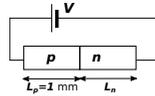


PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 26 Febbraio 2018

ESERCIZIO 1

In figura è rappresentata una giunzione pn , con $S = 1 \text{ mm}^2$, $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.15 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-7} \text{ s}$. Al dispositivo è applicata una tensione pari a 1.2 V (vedi figura), ed è stata misurata una corrente pari a 2.5 mA . La distanza tra il contatto p e il piano della giunzione è pari a 1 mm .



- 1) Determinare la caduta di tensione tra gli estremi della regione di svuotamento. [3]
- 2) Determinare la distanza tra il piano di giunzione e il contatto alla parte n . SUGGERIMENTO: trascurare le lunghezze di diffusione rispetto alle lunghezze delle regioni quasi-neutre. [4]
- 3) Assumere (ai fini dell'esercizio, per semplificare i conti) che la mobilità degli elettroni e delle lacune sia costante con la temperatura. Per $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, determinare la tensione da applicare al dispositivo per ottenere la stessa corrente $I = 2.5 \text{ mA}$. [3]

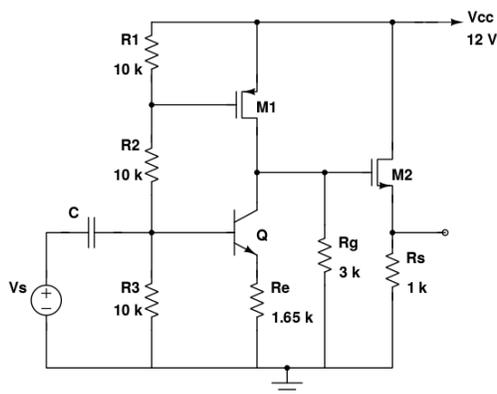
ESERCIZIO 2

Si consideri un transistor n -MOS con $\Phi_{MS} = -1 \text{ V}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $L = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $W = 20 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu_n = 700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Nell'ossido, all'interfaccia ossido-silicio, è stata introdotta una carica negativa pari a $Q_{ox} = -5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$. Il source è polarizzato rispetto al bulk con una tensione $V_{SB} = 0.8 \text{ V}$, e $V_{DS} = 0$.

- 1) Per $V_{GB} = 0$ determinare la caduta di tensione nel silicio. Determinare inoltre la concentrazione di elettroni all'interfaccia. [4]
- 2) Determinare la tensione di Gate V_{GB} per avere una concentrazione di elettroni all'interfaccia pari a quella n_0 del bulk. [3]
- 3) per $V_{GS} = V_{TH} + 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 5 \text{ V}$ determinare la carica mobile totale nel canale e la corrente del transistor. [3]

ESERCIZIO 3

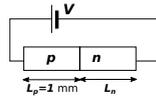
Nel circuito in figura, il transistorore M_1 è un p -MOS con gate in polisilicio, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_p = 0.026$ m²/Vs, $N_D = 10^{16}$ cm⁻³. M_2 è un n -MOS, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.077$ m²/Vs, $W/L = 5$, $V_{TH} = 1$ V, mentre Q è un bipolare con $\beta_{Fminimo} = 500$.



- 1) Per il transistorore M_1 determinare Q_{ox} in maniera tale da avere $V_{TH} = -1$ V.[3]
- 2) Determinare W/L del transistorore M_1 in maniera tale da avere $I_{SD} = 4$ mA.[3]
- 3) Determinare le tensioni e le correnti dei transistori. [4]

ESERCIZIO 1

In figura è rappresentata una giunzione pn , con $S = 1 \text{ mm}^2$, $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.15 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-7} \text{ s}$. Al dispositivo è applicata una tensione pari a 1.2 V (vedi figura), ed è stata misurata una corrente pari a 2.5 mA . La distanza tra il contatto p e il piano della giunzione è pari a 1 mm .



1) Determinare la caduta di tensione tra gli estremi della regione di svuotamento. [3]

2) Determinare la distanza tra il piano di giunzione e il contatto alla parte n . SUGGERIMENTO: trascurare le lunghezze di diffusione rispetto alle lunghezze delle regioni quasi-neutre. [3]

3) Assumere (ai fini dell'esercizio, per semplificare i conti) che la mobilità degli elettroni e delle lacune sia costante con la temperatura. Per $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, determinare la tensione da applicare al dispositivo per ottenere la stessa corrente $I = 2.5 \text{ mA}$. [4]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo la caduta di tensione ai capi della regione di svuotamento:

$$D_n = V_T \mu_n = 3.885 \times 10^{-3}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 19.7 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_p = V_T \mu_p = 1.036 \times 10^{-3}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 10.2 \text{ } \mu\text{m}$$

$$I_S = qS \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \right) = 10.77 \text{ pA}$$

$$V = V_T \ln \frac{I}{I_S} = 0.5 \text{ V}$$

2) Determiniamo la caduta di tensione V_p nella regione quasi-neutra della parte p . Tra

