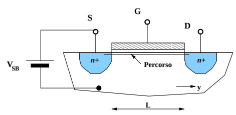
DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 16 Luglio 2012

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Nella figura è mostrato lo schema di massima di un transistore n-MOS (condensatore MOS ideale), con $t_{ox} = 25$ nm, μ_n=800 cm^2/Vs, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, L=10 μm. La tensione V_{SB} tra Source e substrato è pari a 2 V; considerare V_{DS} piccole.



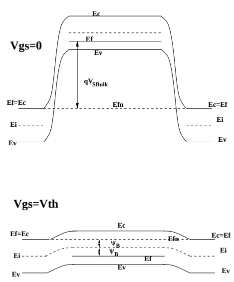
1) Determinare la tensione V_{GS} di inversione e disegnare, per V_{GS}=0 e per $V_{GS} = V_{GSinv}$, i grafici quotati della struttura a bande lungo il percorso indicato (da Source a Drain all'interfaccia ossido-silicio, $x = 0$). [4]

2) Determinare la carica fissa (non vale l'approssimazione $Q_W = Q_W(2\psi_B)$) e mobile per $V_{GS} = 5$ V.[4]

3) Calcolare la resistenza di quadro tra Source e Drain per $V_{GS} = 5$ V.[2]

SOLUZIONE 1

1) L'andamento delle bande per $V_{GS} = 0$ e $V_{GS} = V_{GSinv} = V_{th}$ è mostrato nella figura. Per $V_{GS} = 0$ la differenza di potenziale tra pozzetti e interfaccia



ossido-silico è pari a V_{SBulk}. Per $V_{GS} = V_{GSinv} = V_{TH}$ la differenza di potenziale tra pozzetti e interfaccia ossido-silicio è pari a $2\psi_B$. Il quasi-livello di

Fermi per gli elettroni coincide con il livello di Fermi dei pozzetti, e all'interfaccia ossido-silicio si trova ψ_B SOPRA il livello di Fermi intrinseco.
La tensione V_{GS} di inversione deve tener conto di V_{SB}. In modo particolare:

$$\begin{aligned} V_{GBulk-inv} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_S q N_A \left(2\psi_B + V_{SBulk}\right)}}{C_{OX}} + 2\psi_B + V_{SBulk} \\ V_{GS-inv} &= V_{TH} = V_{GBulk-inv} - V_{SBulk} = \frac{\sqrt{2\epsilon_S q N_A \left(2\psi_B + V_{SBulk}\right)}}{C_{OX}} + 2\psi_B \end{aligned}$$

Questa è l'espressione della V_{TH} in presenza dell'effetto body. Sostituendo i numeri relativi ($V_{SB} = 2$ V, $C_{OX} = \epsilon_{ox}\ t_{ox} = 1.38 \times 10^{-3}$ F/m^2, $\psi_B = 0.347$):

$$V_{GS-inv} = V_{TH} = 0.8 \qquad \mathrm{V}$$

2) La carica fissa è semplicemente (in valore assoluto, è negativa):

$$Q_W(2\psi_B + V_{SBulk}) = \sqrt{2\epsilon_S q N_A \left(2\psi_B + V_{SBulk}\right)} = 6.7 \times 10^{-4} \qquad \mathrm{C/m^2}$$

Dalla relazione:

$$\begin{aligned} V_{GBulk} &= -\frac{Q_n + Q_W}{C_{ox}} + 2\psi_B + V_{SBulk} \\ V_{GS} + V_{SBulk} &= -\frac{Q_n + Q_W}{C_{ox}} + 2\psi_B + V_{SBulk} \\ Q_n &= C_{ox}(V_{GS} - V_{TH}) \end{aligned}$$

si ricava cioè l'espressione ben nota della carica mobile in un condensatore MOS, che con i numeri dati risulta $Q_n = 5.8 \times 10^{-3}$ C/m^2.

3) Per V_{DS} piccole e $W = L$ avremo che:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox}(V_{GS} - V_{TH})V_{DS}$$

e quindi:

$$R(W = L) = \frac{1}{\mu_n C_{ox}(V_{GS} - V_{TH})} = 2157 \qquad \Omega$$

ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Un diodo p^+n è caratterizzato da: $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 1000$ cm^2/Vs, $\mu_p = 400$ cm^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, S=1 mm^2. La distanza W tra la giunzione brusca ed il contatto n è $W = 3$ μm (considerare un'approssimazione al primo ordine).

