

Dispositivi elettronici – AA2018/19

Homework 07

Valerio Nappi

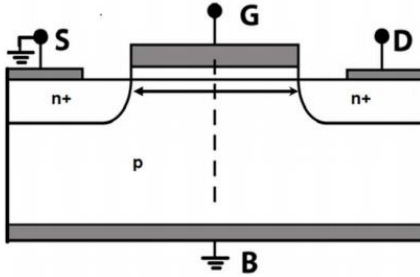
<https://5n44p.github.io/triennale-elettronica-polimi/>

Consegna

Si consideri il MOSFET in Figura 1. Esso è realizzato su substrato in silicio drogato con atomi accettori. Le caratterizzazioni sperimentali indicano una tensione di banda piatta $V_{FB} = -0.3V$ e una tensione di soglia pari a $V_{TH} = 0.6V$.

- a) Sapendo che il dielettrico è costituito da ossido di silicio con spessore nominale $t_{OX} = 60\text{\AA}$, valutare il drogaggio di substrato che sarebbe coerente con i dati elettrici ricavati dalle misure. Applicare il metodo iterativo di Newton-Raphson per risolvere l'equazione non lineare.
- b) Assumendo invece che il drogaggio di substrato sia pari al valore nominale di $N_A = 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, che spessore di ossido sarebbe coerente con i dati elettrici di misura? La caduta di tensione, ϕ_{ms} , tra metallo e substrato è pari alla differenza tra i livelli di Fermi nei due materiali a contatto. Nel metallo di contatto (alluminio) la distanza tra livello di vuoto e livello di Fermi (funzione lavoro) è $q\Phi_M = 4.1 \text{ eV}$. I parametri per il silicio sono in Tabella I.
- c) Supponendo che il substrato abbia drogaggio N_A ricavato in (a) determinare la funzione lavoro nel semiconduttore e il valore nominale della caduta di tensione, ϕ_{ms} , che ci si attenderebbe.
- d) Ripetere la valutazione di ϕ_{ms} nell'ipotesi che il substrato abbia il drogaggio nominale $N_A = 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$.
- e) Sulla base dei risultati in (c) e (d) verificare se il dato sperimentale $V_{FB} = -0.3V$ possa essere dovuto a carica fissa posta all'interfaccia ossido/semiconduttore. Valutare la densità superficiale di questa carica (C/cm^2) e il relativo segno.

- f) Riassumere in una tabella i due set di parametri che sarebbero coerenti con i risultati sperimentali misurati sul transistor.
- g) Supponendo che il sistema sia descritto dai parametri coerenti con la situazione (c), quotare la dimensione della zona di carica spaziale nel semiconduttore con $V_G=2.5V$, $V_D=V_S=0V$ e disegnare l'andamento del campo elettrico nella direzione ortogonale all'interfaccia. Indicarne i valori all'interfaccia silicio/ossido e all'interno dell'ossido.



Gap di energia (Silicio):	$E_{GAP} = 1.12 \text{ eV}$
Affinità elettronica (Silicio):	$\chi = 4.05 \text{ eV}$
Densità stati equiv. in BC	$N_C = 3.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Densità stati equiv. in BV	$N_V = 1.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Tabella I. Parametri

Figura 1. Transistore n-MOSFET

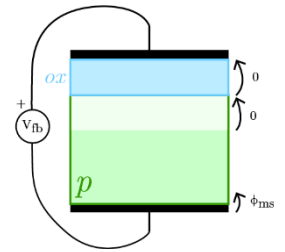
1 Analisi del problema

Il problema riguarda lo studio di un MOSFET realizzato su silicio, viene assunto di studiarlo a temperatura $T=300K$. Si assume inoltre che il dielettrico in ossido di silicio sia ideale e non presenti cariche intrappolate.

