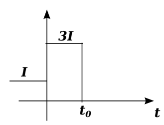
PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 12 Giugno 2017

ESERCIZIO 1

Una giunzione p^+n è caratterizzata da $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2. Questa giunzione è polarizzata con $V = 0.4$ V.



1) Determinare la corrente ed i parametri per piccolo segnale (resistenza e capacità differenziali) della giunzione (con $V = 0.4$ V), verificando la condizione di bassa iniezione. [3]

2) A t=0 (vedi figura) la corrente viene bruscamente triplicata. Si determini il transitorio della carica e della tensione per $0 < t < t_0$, dove $t_0 = \tau_p$. Si determini inoltre la carica dovuta ai portatori minoritari iniettati per $t = t_0 = \tau_p$.[5]

3) Per $t = t_0 = \tau_p$ la corrente viene buscamente portata a 0. Si calcoli il transitorio della carica e della tensione per $t > \tau_p$.[2]

ESERCIZIO 2

Un condensatore n-MOS, con gate in polisilicio ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} =$ 30 nm), viene illuminato uniformemente con luce rossa (lunghezza d'onda $\lambda = 630$ nm). Per misurare l'intensità luminosa, viene applicato un gradino di tensione pari a 5 V a $t = 0$: $V_{GS} = 0$ V per $t < 0$ e $V_{GS} = 5$ V per $t > 0$.

1) Una volta determinata la tensione di soglia, calcolare la carica mobile, la carica fissa e la caduta di tensione nel silicio per $t = 0^+$. [3]

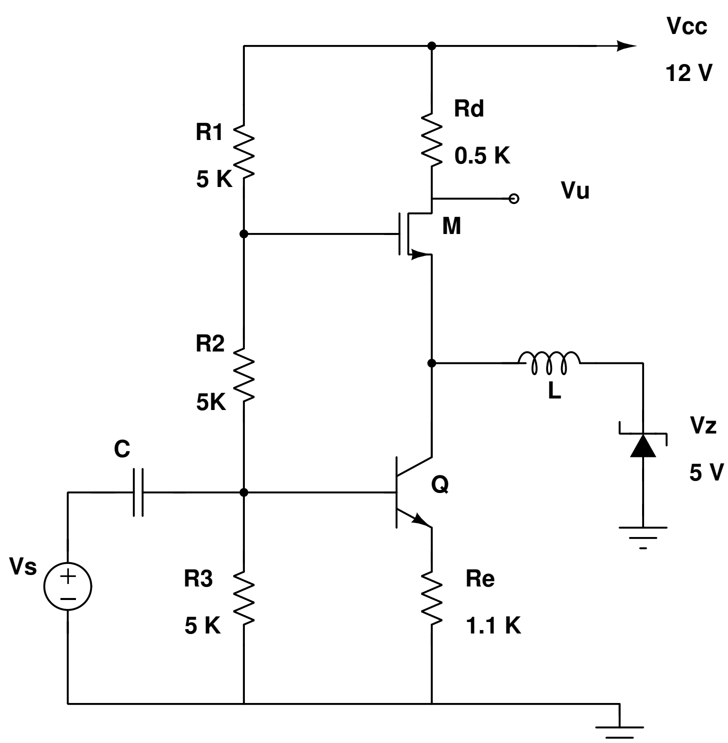
2) Dopo 5 ms viene misurata la carica mobile Q_n, che è risultata negativa e pari a 2 mC/m^2. Determinare la caduta di tensione nel silicio e la carica fissa. [3]

3) Con riferimento al punto 2, parte della carica mobile è dovuta alla generazione ottica e parte alla generazione termica. La carica $Q_{n\ termica}(t)$, dovuta alla generazione termica, si può calcolare con l'espressione $Q_{n\ termica}(t) = Q_{n\ regime}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right)$, dove $\tau_n = 20$ ms e $Q_{n\ regime}$ è la carica mobile del

condensatore MOS per tempi molto lunghi. Calcolare la carica dovuta all'illuminazione (dopo 5 ms) e determinare l'intensita della luce (potenza su unità di superficie, W/m^2).(NOTA: questo è un pixel per misurare l'intensità luminosa).[4]

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, M è un transistore nMOS con gate metallico ($\Phi_M = 3.8$ V, $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.08$ cm^2/Vs). Il substrato è a massa (non indicato nel circuito) e non è cortocircuitato con il Source. Q è un transistore n^+pn con $\beta_{f\ min} = 300$.



