Prova scritta del 5/06/08

ESERCIZIO 1

Su un wafer di Si n ($N_D = 10^{21}$ m^{-3}) si esegue un passo di drive-in in atmosfera ossidante (dry) a partire da una predeposizione di B ($Q = 10^{16}$ cm^{-2}). I dati del drive-in sono: $t = 1$ ora, $T = 1100$ °C, $D_0 = 0.75$ cm^{2}s^{-1}, $E_a = 3.5$ eV; quelli dell'ossidazione: $A = 0.09$ μm, $B = 0.027$ μm$^2/hr$, $\tau = 0.067$ hr.

1) Calcolare la profondità di giunzione, nell'ipotesi semplificativa che l'ossidazione avvenga dopo che è terminato il drive-in e che il profilo di drogaggio non venga influenzato.

2) Descrivere cosa accade in realtà all'interfaccia Si/SiO$_2$.

ESERCIZIO 2

Un NMOS è definito da: $N_A = 6 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 800$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}, $L = 0.5$ μm, $W = 3$ μm, $t_{ox} = 37$ nm; il gate è di poly n^+. Supponendo che sia a canale lungo:

1) Calcolare il valore degli elementi che compaiono nel circuito equivalente per piccoli segnali quando l'NMOS lavora in saturazione ad una $V_{GS} = 3$ V.

2) Calcolare la frequenza di taglio nelle condizioni del punto 1. Per il gap del Si usare il valore 1.08 eV.

ESERCIZIO 3

Una struttura MOS è realizzata su un substrato p ($N_A = 10^{15}$ cm^{-3}), con un top layer n ($N_D = 10^{15}$ cm^{-3}) di spessore $t_n = 300$ nm ed un ossido ideale spesso 50 nm. Il campo elettrico nell'ossido, all'interfaccia ossido-gate, è positivo (diretto verso il silicio) e pari a 1.5 MV/m. Supponendo che il layer di tipo n sia completamente svuotato all'equilibrio:

1) effettuare un disegno quotato del campo elettrico nella struttura MOS (si determinino il campo elettrico massimo nell'ossido e nel silicio, e l'ampiezza della regione di svuotamento);

2) determinare la funzione di lavoro del gate e la carica (C/cm^{-2}) nel gate (all'interfaccia gate-ossido).

SOLUZIONE 1

1) Il profilo di drive-in è dato dall'espressione

$$C(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

con

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) = 0.75 \times \exp\left(-\frac{3.5}{8.63 \times 10^{-5} \times 1373.15}\right) = 1.1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}.$$

Se l'ossidazione fosse assente avremmo per la x_j

$$\frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x_j^2}{4Dt}\right) = N_D$$

$$\frac{10^{16}}{\sqrt{\pi \times 1.1 \times 10^{-13} \times 3600}} \exp\left(-\frac{x_j^2}{4 \times 1.1 \times 10^{-13} \times 3600}\right) = 10^{15}$$

da cui $x_j = 1.41 \times 10^{-4}$ cm $= 1.41$ μm.

Se si suppone che l'ossidazione avvenga dopo il drive-in si deve calcolare lo spessore di ossido che cresce e che consuma una quantità di Si pari a $0.5 t_{ox}$.

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

$$t_{ox} = \frac{0.09}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times 0.027}{0.09^2}(1+0.067)}\right) = 0.13 \ \mu\text{m}.$$

La x_j si troverà dunque ad una distanza dalla superficie del Si uguale a

$$x_j = 1.41 - 0.065 = 1.34 \ \mu\text{m}.$$

2) Si deve evidentemente tener conto della segragazione del drogante che avviene durante la crescita dell'ossido. Il coefficiente di segregazione è definito da

$$k = \frac{C_{\text{Si}}}{C_{\text{Si}\,O_2}}$$

che per il B vale 0.3, il che significa che si avrà alla fine un accumulo di drogante nell'SiO_2 nei pressi dell'interfaccia.

SOLUZIONE 2

1) Si calcola prima di tutto la V_{TH}:

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

$$2\Psi_B = 2 \times 0.026 \times \ln\left(\frac{6 \times 10^{21}}{1.5 \times 10^{16}}\right) = 0.671$$

$$\begin{aligned} V_{TH} &= \frac{\sqrt{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 6 \times 10^{21} \times 0.671}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}} \times 37 \times 10^{-9} \\ &\quad + 0.671 - \left(1.08 - 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{19}}{6 \times 10^{15}}\right)\right) = 0.177 \text{ V}. \end{aligned}$$

