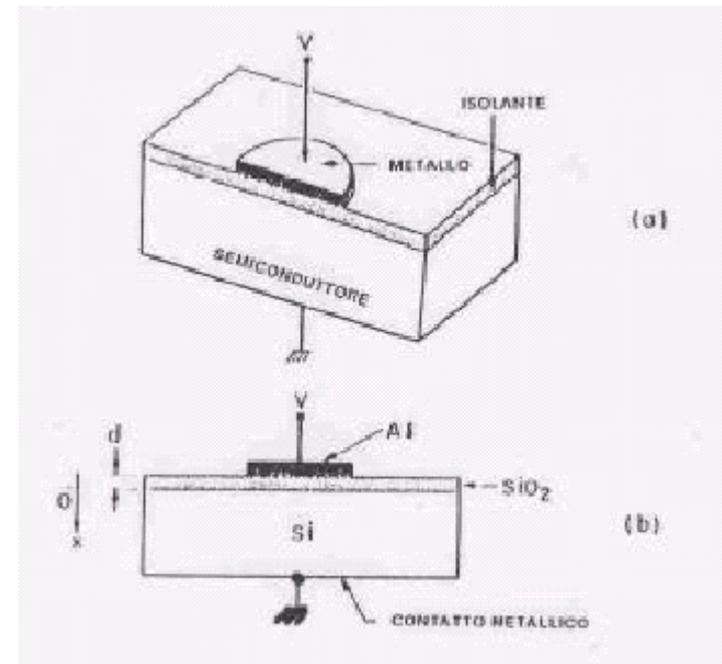
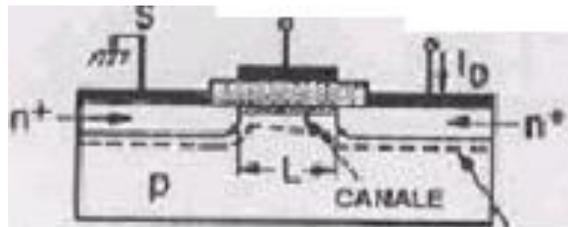


Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Il sistema MOS (sigla che significa “metallo –ossido – semiconduttore”) è un dispositivo di grande importanza nella fisica dei dispositivi a semiconduttore, in particolare per quanto riguarda lo studio delle superfici dei semiconduttori, e nell’elettronica, essendo il “cuore” del dispositivo di integrazione su larghissima scala più usato, il MOSFET (di cui ci occuperemo in seguito)



Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Il MOS rappresenta un caso particolare del più generale metallo – isolante – semiconduttore (MIS), derivante dal fatto che l'isolante usato più di frequente è il biossido di silicio (SiO_2).

Già una prima vista di tale dispositivo ci permette di notare **l'analogia con un condensatore a facce piane e parallele**, in cui la tensione viene applicata al metallo (detto comunemente gate o porta), rispetto al semiconduttore, che viene contattato al circuito mediante un contatto di tipo ohmico.

Consideriamo dunque una struttura MOS, di cui

- disegneremo il diagramma a bande, all'equilibrio termodinamico
- 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.

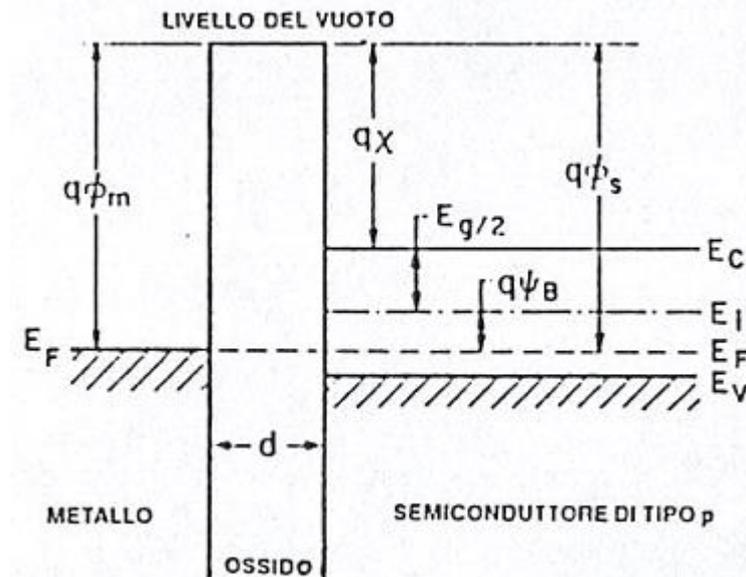
Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

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

Il diagramma a bande per il MOS ideale è descritto nella figura (con semiconduttore di tipo p), per l'equilibrio termodinamico:

Notiamo che il diagramma a bande del metallo e del semiconduttore sono divisi da quello dell'ossido, di spessore d ed immaginabile come un diagramma avente un lavoro di estrazione molto alto.



Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (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 (**condizione di banda piatta**)

Tale condizione è una condizione ideale, e non è detto che si verifichi nella realtà

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.

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

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

1. L'ossido è privo di cariche (ioni e impurità)
2. L'ossido ha resistività infinita (ossido perfetto)

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

N.B. **l'assenza di cariche nell'ossido non è tuttavia realizzabile**, ma la tecnologia odierna permette un livello di controllo molto alto (uno ione ogni atomo di ossido), anche se la presenza di ioni ed impurità portatrici di carica rappresenta comunque una **tipica causa di non idealità**, come vedremo in seguito.

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

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

1. Il metallo è perfettamente equipotenziale (in microelettronica per fare il gate si usa in genere l'alluminio, oppure il polisilicio 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

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

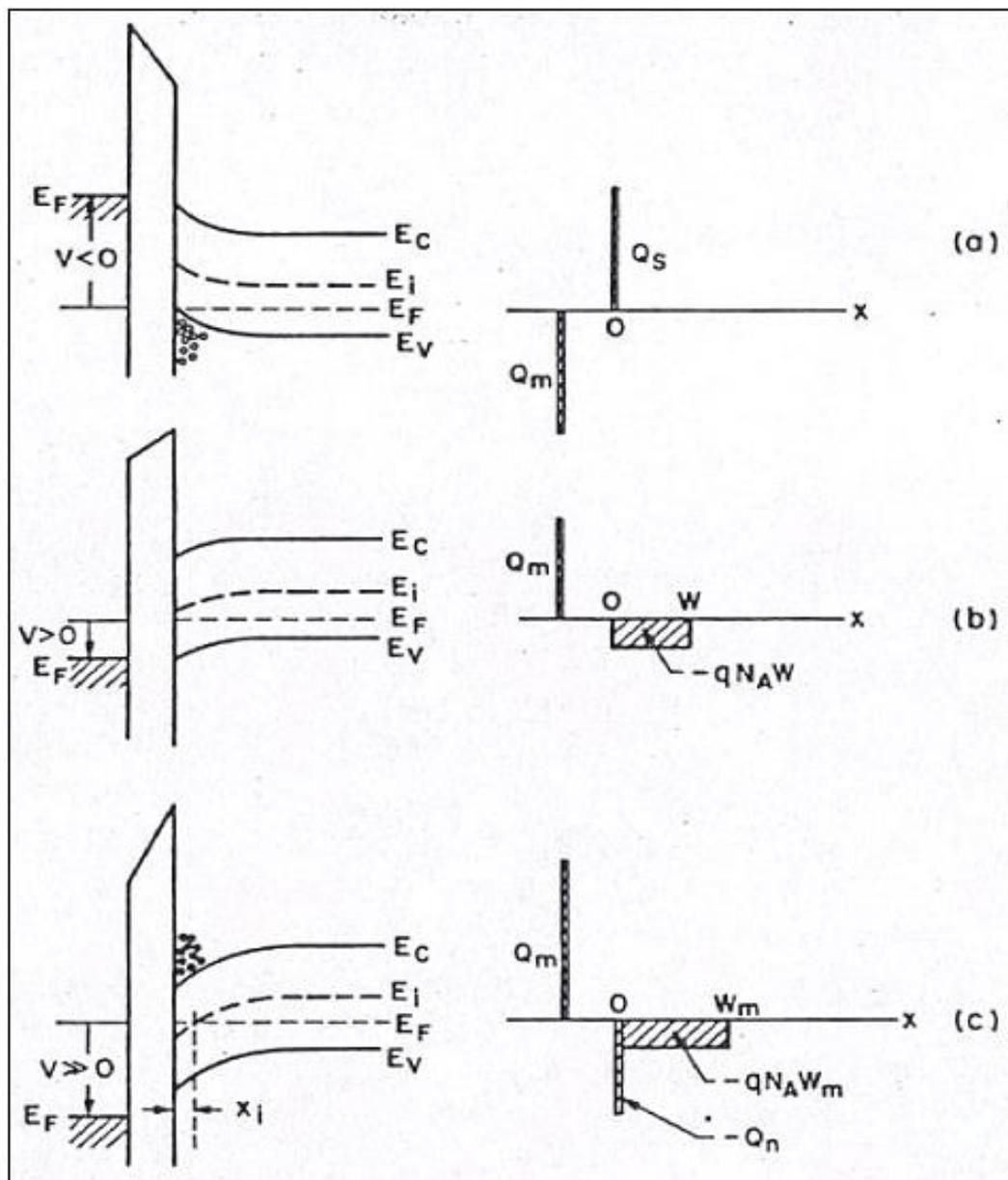
Quando si applica una tensione al sistema MOS, di qualunque segno sia la tensione, **il livello di Fermi nel metallo dista dal livello di Fermi nel semiconduttore di una quantità pari, in elettronvolt, alla tensione applicata (in Volt).**

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**

Incurvamento delle bande

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)



Perché?

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Analizziamo tutti i casi

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:

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

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Caso $V < 0$:

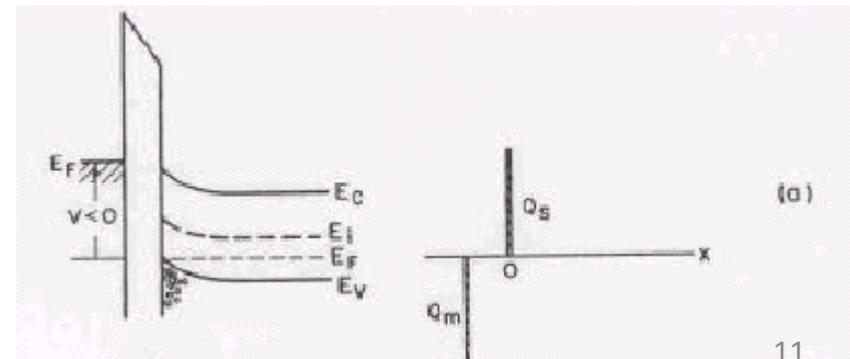
Il livello di Fermi del metallo è superiore a quello del semiconduttore

Non c'è passaggio di corrente perché ho un ossido ideale tra metallo e semiconduttore, per cui i due livelli di Fermi non si allineano

Dovendo mantenere la continuità del livello del vuoto **le bande si incurvano verso l'alto**

In superficie $E_i - E_F$ aumenta \rightarrow accumulo di lacune (Q_s)

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



Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Caso $V > 0$ (ma non troppo)

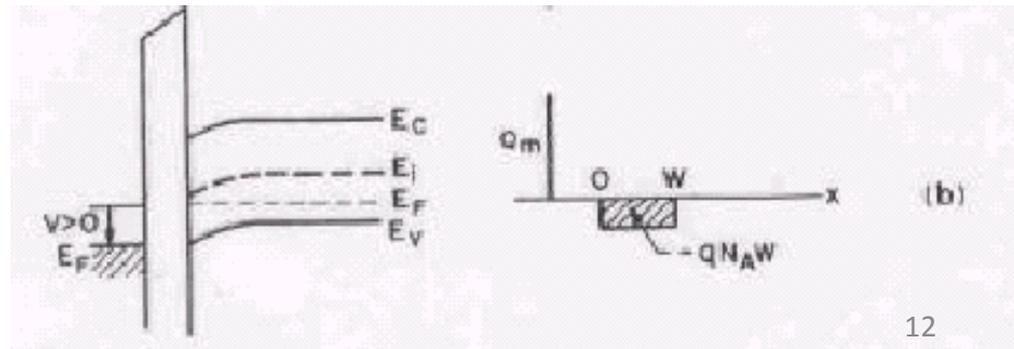
Il livello di Fermi del metallo è inferiore a quello del semiconduttore

Non c'è passaggio di corrente perché ho un ossido ideale tra metallo e semiconduttore, per cui i due livelli di Fermi non si allineano

Dovendo mantenere la continuità del livello del vuoto **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 , con $Q_s = -qN_A W$**

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



Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Caso $V \gg 0$

Se la tensione applicata è molto grande, il livello di Fermi del metallo è di molto inferiore a quello del semiconduttore

Non c'è passaggio di corrente perché ho un ossido ideale tra metallo e semiconduttore, per cui i due livelli di Fermi non si allineano

Dovendo mantenere la continuità del livello del vuoto le bande si incurvano verso il basso, ma **la curvatura è molto più pronunciata.**

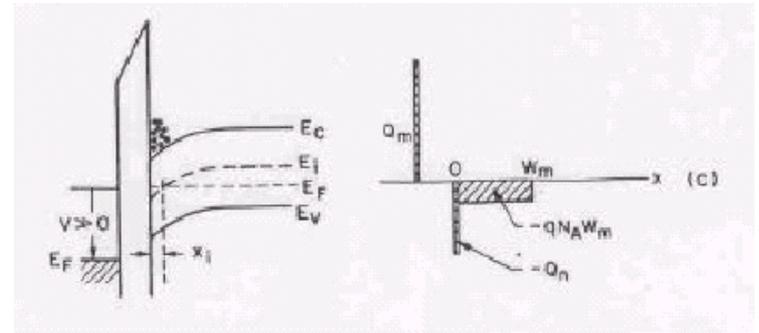
In superficie $E_i - E_F$ diminuisce fino a cambiare segno!

E_F supera E_i !!! \rightarrow ho svuotato completamente di lacune e inizio ad accumulare elettroni

INVERSIONE DI POPOLAZIONE.

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

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



L'inversione di popolazione si verifica in una stretta regione superficiale (regione di inversione, x_i , di dimensioni variabili nell'intervallo **$10 \div 100 \text{ \AA}$**), in cui, come si nota anche dalla figura, la concentrazione degli elettroni è maggiore anche di quella delle lacune.

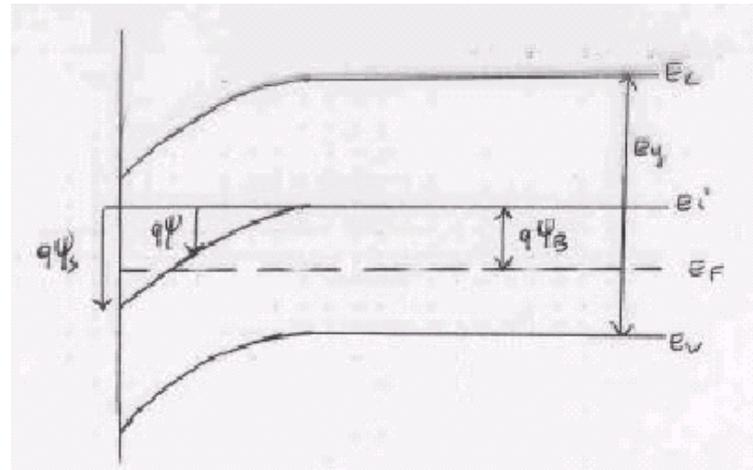
In tal caso la concentrazione totale di portatori del semiconduttore è: **$Q_s = Q_n + Q_{sc}$**

In cui Q_n è la densità di minoritari dovuta all'inversione di popolazione, e $Q_{sc} = -qN_A W_m$ è la densità di carica dovuta allo svuotamento di lacune, in cui W_m è la massima estensione della regione di svuotamento

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Una volta creatasi l'inversione, ogni ulteriore aumento della tensione provoca un **aumento esponenziale della concentrazione degli elettroni in tale regione**

L'ampiezza della regione di svuotamento resta costante.



Per definizione si suppone che il potenziale elettrostatico ψ sia nullo all'interno del semiconduttore, e che alla superficie valga invece $\psi = \psi_s$ (potenziale superficiale);

Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Inoltre, definiamo

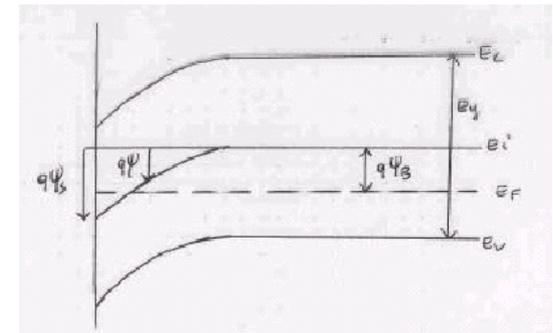
$$q\psi_B = E_{ibulk} - E_F$$

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

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

$$q\psi(x) = E_{ibulk} - E_i(x)$$

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



Questa funzione assume, in superficie, il valore :

$$q\psi_S = E_{ibulk} - E_{iS}$$

Funzionamento del MOS

Possiamo dunque scrivere le concentrazioni dei portatori di carica in funzione di tali grandezze mediante semplici passaggi:

$$p(x) = n_i e^{\frac{E_i(x) - E_F}{kT}} = n_i e^{\frac{E_i(x) - E_{iB} + E_{iB} - E_F}{kT}} =$$

