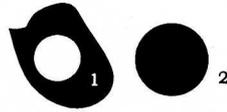


Prova scritta del 10/01/08

### ESERCIZIO 1

1) Disegnare la struttura integrata che si ottiene con i seguenti passi di processo:

- Ossidazione di un wafer  $n$  ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) per uno spessore di 200 nm; b) mask 1: diametro 100  $\mu\text{m}$ ; c) etching completo dell'ossido; d) evaporazione di un film metallico; e) mask 2: diametro 200  $\mu\text{m}$ ; f) etching del metallo.



2) Il Me ha una funzione di lavoro di 5 eV. Si applichi una  $V_{GS}$  fra contatto metallico e sub (supposto ohmico) tale che il MOS sia all'inversione. Nell'ipotesi che il contatto Me/Si sia ideale (assenza di stati superficiali) calcolare l'ampiezza della zds sotto tutto il contatto metallico. Si trascurino gli effetti di bordo.

### ESERCIZIO 2

In una giunzione  $p^+n$  il drogaggio della zona  $n$  varia come  $N_D(x) = k\sqrt{x}$  con  $k = 7.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-\frac{7}{2}}$ . Detta  $V_0$  la ddp di contatto pari a 0.8 V:

- calcolare l'ampiezza della zds;
- ricavare l'espressione della capacità (per unità di superficie) della zds.

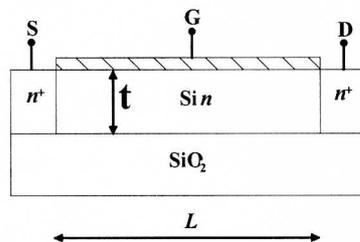
### ESERCIZIO 3

In figura è rappresentato un dispositivo realizzato su substrato SOI (Silicon On Insulator). Si assumano bande piatte all'interfaccia ossido-silicio. Il silicio è drogato di tipo  $n$  con una concentrazione  $N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $L = 3 \mu\text{m}$ ,  $Z = 10 \mu\text{m}$  (in direzione perpendicolare al disegno) e  $t = 1 \mu\text{m}$ . La funzione di lavoro del metallo con cui è realizzato il gate è pari a 5.1 eV.

1) Per  $V_{GS} = -5 \text{ V}$  e per piccoli valori di  $V_{DS}$  determinare la resistenza  $R_{DS}$ . Determinare inoltre il valore di  $V_{GS}$  per cui il canale è interdetto.

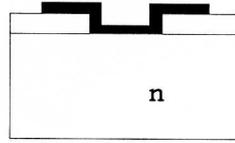
2) Per  $V_{GS} = -5 \text{ V}$  e  $V_{DS} = 15 \text{ V}$  determinare la lunghezza effettiva del canale, assumendo che la regione di svuotamento drain-canale possa essere calcolata come quella dovuta alla tensione drain-punto di strozzamento. Determinare inoltre la corrente  $I_{DS}$ . Si ricorda che, in zona triodo,

$$I_{DS} = G_0 \left( V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{t^2 q N_D}} \left( (V_0 - V_{GS} + V_{DS})^{3/2} - (V_0 - V_{GS})^{3/2} \right) \right)$$



## SOLUZIONE 1

1)



2) E' necessario calcolare la ddp di contatto fra Me e Si del diodo Schottky e la tensione di soglia della struttura MOS.

$$V_0 = \frac{\Phi_{Me} - \Phi_{Si}}{q} = 5 - \left( 4.05 + 0.026 \times \ln \left( \frac{2.8 \times 10^{19}}{10^{15}} \right) \right) = 0.684 \text{ V.}$$

:

$$V_{TH} = -\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_D} 2\Psi_B}{\varepsilon_{ox}} t_{ox} - 2\Psi_B + \frac{\Phi_{Me} - \Phi_{Si}}{q}$$

con

$$2\Psi_B = 0.052 \times \ln \left( \frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}} \right) = 0.578 \text{ V}$$

$$V_{TH} = -\frac{\sqrt{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21} \times 0.578}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}} \times 2 \times 10^{-7} - 0.578 + 0.684 = -0.699 \text{ V}$$

La zds sotto l'ossido vale

$$W_{ox} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.578}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 8.69 \times 10^{-7} \text{ m;}$$

il diodo Schottky è polarizzato inversamente e quindi

$$W_{SC} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.684 + 0.699)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 1.34 \times 10^{-6} \text{ m.}$$

## SOLUZIONE 2

1)

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qk\sqrt{x}}{\varepsilon_s}$$

