DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 8 Febbraio 2012

ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

Una struttura n-MOS ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm) è realizzata con un processo polysilicon gate n^+. La struttura è illuminata con luce rossa ($\lambda = 630$ nm) con una potenza di 1 μW/mm^2. La struttura è raffreddata in maniera tale che i tempi di generazione e ricombinazione termica siano molto lunghi (considerarli infiniti). A $t = 0$ viene applicato un gradino di tensione di ampiezza 5 V ($V_{GS}(t = 0) = 5$ V).
1) Calcolare la carica fissa e mobile per unità di superficie a $t = 0^+$. [5]
2) Calcolare il tempo necessario affinchè i fotoelettroni generati siano sufficienti a portare la struttura MOS all'equilibrio (per equilibrio si intende la condizione di carica fissa e mobile proprie della tensione applicata, che normalmente viene raggiunta per generazione termica; si considerino le approssimazioni usualmente impiegate nel transistore MOS).[5]

SOLUZIONE 1

1) Iniziamo col calcolare la tensione di soglia che sará utile dopo. Essendo il Gate di polisilicio drogato di tipo n^+:

$$\begin{aligned} \psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \qquad \text{V} \\ \Phi_{MS} &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \qquad \text{V} \end{aligned}$$

È immediato calcolare la tensione di soglia V_{TH}:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \qquad \text{F/m}^2 \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| = 0.228 \qquad \text{V} \end{aligned}$$

A $t = 0^+$ la carica mobile è nulla perché il canale non si è ancora formato. La struttura MOS è in "svuotamento profondo". In questo caso bisogna calcolare la caduta di tensione ψ_s nel silicio che non si può approssimare con $2\psi_B$. Bisogna impostare l'equazione:

$$V_{GS} = -\frac{Q_n + Q_W}{C_{ox}} + \psi_s - |\Phi_{MS}|$$

dove $Q_n = 0$ e in valore assoluto (è negativa) $Q_W = \sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_s}$. Quindi bisogna risolvere l'equazione:

$$C_{ox}\left(V_{GS} + |\Phi_{MS}|\right) = \sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_s} + C_{ox}\psi_s$$

che risolta da come soluzione utile $\psi_s = 4.78$ V. La carica fissa è dunque pari a (è negativa, si riporta il valore assoluto):

$$Q_W = \sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_s} = 1.27 \times 10^{-3} \qquad \mathrm{C/m^2}$$

2) A regime la carica mobile nello strato di inversione della struttura MOS è pari a:

$$Q_n = C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 5.49 \times 10^{-3} \qquad \mathrm{C/m^2}$$

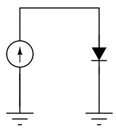
che equivale a $Q_n/e = 3.42 \times 10^{16}$ elettroni per $\mathrm{m^2}$.
I fotoni che arrivano hanno una lunghezza d'onda di 630 nm (laser rosso a stato solido). La loro energia è pari a:

$$E_{fotone} = \frac{hc}{\lambda} = 3.15 \times 10^{-19} \qquad \mathrm{J}$$

La potenza di 1 μw/mm^2 corrisponde dunque a$1 \times 10^{-6}/10^{-6}\ /3.15 \times 10^{-19} = 3.17 \times 10^{18}$ fotoni che arrivano ogni secondo per unità di superficie (al metro quadrato). Questo significa che 3.17×10^{18} coppie elettrone-lacuna vengono generate al secondo nell'unità di superficie: le lacune vanno verso il contatto di bulk, gli elettroni si accumulano nel canale fino a raggiungere 3.42×10^{16} elettroni per m^2. Questo avviene in $3.42 \times 10^{16}/3.17 \times 10^{18} = 0.011$ s cioè in circa 11 millisecondi.

ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Una giunzione n^+p brusca ha le seguenti caratteristiche: $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 1000$ cm^2/Vs, τ_n=10^{-6} s, lunghezza W della zona p (distanza giunzione



- contatto p) = 5 μm (considerare il diodo a base corta), sezione 5 mm^2. La giunzione è polarizzata con $I = 1$ mA (vedi il circuito in figura).

1) Calcolare la tensione di polarizzazione, verificando l'ipotesi di bassa iniezione (trascurare la regione di svuotamento).[3]

A $t = 0$ la corrente viene triplicata bruscamente ($I = 3$ mA, a gradino).

2) Determinare il transitorio della carica immagazzinata ed eseguirne un grafico. [4]

3) Determinare il transitorio di tensione ed eseguirne un grafico. [3]

SOLUZIONE 2

1) Il testo suggerisce che il diodo è a base corta. Infatti:

$$
\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \\
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \qquad \mu\text{m}
\end{aligned}
$$

Assumendo trascurabile la regione di svuotamento la corrente può essere espressa come:

$$
\begin{aligned}
I &= \frac{SqD_n}{W}\frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\
I &= I_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\
I_0 &= \frac{SqD_n}{W}\frac{n_i^2}{N_A} = 9.33 \times 10^{-12} \qquad \text{A}
\end{aligned}
$$

La differenza di potenziale risulta dunque:

$$
\begin{aligned}
I &= I_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\
V &= V_T \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) = 0.48 \qquad \text{V}
\end{aligned}
$$

Per verificare l'ipotesi di bassa iniezione basta calcolare l'eccesso in 0:

$$\delta_n(0) = \frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 2.4 \times 10^{18} \qquad \mathrm{m}^{-3}$$

che è quattro ordini di grandezza inferiore rispetto alla concentrazione dei maggioritari (lacune) pari a 10^{22} m^{-3}.

