

Prova scritta del 18/02/09

ESERCIZIO 1

Una struttura MOS è formata da: Si ($N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), SiO_2 ($t_{ox} = 20 \text{ nm}$), gate di Pt ($\Phi_M = 5.3 \text{ eV}$).

- 1) Disegnare la struttura a bande all'equilibrio.
- 2) Determinare in valore e segno la tensione di bande piatte.
- 3) Se l'area $S = 400 \times 400 \mu\text{m}^2$, calcolare la capacità totale alla soglia.

ESERCIZIO 2

Data una giunzione n^+p polarizzata direttamente:

- 1) Scrivere l'espressione della J_{TOT} per una generica x della zona quasi-neutra (asse x orientato da n a p).
- 2) Per $x \rightarrow \infty$ determinare l'espressione del campo elettrico dopo aver esplicitato J_{TOT} .

ESERCIZIO 3

In un transistore NMOS ideale ($N_A = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $L = 0.5 \mu\text{m}$) l'ossido di gate non ha spessore uniforme. Lo spessore è descritto dalla relazione: $t_{ox}(y) = a - k \left(y - \frac{L}{2}\right)^2$, y direzione del canale ($y = 0$ sul source), $a = 100 \text{ nm}$, $k = 1.44 \times 10^6$.

- 1) Determinare la minima V_{GS} che permette di far condurre il transistore.
- 2) Per $V_{GS} = 1.5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0$, determinare le regioni dove è presente il canale e l'ampiezza della regione di svuotamento a metà canale; disegnare la sezione longitudinale del transistore evidenziando le regioni di svuotamento
- 3) Per $V_{GS} = 3 \text{ V}$ calcolare l'ampiezza della regione di svuotamento nel canale, facendo uso delle approssimazioni usuali, e disegnare la sezione del transistore con le regioni di svuotamento.

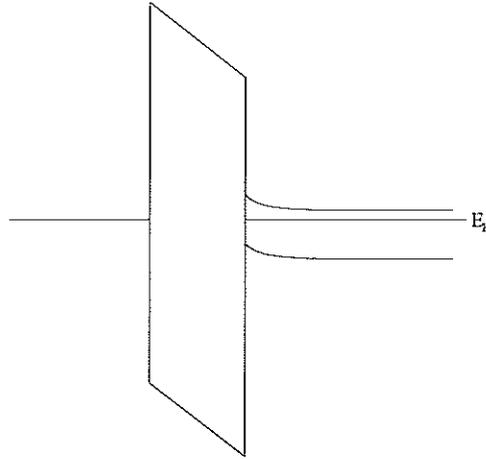
SOLUZIONE 1

1, 2) La funzione di lavoro del Si Φ_{Si} vale

$$\Phi_{Si} = \chi + kT \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) = 4.04 + 0.026 \times \ln \left(\frac{2.8 \times 10^{19}}{10^{15}} \right) = 4.31 \text{ eV} < \Phi_M,$$

quindi fra Si e gate si ha, all'equilibrio, una ddp di contatto pari a $V = \frac{\Phi_M - \Phi_{Si}}{q} = 5.3 - 4.31 = 0.99 \text{ V}$. Segue che la tensione di bande piatte $V_{GS} = V_{FB} = 0.99 \text{ V}$.

La struttura a bande è, qualitativamente, quella della figura



3) Alla soglia la capacità totale è data da

$$C_{TOT} = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_w} \right)^{-1} = \left(\frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox} S} + \frac{\sqrt{\frac{2\epsilon_s 2\psi_B}{qN_D}}}{\epsilon_s S} \right)^{-1}$$

$$C_{TOT} = \left(\frac{20 \times 10^{-9}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-7}} + \frac{\sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.577}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}}}{11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-7}} \right)^{-1}$$

$$= 1.8 \times 10^{-11} \text{ F}$$

SOLUZIONE 2

1) Si hanno tre contributi: la densità di corrente di diffusione relativa all'eccesso di elettroni iniettati, la densità di corrente di diffusione relativa all'eccesso di lacune richiamate dal contatto, la densità di corrente di drift relativa ai maggioritari.

