

Dispositivi elettronici – AA2018/19

Homework 08

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

Consegna

Si consideri il sistema MOS in Figura 1. Esso è realizzato su un substrato in silicio drogato n ($N_D=5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$), ed è dimensionato per realizzare transistori a canale p. Lo spessore dell'ossido è di 5nm. L'elettrodo di gate è realizzato con uno strato conduttivo (M_A) con funzione lavoro $\phi_A=5.15\text{eV}$, il contatto di substrato con uno strato conduttivo (M_B) con funzione lavoro $\phi_B=4.45\text{eV}$, i conduttori afferenti al generatore di polarizzazione sono di rame (M_C con $\phi_C=4.61\text{eV}$).

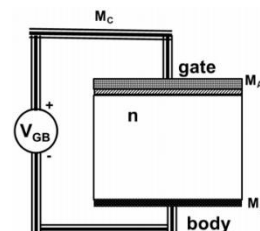


Figura 1. MOS su substrato n

- Indicare valore e verso delle cadute di potenziale alle diverse giunzioni metalliche e dimostrare che la tensione di banda piatta, V_{FB} , dipende solo dalla funzione lavoro ϕ_A . Determinarne il valore.
- Lo strato (M_A) è realizzato con polisilicio *drogato p*. Stimare il drogaggio necessario per ottenere la funzione lavoro desiderata.
- Determinare la tensione di soglia, V_{T0} , del sistema MOS.

Il sistema MOS precedente è utilizzato per realizzare un MOSFET a canale p con $W=2\mu\text{m}$, $L=0.25\mu\text{m}$ è impiegato in un invertitore CMOS alimentato con $V_{DD}=2.5\text{V}$.

- Si consideri l'uscita dell'inverter allo stato alto. Identificare il punto di lavoro del p-MOS, disegnare e quotare il profilo del campo elettrico, $\mathbf{F}(\mathbf{x})$, e della densità di carica, $\rho(\mathbf{x})$, lungo la sezione mediana del dispositivo, indicando l'estensione, \mathbf{Wn} , della regione svuotata.

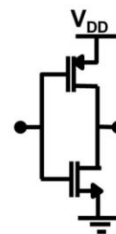


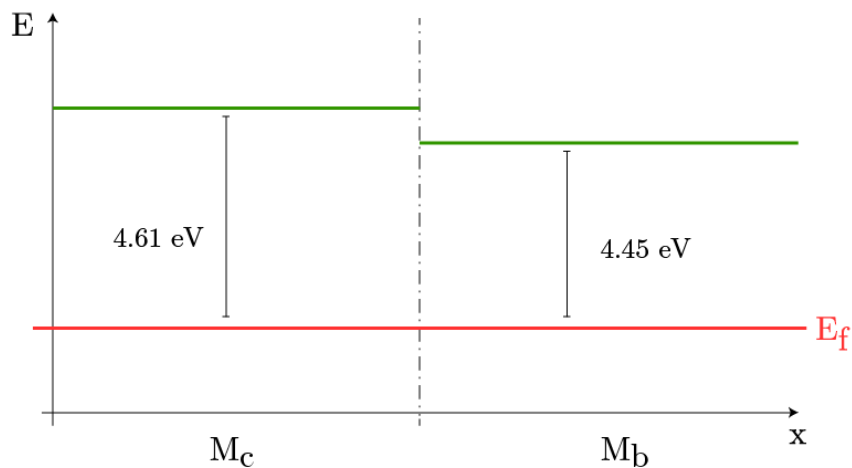
Figura 2. Invertitore CMOS

- e) Si valuti la massima corrente erogabile dal componente in commutazione, tenendo conto che la mobilità superficiale delle lacune è pari a $\mu_h=100 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$.

