PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 13 Settembre 2019

ESERCIZIO 1

Un transistore *pnp* è caratterizzato da: $W = 20$ μm, $N_{Dem} = 10^{17}$ cm^{-3} (emettitore lungo), $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{Dcoll} = 10^{15}$ cm^{-3}, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $S = 1$ mm^2. Il transistore è polarizzato con $V_{BC} = 5$ V e $V_{EB} = 0.5$ V.

1) Determinare il profilo di portatori minoritari nella base. [4]

2) Determinare la corrente di collettore. [2]

3) Determinare le correnti di emettitore e di base, nonché i parametri β_f e γ_E del transistore. [4]

ESERCIZIO 2

Si consideri un transistore n-MOS ideale, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $L = 5$ μm, $W = 2$ μm, $V_{GS} = 5$ V. L'ossido non ha uno spessore uniforme: si ha $t_{ox} = 10$ nm in prossimità del Source e $t_{ox} = 30$ nm in prossimità del Drain ($t_{ox}(0) = 10$ nm e $t_{ox}(L) = 30$ nm).

1) Determinare l'espressione di V_{TH} in funzione di y. [3]

2) Per $V_{DS} = 0.1$ V determinare l'espressione della carica mobile nel canale, in funzione di y. [4]

3) Determinare la tensione V_{DS} di saturazione. [3]

ESERCIZIO 3

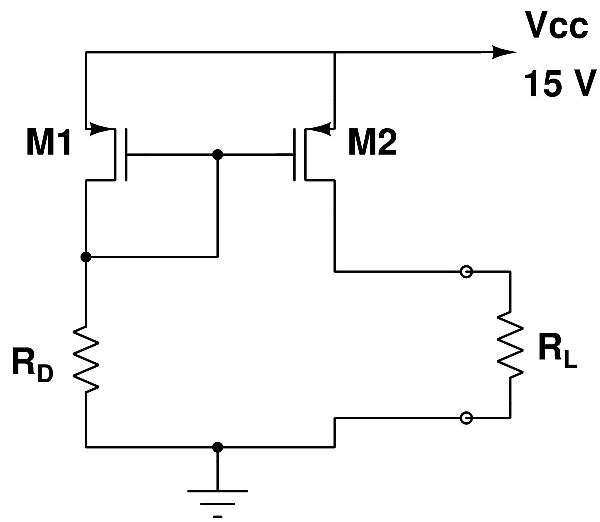
Il circuito in figura si propone di generare una corrente controllata e stabile sul carico R_L. I transistori $M1$ e $M2$ sono p-MOS con $W_1/L_1 = 50$ e $W_2/L_2 = 100$, substrato drogato $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_p = 0.03$ m^2/Vs. All'interfaccia ossido-silicio è presente una concentrazione superficiale di ioni sodio pari a 10^{11} cm^{-2}.

1) Si progetti il metallo del gate affinché la tensione di soglia V_{TH} sia pari a -1 V (si determini la funzione di lavoro del metallo). [3]

2) Si determini R_D affinché in uscita venga generata una corrente $I_L = 50$ mA, per $V_{SD2} = V_{SD2\ sat}$, e si determinino il valore minimo e massimo ammessi per il carico R_L. [4]

3) La lunghezza di canale del transistore M_2 è pari a $L_2 = 2$ μm. Determinare la variazione di corrente (dovuta alla modulazione di canale) tra le

condizioni di carico minimo e carico massimo. Determinare inoltre il parametro differenziale di $M2$ che tiene conto di questa variazione indesiderata di corrente. [3]



ESERCIZIO 1

Un transistore *pnp* è caratterizzato da: $W = 20\ \mu$m, $N_{Dem} = 10^{17}$ cm^{-3} (emettitore lungo), $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{Dcoll} = 10^{15}$ cm^{-3}, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $S = 1$ mm^2. Il transistore è polarizzato con $V_{BC} = 5$ V e $V_{EB} = 0.5$ V.

