**ESERCIZIO 1 (DE,DTE)** Una giunzione $pn$ è caratterizzata da ($W_p$ e $W_n$ distanze tra il piano della giunzione e rispettivamente contatto $p$ ed $n$): $S = 1$ mm$^2$, $N_D = 10^{16}$ cm$^{-3}$, $W_n = 1$ mm, $N_A = 2 \times 10^{15}$ cm$^{-3}$, $W_p = 3$ $\mu$m, $\mu_n = 1000$ cm$^2$/Vs, $\mu_p = 400$ cm$^2$/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $\tau_p = 10^{-7}$s.

1) Per $V = 0.4$ V determinare la corrente nella giunzione[3].

2) Per $V = 0.4$ V calcolare le capacità differenziali[4].

3) Calcolare la corrente per $V = -5$ V[3].

**SOLUZIONE 1**

1) Il lato $n$ è lungo (1 mm), mentre quello $p$ è sicuramente corto (3 $\mu$m). Calcoliamo la regione di svuotamento per $V = 0.5$ V:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{0N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.652 \qquad \text{V} \\ W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)(V_0 - V)} = 0.445 \qquad \mu\text{m} \end{aligned}$$

Questa regione di svuotamento è spostata verso la parte $p$ meno drogata:

$$\begin{aligned} x_p &= 0.372 \qquad \mu\text{m} \\ x_n &= 0.073 \qquad \mu\text{m} \end{aligned}$$

Calcolando i vari coefficienti:

$$\begin{aligned} D_n &= 2.59 \times 10^{-3} \qquad m^2/s \\ L_n &= 50.89 \qquad \mu\text{m} \\ D_p &= 1.04 \times 10^{-3} \qquad m^2/s \\ L_p &= 10.20 \qquad \mu\text{m} \end{aligned}$$

Avremo quindi:

$$I_0 = Sq\left(\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D} + \frac{D_n}{W_p - x_p}\frac{n_i^2}{N_A}\right) = 1.77 \times 10^{-11} \quad \text{A}$$

e quindi la corrente risulta:

$$I = I_0\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 90.30 \qquad \mu\text{m}$$

Verificando l'ipotesi di bassa iniezione, per l'iniezione di lacune nella parte $n$ avremo:

$$p_n = p_{n0}e^{\frac{V}{V_T}} = 1.15 \times 10^{17} \qquad m^{-3}$$

che è molto minore di $n_{n0} = 10^{22}$ m$^{-3}$. Per l'iniezione di elettroni nella parte $p$ avremo:

$$n_p n = n_{p0}e^{\frac{V}{V_T}} = 5.7 \times 10^{17} \qquad m^{-3}$$

che è molto minore di $p_{p0} = 2 \times 10^{21}$ m$^{-3}$.

2) Per quanto riguarda la capacità di svuotamento, essa è data da:

$$C_W = \frac{\epsilon_s}{W} S = 237 \qquad \text{pF}$$

Per quanto riguarda la capacità di diffusione, essa è composta da due componenti, una dovuta all'iniezione di lacune e l'altra dovuta all'iniezione di elettroni. Dal momento che i tempi di ricombinazione sono diversi, si può procedere in molti modi. Il più semplice è quello di calcolare separatamente i due contributi:

$$C_{dp} = \frac{\tau_p}{r_{dp}} S$$

dove:

$$1/r_{dp} = \frac{I_{0p} e^{\frac{V}{V_T}}}{V_T} = \frac{qS}{V_T} \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V}{V_T}} = 7.23 \times 10^{-5}$$

e quindi:

$$C_{dp} = \frac{\tau_p}{r_{dp}} S = 7.23 \times 10^{-18} \qquad \text{F}$$

Si può ripetere lo stesso procedimento per $C_{dn}$, ricordando che gli elettroni sono iniettati nella parte corta:

$$C_{dn} = \frac{\tau_n}{r_{dn}} S$$

dove:

$$1/r_{dn} = \frac{I_{0p} e^{\frac{V}{V_T}}}{V_T} = \frac{qS}{V_T} \frac{D_n}{W_p - x_p} \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V}{V_T}} = 3.49 \times 10^{-3}$$

$$C_{dn} = \frac{\tau_n}{r_{dn}} S = 3.49 \times 10^{-15} \qquad \text{F}$$

Come vediamo, le capacità di diffusione ($C_d = 3.5 \times 10^{-15}$ F) sono molto minori rispetto a quella dovuta alla zona di svuotamento.