Sommo e
sottraggo E_{iB}

$$= n_i e^{\frac{E_i(x) - E_{iB}}{kT}} e^{\frac{E_{iB} - E_F}{kT}} = n_i e^{-\frac{q\psi(x)}{kT}} e^{\frac{q\psi_B}{kT}}$$

$$n(x) = n_i e^{\frac{E_F - E_i(x)}{kT}} = n_i e^{\frac{E_F - E_{iB} + E_{iB} - E_i(x)}{kT}} =$$

$$= n_i e^{-\frac{E_i(x) - E_{iB}}{kT}} e^{-\frac{E_{iB} - E_F}{kT}} = n_i e^{\frac{q\psi(x)}{kT}} e^{-\frac{q\psi_B}{kT}}$$

Funzionamento del MOS

e inoltre, se nelle regioni di bulk vale:

$$\psi = 0, p = N_A, n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$N_A = n_i e^{\frac{q\psi_B}{kT}} e \frac{n_i^2}{N_A} = n_i e^{-\frac{q\psi_B}{kT}}$$

Sostituendo nelle
espressioni precedenti

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

e

$$p_S = N_A e^{-\frac{q\psi_S}{kT}}$$

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

Funzionamento del MOS

A seconda del valore di Ψ_S si distinguono le seguenti regioni di funzionamento:

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

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

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

$\psi_S > \psi_B$ $p_S < p_{bulk}, n_S > n_{bulk}$, e $n_S > p_S$ INVERSIONE

Funzionamento del MOS

Definiamo inoltre una condizione di FORTE INVERSIONE in cui avviene:

$$n_S \cong N_A$$

$$\frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{q\psi_S}{kT}} = n_i e^{\frac{q\psi_B}{kT}}$$

$$n_i e^{-\frac{q\psi_B}{kT}} e^{\frac{q\psi_S}{kT}} = n_i e^{\frac{q\psi_B}{kT}}$$

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

cioè, essendo :

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

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

Effetti capacitivi nel MOS

Effetti capacitivi nel MOS

Un sistema MOS, in condizioni di accumulo e di inversione, si comporta esattamente come il **capacitore a facce piane e parallele che ha come dielettrico l'ossido**.

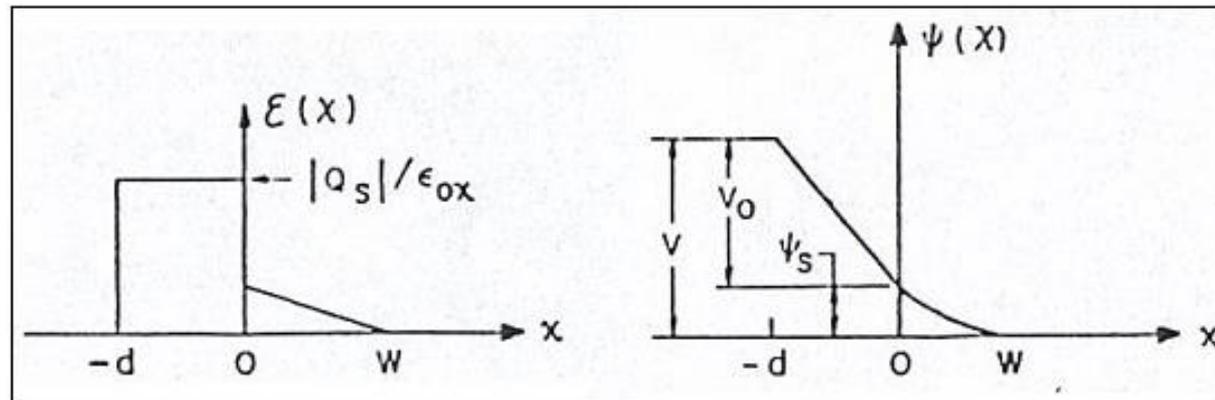
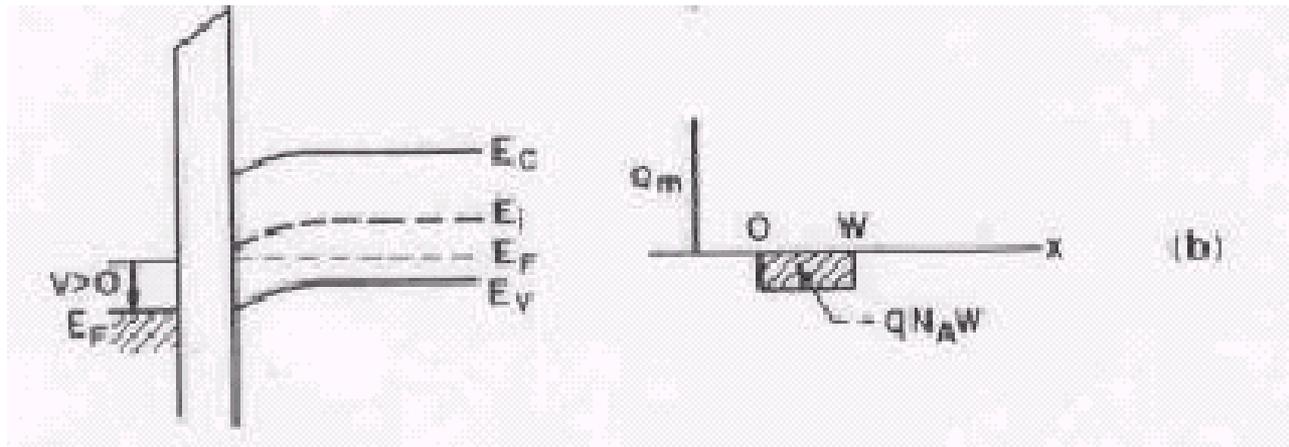
Applicando una tensione, ai capi dell'ossido, sui due piatti si creano due cariche uguali e di segno opposto.

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 capacitori**, uno costituito dall'ossido e l'altro corrispondente alla capacità della regione svuotata.

Effetti capacitivi nel MOS

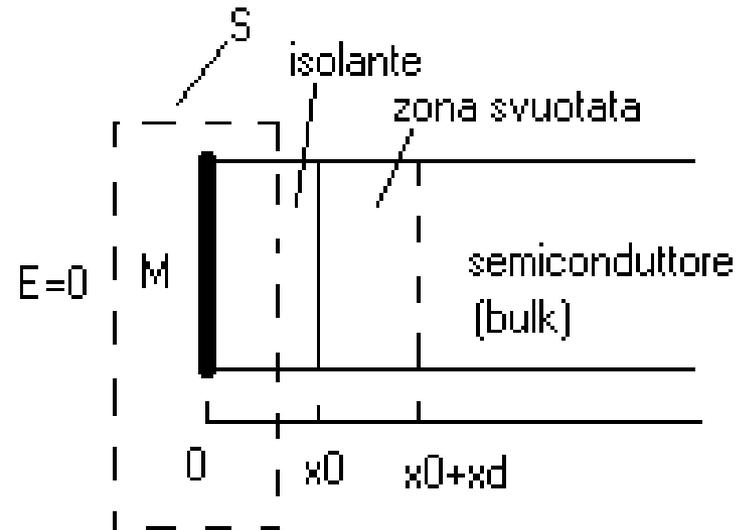
Il potenziale applicato tra il gate e il semiconduttore si ripartisce tra l'ossido e la regione di svuotamento del semiconduttore.



Effetti capacitivi nel MOS

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

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



Il campo elettrico è nullo ovunque fuorché nella parte interna dell'ossido. La sola carica contenuta dentro questa superficie è la carica del gate Q_G .

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

Effetti capacitivi nel MOS

Pertanto **il campo è costante entro l'ossido**.

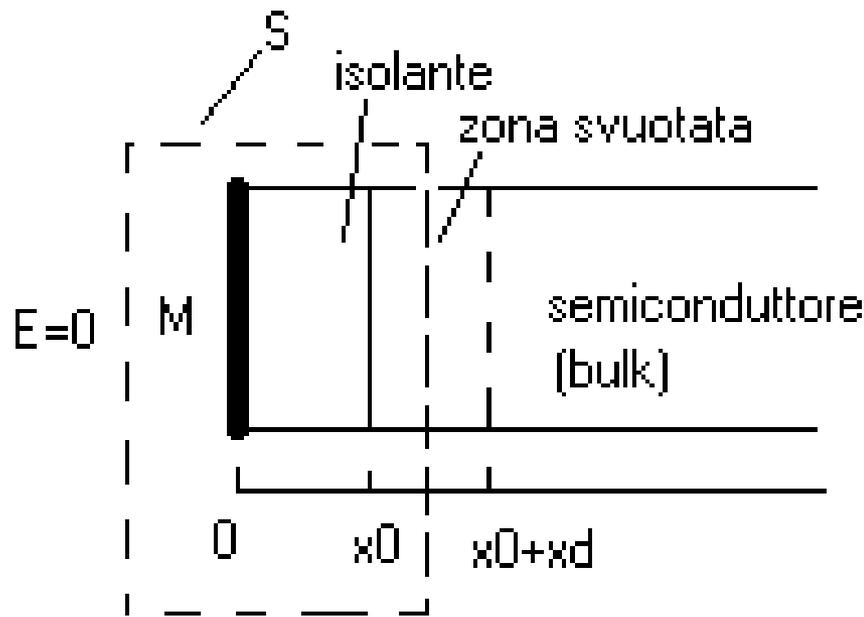
Dato che la carica del gate è esattamente controbilanciata dalla carica del semiconduttore.

In condizioni di svuotamento, questa vale:

$$Q_S = qN_A A_G x_d$$

$$\Rightarrow E_{ox} = \frac{qN_A x_d}{\epsilon_{ox}}$$

Effetti capacitivi nel MOS



Nel semiconduttore, il campo si calcola nello stesso modo:

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

Effetti capacitivi nel MOS

$$Q(x) = Q_G - qN_A A_G (x - x_0)$$

$$\Rightarrow E_S(x) = \frac{Q_G - qN_A A_G (x - x_0)}{A_G \epsilon_S} =$$

$$\frac{qN_A A_G x_D - qN_A A_G (x - x_0)}{A_G \epsilon_S} = \frac{qN_A (x_D - x + x_0)}{\epsilon_S}$$

A questo punto il potenziale si calcola semplicemente come l'integrale del campo (cambiato di segno):

$$V_{ox} = - \int_0^{x_0} E_{ox} dx$$

$$E_{ox} = \frac{qN_A x_d}{\epsilon_{ox}}$$

$$V_{ox} = - \int_0^{x_0} \frac{qN_A x_d}{\epsilon_{ox}} dx = - \frac{qN_A x_d}{\epsilon_{ox}} x_0$$

Effetti capacitivi nel MOS

$$V_S = - \int_{x_0}^{x_0+x_d} E_S(x) dx$$

$$E_S(x) = \frac{qN_A(x_D - x + x_0)}{\epsilon_S}$$

$$V_S = - \int_{x_0}^{x_0+x_d} \frac{qN_A(x_d + x_0 - x)}{\epsilon_S} dx =$$

$$= - \frac{qN_A}{\epsilon_S} \left[(x_d + x_0)x - \frac{x^2}{2} \right]_{x_0}^{x_0+x_d} = - \frac{qN_A x_d^2}{2\epsilon_S}$$

Effetti capacitivi nel MOS

La capacità totale del sistema vale:

$$C = \frac{C_0 C_j}{C_0 + C_j}$$

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

$$\Rightarrow \frac{C}{C_0} = \frac{C_j}{C_0 + C_j} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \frac{x_d}{x_o}}$$

Effetti capacitivi nel MOS

Per cui complessivamente si ottiene:

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

$$V_G - \frac{qN_A x_d}{\epsilon_{ox}} x_0 - \frac{qN_A x_d^2}{2\epsilon_S} = 0$$

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

Noto V_G , si ricava x_d

Il valore x_d , però, è variabile con la tensione

Da $x_d = 0$ per tensioni applicate positive fino

ad un valore massimo W_m (per $\psi_S > \psi_{S_{inv}}$, per valori superiori di tensione la regione di svuotamento non varia ulteriormente), per cui, avremo:

Effetti capacitivi nel MOS

$$x_d = 0 \Rightarrow \frac{C}{C_0} = 1 \Rightarrow C_{\max} = C_0 = \frac{\epsilon_{ox}}{d}$$

$$x_d = W_m \Rightarrow \frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_S} \frac{W_m}{d}} \Rightarrow C_{\min} = \frac{\epsilon_{ox}}{d} \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_S} \frac{W_m}{d}} = \frac{\epsilon_{ox}}{d + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_S} W_m}$$

$$W_m = \sqrt{\frac{2\epsilon_S \psi_{S,inv}}{qN_A}} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_S 2\psi_B}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4\epsilon_S kT \ln(N_A / n_i)}{q^2 N_A}}$$

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

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

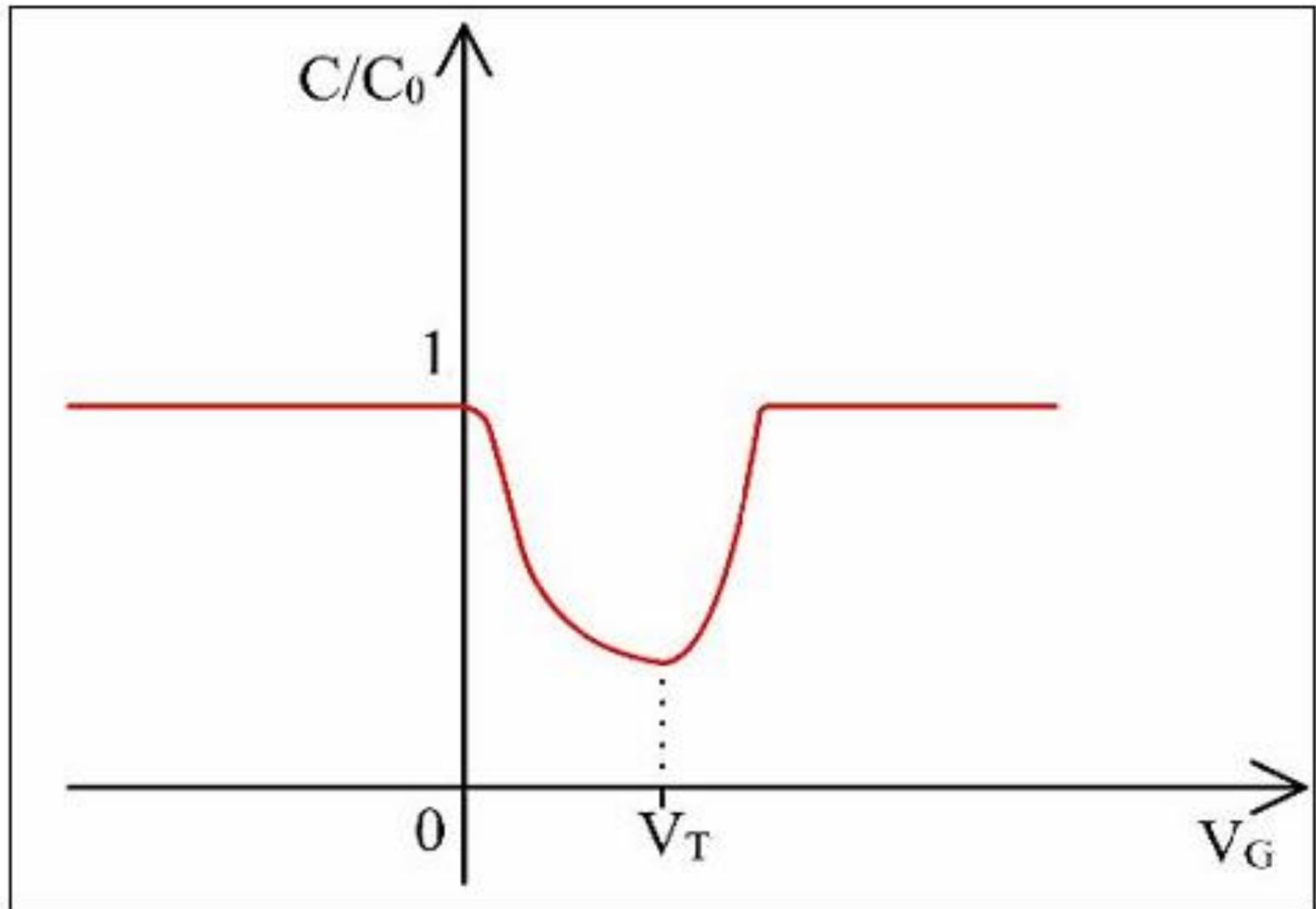
Effetti capacitivi nel MOS

L'andamento della capacità al variare della tensione applicata al gate:

1. per tensioni negative il rapporto C/C_0 rimane costantemente a 1, quindi, al crescere della tensione positiva la capacità tende a diminuire crescendo la dimensione della regione svuotata;
2. arrivati ad un certo valore di tensione, la regione svuotata tende a rimanere costante in dimensioni e si ha l'inversione di popolazione, tale da riportare il valore di C/C_0 verso 1.
3. Tale valore di tensione, detta *tensione di soglia* (V_T) è tale da generare un potenziale superficiale pari a quello di forte inversione, $\psi_S = \psi_{S,inv}$, per cui, essendo inoltre la carica per unità di area ad essa corrispondente e $qN_A W_m$, varrà

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

Effetti capacitivi nel MOS



Effetti capacitivi nel MOS

L'andamento di C_{tot}/C_{ox} in funzione di V si interpreta sulla base del seguente schema.

$V < 0$: ACCUMULAZIONE

alta concentrazione di portatori mobili (lacune) all'interfaccia. Il MOS si comporta come un condensatore con due armature metalliche: il gate e il semiconduttore in condizioni di accumulazione. $C_{tot} = C_{ox}$.

$V > 0$: SVUOTAMENTO

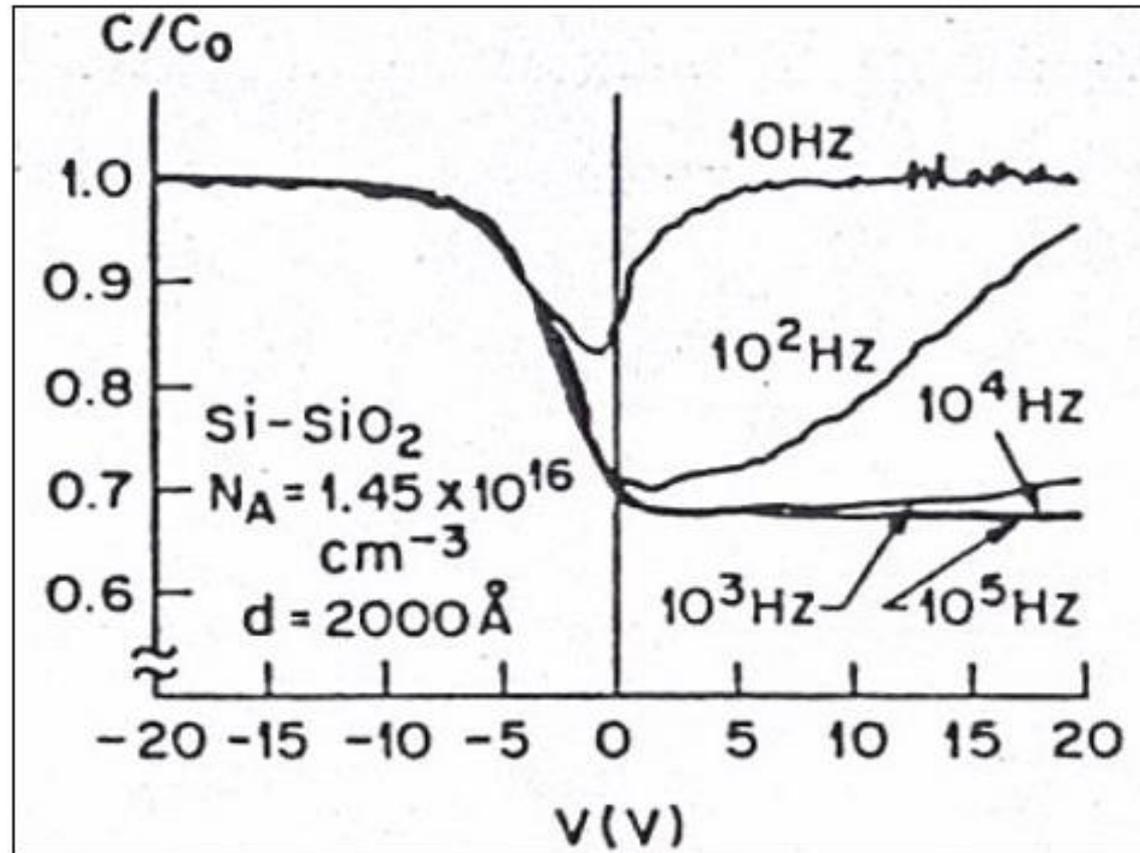
C_{ox} e C_j in serie, diminuzione della C_{tot} .

$V \gg 0$: INVERSIONE

Alta concentrazione di elettroni all'interfaccia. Se n segue la frequenza del segnale di misura (tempi di generazione e ricombinazione molto minori del periodo del segnale) si hanno nuovamente due armature metalliche ai lati dell'ossido.

$C_{tot} = C_{ox}$.

C-V in frequenza



La misura per la capacità di tali sistemi, è bene dirlo, è effettuata polarizzando il sistema con una tensione continua cui viene sovrapposto un segnale di piccola ampiezza con una frequenza opportuna (un modello simile a quello dei piccoli segnali visto per la giunzione $p-n$); al variare della frequenza, come si nota dalla figura a lato, la capacità varia

C-V in frequenza

Al variare della frequenza del segnale la misura della capacità varia, 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**.

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"**.

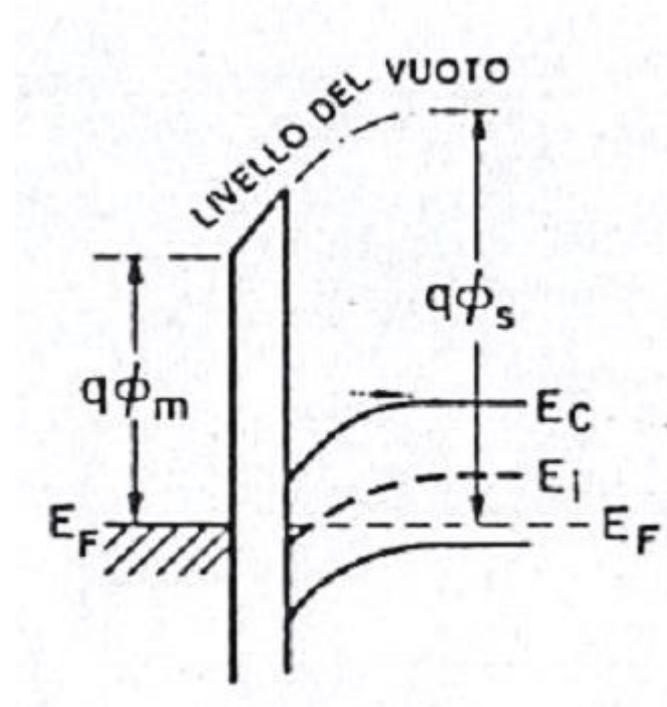
In risposta alle variazioni del segnale, perciò, si muovono con una certa **dinamica**, che però, per alte frequenze di segnale, **non è sufficiente a "seguire" il segnale**.

Non idealità nel MOS

Non idealità nel MOS: tensione di Flat Band

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 $\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S \neq 0$, allora le bande per $V=0$ sono incurvate, verso il basso o verso l'alto a seconda del segno di Φ_{MS} .



Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

Cosa succederebbe se il livello di Fermi del metallo fosse maggiore di quello del semiconduttore?

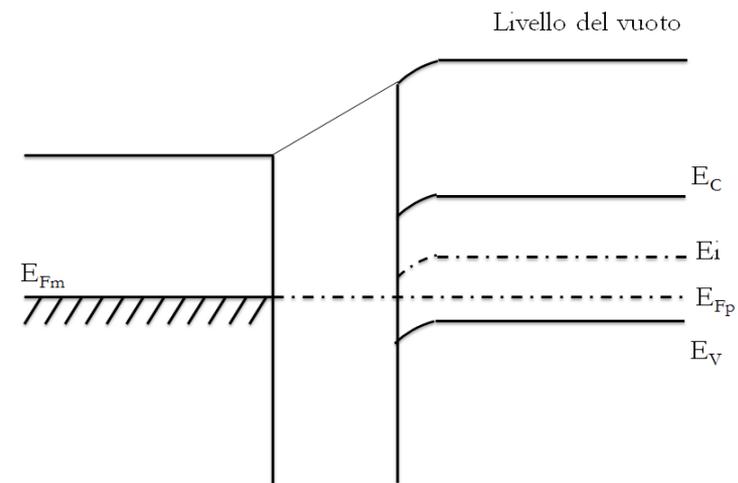
Trasferimento di carica dal metallo al semiconduttore (attraverso il circuito esterno, non attraverso l'ossido)

Si crea regione di carica positiva nel metallo

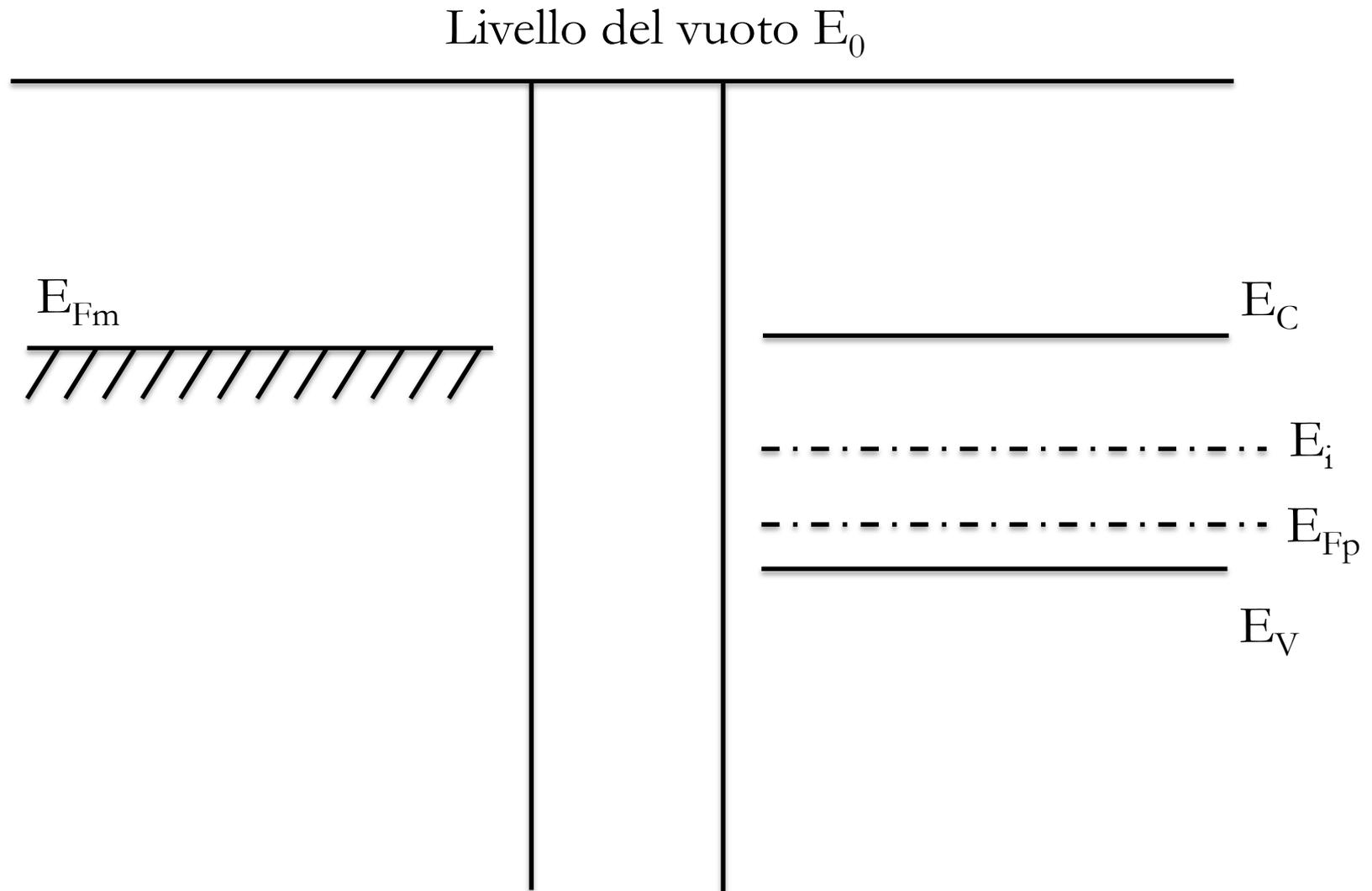
Svuotamento di lacune nel semiconduttore

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

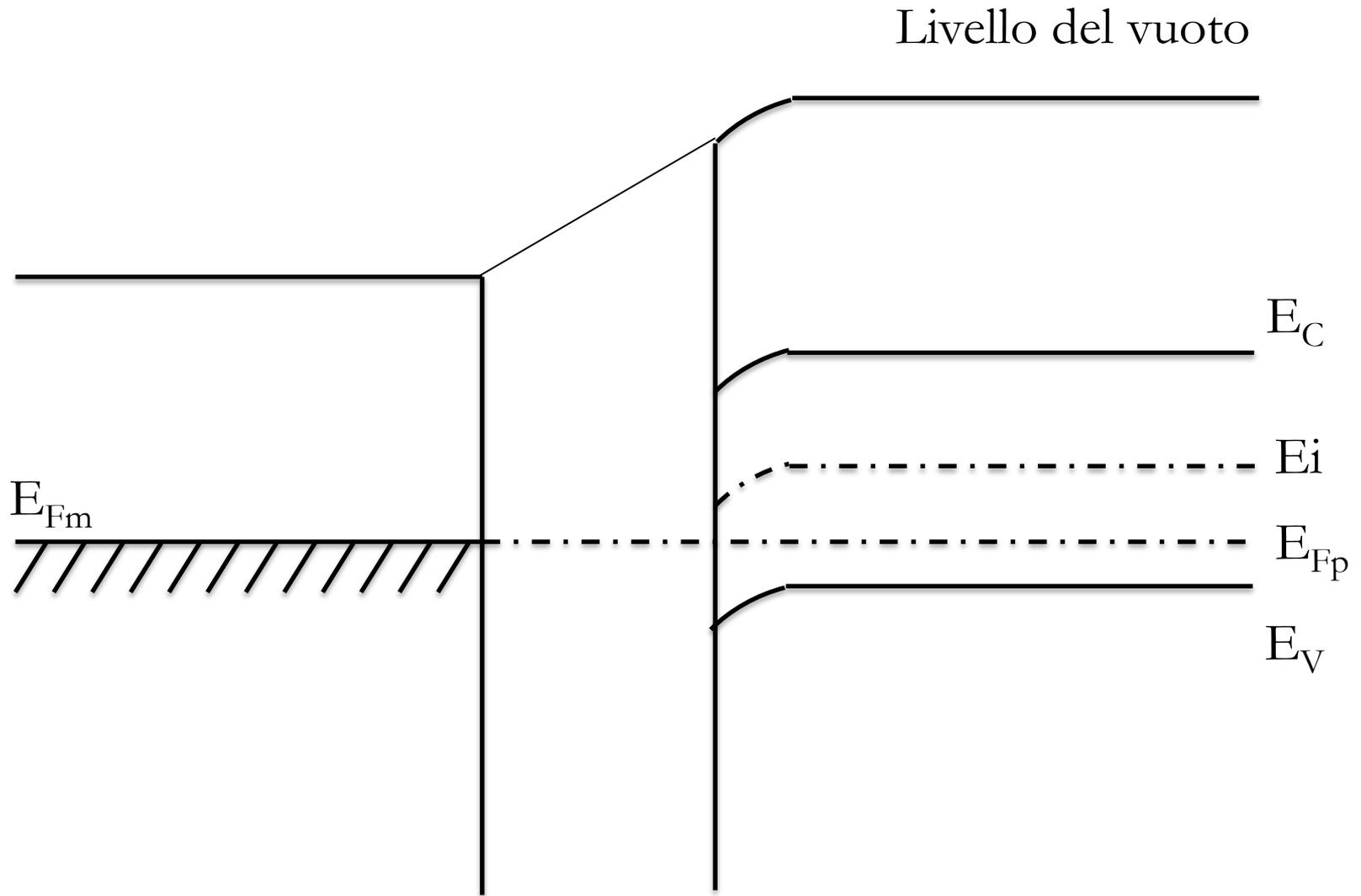
Le bande si incurvano verso il basso



Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)



Il sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)



Non idealità nel MOS: tensione di Flat Band

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} .

$$V_{FB} = \frac{q\phi_{MS}}{q} = \phi_M - \phi_S$$

Questo fatto si ripercuote sul valore della tensione di soglia, ovvero la tensione necessaria per avere inversione di popolazione.

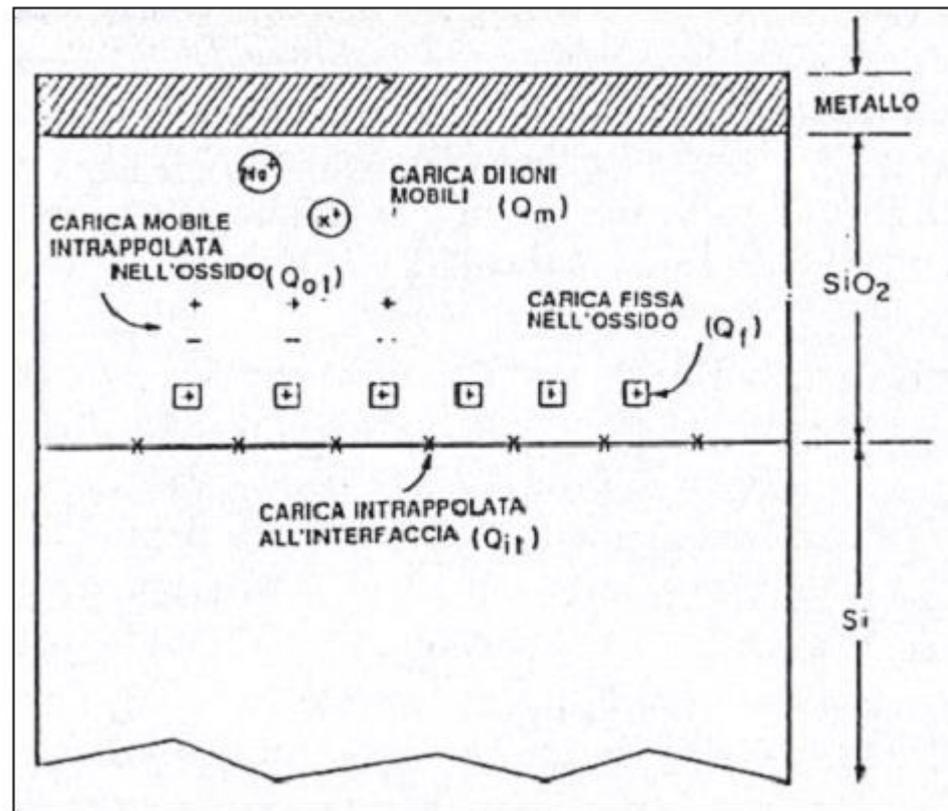
Occorre infatti aggiungere al valore calcolato precedentemente, che si riferisce ad una situazione in cui le bande sono piatte per tensione applicata nulla, la quantità Φ_{MS} .

$$V_T \approx \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A (2\psi_B)}}{C_o} + 2\psi_B + \phi_{MS}$$

Non idealità nel MOS: cariche nell'ossido

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:



Non idealità nel MOS: cariche nell'ossido

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

Non idealità nel MOS: tensione di Flat Band

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

sono legate alle proprietà dell'interfaccia stessa e dipendono dalla sua composizione chimica;

Le trappole, localizzate all'interfaccia con stati energetici nella banda proibita del silicio, hanno una densità variabile a seconda dell'orientazione del reticolo cristallino (in genere l'orientazione $\langle 100 \rangle$ presenta un numero di cariche di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella $\langle 111 \rangle$).

Come già detto in precedenza, la tecnologia odierna permette un livello di controllo molto alto (uno ione ogni $10^{10} - 10^{11}$ atomi di ossido) mediante tecniche di ricottura del semiconduttore a basse temperature (450°C).

Non idealità nel MOS: tensione di Flat Band

- 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.

sono in genere dovute alla presenza di legami saturi e derivanti da processi di ossidazione o di ricottura, e possono produrre cariche fisse positive nell'ossido, tanto da poter essere considerate come un sottile strato di cariche fisse nell'ossido;

valori tipici sono di 10^{10} cm⁻² per Si<100> e 5×10^{10} cm⁻² per Si<111> proprio per i valori minori di Q_{it} e Q_f il Si<100> è il cristallo in genere usato nei MOSFET.

Non idealità nel MOS: tensione di Flat Band

- 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.

Le cariche mobili intrappolate nell'ossido Q_{ot} sono da associarsi ai difetti presenti nel SiO_2 e possono quindi prodursi mediante irraggiamento a raggi X o mediante bombardamento di elettroni ad alta energia; le trappole sono distribuite all'interno dell'ossido e le Q_{ot} si possono eliminare mediante trattamenti termici come la ricottura a bassa temperatura.

Non idealità nel MOS: tensione di Flat Band

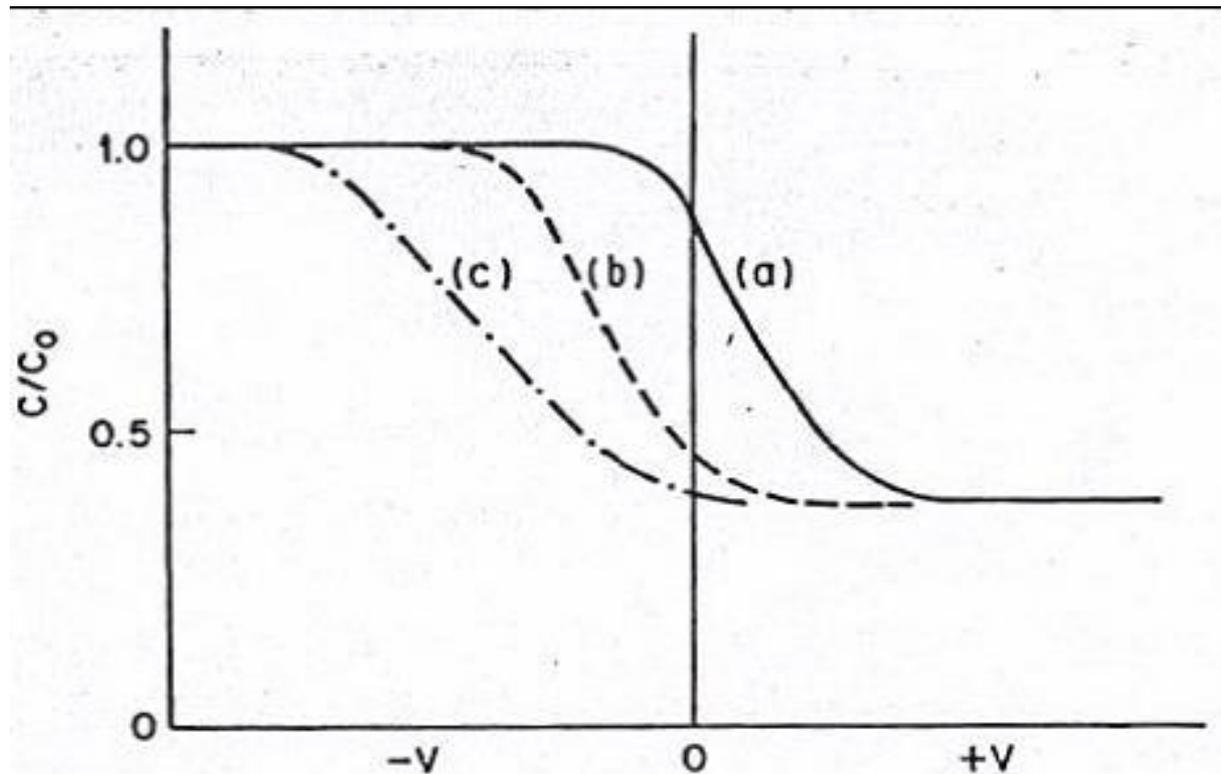
- 4) Cariche ioniche mobili dovute a ioni alcalini, tipo Na^+ , che si muovono nell'ossido in presenza di campi elettrici

Le cariche ioniche mobili Q_m , quali lo ione sodio, possono muoversi entro l'ossido in condizione di elevata temperatura e tensione applicata;

tali cariche portano a delle variazioni per quanto riguarda l'andamento della curva $C - V$, provocando uno spostamento della curva lungo l'asse delle tensioni come da figura a lato;

la presenza di cariche ioniche produce anche un effetto non trascurabile sulla tensione di banda piatta, in particolare quando si trovano in prossimità dell'interfaccia, in quanto sono in grado di indurre sia nel metallo che nel semiconduttore delle cariche negative, con una distribuzione del campo come in figura.

Non idealità nel MOS: effetto sulle C-V

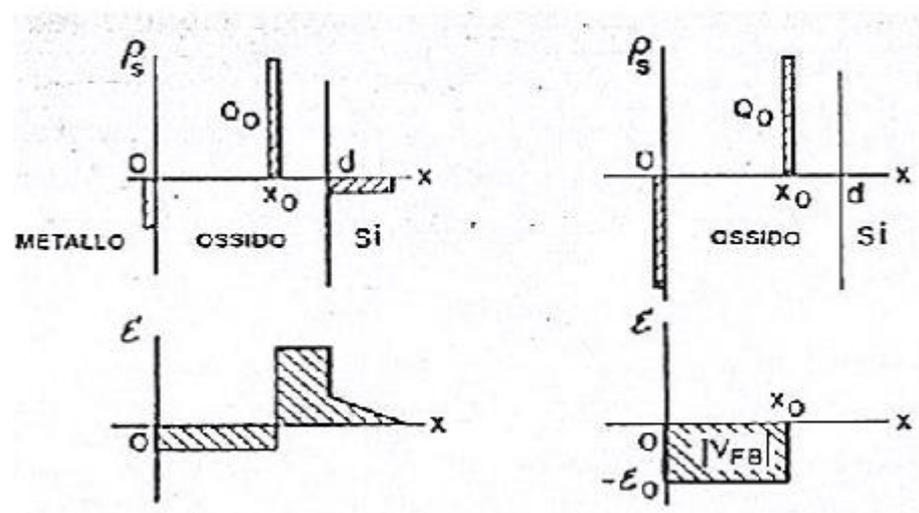


Sotto l'effetto di V , le cariche mobili si spostano e la curva di capacità trasla e si distorce.

Non idealità nel MOS: effetto sulle C-V

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:

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



La carica però potrebbe non necessariamente essere concentrata tutta all'interfaccia

Non idealità nel MOS: effetto sulle C-V

Se 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.

x è la distanza dall'interfaccia metallo/ossido

Dunque, il valore complessivo della tensione di banda piatta è:

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

Se $x=0$ le cariche sono all'interfaccia con il metallo, per cui il loro effetto è nullo

Se $x=d$ le cariche sono tutte all'interfaccia con il semiconduttore

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

MOS con semiconduttore di tipo n

Le considerazioni compiute per un MOS con semiconduttore p possono essere riportate anche per un semiconduttore di tipo n

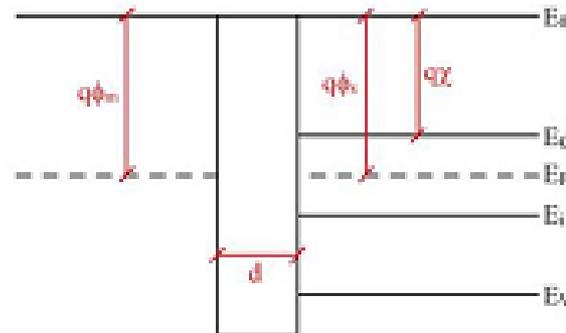
Innanzitutto, mediante una dimostrazione del tutto simile a quella vista in precedenza, otteniamo che le distribuzioni di carica seguono le seguenti leggi:

$$n(x) = N_D e^{\frac{q\phi(x)}{kT}} \Rightarrow n_S = N_D e^{\frac{q\phi_S}{kT}}$$

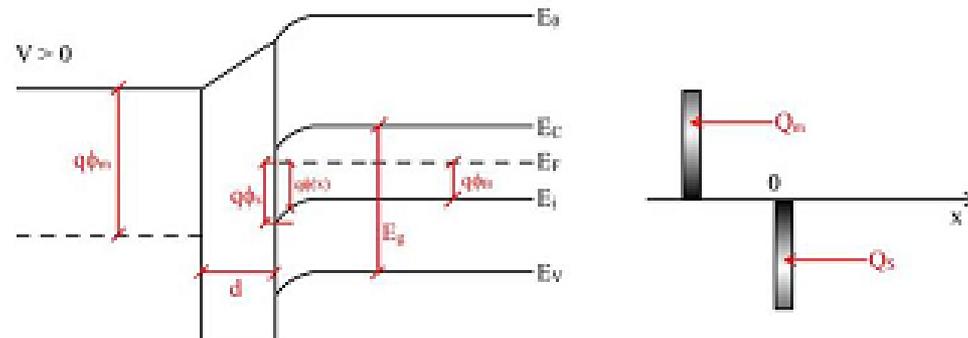
$$p(x) = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{-q\phi(x)}{kT}} \Rightarrow p_S = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{-q\phi_S}{kT}}$$

MOS con semiconduttore di tipo n

Partendo sempre dalla condizione di banda piatta, consideriamo i vari casi di polarizzazione.

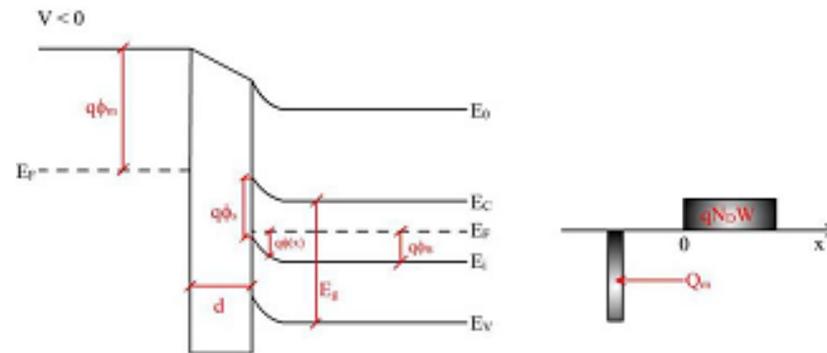


Se applichiamo una tensione positiva utilizzando la convenzione di prima MOS le bande si distorcono verso il basso, per cui si ha un accumulo di elettroni ($E_i - E_F$ aumenta).

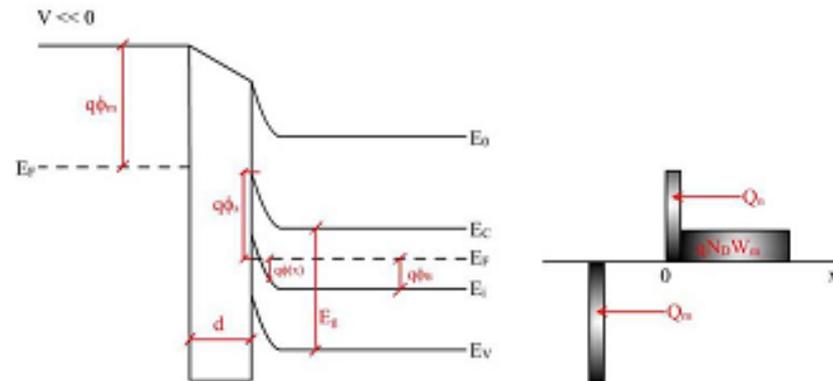


MOS con semiconduttore di tipo n

Se applichiamo una tensione negativa (ma non troppo), la distorsione delle bande è tale che $n_s < n_{\text{bulk}}$, per cui ci si trova in condizione di svuotamento



Se aumentiamo la tensione negativa, otteniamo anche in questo caso la condizione di inversione di popolazione $p_s > n_s$



Il PMOS con $V_{FB} \neq 0$

$$V_T = -\frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_D (2\psi_B)}}{C_o} - 2\psi_B + \phi_{MS}$$

In generale abbiamo:

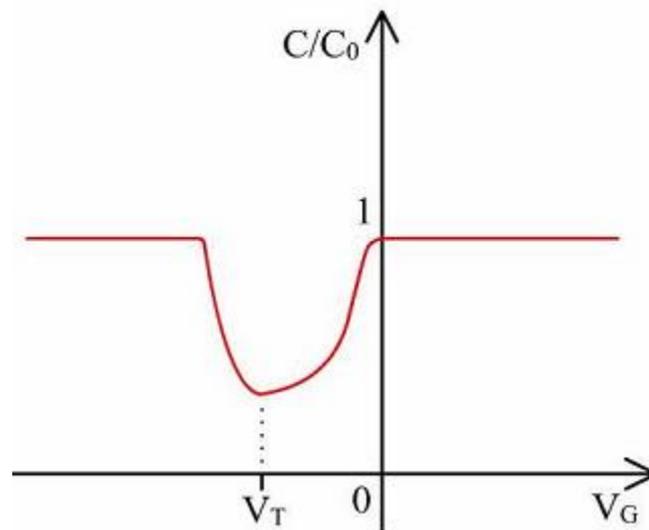
$$V_T = -\frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_D (2\psi_B)}}{C_o} - 2\psi_B + V_{FB}$$

$$V_T = -\frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_D (2\psi_B)}}{C_o} - 2\psi_B + \left[\phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \frac{x}{d_{ox}} \right]$$

MOS con semiconduttore di tipo n

la curva di capacità, sarà esattamente opposta rispetto al caso precedente, ovvero avremo un andamento costante di capacità per tensioni positive ($C=C_0$), per cominciare a diminuire per tensioni negative, quando si ha svuotamento, fino ad un valore minimo

Quando avviene l'inversione di popolazione, si ha un nuovo aumento della capacità, che tende, per le basse frequenze, ad attestarsi nuovamente, e repentinamente, al valore di capacità dell'ossido (all'aumentare della frequenza questo non è più verificato, come visto per il MOS p).



MOS con semiconduttore di tipo n

Le considerazioni sono analoghe anche per quanto riguarda il comportamento non ideale:

se la condizione di banda piatta non è verificata sarà necessario introdurre un termine di tensione di banda piatta

$$V_{\text{FB}} = \Phi_{\text{ms}}$$

che ci permetta di tornare in tale condizione (banda piatta); e che andrà introdotto anche nel valore di tensione di soglia

la presenza di cariche di varia identità provoca inoltre una distorsione della curva e una traslazione verso le tensioni positive negli stessi termini visti in precedenza.

MOS con semiconduttore di tipo n

Le considerazioni sono analoghe anche per quanto riguarda il comportamento non ideale:

se la condizione di banda piatta non è verificata sarà necessario introdurre un termine di tensione di banda piatta

$$V_{\text{FB}} = \Phi_{\text{ms}}$$

che ci permetta di tornare in tale condizione (banda piatta); e che andrà introdotto anche nel valore di tensione di soglia

la presenza di cariche di varia identità provoca inoltre una distorsione della curva e una traslazione verso le tensioni positive negli stessi termini visti in precedenza.

Esercizi

MOS con semiconduttore di tipo n

Dato un MOSFET a canale n con il gate in polysilicio si conosce la mobilità dei portatori $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ e lo spessore dell'ossido $d = 50 \text{ nm}$.

Si determini la tensione di soglia del dispositivo

Dalla mobilità mi ricavo il drogaggio $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

MOS con semiconduttore di tipo n

ESERCIZIO 1

Si consideri un capacitore MOS di Silicio con gate di Oro di cui è noto che nel bulk $E_F - E_i = -0,2$ eV. Assumendo che la struttura sia ideale, calcolare la differenza tra le funzioni lavoro dei due materiali, determinare il drogaggio del semiconduttore (tipo e concentrazione), disegnare il diagramma a bande e dire se, a tensione applicata nulla, il dispositivo si trovi in condizione di accumulazione, svuotamento o inversione.