1) Calcolare la corrente per $V = -2$ V e $V = 0.5$ V (trascurare la regione di svuotamento in diretta).[3]

3) Ricavare l'espressione della capacità di diffusione e confrontare le capacità di diffusione e di svuotamento per $V = 0.5$ V. [3]

Il dispositivo, ed in particolare la parte n, è illuminato uniformemente in maniera tale da avere una $G_{OP} = 10^{12}$ cm^{-3}s^{-1}.

3) Risolvere l'equazione di continuità e ricavare l'espressione del profilo di portatori minoritari a regime.[4]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo:

$$\begin{aligned} D_p &= \frac{kT}{q}\mu_n = 1.032 \times 10^{-3} \\ L_p &= \sqrt{D_n \tau_n} = 32.1 \qquad \mu\text{m} \end{aligned}$$

quindi $W \ll L_p$ e il diodo è a base corta, fortemente asimmetrico. La corrente si può scrivere come:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

dove:

$$I_0 = qS \frac{D_p}{W_{eff}(V)} \frac{n_i^2}{N_D}$$

dove W_{eff} dipende dalla tensione applicata. Per V positive $W_{eff} = W$ come suggerito dal testo. Avremo dunque $I_0 = 1.24 \times 10^{-12}$ A e $I(V = 0.5) = 0.32$ mA. Per $V = -2$ V (polarizzazione inversa) bisogna calcolare $W_{eff} = W - X_p$, dove X_p è la regione di svuotamento che si estende tutta nella zona p:

$$X_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_0 + 2)}$$

$$
\begin{aligned}
V_0 &= \frac{E_g}{q} - \frac{E_C - E_F}{q} = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} ln \frac{N_C}{N_D} = 0.85 \qquad \text{V} \\
X_p &= 0.6 \qquad \mu\text{m}
\end{aligned}
$$

quindi la corrente risulta:

$$
I = -qS \frac{D_p}{W - X_p(-2\text{V})} \frac{n_i^2}{N_D} = 1.55 \times 10^{-12} \qquad \text{A}
$$

2) La capacità di diffusione (per polarizzazione diretta) si calcola come:

$$
C_{diff} = \frac{dQ}{dV}
$$

dove:

$$
Q = \frac{1}{2} qS\delta_p(0) W_{eff} = \frac{1}{2} qSW_{eff} p_{n0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)
$$

e quindi:

$$
C_{diff} = \frac{dQ}{dV} = \frac{1}{2V_T} qSW_{eff} \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V}{V_T}}
$$

Per V=2 V avremo $C_{diff} = 50$ pF. La capacità dovuta allo svuotamento:

$$
\begin{aligned}
C_W &= \frac{\epsilon_s}{X_p} S \\
X_p &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_0 - V)}
\end{aligned}
$$

Per V=0.5 V:

$$
\begin{aligned}
X_p(0.5 \text{ V}) &= 0.21 \qquad \mu\text{m} \\
C_W &= 491 \qquad \text{pF}
\end{aligned}
$$

Essendo il diodo a base corta, la capacità dovuta allo svuotamento risulta molto maggiore rispetto alla capacità di diffusione

3) Nel caso di generazione ottica, l'equazione di continuità stazionaria si può scrivere come:

$$
\begin{aligned}
0 &= D_p \frac{d^2 \delta_p(x)}{dx^2} + G_{th} - R_{th} + G_{op} \\
0 &= D_p \frac{d^2 \delta_p(x)}{dx^2} - \frac{\delta_p}{\tau} + G_{op}
\end{aligned}
$$

