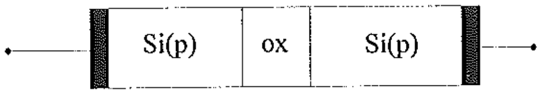
Prova scritta del 10/06/04

ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

1) Disegnare il diagramma a bande della struttura seguente



sapendo che:

a) I contatti Si/ox e M/Si sono ideali;

b) $\Phi_M = 3.5$ eV, $\Phi_S = 4.8$ eV.

2) Calcolare la capacità differenziale per unità di superficie dei contatti M/Si quando $V = 0$. L'affinità elettronica del Si vale 4 eV; per il gap si utilizzi il valore 1.1 eV.

ESERCIZIO 2 (μE I e DTE)

Un transistore NMOS è definito da: $t_{ox} = 200$ nm, $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, gate di poly n^+, carica nulla nell'ossido.

1) Per $V_{DS} = 0$ per $V_{GS} = 5$ V calcolare l'ampiezza della zona di svuotamento sotto il gate e Q_n, carica mobile per unità di superficie.

2) Se $V_{DS} > 0$ e $V_{GS} = 5$ V calcolare Q_n alla coordinata y_0 sapendo che $V(y_0) - V(0) = 2$ V, dove y_0 è un punto all'interno del canale. $0 \leq V(y) \leq V_{DS}$, $0 \leq y \leq L$.

3) Se al punto 2) fosse stato $V(y_0) - V(0) = 5$ V la domanda sarebbe stata corretta? Spiegare.

Si faccia riferimento al modello di prima approssimazione del MOSFET.

ESERCIZIO 3 (DTE)

L'intensità luminosa su uno strato di fotoresist positivo è data dall'espressione

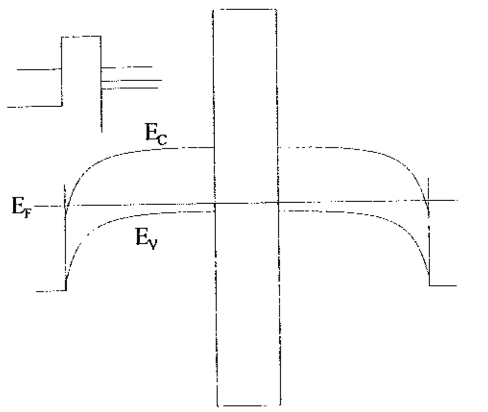
$$I(x) = I_o \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right)$$

con $I_o = 17$ mW/cm^2 e $a = 1$ μm. Il fattore di contrasto vale 3 e la sensibilità Q_2 è pari a 10 mJ/cm^2. L'esposizione dura 2 s.

Determinare l'ampiezza della zona in cui il fotoresist, dopo lo sviluppo, è stato solo parzialmente rimosso.

SOLUZIONE 1

1) Dato che i contatti Si/ox sono ideali il complesso Si(p)/ox/Si(p) sarà caratterizzato da bande piatte; i contatti M/Si ideali (assenza di stati di interfaccia; si noti il diverso significato che assume "ideale" nei due casi) danno luogo ad un piegamento delle bande verso il basso. Si noti che $qV_0 > E_G$ e quindi all'interfaccia con il metallo c'è uno strato di inversione costituito da elettroni. Nella figura è mostrata anche la situazione M/Si prima del contatto.



2) Per quanto riguarda la capacità si osservi che lo strato di inversione costituisce un prolungamento dell'elettrodo metallico e quindi la capacità cercata è solo quella relativa allo strato di svuotamento.

Dato che $\Phi_s = 4.8$ eV avremo $E_F - E_V = 1.1 - 0.8 = 0.3$ da cui si deduce il drogaggio del Si(p)

$$N_A = 10^{19} \times \exp\left(-\frac{0.3}{0.026}\right) = 9.75 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}.$$

Si pone il problema di calcolare quanta parte della V_0 cada ai capi della zds. Adottando lo stesso criterio usato nella struttura MOS stabiliamo che l'inversione si ha quando $\Psi_s = 2\Psi_B = 0.052 \times \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.052 \times \ln\left(\frac{9.75\times10^{13}}{1.5\times10^{10}}\right) = 0.456$ V $= V_0^*$. Quindi

$$C_D = \frac{\varepsilon_s}{W}$$

con $W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0^*}{qN_A}}$:

$$C_D = \frac{11.8 \times 8.85 \times 10^{-12}}{\sqrt{\frac{2\times11.8\times8.85\times10^{-12}\times0.456}{1.6\times10^{-19}\times9.75\times10^{19}}}} = 4.2 \times 10^{-5} \text{ F/m}^2.$$