1) Determinare il profilo di portatori minoritari nella base. [4]

2) Determinare la corrente di collettore. [2]

3) Determinare le correnti di emettitore e di base, nonché i parametri β_f e γ_E del transistore. [4] yr

SOLUZIONE 1

1) Dalla soluzione generica dell'equazione di continuità abbiamo:

$$\delta p(x) = Ae^{\frac{x}{L_p}} + Be^{-\frac{x}{L_p}} \tag{1}$$

dove $D_p = V_T \mu_p = 1.034 \times 10^{-3}$ e $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15\ \mu$m. La base non è né corta né lunga, quindi bisogna risolvere l'equazione di continuità senza approssimazione lineare. Considerando le condizioni a contorno:

$$\begin{aligned} \delta p(0) &= p_0 e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = 5.6 \times 10^{18} \ \ \text{m}^{-3} \\ \delta p(W) &= 0 \end{aligned}$$

abbiamo:

$$\begin{aligned} \delta p(0) &= A + B \\ 0 &= Ae^{\frac{W}{L_p}} + Be^{-\frac{W}{L_p}} = 1.86\ A + 0.54B \end{aligned}$$

dove abbiamo fatto la piccola approssimazione $W \simeq W_{eff}$, dato che la lunghezza della base è molto maggiore dell'ampiezza della regione di svuotamento base-collettore. NOTA: se non si fa questa approssimazione va bene uguale, anzi è più precisa. Risolvendo il sistema avremo:

$$\begin{aligned} A &= -2.3 \times 10^{18} \ \ \text{m}^{-3} \\ B &= 7.9 \times 10^{18} \ \ \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

2) La corrente di collettore si può ricavare dalla derivata del profilo in $x = W$ (con il segno positivo):

$$I_C = qSD_p \left. \frac{d\delta p(x)}{d_x} \right|_{x=W}$$

$$I_C = qSD_p\frac{A}{L_p}e^{\frac{W}{L_p}} - \frac{B}{L_p}e^{-\frac{W}{L_p}} = -42 \quad \mu\text{A}$$

Da notare che la corrente viene correttamente negativa, cioè uscente.

3) L'emettitore è poco drogato, quindi la corrente di emettitore è data sia dall'iniezione di lacune verso la base (I_{Ep}) che dall'iniezione di elettroni dalla base verso l'emettitore (I_{En}). Per I_{Ep} avremo:

$$\begin{aligned} I_{Ep} &= -qSD_p \left.\frac{d\delta p(x)}{d_x}\right|_{x=0} \\ I_{Ep} &= -qSD_p\frac{A}{L_p} - \frac{B}{L_p} = 53 \quad \mu\text{A} \end{aligned}$$

La corrente viene positiva, poiché è entrante. A questa va sommata I_{En}:

$$\begin{aligned} I_{En} &= qS\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_{Aem}}e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} \\ D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.33 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 48.23 \quad \mu\text{m} \\ I_{En} &= 44 \quad \mu\text{A} \end{aligned}$$

Quindi avremo:

$$\begin{aligned} I_C &= -42 \quad \mu\text{A} \\ I_E &= I_{En} + I_{Ep} = 97 \quad \mu\text{A} \\ I_B &= -I_E - I_C = -55 \quad \mu\text{A} \\ \beta_f &= \frac{I_C}{I_B} = 0.8 \\ \gamma_E &= \frac{I_{En}}{I_{Ep} + I_{En}} = 0.55 \end{aligned}$$

Il β_f è ovviamente molto piccolo,poiché la base è tutt'altro che corta, ed inoltre l'efficienza di emettitore è di molto inferiore a 1.

ESERCIZIO 2

Si consideri un transistore n-MOS ideale, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $L = 5$ μm, $W = 2$ μm, $V_{GS} = 5$ V. L'ossido non ha uno spessore uniforme: si ha $t_{ox} = 10$ nm in prossimità del Source e $t_{ox} = 30$ nm in prossimità del Drain ($t_{ox}(0) = 10$ nm e $t_{ox}(L) = 30$ nm).