3) Nel caso di polarizzazione inversa, $I_{0p}$ rimane la stessa, poichè è legata all'iniezione di lacune nella parte $n$ che è corta. Cambia la $I_{0n}$, che invece dipende da $W_p - x_p$. Avremo per $V = -5$ V:

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + 5)} = 1.49 \qquad \mu\text{m} \\ x_p &= 1.24 \qquad \mu\text{m} \\ x_n &= 0.245 \qquad \mu\text{m} \end{aligned}$$

e quindi avremo:

$$I = -I_0 = -Sq\left(\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D} + \frac{D_n}{W_p - x_p}\frac{n_i^2}{N_A}\right) = -2.69 \times 10^{-11} \quad \text{A}$$

**ESERCIZIO 2 (DE,DTE)** Una struttura $n$-MOS, realizzata su un substrato $p$, $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm$^{-3}$, è realizzata con un gate di polisilicio di tipo $p^+$, di area $5 \times 5$ $\mu$m$^2$. La struttura è stata caratterizzata mediante una curva $C - V$: la capacità massima è risultata pari a $2.9 \times 10^{-14}$ F, mentre la capacità minima è stata misurata per una tensione $V = 0.4$ V.

1) Determinare lo spessore dell'ossido, la tensione di soglia e la carica nell'ossido, considerata all'interfaccia ossido/silicio[3].

2) Alla struttura MOS viene applicato un gradino di tensione pari a -5 V ($V_{GSubst} = 0$ per $t < 0$, $V_{GSubst} = -5$ V per $t > 0$); facendo le approssimazioni opportune, calcolare la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ (minore del tempo di vita medio) e $t \to \infty$[4].

3) Alla struttura MOS viene applicato un gradino di tensione pari a +5 V ($V_{GSubst} = 0$ per $t < 0$, $V_{GSubst} = +5$ V per $t > 0$); facendo le approssimazioni opportune, calcolare la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ (minore del tempo di vita medio) e $t \to \infty$[3].

**SOLUZIONE 2**

1) L'area è pari a 25 $\mu$m$^2$ e quindi la capacità dell'ossido, pari alla capacità massima misurata nella curva $C - V$ è pari a:

$$C_{ox} = \frac{2.9 \times 10^{-14}}{25 \times 10^{-12}} = 1.16 \times 10^{-3} \qquad F/m^2$$

Lo spessore dell'ossido risulta dunque:

$$t_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 30 \qquad \text{nm}$$

La tensione di soglia risulta pari a 0.4 V, è la tensione per cui la curva $C - V$ ha un minimo. Se non ci fosse carica nell'ossido, avremo:

$$\begin{aligned} \psi_B &= V_T ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.329 \\ \Phi_{MS} &= \frac{E_g}{2q} - \psi_B = 0.211 \end{aligned}$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 1.156 \qquad \text{V}$$

e quindi la carica nell'ossido risulta:

$$\begin{aligned} V_{TH} &= V_{TH-no-carica} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \\ \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} &= V_{TH-no-carica} - V_{TH} \\ Q_{ox} &= C_{ox}\, 0.476 \ = \ 8.77 \times 10^{-4} \qquad C/m^2 \end{aligned}$$

2) Per $V_{GSubst} = -5$ V la struttura MOS è in accumulazione, quindi possiamo approssimare $Q_W = 0$ e $Q_n$ come quella di un condensatore a facce piane e parallele:

$$Q_n = C_{ox}\, V_{GSubst} = 5.8 \times 10^{-3}$$

e risulta positiva, perchè dovuta ai maggioritari mobili (lacune). Questo vale sia per $t = 0^+$ che per $t \to \infty$.

3) Nel caso di $V_{GSubst} = 5$ V la struttura MOS è in profonda inversione, e a $t = 0^+$ i portatori minoritari, che costituiscono la carica mobile$Q_n$ non sono ancora stati generati termicamente $(Q_n(0^+) = 0$. La carica è dovuta allo svuotamento, secondo la relazione:

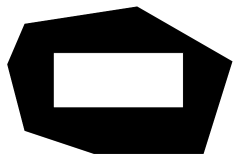
$$Q_W(\psi_S) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_S}$$

dove $\psi_s$ può essere determinata dalla relazione:

$$V_{GSubst} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a \psi_S}}{C_{ox}} + 2\psi_S + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

Risolvendo questa equazione ottieniamo $\psi_S = 2.18$ V e $Q_W(2.18) = 6.1 \times 10^{-4}$ C/m$^2$.$A$t$\rightarrow \infty$, la carica fissa si può approssimare a quella all'inversione, $Q_W \simeq Q_W(2\psi_B) = 3.33 \times 10^{-4}$ C/m$^2$. E' immediato calcolare $Q_n = C_{ox}(V_{GSubst} - V_{TH}) = 5.34 \times 10^{-3}$ C/m$^2$.

**ESERCIZIO 3 (DTE)** Un substrato di silicio $n$ ($N_D = 10^{16}$ cm$^{-3}$) viene sottoposto ai



seguenti processi: ossidazione dry 1100 $^0$C per $t_{ox1} = 20$ minuti ($A = 0.09$ $\mu$m, $B = 0.027$ $\mu$m$^2$/hr, $\tau = 0.067$ hr); litografia ottica, utilizzando la maschera in figura (litografia ideale); attacco dry dell'ossido perfettamente anisotropo (e selettivo rispetto al silicio); ossidazione per un tempo $t_{ox2}$ da determinare (dry a 1100 $^0$C); impiantazione ionica di $B$ a 100 keV, con $Q = 5 \times 10^{12}$ cm$^{-2}$ ($R_{pSi} = 0.0582$ $\mu$m, $\Delta R_{pSi} = 0.0207$ $\mu$m, $R_{pOx} = 0.046$ $\mu$m, $\Delta R_{pox} = 0.0151$ $\mu$m); attacco wet per un tempo sufficiente alla rimozione di tutto l'ossido.

1) Determinare $t_{ox2}$ in maniera tale che il massimo del profilo di drogaggio coincida con l'interfaccia ossido-silicio, nell'area della finestra precedentemente aperta; determinare la profondità della giunzione sotto la finestra[5].

2) Disegnare una sezione che si ottiene alla fine dei processi, calcolando l'altezza del gradino che si ottiene dopo la rimozione dell'ossido[5].

**SOLUZIONE 3**

1) Dopo la prima ossidazione, sul silicio si è formato uno strato di ossido di spessore (servirà nel punto 2, poteva anche essere calcolata dopo):

$$x_{ox1} = \frac{A}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4B}{A^2}(\tau + t)}\right) = 68 \qquad \text{nm}$$

Dopo l'apertura della finestra, viene eseguita una seconda ossidazione con un tempo $t_{ox2}$ tale che il massimo del profilo di drogaggio coincida con l'interfaccia ossido-silicio nella finestra. Questo significa che $x_{ox2} = R_{pox} = 46$ nm. Avremo quindi:

$$\begin{aligned} x_{ox2} = R_{pox} &= \frac{A}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4B}{A^2}(\tau + t_{ox2})}\right) \\ t_{ox2} &= 0.13 \qquad \text{hr} \\ t_{ox2} &= = 7.9 \qquad \text{min} \end{aligned}$$

Per calcolare la profondità della giunzione, abbiamo bisogno del profilo di drogaggio. Dal momento che la dose totale impiantata è pari a $5 \times 10^{12}$ cm$^{-2}$, la metà finirà nell'ossido, l'altra metà va nel silicio sottostante. Avremo quindi:

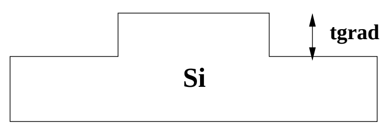
$$
\begin{aligned}
N_A(x) &= \frac{Q_{totale}}{2}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{pSi}}\, e^{-\frac{x^2}{2\Delta R_{pSi}^2}} \\
N_A(x) &= 4.82\times 10^{23}\, e^{-\frac{x^2}{8.57\times 10^{-16}}}
\end{aligned}
$$

e quindi la profondità di giunzione ($N_A(x_i) = N_D$) risulta pari a 58 nm.

2) Al di fuori della finestra, l'ossido cresce ma in misura minore dei 46 nm necessari nell'area della finestra. Dato che le caratteristiche del processo di ossidazione sono le stesse, avremo che al di fuori della finestra lo spessore totale di ossido è pari a quello che si avrebbe con un tempo di crescita pari a 20+7.9=27.9 minuti:

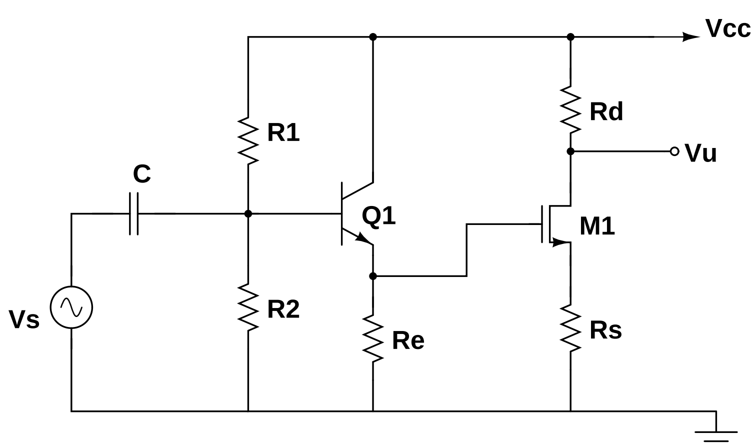
$$
x_{ox-fuori-finestra} = \frac{A}{2}\left(-1+\sqrt{1+\frac{4B}{A^2}(\tau+t)}\right) 83 \qquad \text{nm}
$$

e quindi lo spessore di ossido cresciuto durante la seconda ossidazione è pari a 83-68=15 nm. Dopo la rimozione dell'ossido la situazione è quindi la seguente: dove lo spessore del gradino risulta




(46-15)/2=16 nm.

**ESERCIZIO 4** Con riferimento al circuito in figura: $R_1 = 5$ kΩ, $R_2 = 10$ kΩ, $R_E = 1$ kΩ, $R_S = 1$ kΩ, $R_D = 1$ kΩ. Il transistore bipolare $Q_1$ ha $\beta_f \simeq h_{fe} = 200$. Il transistore MOS $M_1$ é caratterizzato da $\mu_n = 800$ cm$^2$/Vm $C_{ox} = 10^{-3}$ F/m$^2$, $V_{th} = 1$ V, $W = L$. 1) Determinare il




punto di riposo dei transistori e la tensione in uscita a bassa frequenza.

2) Supponendo che $h_{ie}$ sia costituita solo dalla parte differenziale, calcolare i parametri dinamici ($h_{oe} \to 0$, $r_d \to \infty$ ) e disegnare il circuito equivalente per le variazioni.

**SOLUZIONE 4**

1) Applicando il paritore pesante, la tensione di base di $Q_1$ é pari a $12 \times 2/3 = 8$ V. La tensione di emettitore, pari alla tensione di gate di $M_1$, é dunque pari a 7.3 V ($V_b - V_\gamma$). Per calcolare la tensione e la corrente $I_{DS}$ di $M_1$ si puó impostare l'equazione:

$$\begin{aligned} k &= \mu_n C_{ox} = 8\ 10^{-5} \quad \mathrm{A/V^2} & (1) \\ V_{GS} &= V_G - V_S & (2) \\ I_{DS} &= \frac{V_S}{R_S} & (3) \\ \frac{V_S}{R_S} &= \frac{k}{2}\left(V_G - V_{TH} - V_S\right)^2 & (4) \end{aligned}$$

la cui soluzione accettabile é $V_S = 1.03$ V, $V_{GS} = 7.30 - 1.03 = 6.27$ V, $I_{DS} = 1.1$ mA. Risulta quindi: $I_{E1} \simeq I_{C1} = 7.3$ mA; $I_{B1} = 36.5$ $\mu$A, $I_{R1,R2} = 0.8$ mA (pp. verificato); $V_{CE1} = 4.7$ V (ok, $Q_1$ zona attiva diretta); $I_{DS} = 1.1$ mA, $V_{GS} = 6.27$ V; $V_{DS} = 10.9$ V.

2) Dalla corrente di base, è immediato calcolare $h_{ie} = V_T/I_B = 709\ \Omega$ costituita solo dalla parte differenziale. Per quanto riguarda il $g_m$:

$$g_m = k\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 4.22 \times 10^{-4}$$

ed il circuito equivalente risulta: