PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 12 febbraio 2025

ESERCIZIO 1

In un circuito C-MOS (Complementary-MOS) vengono fabbricati sia transistori n-MOS che p-MOS polysilicon gate (gate drogato come i pozzetti). L'n-MOS è fabbricato in un'area p drogata $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}; il source è cortocircuitato con il substrato che è a massa (0 V); $\mu_n = 0.08$ m^2/V/s, $W = L = 2$ μm. Il p-MOS è realizzato in un'area n, drogata $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}; il source è cortocircuitato con il substrato che è mantenuto alla tensione di alimentazione $V_{CC} = 5$ V; $\mu_p = 0.04$ m^2/V/s, $W = L = 2$ μm. L'ossido di gate è cresciuto contemporaneamente per entrambi i transistori, e $t_{ox} = 30$ nm. Entrambi i transistori sono polarizzati con $V_G = 2.5$ V e $V_D = 2.5$ V, rispetto a massa.

1) Per il transistore n-MOS determinare la corrente I_{DS} considerando la lunghezza effettiva del canale, la resistenza r_d e gli altri parametri del circuito equivalente per le variazioni (disegnare il circuito). [4]
2) Per il transistore p-MOS determinare la tensione di soglia e la corrente I_{SD}.[3]
3) Disegnare il circuito per le variazioni del transistore p-MOS, determinando il valore dei parametri che lo compongono. [3]

ESERCIZIO 2

La mobilità dei portatori in un pezzo di silicio intinseco è risultata $\mu_n = 0.12$ m^2/Vs e $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs. La mobilità diminuisce con la temperatura, seguendo una legge $T^{\frac{3}{2}}$.

1) Determinare la posizione del livello di Fermi rispetto alla metà del gap, per $T = 300$ K e per $T = 900$ K. Determinare inoltre la resistività del silicio alle 2 temperature.[4]
2) Il silicio viene drogato con fosforo, per una concentrazione di 10^{15} cm^{-3}. Calcolare la posizione del livello di Fermi per $T = 300$ K e per $T = 900$ K, rispetto alla posizione del livello di Fermi intrinseco. [3]
3) Calcolare la resistività alle 2 temperature, tenendo conto che la mobilità con il drogaggio varia del 50% (aumenta o diminuisce?). [3]

ESERCIZIO 3

Un transistore bipolare ($N_{AB} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{DC} = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, S=1 mm^2, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $W_{met} = 4$ μm) è polarizzato con $V_{BE} = 0.6$ V. Sono state misurate le correnti ai terminali: $I_C = 30$ mA, $I_B = 1$ mA.

1) Determinare la lunghezza effettiva della base. ATTENZIONE: l'emettitore non è fortemente drogato. [4]
2) Determinare la tensione V_{CE}.[2]
3) Determinare il drogaggio dell' emettitore. [4]

ESERCIZIO 1 In un circuito C-MOS (Complementary-MOS) vengono fabbricati sia transistori n-MOS che p-MOS polysilicon gate (gate drogato come i pozzetti). L'n-MOS è fabbricato in un'area p drogata $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}; il source è cortocircuitato con il substrato che è a massa (0 V); $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $W = L = 2$ μm. Il p-MOS è realizzato in un'area n, drogata $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}; il source è cortocircuitato con il substrato che è mantenuto alla tensione di alimentazione $V_{CC} = 5$ V; $\mu_p = 0.04$ m^2/V/s, $W = L = 2$ μm. L'ossido di gate è cresciuto contemporaneamente per entrambi i transistori, e $t_{ox} = 30$ nm. Entrambi i transistori sono polarizzati con $V_G = 2.5$ V e $V_D = 2.5$ V, rispetto a massa.
1) Per il transistore n-MOS determinare la corrente I_{DS} considerando la lunghezza effettiva del canale, la resistenza r_d e gli altri parametri del circuito equivalente per le variazioni (disegnare il circuito). [4]
2) Per il transistore p-MOS determinare la tensione di soglia e la corrente I_{SD}. [3]
3) Disegnare il circuito per le variazioni del transistore p-MOS, determinando il valore dei parametri che lo compongono. [3]

SOLUZIONE 1
1) Il condensatore n-MOS è standard, basta fare i conti:

$$
\begin{aligned}
\psi_B &= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i} = 0.347 \;\; \text{V} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{oxB}} = 1.151\times 10^{-3} \;\; \text{F/m}^2 \\
\Phi_{MS} &= -\frac{E_G}{2q} - \psi_B = -0.889 \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + +2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.225 \;\; \text{V} \\
V_{DS\ Sat} &= V_{GS} - V_{TH} = 2.275 \\
V_{0\ DB} &= V_T \ln\frac{N_A N_D^+}{n_i^2} = 0.81 \\
W_{DP} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\left(V_D S - V_{DS\ Sat}\right)} = 0.37 \;\; \mu\text{m} \\
L_{eff} &= L - W_{DP} = 1.67 \;\; \mu\text{m} \\
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L_{eff}}\left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 0.28 \;\; \text{mA}
\end{aligned}
$$

Calcolando la I_{DS} con $V_{DS\ Sat}$, cioè con $L_{eff} = L$ avremo $I_{DS} = 0.23$ mA. Quindi per i parametri a piccolo segnale avremo:

$$
\begin{aligned}
g_m &= \mu_n C_{ox}\frac{W}{L_{eff}}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 0.25\times 10^{-3} \\
r_d &= \frac{V_{DS} - V_{DS\ Sat}}{I_{DS} - I_{DS\ Sat}} = 2045 \;\; \Omega \\
C_{GS} &= \frac{2}{3} C_{ox} W L_{eff} = 2.56\times 10^{-15} \;\; \text{F} \\
C_{GD} &= 0
\end{aligned}
$$

Il circuito equivalente per le variazioni è riportato sulla dispensa.

2) Da notare che il substrato (e il Source)sono a 5 V, quindi $V_{SG} = V_{BG} = -V_{GS} = 2.5$ V. Quindi il transistore è polarizzato correttamente. Per il calcolo della tensione di soglia si procede come usuale, con i segni scambiati. Attenzione al gate, che è polisilicio drogato p^+, quindi Φ_{MS} è positiva e si sottrae, in valore assoluto, alla V_{TH} ideale che è negativa. ψ_B è negativa, il livello di Fermi si trova sopra E_i. In sintesi sono gli stessi numeri del punto 1, a parte i segni scambiati e la mobilità delle lacune nel canale. Da notare che il Drain è a 2.5 V rispetto a massa, quindi $V_{SD} = -2.5$ V (come nel punto 1 ma cambiata di segno):

$$\begin{aligned}
\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\
\Phi_{MS} &= +\frac{E_g}{2q} + \psi_B = +0.889 \text{ V} \\
V_{TH} &= -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.225 \text{ V} \\
V_{0\ BD} &= -0.81 \text{ V} \\
V_{SD\ Sat} &= 2.275 \text{ V} \\
L_{eff} &= 1.67 \ \mu\text{m vedi punto 1} \\
I_{SD} &= -I_{DS} = -\frac{\mu_p C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{SG} - V_{TH})^2 = 0.142 \text{ mA}
\end{aligned}$$

La corrente I_{SD} è la metà rispetto al punto 1, poiché la mobilità delle lacune è circa la metà di quella degli elettroni.

3) Il circuito equivalente è esattamente lo stesso di quello del punto precedente, ed il particolare il generatore comandato ha lo stesso segno poich'e sia le tensioni che le correnti sono invertite. La resistenza r_d è doppia, poiché le correnti sono la metà di quelle del punto precedente.

ESERCIZIO 2 La mobilità dei portatori in un pezzo di silicio intinseco è risultata $\mu_n = 0.12$ m^2/Vs e $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs. La mobilità diminuisce con la temperatura, seguendo una legge $T^{\frac{3}{2}}$.
1) Determinare la posizione del livello di Fermi rispetto alla metà del gap, per $T = 300$ K e per $T = 900$ K. Determinare inoltre la resistività del silicio alle 2 temperature.[4]
2) Il silicio viene drogato con fosforo, per una concentrazione di 10^{15} cm^{-3}. Calcolare la posizione del livello di Fermi per $T = 300$ K e per $T = 900$ K, rispetto alla posizione del livello di Fermi intrinseco. [3]
3) Calcolare la resistività alle 2 temperature, tenendo conto che la mobilità con il drogaggio varia del 50% (aumenta o diminuisce?). [3]

SOLUZIONE

1) A temperatura ambiente avremo che il livello di Fermi, riferito alla metà del gap, si

trova a:

$$\begin{aligned} E_f &= \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} \\ E_f &= \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} = -0.013 \ \ \mathrm{eV} \end{aligned}$$

Per $T = 900$ K bisogna calcolare le densità equivalenti degli stati:

$$\begin{aligned} N_C(900) &= N_C(300) \left(\frac{900}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 1.45 \times 10^{20} \ \ \mathrm{cm}^{-3} \\ N_V(900) &= N_V(300) \left(\frac{900}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 5.20 \times 10^{19} \ \ \mathrm{cm}^{-3} \\ E_f &= \frac{k\ 900}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} = -0.079 \ \ \mathrm{eV} \end{aligned}$$

Per quanto riguarda la resistività a temperatura ambiente avremo:

$$\begin{aligned} \sigma &= q\mu_n n_i + q\mu_p n_i = 3.84 \times 10^{-4} \ \ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1} \\ \rho &= 2600 \ \ \Omega\mathrm{m} \end{aligned}$$

A $T = 900$ K:

$$\begin{aligned} n_i &= \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_G}{2kT}} = 8.19 \times 10^{16} \ \ \mathrm{cm}^{-3} \\ \mu_n(900) &= \mu_n 300 \left(\frac{300}{900}\right)^{3/2} = 0.023 \ \ \mathrm{m}^2/\mathrm{Vs} \\ \mu_p(900) &= \mu_p 300 \left(\frac{300}{900}\right)^{3/2} = 0.008 \ \ \mathrm{m}^2/\mathrm{Vs} \\ \sigma &= q\mu_n n_i + q\mu_p n_i = 407 \ \ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1} \\ \rho &= 2.45 \ \ \mu\Omega\mathrm{m} \end{aligned}$$

2) Il silicio è drogato $n = N_D = 10^{15}$ cm^{-3}:

$$\begin{aligned} E_C - E_f &= kT \ln\left(\frac{N_C}{n = N_D}\right) = 0.265 \ \ mathrmeV \\ E_f - E_{fi} &= \frac{E_G}{2} - (E_C - E_f) + 0.013 = 0.288 \ \ \mathrm{eV} \end{aligned}$$

Nel caso di $T = 900$ K, $n_i >> N_D$ e quindi il silicio è praticamente intrinseco (vedi punto 1).

3) Per quanto riguarda la temperatura ambiente possiamo procedere come usuale (le mobilità diminuiscono con il drogaggio, quindi sono la metà di quelle intrinseche):

$$\begin{aligned} \mu_n &= 0.12/2 = 0.06 \ \ \mathrm{m}^2/\mathrm{Vs} \\ \sigma &= q\mu_n n = 9.6 \ \ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1} \\ \rho &= 0.1 \ \ \Omega\mathrm{m} \end{aligned}$$

Per quanto riguarda $T = 900$ K avremo che il semiconduttore è praticamente intrinseco, a parte per le mobilità che risentono delle impurezze droganti e quindi dimezzano:

$$\begin{aligned}
\mu_n(900) &= 0.023/2 = 0.0115 \quad \mathrm{m^2/Vs} \\
\mu_p(900) &= 0.023/2 = 0.0115 \quad \mathrm{m^2/Vs} \\
\sigma &= q\mu_n n_i + q\mu_p n_i = 203 \quad \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1} \\
\rho &= 4.90 \quad \mu\Omega\mathrm{m}
\end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Un transistore bipolare ($N_{AB} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{DC} = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, S=1 mm^2, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $W_{met} = 4$ μm) è polarizzato con $V_{BE} = 0.6$ V. Sono state misurate le correnti ai terminali: $I_C = 30$ mA, $I_B = 1$ mA.

1) Determinare la lunghezza effettiva della base. ATTENZIONE: l'emettitore non è fortemente drogato. [4]
2) Determinare la tensione V_{CE}.[2]
3) Determinare il drogaggio di emettitore. [4]

SOLUZIONE

1) COnsideriamo l'espressione della I_C con il modello a controllo di carica, e ricaviamo la lunghezza effettiva della base:

$$\begin{aligned}
I_C &= \frac{Q}{\tau_t} \\
I_C &= qS\delta n(0)\frac{W}{2}\frac{2D_n}{W^2} \\
I_C &= qS\delta n(0)\frac{D_n}{W} \\
W &= qS\delta n(0)\frac{D_n}{I_C} \\
\delta_n(0) &= \frac{n_i^2}{N_A}e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = 2.7 \times 10^{20} \quad \mathrm{m^{-3}} \\
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.33 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
W &= 3.35 \quad \mu\mathrm{m}
\end{aligned}$$

2) Calcoliamo l'ampiezza della regione di svuotamento base-collettore e la tensione $V_{CB}-$:

$$\begin{aligned}
x_{nCB} &= 4.3.35 = 0.65 \quad \mu\mathrm{m} \\
W_{CB} &= x_{nCB}\frac{N_{DC} + N_{AB}}{N_{DC}} = 1.95 \quad \mu\mathrm{m}
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
V_{0\ CB} &= V_T \ln \frac{N_{AB} N_{DC}}{n_i^2} = 0.675 \ \ \mathrm{V} \\
W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + V_C B)} \\
V_{CB} &= \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{q}{2\epsilon_s} W_{CB}^2 - V_{0\ CB} = 8.96 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

3) La I_B è costituita dalla componente dovuta alla carica in base Q e dalla componente dovuta all'iniezione verso l'emettitore. Calcoliamo questa seconda componente sottraendo dalla I_B la quantità $\frac{Q}{\tau_n}$:

$$
\begin{aligned}
I_{B\to\mathrm{emettitore}} &= I_B - \frac{Q}{\tau_n} \\
\frac{Q}{\tau_n} &= \frac{qS\delta_n(0)W}{2\tau_n} = 7.24 \times 10^{-5} \ \ \mathrm{A} \\
I_{B\to\mathrm{emettitore}} &= qS\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_{DE}} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = 1 - 0.00724 \simeq 1 \ \ \mathrm{mA} \\
N_{DE} &= qS\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{I_{B\to\mathrm{emettitore}}} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{m^2/s} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \ \ \mu\mathrm{m} \\
N_{DE} &= 4.6 \times 10^{21} \ \ \mathrm{m^{-3}}
\end{aligned}
$$