1) Determinare l'espressione di V_{TH} in funzione di y. [3]

2) Per $V_{DS} = 0.1$ V determinare l'espressione della carica mobile nel canale, in funzione di y. [4]

3) Determinare la tensione V_{DS} di saturazione. [3]

SOLUZIONE 2

1) Possiamo scrivere, con ovvio significato dei simboli:

$$
\begin{aligned}
t_{ox} &= t_{ox0} + \left(\frac{t_{oxL} - t_{ox0}}{L}\right) y \\
t_{ox} &= 10 \times 10^{-9} + 4 \times 10^{-3} y \quad \text{m} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}(y)} + 2\psi_B \\
\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \quad \text{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{\epsilon_{ox}} \left(10 \times 10^{-9} + 4 \times 10^{-3} y\right) + 0.694 \\
V_{TH} &= 0.834 + 56 \times 10^{3} y \quad \text{V}
\end{aligned}
$$

2) Dato che la tensione V_{DS} è piccola, possiamo supporre che l'andamento della carica nel canale sia dovuta soltanto alla variazione di spessore dell'ossido. Possiamo dunque usare la formula:

$$
\begin{aligned}
Q_n(y) &= qC_{ox}(y)\left(V_{GS} - V_{TH}(y)\right) \\
Q_n(y) &= qC_{ox}(y)V_{GS} - \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} - C_{ox}2\psi_B) \\
Q_n(y) &= q\frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}(y)}\left(V_{GS} - 2\psi_B\right) - \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} \\
Q_n(y) &= q\left(\frac{1.49 \times 10^{-10}}{10 \times 10^{-9} + 4 \times 10^{-3} y} - 4.84 \times 10^{-4}\right) \quad \text{C/m}^2
\end{aligned}
$$

3) La saturazione si ha per il valore di V_{DS} per cui la carica mobile in prossimità del Drain è pari a 0. Si può procedere in questo modo:

$$
V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}
$$

$$
\begin{aligned}
V_{GD\ sat} &= V_{TH}(L)\\
V_{DS\ sat} &= V_{GS} - V_{GD\ sat} = V_{GS} - V_{TH}(L)\\
V_{TH}(L) &= 1.114\\
V_{DS\ sat} &= 5 - 1.114 = 3.89\ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

ESERCIZIO 3

Il circuito in figura si propone di generare una corrente controllata e stabile sul carico R_L. I transistori $M1$ e $M2$ sono p-MOS con $W_1/L_1 = 50$ e $W_2/L_2 = 100$, substrato drogato $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_p = 0.03$ m^2/Vs. All'interfaccia ossido-silicio è presente una concentrazione superficiale di ioni sodio pari a 10^{11} cm^{-2}.

1) Si progetti il metallo del gate affinché la tensione di soglia V_{TH} sia pari a -1 V (si determini la funzione di lavoro del metallo). [3]

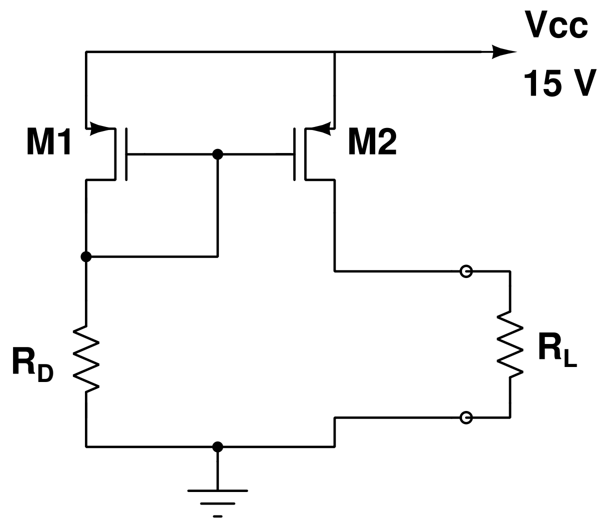
2) Si determini R_D affinché in uscita venga generata una corrente $I_L = 50$ mA, per $V_{SD2} = V_{SD2\ sat}$, e si determinino il valore minimo e massimo ammessi per il carico R_L. [4]

3) La lunghezza di canale del transistore M_2 è pari a $L_2 = 2$ μm. Determinare la variazione di corrente (dovuta alla modulazione di canale) tra le condizioni di carico minimo e carico massimo. Determinare inoltre il parametro differenziale di $M2$ che tiene conto di questa variazione indesiderata di corrente. [3]