SOLUZIONE 2

Per un NMOS si ha in generale, per una V_{DS} qualsiasi,

$$V_{GS} = -\frac{Q_n(y)}{C_{ox}} - \frac{Q_W(V(y))}{C_{ox}} + 2\Psi_B + \Phi_{MS} + V(y).$$

1) Se $V_{DS}=0 \Rightarrow V(y)=0$ e quindi

$$V_{GS}=-\frac{Q_n}{C_{ox}}-\frac{Q_W}{C_{ox}}+2\Psi_B+\Phi_{MS}=-\frac{Q_n}{C_{ox}}+V_T$$

da cui

$$-Q_n=C_{ox}\left(V_{GS}-V_T\right)$$

con Q_n negativa (elettroni dello strato di inversione).

$$V_T=\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\Psi_B}}{C_{ox}}+2\Psi_B+\Phi_{MS}$$

$2\Psi_B = 2\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.052\times\ln\left(\frac{5\times10^{15}}{1.5\times10^{10}}\right) = 0.66$ V; $\Phi_{MS} = -\frac{E_g-(E_F-E_V)}{q} = -\left(1.1-0.026\times\ln\left(\frac{10^{19}}{5\times10^{15}}\right)\right)=-0.9$ V;

$V_T=\frac{\sqrt{2\times11.8\times8.85\times10^{-12}\times1.6\times10^{-19}\times5\times10^{21}\times0.66}}{3.9\times8.85\times10^{-12}}\times200\times10^{-9}+0.66-0.9=1.68$ V;

$-Q_n=C_{ox}\left(V_{GS}-V_T\right)=\frac{3.9\times8.85\times10^{-12}}{200\times10^{-9}}\times(5-1.68)=5.73\times10^{-4}$ C/m^2.

W, ampiezza della zds, è data da

$$\sqrt{\frac{2\varepsilon_s 2\Psi_B}{qN_A}}=\sqrt{\frac{2\times11.8\times8.85\times10^{-12}\times0.66}{1.6\times10^{-19}\times5\times10^{21}}}=4.15\times10^{-7}\text{ m.}$$

2) Vale in questo caso la

$$V_{GS}=-\frac{Q_n\left(y_0\right)}{C_{ox}}-\frac{Q_W\left(V(y_0)\right)}{C_{ox}}+2\Psi_B+\Phi_{MS}+V(y_0),$$

ma poiché si utilizza il modello di prima approx sarà

$$V_{GS}=-\frac{Q_n\left(y_0\right)}{C_{ox}}-\frac{Q_W}{C_{ox}}+2\Psi_B+\Phi_{MS}+V(y_0),$$

in cui Q_W è indipendente da $V(y)$.

Per $Q_n\left(y_0\right)$ avremo

$$Q_n\left(y_0\right)=C_{ox}\left(V_{GS}-\left(\frac{Q_W}{C_{ox}}+2\Psi_B+\Phi_{MS}+V(y_0)\right)\right)=$$

$$C_{ox}\left(5-\left(\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\Psi_B}}{C_{ox}}+0.66-0.9+2\right)\right)=$$

$\frac{3.9\times8.85\times10^{-12}}{200\times10^{-9}}\left(5-\left(\frac{\sqrt{2\times11.8\times8.85\times10^{-12}\times1.6\times10^{-19}\times5\times10^{21}\times0.66}}{3.9\times8.85\times10^{-12}}\times200\times10^{-9}+0.66-0.9+2\right)\right)=$ 2.27×10^{-4} C/m^2, ovviamente minore che nel caso $V_{DS}=0$.

3) Ai capi del canale, qualunque sia la V_{DS}, si ha sempre una caduta pari a $V_{GS} - V_T = 5 - 1.68 = 3.32$ V; quindi non è possibile che $V(y_0) - V(0) = 5$ V con y_0 all'interno del canale.

SOLUZIONE 3

La sensibilità Q_2 è per definizione quell'energia su cm^2 necessaria ad impressionare completamente il fotoresist. Dall'espressione di fattore di contrasto

$$\gamma = \frac{1}{\log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)}$$

si ottiene $Q_1 = \frac{Q_2}{10^{\frac{1}{3}}} = \frac{10}{10^{\frac{1}{3}}} = 4.64$ mJ/cm^2. Poiché l'esposizione dura $t_0 = 2$ secondi avremo che la relazione

$$I(x_0)t_0 = Q_2$$

stabilisce i limiti dell'intervallo $\pm x_0$ all'interno del quale si ha esposizione completa. Si ha

$$17 \exp\left(-x_0^2\right) \times 2 = 10$$

$$x_0 = \pm\sqrt{\ln\left(\frac{17 \times 2}{10}\right)} = \pm 1.11 \ \mu\text{m}.$$