2) Per il transitorio di carica bisogna risolvere l'equazione di continuità per la giunzione:

$$i(t) = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q(t)}{\tau_n}$$

con $i(t)$=cost.=3 mA. Similmente al diodo a base lunga, la soluzione generale di questa equazione è:

$$Q(t) = A + Be^{\frac{-t}{\tau_n}}$$

Le condizioni a contorno però sono diverse in quanto per $t = 0^-$:

$$Q(0^-) = \frac{qS\delta_n(0, t = 0^-)W}{2} = 4.83 \times 10^{-12} \qquad \mathrm{C}$$

Questa espressione della carica totale immagazzinata è valida per un diodo a base corta con profilo di portatori minoritari lineare. Per $t \to \infty$:

$$Q(\infty) = \frac{qS\delta_n(0, t \to \infty)W}{2}$$

dove $\delta_n(0t \to \infty)$ può essere calcolato considerando $I = 3$ mA:

$$V = \ln\left(\frac{I}{I_0 + 1}\right) = 0.51 \qquad \mathrm{V}$$

$$\delta_n(0, t \to \infty) = \frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 8.0 \times 10^{18} \qquad \mathrm{m}^{-3}$$

e quindi:

$$Q(\infty) = \frac{qS\delta_n(0, t \to \infty)W}{2} = 1.61 \times 10^{-11} \qquad \mathrm{C}$$

Quindi il transitorio della carica può essere determinato semplicemente:

$$\begin{aligned} A + B &= Q(0^-) \\ A &= Q(\infty) \end{aligned}$$

e quindi:

$$Q(t) = Q(\infty) + \Big(Q(0^-) - Q(\infty)\Big)\, e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

3) Seguendo l'approssimazione di quasi-equilibrio il transitorio di tensione può essere ricavato da quello della carica:

$$\begin{aligned} Q(t) &= \frac{Sq\delta_n(0,t)W}{2} \\ Q(t) &= \frac{1}{2}Sq\frac{n_i^2}{N_A}e^{\frac{v(t)}{V_T}}W \\ v(t) &= V_T\ln\left(\frac{2Q(t)}{Sq\frac{n_i^2}{N_A}}\right) \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3 (DTE) In un processo LOCOS per la realizzazione di un circuito n-MOS polysilicon gate ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}), bisogna mettere a punto il passo di fabbricazione dell'ossido di campo. Il circuito da realizzare avrà una tensione di alimentazione massima di 5 V. Si considerino i seguenti parametri per l'ossidazione. WET a 920 ^{0}C: A=0.50 μm, B=0.203 μm^2/hr. DRY a 1100 ^{0}C: A=0.09 μm, B=0.027 μm^2/hr, τ= 0.0 hr.
1) Si calcoli il tempo necessario per una ossidazione dry, nel caso di drogaggio di channel stop 5×10^{18} cm-3). [5]
2) Si calcoli il tempo per una ossidazione wet necessario nel caso di drogaggio di channel stop pari a 10^{17} cm-3. [5]

SOLUZIONE 3 1) L'ossido di campo deve essere tale che la struttura n-MOS parassita gate-ossido di campo-substrato abbia una tensione di soglia maggiore della tensione massima del circuito (5 V). Nel caso di drogaggio di channel stop pari a 10^{19} cm-3 avremo dunque:

$$\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| > 5 \qquad \text{V}$$

dove:

$$\begin{aligned} \psi_B &= \frac{kT}{q}ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.51 \qquad \text{V} \\ \Phi_{MS} &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 1.05 \qquad \text{V} \end{aligned}$$

Possiamo calcolare lo spessore minimo di ossido da crescere:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{5 - 2\psi_B + |\Phi_{MS}|} \\ C_{ox} &= 2.58 \times 10^{-3} \qquad \mathrm{F/m^2} \end{aligned}$$

e quindi lo spessore dell'ossido dovrà essere:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \\ t_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 14 \qquad \mathrm{nm} \end{aligned}$$

che è uno spessore di ossido molto piccolo. Questo è compatibile con l'alto drogaggio. Lo spessore di ossido dry può essere calcolato con la seguente formula:

$$t_{ox} = \frac{A}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4B}{A^2}(\tau + t)}\right)$$

oppure, visto il ridotto spessore dell'ossido, può essere usata l'approssimazione lineare:

$$t_{ox} = \frac{B}{A}(t + \tau)$$

Facendo i conti, viene un tempo molto corto, pari a 2.8 minuti.