1.1 Drogaggio N_A dai dati sperimentali

La condizione di banda piatta per un condensatore MOS con ossido ideale si verifica quando il potenziale sulla regione svuotata e il potenziale ai capi dell'ossido sono nulli. La tensione di banda piatta è quindi:

$$V_{fb} = \phi_{ms} = -0.300 \text{ V}$$



In condizione di soglia si avrà invece:

$$V_T = \phi_{ms} + \psi_S + \Delta V_{ox} = 0.600 \text{ V}$$

Dove sia ψ_S che ΔV_{ox} sono funzioni del drogaggio di substrato N_A , secondo l'equazione non lineare:

$$2 \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) + \frac{\sqrt{2 \varepsilon_{Si} 2 \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) q N_A}}{C'_{ox}} - V_T + \phi_{ms} = 0$$

Dove:

$$C'_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 575.5 \text{ nF/cm}^2$$

Che attraverso strumenti di calcolo numerico può essere risolta, ad ottenere:

$$N_A = 4.62 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

1.2 Spessore dell'ossido per $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

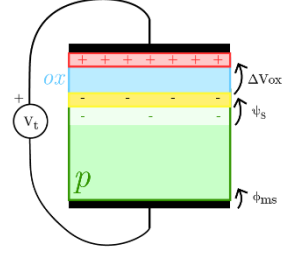
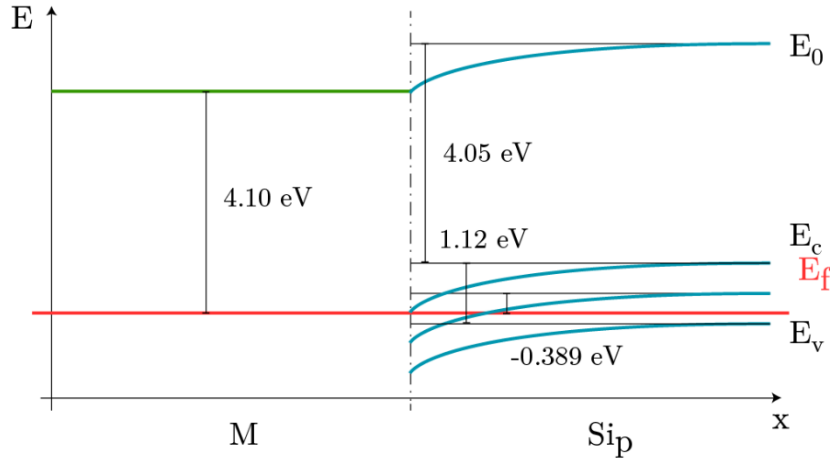
La differenza di energia tra il livello di Fermi e il livello intrinseco nel semiconduttore è:

$$q\phi_p = -kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = -0.389 \text{ eV}$$

Che risulta in una ϕ_{ms} di:

$$\phi_{ms} = 4.1 \text{ V} - 4.05 \text{ V} - \frac{E_g}{2} - 0.389 \text{ V} = -0.899 \text{ V}$$

Il diagramma delle bande sarà:



Con la nuova ϕ_{ms} , nel caso $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ si avrebbe:

$$t_{ox} = \frac{V_T - \phi_{ms} - \psi_S}{\sqrt{2} \varepsilon_{Si} \psi_S q N_A} \varepsilon_{ox} = 2.17 \text{ } \mu m$$

Con:

$$\psi_S = 2 \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.779 \text{ V}$$

1.3 Potenziale di contatto per $N_A = 4.62 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Per $N_A = 4.62 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, si ha:

$$q\phi_p = -kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = -0.447 \text{ eV}$$

$$\phi_{ms} = 4.1 \text{ V} - 4.05 \text{ V} - \frac{E_g}{2} - 0.447 \text{ V} = -0.957 \text{ V}$$

1.4 Potenziale di contatto per $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Come già valutato, per $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ si ha:

$$q\phi_p = -kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = -0.389 \text{ eV}$$

Che risulta in una ϕ_{ms} di:

$$\phi_{ms} = 4.1 \text{ V} - 4.05 \text{ V} - \frac{E_g}{2} - 0.389 \text{ V} = -0.899 \text{ V}$$

1.5 Carica intrappolata nell'ossido

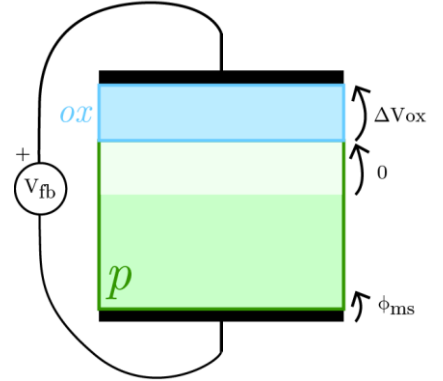
Per le ϕ_{ms} calcolate ai punti precedenti, e la V_{fb} ottenuta sperimentalmente, si può ricavare segno e densità della carica intrappolata all'interfaccia. Si ha infatti che:

