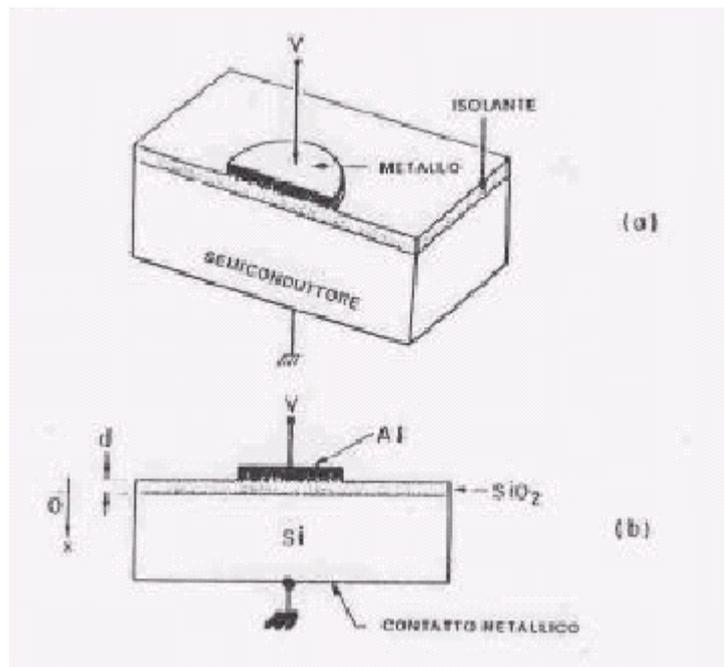
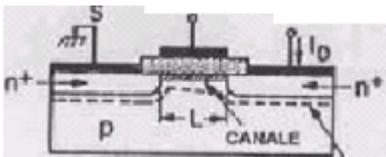


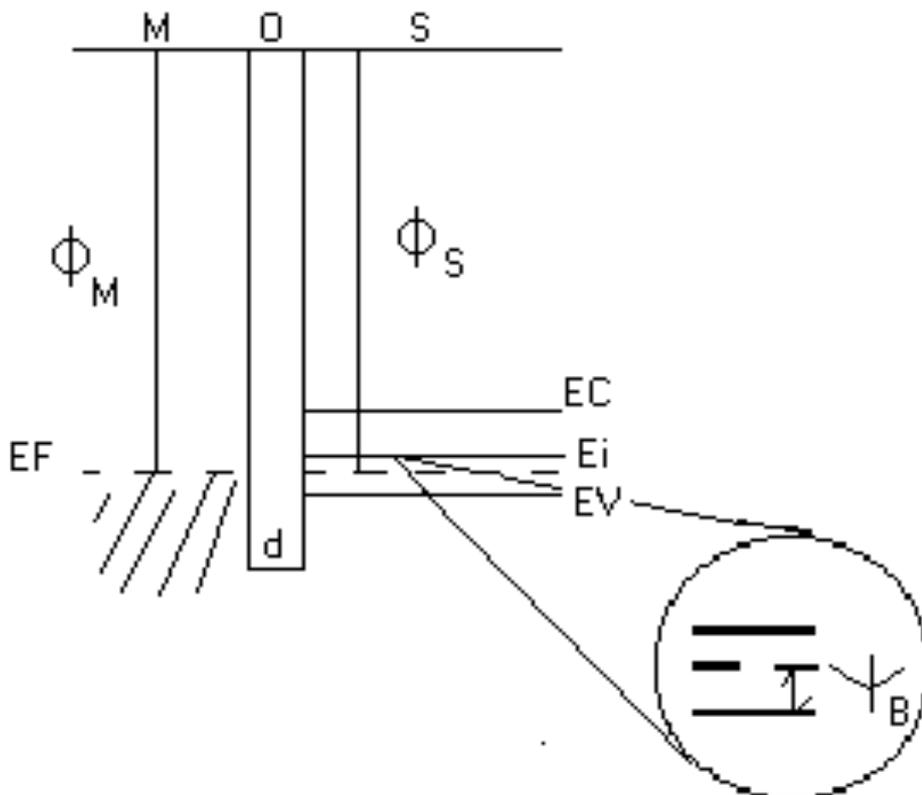
Il sistema MOS (Metallo – Ossido – Semiconduttore)

Il dispositivo a effetto di campo più diffuso è il transistor MOSFET. Si tratta di un dispositivo a tre terminali in cui la tensione applicata al terminale di gate controlla la corrente che scorre nel canale che collega gli altri due terminali. Il gate è elettricamente isolato dal canale. In questo caso, tale isolamento è realizzato attraverso una struttura, che è essenzialmente un condensatore, che prende il nome di MOS (o MIS = Metallo – Isolante – Semiconduttore)



Funzionamento della struttura MOS

Consideriamo dunque una struttura MOS, di cui disegneremo il diagramma a bande, all'equilibrio termodinamico e di cui considereremo il comportamento sotto l'azione di una tensione applicata tra l'elettrodo superiore (quello che sarà poi il gate del MOSFET) e il semiconduttore. Per convenzione, si considera positiva la tensione applicata se il potenziale del metallo è positivo rispetto a quello del semiconduttore. Nel seguito considereremo sempre un semiconduttore di tipo p



Funzionamento della struttura MOS

Il diagramma a bande si costruisce imponendo che, all'equilibrio, il livello di Fermi sia costante e il livello del vuoto sia continuo (come per i sistemi metallo-semiconduttore). Nel caso particolare in cui, come nella figura precedente, la funzione lavoro del metallo sia pari a quella del semiconduttore, le bande sono piatte. Questa condizione è per l'appunto detta condizione di banda piatta. Nel seguito faremo uso di questa ipotesi nel trattare il comportamento del dispositivo in risposta ad una tensione, anche se, si badi bene, non è affatto necessaria per portare avanti la trattazione. Si tratta semplicemente di una ipotesi semplificativa, che verrà poi rimossa senza sostanziali modifiche delle teoria.

E' invece fondamentale fare uso di altre due ipotesi che riguardano il ruolo dell'isolante:

- 1) L'ossido è privo di cariche
- 2) L'ossido ha resistività infinita

Ovvero, attraverso l'ossido non può passare alcuna corrente continua

Funzionamento della struttura MOS

Ci sono poi ulteriori ipotesi che si considerano valide quando si studia il comportamento del MOS in condizione di polarizzazione.

Esse sono:

- 1) Il metallo è perfettamente equipotenziale (in microelettronica per fare il gate si usa in genere l'alluminio, oppure il poli-silicio molto drogato)
- 2) Il semiconduttore è uniformemente drogato
- 3) Il semiconduttore è sufficientemente spesso (cioè c'è un'ampia zona neutra)
- 4) Il generatore di tensione è collegato al semiconduttore tramite un contatto ohmico ideale (ovvero senza cadute di tensione di contatto)
- 5) Non ci sono effetti di bordo, per cui il problema può essere considerato puramente unidimensionale

Quando si applica una tensione al sistema MOS, di qualunque segno sia la tensione, il livello di Fermi nel metallo dista dal livello di Fermi nel semiconduttore di una quantità pari, in elettronvolt, alla tensione applicata (in Volt). D'altra parte, data la presenza dell'ossido, non ci può essere passaggio di corrente dal metallo al semiconduttore. Pertanto, applicando una tensione, il livello di Fermi rimane costante nel metallo e nel semiconduttore rispettivamente.

Funzionamento della struttura MOS

Quindi,

Se $V < 0$ il livello di Fermi del metallo è superiore a quello del semiconduttore

Se $V > 0$ il livello di Fermi del metallo è inferiore a quello del semiconduttore

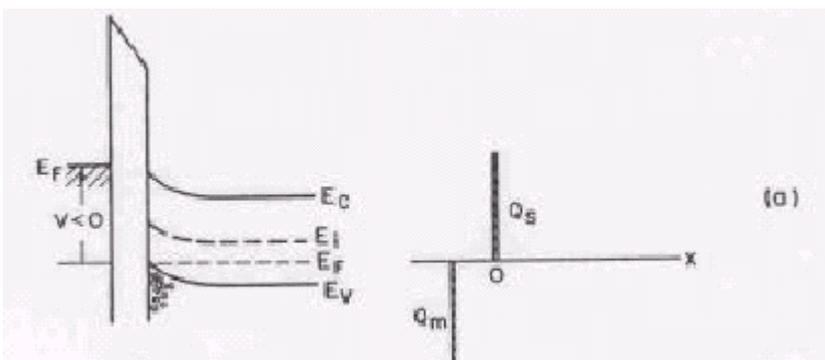
Il diagramma a bande si costruisce tenendo presente la regola della continuità del livello del vuoto. Il materiale isolante viene schematizzato come se fosse un semiconduttore con un gap estremamente ampio.

Si tenga inoltre presente che nel semiconduttore, ove il livello di Fermi è costante, continuano a valere le relazioni:

$$p = n_i e^{-\frac{E_i - E_F}{kT}}$$

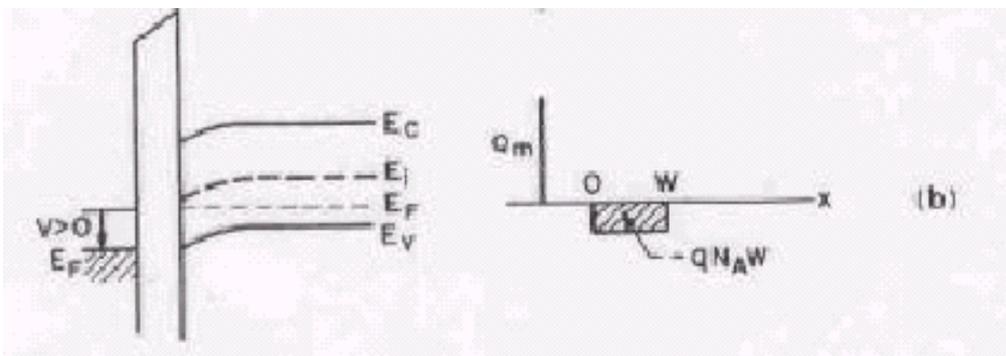
$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$$

Caso $V < 0$: le bande si incurvano verso l'alto, in superficie $E_i - E_F$ aumenta \rightarrow accumulo di lacune



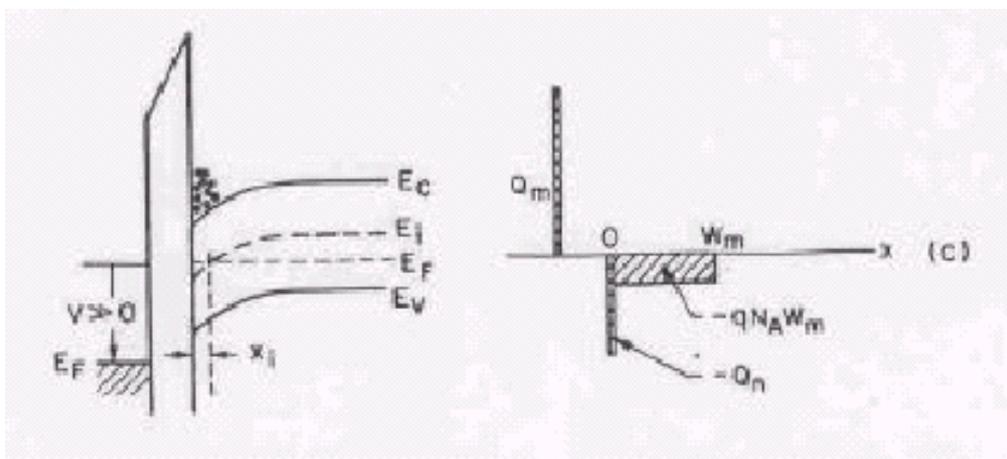
Funzionamento della struttura MOS

Caso $V > 0$ (ma non troppo) : le bande si incurvano verso il basso, in superficie $E_i - E_F$ diminuisce \rightarrow svuotamento di lacune. Si crea una regione di carica spaziale di ampiezza W .



Caso $V \gg 0$: le bande si incurvano verso il basso, in superficie $E_i - E_F$ diminuisce fino a cambiare segno \rightarrow accumulo di elettroni.

