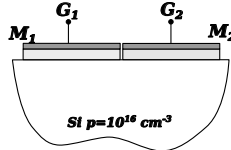


PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 1 Febbraio 2023

ESERCIZIO 1

In figura sono rappresentati due condensatori n -MOS, substrato $p = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{oxA} = 30 \text{ nm}$ e $\phi_M = \phi_S$. La tensione di soglia del condensatore 1 viene modificata introducendo uno strato di carica nell'ossido, molto vicino all'interfaccia silicio-ossido.



1) Determinare la concentrazione di carica per unità di superficie di M_1 , all'interfaccia ossido-silicio, per avere $V_{TH} = 4 \text{ V}$. [2]

Il dispositivo viene polarizzato con $V_{GB1} = V_{GB2} = 5 \text{ V}$ e viene illuminato con luce uniforme tale da generare 10^{15} coppie di elettroni-lacune al metro quadro, al secondo ($10^{15} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$). La generazione termica è trascurabile (dispositivo raffreddato).

2) Determinare il tempo necessario per portare all'equilibrio M_1 , e per questo tempo τ determinare la carica fissa e mobile di entrambi i condensatori. [4]

3) Al tempo τ^+ , V_{GB1} viene portato a 3 V . Determinare la carica fissa e mobile nel silicio di M_1 e di M_2 . Le superfici dei due condensatori sono le stesse. [4]

ESERCIZIO 2

Una giunzione pn ha le seguenti caratteristiche: $W_p = 500 \mu\text{m}$, $W_n = 5 \mu\text{m}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$.

1) Determinare la corrente per $V = -5 \text{ V}$. [3]

2) Determinare la tensione di polarizzazione inversa necessaria per raddoppiare la corrente. [4]

3) Determinare la massima tensione inversa applicabile per $\mathcal{E}_{Break\ Down} = 5 \times 10^7 \text{ V/m}$ e per $\mathcal{E}_{Break\ Down} = 10^7 \text{ V/m}$. [3]

ESERCIZIO 3

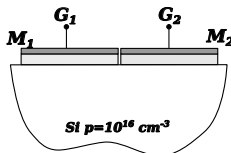
Si consideri un transistor n -MOS polysilicon gate con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.085 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W = L = 5 \mu\text{m}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, a 4 terminali.

1) Per $V_{SB} = 0$ e $V_{DS} = 0$ determinare V_{GS} per avere, nel canale, una concentrazione di elettroni alla superficie n_s pari alla metà di quella delle lacune nel bulk. Determinare la carica fissa. [3]

2) Per $V_{SB} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0$ determinare V_{GS} per avere una concentrazione di elettroni alla superficie n_s pari alla metà di quella delle lacune nel bulk. Determinare inoltre la carica fissa, e confrontarla con quella del punto 1. [3]

3) Per $V_{SB} = 5 \text{ V}$, V_{GS} quella del punto 2 e $V_{DS} = 5 \text{ V}$, il dispositivo viene illuminato uniformemente, in maniera tale da generare 10^{16} coppie di elettroni-lacune al metro quadro, al secondo ($10^{16} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$). Determinare la corrente I_{DS} . [4]

ESERCIZIO 1 In figura sono rappresentati due condensatori n -MOS, substrato $p = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{oxA} = 30 \text{ nm}$ e $\phi_M = \phi_S$. La tensione di soglia del condensatore 1 viene modificata introducendo uno strato di carica nell'ossido, molto vicino all'interfaccia silicio-ossido.



1) Determinare la concentrazione di carica per unità di superficie di M_1 , all'interfaccia ossido-gate, per avere $V_{TH} = 4 \text{ V}$. [2]

Il dispositivo viene polarizzato con $V_{GB1} = V_{GB2} = 5 \text{ V}$ e viene illuminato con luce uniforme tale da generare 10^{15} coppie di elettroni-lacune al metro quadro, al secondo ($10^{15} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$). La generazione termica è trascurabile (dispositivo raffreddato).

