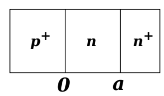
PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 18 Luglio 2016

ESERCIZIO 1

Il dispositivo in figura è un diodo p^+n, con $a = 5$ μm, $N_D = 10^{15}$ cm^{-3} per $0 < x < a$, n^+ per $x > a$), $\mu_p = 0.045$ m^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2.



1) Per $V = -30$ verificare che la regione di svuotamento è più grande di a e determinare il campo elettrico per $x = 0$ e per $x = a$ (SUGGERIMENTO: disegnare un grafico del campo elettrico, assumendo che sia 0 per $x > a$). [4]

2) Determinare la carica totale (per unità di superficie) nella parte n e quella nella parte n^+ (usare il teorema di Gauss). [3]

3) Per $V = 0.5$ V calcolare la corrente della giunzione. [3]

ESERCIZIO 2

Un transistore nMOS polysilicon gate, ha $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm, $\mu_n = 1000$, $\tau_n = 10^{-7}$ s, cm^2/Vs, W=5μm, L=5 μm. L'area della superficie della giunzione pn^+ Drain- Substrato è pari a 100 μm^2.

1) Determinare la tensione di soglia ad una temperatura pari a 450 K, e confrontarla con quella a temperatura ambiente. [4]

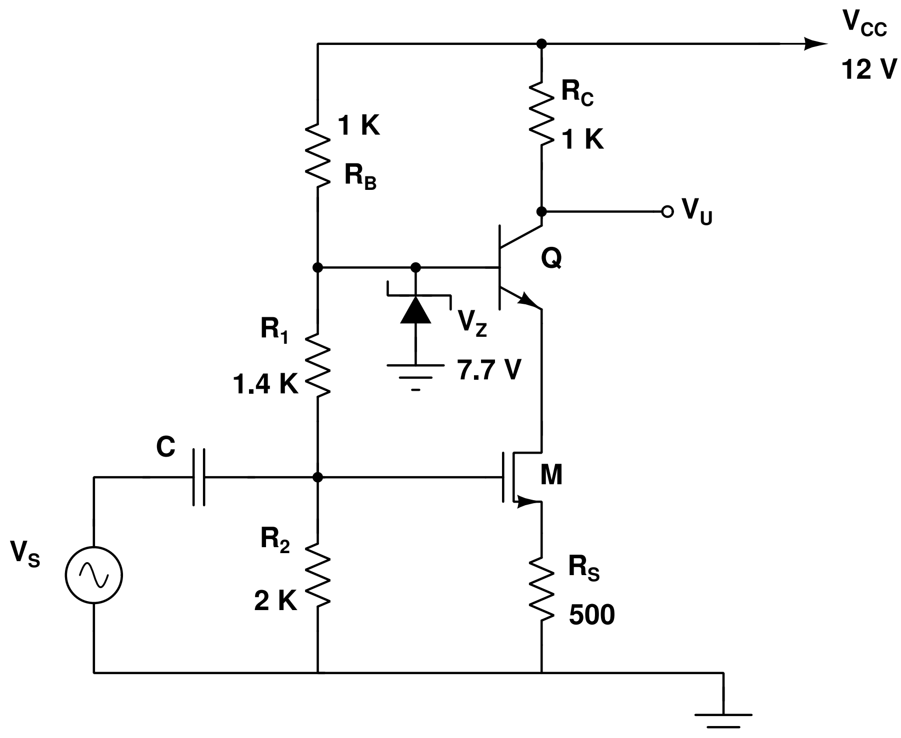
2) Per $T = 450$ K e $V_{GS} = 0$ V determinare la corrente I_{DS} per $V_{DS} =$ 5V, assumendo che la mobilità degli elettroni aumenti lineramente con la temperatura. Confrontare la corrente di canale con la corrente di perdita dovuta alla giunzione pn^+. [3]

3) Determinare la corrente per $V_{DS} = -0.6$ V, con $V_{GS} = 0$ V ($T = 450$ K). [3]

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, Q è un transistore bipolare npn simmetrico, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{17}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $W = 3$ μm, emettitore lungo. M è un transistore nMOS con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $t_{ox} = 30$ nm, $V_{TH} = 1$ V, $W = 10$ μm e $L = 2$ μm.