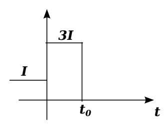
1) Determinare la tensione di soglia del transistore MOS.[4]

2) Determinare W/L del transistore MOS in maniera tale da avere $I_{DS} \simeq 4.6$ mA. Determinare inoltre il punto di riposo dei transistori, verificando la polarizzazione del diodo Zener.[4]

3) Determinare il massimo valore della resistenza R_D che consenta la corretta polarizzazione del transistore nMOS. [2]

ESERCIZIO 1

Una giunzione p^+n è caratterizzata da $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2. Questa giunzione è polarizzata con $V = 0.4$ V.



1) Determinare la corrente ed i parametri per piccolo segnale (resistenza e capacità differenziali) della giunzione (con $V = 0.4$ V), verificando la condizione di bassa iniezione. [3]

2) A t=0 (vedi figura) la corrente viene bruscamente triplicata. Si determini il transitorio della carica e della tensione per $0 < t < t_0$, dove $t_0 = \tau_p$. Si determini inoltre la carica dovuta ai portatori minoritari iniettati per $t = t_0 = \tau_p$.[5]

3) Per $t = t_0 = \tau_p$ la corrente viene buscamente portata a 0. Si calcoli il transitorio della carica e della tensione per $t > \tau_p$.[2]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo i parametri:

$$\begin{aligned} D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.036 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2/\text{s} \\ L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.19 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

Calcoliamo la corrente inversa di saturazione I_S:

$$I_S = qS\frac{n_i^2}{N_D}\frac{D_p}{L_p} = 2.32 \times 10^{-13} \quad \text{A} \tag{1}$$

Quindi per $V = 0.4$ V avremo:

$$I = I_S\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 1.18 \quad \mu\text{A}$$

$$r_D = \frac{V_T}{I} = 22 \quad \text{K}\Omega$$

Poiché $C_{diff} r_D = \tau_p$ avremo che la capacità di diffusione è pari a $C_{Diff} = \tau_p / r_D = 46$ pF. Rimane da calcolare la capacità dovuta allo svuotamento (assumendo $N_A = 10^{19}$ cm^{-3}:

$$\begin{aligned}
V_0 &= V_T \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) = 0.855 \quad \text{V} \\
W(0.55 \text{ V}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q N_A}(V_0 - 0.6)} = 0.283 \quad \mu\text{m} \\
C_W &= S\frac{\epsilon_s}{W} = 372 \quad \text{pF}
\end{aligned}$$

Verifichiamo la bassa iniezione, calcolando:

$$\begin{aligned}
\delta p(0) &= \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V}{V_T}} = 2.3 \times 10^{11} \quad \text{cm}^{-3} \\
\delta p(0) &\ll N_D \\
\delta p(0) &\gg p_0
\end{aligned}$$

2) Per il transitorio, bisogna risolvere l'equazione di continuità dipendente dal tempo, in forma integrale (diodo a base nulla):

$$I(t) = \frac{Q(t)}{\tau_p} + \frac{dQ}{dt} \tag{2}$$

dove $I(t) = 3I$ per $0 < t < t_0$. A $t = 0$ la condizione a contorno è fissata dalla corrente I per $t < 0$:

$$Q(t = 0^+) = Q(t = 0^-) = I\tau_p \tag{3}$$

La soluzione si può scrivere come soluzione generale dell'omogenea associata, più una soluzione particolare, che può essere $Q(t) = \text{Costante} = 3I\tau_p$:

$$Q(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau_p}} + 3I\tau_p \tag{4}$$

Quindi, imponendo la condizione a contorno:

$$\begin{aligned}
Q(t) &= (I\tau_p - 3I\tau_p)\, e^{-\frac{t}{\tau_p}} + 3I\tau_p \\
Q(t) &= I\tau_p\left(3 - 2e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right)
\end{aligned}$$

L'andamento della tensione si calcola nella maniera usuale, supponendo la condizione di quasi- equilibrio:

$$Q(t) \simeq qSL_p \frac{n_i^2}{N_D} \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) = I_S \tau_p \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) \tag{5}$$

Otteniamo:

$$v(t) = V_T \ln \left(\frac{I}{I_S} \left(3 - 2e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) + 1 \right) \tag{6}$$

All'istante $t_0 = \tau_p$ la carica dovuta alle lacune iniettate risulta (basta sostituire τ_p nell'espressione della carica $Q(t)$):

$$Q(\tau_p) = I\tau_p \left(3 - 2e^{-1} \right) = 8.76 \times 10^{-10} \quad \mathrm{C} \tag{7}$$