1 Analisi del problema

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

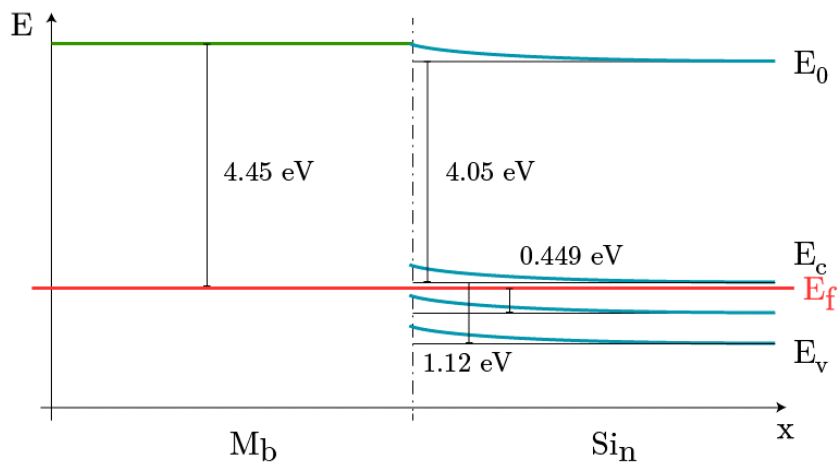
Nel sistema sono presenti tre giunzioni: M_c-M_b , M_b-Si_n e M_a-M_c di cui si rappresentano di seguito i diagrammi delle bande:



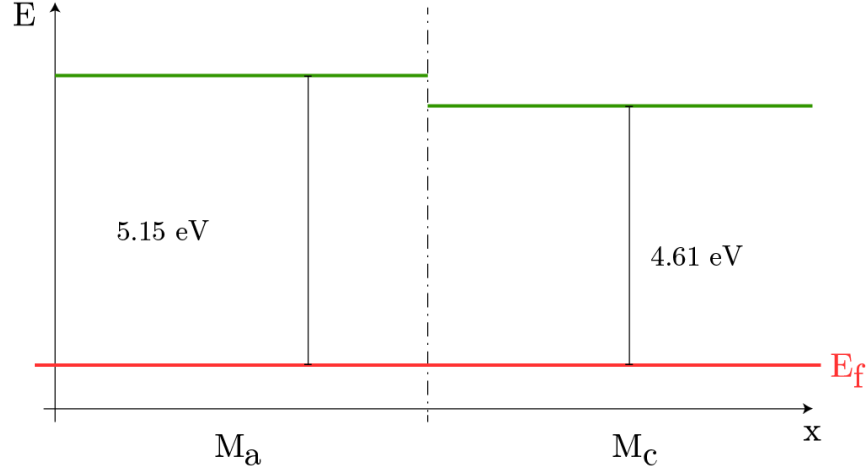
Per la giunzione M_b-Si_n è necessario calcolare la posizione del livello di Fermi rispetto al livello di Fermi intrinseco:

$$q\phi_n = kT \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = 0.449 \text{ eV}$$

Conoscendo il bandgap del silicio ($E_g = 1.12 \text{ eV}$) si ricava il grafico delle bande della giunzione M_b-Si_n :



Si ricava poi il grafico delle energie per la giunzione M_a-M_c :



1.1 Valore e verso delle cadute di potenziale alle giunzioni

Dati i grafici presentati al precedente punto, possiamo individuare tensione e verso delle cadute di potenziale delle giunzioni. Per la giunzione M_c-M_b :

$$\phi_{bc} = 4.61 - 4.45 \text{ V} = 0.16 \text{ V}$$

Per la giunzione M_b-Si_n si avrà:

$$\phi_{sb} = 4.45 - 4.05 - \frac{E_g}{2} + 0.45 \text{ V} = 0.29 \text{ V}$$

Infine, per la giunzione M_a-M_c si avrà:

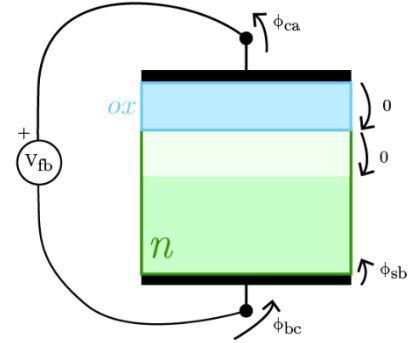
$$\phi_{ca} = 5.15 - 4.61 \text{ V} = 0.54 \text{ V}$$

Dove il verso è indicato dalla nomenclatura.