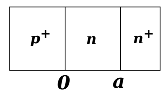
1) Stimare il β_f minimo garantito. [3]



2) Con riferimento al circuito in figura, calcolare il punto di riposo dei transistori e determinare la corrente nel diodo zener. [4]

3) Determinare i parametri dinamici g_m e r_d per il transistore nMOS. [3]

ESERCIZIO 1 Il dispositivo in figura è un diodo p^+n, con $a = 5$ μm, $N_D = 10^15$ cm^{-3} per $0 < x < a$, n^+ per $x > a$), $\mu_p = 0.045$ m^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2.



1) Per $V = -30$ verificare che la regione di svuotamento è più grande di a e determinare il campo elettrico per $x = 0$ e per $x = a$ (SUGGERIMENTO: disegnare un grafico del campo elettrico, assumendo che sia 0 per $x > a$). [4]

2) Determinare la carica totale (per unità di superficie) nella parte n e quella nella parte n^+ (usare il teorema di Gauss). [3]

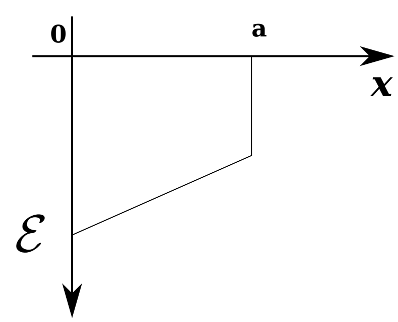
3) Per $V = 0.5$ V calcolare la corrente della giunzione. [3]

SOLUZIONE 1

1) Avremo:

$$\begin{aligned} V_0(p^+n) &= 0.814 \ \ \text{V} \\ W(-30\ (V)) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_0+30)} = 6.37 \ \ \mu\text{m} \end{aligned}$$

Quindi la regione di svuotamento si estende per tutta a, e non penetra nella parte n^+ (il campo elettrico è zero). La situazione è schematizzata nella figura, che mostra il campo elettrico in funzione di x. La pendenza è determinata dal drogaggio e pari a qN_D/ϵ_s. Avremo che l'area sottesa dal grafico



del campo elettrico è pari alla differenza di potenziale totale, che in questo caso è:

$$
\begin{aligned}
V_0(p^+n^+) &= \frac{E_g}{q} = 1.08 \ \ \text{V} \\
V &= 30 + V_0
\end{aligned}
$$

Il campo elettrico in 0 ed in a si può trovare ponendo l'area del trapezio uguale a questa differenza di potenziale. Possiamo scrivere (alternativamente si possono usare delle relazioni trigonometriche):

$$
\begin{aligned}
\frac{\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_a}{2} a &= V_0 + 30 \\
\frac{\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_a}{a} &= \frac{qN_D}{\epsilon_s} = 1.52 \times 10^{12}
\end{aligned}
$$

Risolvendo questo sistema otteniamo il campo elettrico nei due punti. In valore assoluto risulta:

$$
\begin{aligned}
\mathcal{E}_0 &= 10 \ \ \text{MV/m} \\
\mathcal{E}_a &= 2.42 \ \ \text{MV/m}
\end{aligned}
$$

2) Il campo elettrico è negativo, quindi il flusso uscente dal cilindro di Gauss con una faccia coincidente con 0 (e l'altra faccia all'infinito) è positivo. Per determinare la carica nella regione n^+ basta immaginare la faccia della superficie di Gauss posta in a (e l'altra faccia sempre all'infinito). Avremo:

$$
\begin{aligned}
\mathcal{E}_0 &= \frac{Q_{n\ n^+}}{\epsilon_s} \\
\mathcal{E}_a &= \frac{Q_{n^+}}{\epsilon_s}
\end{aligned}
$$