2) Determinare il tempo necessario per portare all'equilibrio M_1 , e per questo tempo τ determinare la carica fissa e mobile di entrambi i condensatori. [4]

3) Al tempo τ^+ , V_{GB1} viene portato a 3 V . Determinare la carica fissa e mobile nel silicio di M_1 e di M_2 . Le superfici dei due condensatori sono le stesse. [4]

SOLUZIONE 1

1) I condensatori MOS sono ideali ($\Phi_{MS} = 0$), quindi in assenza di cariche nell'ossido avremo:

$$\begin{aligned}\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 1.11 \text{ V}\end{aligned}$$

Se V_{TH} deve aumentare a 4 V , bisogna introdurre carica negativa:

$$\begin{aligned}V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 4 \text{ V} \\ Q_{ox} &= C_{ox} \left[4 - \left(\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B \right) \right] = 3.33 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2\end{aligned}$$

2) Con una polarizzazione pari a $V_{GB} = 5 \text{ V}$ serve una carica mobile (negativa) all'equilibrio pari a:

$$Q_n = C_{ox} (V_{GB} - V_{TH}) = 1.151 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \quad (1)$$

che significa $1.151 \times 10^{-3}/q = 7 \times 10^{15}$ elettroni/m². Quindi l'equilibrio viene raggiunto in 7 secondi ($\tau = 7 \text{ s}$). A 7 secondi, M_1 è in equilibrio, con $Q_n = C_{ox} (V_{GB} - V_{TH})$,

$V_S \simeq 2\psi_B$ e $Q_W = Q_W(2\psi_B) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = 4.84 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$. Sia Q_n che Q_W sono riportate in valore assoluto, sono entrambe negative. Il condensatore 2, invece, che ha $V_{TH} = 1.11 \text{ V}$, ha la stessa Q_n di M_1 ma non ha ancora raggiunto l'equilibrio. Avremo:

$$V_{GB} = -\frac{Q_n - \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S$$

$$5 = 1 + 0.504\sqrt{V_S} + V_S$$

Risolviendo l'equazione avremo, come unica soluzione accettabile, $V_S = 3.11 \text{ V}$. La carica fissa, negativa, risulta dunque (in valore assoluto) $Q_W = Q_W(V_S) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2V_S} = 1.31 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$.

3) Poichè $V_{GB1} = 3 < V_{TH1}$, la carica mobile nel condensatore 1 diventa praticamente 0, $Q_{n1} = 0$. Quindi, la Q_n accumulata sotto il condensatore 1 si sposta tutta sotto il condensatore 2. Alla carica mobile Q_n del condensatore 2 si aggiunge dunque quella del condensatore 1, e quindi raddoppia $Q_{n2} = 2.302 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$. Per la carica fissa di M_2 basta ripetere i conti del punto precedente, considerando una Q_n doppia, e otteniamo $V_S = 2.25 \text{ V}$; avremo $Q_W = Q_W(V_S) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2V_S} = 8.7 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$.

Dobbiamo trovare la carica fissa del condensatore 1, che è in svuotamento:

$$3 = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$3 = 0.504\sqrt{V_S} + V_S + 2.89$$

da cui si ricava $V_S = 0.16 \text{ V}$, e $Q_W = Q_W(V_S) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2V_S} = 2.32 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$.

ESERCIZIO 2

Una giunzione pn ha le seguenti caratteristiche: $W_p = 500 \mu\text{m}$, $W_n = 5 \mu\text{m}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S=1 \text{ mm}^2$.

- 1) Determinare la corrente per $V = -5 \text{ V}$. [3]
- 2) Determinare la tensione di polarizzazione inversa necessaria per raddoppiare la corrente. [4]
- 3) Determinare la massima tensione inversa applicabile per $\mathcal{E}_{Break\ Down} = 5 \times 10^7 \text{ V/m}$ e per $\mathcal{E}_{Break\ Down} = 10^7 \text{ V/m}$. [3]

SOLUZIONE 2

- 1) Calcoliamo i vari parametri della giunzione:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}$$

$$\begin{aligned}
D_p &= \frac{kT}{q} \mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{s} \\
L_n &= \sqrt{D_n \mu_n} = 50.84 \text{ } \mu\text{m} \\
L_p &= \sqrt{D_p \mu_p} = 32.15 \text{ } \mu\text{m}
\end{aligned}$$

Quindi la giunzione p è lunga, quella n è corta. Per $V = 5 \text{ V}$ in inversa avremo:

$$\begin{aligned}
V_0 &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.675 \text{ V} \\
W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V)} = 1.49 \text{ } \mu\text{m} \\
x_n &= W \frac{N_A}{N_D + N_A} = 1 \text{ } \mu\text{m}
\end{aligned}$$

La corrente di saturazione inversa (negativa) per $V = 5 \text{ V}$ risulta dunque:

$$I_0 = qS n_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{(W_n - x_n) N_D} \right) = 2.04 \text{ pA} \quad (2)$$

2) La corrente di saturazione inversa aumenta (in valore assoluto) con l'aumento della tensione di polarizzazione inversa, poiché aumenta x_n e quindi diminuisce la base n corta, dove vengono iniettate le lacune. Avremo:

$$\begin{aligned}
4.08 \times 10^{-12} &= qS n_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{(W_n - x_n) N_D} \right) \\
\frac{D_p}{(W_n - x_n) N_D} &= \frac{4.08 \times 10^{-12}}{qS n_i^2} - \frac{D_n}{N_A L_n} = 1.13 \times 10^{-19} \\
W_n - x_n &= 1.83 \text{ } \mu\text{m} \\
x_n &= W_n - 1.83 = 3.16 \text{ } \mu\text{m} \\
W &= x_n \frac{N_A + N_D}{N_A} = 4.75 \text{ } \mu\text{m} \\
\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V)} &= 4.75 \text{ } \mu\text{m}
\end{aligned}$$

Eseguito il conto, viene una tensione pari a 57 V.

