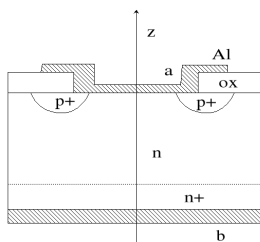


DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 5 febbraio 2011

ESERCIZIO 1 (DTE) 1) Descrivere i processi e disegnare le maschere necessarie alla real-



izzazione del dispositivo di cui nella figura è mostrata la sezione; la struttura del dispositivo si ottiene ruotando la sezione intorno all'asse z . Il wafer di partenza è drogato uniformemente di tipo n .

2) Scrivere l'espressione *esatta* della caratteristica fra i terminali a e b , nonché quella *approssimata* utilizzabile nelle applicazioni.

ESERCIZIO 2 (DE) Una struttura MOS ideale è definita da: $t_{ox} = 50 \text{ nm}$, $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $S = 1 \text{ mm}^2$.

1) Si disegni l'andamento della capacità in funzione della V applicata e se ne calcoli il valore per $V \ll 0$.

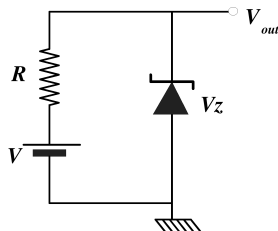
2) Si supponga poi che nell'ossido sia presente una carica positiva uniformemente distribuita in uno strato di 5 nm all'interfaccia ossido-silicio, di valore $k = 9 \times 10^5 \text{ Cm}^{-3}$. Calcolare la capacità per $V = 0$.

ESERCIZIO 3 (DE,DTE) Un transistor n -MOS polysilicon gate a tre terminali ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{ncanale} = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_{nbulk} = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, tempo di vita media $\tau_n = 1 \mu\text{s}$, $L = W = 2 \mu\text{m}$, $t_{OX} = 50 \text{ nm}$, area contatto pozzetto di Drain $100 \mu\text{m}^2$) è polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$.

1) Per $V_{DS} = 6 \text{ V}$ determinare la corrente I_{DS} considerando la lunghezza effettiva di canale. Valutare l'incremento della corrente rispetto a $V_{DS} = V_{DSSat}$.

2) Per $V_{DS} = -0.5 \text{ V}$ disegnare il circuito equivalente del dispositivo (V_{DS} piccola) e calcolare la corrente.

ESERCIZIO 4 (DE) Nel regolatore in figura, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $V_Z = 5 \text{ V}$, $R_D = 50 \Omega$, $R_Z = 20 \Omega$.



1) Disegnare la caratteristica $I - V$ e la retta di carico per $V = 10 \text{ V}$ e $V = 8 \text{ V}$.

2) Calcolare il fattore di regolazione per i valori nominali di tensione $V = 10 \text{ V}$ e $V = 8 \text{ V}$. Calcolare inoltre la variazione di tensione in uscita per una tensione nominale di $V = 10 \text{ V}$ ed una variazione di tensione in ingresso pari a 100 mV .

3) Cosa succede se $V = 5 \text{ V}$?

PROVA SCRITTA DEL 5 febbraio 2011, DE e DTE

SOLUZIONE

ESERCIZIO 1

1) a) ossidazione; b) apertura di una finestra nell'ossido (mask b); c) drogaggio $p+$; d) eliminazione dell'ossido; e) nuova ossidazione; f) apertura di una finestra (mask f); g) evaporazione Al; h) definizione contatto Al (mask h). A questo punto, in conseguenza del passo f) non c'è più ossido sul retro del wafer per cui si può procedere all'impiantazione ionica $n+$ sul retro, che serve da contatto ohmico.

2) Si tratta di un diodo Schottky e di una giunzione $p+n$ in parallelo; la caratteristica si scrive

$$I = (I_{pn} + I_{Sc}) \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

con

$$I_{pn} = qS \frac{D_h}{L_h} p_{n0}, I_{Sc} = qSAT^2 e^{-\frac{q\Phi_{BN}}{kT}};$$

dato tuttavia che I_{Sc} è ordini di grandezza maggiore di I_{pn} la caratteristica del dispositivo può essere approssimata con quella del solo diodo Schottky.

ESERCIZIO 2

1) L'andamento è quello solito ed mostrato qualitativamente in figura. Per $V < 0$ la capacità si riduce alla C_{OX} e quindi

$$C_{OX} = \varepsilon_{ox} \frac{S}{t_{ox}} = 3.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times \frac{10^{-6}}{5 \times 10^{-8}} = 6.9 \times 10^{-10} \text{ F}$$