Una soluzione particolare è $\delta_p(x) = G_{op}\tau$ e la soluzione dell'omogenea associata risulta essere quella generale:

$$\delta_p(x) = Ae^{\frac{x}{L_p}} + Be^{-\frac{x}{L_p}}$$

Essendo il diodo a base corta, useremo l'espressione approssimata al primo ordine:

$$\delta_p(x) = A + B\frac{x}{L_p}$$

La soluzione completa (generale + particolare) risulta dunque essere:

$$\delta_p(x) = A + B\frac{x}{L_p} + G_{op}\tau$$

con le condizioni a contorno $\delta_p(0) = p_{n0}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)$ (0 posto all'estremo della regione di svuotamento) e $\delta_p(W_{eff}) = 0$. Avremo:

$$\begin{aligned} \delta_p(0) &= A + G_{op}\tau \\ A &= \delta_p(0) - G_{op}\tau \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_p(W) &= A + B\frac{W}{L_p} + G_{op}\tau = 0 \\ 0 &= \delta_p(0) - G_{op}\tau + B\frac{W}{L_p} + G_{op}\tau \\ B &= \delta_p(0)\frac{L_p}{W} \end{aligned}$$

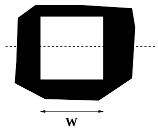
e quindi avremo:

$$\delta_p(x) = \delta_p(0)\left(1 - \frac{x}{W}\right)$$

cioè la generazione ottica non da alcun contributo alla conduzione. Questo è dovuto all'approssimazione al primo ordine che abbiamo considerato.

ESERCIZIO 3 (DTE)

Su un substrato di silicio di tipo p ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}), viene cresciuto termicamente un layer di ossido di $t_h = 100$ nm di spessore. Viene poi usata la maschera in figura ($W = 1$ μm) per attaccare selettivamente l'ossido: velocità dell'attacco wet 50 nm/minuto, tempo di attacco 3 minuti.



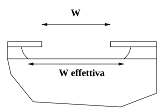
1) Disegnare un profilo lungo la linea tratteggiata, dopo l'attacco e prima della rimozione della maschera. [3]

2) Determinare la larghezza effettiva della finestra. [3]

3) Viene eseguita poi una impiantazione ionica di As a 100 keV ($R_P = 0.0582$ μm, $\Delta R_P = 0.0207$ μm), usando l'ossido da 100 nm come maschera. Determinare la dose di impiantazione affinchè la profondità di giunzione sia di 200 nm. Eseguire un disegno quotato della struttura finale. [4]

SOLUZIONE 3

1) Un disegno schematico dopo l'attacco è questo: Sono anche indicati



gli spessori, ed in particolare il sottoattacco in prossimità della maschera $t_{etch} = 50 \times 3 = 150$ nm.

2) La larghezza finale della finestra di silicio esposto è più grande di W a causa del sottoattacco. L'entità del sottoattacco può essere determinata come $\sqrt{t_{etch}^2 - t_h^2} = 112$ nm e quindi $W_{eff} = W + 2 \times 0.112 = 1.224$ μm

3) Il profilo di impiantazione ionica può essere scritto come:

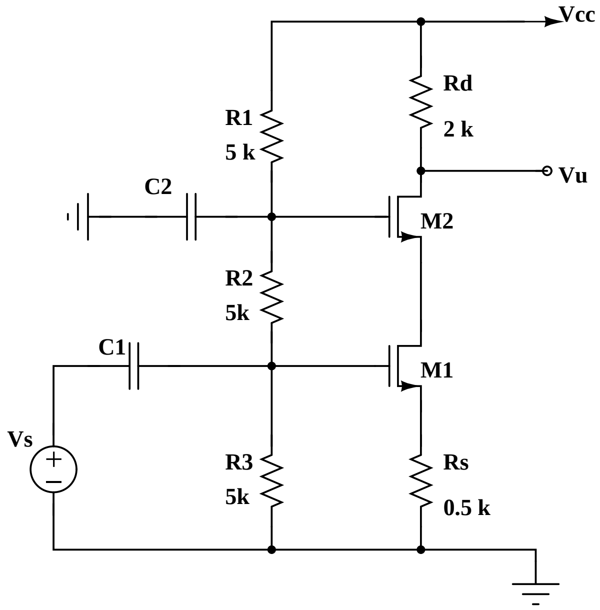
$$N_D(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_P} e^{-\frac{(x-R_P)^2}{2\Delta R_P^2}}$$