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{2qkx^{\frac{3}{2}}}{3\varepsilon_s} + \frac{2qkW^{\frac{3}{2}}}{3\varepsilon_s}$$

$$V(x) = -\frac{4qkx^{\frac{5}{2}}}{15\varepsilon_s} + \frac{2qkW^{\frac{3}{2}}x}{3\varepsilon_s} + C;$$

in  $x = W$   $V(x) = V_0$ ; segue

$$V_0 + \frac{4qkW^{\frac{5}{2}}}{15\varepsilon_s} - \frac{2qkW^{\frac{5}{2}}}{3\varepsilon_s} = C$$

$$V(x) = -\frac{4qkx^{\frac{5}{2}}}{15\varepsilon_s} + \frac{2qkW^{\frac{3}{2}}x}{3\varepsilon_s} + V_0 - \frac{6qkW^{\frac{5}{2}}}{15\varepsilon_s};$$

per  $x = 0$   $V(x) = 0$

$$\frac{6qkW^{\frac{5}{2}}}{15\varepsilon_s} = V_0$$

$$W = \left( \frac{15\varepsilon_s V_0}{6qk} \right)^{\frac{2}{5}} = \left( \frac{15 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.8}{6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 7.0 \times 10^{18} \times 10^7} \right)^{\frac{2}{5}} = 2.03 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

N.B. La costante  $k$  è data in  $\text{cm}^{-3.5}$ ; per convertirla in  $\text{m}^{-3.5}$  bisogna moltiplicarla per  $10^7$ .

2)

La carica per unità di superficie nella zona svuotata si scrive per qualunque tensione inversa applicata

$$Q_W = q \int_0^W k\sqrt{x} dx = \frac{2qkW(V)^{\frac{3}{2}}}{3}$$

e quindi

$$C_W = \left| \frac{dQ_W}{dV} \right| = \frac{d}{dV} \frac{2qk}{3} \left( \frac{15\varepsilon_s (V_0 - V)}{6qk} \right)^{\frac{3}{5}}$$

$$C_W = \frac{\varepsilon_s}{\left( \frac{15\varepsilon_s (V_0 - V)}{6qk} \right)^{\frac{2}{5}}} = \frac{\varepsilon_s}{W}.$$

### SOLUZIONE 3

1) Il dispositivo è un JFET dove la giunzione gate-canale è realizzata per mezzo di un contatto Schottky (MESFET). Per piccoli valori di  $V_{DS}$  il dispositivo si comporta come un resistore. Lo spessore del resistore è diminuito della regione di svuotamento gate-substrato:

$$R = \frac{1}{q\mu_n N_D} \frac{L}{Z(t - W(V_{GS}))}$$

dove:

$$W(V_{GS}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_D} (V_0 + |V_{GS}|)}$$

$$qV_0 = \Phi_M - \Phi_S = \Phi_M - (q\chi + E_C - E_F)$$

$$E_C - E_F = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_C}{N_D} \right) = 0.188$$

e quindi:

$$V_0 = 0.812$$

$$W(V_{GS}) = 0.618 \mu\text{m}$$

$$R = \frac{1}{q\mu_n N_D Z (t - W(V_{GS}))} = 2450 \Omega.$$

Il valore di  $V_{GS}$  per cui il canale risulta completamente interdetto risulta:

$$V_{GS}^* = V_0 - \frac{t^2 q N_D}{2\epsilon_s} = -14.39 \text{ V}$$

2) Per  $V_{DS} = 15 \text{ V}$  il transistorore risulta in saturazione. Infatti per  $V_{GS} = -5 \text{ V}$  avremo:

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_{GS}^* = 9.393 \text{ V}.$$

Sia  $P$  il punto di strozzamento del canale. Per  $V_{DS} > V_{DSsat}$ , il punto di strozzamento si trova ad una tensione pari a  $V_{DSsat}$  e quindi tra drain e punto  $P$  la differenza di potenziale risulta pari a:

$$V_{DP} = V_{DS} - V_{DSsat} = 5.607 \text{ V}$$

Il drain è  $n$  pesantemente drogato, quindi la regione di svuotamento si estenderà dal drain al canale secondo la formula ben nota:

$$W(V_{DP}) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_0 + |V_{DP}|)}$$

dove:

$$V_0 = \frac{E_C - E_F}{q} = 0.188 \text{ V}$$

Quindi:

$$W(V_{DP}) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (0.188 + |V_{DP}|)} = 0.617 \mu\text{m}$$

e la lunghezza effettiva di canale risulta:

$$L_{effettiva} = L - W(V_{DP}) = 2.38 \mu\text{m}$$

Il calcolo della corrente è immediato, considerando la formula standard:

$$I_{DS} = G_0 \left( V_{DS} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{t^2 q N_D}} \left( (V_0 - V_{GS} + V_{DS})^{3/2} - (V_0 - V_{GS})^{3/2} \right) \right)$$

dove:

$$G_0 = q\mu_n N_D \frac{Zt}{L_{effettiva}} = 1.34 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$$

e  $V_{DS} = V_{DSsat}$ , in quanto la variazione della corrente  $I_{DS}$  all'aumentare della  $V_{DS}$  (maggiore di  $V_{DSsat}$ ) è dovuta soltanto alla variazione della lunghezza effettiva di canale, che abbiamo considerato nel calcolo della  $G_0$ . Svolgendo il conto risulta:

$$I_{DS} = 2.22 \text{ mA}.$$