2) La tensione di soglia ideale vale

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\Psi_B}}{C_{ox}} + 2\Psi_B$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21} \times 0.577}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}} \times 5 \times 10^{-8} + 0.577 = 0.778 \text{ V}$$

mentre quella con la carica nell'ossido è pari a (Q_{ox} è una carica per unità di superficie)

$$V_{TH}^* = V_{TH} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = V_{TH} - \frac{kt_{ox}}{C_{ox}} = 0.778 - \frac{5 \times 10^{-9} \times 9 \times 10^5}{\frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}}{50 \times 10^{-9}}} = -5.74 \text{ V}$$

per cui la curva è traslata verso sinistra di questa quantità; per la capacità in $V = 0$ si avrà

$$C_{TOT} = \left(\frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_W} \right)^{-1}$$

con

$$C_W = \varepsilon_s \frac{S}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_s 2\psi_B}{qN_A}}} = 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times \frac{10^{-6}}{\sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.577}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}}} = 1.2 \times 10^{-10} \text{ F}$$

e quindi

$$C_{TOT} = \left(\frac{1}{6.88 \times 10^{-10}} + \frac{1}{1.2 \times 10^{-10}} \right)^{-1} = 1.02 \times 10^{-10} \text{ F.}$$

ESERCIZIO 3

1) Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia del dispositivo, considerando il gate in polisilicio $n+$.

$$C_{OX} = \frac{\varepsilon_{OX}}{t_{OX}} = 6.906 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

$$\psi_B = V_T \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) = 0.179$$

$$\Phi_{MS} = \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.718$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| = 0.143 \text{ V}$$

Se $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 6 \text{ V}$, il transistor è in saturazione ($V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$). Avremo quindi che:

$$I_{DS}(V_{DSSat}) = \frac{\mu_{ncanale} C_{OX} W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0.65 \text{ mA}$$

$$I_{DS}(6 \text{ V}) = \frac{\mu_{ncanale} C_{OX} W}{2L_{effettiva}} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Per calcolare la lunghezza effettiva, bisogna calcolare la regione di svuotamento Drain-Substrato, che è determinata dalla caduta di tensione tra Drain e punto di strozzamento P :

$$V_{DP} = V_{DS} - V_{DSSat} = V_{DS} - (V_{GS} - V_{TH}) = 1.143 \text{ V}$$

$$W_{DP} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}}{qN_A} (V_{oDSubst} + V_{DP})}$$

dove $V_{oDSubst}$ è la differenza dei livelli di Fermi tra Drain ($n+$) e substrato ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) pensati lontani, prima della giunzione, e sarà determinata da $V_{oDSubst} = \Phi_{MS}$. Avremo quindi:

$$W_{DP} = 0.495 \text{ } \mu\text{m}$$

$$L_{effettiva} = L - W_{DP}$$

da cui segue:

$$I_{DS} = \frac{\mu_{ncanale} C_{OX}}{2} \frac{W}{L_{effettiva}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0.86 \text{ mA}$$

con un incremento, rispetto a $I_{DS}(V_{DSSat})$, pari a più del 30%.

2) Il dispositivo equivale ad una resistenza, poichè V_{DS} è piccola ed il transistor lavora in zona lineare, in parallelo alla giunzione (diodo) Drain-Substrato (Drain-Source) che è polarizzata in diretta.

La corrente nel canale può essere calcolata come:

$$I_{DS} = \mu_{ncanale} C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = -0.13 \text{ mA}$$

e scorre dal Source al Drain (negativa rispetto al verso abituale, dal Drain al Source).

La corrente nel diodo (in parallelo al canale) scorre dal Source al Drain e può essere calcolata come:

$$I_{DS} = I_{oDSubst} \left(e^{\frac{V_{DS}}{V_T}} - 1 \right)$$

Dato che la giunzione è asimmetrica ($n + /p$)

$$I_{oDSubst} = q \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} S_{Drain}$$

$$D_n = V_T \mu_n = 2.59 \times 10^{-3}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \text{ } \mu\text{m}$$

$$I_{oDSubst} = 1.83 \times 10^{-17} \text{ A}$$

$$I_{DS} = 4.44 \text{ nA}$$

Per questa tensione Drain-Substrato, la corrente risulta dunque piccola.

ESERCIZIO 4

1) La caratteristica $I - V$ è quella tipica di un diodo zener, con la retta di carico nel terzo quadrante, di pendenza $1/R$.

2) Il fattore di regolazione è

$$f_r = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V}$$

ed è dovuto essenzialmente alla resistenza non nulla del diodo zener, quando è polarizzato in zona zener (nel terzo quadrante). Non dipende dal valore nominale della tensione ($V = 10 \text{ V}$ o $V = 8 \text{ V}$), ma solo da R e R_Z :

$$\Delta V_{out} = \Delta V \frac{R_Z}{R + R_Z}$$

$$f_r = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V} = \frac{R_Z}{R + R_Z} = 0.020$$

cioè il fattore di regolazione dice che il 2% della variazione della tensione in ingresso è riportato all'uscita. Nel caso che in ingresso la tensione vari di $\Delta V = 100 \text{ mV}$, in uscita la tensione varia di 2 mV.

3) Se la tensione nominale in ingresso è pari a 5 V, che è proprio la tensione di zener (di ginocchio), il diodo zener non è polarizzato correttamente e non si ha regolazione.