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{1}{qN_A\mu_n} \frac{L}{S} = 156 \ \Omega \\ V_p &= R_p I = 0.39 \ \text{V} \end{aligned}$$

Quindi avremo che la caduta di tensione nella regione quasi-neutra della parte n risulta:

$$V_n = V - V_{giunzione} - V_p = 0.31 \ \text{V} \quad (1)$$

Quindi la resistenza della regione quasi-neutra n è pari a $R_n = V_n/I = 124 \ \Omega$, da cui avremo:

$$L = R(q\mu_n N_D)S = 3 \ \text{mm} \quad (2)$$

3) Calcoliamo la concentrazione intrinseca di portatori a $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, che significa $T = 423 \ \text{K}$.

$$\begin{aligned} N_D(423 \ \text{K}) &= N_D(300 \ \text{K}) \left(\frac{423}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 4.7 \times 10^{19} \ \text{cm}^{-3} \\ N_A(423 \ \text{K}) &= N_A(300 \ \text{K}) \left(\frac{423}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 1.7 \times 10^{19} \ \text{cm}^{-3} \\ n_i(423 \ \text{K}) &= \sqrt{N_D(423 \ \text{K})N_A(423 \ \text{K})} e^{-\frac{E_g}{2kT}} = 1 \times 10^{13} \ \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

Quindi $n_i < N_D, N_A$ e i due pezzi di semiconduttore rimangono drogati, con lo stesso drogaggio. Dato che la mobilità è stata assunta costante con la temperatura (in realtà diminuisce con la temperatura), le due resistenze delle regioni quasi-neutre sono le stesse. Quello che cambia è la caduta ai capi delle regioni di svuotamento, poiché cambia I_S .

$$\begin{aligned} I_S &= qS \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \right) = 47.9 \ \text{nA} \\ V &= V_T(423 \ \text{K}) \ln \frac{I}{I_S} = 0.39 \ \text{V} \end{aligned}$$

Quindi la tensione totale da applicare al dispositivo risulta $V_p + V + V_n = 0.39 + 0.39 + 0.31 = 1.09 \ \text{V}$.

ESERCIZIO 2

Si consideri un transistoro n -MOS con $\Phi_{MS} = -1$ V, $t_{ox} = 30$ nm, $N_A = 10^{15}$ cm $^{-3}$, $L = 5$ μ m, $W = 20$ μ m, $\mu_n = 700$ cm 2 /Vs. Nell'ossido, all'interfaccia ossido-silicio, è stata introdotta una carica negativa pari a $Q_{ox} = -5 \times 10^{-4}$ C/m 2 . Il source è polarizzato rispetto al bulk con una tensione $V_{SB} = 0.8$ V, e $V_{DS} = 0$.

1) Per $V_{GB} = 0$ determinare la caduta di tensione nel silicio. Determinare inoltre la concentrazione di elettroni all'interfaccia.[4]

2) Determinare la tensione di Gate V_{GB} per avere una concentrazione di elettroni all'interfaccia pari a quella n_0 del bulk.[3]

3) per $V_{GS} = V_{TH} + 5$ V e $V_{DS} = 5$ V determinare la carica mobile totale nel canale e la corrente del transistoro.[3]

SOLUZIONE 2

1) Possiamo scrivere l'equazione:

$$0 = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (3)$$

dove:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$$
$$\psi_B = V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.287 \text{ V}$$

Risolvendo questa equazione abbiamo, come soluzione accettabile, $V_S = 0.344$. Il condensatore MOS è quindi verso l'inversione, ma non ancora in inversione poichè $V_S < 2\psi_B + V_{SB}$. Se avessimo V_{SB} la concentrazione di elettroni all'interfaccia sarebbe pari a quella nel bulk, poichè in questo la caduta di tensione nel silicio "recupererebbe" la polarizzazione del Source. Avremo:

$$n_S = n_0 e^{\frac{-V_{SB} + V_S}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{-V_{SB} + V_S}{V_T}} = 5.1 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \quad (4)$$

2) Poiché il Source è polarizzato rispetto al substrato, per avere una concentrazione di elettroni all'interfaccia uguale a quella nel silicio bulk bisogna avere $V_S = V_{SB} = 0.5$ V. Quindi possiamo scrivere:

$$V_{GB} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_s}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 0.38 \text{ V} \quad (5)$$