E quindi:

$$
\begin{aligned}
Q_{n\ n^+} &= \epsilon_s \mathcal{E}_0 = 1.05 \times 10^{-3} \ \ \text{C/m}^2 \\
Q_{n^+} &= \epsilon_s \mathcal{E}_a = 2.55 \times 10^{-4} \ \ \text{C/m}^2
\end{aligned}
$$

3) In questo caso la regione di svuotamento cade sicuramente nella parte n. La giunzione si comporta dunque come un diodo a base corta, il cui

contatto alla parte n è fornito dalla zona n^+. Avremo dunque:

$$
\begin{aligned}
W(0.5\ (V)) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_0 - 0.6)} = 0.642 \quad \mu\text{m} \\
D_p &= V_T \mu_p = 1.16 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2/\text{s} \\
I &= qS \frac{D_p}{a - W(0.5)} \frac{n_i^2}{N_D} \left(e^{\frac{V}{V_t}} - 1 \right) = 2.3 \quad \text{mA}
\end{aligned}
$$

ESERCIZIO 2 Un transistore nMOS polysilicon gate, ha $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm, $\mu_n = 1000$, $\tau_n = 10^{-7}$ s, cm^2/Vs, W=5μm, L=5 μm. L'area della superficie della giunzione pn^+ Drain- Substrato è pari a 100 μm^2.

1) Determinare la tensione di soglia ad una temperatura pari a 450 K, e confrontarla con quella a temperatura ambiente. [4]

2) Per $T = 450$ K e $V_{GS} = 0$ V determinare la corrente I_{DS} per $V_{DS} =$ 5V, assumendo che la mobilità degli elettroni aumenti linearmente con la temperatura. Confrontare la corrente di canale con la corrente di perdita dovuta alla giunzione pn^+. [3]

3) Determinare la corrente per $V_{DS} = -0.6$ V, con $V_{GS} = 0$ V ($T = 450$ K). [3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia a temperatura ambiente.

$$
\begin{aligned}
\psi_B &= \frac{kT}{q} ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.329 \quad \text{V} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.726 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\
\Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_B = -0.869 \quad \text{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = -0.018 \quad \text{V}
\end{aligned}
$$

Al variare della temperatura, nell'espressione della V_{TH} cambiano essenzialmente ψ_B, che dipende da n_i, e conseguentemente Φ_{MS}. Calcoliamo

$\psi_B(450\ \mathrm{K})$:

$$
\begin{aligned}
N_C(450\ \mathrm{K}) &= N_C(300)\left(\frac{450}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 5.14\times 10^{19}\ \ \mathrm{cm}^{-3}\\
N_V(450\ \mathrm{K}) &= N_V(300)\left(\frac{450}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 1.84\times 10^{19}\ \ \mathrm{cm}^{-3}\\
V_T(450\ \mathrm{K}) &= V_T 300\frac{450}{300} = 0.03885\\
n_i(450\ \mathrm{K}) &= \sqrt{N_C\ N_V}\ e^{-\frac{E_g}{2qV_T}} = 2.83\times 10^{13}\ \ \mathrm{cm}^{-3}
\end{aligned}
$$

Ripetendo il calcolo della V_{TH} avremo:

$$
\begin{aligned}
\psi_B &= V_T(400)ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.201 \quad \mathrm{V}\\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.726\times 10^{-3} \quad \mathrm{F/m^2}\\
\Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_B = -0.741 \quad \mathrm{V}\\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = -0.188 \quad \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

È quindi negativa.

