

Prova scritta del 29/01/08

ESERCIZIO 1

Un transistore NMOS è polarizzato con $V_{GS} \gg V_{TH}$ e con $V_{DS} \ll V_{GS} - V_{TH}$.

1) Ricavare l'espressione del tempo di transito utilizzando il modello del controllo di carica.

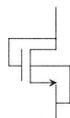
2) Far vedere che il risultato poteva essere ottenuto più semplicemente per altra via.

3) Se lo spessore dell'ossido vale 50 nm, $W = 6 \mu\text{m}$ e $L = 0.35 \mu\text{m}$ calcolare la capacità di ingresso del circuito equivalente per piccoli segnali giustificando il risultato.

ESERCIZIO 2

Un NMOS ha il gate di Ti ($\Phi_M = 4.33 \text{ eV}$); $t_{ox} = 40 \text{ nm}$, $N_A = 7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

1) Calcolare la tensione di soglia.



2) Nella configurazione circuitale della figura si misurano i seguenti valori di I_{DS} (A) in funzione di V_{DS} (V): $1.1 \times 10^{-4}, 1$; $3.4 \times 10^{-4}, 1.5$; $7.0 \times 10^{-4}, 2$; $1.2 \times 10^{-3}, 2.5$; $1.8 \times 10^{-3}, 3$; $2.6 \times 10^{-3}, 3.5$; $3.4 \times 10^{-3}, 4$.

Determinare graficamente la V_{TH} .

3) Spiegare la differenza fra il valore calcolato e quello misurato.

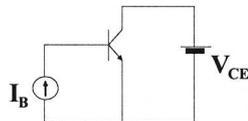
ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, il transistore bipolare è un n^+pn^+ ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-7} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, $W_{BASE} = 3 \mu\text{m}$), ed il generatore di corrente impone $I_B = 10 \mu\text{A}$. Ai fini del calcolo delle regioni di svuotamento, si considerino trascurabili rispetto alla V_0 le tensioni di polarizzazione diretta delle giunzioni.

1) Nel caso $V_{CE} = 0$ determinare la tensione V_{BE} e V_{BC} . Si determini l'entità dell'approssimazione nel calcolo delle regioni di svuotamento.

2) Nel caso $V_{CE} = 5 \text{ V}$ determinare V_{BE} e I_C .

3) Si determini la resistenza differenziale emettitore-collettore. Suggerimento: si consideri I_C per $V_{CE} = 5 \text{ V}$ e si determini I_C per $V_{CE} = 10 \text{ V}$.



SOLUZIONE 1

1)

$$I_{DS} = \frac{Q_{nTOT}}{\tau_t}$$

e, dato che siamo in zona lineare

$$I_{DS} = k(V_{GS} - V_{TH})V_{DS}$$

$$R = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{L}{W\mu_n Q_n}$$

in cui Q_n è la carica mobile per unità di superficie.

$$Q_{nTOT} = WLQ_n = WL \frac{L}{W\mu_n R} = \frac{L^2 I_{DS}}{\mu_n V_{DS}}$$

$$\tau_t = \frac{Q_{nTOT}}{I_{DS}} = \frac{L^2}{\mu_n V_{DS}}$$

2) La velocità di drift è data da $v_{drift} = \mu_n \mathcal{E}$ per cui

$$\tau_t = \frac{L}{\mu_n \mathcal{E}} = \frac{L}{\mu_n} \frac{L}{V_{DS}}$$

3)

$$C_{gs} = \frac{dQ_{nTOT}}{dt} = \frac{L^2}{\mu_n} \frac{d}{dt} k(V_{GS} + v_{gs} - V_{TH}) = \frac{L^2 k}{\mu_n} \frac{dv_{gs}}{dt}$$

$$\frac{L^2 k}{\mu_n} = \frac{L^2}{\mu_n} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = C_{ox} WL = C_{OX}$$

$$C_{OX} = \frac{6 \times 0.35 \times 10^{-12} \times 3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}}{50 \times 10^{-9}} = 1.45 \times 10^{-15} \text{ F.}$$

SOLUZIONE 2

1)

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

con

$$2\Psi_B = 0.052 \times \ln\left(\frac{7 \times 10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.679 \text{ V}$$

e

$$\frac{\Phi_{Me} - \Phi_{Si}}{q} = \frac{\Phi_{Me} - \left(\chi + E_g - kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)\right)}{q} =$$

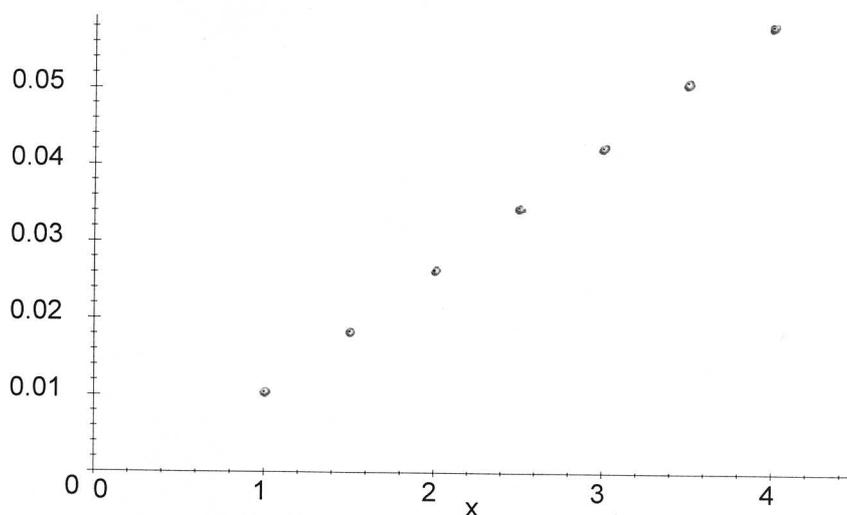
$$4.33 - \left(4.05 + 1.08 - 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{19}}{7 \times 10^{15}}\right)\right) = -0.61 \text{ V}$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 7 \times 10^{21} \times 0.679}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}} \times$$

$$4 \times 10^{-8} + 0.679 - 0.61 = 0.53 \text{ V.}$$

2) Riportando in grafico i valori di $\sqrt{I_{DS}}$ in funzione di $V_{DS} = V_{GS}$ e interpolando manualmente si ottiene

V_{DS} (V)	$\sqrt{I_{DS}}$
1	1.05×10^{-2}
1.5	1.84×10^{-2}
2	2.64×10^{-2}
2.5	3.46×10^{-2}
3	4.24×10^{-2}
3.5	5.10×10^{-2}
4	5.83×10^{-2}



un valore ≤ 0.4 V.

3) Il valore misurato riguarda la tensione di soglia in saturazione che, com'è noto, è minore di quella in zona lineare (valore calcolato).

SOLUZIONE 3

1) Facendo riferimento al modello a controllo di carica, il profilo dell'eccesso di portatori nella base è costante, poiché $V_{BE} = V_{BC} = V$.

$$I_B = \frac{Q_B}{\tau_n} = \frac{qS\delta n W_{EFF}}{\tau_n}$$

dove δn è costante e pari a:

$$\delta n = n_{p0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \simeq n_{p0} e^{\frac{V}{V_T}}$$

La lunghezza effettiva di base può essere calcolata considerando le regioni di svuotamento base-collettore e base-emettitore dovute a V_0 .

$$V_0 = \frac{E_G - (E_F - E_V)}{q} = 0.901 \text{ V}$$

$$W_{BE} = W_{BC} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_A}} V_0 = 0.344 \mu\text{m}$$

$$W_{EFF} = W_{BASE} - 2W_{BE} = 2.312 \mu\text{m}$$

e quindi:

$$\delta n = \frac{I_B \tau_n}{qS W_{EFF}} = 2.70 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

(notare che l'ipotesi di bassa iniezione è verificata) e $V_{BE} = V_{BC} = V$ risulta:

$$V = V_T \ln \left(\frac{\delta n}{n_{p0}} \right) = 0.478 \text{ V.}$$

Calcolando l'ampiezza della regione di svuotamento con questo valore di tensione avremo ottenuto:

$$W_{BE} = W_{BC} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_A}} (V_0 - V) = 0.236 \mu\text{m}$$

con un errore sulla lunghezza effettiva di base pari a meno del 10%. Anche se non richiesto, ricalcolando la tensione $V_{BE} = V_{BC}$ otteniamo un valore di 0.476 V, confrontabile con quello precedente. Infatti l'approssimazione sulla tensione si ripercuote attraverso la radice quadrata nel calcolo della zona di svuotamento, e attraverso il logaritmo nel calcolo di V .

2) Nel caso $V_{CE} = 5 \text{ V}$, il transistor è polarizzato in zona attiva diretta. La giunzione base-collettore è polarizzata in inversa, la giunzione base-emettitore è in diretta. Applicando ancora il modello a controllo di carica, il profilo è stavolta triangolare:

$$I_B = \frac{Q}{\tau_n} = \frac{qS\delta n W_{EFF}}{2\tau_n}$$

La lunghezza effettiva di base si calcola considerando W_{BE} dovuta a V_0 , e calcolata precedentemente. W_{BC} si ottiene (trascurando V_{BE} rispetto a V_0):

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_A}} (V_0 + V_{CE} - V_{BE}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_A}} (V_0 + V_{CE}) = 0.881 \mu\text{m}$$

e quindi:

$$W_{EFF} = W - W_{BE} - W_{BC} = 1.775 \mu\text{m}$$

Procedendo come al punto 1:

$$\delta n = \frac{2I_B \tau_n}{qS W_{EFF}} = 7.03 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

$$V_{BE} = V_T \ln \left(\frac{\delta n}{n_{p0}} \right) = 0.507 \text{ V}$$

Quindi l'approssimazione della regione di svutamento può ancora ritenersi valida. La corrente di emettitore può essere calcolata come corrente di diffusione, o mediante il calcolo del beta.

$$I_E = -SqD_n \frac{\delta n}{W_{EFF}} = -1.64 \text{ mA}$$

dove $D_n = \frac{kT}{q} \mu_n$.

3) Per $V_{CE} = 10 \text{ V}$ si modifica la lunghezza effettiva di base. Ripetendo il calcolo:

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_A} (V_0 + V_{CE})} = 1.197 \text{ } \mu\text{m} \quad (0.1)$$

$$W_{EFF} = W - W_{BE} - W_{BC} = 1.458 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\delta n = \frac{2I_B \tau_n}{qSW_{EFFETTIVA}} = 8.56 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

$$I_E = SqD_n \frac{\delta n}{W_{EFFETTIVA}} = 2.437 \text{ mA}$$

e quindi la resistenza differenziale, dovuta all'effetto Early, risulta:

$$r = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = 6273 \text{ } \Omega.$$