SOLUZIONE 3

1) La carica per unità di superficie all'interfaccia ossido-silicio è positiva e pari a $Q_{ox} = q \times 10^{15} = 1.602 \times 10^{-4}$ C/m^2. Quindi avremo:

$$
\begin{aligned}
V_{TH} &= -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}\\
\Phi_{MS} &= V_{TH} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}\\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3}
\end{aligned}
$$



$$
\begin{aligned}
\psi_B &= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_D}{n_i^2} = 0.347 \;\; \text{V} \\
\Phi_{MS} &= 0.254 \;\; \text{V} \\
\Phi_S &= \chi + (\frac{E_g}{2q} - \psi_B) = 4.313 \;\; \text{V} \\
\Phi_M &= 4.567 \;\; \text{V}
\end{aligned}
$$

2) Determiniamo V_{SG2}:

$$
\begin{aligned}
I_{SD2} &= \frac{\mu_p C_{ox}}{2}\frac{W_2}{L_2}\left(V_{GS2} - V_{TH}\right)^2 \\
V_{GS2} &= -\sqrt{\frac{I_{SD2}}{\frac{\mu_p C_{ox}}{2}\frac{W_2}{L_2}}} + V_{TH} = -6.38 \;\; \text{V}
\end{aligned}
$$

Per come è fatto il circuito avremo che $V_{SG2} = V_{SG1} = V_{SD1}$. Da notare che M_1 è sempre in saturazione. La corrente I_{SD1} risulta:

$$
I_{SD1} = \frac{\mu_p C_{ox}}{2}\frac{W_1}{L_1}\left(V_{GS2} - V_{TH}\right)^2 = 25 \;\; \mu\text{A} \tag{2}
$$

Da notare che il rapporto tra le correnti è uguale al rapporto geometrico $\frac{W_1/L_1}{W_2/L_2}$. La resistenza R_D si determina facilmente:

$$
R_D = \frac{V_{D1}}{I_{SD1}} = \frac{V_{CC} - V_{SD1}}{I_{SD1}} = \frac{V_{CC} - V_{SG1}}{I_{SD1}} = 385 \;\; \Omega \tag{3}
$$

I valori limite della resistenza R_L sono ovviamente quello che permette a $M2$ di lavorare in saturazione: $R_L = \frac{V_{CC}-V_{SD2}}{I_{SD2}} = 192\ \Omega$; il transistore $M1$ lavora bene con $V_{SD2} = V_{CC}$, per cui $R_L = 0$.

3) La tensione di saturazione di $M2$ è $V_{DS\ sat} = V_{GS} - V_{TH} = -5.38$ V. Quindi la regione di svuotamento Drain-punto di strozzamento è determinata da $V_{DS\ max} - V_{DS\ sat} = -V_C C - V_{DS\ sat} = -9.62$ V. Avremo dunque:

$$\begin{aligned}
L_{eff} &= L_{met} - W(V_{DS\ max} - V_{DS\ sat}) \\
W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}\left(V_{0Dsubst} + 9.62\ \text{V}\right)} \\
V_{0Dsubst} &= \frac{E_g}{2q+\psi_B} = 0.907\ \ \text{V} \\
W &= 1.18\ \ \mu\text{m} \\
L_{eff} &= 2 - 1.17 = 0.82\ \ \mu\text{m} \\
I_{SD} &= \frac{\mu_p C_{ox}}{2}\frac{W_2}{L_{2\ eff}}\left(V_{GS2} - V_{TH}\right)^2 = 122\ \ \text{mA}
\end{aligned}$$

Quindi in condizioni di carico minimo (resistenza massima $R_L = 192\ \Omega$) abbiamo $I_L = 50$ mA ($V_{SD2} = V_{SD2\ sat}$), in condizioni di carico massimo abbiamo $I_L = 122$ mA, per $V_{SD2} = V_{CC}$. Il parametro dinamico (differenziale) che tiene conto della variazione della $I_L = I_{SD2}$ rispetto alla variazione della $V_L = V_{CC} - VSD2$ è $r_d = (V_{CC} - V_{SD2\ sat})/(I_{Lmax} I_{Lmin}) = 134\ \Omega$.