Si considera la legge di Kirchhoff alla maglia, per ricavare la tensione di banda piatta:

$$V_{fb} = \phi_{bc} + \phi_{sb} + \phi_{ca} = q\chi + \frac{E_g}{2} - q\phi_n - q\phi_a = 0.99 \text{ V}$$

È ora evidente che la tensione di banda piatta dipende solo dalla funzione lavoro ϕ_a e dal drogaggio del semiconduttore.



1.2 Concentrazione del drogante in M_A

Per avere funzione lavoro $q\phi_a = 5.15eV$, si considera:

$$q\phi_a = q\chi + \frac{E_g}{2} + kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$$

Da cui:

$$N_A = n_i e^{\frac{q\phi_a - q\chi - \frac{E_g}{2}}{kT}} = 1.69 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

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 interfaccia tra substrato e ossido si trovi una concentrazione di portatori minoritari uguale alla concentrazione dei maggioritari nel substrato.

Si avrà che:

$$\psi_S = 2 \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = 0.896 \text{ V}$$

$$C'_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 691 \text{ nF/cm}^2$$

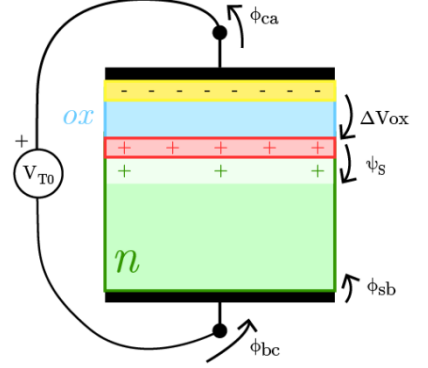
$$\Delta V_{ox} = \frac{\sqrt{2 \varepsilon_{Si} \psi_S q N_D}}{C'_{ox}} = 0.563 \text{ V}$$

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

La tensione di soglia sarà allora:

$$V_{T0} = \phi_{bc} + \phi_{sb} + \phi_{ca} - \psi_S - \Delta V_{ox} = -0.469 \text{ V}$$

Dove il segno è dato dalla convenzione usata in figura 1 della consegna per il generatore. Si osserva che è coerente col segno che ci si aspetta per un MOS a canale p.



2 Inverter CMOS

Si richiede ora lo studio di un inverter CMOS realizzato col dispositivo studiato ai punti precedenti. L'uscita dell'inverter si trova nello stato logico alto, pertanto l'ingresso si trova nello stato logico basso.

Si assume che la tensione di alimentazione dell'inverter $V_{DD} = 2.5V$ corrisponda al livello logico alto in ingresso, mentre la tensione $V_{SS}=0V$ rappresenti il livello logico basso. Pertanto, è richiesto lo studio del dispositivo con $V_G = 0V$, $V_S = V_B = 2.5V$. V_{SG} risulta essere $V_{SG} = -2.5V$. Ci si trova quindi oltre la tensione di soglia, in condizioni di forte inversione.

Sotto le assunzioni presentate, la tensione al drain del MOSFET, V_D si trova ad essere $V_D = 2.5V$, da cui $V_{DG} = -2.5V$. Non sussistono quindi le condizioni per la formazione di un punto di pinch-off. Il dispositivo sta operando in regione ohmica.