2) Per $V_{GS} = 0$ V e $V_{DS} = 5$ V, ad alta temperatura, il transistore è in saturazione ($V_{GS} > V_{TH} = -0.188$, $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$). Avremo:

$$
\begin{aligned}
\mu_n(450\ \mathrm{K}) &= \mu_n(300)\frac{450}{300} = 0.15\ \ \mathrm{m^2/Vs}\\
I_{DS} &= \frac{\mu_n(450)C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left[V_{GS} - V_{TH}(450)\right]^2 = 4.57\ \ \mu\mathrm{A}
\end{aligned}
$$

A questa corrente, va sommata la corrente di saturazione inversa della giunzione Drain- Substrato.

$$
\begin{aligned}
D_n(450\ \mathrm{K}) &= V_T(450)\mu_n(450) = 5.827\times 10^{-3}\ \ \mathrm{C/m^2}\\
L_n(450\ \mathrm{K}) &= \sqrt{D_n\tau_n} = 22.3\ \ \mu\mathrm{m}\\
I_{0Drain\ Sub} &= qS\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_A} = 6.7\ \ \mathrm{pA}
\end{aligned}
$$

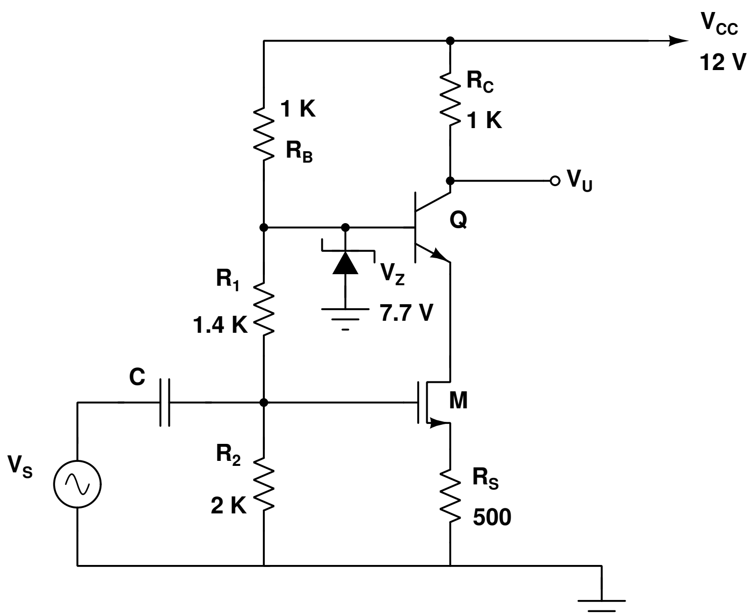
3) Per $V_{DS} = -0.6$ V il diodo Drain- Substrato è polarizzato in diretta. Avremo allora:

$$I_{DS\ pn^+} = qS\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V_{SD}}{V_T}} - 1\right) = 34.1 \quad \mu\text{A} \tag{1}$$

A questa corrente deve essere aggiunta quella di canale. Da notare che per $V_{GS} = 0$ siamo in saturazione, anche con $V_{DS} = 0.7$ V. Avremo dunque che la corrente è quella calcolata al punto 2, $I_{DS\ Canale} = 4.57$ μA.

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, Q è un transistore bipolare *npn* simmetrico, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{17}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $W = 3$ μm, emettitore lungo. M è un transistore nMOS con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $t_{ox} = 30$ nm, $V_{TH} = 1$ V, $W = 10$ μm e $L = 2$ μm.



1) Stimare il β_f minimo garantito. [3]

2) Con riferimento al circuito in figura, calcolare il punto di riposo dei transistori e determinare la corrente nel diodo zener. [4]

3) Determinare i parametri dinamici g_m e r_d per il transistore nMOS. [3]

SOLUZIONE 3

1) Il drogaggio dell'emettitore non è n^+, quindi il guadagno del transistore è ridotto dall'efficienza di emettitore, che non è unitaria. Come lunghezza della base, dovendo stimare il β_f minimo gadantito, possiamo considerare la lunghezza metallurgica $W = 3$ μm. Dalle misure possiamo calcolare il $\beta_f = I_C/I_B = 500$ e quindi la lunghezza effettiva di base:

$$\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \\
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \quad \mu\text{m} \\
\alpha_t &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n^2}} = 0.998265 \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.036 \times 10^{-3} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.19 \quad \mu\text{m} \\
\gamma_E &= \frac{qS\frac{D_n}{W}\frac{n_i^2}{N_A}}{qS\frac{D_n}{W}\frac{n_i^2}{N_A} + qS\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D}} = 0.99629 \\
\alpha_f &= \gamma\alpha_t = 0.994562 \\
\beta_f &= \frac{\alpha_f}{1-\alpha_f} = 183
\end{aligned}$$

2) La tensione di base di Q è pari a $V_Z = 7.7$ V, e quindi la tensione di emettitore $V_E = V_D = 7$ V. La tensione di gate di M risulta: $V_G = V_Z\frac{R_2}{R_1+R_2} = 4.53$ V. Supponendo il MOS in saturazione, possiamo calcolare la corrente dall'equazione:

$$\begin{aligned}
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \quad \text{C/m}^2 \\
V_{GS} &= V_G - R_S I_{DS} \\
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_G - V_{TH} - R_S I_{DS}\right)^2
\end{aligned}$$

Risolvendo questa equazione otteniamo, come unica soluzione accettabile, $I_{DS} = 1.7$ mA. Avremo dunque $I_C \simeq I_E = I_{DS} = 1.7$ mA. Da ciò avremo $V_u = V_C = V_{CC} - R_C I_C = 10.3$ V. Quindi: Avremo dunque:

$$
\begin{aligned}
V_B &= 7.7 \text{ V} \\
I_E &= 1.7 \text{ mA} \\
V_{BE} &= 0.7 \text{ V} \\
V_{CE} &= V_C - V_E = 3.3 \text{ V}
\end{aligned}
$$

quindi il transistore bipolare è correttamente polarizzato. Per il transistore MOS avremo:

$$
\begin{aligned}
I_{DS} = 1.7 \text{ mA} V_G &= 4.53 \text{ V} \\
V_{GS} &= V_G - R_S I_{DS} = 3.68 \text{ mA} \\
V_{DS} &= V_D - V_S = 6.15 \text{ V}
\end{aligned}
$$

Quindi anche il MOS risulta correttamente polarizzato. Per quanto riguarda il diodo Zener abbiamo che $I_{R_B} = 12 - 7.7/R_B = 4.3$ mA, trascurando $I_B = I_C/\beta_g = 9.3$ μA. Per R_1 e R_2 avremo $I_{R_1R_2} = V_Z/R_1 + R_2 = 2.26$ mA, quindi $I_Z = I_{R_B} - I_{R_1R_2} = 2.04$ mA: il diodo zener è polarizzato oltre il ginocchio.

3) I parameetri dimanici vanno calcolati con i valori di correnti e di tensioni del punto di riposo. Abbiamo ($V_{GS} = 3.68$ V):

$$
g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}|_{V_{DS0}} = \mu_n C_{ox} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 1.23 \times 10^{-3} \tag{2}
$$

Per la resistenza r_d basta calcolare I_{DS} per due valori di V_{DS}, con $V_{GS} = 3.68$ V. Possiamo scegliere $I_{DS1}(V_{DS\ Sat}) = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 1.7$ mA, e l'altra per $V_{DS} = 6.15$ V:

$$
\begin{aligned}
V_{0DS} &= V_T ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \text{ V} \\
V_{DS\ Sat} &= V_{GS} - V_{TH} = 2.687 \text{ V} \\
W(V_{DS} - V_{DS\ Sat}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\left(V_{0DS} + V_{DS\ Sat}\right)} = 0.63 \ \mu\text{V} \\
L_{eff} &= 2 - 0.63 = 1.37 \ \mu\text{V} \\
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 2.41 \text{ mA}
\end{aligned}
$$

e quindi:

$$r_d = \frac{V_{DS} - V_{DS\ Sat}}{I_{DS} - I_{DS\ Sat}} = 4877 \quad \Omega \tag{3}$$