3) Per $t > t_0 = \tau_p$ avremo che la forma integrale dell'equazione di continuità dipendente dal tempo diventa:

$$0 = \frac{Q(t)}{\tau_p} + \frac{dQ}{dt} \tag{8}$$

con condizione a contorno:

$$Q(t = t_0^+) = Q(t = t_0^-) \tag{9}$$

Quindi avremo semplicemente:

$$Q(t) = Q(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_p}} \tag{10}$$

ESERCIZIO 2

Un condensatore n-MOS, con gate in polisilicio ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} =$ 30 nm), viene illuminato uniformemente con luce rossa (lunghezza d'onda $\lambda = 630$ nm). Per misurare l'intensità luminosa, viene applicato un gradino di tensione pari a 5 V a $t = 0$: $V_{GS} = 0$ V per $t < 0$ e $V_{GS} = 5$ V per $t > 0$.

1) Una volta determinata la tensione di soglia, calcolare la carica mobile, la carica fissa e la caduta di tensione nel silicio per $t = 0^+$. [3]

2) Dopo 5 ms viene misurata la carica mobile Q_n, che è risultata negativa e pari a 2 mC/m^2. Determinare la caduta di tensione nel silicio e la carica fissa. [3]

3) Con riferimento al punto 2, parte della carica mobile è dovuta alla generazione ottica e parte alla generazione termica. La carica $Q_{n\ termica}(t)$, dovuta alla generazione termica, si può calcolare con l'espressione $Q_{n\ termica}(t) = Q_{n\ regime}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right)$, dove $\tau_n = 20$ ms e $Q_{n\ regime}$ è la carica mobile del condensatore MOS per tempi molto lunghi. Calcolare la carica dovuta all'illuminazione (dopo 5 ms) e determinare l'intensita della luce (potenza su unità di superficie, W/m^2).(NOTA: questo è un pixel per misurare l'intensità luminosa).[4]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia:

$$\begin{aligned}
\psi_B &= V_T ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \ \ \text{V} \\
\mid \Phi_{MS} \mid &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \ \ \text{V} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \ \ \text{F/m} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \mid \Phi_{MS} \mid = 0.23 \ \ \text{V}
\end{aligned}$$

La carica mobile a $t = 0^+$ è nulla, poiché $Q(0^+) = Q(0^-) = 0$. Tutta la carica è dovuta allo svuotamento (svuotamento profondo), per cui avremo:

$$V_{GS} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S - \mid \Phi_{MS} \mid \tag{11}$$

Risolvendo questa equazione abbiamo, come unica soluzione possibile, $V_S = 4.79$ V. La carica fissa, dovuta alla regione di svuotamento, risulta allora (è negativa, in valore assoluto):

$$Q_W(0^+) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 1.27 \times 10^{-3} \ \ \text{C/m}^2 \tag{12}$$

2) Avremo (sia Q_W che Q_n sono negative):

$$V_{GS} = \frac{Q_n + \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S - \mid \Phi_{MS} \mid \tag{13}$$

Risolvendo questa equazione otteniamo $V_S = 3.24$ V. Avremo dunque:

$$Q_W(5\ \text{ms}) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 1.04 \times 10^{-3}\ \ \text{C/m}^2 \tag{14}$$

3) La carica mobile a regime si può determinare con l'espressione usuale:

$$Q_{n\ regime} = C_{ox}(V_{GS} - V_{TH}) = 5.48 \times 10^{-3}\ \ \text{C/m}^2 \tag{15}$$

Quindi $Q_{n\ termica}(5\ \text{ms}) = Q_{n\ regime}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right) = 1.2 \times 10^{-3}\ \text{C/m}^2$. La carica Q_n dovuta alla generazione ottica risulta dunque: $Q_{n\ ottica} = Q_n - Q_{n\ termica} = 0.7 \times 10^{-3}\ \text{C/m}^2$.
In 5 ms arrivano un totale di $\frac{0.7\times10^{-3}}{q} = 5\times10^{15}$ fotoni/m^2. Poichè ogni fotone ha una energia pari a $E_{fot} = q\frac{1.24}{0.63} = 3.15 \times 10^{-19}$ W, l'intensità luminosa risulta pari a $3.25 \times 10^{-19}\ 5 \times 10^{15}/5$ ms=0.31 Wm^2.