L'analoga relazione

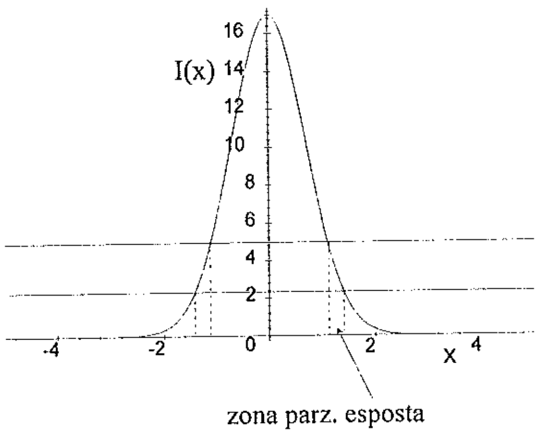
$$I(x_1)t_0 = Q_1$$

fissa i valori limite di x_1 al di là dei quali l'esposizione del resist è nulla

$$17 \exp\left(-x_1^2\right) \times 2 = 4.64$$

$$x_1 = \pm\sqrt{\ln\left(\frac{17 \times 2}{4.64}\right)} = \pm 1.41 \ \mu\text{m}.$$

L'ampiezza cercata vale dunque $x_1 - x_0 = 1.41 - 1.11 = 0.3 \ \mu$m.



$$\left(\frac{\sqrt{1-\left(\frac{4}{28.0855}\sin\left(2.9671\right)\right)^{2}}+\frac{4}{28.0855}\cos\left(2.9671\right)}{1+\frac{4}{28.0855}}\right)^{2}$$

: .56594

6

Prova scritta del 30/06/04

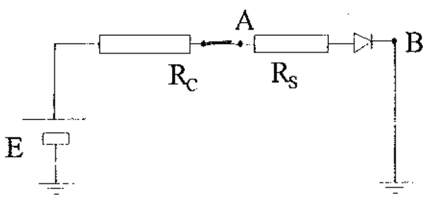
ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

Una giunzione p^+n a base lunga è inserita nel circuito della figura. Per fissati valori di R_C ed E si sa che nella giunzione c'è un eccesso Q di carica pari a 6.12×10^{-11} Coulomb. La giunzione è schematizzabile con un diodo ideale e una resistenza serie R_S. $S = 10^4$ μm^2, $\tau_h = 10^{-6}$ s, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_h = 1000$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}.

1) Sapendo che $V_{AB} = 0.65$ V calcolare il valore di R_S.

2) Si verifichi se il diodo si trova in condizione di bassa iniezione.

3) All'istante $t = 0^+$ l'interruttore si apre. Graficare l'andamento della tensione V_{AB} in funzione del tempo per $-\infty < t < t_0$, con $t_0 << \tau_h$.



ESERCIZIO 2 (μE I e DTE)

Un processo polysilicon gate usa strutture MOS a canale p: $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, spessore dell'ossido 100 nm, gate poly di tipo n^+ ($n_i = 1.5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\chi_{Si} = 4.1$ eV, $E_g = 1.08$ eV). Il circuito verrà alimentato con una tensione duale -3/+3 V.

1) Determinare il minimo spessore di ossido di campo, sufficiente a garantire l' isolamento tra i dispositivi;

2) le metal sono realizzate di metallo con funzione di lavoro pari a 5.1 eV; considerando l'ossido di campo pari a quello minimo, determinare lo spessore della deposizione CVD necessaria a garantire l' isolamento.

ESERCIZIO 3 (DTE)

In un impianto di evaporazione termica un wafer di silicio è interessato da un flusso costante F di atomi di un metallo Me pari a 6×10^{16} cm^{-2}s^{-1}. F è uniforme e ortogonale al wafer. La struttura cristallina dell'Me è cubica con in più un atomo al centro di ogni cubo (struttura BCC, body centered cubic). La costante reticolare dell'Me vale 4 Å.

1) Nell'ipotesi che il film di Me cresca come un monocristallo calcolare quanto tempo è necessario per ottenere un film di spessore 0.2 μm.

2) Calcolare la resistenza di strato del film sapendo che il tempo di rilassamento degli elettroni di conduzione vale 1.5×10^{-14} s.

SOLUZIONE 1

1) La tensione V_{AB} ai capi del diodo sarà data da

$$V_{AB} = V_D + R_S I$$

dove V_D è la tensione che cade ai capi del diodo ideale. Sia V_D che I sono calcolabili dato che è noto l'eccesso di carica Q.