Per $x_i = 200$ nm:

$$\begin{aligned}
N_D(x_i) &= 10^{22} \quad \mathrm{m}^{-3} \\
10^{22} &= \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_P} e^{-\frac{(0.2-R_P)^2}{2\Delta R_P^2}} \\
10^{22} &= Q \; 1.2 \times 10^{-3}
\end{aligned}$$

Quindi $Q = 10^{22}/1.2 \times 10^{-3} = 8.0328 \times 10^{24}$ m^{-2}

ESERCIZIO 4 (DE) Con riferimento al circuito in figura, i transistori M_1 e M_2 hanno $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $t_{ox} = 50$ nm, $V_{TH} = 1$ V. Per M_1 $W/L = 18$, per M_2 $W/L = 8$. $V_{CC} = 12$ V.



1) Calcolare i punti di riposo dei transistori. [6]

2) Calcolare i parametri dinamici e disegnare il circuito equivalente per le variazioni ($r_0 \to \infty$, condensatori CC). [4]

SOLUZIONE 4

1) le tre resistenze R_1, R_2, R_3 sono uguali, quindi avremo $V_{G1} = 4$ V e $V_{G2} = 8$ V. È possibile determinare la I_{DS1} supponendo che M_1 sia in saturazione e scrivendo:

$$I_{DS1} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}(V_G - V_S - V_{th})^2$$
$$I_{DS1} = \frac{V_S}{R_S}$$

$$\frac{V_S}{R_S} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_G - V_S - V_{th}\right)^2$$

Questa equazione di secondo grado in V_S ha come soluzioni $V_S = 1$ V e $V_S = 6.5$ V; la prima soluzione è quella accettabile, poichè per la seconda avremo $V_S > V_G = 4$ V. Per $V_S = 1$ V, $I_{DS1} = 2$ mA. Ma $I_{DS2} = I_{DS1} = 2$ mA, e da questo possiamo ricavare $V_{S2} = V_{D1}$:

$$\begin{aligned} I_{DS2} &= I_{DS1} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_{GS2} - V_{th}\right)^2 \\ V_{GS2} - V_{th} &= 3 \quad \text{V} \\ V_{GS2} &= 4 \quad \text{V} \\ V_{S2} = V_{D1} &= 4 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Da ciò si ricava $V_{DS1} = 3$ V $= V_{GS1} > V_{GS1} - V_{th}$ e l'ipotesi M_1 in saturazione è verificata. Avremo anche che $V_{D2} = V_{CC} - R_D I_{DS2} = 8$ V e quindi $V_{DS2} = 4$ V $> V_{GS2} - V_{th}$; quindi anche M_2 è in saturazione. Riassumendo, per M_1:

$$\begin{aligned} V_{GS1} &= 3 \quad \text{V} \\ V_{DS1} &= 3 \quad \text{V} \\ I_{DS1} &= 2 \quad \text{mA} \end{aligned}$$

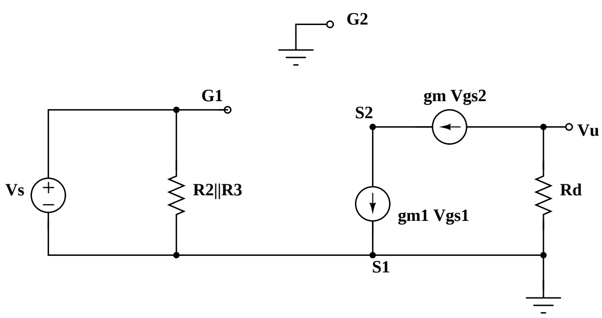
e per M_2:

$$\begin{aligned} V_{GS2} &= 4 \quad \text{V} \\ V_{DS2} &= 4 \quad \text{V} \\ I_{DS2} &= 2 \quad \text{mA} \end{aligned}$$

2) I parametri dinamici da calcolare sono i g_m:

$$\begin{aligned} g_{m1} &= \mu_n C_{ox}\frac{W_1}{L_1}\left(V_{GS1} - V_{th}\right) = 2 \times 10^{-3} \\ g_{m2} &= \mu_n C_{ox}\frac{W_2}{L_2}\left(V_{GS2} - V_{th}\right) = 1.3 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Il circuito per le variazioni risulta:


G2
G1
S2
gm Vgs2
Vu
Vs
R2||R3
Rd
gm1 Vgs1
S1