

Dispositivi elettronici – AA2018/19

Homework 06

Valerio Nappi

<https://5n44p.github.io/triennale-elettronica-polimi/>

Consegna

Si consideri il MOSFET in Figura 1. Esso è realizzato su un substrato in silicio drogato p ($N_A=1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$). Il dielettrico è realizzato in ossido di silicio con uno spessore $t_{\text{ox}}=6 \text{nm}$. La caduta di tensione tra substrato e contatto è $\Phi_{\text{ms}}=-0.96 \text{V}$.

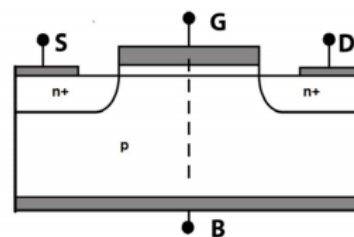


Figura 1. MOSFET su substrato p

- Calcolare la capacità specifica C'_{ox} del dielettrico, tensione di banda piatta V_{FB} e la tensione di soglia V_{T} .
- Per $V_{\text{S}}=V_{\text{G}}=V_{\text{D}}=V_{\text{B}}=0 \text{V}$ qual è lo stato elettrico dell'interfaccia (accumulo, inversione, svuotamento)? Giustificare la risposta disegnando e quotando l'andamento della densità di carica spaziale e del campo elettrico ai capi del sistema MOS in queste condizioni di polarizzazione.
- determinare la tensione di gate $V_{\text{G}} > V_{\text{T}}$ per cui, nel dielettrico, si raggiunge il campo di $5 \cdot \text{MV/cm}$. Disegnare grafici quotati dell'andamento della densità di carica spaziale e del campo elettrico ai capi del sistema MOS.
- Cambiare la polarità della tensione di gate $V_{\text{G}} < V_{\text{FB}}$ e, sempre con $V_{\text{S}}=V_{\text{D}}=V_{\text{B}}=0 \text{V}$, determinare la tensione V_{G} per cui si raggiunge il campo di $5 \cdot \text{MV/cm}$. Disegnare grafici quotati dell'andamento della densità di carica spaziale e del campo elettrico ai capi del sistema MOS.
- Cosa cambia nelle valutazioni di cui ai punti (a) e (b) se si porta $V_{\text{B}}=-15 \text{V}$, mantenendo $V_{\text{S}}=V_{\text{G}}=V_{\text{D}}=0 \text{V}$? Quotare la nuova estensione della zona svuotata, e riportare in grafici quotati la

densità di carica spaziale e il campo elettrico ai capi del sistema MOS.

1 Analisi del problema

Il problema riguarda lo studio di un MOSFET realizzato su silicio, viene assunto di studiarlo a temperatura $T=300K$.

1.1 Capacità specifica, tensione di banda piatta, tensione di soglia

1.1.1 Capacità specifica

La capacità specifica dell'ossido è definita come capacità tra gate e substrato per unità di area di contatto. Il condensatore che si forma, viene considerato un condensatore a facce piane parallele.

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox} A}{t_{ox}} \Rightarrow C'_{ox} = \frac{C_{ox}}{A} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 575 \text{ nF/cm}^2$$

Dove si è assunto $\varepsilon_{ox} = 34.53 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$.

1.1.2 Tensione di banda piatta

La tensione di banda piatta è definita come la tensione applicata ai morsetti esterni di gate e di bulk che annulla i campi elettrici all'interfaccia tra ossido e substrato. Assumendo l'ossido ideale, il substrato si troverà ad un potenziale Φ_{ms} rispetto al terminale di body. È necessario quindi portare il morsetto di gate allo stesso potenziale del substrato, annullando così il campo elettrico ai capi dell'ossido. La tensione di banda piatta risulta così:

$$V_{FB} = \Phi_{ms} = -0.96V$$

1.1.3 Tensione di soglia

Si definisce tensione di soglia la tensione applicata ai morsetti di gate e body tale per cui nella regione di substrato adiacente all'ossido si trovi una concentrazione di portatori minoritari uguale alla concentrazione dei maggioritari nel substrato. È possibile esprimere questa condizione come:

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

Da cui deriva:

$$\psi_S = 2 \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_i}{N_A}\right) = 0.716 \text{ V}$$

Applicando la legge di Kirchhoff delle tensioni, la V_T applicata esternamente per trovarci in questa condizione risulta:

$$V_T = \Phi_{ms} + \psi_S + \Delta V_{ox} = -0.159 \text{ V}$$

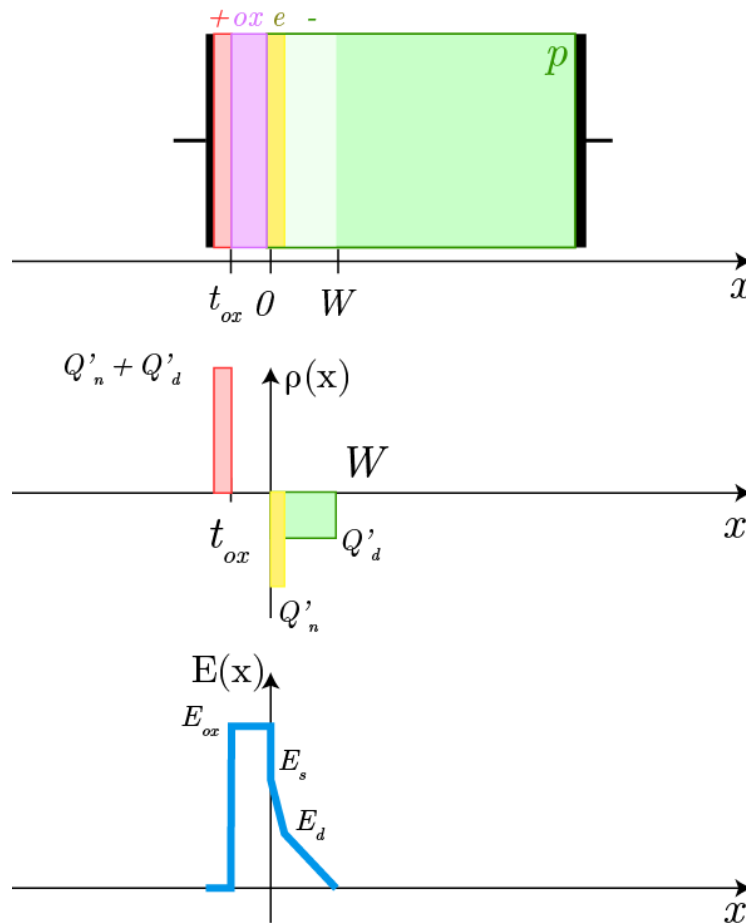
Dove:

$$\Delta V_{ox} = \frac{\sqrt{2 \varepsilon_{Si} \psi_S q N_A}}{C'_{ox}} = 0.0855 \text{ V}$$

È la caduta di tensione sull'ossido.

1.2 Studio per $V_S = V_G = V_D = V_B = 0 \text{ V}$

La differenza di potenziale tra il gate e il body è superiore alla tensione di soglia. Il dispositivo si trova quindi in condizione di inversione, e sono disponibili dei portatori minoritari accumulati all'interfaccia.



Con:

$$W = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_{Si} \psi_S}{q N_A}} = 307 \text{ nm}$$

$$E_{ox} = \frac{Q'_n + Q'_d}{\varepsilon_{ox}} = \frac{C'_{ox} V_{GB} - V_T + q N_A W}{\varepsilon_{ox}} = 407.2 \text{ kV/cm}$$

$$E_s = \frac{Q'_n + Q'_d}{\varepsilon_{Si}} = \frac{C'_{ox} (V_{GB} - V_T) + q N_A W}{\varepsilon_{Si}} = 133.40 \text{ kV/cm}$$

$$E_d = \frac{Q'_d}{\varepsilon_{Si}} = \frac{q N_A W}{\varepsilon_{Si}} = 46.67 \text{ kV/cm}$$

1.3 Tensione per $E_{ox} = 5 \text{ MV/cm}$

Considerata la relazione vista in precedenza:

$$E_{ox} = \frac{C'_{ox} V_{GB} - V_T + q N_A W}{\varepsilon_{ox}}$$

Si ottiene:

$$V_{GB} = \frac{E_{ox} \varepsilon_{ox}}{C'_{ox}} - \frac{q N_A W}{C'_{ox}} + V_T = 2.93 \text{ V}$$

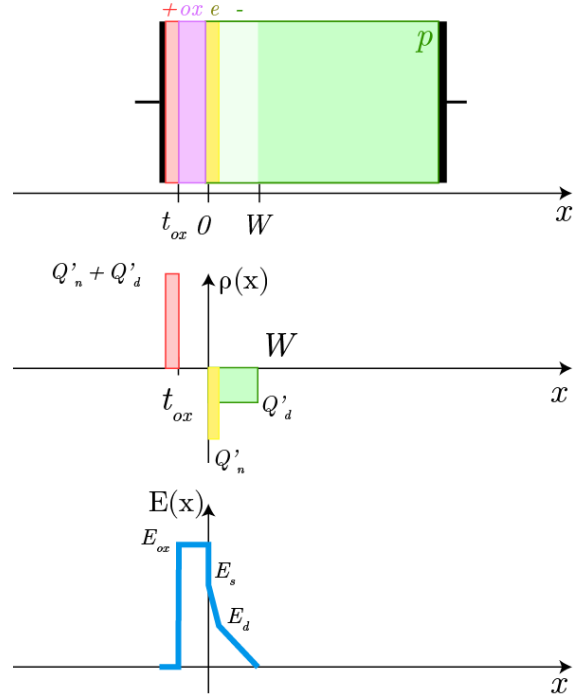
Riprendendo i risultati del punto precedente, si avrà:

$$W = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_{Si} \psi_S}{q N_A}} = 307 \text{ nm}$$

$$E_{ox} = \frac{Q'_n + Q'_d}{\varepsilon_{ox}} = 5 \text{ MV/cm}$$

$$E_s = \frac{Q'_n + Q'_d}{\varepsilon_{Si}} = 1.638 \text{ MV/cm}$$

$$E_d = \frac{Q'_d}{\varepsilon_{Si}} = 46.67 \text{ kV/cm}$$



1.4 Dispositivo in regime di accumulo

Il sistema si trova ora in regime di accumulo. I portatori maggioritari sono accumulati all'interfaccia tra il substrato e l'ossido. Sull'elettrodo di gate si trovano ora elettroni. Il dispositivo si comporta come un condensatore a facce piane parallele. Affinché sia $E_{ox} = -5 \text{ MV/cm}$, si dovrà avere una densità di carica:

$$Q' = E_{ox} \varepsilon_{ox} = -1.726 \text{ } \mu\text{C/cm}^2$$

Questa densità di carica, disposta nel dispositivo, è associata ad una tensione ai capi dell'ossido di:

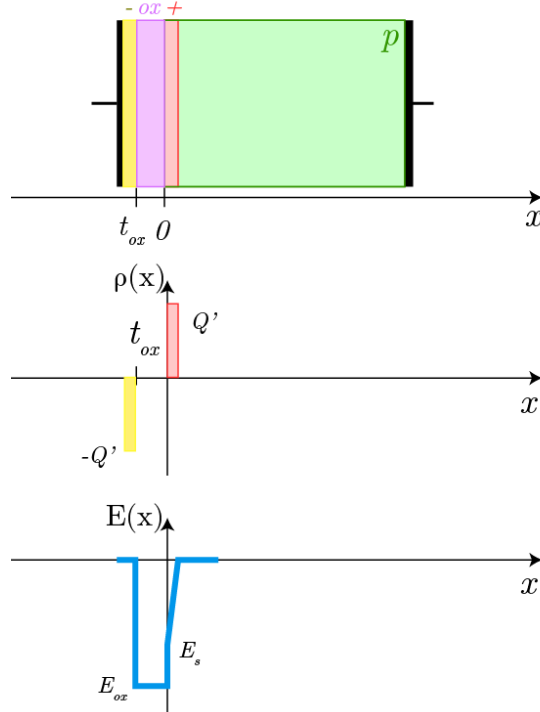
$$\Delta V_{ox} = \frac{Q'}{C'_{ox}} = -3.00 \text{ V}$$

La tensione da applicare dall'esterno è quindi:

$$V_{GB} = \Delta V_{ox} + \Phi_{ms} = -3.96 \text{ V}$$

Si avrà inoltre:

$$E_s = E_{ox} \frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{Si}} = -1.638 \text{ MV/cm}$$



1.5 Studio per $V_S=V_G=V_D=0V$ e $V_B=-15V$

Il dispositivo si trova di nuovo in regime di forte inversione. Applicando la legge di Kirchhoff delle tensioni si ha che:

$$V_{GB} = \Phi_{ms} + \Delta V_S + \Delta V_{ox}$$