Infatti
$Q = qS\delta p(0) \int_0^\infty e^{-\frac{x}{L_h}} dx = q\delta p(0) L_h S =$
$1.6 \times 10^{-19} \times 2.25 \times 10^{10} \times \left(e^{\frac{V_D}{0.026}} - 1\right) \times \sqrt{0.026 \times 0.1 \times 10^{-6}} \times 10^4 \times 10^{-12} =$
$1.83 \times 10^{-21} \times \left(e^{\frac{V_D}{0.026}} - 1\right)$ da cui si ottiene

$$V_D = 0.026 \times \ln\left(\frac{6.12 \times 10^{-11}}{1.83 \times 10^{-21}} + 1\right) = 0.63 \text{ V}.$$

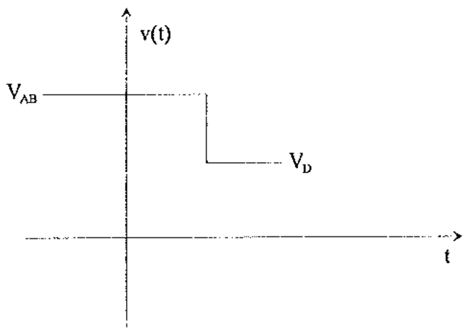
$R_S I = 0.65 - 0.63 = 0.02$. Con il modello del controllo di carica $I = \frac{Q}{\tau_h} = \frac{6.12 \times 10^{-11}}{10^{-6}} = 6.12 \times 10^{-5}$ A. Segue che $R_S = \frac{0.02}{6.12 \times 10^{-5}} = 326.8\ \Omega$.

2) L'eccesso in zero è dato da

$$\delta p(0) = 2.25 \times 10^{10} \times \left(e^{\frac{0.63}{0.026}} - 1\right) = 7.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} = 7.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

ed è quindi molto minore di n_{n0}. La condizione di bassa iniezione è verificata.

3) La tensione V_{AB} passa all'istante $t = 0^+$ al valore V_D dato che $I = 0$. La V_D tenderà a zero in un intervallo di tempo dell'ordine del tempo medio di ricombinazione dei minoritari per cui il grafico richiesto è il seguente



SOLUZIONE 2

1)La tensione di soglia è data da:

$$V_T = -\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B + \Phi_{MS}$$

negativa, poiché la struttura MOS è a canale p e $\Phi_{MS} < 0$.

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 0.329 \text{ V}$$

Essendo il gate di polisilicio di tipo n^+ il livello di Fermi coincide con il livello della banda di conduzione ($q\Phi_M = E_C$):

$$q\Phi_{MS} = -(E_C - E_F) = -\left(\frac{E_g}{2} - q\psi_B\right) = -0.211 \text{ eV}$$

La Φ_{MS} è negativa, all' equilibrio la struttura MOS è verso l' accumulazione di elettroni (la tensione di soglia reale è maggiore, in valore assoluto, della tensione di soglia ideale). Per garandire l' isolamento dovremo avere che:

$$-Vcc < V_T$$

cioè che la tensione di alimentazione, in valore assoluto, sia maggiore di $|V_T|$. Quindi:

$$-3 + 2\psi_B - \Phi_{MS} < -\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}}$$

risolviamo nel caso dell' uguaglianza:

$$C_{ox}(3 - 2\psi_B + \Phi_{MS}) = \sqrt{2\varepsilon_s q N_D 2\psi_B}$$

$$C_{ox} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_D 2\psi_B}}{(3 - 2\psi_B + \Phi_{MS})} = 1.564 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

e quindi:

$$t_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{C_{ox}} = 2.21 \times 10^{-7} \text{ m} = 221 \text{ nm}$$

2) Le metal sono sopra il layer di ossido di campo, più il layer di ossido deposto per CVD. Quindi la struttura MOS parassita metal-ossido CVD + ossido di campo-silicio è meno critica della struttura parassita gate-ossido di campo-silicio. In questo caso, la funzione di lavoro delle metal è diversa rispetto alla funzione di lavoro del gate e:

$$\Phi_{MS} = \Phi_M - \left(\chi_{\text{Si}} + \frac{E_g}{2q} + \psi_B\right) = 5.1 - (4.1 + 0.54 - 0.329) = 0.789 \text{ V}$$

In questo caso, la Φ_{MS} è positiva, all' equilibrio la struttura MOS è verso l' inversione (la tensione di soglia reale è inferiore, in valore assoluto, rispetto a quella ideale). Ripetendo il calcolo precedente, troviamo che per garantire l' isolamento in questo caso avremo:

$$C_{ox} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_D 2\psi_B}}{(3 - 2\psi_B + \Phi_{MS})} = 1.064 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

e quindi:

$$t_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{C_{ox}} = 3.24 \times 10^{-7} \text{ m} = 324 \text{ nm}$$

Lo spessore minimo di ossido deposto per CVD risulta dunque:

$$t_{oxCVD} = t_{ox} - t_{oxCAMPO} = 324 - 221 = 103 \text{ nm}$$

SOLUZIONE 3

1) Detta S un qualsiasi elemento di superficie del wafer $FSdt$ rappresenta in numero di atomi di Al che attraversano questa superficie nell'intervallo di tempo dt. Condensando questi atomi si trasformano in uno spessore dx dato dall'uguaglianza

$$FSdt = NSdx$$

dove N è la concentrazione di atomi di Me. F è costante quindi il tempo cercato si calcola da

$$t = \frac{Nx}{F}.$$

L'Me ha una struttura BCC (body centered cubic) con 2 atomi per ogni cubo di lato pari alla costante reticolare. $N = \frac{2}{(4\times10^{-8})^3} = 3.12 \times 10^{22}$ cm^{-3}.

$$t = \frac{3.12 \times 10^{22} \times 0.2 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{16}} = 10.4 \text{ s.}$$

2) La resistenza di strato $\rho_\square$ è per definizione $\frac{\rho}{t}$ con ρ resistività del film. $\rho = \frac{1}{ne\mu} = \frac{1}{ne\left(\frac{e\tau}{m_o}\right)} = \frac{9.1\times10^{-31}}{3.12\times10^{28}\times(1.6\times10^{-19})^2\times1.5\times10^{-14}} = 7.59 \times 10^{-8}$ Ω·m; $\rho_\square = \frac{\rho}{t} = \frac{7.59\times10^{-8}}{0.2\times10^{-6}} = 0.379$.

Prova scritta del 21/07/04

ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

La diffusione della base in un processo BJT dà luogo ad un profilo che può essere espresso dalla funzione

$$N_A(x) = N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}}.$$

Detto N_D il drogaggio costante del wafer:

1) determinare l'espressione del campo in x_j, coordinata del piano della giunzione;

2) se la mobilità dei portatori varia nello strato p come

$$\mu_h(x) = \mu_h(0) + Kx,$$

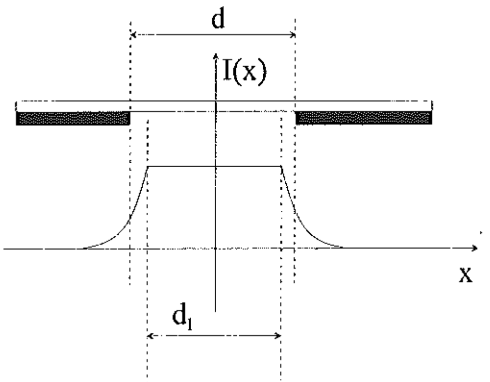
detto x_p il punto di inizio della zona di svuotamento nella zona p, determinare l'espressione di $\rho_\square$, resistenza di strato del resistore diffuso. L'origine dell'asse x è sulla superficie del Si. Si facciano le ipotesi opportune per risolvere i quesiti dei punti 1) e 2).

ESERCIZIO 2 (μE I e DTE)

Ricavare il circuito corrispondente al layout della figura allegata. Le metal sono trasparenti, le aree attive quadrettate, il poly tratteggiato.

ESERCIZIO 3 (DTE)

La parte di una maschera che serve ad aprire delle finestre nell'ossido di Si è mostrata in figura; $d = 4$ μm. Si supponga che sul fotoresist l'intensità luminosa vari con x come $I_0 e^{-\frac{x}{x_0}}$ con $I_0 = 45$ mW/cm^2, $x_0 = 0.5$ μm e d_1 =3.6 μm. La sensibilità Q_2 vale 100 mJ/cm^2. Si espone per un tempo pari a 10 s.



Dopo aver completato il processo fotolitografico si rimuove tutto l'ossido ($t_{ox} = 0.5$ μm) con un attacco wet isotropo.

1) Disegnare, quotandolo, il profilo dell'SiO_2;

2) se, a parità di tempo di attacco, per effetto di un aumento di temperatura, la velocità di attacco dell'SiO_2 aumenta del 50% calcolare l'ampiezza della zona di silicio esposta.

SOLUZIONE 1

L'equazione di Poisson nella zona di svuotamento in un intorno di x_j si scrive

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

dove $\rho(x)$ è la densità netta di carica. Nella parte p della giunzione si ha, nell'ipotesi di svuotamento completo, $\rho(x) = -q\left(N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}} - N_D\right)$ e quindi

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{q\left(N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}} - N_D\right)}{\epsilon_s};$$

integrando

$$\frac{dV(x)}{dx} = \frac{-qx_0N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}} - qN_Dx}{\epsilon_s} + C$$

con la condizione $\frac{dV(x)}{dx}\mid_{x=x_p}= 0$. Si ottiene $C = \frac{qx_0N_A(0)e^{-\frac{x_p}{x_0}}+qN_Dx_p}{\epsilon_s}$

$$\frac{dV(x)}{dx} = \frac{-qx_0N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}} - qN_Dx}{\epsilon_s} + \frac{qx_0N_A(0)e^{-\frac{x_p}{x_0}} + qN_Dx_p}{\epsilon_s}.$$

Poiché il valore massimo del campo si ha in x_j avremo in definitiva

$$E_{MAX} = -\frac{dV(x)}{dx}\mid_{x=x_j}= \frac{qx_0N_A(0)e^{-\frac{x_j}{x_0}} + qN_Dx_j}{\epsilon_s} - \frac{qx_0N_A(0)e^{-\frac{x_p}{x_0}} + qN_Dx_p}{\epsilon_s}.$$

2) Per definizione $\rho_\square = \frac{\overline{\rho}}{x_p}$ in cui $\overline{\rho} = \frac{1}{\overline{\sigma}}$; nell'ipotesi di quasi neutralità $p(x) = N_A(x)$ per cui

$$\overline{\sigma} = \frac{q}{x_p}\int_0^{x_p} \mu_h(x)\, N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}}dx = \frac{q}{x_p}\int_0^{x_p} (\mu_h(0) + Kx)\, N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}}dx =$$

$$\frac{q}{x_p}\left(\int_0^{x_p} \mu_h(0)\, N_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}}dx + \int_0^{x_p} KxN_A(0)e^{-\frac{x}{x_0}}dx\right);$$

valutiamo separatamente i due integrali

$$\mu_h(0)\, N_A(0)x_0 \int_0^{x_p} e^{-\frac{x}{x_0}}d\left(\frac{x}{x_0}\right) = \mu_h(0)\, N_A(0)x_0\left(-e^{-\frac{x}{x_0}}\right)_0^{x_p} =$$

$$\mu_h(0)\, N_A(0)x_0\left(1 - e^{-\frac{x_p}{x_0}}\right);$$

$$N_A(0)Kx_0^2\int_0^{x_p} \frac{x}{x_0}e^{-\frac{x}{x_0}}d\left(\frac{x}{x_0}\right)$$

richiede un'integrazione per parti

$$-N_A(0)Kx_0^2\int_0^{x_p}\left(\frac{x}{x_0}\right)d\left(e^{-\frac{x}{x_0}}\right)=-N_A(0)Kx_0^2\left[\left(\frac{x}{x_0}e^{-\frac{x}{x_0}}\right)-\int_0^{x_p}e^{-\frac{x}{x_0}}d\left(\frac{x}{x_0}\right)\right]_0^{x_p}=$$

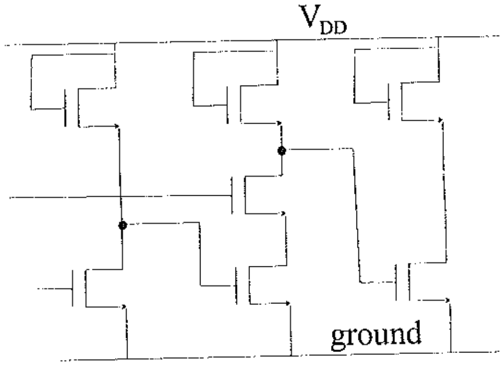
$$-N_A(0)Kx_0^2\left[\frac{x_p}{x_0}e^{-\frac{x_p}{x_0}}+\left(e^{-\frac{x_p}{x_0}}-1\right)\right].$$

Si ottiene per $\overline{\sigma}$

$$\overline{\sigma}=\mu_h(0)\,N_A(0)x_0\left(1-e^{-\frac{x_p}{x_0}}\right)-N_A(0)Kx_0^2\left[\frac{x_p}{x_0}e^{-\frac{x_p}{x_0}}+\left(e^{-\frac{x_p}{x_0}}-1\right)\right].$$

Il resto segue immediatamente.

SOLUZIONE 2



SOLUZIONE 3

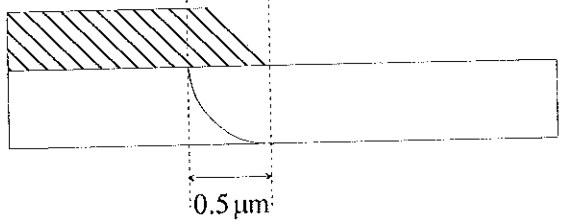
1) Il fotoresist risulta completamente esposto quando $I(x)t \geqslant 100$ mJ/cm^2. Quindi, considerando la parte destra della figura x_1 sarà l'ascissa oltre la quale l'esposizione diviene parziale. Avremo

$$450e^{-\frac{x_1}{x_0}}=100$$

da cui immediatamente

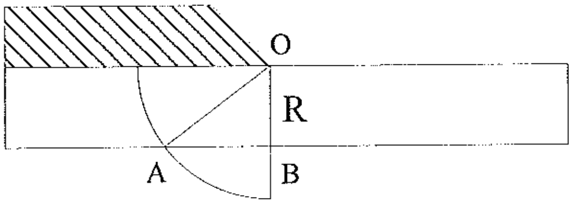
$$x_0\ln(4.5)=x_1$$

si ottiene $x_1 = 0.752\ \mu$m. La zona di resist completamente esposta, e di conseguenza sviluppata, vale $d_1+2x_1 = 3.6+2\times0.752 = 5.1 = \mu$m. Il successivo attacco isotropo scava lateralmente l'SiO_2 di 0.5 μm per parte. Il profilo è quello della figura, in cui ilprofilo del fotoresist è indicato schematicamente.



2) In questo caso vengono attaccati 0.75 μm di SiO_2, indicati nella figura con R. E' immediato calcolare

$$AB = \sqrt{R^2 - OB^2} = \sqrt{0.75^2 - 0.5^2} = 0.56\ \mu\text{m}.$$



L'ampiezza di Si esposta vale $5.1+2\times0.56 = 6.22\ \mu$m.

Prova scritta del 16/09/04

ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

Una struttura MOS ideale è definita da: $N_A = 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox1} = 100$ nm; il segnale di misura ha una frequenza di 1 MHz, il tempo di vita dei portatori minoritari vale 10^{-4} s e la tensione V_{GS} applicata è uguale a 12 V. L'area del gate vale 1 mm^2.

1) Calcolare la capacità C_{TOT} per $V_{GS} = \pm 12$ V.

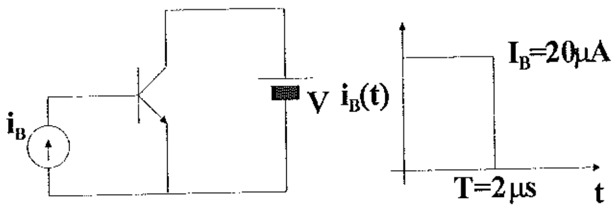
2) Per quale valore positivo di V_{GS} C_{TOT} comincia ad aumentare?

ESERCIZIO 2 (μE I e DTE)

Un transistore bipolare n^+pn ($N_{DColl} = N_{ABase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 800$ cm^2/Vs, $\tau_n = 1$ μs, lunghezza metallurgica della base pari a 3 μm) è polarizzato con $V = 10$ V. Il generatore di corrente di base sollecita la base con un impulso di ampiezza $I_B = 20$ μA e durata 2 μs ($T = 2$ μs).

1) Determinare l'andamento $Q_B(t)$ della carica di base in funzione del tempo.

2) Trascurando la regione di svuotamento base-emettitore, e assumendo che $V_{BE} = 0.7$ V in ogni istante, determinare l'andamento della corrente di collettore in funzione del tempo $i_C(t)$.



ESERCIZIO 3 (DTE)

Su un substrato di tipo p ($N_A = 10^{15}$ cm^{-3}) viene eseguito un processo di drive-in di P a partire da una predeposizione il cui profilo può essere schematizzato con una delta di Dirac. La dose di predeposizione vale 10^{15} cm^{-2}. Il processo avviene alla temperatura di 1050 °C per un tempo di 2 ore.

1) Si calcoli la profondità di giunzione supponendo che il coefficiente di diffusione del P sia quello intrinseco ($D_0 = 4.70$ cm^{-2}s^{-1}, $E_a = 3.68$ eV).

2) Si assuma poi che il profilo iniziale sia costante con $N_D = 10^{20}$ cm^{-3}. Discutere se è lecito utilizzare come coefficiente di diffusione quello del punto 1, verificando se il Si è intrinseco o meno alla T di diffusione.

SOLUZIONE 1

Ad una frequenza di 1 MHz corrisponde un periodo T del segnale di misura di 10^{-6} s e quindi $T << \tau$. La misura avviene in alta frequenza.

1) Per $V_{GS} = 12$ V siamo in inversione ed è necessario calcolare preliminarmente $2\Psi_B = \frac{2kT}{q}\ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.052 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5\times 10^{10}}\right) = 0.578$ da cui $W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s 2\Psi_B}{qN_A}} = \sqrt{\frac{2\times 11.8\times 8.85\times 10^{-12}\times 0.578}{1.6\times 10^{-19}\times 10^{21}}} = 8.69 \times 10^{-7}$ m.

Dato che

$$C_{TOT} = \left(\frac{1}{C_W} + \frac{1}{C_{ox}}\right)^{-1} = \left(\frac{W}{\varepsilon_s S} + \frac{t_{ox}}{\varepsilon_{ox} S}\right)^{-1}$$

$$C_{TOT} = \left(\frac{8.69 \times 10^{-7}}{11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 10^{-6}} + \frac{10^{-7}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 10^{-6}}\right)^{-1} = 8.9 \times 10^{-11}\ \text{F}.$$

Per $V_{GS} = -12$ V siamo in accumulazione ed è banalmente $C_{TOT} = C_{ox} = \frac{3.9\times 8.85\times 10^{-12}\times 10^{-6}}{10^{-7}} = 3.45 \times 10^{-10}$ F.

2) Ricordando l'andamento delle curve $C-V$ in alta frequenza C_{TOT} comincia ad aumentare per $V_{GS} < V_T$, il cui calcolo è immediato

$$V_T = 2\Psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\Psi_B}}{C_{OX}}$$

dove con C_{OX} è stata indicata la capacità per unità di superficie.

$$V_T = 0.578 + \frac{\sqrt{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21} \times 0.578}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}} \times 10^{-7} = 0.98\ \text{V}.$$

SOLUZIONE 2

1) Dalla teoria sappiamo che $Q_B(t)$ ha l'andamento seguente che tende asintoticamente al valore di $I_B\tau_n$:

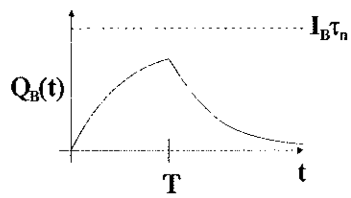
$$Q_B(t) = I_B\tau_n\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right),\ t < 2\mu s;$$

dopo due microsecondi la carica accumulata in base sarà dunque pari a:

$$Q_B(t=T) = I_B\tau_n\left(1 - e^{-\frac{2\times 10^{-6}}{\tau_n}}\right) = 34.6\ \text{pC}.$$

Dopo $T = 2$ μs la carica in base evolverà esponenzialmente fino a zero secondo l' espressione:

$$Q_B(t) = Q_B(t=T)e^{-\frac{t-T}{\tau_n}},\ t > 2\mu s$$



2) Secondo il modello a controllo di carica è possibile determinare I_C come:

$$I_C = \frac{Q_B}{\tau_t}$$

dove

$$\tau_t = \frac{W^2}{2D_n}$$

in cui W è la lunghezza effettiva di base:

$$W = W_{metallurgica} - X_{BC}.$$

Dal momento che si trascura la regione di svuotamento emettitore-base:

$$V_{0BC} = V_T \ln\left(\frac{N_{ABase}N_{DCollettore}}{n_i^2}\right) = 0.694 \text{ V}$$

$$X_{BC} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(V_{0BC} + 10 - 0.7\right)\left(\frac{1}{N_{ABase}} + \frac{1}{N_{DCollettore}}\right)} = 0.812 \ \mu\text{m}$$

e quindi:

$$W = 3 - 0.812 = 2.188 \ \mu\text{m}$$

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n = 20.72 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\tau_t = \frac{(2.188 \times 10^{-4})^2}{2 \times 20.72} = 1.15 \text{ ns}$$

il valore massimo della corrente di collettore risulta dunque:

$$I_C = \frac{34.6 \times 10^{-12}}{1.15 \times 10^{-9}} = 30 \text{ mA}$$

e la corrente di collettore segue, a meno di una costante, l' andamento della carica immagazzinata in base.

SOLUZIONE 3

1) Il profilo di drive-in è dato dalla gaussiana

$$N_D(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_i t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_i t}\right);$$

in cui il valore del coefficiente di diffusione si ottiene dall'espressione

$$D_i = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) = 4.70 \times \exp\left(-\frac{3.68}{8.63 \times 10^{-5} \times (1050 + 273)}\right) = 4.7 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}.$$

Per la profondità di giunzione

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

$$x_j = \pm\sqrt{4Dt \ln\left(\frac{Q}{N_A\sqrt{\pi Dt}}\right)} = \sqrt{4 \times 4.7 \times 10^{-14} \times 7200 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{10^{15} \times \sqrt{\pi} \times 4.7 \times 10^{-14} \times 7200}\right)} =$$

1.18×10^{-4} cm $= 1.18$ μm.

2) Si calcoli n_i alla T di diffusione:

$$n_i = \sqrt{N_C(T)N_V(T)} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) = \sqrt{2.8 \times 10^{38} \times \left(\frac{1323}{300}\right)^3} \times \exp\left(-\frac{1}{2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times (1050 + 27}\right.$$

1.94×10^{18} cm^{-3}; $N_D >> n_i$ e quindi il silicio non è intrinseco. La diffusione avviene attraverso le vacanze neutre (diffusione intrinseca) e quelle cariche negativamente, per cui il coefficiente di diffusione è espresso per il P da

$$D = D_i + D^{-}\left(\frac{n}{n_i}\right) + D^{--}\left(\frac{n}{n_i}\right)^2.$$