2.1 Studio del punto di lavoro

Si considera qui costante la carica nella regione svuotata, considerata pari alla carica nella regione svuotata a soglia, considerando quindi costante il potenziale ai capi della regione svuotata $\psi_S = 0.896V$. Sotto questa ipotesi, la caduta di potenziale ai capi dell'ossido sarà:

$$\Delta V_{ox} = \psi_S - V_{SG} - \phi_{bc} - \phi_{sb} - \phi_{ca} = 2.41V$$

Di questa, un contributo è dovuto alla carica fissa, e un contributo è dovuto alla carica mobile, secondo la relazione:

$$\Delta V_{ox} = \frac{Q'_d}{C'_{ox}} + \frac{Q'_p}{C'_{ox}}$$

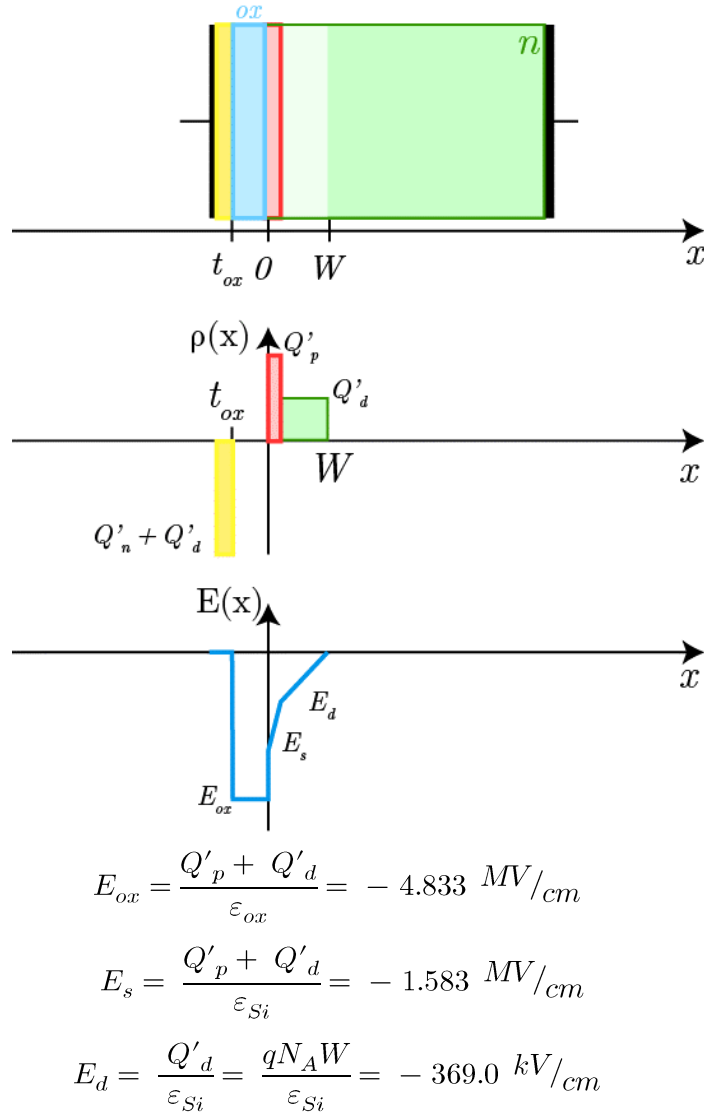
Dove Q'_d (*depleted*) è la densità di carica fissa, mentre Q'_p (*delle lacune*) è la densità di carica mobile. La densità di carica fissa è invariata rispetto allo studio a soglia, la densità di carica mobile risulta invece:

$$Q'_p = \Delta V_{ox} C'_{ox} - \sqrt{2 \varepsilon_{Si} \psi_S q N_D} = 1.28 \mu C/cm^2$$

Dove $Q'_d = \sqrt{2 \varepsilon_{Si} \psi_S q N_D} = 388.96 nC/cm^2$ è la densità di carica fissa.

La regione svuotata avrà dimensione $W = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_{Si} \psi_S}{q N_D}} = 48.55 nm$

I grafici degli andamenti nello spazio saranno allora:



Dove i segni sono conseguenza del verso in cui si è presa x.

2.2 Massima corrente erogabile

La massima corrente viene erogata dal dispositivo quando l'uscita dell'inverter è in fase di transizione L→H. In questa condizione $V_{DG}=0V$. Il MOSFET si trova quindi in saturazione, ed eroga al drain una corrente:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_p C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} + V_{T0})^2 = 1.140 \text{ mA}$$