3) $V_{DS} = 5$ V, ed è proprio uguale a $V_{GS} - V_{TH}$. Quindi il transistorore è in saturazione. Da notare che non serve calcolare V_{TH} , dove appare la polarizzazione del Source rispetto al substrato. Tutte le tensioni sono riferite al Source, quindi possiamo procedere usando le formule standard (la polarizzazione del Source modifica solo la tensione di soglia V_{TH} . Avremo dunque:

$$Q_n = \frac{2}{3} C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) WL = 1.92 \times 10^{-13} \text{ C}$$

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 4 \text{ mA}$$

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, il transistorore M_1 è un p -MOS con gate in polisilicio, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_p = 0.026$ m²/Vs, $N_D = 10^{16}$ cm⁻³. M_2 è un n -MOS, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.077$ m²/Vs, $W/L = 5$, $V_{TH} = 1$ V, mentre Q è un bipolare con $\beta_{Fminimo} = 500$.

1) Per il transistorore M_1 determinare Q_{ox} (positiva) in maniera tale da avere $V_{TH} = -1$ V.[3]

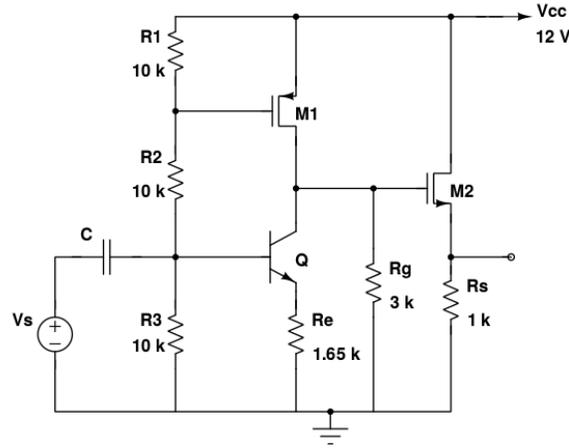
2) Determinare W/L del transistorore M_1 in maniera tale da avere $I_{SD} = 4$ mA.[3]

3) Determinare le tensioni e le correnti dei transistorori. [4]

SOLUZIONE 3

1) Avremo:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$$



$$V_{TH} = -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$\psi_B = V_T \ln \frac{N_D}{n_i} = 0.347 \text{ V}$$

$$\Phi_{MS} = \frac{E_g}{2q} \psi_B = 0.887 \text{ V}$$

$$Q_{ox} = C_{ox} \left(-\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B + \Phi_{MS} - V_{TH} \right) = 8.87 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

2) Per il transistorore M_1 abbiamo che $V_G = 8 \text{ V}$, e quindi $V_{GS} = 8 - 12 = -4 \text{ V}$. Avremo dunque:

$$I_{DS} = -\frac{\mu_p C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$\frac{W}{L} = \frac{I_{DS}}{-\frac{\mu_p C_{ox}}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2} \simeq 30$$

3) Per il transistorore bipolare abbiamo $V_B = 4$, $V_E = 3.3$, $I_E \simeq I_C = 2 \text{ mA}$. Quindi abbiamo $I_{RG} = 4 - 2 = 2 \text{ mA}$, $V_{G2} = V_C = 6 \text{ V}$. Da cui ricaviamo $I_S = 2 \text{ mA}$, $V_u = V_S = 2 \text{ V}$. Quindi abbiamo, per M_1 :

$$I_{DS} = 4 \text{ mA}$$

$$V_G = 8 \text{ V}$$

$$\begin{aligned}
 V_{GS} &= -4 \text{ V} \\
 V_{DS} &= 6 - 12 = -6 \text{ V}
 \end{aligned}$$

quindi $V_{DS} = -6 < V_{GS} - V_{TH} = -3\text{V}$, quindi il transistoro è in saturazione (in valore assoluto $|V_{DS}| > |V_{GS} - V_{TH}|$).

Per M_2 :

$$\begin{aligned}
 I_{DS} &= 2 \text{ mA} \\
 V_G &= 6 \text{ V} \\
 V_{GS} &= 4 \text{ V} \\
 V_{DS} &= 12 - 4 = 8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

quindi $V_{DS} = 8 > V_{GS} - V_{TH} = 3\text{V}$, quindi il transistoro è in saturazione. Per il bipolare:

$$\begin{aligned}
 I_E &\simeq I_C = 2 \text{ mA} \\
 V_E &= 3.3 \text{ V} \\
 V_C &= V_{G2} = 6 \text{ V} \\
 V_{CE} &= 2.7 \text{ V} > V_{CEsat} \\
 I_{Bmax} &= \frac{I_C}{\beta_{Fmin}} = 4 \text{ } \mu\text{A} \ll \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2 + R_3} = 0.4 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Tutti i transistori sono correttamente polarizzati (in saturazione i MOS e in zona attiva diretta il bipolare). Il partitore pesante è verificato.