$$J_{TOT} = qD_n \frac{d}{dx} \left(\delta n(0) e^{-\frac{x}{L_n}} \right) - qD_p \frac{d}{dx} \left(\delta p(0) e^{-\frac{x}{L_p}} \right) + q\mu_h p_{p0} \mathcal{E}$$

2) Per $x \rightarrow \infty$ la densità di corrente si riduce a

$$J_{TOT} = q\mu_h p_{p0} \mathcal{E}$$

$$-q \frac{D_n}{L_n} \delta n(0) = q\mu_h p_{p0} \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E} = -\frac{D_n}{L_n} \frac{\delta n(0)}{\mu_h p_{p0}} = -\frac{D_n}{L_n} \frac{\delta n(0)}{\mu_h p_{p0}}$$

SOLUZIONE 3

1) La V_{GS} deve essere tale da generare il canale (carica mobile) in tutto il transistor.

Quindi, data l'espressione della V_{TH} in funzione dello spessore dell'ossido, e quindi di y :

$$V_{TH}(y) = \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A 2\psi_B}}{\varepsilon_{ox}} t_{ox}(y) + 2\psi_B$$

dovremo avere per V_{GS}

$$V_{GS} > V_{TH\max} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A 2\psi_B}}{\varepsilon_{ox}} t_{ox\max} + 2\psi_B;$$

dal momento che:

$$t_{ox\max} = a = 100 \text{ nm}$$

avremo:

$$\psi_B = V_T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347$$

$$V_{GS} > V_{TH\max} = 2.09 \text{ V}$$

2) Per il valore $V_{GS} = 1.5 \text{ V}$, la struttura MOS non risulta invertita per tutti i valori di y . In modo particolare il canale sarà strozzato in due punti, simmetrici rispetto a $L/2$, in cui si ha:

$$t_{ox}(y_{inv}) = \frac{V_{TH}(y_{inv})}{\frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A 2\psi_B}}{\varepsilon_{ox}}} = \frac{V_{GS}}{\frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A 2\psi_B}}{\varepsilon_{ox}}} (V_{GS} - 2\psi_B) = 57.5 \text{ nm}$$

e quindi i punti del canale in cui si ha lo strozzamento si determinano come:

$$a - k \left(y_{inv} - \frac{L}{2} \right)^2 = 57.5 \text{ nm}$$

$$\left(y_{inv} - \frac{L}{2} \right)^2 = \frac{a - 57.5 \times 10^{-9}}{k}$$

$$y_{inv} - \frac{L}{2} = \pm 172 \text{ nm}$$

Quindi il canale è strozzato nei punti:

$$y_1 = 328 \text{ nm}$$

$$y_1 = 672 \text{ nm}$$

A metà canale non c'è carica mobile negativa, perché la struttura MOS non è ancora all'inversione. Il calcolo della regione di svuotamento può essere impostato:

$$V_{GS} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A \psi_s}}{\varepsilon_{ox}} t_{ox}(L/2) + \psi_s$$

$$1.5 = 1.683 \sqrt{\psi_s} + \psi_s$$

Risolvendo:

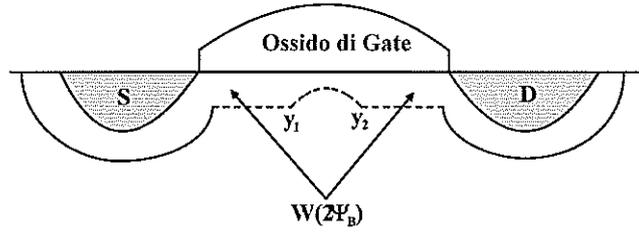
$$\psi_s = 0.415$$

e quindi l'ampiezza della regione di svuotamento risulta:

$$W\left(\frac{L}{2}\right) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_A} \psi_s} = 234 \text{ nm.}$$

Il grafico, dove si evidenzia la regione di svuotamento, mostra $W(2\psi_B)$ dove è presente il canale, ed un andamento che segue approssimativamente lo spessore dell'ossido dove il

canale non è presente:



3) Per $V_{GS} = 3 \text{ V}$ il canale è presente in tutto il transistor, e quindi secondo l'approssimazione usuale l'ampiezza della regione di svuotamento è costante e pari a $W(2\psi_B)$:

$$W(2\psi_B) = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{qN_A} 2\psi_B} = 302 \text{ nm.}$$

come nella figura