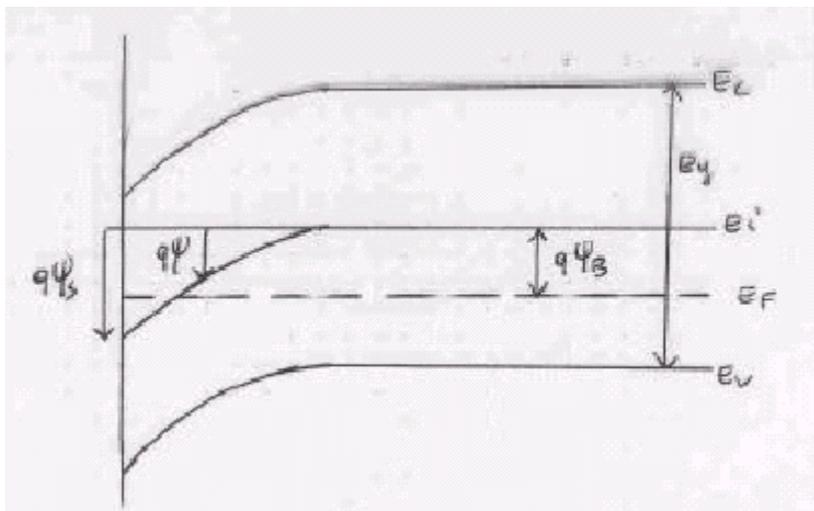
Questa situazione è detta **INVERSIONE DI POPOLAZIONE**.



Funzionamento della struttura MOS

Oltre alla regione svuotata, si crea una strettissima regione (10-100 Å) in cui ci sono più elettroni che lacune. Una volta creatasi l'inversione, ogni ulteriore aumento della tensione provoca un aumento esponenziale della concentrazione degli elettroni in tale regione, mentre l'ampiezza della regione di svuotamento resta costante.

Trattazione quantitativa del problema



Si definiscono:

$$q\psi_B = E_{i\text{bulk}} - E_F$$

con $q\psi_B > 0$ se il semiconduttore è di tipo p

$q\psi_B < 0$ se il semiconduttore è di tipo n

$$q\psi(x) = E_{i\text{bulk}} - E_i(x)$$

con $\lim_{x \rightarrow \infty} q\psi(x) = 0$

Questa funzione assume, in superficie, il valore :

$$q\psi_S = E_{i\text{bulk}} - E_{iS}$$

Funzionamento della struttura MOS

Come conseguenza:

$$\begin{aligned}
 p(x) &= n_i e^{\frac{E_i(x)-E_F}{kT}} = n_i e^{\frac{E_i(x)-E_{iB}+E_{iB}-E_F}{kT}} = \\
 &= n_i e^{\frac{E_i(x)-E_{iB}}{kT}} e^{\frac{E_{iB}-E_F}{kT}} = n_i e^{-\frac{q\psi(x)}{kT}} e^{\frac{q\psi_B}{kT}} = \\
 n(x) &= n_i e^{\frac{E_F-E_i(x)}{kT}} = n_i e^{\frac{E_F-E_{iB}+E_{iB}-E_i(x)}{kT}} = \\
 &= n_i e^{-\frac{E_i(x)-E_{iB}}{kT}} e^{\frac{E_{iB}-E_F}{kT}} = n_i e^{\frac{q\psi(x)}{kT}} e^{\frac{q\psi_B}{kT}}
 \end{aligned}$$

Inoltre:

poichè nel bulk $\psi = 0$, $p = N_A$, $n = \frac{n_i^2}{N_A}$, da cui :

$$\begin{aligned}
 N_A &= n_i e^{\frac{q\psi_B}{kT}} e^{\frac{n_i^2}{N_A}} = n_i e^{-\frac{q\psi_B}{kT}} \\
 \Rightarrow p(x) &= N_A e^{-\frac{q\psi(x)}{kT}} \quad n(x) = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{q\psi(x)}{kT}}
 \end{aligned}$$

e

$$p_S = N_A e^{-\frac{q\psi_S}{kT}} \quad n_S = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{q\psi_S}{kT}}$$

Funzionamento della struttura MOS

Allora, a seconda del valore di ψ_S si distinguono le seguenti regioni di funzionamento:

$$\psi_S < 0 \quad p_S > p_{bulk} \quad \text{ACCUMULAZIONE}$$

$$\psi_S = 0 \quad p_S = p_{bulk} \quad \text{BANDA PIATTA}$$

$$0 < \psi_S < \psi_B \quad p_S < p_{bulk}, n_S > n_{bulk}, \\ \text{ma } n_S < p_S \quad \text{SVUOTAMENTO}$$

$$\psi_S > \psi_B \quad p_S < p_{bulk}, n_S > n_{bulk}, \\ \text{E } n_S > p_S \quad \text{INVERSIONE}$$

Criterio di FORTE INVERSIONE:

$$n_S = N_A$$

ovvero:

$$n_i e^{\frac{q(\psi_S - \psi_B)}{kT}} = n_i e^{\frac{q\psi_B}{kT}} \Rightarrow \psi_S = 2\psi_B$$

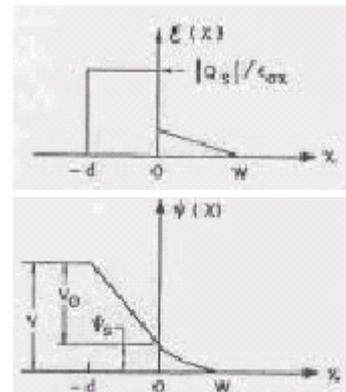
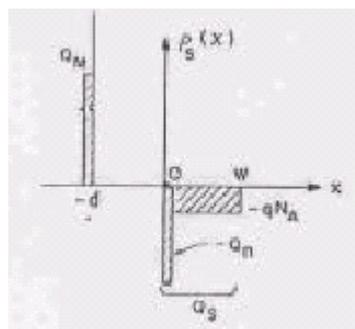
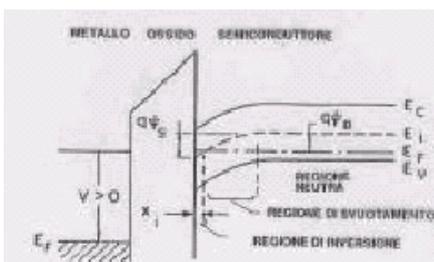
cioè, essendo:

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \Rightarrow \psi_S = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Effetti capacitivi

Un sistema MOS, in condizioni di accumulo e di inversione, si comporta esattamente come il condensatore a facce piane e parallele che ha come dielettrico l'ossido. Applicando una tensione, ai capi dell'ossido, sui due piatti si creano due cariche uguali e di segno opposto. Il semiconduttore si comporta perciò come se fosse un metallo. Quando invece le condizioni di polarizzazione sono tali da indurre uno svuotamento nel semiconduttore, il sistema si comporta come una serie di due condensatori, uno costituito dall'ossido e l'altro corrispondente alla capacità della regione svuotata.

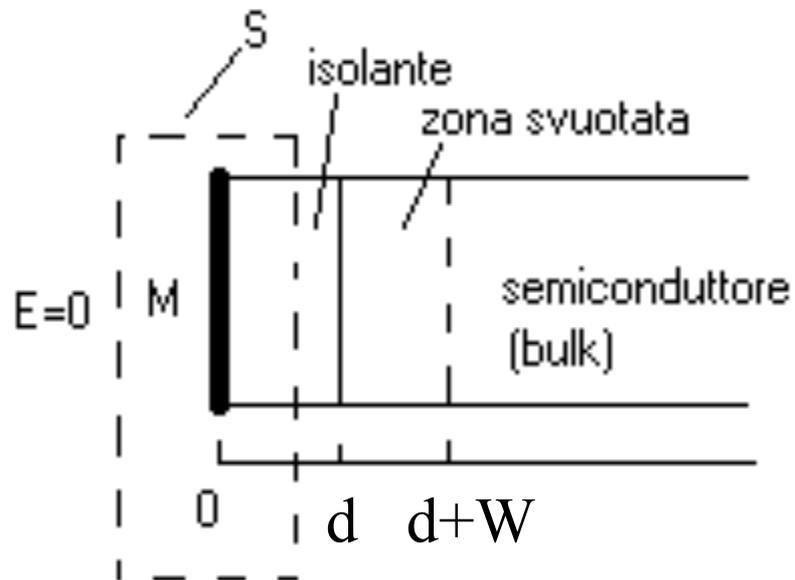
Il potenziale applicato tra il gate e il semiconduttore si ripartisce tra l'ossido e la regione di svuotamento del semiconduttore.



Effetti capacitivi

Il potenziale si calcola a partire dalla legge di Gauss applicata ad una opportuna superficie chiusa

$$\int_S \vec{\epsilon} \vec{E} \cdot \vec{dA} = Q$$



Il campo elettrico è nullo ovunque fuorchè sul lato destro della superficie chiusa. La sola carica contenuta dentro questa superficie è la carica del gate Q_G .

$$\epsilon_{ox} E(x) A_G = Q_G \Rightarrow E(x) = \frac{Q_G}{\epsilon_{ox} A_G}$$

Pertanto il campo è costante entro l'ossido. La carica del gate è esattamente controbilanciata dalla carica del semiconduttore. In condizioni di svuotamento, questa vale:

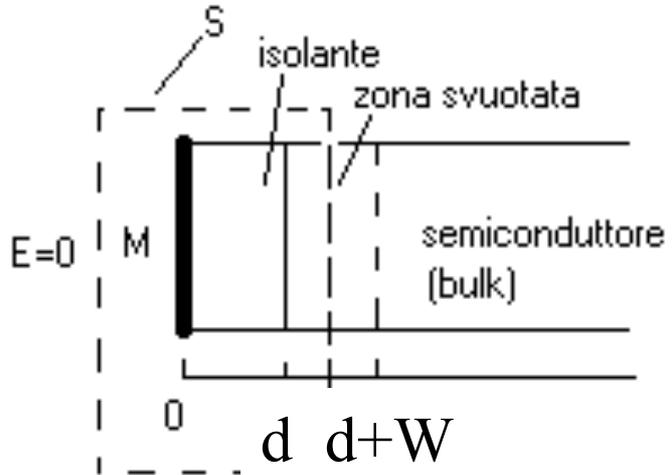
$$Q_S = q N_A A_G W$$

$$\Rightarrow E_{ox} = \frac{q N_A W}{\epsilon_{ox}}$$

Effetti capacitivi

Nel semiconduttore, il campo si calcola nello stesso modo:

$$\int_S \vec{\epsilon} \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q$$



$$Q(x) = Q_G - qN_A A_G (x - d)$$

$$\Rightarrow E_S(x) = \frac{Q_G - qN_A A_G (x - d)}{A_G \epsilon_S} =$$

$$\frac{qN_A A_G W - qN_A A_G (x - d)}{A_G \epsilon_S} = \frac{qN_A (W - x + d)}{\epsilon_S}$$

Calcolo del potenziale:

$$V_{ox} = - \int_0^d E_{ox} dx = - \int_0^d \frac{qN_A W}{\epsilon_{ox}} dx = - \frac{qN_A W}{\epsilon_{ox}} d$$

$$V_S = - \int_d^{d+W} E_S(x) dx = - \int_d^{d+W} \frac{qN_A (W + d - x)}{\epsilon_S} dx =$$

$$= - \frac{qN_A}{\epsilon_S} \left[(W + d)x - \frac{x^2}{2} \right]_d^{d+W} = - \frac{qN_A W^2}{2\epsilon_S}$$

Effetti capacitivi

Complessivamente dunque:

$$V_G + V_{ox} + V_S = 0$$

$$V_G - \frac{qN_A W}{\epsilon_{ox}} d - \frac{qN_A W^2}{\epsilon_S} = 0$$

$$\Rightarrow V_G = \frac{qN_A W}{\epsilon_{ox}} x_0 + \frac{qN_A W^2}{\epsilon_S}$$

Noto V_G , si ricava W . Corrispondentemente:

$$C = \frac{C_0 C_j}{C_0 + C_j} \quad \psi_S > \psi_{inv}$$

ove $C_0 = \frac{\epsilon_{ox}}{d}$ e $C_j = \frac{\epsilon_s}{W}$ per unità di area

$$\Rightarrow \frac{C}{C_0} = \frac{C_j}{C_0 + C_j} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox} W}{\epsilon_S d}}$$

W varia da 0 (per $V < 0$) a W_m (per $\psi_S > \psi_{inv}$).

Quando $\psi_S = \psi_{inv}$ si ha $V_G = V_t$, tensione di soglia.

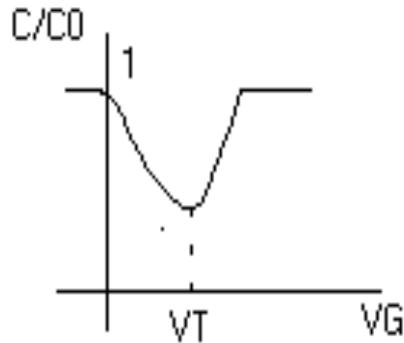
$$V_T = \frac{qN_A W_m}{C_0} + \psi_{inv} = \frac{\sqrt{2\epsilon_S qN_A (2\psi_B)}}{C_0} + 2\psi_B$$

Effetti capacitivi

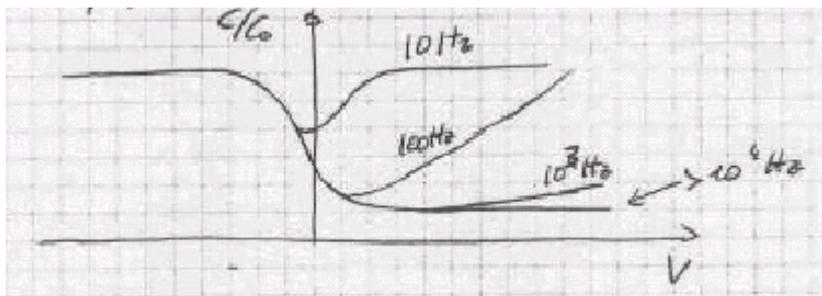
Corrispondentemente:

$$C_{\max} = C_0 = \frac{\epsilon_{ox}}{d}$$

$$C_{\min} = \frac{\epsilon_{ox}}{d + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_S} W_m}$$



Dipendenza delle curve C-V dalla frequenza



La misura della capacità di questo sistema viene fatta polarizzando il sistema con una tensione continua cui viene sovrapposto un segnale di piccola ampiezza con una certa frequenza. Nel MOS si nota come al variare della frequenza del segnale la misura della capacità vari, particolarmente, nel range di tensioni che caratterizza il formarsi della regione di inversione. In pratica, la capacità del sistema dovrebbe tornare a coincidere con quella dell'ossido mentre questo avviene solo a basse frequenze. Ad alte frequenze, la capacità si comporta come se lo strato di inversione non si formasse.

Effetti capacitivi

Lo strato di inversione è formato da minoritari nel bulk del semiconduttore che, accumulandosi in una strettissima regione all'interfaccia con l'ossido, diventano in quella regione maggioritari. Ma per accumularsi in quella regione, devono attraversare zone in cui continuano ad essere minoritari perciò soggetti a fenomeni "lenti".

In risposta alle variazioni del segnale, perciò, si muovono con una certa dinamica, che però, per alte frequenze di segnale, non è sufficiente a "seguire" il segnale.

Effetti di non idealità

Vediamo ora cosa succede quando metallo e semiconduttore non hanno la stessa funzione lavoro (caso molto realistico!) ovvero le bande non sono piatte per $V=0$.

Se $\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S = 0$, allora le bande per $V=0$ sono incurvate, verso il basso o verso l'alto a seconda del segno di Φ_{MS} . Nella maggior parte dei casi, le bande sono incurvate verso il basso. Ciò significa che per riottenere la condizione di banda piatta occorre applicare una tensione (detta tensione di banda piatta V_{FB}) in grado di riportare le bande nella condizione di piattezza, ovvero occorre applicare, in Volt, una tensione esattamente pari a Φ_{MS} . Questo fatto si ripercuote sul valore della tensione di soglia, ovvero la tensione necessaria per avere inversione di popolazione. Occorre infatti aggiungere al valore calcolato precedentemente, che si riferisce ad una situazione in cui le bande sono piatte per tensione applicata nulla, la quantità Φ_{MS} .

Similmente, quando nell'ossido sono presenti delle cariche, queste inducono cariche nel semiconduttore, producendo un'incurvatura delle bande a tensione applicata nulla. Il segno della carica indotta è opposto a quello della carica inducente che può essere dovuta a varie cause:

Effetti di non idealità

- 1) Cariche dovute a trappole all' interfaccia tra ossido e semiconduttore, Q_{it} .

Valori tipici:

$$Q_{it} (Si < 100 >) = 10^{10} cm^{-2}$$

$$Q_{it} (Si < 111 >) = 10^{11} cm^{-2}$$

Le trappole si caricano o si scaricano a seconda del segno della tensione.

- 2) Cariche fisse nell' ossido, Q_f , originate da legami non saturi (Si-Si oppure Si- SiO₂, entro 30 Å dall' interfaccia con l' ossido). Sono ancora considerate cariche di interfaccia.

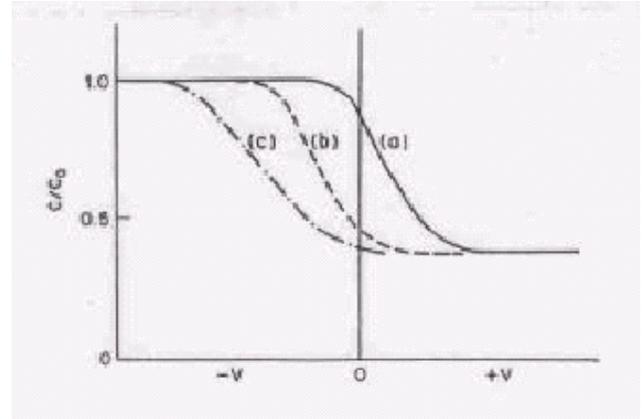
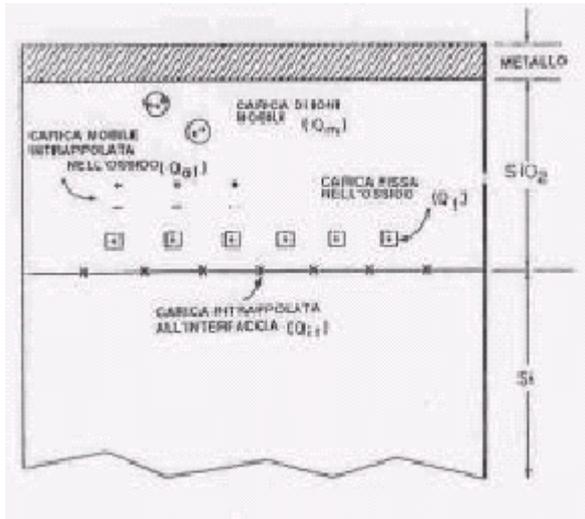
Valori tipici:

$$Q_f (Si < 100 >) = 10^{10} cm^{-2}$$

$$Q_f (Si < 111 >) = 5 \cdot 10^{10} cm^{-2}$$

- 3) Cariche mobili nell' ossido, Q_{ot} , dovute a difetti nell' ossido in tutta la sua estensione. Di solito si cerca di neutralizzarle con trattamenti termici.
- 4) Cariche ioniche mobili dovute a ioni alcalini, tipo Na⁺, che si muovono nell' ossido in presenza di campi elettrici

Effetti di non idealità



La carica nell'ossido induce capacitivamente carica nel semiconduttore. Se la carica si trovasse tutta all'interfaccia tra ossido e semiconduttore, il contributo alla tensione di banda piatta sarebbe pari a:

$$V_{FB} = -\frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

Considerando però che la carica non è tutta concentrata all'interfaccia occorre introdurre un fattore correttivo, pari a x/d ove x è la posizione della carica che stiamo considerando (considerata concentrata in uno strato sottilissimo) e d è lo spessore dell'ossido. Dunque, il valore complessivo della tensione di banda piatta è:

$$V_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \frac{x}{d} = \Phi_{MS} - \frac{Q_{it} + Q_f + Q_{ot} \pm Q_m}{C_{ox}} \frac{x}{d}$$

Sotto l'effetto di V , le cariche mobili si spostano e la curva di capacità trasla e si distorce.