passaggio di corrente: questo sta alla base del funzionamento del transistor.

Se la tensione è inferiore alla tensione di soglia vi è il passaggio di una piccola corrente, detta corrente di sottosoglia.

Per un transistor pMOSFET le distribuzioni di carica sono contrarie, per cui il substrato ha un drogaggio di tipo  $n$  e i terminali di gate e source di tipo  $p$ .

### Regioni di funzionamento

A seconda della tensione applicata tra gate e substrato si individuano tre regioni di lavoro del dispositivo, riportate di seguito nel caso di un nMOSFET:

#### Regione di interdizione

La regione di interdizione, anche detta di *cut-off*, si verifica quando  $V_{GS} < V_{th}$ , dove  $V_{GS}$  è la tensione tra gate e source considerando il terminale di source cortocircuitato con l'elettrodo del substrato.

In questo caso il transistor è spento, e non vi è passaggio di carica tra gate e source. In realtà la distribuzione di Boltzmann permette ad alcuni elettroni di avere energia sufficiente per entrare nel canale, e questo origina la corrente di sottosoglia. Tale corrente varia esponenzialmente  $V_{GS}$ , ed è definita approssimativamente dalla relazione:<sup>[2][3]</sup>

$$I_D \approx I_{D0} e^{\frac{V_{GS} - V_{th}}{nV_T}},$$

dove  $I_{D0}$  è la corrente per  $V_{GS} = V_{th}$  ed il fattore  $n$  è dato da:

$$n = 1 + C_D/C_{OX},$$

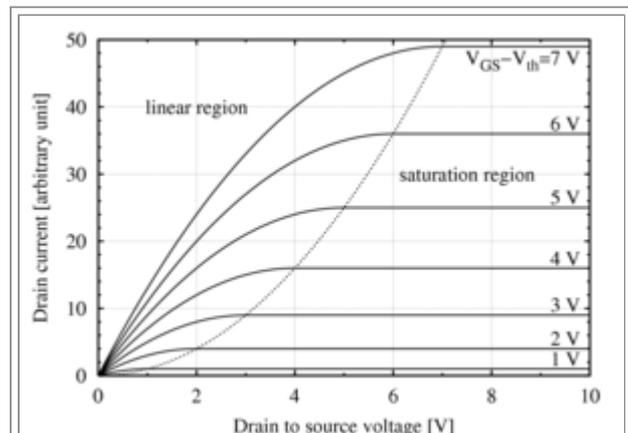
dove  $C_D$  è la capacità della regione di svuotamento e  $C_{OX}$  la capacità dello strato di ossido.

In un transistor il cui canale sia sufficientemente lungo, non c'è dipendenza dalla tensione del drain della corrente finché  $V_{DS} \gg V_T$ . Questa corrente è una delle cause del consumo di potenza nei circuiti integrati.

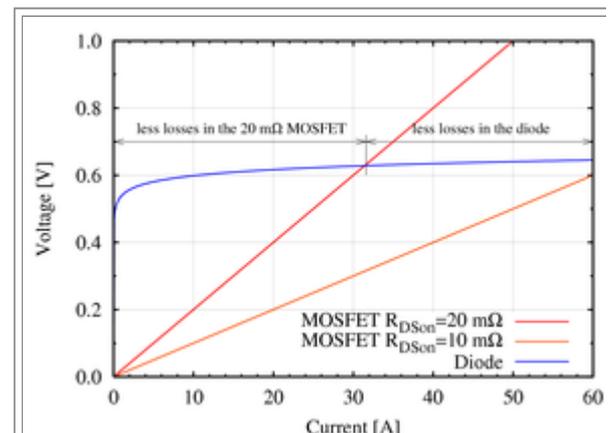
### Regione lineare

La regione lineare, anche detta *regione ohmica*, [4][5] si verifica quando  $V_{GS} > V_{th}$  e  $V_{DS} < (V_{GS} - V_{th})$ .

In questo caso il transistor è acceso, e si è creato il canale che permette il passaggio di corrente tra i terminali source e drain controllato dalla tensione  $V_{GS}$ . Il MOSFET lavora come un resistore e la corrente è data approssimativamente da:



Andamento della corrente del drain in funzione della tensione tra drain e source per vari valori di  $V_{GS} - V_{th}$ . La linea di contorno tra le regioni lineare e di saturazione è rappresentata dal ramo di parabola.



Confronto dell'andamento della tensione in funzione della corrente di un MOSFET in regione lineare e di un diodo.

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left( (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

dove  $\mu_n$  è la mobilità effettiva dei portatori di carica,  $W$  la larghezza del canale,  $L$  la sua lunghezza e  $C_{ox}$  la capacità per unità di superficie.

### Regione di saturazione

La regione di saturazione, anche detta regione attiva, [6][7] si verifica quando  $V_{GS} > V_{th}$  e  $V_{DS} > (V_{GS} - V_{th})$ .

$-V_{tn}$ ).

L'interruttore è chiuso e si è creato un canale che permette alla corrente di scorrere tra *drain* e *source*, ma la corrente non dipende dalla tensione applicata al canale, e quindi il MOSFET non funziona come un resistore, ma come un amplificatore. La corrente è:

$$I_{DSAT} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_{tn})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Il fattore  $\lambda$  tiene conto dell'effetto di modulazione di canale, ed esprime la dipendenza della corrente dalla tensione del drain a causa dell'effetto Early. Da questo si ricava la transconduttanza del MOSFET:

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{th}} = \frac{2I_D}{V_{ov}}$$

dove il termine  $V_{ov} = V_{GS} - V_{th}$  è detto *tensione di overdrive*.<sup>[8]</sup>

Un altro parametro importante nella realizzazione del dispositivo è la resistenza di uscita  $r_O$ , data da:

$$r_O = \frac{1 + \lambda V_{DS}}{\lambda I_D} = \frac{1}{\lambda + V_{DS} I_D}$$

Se  $\lambda$  è posta nulla, la resistenza di uscita diventa infinita, mentre normalmente ha un valore compreso tra 0.1 e 0.001.

## L'effetto body

L'effetto body descrive la dipendenza della tensione di soglia dalla tensione tra gate e source. Per un MOS a canale N si ha:

$$V_{tn} = V_{tn0} + \gamma \left( \sqrt{V_{SB} + 2\phi} - \sqrt{2\phi} \right),$$

dove  $V_{TN}$  è la tensione di soglia,  $V_{tn0}$  il suo valore per  $V_{SB}$  nulla,  $\gamma$  il parametro dell'effetto body e  $2\phi$  il parametro del potenziale di superficie. L'effetto comporta una riduzione della corrente nel canale a parità di tensione applicata al gate.

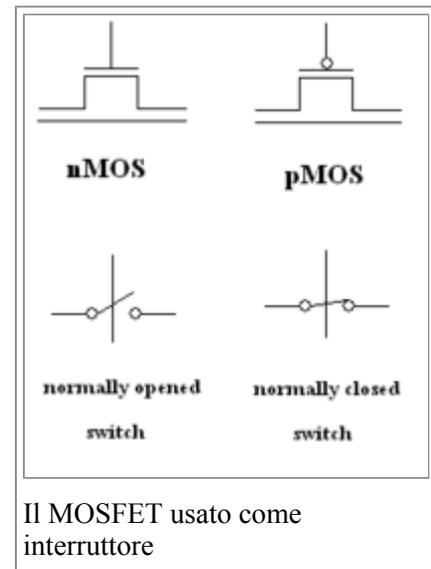
L'equazione che descrive l'effetto body risulta approssimata, dal momento che la tensione del canale non è in generale costante, ma varia man mano che ci si sposta da un potenziale all'altro.

L'effetto body è dovuto alla presenza di capacità parassite tra il canale, sostanzialmente al potenziale del source, ed il substrato del transistor: vi è una partizione capacitiva tra la capacità gate-canale e la capacità canale-substrato. Nel caso in cui il canale sia mantenuto allo stesso potenziale del substrato la capacità canale-substrato è ininfluente poiché è situata tra due nodi alla medesima tensione. Se vi è, al contrario, una differenza di tensione tra source e substrato, le capacità gate-canale e canale-substrato non sono trascurabili, e per ottenere la regione di inversione è necessaria una maggiore differenza di potenziale, il che equivale ad un aumento della tensione di soglia del transistor. Se si definisce pertanto la tensione di soglia senza considerare l'effetto body, nel canale risulta una carica indotta minore di quella aspettata, e questo che comporta un errore in eccesso nella valutazione della corrente del canale.

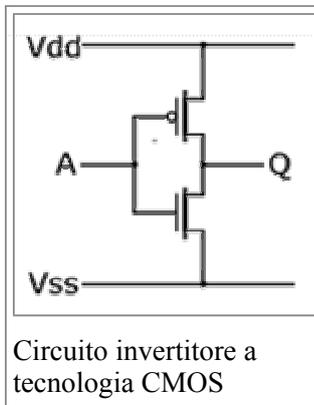
## Il MOSFET nell'elettronica digitale

 Per approfondire, vedi la voce *elettronica digitale*.

Lo sviluppo delle tecnologie digitali ha portato alla supremazia del MOSFET rispetto ad ogni altro tipo di transistor basato sul silicio. La ragione di tale successo è stato lo sviluppo della logica digitale CMOS, che vede nel MOSFET il costituente fondamentale. Il sostanziale vantaggio del dispositivo è il fatto che, idealmente, quando è spento non permette alla corrente di scorrere, e ciò si traduce nella riduzione della potenza dissipata. Alla base di ogni porta logica vi è infatti l'invertitore CMOS, la combinazione di un NMOSFET e di un PMOSFET in parallelo, in un modo tale che quando uno conduce l'altro è spento. Tale dispositivo fornisce un considerevole risparmio energetico e previene il surriscaldamento del circuito, una delle principali problematiche dei circuiti integrati.



Ulteriore vantaggio della tecnologia MOSFET risiede nel fatto che nei circuiti digitali lo strato di ossido tra il gate e il canale impedisce ad ogni corrente in continua di scorrere attraverso il gate, riducendo il consumo di potenza. In uno stato logico distinto questo isola efficacemente un MOSFET dallo stadio precedente e successivo, essendo il terminale di gate solitamente comandato dall'uscita di una porta logica precedente; permettendo inoltre una maggiore facilità nel progettare indipendentemente i vari stadi logici.



### La tecnologia CMOS

 Per approfondire, vedi la voce *CMOS*.

La tecnologia CMOS, acronimo di *complementary metal-oxide semiconductor*, è utilizzata per la progettazione di circuiti integrati, alla cui base sta l'uso dell'invertitore a transistor MOSFET.<sup>[9]</sup> Si tratta di una struttura circuitale costituita dalla serie di una rete di "Pull-Up" ed una di "Pull-Down": la prima s'incarica di replicare correttamente il livello logico alto **LL1** mentre alla seconda è destinata la gestione del livello logico basso **LL0**. La rete di Pull-Up è costituita di soli pMOSFET, che si accendono solo se la tensione presente al gate, misurata rispetto al

source, è minore della tensione di soglia, che per questi particolari componenti equivale a metà tensione di alimentazione. Inversamente la rete di Pull-Down è costituita di soli nMOSFET, che si accendono solo se la tensione presente al gate è maggiore della tensione di soglia. A partire dall'invertitore si costruiscono le porte logiche e quindi i circuiti integrati.

Con la necessità di raggiungere velocità di commutazione sempre maggiori e l'avvento della VLSI la logica CMOS ha visto un ridimensionamento del proprio utilizzo a favore di logiche incomplete quali la Pass Transistor e la logica Domino.

## Il MOSFET nell'elettronica analogica

 Per approfondire, vedi la voce *elettronica analogica*.

Nell'ambito dell'elettronica analogica il MOSFET è nella maggior parte dei casi rimpiazzato dal transistor a giunzione bipolare, considerato migliore soprattutto a causa della sua alta transconduttanza. Tuttavia, data la difficoltà nel fabbricare BJT e MOSFET sullo stesso chip, si usano i MOSFET anche qualora sia richiesta la presenza contemporanea di entrambi i dispositivi, sebbene dagli anni '90 è stato possibile integrare nello stesso wafer transistori MOS e bipolari. Questa logica, chiamata BiCMOS, è particolarmente utile in amplificatori a larga banda e circuiti digitali, anche se il suo uso rimane limitato ai circuiti SSI e MSI a causa di difficoltà nella miniaturizzazione. Anche la possibilità di dimensionare il transistor a seconda delle esigenze di progettazione è un vantaggio rispetto all'uso dei bipolari, le cui dimensioni non influenzano notevolmente le caratteristiche di trasferimento.

I MOSFET sono anche utilizzati nei circuiti analogici come interruttori, e, in regione lineare, come resistori di precisione. In circuiti ad alta potenza, inoltre, sono sfruttati per la loro resistenza alle alte temperature.

## Miniaturizzazione del MOSFET

La tecnologia elettronica trae notevole vantaggio dalla possibilità di ridurre le dimensioni dei circuiti: questo ha portato alla miniaturizzazione dei MOSFET, le cui dimensioni sono passate da vari micrometri all'ordine dei nanometro: i circuiti integrati contengono MOSFET il cui canale ha lunghezza di novanta nanometri o meno. I dispositivi costruiti con un canale più piccolo del micrometro sono detti MOSFET a canale corto, ed hanno caratteristiche corrente-tensione sensibilmente diverse rispetto ai MOSFET di dimensioni maggiori. Storicamente la difficoltà nel ridurre le dimensioni dei MOSFET è stata associata al processo di produzione di componenti a semiconduttore.



Un IC CMOS della serie 4000 in package DIP

### Ragioni per la miniaturizzazione dei MOSFET

Il motivo per il quale si cerca di ottenere MOSFET sempre più piccoli risiede in primis nel fatto che MOSFET più corti lasciano passare meglio la corrente: i MOSFET accesi in regione lineare si comportano come resistori, e la miniaturizzazione ha il fine di ridurre la resistenza. In secondo luogo avere gate più piccoli implica ottenere minore capacità di gate. Questi due fattori contribuiscono a ridurre i tempi di accensione e spegnimento dei transistor stessi, e nel complesso permettono di raggiungere velocità di commutazione più elevate.

Una terza ragione che motiva la riduzione delle dimensioni dei MOSFET è la possibilità di ottenere circuiti più piccoli, il che comporta una maggiore potenza di calcolo a parità di area occupata. Poiché il costo della produzione di circuiti integrati è collegata al numero di chip che possono essere prodotti per wafer di silicio, il prezzo per ogni chip si riduce.

### Problematiche della miniaturizzazione dei MOSFET

La difficoltà nella produzione di MOSFET con lunghezze di canale più corte di un micrometro sono un fattore limitante nell'avanzamento della tecnologia dei circuiti integrati. Le ridotte dimensioni dei MOSFET talvolta possono infatti creare problemi di funzionamento.

### Saturazione della velocità dei portatori

Uno dei problemi maggiori nella progettazione di circuiti contenenti MOSFET scalati è quello della saturazione della velocità dei portatori: con il ridursi della lunghezza di canale, infatti, il campo elettrico presente tra source e drain del dispositivo aumenta sensibilmente a parità di tensione applicata. Questo aumento comporta il raggiungimento da parte degli elettroni (o delle lacune) della velocità detta *velocità di saturazione*. Raggiunta questa velocità, essi non possono essere più ulteriormente accelerati e pertanto la corrente assume un valore costante ed inferiore a quello che avrebbe in saturazione del dispositivo. Questo fenomeno è particolarmente rilevante nelle tecnologie nanometriche e comporta un notevole scarto nei tempi di commutazione delle logiche costruite mediante transistori ad effetto di campo.

### Corrente di sottosoglia

Con la riduzione delle dimensioni la tensione che può essere applicata al gate deve essere ridotta al fine di mantenere l'affidabilità del dispositivo, e la tensione di soglia deve essere ridotta di conseguenza per garantire le prestazioni ottimali. Con tensioni di soglia ridotte il transistor non può spegnersi completamente, formando uno strato con una debole tensione inversa che genera di una corrente di sottosoglia che dissipa potenza. La corrente di sottosoglia non può in questi casi essere trascurata, dal momento che può arrivare a consumare fino al 50% della potenza richiesta dal chip.

### Capacità di interconnessione

Nella tecnologia MOSFET il tempo di ritardo di una porta è approssimativamente proporzionale alla somma delle capacità di gate. Con la miniaturizzazione dei transistor la capacità di interconnessione, cioè la capacità dei conduttori che connettono le diverse parti del chip, crescendo in proporzione al numero di transistori accrescendo i ritardi a scapito delle prestazioni.

### Produzione di calore

L'aumentare della densità di MOSFET in un circuito integrato crea problemi di dissipazione termica, sia negli stessi dispositivi attivi, sia nelle interconnessioni. Se il calore prodotto nel circuito integrato non viene smaltito in modo opportuno si può riscontrare la distruzione del dispositivo o comunque la riduzione del tempo di vita del circuito. L'aumentare della temperatura rallenta inoltre il funzionamento dei circuiti, dal momento che si riduce la mobilità degli elettroni e delle lacune. La maggior parte dei circuiti integrati, in particolare i microprocessori, possono funzionare solo con opportuni dissipatori di calore o con sistemi che ne aiutano il raffreddamento: in un microprocessore di ultima generazione la densità di corrente che attraversa le interconnessioni può arrivare all'ordine di  $10^6 A / cm^2$ , mentre nelle abitazioni la densità di corrente che raggiungono i cavi della rete elettrica non supera i  $100 A / cm^2$ .



Sistema di raffreddamento di un processore in una scheda madre

### La corrente di gate

L'ossido di gate, isolante tra il gate e il canale, è il più sottile possibile al fine di permettere un maggiore flusso di corrente quando il transistor è acceso, portando a migliori prestazioni e ad una ridotta corrente di sottosoglia quando il transistor è spento. Con ossidi di spessore di circa 2 nanometri si sviluppa un effetto tunnel per le cariche tra il gate e il canale, responsabile di una

piccola corrente che porta a un aumento del consumo di potenza.

Isolanti dotati di una costante dielettrica maggiore dell'ossido di silicio, come l'ossido di afnio, vengono studiati per ridurre la corrente di gate. Aumentare la costante dielettrica del materiale costituente l'ossido di gate permette di creare uno strato più spesso, mantenendo un'alta capacità e riducendo l'effetto tunnel. È importante considerare l'altezza della barriera del nuovo ossido di gate: la differenza di energia in banda di conduzione tra semiconduttore e ossido, e la corrispondente differenza di energia in banda di valenza, hanno effetti anche sul livello della corrente di perdita. Per quanto riguarda l'ossido di gate tradizionale, il biossido di silicio, questa barriera è di circa 3 eV. Per molti altri dielettrici questo valore è molto più basso, il che nega i benefici che si possono avere da una costante dielettrica più elevata.

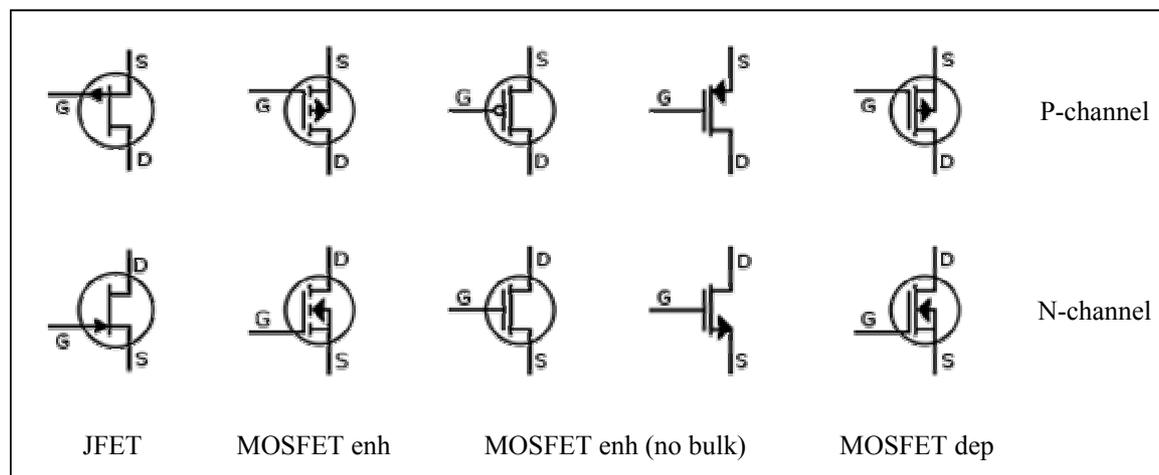
### Cambiamenti nel processo di produzione

Con MOSFET sempre più piccoli il numero degli atomi di silicio che influiscono sulle proprietà dei transistor diminuisce fino a poche centinaia di atomi. Durante la produzione di chip il numero di atomi usati per produrre il transistor può variare significativamente, compromettendo le caratteristiche del transistor.

## Simbolo circuitale

I simboli circuitali dei MOSFET sono molteplici, tutti caratterizzati dall'avere i tre terminali, gate, source e drain, identificati da una linea: quella del gate è perpendicolare alle altre due. La connessione del substrato è mostrata da una freccia che punta da P a N, cioè nel caso di un nMOS, il cui substrato ha drogaggio di tipo *p*, punta dal bulk al canale. Il contrario accade per il pMOS, e questo permette di distinguere gli nMOS dai pMOS. Nel caso il terminale di bulk non sia mostrato, si usa il simbolo invertente (un pallino in prossimità del gate) per identificare i pMOS; in alternativa una freccia sul source indica l'output per il nMOS o l'input per il pMOS.

Di seguito il confronto tra i vari simboli di MOSFET e JFET:



Per i simboli in cui è mostrato il terminale di bulk, esso appare connesso al source: questa è una configurazione tipica, ma non è l'unica possibile. In generale il MOSFET è un dispositivo a quattro terminali.

## Capacità parassite

All'interno di ogni transistor ad effetto di campo vi sono un certo numero di capacità parassite, elencate di seguito a proposito del MOSFET.

## Capacità $C_{gb}$

Il campo elettrico generato da una tensione applicata tra gate e bulk produce l'accumulazione di cariche in prossimità di entrambi i terminali: la carica del condensatore MOS così ottenuto è quindi formata da contributi che variano al variare della tensione. All'aumentare della tensione la zona svuotata si ingrandisce e la forza esercitata sulle lacune diventa sempre meno efficace, mentre gli elettroni aumentano in modo pressoché lineare una volta superata la tensione di soglia. Nel caso di canale completamente formato, la capacità del condensatore MOS  $C_{gb}$  è costante e pari al valore:

$$C_{gb} = C_{ox}WL$$

con

$$C_{ox} = \frac{E_{ox}}{T_{ox}}$$

la capacità dell'ossido, dove  $T_{ox}$  è lo spessore dell'ossido,  $E_{ox}$  il campo elettrico e  $WL$  le dimensioni geometriche del canale precedentemente definite.

## Capacità associate alle giunzioni PN

A ogni giunzione PN si può associare una capacità in regime dinamico. Le capacità parassite di questo tipo sono innanzitutto le capacità  $C_{db}$  della giunzione drain–bulk e  $C_{sb}$ <sup>[10]</sup> della giunzione source–bulk. Solitamente tali capacità non influiscono molto, essendo le giunzioni polarizzate inversamente, dal momento che nel caso di un nMOS il bulk si trova al potenziale più basso e nel caso di un pMOS al potenziale più alto.

Vi sono inoltre le capacità  $C_{gs}$  della giunzione gate-source e  $C_{gd}$  della giunzione gate-drain.<sup>[10]</sup> A livello teorico le zone di source e drain dovrebbero essere affiancate al gate, mentre in pratica risulta una leggera sovrapposizione del gate con il source e il drain per garantire la continuità della struttura, dal momento che un minimo spazio tra gate e source o drain genererebbe un malfunzionamento.<sup>[11]</sup>

## Tipologie particolari di MOSFET

### MOSFET a svuotamento

Il MOSFET tradizionale viene detto "ad arricchimento", a distinzione dei dispositivi "a svuotamento", o *depletion*, cioè MOSFET drogati in modo che il canale esista anche se non è applicata alcuna tensione. Quando si applica una tensione al gate il canale si svuota, riducendo il flusso di corrente attraverso il transistor. In sostanza un MOSFET a svuotamento si comporta come un interruttore aperto, mentre una MOSFET ad arricchimento si comporta di norma come un interruttore chiuso.

Tali transistor, in struttura a tetrodo, si utilizzano negli stadi amplificatori e mixer RF per diversi dispositivi, in particolare televisori, grazie alla caratteristica di avere un alto rapporto guadagno-capacità ed un basso rumore in banda RF, pur avendo un punto di ginocchio  $I/f$  tanto alto da

pregiudicarne l'uso come oscillatore.

Tra i mosfet depletion più diffusi vi sono le famiglie BF 960 Siemens e BF 980 Philips, datate 1980, i cui discendenti sono tuttora i componenti più diffusi nei gruppi di sintonia.

## DMOS

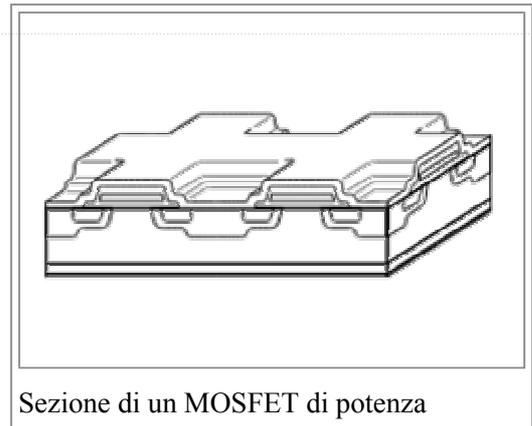
DMOS sta per *Double Diffused MOS*, cioè MOS a doppia diffusione. Esistono i MOS a doppia diffusione laterale (Lateral Double-diffused MOS - LDMOS) e i MOS a doppia diffusione verticale (Vertical Double-diffused MOS - VDMOS).

## Mosfet di potenza



Per approfondire, vedi la voce **MOSFET di potenza**.

Il MOSFET di potenza ha avuto grande importanza nelle applicazioni tecnologiche moderne, tra le quali gli amplificatori, gli inverter e gli alimentatori switching. Il principale vantaggio rispetto ai tradizionali transistor è la struttura verticale, che permette di sostenere alti valori di tensione e corrente.<sup>[12]</sup> La tensione dipende dal drogaggio e dallo spessore degli strati di semiconduttore che lo compongono, mentre la corrente dipende dalle dimensioni del canale. Il guadagno in corrente del MOSFET di potenza può essere considerato idealmente infinito, cosicché gli stadi di pilotaggio possano essere semplificati, ed è caratterizzato da un basso valore della *RDSon*, cioè della resistenza che il componente oppone al passaggio della corrente tra drain e source in condizione di saturazione.



Sezione di un MOSFET di potenza

Le caratteristiche dei singoli modelli di mosfet di potenza variano in funzione delle specifiche richieste, ed appare evidente la necessità di scegliere accuratamente il modello di mosfet necessario per ogni singola applicazione, evitando di sovradimensionare eccessivamente la tensione massima rispetto a quella di lavoro.

## Note

- <sup>^</sup> <http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1960-MOS.html>
- <sup>^</sup> P R Gray, P J Hurst, S H Lewis, and R G Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits* , New York, Wiley, 2001. ISBN 0-471-32168-0
- <sup>^</sup> P. R. van der Meer, A. van Staveren, A. H. M. van Roermund, *Low-Power Deep Sub-Micron CMOS Logic: Subthreshold Current Reduction* , Dordrecht, Springer, 2004. ISBN 1402028482
- <sup>^</sup> C Galup-Montoro & Schneider MC, *MOSFET modeling for circuit analysis and design* , London/Singapore, World Scientific, 2007. 83 ISBN 981-256-810-7
- <sup>^</sup> Norbert R Malik, *Electronic circuits: analysis, simulation, and design* , Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1995. 315–316 ISBN 0-02-374910-5
- <sup>^</sup> PR Gray, PJ Hurst, SH Lewis & RG Meyer, §1.5.2 p. 45 , ISBN 0-471-32168-0
- <sup>^</sup> A. S. Sedra and K.C. Smith, *Microelectronic circuits* , New York, Oxford, 2004. ISBN 0-19-514251-9
- <sup>^</sup> A. S. Sedra and K.C. Smith, p. 250, Eq. 4.14 , ISBN 0-19-514251-9
- <sup>^</sup> Computer History Museum - The Silicon Engine | 1963 - Complementary MOS Circuit Configuration is Invented
- <sup>^</sup> <sup>a</sup> <sup>b</sup> Micrel - micrel
- <sup>^</sup> Ic.hqu.edu - MOSFET Capacitances
- <sup>^</sup> *Power Semiconductor Devices*, B. Jayant Baliga, PWS publishing Company, Boston. ISBN 0-534-

94098-6

## Altri progetti

- Wikimedia Commons** contiene file multimediali sul **MOSFET**

## Voci correlate

- Diodo
- Semiconduttore
- Dispositivi a semiconduttore
- Valvola termoionica
- Transistor a giunzione bipolare
- Effetto Early
- JFET
- CMUT
- MESFET
- IGBT
- Modello Mosfet EKV
- Icefet

Categorie: Acronimi | Transistor | Semiconduttori | Dispositivi elettronici

---

- Ultima modifica per la pagina: 12:42, 23 mag 2010.
- Il testo è disponibile secondo la licenza Creative Commons Attribuzione-Condividi allo stesso modo; possono applicarsi condizioni ulteriori. Vedi le condizioni d'uso per i dettagli. Wikipedia® è un marchio registrato della Wikimedia Foundation, Inc.