Gli elementi di interesse sono la capacità di ingresso

$$C_{gs} = \frac{2}{3} C_{OX} = \frac{2}{3} \times \frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}}{37 \times 10^{-9}} \times 3 \times 0.5 \times 10^{-12} = 9.3 \times 10^{-16} \text{ F}$$

e il generatore di corrente comandato definito dalla transconduttanza

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{2L} \frac{\partial}{\partial V_{GS}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})$$

$$g_m = 0.08 \times \frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}}{37 \times 10^{-9}} \times \frac{3}{0.5}(3 - 0.177) = 1.26 \times 10^{-3}\ \text{AV}^{-1}.$$

2) La f_T è data da

$$f_T = \frac{1}{\pi \tau_t}$$

in cui $\tau_t = \frac{4}{3}\frac{L^2}{\mu_n(V_{GS}-V_{TH})}$è il tempo di transito in saturazione;

$$f_T = \frac{3\mu_n (V_{GS} - V_{TH})}{\pi 4L^2} = \frac{3 \times 0.08 \times (3 - 0.177)}{4\pi \times (0.5 \times 10^{-6})^2} = 2.15 \times 10^{11}\ \text{Hz}.$$

SOLUZIONE 3

1) Il campo elettrico nell'ossido è costante (ossido ideale e quindi privo di cariche), mentre per la continuità dell'induzione elettrica, il campo elettrico nel silicio, all'interfaccia silicio-ossido, risulta:

$$\varepsilon_{ox} E_{ox} = \varepsilon_{\text{Si}} E_{\text{Si}}$$

$$E_{\text{Si}} = \frac{\varepsilon_{ox} E_{ox}}{\varepsilon_{\text{Si}}} = \frac{3.9}{11.9} 1.5 = 0.492\ \text{MV/m}.$$

Nel silicio di tipo n il campo elettrico è lineare crescente, dovuto ai donatori positivi ionizzati, e la derivata è proporzionale alla carica (equazione di Poisson):

$$\frac{dE_{\text{Si}}}{dx} = \frac{qN_D}{\varepsilon_{\text{Si}}}$$

Il campo elettrico massimo (nel silicio) sarà all'interfaccia pn, e sarà pari a:

$$E_{\max} = E_{\text{Si}} + \frac{qN_D}{\varepsilon_{\text{Si}}} t_n = 0.948\ \text{MV/m}.$$

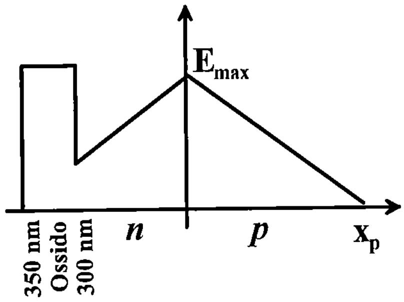
Nel silicio p il campo elettrico sarà decrescente (carica negativa, p svuotato) e nell'approssimazione di svuotamento completo avremo che la pendenza sarà data da:

$$\frac{dE_{\text{Si}}}{dx} = -\frac{qN_A}{\varepsilon_{\text{Si}}}$$

Il campo elettrico sarà nullo (bande piatte) per una distanza x_p dalla giunzione pn pari a

$$x_p = \frac{E_{\max}}{\frac{qN_A}{\varepsilon_{\text{Si}}}} = 623\ \text{nm}$$

Ponendo l'origine degli assi alla giunzione pn avremo:



l'andamento del campo elettrico è analogo a quello di una giunzione pn, a parte il comportamento nell'ossido.

2) La funzione di lavoro del substrato di tipo p è nota, e pari a:

$$q\Phi_p = q\chi + E_g - (E_F - E_V)$$

$$E_F - E_V = kT \ln (N_V/p) = 0.238 \text{ eV}$$

e quindi:

$$q\Phi_p = q\chi + E_g - (E_F - E_V) = 4.94 \text{ eV}$$

La differenza tra i livelli di Fermi del silicio p ed il gate è pari al potenziale di contatto V_0, dato dall'area della curva riportata sopra (integrale del campo elettrico), cioè la somma dell'area del rettangolo (ossido), del trapezio (silicio n) e del triangolo (silicio p):

$$V_0 = 0.075 + 0.216 + 0.295 = 0.586 \text{ V}$$

Da notare che questo è il valore assoluto, infatti il potenziale del silicio p è inferiore (energia potenziale superiore) rispetto al gate. Quindi la funzione di lavoro del gate è minore rispetto a quella del silicio p, e risulta pari a:

$$\Phi_g = 4.94 - 0.586 = 4.354 \text{ V}$$

Tenendo conto che la carica totale (per unità di superficie) deve essere nulla, dovremo avere:

$$Q_{gate} + qN_D t_n - qN_A x_p = 0$$

$$Q_{gate} = qN_A x_p - qN_D t_n = 5.174 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2.$$