$$V_{fb} = \phi_{ms} + \Delta V_{ox} = -0.300 \text{ V}$$

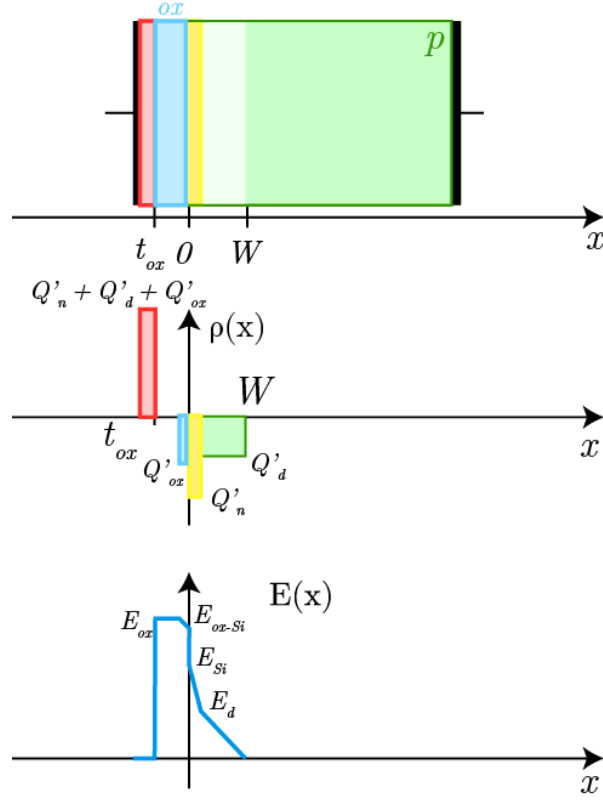
Dove $\Delta V_{ox} = \frac{Q'_{ox}}{C'_{ox}}$

Si ha allora:

$$Q'_{ox} = C'_{ox} (V_{fb} - \phi_{ms}) = \begin{cases} -723.4 \text{ nC/cm}^2, & \phi_{ms} = -0.957 \text{ V} \\ -690.0 \text{ nC/cm}^2, & \phi_{ms} = -0.899 \text{ V} \end{cases}$$



1.6 Studio del dispositivo oltre la tensione di soglia



Si studia ora il dispositivo per $V_G=2.5V$, $V_D=V_B=V_S=0V$, $\phi_{ms} = -0.957V$, $N_A = 4.62 \cdot 10^{17} cm^{-3}$, $Q'_{ox} = -723.4 nC/cm^2$.

La differenza di potenziale ai capi dell'ossido sarà di:

$$\Delta V_{ox} = \frac{Q'_{ox} + Q'_d + Q'_n}{C'_{ox}} = V_{GS} - \psi_S - \phi_{ms} = 3.07V$$

In cui:

$$\begin{aligned} Q'_{ox} &= -723.4 nC/cm^2 \\ Q'_d &= \sqrt{2 \varepsilon_{Si} \psi_S q N_A} = -246.0 nC/cm^2 \\ Q'_n &= \Delta V_{ox} C'_{ox} - (Q'_{ox} + Q'_d) = -797.4 nC/cm^2 \end{aligned}$$

All'interno dell'ossido si avrà campo elettrico:

$$E_{ox} = \frac{Q'_{ox} + Q'_d + Q'_n}{\varepsilon_{ox}} = 5.117 MV/cm$$

Saranno poi presenti due punti di discontinuità del campo elettrico all'interfaccia dielettrico-semiconduttore. La prima verrà incontrata in corrispondenza della carica intrappolata nell'ossido, e sarà:

$$E_{ox-Si,ox} = \frac{Q'_d + Q'_n}{\varepsilon_{ox}} = 3.021 \text{ MV/cm}$$

La seconda in corrispondenza del cambio di costante dielettrica, sarà:

$$E_{ox-Si,Si} = \frac{Q'_d + Q'_n}{\varepsilon_{Si}} = 990.0 \text{ kV/cm}$$

Dopo lo strato di carica all'interfaccia ci sarà campo elettrico:

$$E_d = \frac{Q'_d}{\varepsilon_{Si}} = 712.4 \text{ kV/cm}$$