PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 8 Gennaio 2018

ESERCIZIO 1 Un transistore n^+pn, con $N_{ABase} = N_{DCollettore} = 5{\times}10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.11$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2, è polarizzato con $I_B = 5$ μA, $I_C = 1$ mA, $V_{CB} = 5$ V.

1) Determinare I_E, la lunghezza effettiva e metallurgica di base e V_{CE}.[4]

2) Determinare l'espressione ed il valore della resistenza differenziale $\partial V_{BE}/\partial I_B$. Determinare inoltre le capacità differenziali della giunzione Base-Emettitore. [3]

3) Determinare la resistenza di uscita $\partial V_{CE}/\partial I_C$ (con I_B costante) e la capacità differenziale della giunzione Base-Collettore. (SUGGERIMENTO: si può assumere V_{BE} costante, e calcolare I_C per un altro valore di V_{CB}, per esempio $V_{CB} = 10$ V). [3]

ESERCIZIO 2 Si consideri un condensatore n-MOS con $\Phi_{MS} = 0$, $t_{ox} = 20$ nm, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, tempo di generazione $\tau_n = 10^{-6}$ s.

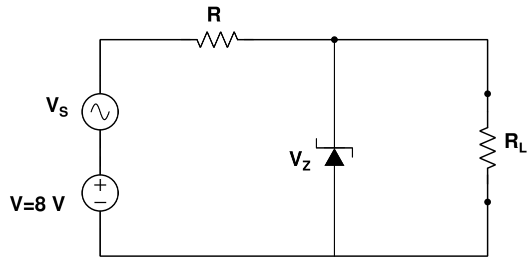
1) E' stata misurata la tensione di soglia, che è risultata $V_{TH} = 0.5$ V. Determinare la concentrazione di carica nell'ossido, all'interfaccia ossido-silicio (determinare il segno). [2]

2) A $t = 0$ viene applicato un gradino di tensione pari a 5 V ($V_{GBulk} = 5$ V per $t > 0$). Determinare la carica fissa Q_W e mobile Q_n per $t = 0^+$ e per $t > 10^{-5}$ s. [4]

3) Il condensatore n-MOS è utilizzato per la fabbricazione di un transistore con $W = 4$ μm, $L = 2$ μm, $\mu_n = 800$ cm^2/Vs. Il transistore viene polarizzato con $V_{DS} = 5$ V. Al Gate viene applicato lo stesso gradino del punto 2 ($V_{GS} = 0$ V per $t < 0$, $V_{GS} = 5$ V per $t > 0$). Determinare la carica mobile totale nel canale per $t = 0^+$ e per $t \to \infty$, e confrontarla con quella del semplice condensatore MOS (perché sono diverse?). Stimare inoltre il tempo che impiega il canale a formarsi. [4]

ESERCIZIO 3 Nello stabilizzatore in figura, V_Z è un diodo zener con $V_{BreakDown} = 5$ V $R_Z = 10$ Ω. Il generatore di segnale V_S schematizza un disturbo sinusoidale $v_s(t) = V_M cos(\omega t)$, dove V_M al massimo vale 1 V.

1) Il diodo Zener è realizzato con una giunzione p^+n con $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}. Determinare il campo elettrico di Break-Down.[3]



2) Lo stabilizzatore deve poter alimentare un carico massimo (resistenza minima) pari a $R_L = 50\ \Omega$. Determinare la corrente di polarizzazione ottimale per lo Zener e i parametri del circuito (resistenza R). Disegnare inoltre una caratteristica $I - V$ con la retta di carico.[4]

3) Determinare il fattore di regolazione di linea $\Delta V_u/\Delta V_i$ in condizioni di carico massimo in uscita. [3]

ESERCIZIO 1

Un transistore n^+pn, con $N_{ABase} = N_{DCollettore} = 5\times10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.11$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2, è polarizzato con $I_B = 5$ μA, $I_C = 1$ mA, $V_{CB} = 5$ V.

1) Determinare I_E, la lunghezza effettiva e metallurgica di base e V_{CE}.[4]

2) Determinare l'espressione ed il valore della resistenza differenziale $\partial V_{BE}/\partial I_B$. Determinare inoltre le capacità differenziali della giunzione Base-Emettitore. [3]

3) Determinare la resistenza di uscita $\partial V_{CE}/\partial I_C$ (con I_B costante) e la capacità differenziale della giunzione Base-Collettore. (SUGGERIMENTO: si può assumere V_{BE} costante, e calcolare I_C per un altro valore di V_{CB}, per esempio $V_{CB} = 10$ V). [3]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo i parametri:

$$\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.849 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2/\text{s} \\
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 53.40 \quad \mu\text{m} \\
I_E &= -I_C - I_B = -1.005 \quad \text{mA} \\
\beta_f &= \frac{I_C}{I_B} = 200 \\
\alpha_f &= \frac{I_C}{I_C + I_B} = 0.99502487
\end{aligned}$$

Possiamo calcolare la lunghezza effettiva di base da β_f (o da α_f):

$$\begin{aligned}
\beta_f &= \frac{\tau_n}{\tau_t} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} \\
\frac{\tau_n}{\beta_f} &= \frac{W^2}{2D_n} \\
W &= \sqrt{\frac{\tau_n}{\beta_f} 2D_n} = 5.3 \quad \mu\text{m}
\end{aligned}$$

Dal modello a controllo di carica possiamo calcolarci V_{BE}:

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{Q_B}{\tau_n} = qS\frac{n_i^2}{N_A\tau_n}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}-1\right)\frac{W}{2} \\ V_{BE} &= V_T \ln\left(\frac{2I_B\tau_n N_A}{qSn_i^2 W}+1\right) = 0.502 \ \text{ V} \end{aligned}$$

La lunghezza metallurgica della base si può determinare aggiungendo l'ampiezza della regione di svuotamento nella based X_{BC} alla lunghezza effettiva W già calcolata. Avremo:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_T \ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.659 \text{ V} \\ W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)(V_0+V_{CB})} = 1.72 \ \ \mu\text{m} \\ X_{BC} &= \frac{W_{BC}}{2} = 0.86 \ \ \mu\text{m} \end{aligned}$$

l'ultima equazione dipende dal fatto che i drogaggi di base e collettore sono numericamente uguali. Quindi $W_{met} = W + X_{BC} = 6.16\ \mu$m.

2) La resistenza differenziale della giunzione Base-Emettitore può essere calcolata dal modello a controllo di carica:

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{Q_B}{\tau_n} = qS\frac{n_i^2}{N_A\tau_n}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}-1\right)\frac{W}{2} \\ \frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} &= \frac{1}{V_T}qS\frac{n_i^2}{N_A\tau_n}e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}\frac{W}{2} \simeq \frac{I_B}{V_T} \\ \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} &= \frac{V_T}{I_B} = 5180 \ \ \Omega \end{aligned}$$

Le capacità differenziali sono quella dovuta all'iniezione dei portatori minoritari nella base e quella dovuta alla regione di svuotamento della giunzione base-emettitore. Quella dovuta all'iniezione:

$$\begin{aligned} C_{BE\ diff} &= \frac{\partial Q_B}{\partial V_{BE}} = \tau_n\frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} \\ C_{BE\ diff} &= \frac{\tau_n I_B}{V_T} = 193 \ \ \text{pF} \end{aligned}$$

Abbiamo trascurato la regione di svuotamento della giunzione BE in tutti i conti fin qui svolti. Questo perché è piccola rispetto alle altre grandezze in gioco. È importante calcolarla per la valutazione della $C_{BE\ W}$ ($N_{D\ em} = 10^{19}$ cm^{-3}):

$$\begin{aligned} V_{0\ BE} &= V_T \ln \frac{N_{A\ base} N_{D\ em}}{n_i^2} = 0.855 \text{ V} \\ W_{BE} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_{A\ base}}) (V_{0\ BE} + V_{BE})} = 0.6 \ \ \mu\text{m} \end{aligned}$$

Da questo ricaviamo $C_{BE\ W} = S\epsilon_s / W_{BE} = 176$ pF.

3) La giunzione base-collettore è polarizzata in inversa, e la capacità differenziale è dovuta soltanto alla regione di svuotamento:

$$C_{BC} = \frac{S\epsilon_S}{W_{BC}} = 61 \ \ \text{pF} \tag{1}$$

Per quanto riguarda la resistenza differenziale, dovuta all'effetto Early, avremo con $V_{CB} = 10$ V:

$$\begin{aligned} W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + V_{CB})} = 2.4 \ \ \mu\text{m} \\ X_{BC} &= \frac{W_{BC}}{2} = 1.2 \ \ \mu\text{m} \end{aligned}$$

Da cui avremo:

$$\begin{aligned} W &= W_{met} - X_{BC} = 4.96 \ \ \mu\text{m} \\ \beta_f &= \frac{\tau_n}{\tau_t} = \frac{2D_n\tau_n}{W^2} = 232 \\ I_C(10V) &= 1.16 \ \ \text{mA} \\ R_{out} &= \frac{10-5}{I_C(10) - I_C(5)} = 31634 \ \ \Omega \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2 Si consideri un condensatore n-MOS con $\Phi_{MS} = 0$, $t_{ox} = 20$ nm, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, tempo di generazione $\tau_n = 10^{-6}$ s.

1) E' stata misurata la tensione di soglia, che è risultata $V_{TH} = 0.5$ V. Determinare la concentrazione di carica nell'ossido, all'interfaccia ossido-silicio (determinare il segno). [2]

2) A $t = 0$ viene applicato un gradino di tensione pari a 5 V ($V_{GBulk} = 5$ V per $t > 0$). Determinare la carica fissa Q_W e mobile Q_n per $t = 0^+$ e per $t > 10^{-5}$ s. [4]

3) Il condensatore n-MOS è utilizzato per la fabbricazione di un transistore con $W = 4$ μm, $L = 2$ μm, $\mu_n = 800$ cm^2/Vs. Il transistore viene polarizzato con $V_{DS} = 5$ V. Al Gate viene applicato lo stesso gradino del punto 2 ($V_{GS} = 0$ V per $t < 0$, $V_{GS} = 5$ V per $t > 0$). Determinare la carica mobile totale nel canale per $t = 0^+$ e per $t \to \infty$, e confrontarla con quella del semplice condensatore MOS (perché sono diverse?). Stimare inoltre il tempo che impiega il canale a formarsi. [4]

SOLUZIONE 2

1) Ricordiamo la tensione di soglia:

$$
\begin{aligned}
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.726 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\
\psi_B &= V_T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \\
Q_{ox} &= C_{ox}\left(\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - V_{TH}\right) = 8.19 \times 10^{-4} \quad \text{C/m}^2
\end{aligned}
$$

La carica dunque risulta positiva.

2) A $t = 0^+$ la carica mobile nel silicio è zero, perché non si è ancora formata ($Q_n(0^+) = 0$). Tutta la carica è fornita dalla regione di svuotamento (svuotamento profondo). Avremo:

$$
\begin{aligned}
Q_W &= -\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} \\
V_{GS} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}
\end{aligned}
$$

$$V_{GS} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S - 0.474$$

L'equazione quadratica consente di determinare la caduta di tensione nel silicio V_S, il cui valore accettabile risulta $V_S = 4.74$. Quindi avremo $Q_W(0^+) = 1.26 \times 10^{-3}$ C/m^2. Per $t > 10^{-5}$ s il condensatore MOS è in equilibrio termico, poiché il tempo è pari a 10 volte quello di generazione-ricombinazione. Quindi la carica mobile assume il suo valore di regime, e quella fissa si può approssimare con quella dovuta a $2\psi_B$. Entrambe le cariche sono negative (si calcolano in valore assoluto):

$$\begin{aligned} Q_n(t \to \infty) &= C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 7.77 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{C/m^2} \\ Q_W(t \to \infty) &= Q_W(2\psi_B) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = 4.84 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{C/m^2} \end{aligned}$$

3) Similmente al caso di prima, la carica mobile a $t = 0^+$ è nulla. Per t superiori al tempo di transito nel canale (che valuteremo alla fine), il canale è formato. Abbiamo che $V_{DS} > V_{DSSat} = V_{GS} - V_{TH}$, quindi la carica nel canale non è uniforme poiché siamo in saturazione. Avremo dunque:

$$Q_{n\ tot} = \frac{2}{3} W L C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 4.14 \times 10^{-14} \ \ \mathrm{C} \qquad (2)$$

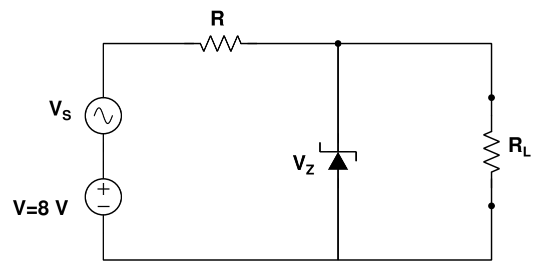
Per tempi molto lunghi, nel condensatore MOS avevamo una carica $Q_n = C_{ox} W L \left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 6.22 \times 10^{-14}$ C, quindi più elevata. Nel transistore MOS abbiamo infatti lo strozzamento del canale che riduce la carica mobile nel canale stesso. Il tempo da considerare per l'accensione del canale è il tempo di transito, che può essere calcolato come $I_{DS} = Q_n/\tau_t$. Esprimendo $I_{DS} = I_{DSSat}$ con la formula standard possiamo ricavare (vedi dispensa):

$$\tau_t = \frac{4}{3}\frac{L^2}{\mu_n}\frac{1}{V_{GS} - V_{TH}} = 15 \ \ \mathrm{ps} \qquad (3)$$

Quindi il canale raggiunge la situazione di regime in tempi molto più rapidi rispetto al condensatore MOS.

ESERCIZIO 3

Nello stabilizzatore in figura, V_Z è un diodo zener con $V_{BreakDown} = 5$ V $R_Z = 10\ \Omega$. Il generatore di segnale V_S schematizza un disturbo sinusoidale $v_s(t) = V_M cos(\omega t)$, dove V_M al massimo vale 1 V.



1) Il diodo Zener è realizzato con una giunzione p^+n con $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}. Determinare il campo elettrico di Break-Down.[3]

2) Lo stabilizzatore deve poter alimentare un carico massimo (resistenza minima) pari a $R_L = 50\ \Omega$. Determinare la corrente di polarizzazione ottimale per lo Zener e i parametri del circuito (resistenza R). Disegnare inoltre una caratteristica $I - V$ con la retta di carico.[4]

3) Determinare il fattore di regolazione di linea $\Delta V_u/\Delta V_i$ in condizioni di carico massimo in uscita. [3]

SOLUZIONE 3

1) La tensione di break-down, in questo caso 5 V, è proprio la tensione per cui il campo elettrico massimo supera quello critico. Quindi basta calcolare il campo elettrico per $V = 5$ V, per una giunzione p^+n ($N_A = 10^{19}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}).

$$\begin{aligned} V_0 &= V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.873 \ \ \text{V} \\ W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_0 + 5)} = 0.879 \ \ \mu\text{m} \\ \mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_D}{\epsilon_s} W = 13.4 \ \ \text{MV/m} \end{aligned}$$

Questo è il campo elettrico di break-down.

2) La corrente massima che lo stabilizzatore deve erogare è pari a 5V/50 Ω=100 mA. Questo vuol dire che il diodo zener, in assenza di carico, deve

essere polarizzato con una corrente almeno pari a 100 mA, in realtà leggermente superiore (diciamo 105 mA). La tensione in ingresso è pari a 8 V, ma per effetto del disturbo, oscilla tra 7 e 9 V. Prendiamo il caso peggiore, di $V_{in} = 7$ V. Avremo $I_R = 105$ mA $= I_Z$ nelcaso di carico nullo (resistenza infinita):

$$\frac{I_R = 7 - 5}{R = 105 \ \ \text{mA}} \tag{4}$$

da cui si ricava $R = 19\ \Omega$. Per la caratteristica e la retta di carico, si faccia riferimento al Sedra-Smith.

3) Il fattore di regolazione è pari alla variazione di tensione in uscita, diviso la variazione di tensione all'ingresso. L'esercizio chiede di calcolare questa variazione in condizioni di carico massimo (cioè con la resistenza minima in uscita pari a 50 Ω). Avremo:

$$\begin{aligned} R_{ZL} &= \frac{R_L R_Z}{R_L + R_Z} = 8.3 \ \ \Omega \\ \frac{\Delta V_u}{\Delta V_i} &= \frac{R_{ZL}}{R_{ZL} + R} = 0.3 \end{aligned}$$