

PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 24 Luglio 2019

ESERCIZIO 1

Un transistor *npn* a base corta è caratterizzato da: $N_{Dem} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (emettitore lungo), $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dcoll} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_n = 0.09 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.035 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$. Sono state misurate $I_C = 5 \text{ mA}$ (entrante) e $I_E = 8 \text{ mA}$ (uscite), con $V_{CB} = 5 \text{ V}$.

1) Facendo le approssimazioni opportune, determinare la tensione V_{BE} .
NOTA: l'efficienza di emettitore è molto bassa, gran parte della corrente di base non controlla la corrente di collettore. [4]

2) Determinare la lunghezza effettiva della base, nonché la frazione di corrente di base che controlla la carica in base. [4]

3) Determinare la lunghezza metallurgica della base. [2]

ESERCIZIO 2

Si consideri un transistor *n*-MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W/L = 10$, $L = 5 \mu\text{m}$. Il transistor viene polarizzato con $V_{Sbulk} = 3 \text{ V}$, $V_{Dbulk} = 6 \text{ V}$ e $V_{Gbulk} = 0 \text{ V}$.

1) A $t = 0$ V_{Gbulk} viene portata a 3 V ($V_{Gbulk} = 3 \text{ V}$ per $t \geq 0$). Calcolare la caduta di tensione nel silicio, a metà del canale, nonché la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ e per $t \rightarrow \infty$ (nel caso che le condizioni di polarizzazione vengano mantenute). [3]

2) A $t = t_s = 10 \text{ ms}$ la tensione V_{Sbulk} viene portata a 1 V (V_{Gbulk} viene mantenuta a 3 V e $V_{Dbulk} = 6 \text{ V}$). Calcolare la carica fissa e mobile totale nel canale per $t \rightarrow \infty$. [4]

3) Determinare una stima del tempo di accensione del canale, per $t \geq t_s$. [3]

ESERCIZIO 3

1) Si progetti un raddrizzatore a semplice semionda capace di fornire in uscita una tensione massima pari a 10 V , con una corrente massima di 120 mA e un ripple residuo pari a 0.5 V . [2]

2) Un processo per la fabbricazione di diodi zener consente di avere $V_Z = 10 \text{ V}$, dovuta al break-down a valanga, con un drogaggio pari a $N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Determinare il drogaggio che si deve avere per ottenere un diodo zener con $V_Z = 7 \text{ V}$. Si può trascurare V_0 . [5]

3) Usando questo diodo zener, si disegni lo schema elettrico e si progetti uno stabilizzatore che, utilizzando il raddrizzatore del punto 1, possa fornire in uscita una corrente massima di 100 mA. [3]

ESERCIZIO 1

Un transistor $n-p-n$ a base corta è caratterizzato da: $N_{Dem} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (emettitore lungo), $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dcoll} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_n = 0.09 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.035 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$. Sono state misurate $I_C = 5 \text{ mA}$ (entrante) e $I_E = 8 \text{ mA}$ (uscente), con $V_{CB} = 5 \text{ V}$.

1) Facendo le approssimazioni opportune, determinare la tensione V_{BE} .
NOTA: l'efficienza di emettitore è molto bassa, gran parte della corrente di base non controlla la corrente di collettore. [4]

2) Determinare la lunghezza effettiva della base, nonché la frazione di corrente di base che controlla la carica in base. [4]

3) Determinare la lunghezza metallurgica della base. [2] y

SOLUZIONE 1

1) Il transistor è a base molto corta, quindi la corrente $I_B = I_E - I_C = 2 \text{ mA}$ entrante è in gran parte dovuta all'iniezione di lacune dalla base verso l'emettitore. Possiamo infatti assumere che la frazione di corrente di base che controlla il profilo di portatori minoritari sia molto piccola. Avremo dunque:

$$\begin{aligned} I_{Bp \rightarrow n} &= qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_{Dem}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = I_{Sp \rightarrow n} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \\ D_p &= V_T \mu_p = 9.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs} \\ L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 30.08 \text{ } \mu\text{m} \\ I_{Sp \rightarrow n} &= qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_{Dem}} = 1.08 \times 10^{-12} \text{ A} \\ V_{BE} &= V_T \ln \frac{I_{Bp \rightarrow n}}{I_{Sp \rightarrow n}} = 0.56 \text{ V} \end{aligned}$$

2) