

Capitolo 1

Il transistor MOSFET

L'obiettivo di questo capitolo è quello di discutere il funzionamento del transistor MOSFET e degli effetti delle radiazioni ionizzanti su di esso. In particolare, nella prima sezione verranno spiegati brevemente i concetti di:

- MOSFET a canale N e a canale P
- Regioni di funzionamento del transistor
- Modello per piccolo segnale
- Sorgenti di rumore presenti in un MOSFET

Nella seconda parte si introdurranno gli effetti delle radiazioni ionizzanti sui dispositivi MOSFET e come mitigare questi danni, oltre a spiegare che cosa rappresenta la *Total Ionizing Dose* (*TID*) e quali unità di misura vengono utilizzate.

1.1 Transistore MOSFET

Il transistor MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) è un dispositivo elettronico utilizzato sia in circuiti digitali, principalmente come interruttore controllato in tensione, sia in circuiti analogici, come amplificatori di segnale o come resistenze controllate in tensione.

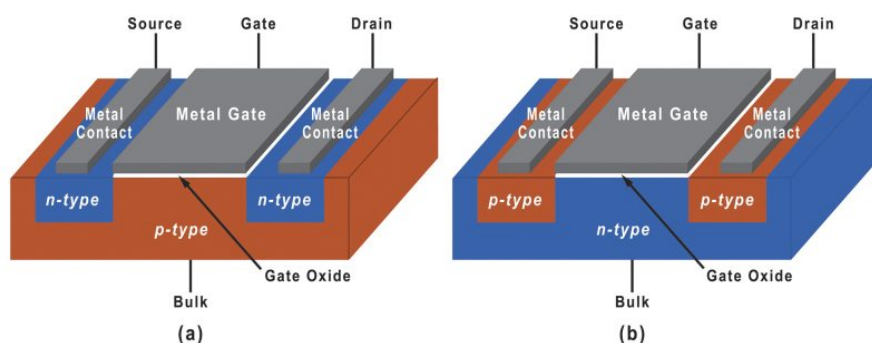


Figura 1.1: MOSFET a canale N (a) e a canale P (b)

Come mostrato nella figura 1.1, i MOSFET sono caratterizzati da quattro terminali: Source (S), Drain (D), Gate (G) e Bulk (B). Il MOSFET a canale N viene realizzato su un substrato di tipo P in cui sono innestate due regioni fortemente drogate di tipo N. Queste due regioni presentano delle metallizzazioni che formano i terminali di Source e di Drain. Sul substrato, tra le due regioni fortemente drogate, è presente un sottile strato di ossido che fa da isolante (storicamente SiO_2 , attualmente si usano anche altri ossidi) sopra il quale si trova una metallizzazione che forma il contatto di Gate. Il Bulk (o Substrato) è il terminale che si collega solitamente con il Source.

1.1.1 Regioni di funzionamento e caratteristica $I - V$

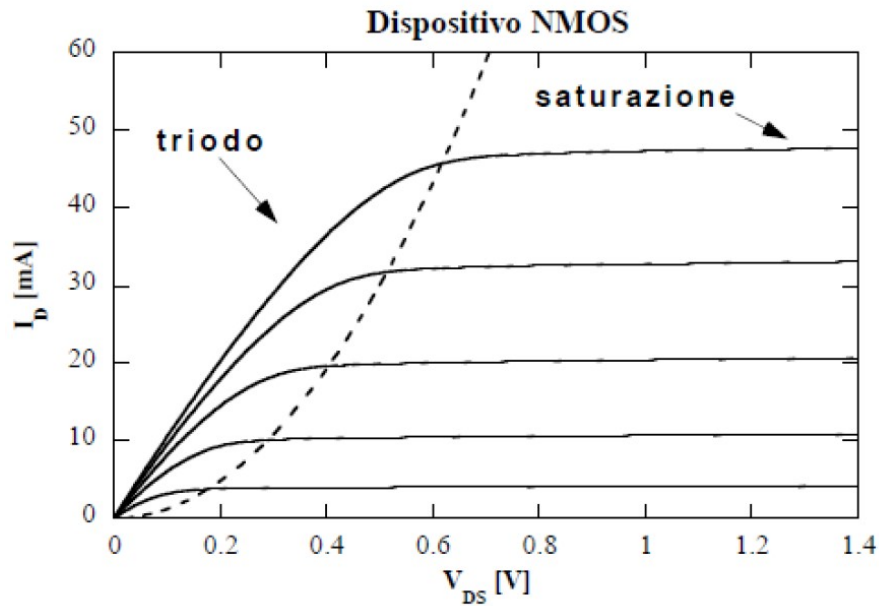


Figura 1.2: Caratteristica $I - V$ di un MOSFET a canale N

In un MOSFET a canale N, in linea generale, può scorrere una corrente I_D che va dal Drain al Source in funzione di due tensioni (sempre non negative):

- la tensione presente tra Drain e Source (V_{DS});
- la tensione presente tra Gate e Source (V_{GS}).

La dipendenza di I_D da tali tensioni è messa in evidenza dalla caratteristica corrente-tensione (figura 1.2).

Quando $V_{GS} = 0$, indipendentemente dal valore di V_{DS} , la corrente I_D è nulla, poiché la giunzione P-N composta da substrato e Drain e quella formata da substrato e Source sono in regione inversa.

Aumentando il valore di V_{GS} , le lacune presenti nel substrato si allontanano dalla regione direttamente al di sotto dell'ossido, creando una zona svuotata di portatori di carica liberi. Gli elettroni presenti nel semiconduttore vengono attirati creando una regione di canale di tipo N che unisce il Source e il Drain. Questo canale permette il passaggio di corrente, ma per crearlo è necessario che V_{GS} abbia un valore almeno pari alla cosiddetta tensione di soglia (V_{th}). Finché $V_{GS} < V_{th}$, il MOSFET si trova in regione di *cutoff* e $I_D \simeq 0$.

Nel momento in cui V_{GS} eguaglia e supera V_{th} , il canale di conduzione è completo e inizia a scorrere corrente, seguendo leggi matematiche differenti in funzione del valore di V_{DS} .

Se $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$, il MOSFET è in regione lineare o di triodo e la corrente di Drain segue la seguente legge:

$$I_D = 2k_n \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

dove

$$k_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

μ_n = mobilità degli elettroni

C_{ox} = capacità dell'ossido

W = larghezza del canale

L = lunghezza del canale

Se, invece, $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ il MOSFET si trova in regione di saturazione e la corrente di Drain ha un andamento lineare che segue la legge:

$$I_D = k_n (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

dove λ è un fattore matematico ricavato dalla caratteristica I-V ottenuta sperimentalmente.

Tutto quanto detto finora sui MOSFET a canale N vale in maniera analoga per i MOSFET a canale P. Altri parametri verranno descritti nel prossimo capitolo.

1.1.2 Modello per piccolo segnale e sorgenti di rumore

Il modello per piccolo segnale rappresenta il funzionamento del MOSFET nel momento in cui si fissa il punto di lavoro in continua e si fornisce in ingresso al dispositivo un segnale con un'ampiezza sufficientemente piccola da non alterarne il funzionamento.

In prima approssimazione, il MOSFET si comporta come un generatore di corrente controllato in tensione che emette una corrente proporzionale al valore di V_{GS} . La costante di proporzionalità è la transconduttanza di canale g_m , che dipende dal punto di lavoro ed è descritta meglio al paragrafo 2.3. Un modello più accurato prevede che, quando il MOSFET è in saturazione, la corrente di Drain dipenda anche da V_{DS} in modo

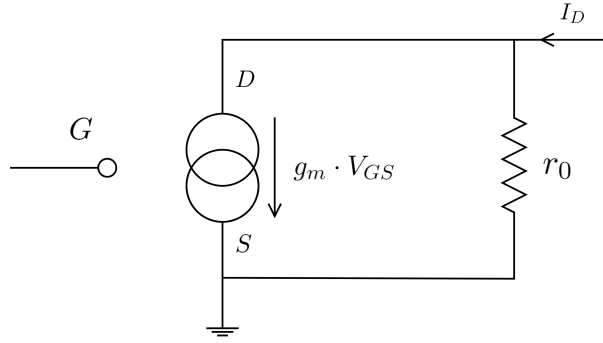


Figura 1.3: Modello piccolo segnale

lineare. Nel circuito equivalente per piccolo segnale, perciò, in parallelo al generatore di corrente, è presente una resistenza $r_0 = \frac{1}{\lambda I_{D,sat}}$ che viene attraversata da una corrente prodotta dalla differenza di tensione tra Drain e Source e che va a sommarsi a quella generata dal generatore ideale, figura 1.3.

Per comprendere al meglio l'effettivo comportamento dei MOSFET, però, bisogna considerare che il segnale in uscita al MOSFET subisce delle interferenze dovute al rumore generato all'interno del dispositivo stesso. Esistono diverse sorgenti di rumore; qui di seguito si descrivono le principali.

Rumore termico di canale o rumore bianco Il canale di un dispositivo è composto da materiale resistivo e quindi è sorgente di rumore termico. Tale sorgente può essere rappresentata come un generatore di segnale la cui densità spettrale segue la seguente legge:

$$S_{I_d} = \frac{4K_B T}{L^2 I_D} \int_0^{V_{DS}} g^2(V') dV'$$

dove K_B è la costante di Boltzmann, T è la temperatura assoluta e $g(V')$ è la conduttanza di canale misurata nel punto in cui la tensione rispetto al source vale V' . Questa equazione può essere semplificata in maniera differente in funzione della lunghezza del canale. Infatti, se tale dimensione è nell'ordine delle frazioni di micron, subentrano i cosiddetti effetti di canale corto, che comportano l'aumento del rumore e che non possono essere ignorati. Poiché tutti i dispositivi presi in considerazione ricadono in questa categoria, la trattazione del rumore termico di canale si concentra sulla descrizione della legge matematica legata ai dispositivi a canale corto, ovvero ¹:

$$S_w = 4K_B T \frac{\alpha_w n_{sub} \gamma}{g_m}$$

α_w è il fattore di rumore in eccesso che tiene conto degli effetti di canale corto. Generalmente ha valore maggiore di 1, ma analisi approfondite sui dispositivi studiati hanno

¹ $S_w = S_{I_d}$ riferita al Gate del MOSFET

messo in luce che i MOSFET utilizzati con lunghezza di canale $L = 30nm$ hanno un fattore α_w anomalo. n_{sub} è un coefficiente proporzionale al reciproco della pendenza della caratteristica $I_D - V_{GS}$ nella regione di sottosoglia. γ è il coefficiente di rumore termico di canale che, per i dispositivi nanometrici, può essere espresso come:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{I_{DL}}{I_Z^* W}} \left(\frac{1}{2} + \frac{2I_{DL}}{3I_Z^* W} \right)$$

dove I_Z^* è la corrente di Drain caratteristica normalizzata, ovvero la corrente che separa la regione di triodo da quella di saturazione.

Il rumore termico di canale può essere anche espresso sotto forma di resistenza equivalente R_{eq} , tramite l'equazione:

$$R_{eq} = \frac{S_w}{4K_B T} = \alpha_w \frac{n_{sub} \gamma}{g_m}$$

Flicker Noise Generalmente, a basse frequenze, prevale una componente di rumore del tipo $1/f$, la cui densità spettrale è inversamente proporzionale alla frequenza del segnale:

$$S_{\frac{1}{f}}(f) = \frac{K_f}{C_{ox}^2 W L} \frac{1}{f^{\alpha_f}}$$

dove K_f è un parametro che dipende dalla tecnologia e α_f tiene conto della dipendenza dalla frequenza.

Le cause più probabili di questo comportamento sono:

- fluttuazione casuale del numero dei portatori di carica dovuta a fenomeni di generazione e ricombinazione, prevalente nei dispositivi a canale N,
- fluttuazione della mobilità dei portatori di carica a causa di fenomeni di scattering con le impurità presenti nel cristallo, prevalente nei dispositivi a canale P.

A parità di tecnologia, polarizzazione e dimensioni, il flicker noise è minore nei MOSFET a canale P, rispetto a quelli a canale N. Infine, il processo di *scaling* dei dispositivi influenza la quantità di questo tipo di rumore: analizzando l'equazione della densità spettrale, si nota come la riduzione delle dimensioni del canale comportano un aumento di rumore. Al contrario, la diminuzione dello spessore del Gate porta all'aumento della sua capacità e quindi ad una riduzione del rumore. Allo stesso tempo, però, un Gate più fine è soggetto a maggiore degrado, quindi il fattore K_f potrebbe non diminuire come aspettato.

Rumore Lorentziano Il rumore Lorentziano, o *Random Telegraph Signal (RTS)*, è causato dall'intrappolamento e rilascio dei portatori di carica da parte di trappole presenti nella regione di svuotamento tra il canale di conduzione e l'ossido. Questo tipo di rumore è maggiormente presente nei dispositivi soggetti a grandi dosi di radiazioni e fluenze neutroniche, che producono nel reticolo cristallino dei difetti che fungono da centri di intrappolamento. La riduzione di spessore del Gate comporta un aumento del numero delle trappole, poiché soggetto a maggior degrado.

Rumore associato alla corrente di Gate Fino ad ora si è considerata solo la corrente I_D che va da dal Drain al Source (o viceversa, in base al tipo di canale). In realtà esiste anche una corrente I_G che attraversa il Gate, che in generale, appunto, è trascurabile, se confrontata con I_D . Infatti l'ossido presente tra la metallizzazione del Gate e il substrato fa da barriera di potenziale all'iniezione dei portatori di carica. Questa barriera può essere comunque attraversata dai portatori con temperatura (e quindi energia cinetica) maggiore. Con la riduzione dello spessore del gate, l'energia necessaria per iniettare i portatori attraverso il Gate diminuisce e quindi I_G diventa meno trascurabile.

Altre sorgenti di rumore Ci sono infine sorgenti di rumore legate alle resistenze presenti nel Gate e nel substrato e alle resistenze parassite di Drain e Source.

1.2 Effetti delle radiazioni sui transistori MOSFET

Gli effetti principali delle radiazioni su dispositivi elettronici possono essere di due categorie [3]:

- Danno da spostamento (DD), dislocazione degli atomi dai loro siti reticolari,
- Ionizzazione, generazione di coppie elettrone-lacuna ($e - h$).

1.2.1 Danno da spostamento

Quando una particella (neutrone) possiede abbastanza energia tale da poter dislocare un atomo al di fuori dalla sua posizione normale all'interno reticolo, avviene il danno da spostamento (*Displacement damage*); ne risulta che le caratteristiche elettroniche del materiale vengano alterate. Inoltre, può verificarsi che l'atomo colpito generi a sua volta altri DD , a patto che abbia abbastanza energia. L'energia minima da trasferire ad un atomo per far sì che si generi un danno da spostamento nel silicio è di 20eV .

Mentre il danno da spostamento non è molto rilevante sui MOSFET, la ionizzazione può comportare variazioni dei parametri elettrici come guadagno e tensione di soglia; per questi motivi ci concentreremo solo sugli effetti della ionizzazione.

1.2.2 Ionizzazione

La creazione di coppie $e - h$ all'interno del dispositivo MOSFET è provocata dalla ionizzazione che a sua volta è generata dal passaggio di una o più particelle che depositano una certa quantità di energia, nel materiale. Esiste una proporzionalità diretta tra il numero di coppie elettrone-lacuna e l'energia depositata da parte della particella, che collide con il dispositivo. Per esempio, nel silicio si ha una costante di $\frac{1}{3,6\text{eV}}$ mentre per il biossido di silicio è di $\frac{1}{18\text{eV}}$ [2].

Negli isolanti, come l'ossido di gate dei transistori MOSFET, l'effetto della ionizzazione è cumulativo. Gli elettroni liberati da una particella ionizzante si possono muovere facilmente soprattutto grazie a effetti di campo dovuti, ad esempio, a polarizzazioni. Al contrario, le lacune sono molto meno mobili, dai 5 ai 12 ordini di grandezza inferiori, rispetto agli elettroni. La maggior parte delle lacune riesce a sopravvivere alla ricombinazione con gli elettroni, creando perciò una carica positiva vicino alla giunzione Si/SiO_2 . Un aumento della carica positiva ha come effetto la diminuzione della tensione di soglia dei MOSFET a canale P; invece negli NMOS, dopo aver subito bassi dosaggi (inferiori a $10Mrad$), si può notare un abbassamento della tensione di soglia, mentre per dosi superiori un innalzamento. Questo andamento è dato da due fattori:

1. Cariche positive intrappolate nell'ossido
2. Cariche negative presenti nelle trappole all'interfaccia²

Mentre la prima provoca l'abbassamento della tensione di soglia, la seconda, all'aumentare della dose assorbita, aumenta d'intensità, sovrastando il primo effetto e incrementando la presenza di elettroni all'interfaccia con conseguente aumento della V_{th} .

Un'altro effetto presente solo negli NMOS è quello della formazione di transistor parassiti [1]. Questo effetto è dovuto all'aumento delle cariche positive nella *shallow trench isolation* (STI), comportando un aumento degli elettroni nel substrato (figura 1.4) che, a loro volta, creano un canale conduttivo tra source e drain, aggirando quello principale. Questo collegamento fa sì che possa esserci un flusso di corrente anche quando il dispositivo è polarizzato con una $V_{GS} \simeq 0$.

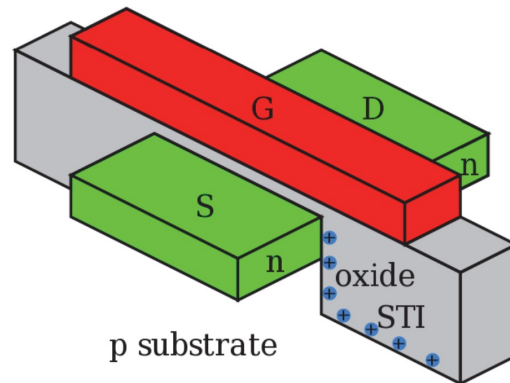


Figura 1.4: Accumulo delle lacune nella *shallow trench isolation* [1].

Poiché gli effetti delle radiazioni sui MOSFET precedentemente elencati sono maggiori sui dispositivi a canale N, in passato si è consolidata la preferenza ad utilizzare i PMOS

²Le trappole all'interfaccia sono imperfezioni o difetti presenti alla giunzione Si/SiO_2 che possono intrappolare delle cariche. Queste trappole aumentano all'aumentare della dose assorbita

essendo più tolleranti alla ionizzazione. L'evoluzione di tecnologie MOSFET sempre più piccole, però, ha comportato un aumento della resistenza alle radiazioni ionizzanti, riducendo correnti di perdita, I_{off} e variazioni della tensione di soglia (figura 1.5).

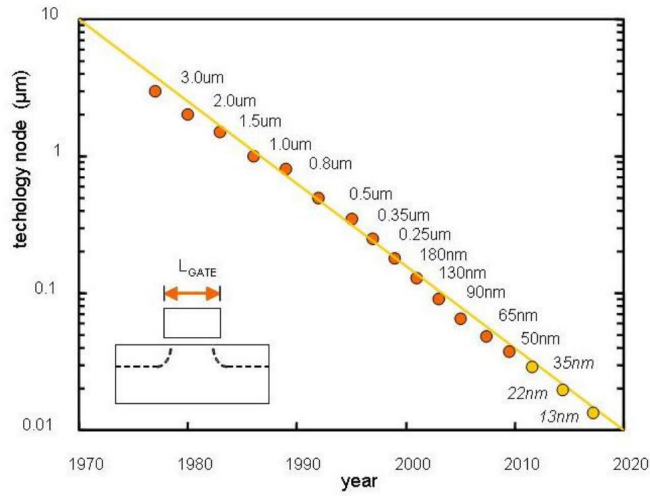


Figura 1.5: Evoluzione delle dimensioni nei dispositivi elettronici [6]

La ricottura dell'ossido (*oxide anneals*) è una procedura volta a ripristinare, almeno in parte, le caratteristiche del MOSFET a seguito dell'assorbimento di radiazioni. Questo processo consiste nel neutralizzare le lacune scaldando il dispositivo e facendo sì che gli elettroni presenti acquisiscano abbastanza energia per potersi ricombinare con le lacune. Per questo lavoro di tesi, sono stati portati ad una temperatura di 100°C per ventiquattro ore. La ricottura può avvenire anche a temperatura ambiente, ma i tempi per osservare effetti significativi sarebbero molto lunghi, anche di anni [2].

1.2.3 Misura della dose

La quantità di radiazioni ionizzanti assorbite da un materiale viene chiamata *TID* (*total ionizing dose*) ed è espressa in energia su unità di massa. La *TID* normalmente è misurata in *rad* (*radiation absorbed dose*), definito come $100\text{erg} = 100 \cdot 10^{-7}\text{J}$ per grammo di materiale. Un'altra unità di misura per la *TID*, accolta anche dal sistema internazionale, sono i *gray* (*Gy*), dove $1\text{Gy} = 100\text{rad} = 1\frac{\text{J}}{\text{Kg}}$. Data l'esistenza di una dipendenza tra quantità di energia persa e il materiale su cui essa si deposita, spesso insieme all'unità di misura si indica anche il materiale; ad esempio, nel caso del biossido di silicio si indica *rad(SiO₂)*.