ESERCIZIO 3

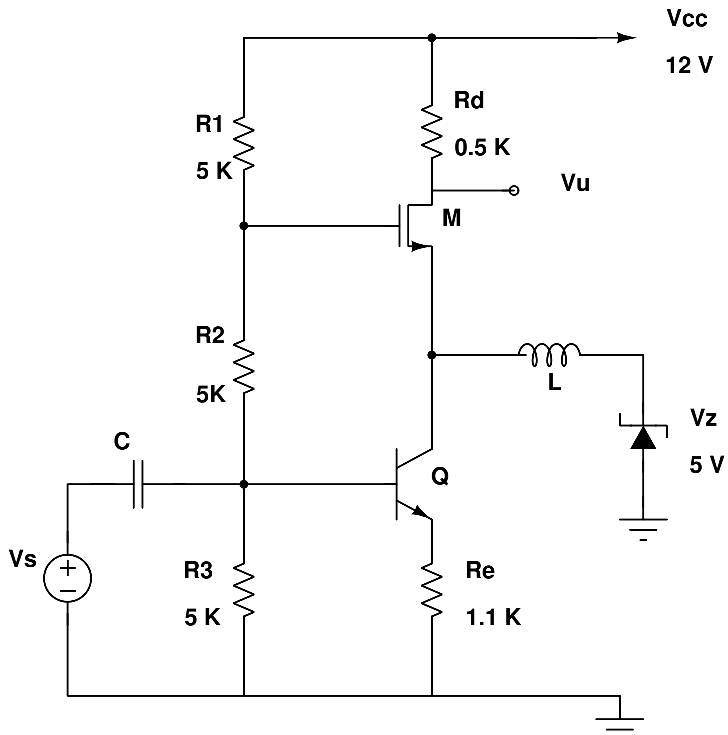
Nel circuito in figura, M è un transistore nMOS con gate metallico ($\Phi_M = 3.8$ V, $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.08$ cm^2/Vs). Il substrato è a massa (non indicato nel circuito) e non è cortocircuitato con il Source. Q è un transistore n^+pn con $\beta_{f\ min} = 300$.

1) Determinare la tensione di soglia del transistore MOS.[4]

2) Determinare W/L del transistore MOS in maniera tale da avere $I_{DS} \simeq 4.6$ mA. Determinare inoltre il punto di riposo dei transistori, verificando la polarizzazione del diodo Zener.[4]

3) Determinare il massimo valore della resistenza R_D che consenta la corretta polarizzazione del transistore nMOS. [2]

SOLUZIONE 3



1) Per il transistore MOS, si svolgono i passaggi usuali. Bisogna tener conto, peró, che il Source si trova ad un potenziale di 5 V ($V_S = 5$ V). Da ricordare che la tensione di soglia di un MOS è riferita al Source.

$$\begin{aligned}
\psi_B &= V_T ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.329 \;\; \text{V} \\
\Phi_{MS} &= \Phi_M - \left(q\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B\right) = -1.169 \;\; \text{V} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \;\; \text{F/m} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V_S)}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.314 \;\; \text{V}
\end{aligned}$$

2) $V_G = 8$ V, e quindi $V_{GS} = V_G - V_S = 8 - 5 = 3$ V. Avremo dunque:

$$I_D S = \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2$$

$$\frac{W}{L} = \frac{I_{DS}}{\frac{\mu_n C_{ox}}{2}(V_{GS}-V_{TH})^2} = 14$$

Quindi per il MOS avremo:

$$\begin{aligned} V_{GS} &= V_G - V_S == V_G - V_Z = 3 \ \ \text{V} \\ I_{DS} &= 4.6 \ \ \text{mA} \\ V_{DS} &= V_D - V_S = V_{CC} - R_D I_{DS} - V_Z = 4.7 \ \ \text{V} \end{aligned}$$

Il transistore è polarizzato in saturazione, essendo $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$. Per il transistore bipolare abbiamo che $V_B = 4$ V, $V_E = V_B - V_\gamma = 3.3$ V e quindi $I_E = V_E/R_E = 3$ mA. Quindi:

$$\begin{aligned} I_C &\simeq I_E = 3 \ \ \text{mA} \\ V_{CE} &= V_C - V_E = V_Z - V_E = 5 - 3.3 = 1.7 \ \ \text{V} \\ I_{B\ max} &= \frac{I_C}{\beta_{f\ min}} = 10 \ \mu\text{A} \ll \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2 + R_3} = 800 \ \ \mu\text{A} \end{aligned}$$

Nel diodo Zener scorrono $I_{DS} - I_C = 1.5$ mA, quindi è correttamente polarizzato.

3) Il valore massimo di R_D è quello per cui il transistore MOS rimane in saturazione, cioè $V_{DS} \geq V_{DS\ Sat} = V_{GS} - V_{TH} = 2.69$ V. Imponendo ($V_S = V_Z$):

$$V_{DS} = V_{CC} - R_D I_{DS} - V_S = V_{DS\ Sat} \tag{16}$$

Otteniamo $R_{D\ Max} = 940\ \Omega$.