2) Nel caso di drogaggio 10^{17}, bisogna ripetere i conti per determinare C_{ox} e t_{ox}.

$$\begin{aligned} \psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.41 \qquad \mathrm{V} \\ \Phi_{MS} &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.95 \qquad \mathrm{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{5 - 2\psi_B + |\Phi_{MS}|} \\ C_{ox} &= 3.58 \times 10^{-4} \qquad \mathrm{F/m^2} \end{aligned}$$

da cui si ricava uno spessore di ossido pari a:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \\ t_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 96 \qquad \mathrm{nm} \end{aligned}$$

A questo punto dobbiamo fare riferimento alla formula:

$$t_{ox} = \frac{A}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4B}{A^2}(\tau + t)}\right)$$

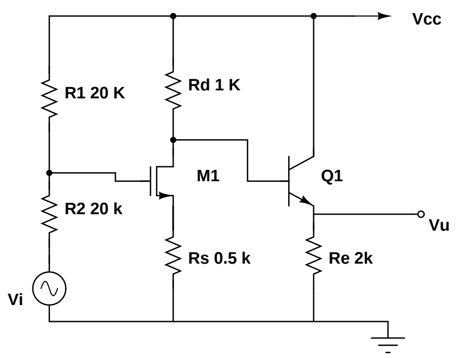
Svolgendo un po' di passaggi ($\tau = 0$) otteniamo:

$$t = \frac{A^2}{4B}\left[\left(\frac{2}{A}t_{ox} + 1\right)^2 - 1\right]$$

Facendo i conti, viene un tempo pari a 0.28 ore, che corrispondono a circa 17 minuti. In sintesi in caso di alti drogaggi i tempi di ossidazione sono brevi, anche considerando una ossidazione dry.

ESERCIZIO 4 (DE)

Con riferimento al circuito in figura, il transistore MOS $M1$ ha $\mu_n = 800$ cm^2/Vs, $t_{ox} = 50$ nm, $W/L = 10$, $V_{TH} = 1$ V. Il transistore bipolare ha un guadagno elevato ($\beta_f > 500$). $V_{CC} = 16$ V.



1) Calcolare il punto di riposo dei transistori.[6]

2) Disegnare il circuito equivalente per le variazioni, considerando $r_d \to \infty$ e $h_{oe} = 0$.[4]

SOLUZIONE 4

1) Per il transistore MOS avremo che $V_G = V_{CC}/2 = 8$ V. Nell'ipotesi di saturazione, la corrente I_{DS} sarà data da:

$$\begin{aligned} I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{2L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 \\ I_{DS} &= 2.76 \times 10^{-4} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 \end{aligned}$$

Ci sono diversi modi per impostare un'equazione di secondo grado necessaria per determinare V_{GS}. Un modo può essere:

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_{DS}R_S = V_G - 2.76 \times 10^{-4} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 \times 500$$

Risolvendo questa equazione vengono due valori, uno positivo (accettabile) ed uno negativo. Il valore accettabile risulta: $V_{GS} = 5.37$ V. Da qui otteniamo:

$$I_{DS} = 2.76 \times 10^{-4} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 5.25 \qquad \text{mA}$$

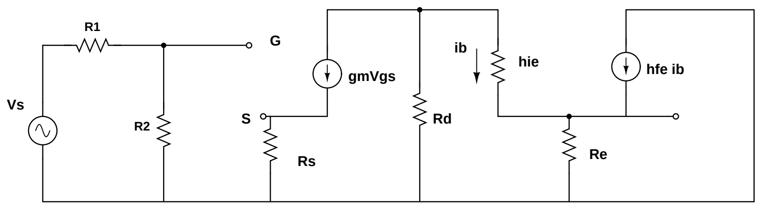
Quindi $V_{DS} = V_{CC} - R_D I_{DS} - R_S I_{DS} = 8.12$ V ed il MOS risulta in saturazione $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH} = 4.37$ V. A questo punto possiamo determinare la tensione $V_B = V_D$ sulla base del transistore bipolare:$V_B = V_{CC} - R_D I_{DS} = 10.75$ V. Nel fare questo, è stata trascurata la corrente di base rispetto a I_{DS}. La tensione sull'emettitore è pari a: $V_E = V_B - V_\gamma = 10.05$ V. La corrente $I_E \simeq I_C = 10.05/2 = 5$ mA. Avremo $V_{CE} = 16 - 10 = 6$ V ed il transistore bipolare è polarizzato correttamente. Avremo inoltre $I_B = I_E/\beta_F = 10$ μA « I_{DS}.Ricapitolando, per il MOS:

$$\begin{aligned} V_{GS} &= 5.37 \qquad \text{V} \\ I_{DS} &= 5.25 \qquad \text{mA} \\ V_{DS} &= 8.12 \qquad \text{V} \end{aligned}$$

e per il bipolare:

$$\begin{aligned} I_E \simeq I_C &= 5 \qquad \text{mA} \\ I_B &= 10 \qquad \text{mA} \\ V_{CE} &= 6 \qquad \text{V} \\ V_{BE} &= 0.7 \qquad (V) \end{aligned}$$

2) Il circuito per le variazioni è il seguente:


R1
G
Vs
R2
S
Rs
gmVgs
Rd
ib
hie
Re
hfe ib