3) Il break-down per svutamento della zona n (punch-through) si ha per una tensione per cui $x_n = W_n$:

$$\begin{aligned}
W &= x_n \frac{N_A + N_D}{N_A} = 7.5 \text{ } \mu\text{m} \\
\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V)} &= 6.15 \text{ } \mu\text{m}
\end{aligned}$$

eseguendo i conti si ha $V = 142$ V. Per questa tensione, il campo elettrico massimo, sul piano della giunzione, risulta:

$$\mathcal{E}_{max} = \frac{qN_A}{\epsilon_s}x_p = \frac{qN_D}{\epsilon_s}x_n = 38 \text{ MV/m} \quad (3)$$

Quindi se $\mathcal{E}_{Break\ Down} = 5 \times 10^7$ il break-down si ha per lo svuotamento completo della parte n , mentre se $\mathcal{E}_{Break\ Down} = 10^7$ il break-down si ha perché si raggiunge il campo elettrico massimo, per una giunzione pari a:

$$\begin{aligned} \frac{qN_D}{\epsilon_s}x_n &= 10 \text{ MV/m} \\ x_n &= \frac{\epsilon_s}{qN_D}10^7 = 1.31 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

Da cui si può calcolare la tensione di break-down.

ESERCIZIO 3

Si consideri un transistor n -MOS polysilicon gate con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.085 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W = L = 5 \text{ } \mu\text{m}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, a 4 terminali.

1) Per $V_{SB} = 0$ e $V_{DS} = 0$ determinare V_{GS} per avere, nel canale, una concentrazione di elettroni alla superficie n_s pari alla metà di quella delle lacune nel bulk. Determinare la carica fissa. [3]

2) Per $V_{SB} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0$ determinare V_{GS} per avere una concentrazione di elettroni alla superficie n_s pari alla metà di quella delle lacune nel bulk. Determinare inoltre la carica fissa, e confrontarla con quella del punto 1. [3]

3) Per $V_{SB} = 5 \text{ V}$, V_{GS} quella del punto 2 e $V_{DS} = 5 \text{ V}$, il dispositivo viene illuminato uniformemente, in maniera tale da generare 10^{18} coppie di elettroni-lacune al metro quadro, al secondo ($10^{18} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$). Determinare la corrente I_{DS} . [4]

SOLUZIONE 3

1) Usando la relazione di equilibrio:

$$\begin{aligned} V_S - V_{Bulk} &= \frac{kT}{q} \ln \frac{n_s}{\frac{n_i^2}{N_A}} \\ V_S &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{2 \frac{n_i^2}{N_A}} \\ V_S &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A^2}{n_i} \frac{1}{2} \right) = 0.675 \text{ V} \\ \psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{MS} &= -\frac{E_G}{2q} - \psi_B = -0.887 \text{ V} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\ V_{GS} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} = 0.203 \text{ V}\end{aligned}$$

La carica fissa (negativa) è quella standard (negativa), in valore assoluto: $Q_W = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 5.81 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$.

2) La tensione deve essere quella del punto 1, aumentata della tensione di polarizzazione Source-Bulk:

$$\begin{aligned}V_S &= V_{SB} + 0.675 = 5.675 \\ V_{GBulk} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} = 5.991 \text{ V}\end{aligned}$$

Quindi la tensione V_{GS} per ottenere $n_s = N_A/2$ è pari a $V_{GB} - V_{SB} = 0.991 \text{ V}$. La carica fissa è quella determinata da $V_S = 5.675$, in valore assoluto $Q_W = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 1.42 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$. È ovviamente più grande di quella del punto 1.

3) Se il Source (e quindi il canale) è polarizzato rispetto al substrato, tutte le cariche generate (termicamente o otticamente) nel canale, vanno a finire nei pozzetti. Quindi avremo, trascurando la generazione termica, che la corrente è data da tutte le cariche generate nel canale WL al secondo:

$$I_{DS} = q10^{18}WL = 4 \times 10^{-12} \text{ A} \quad (4)$$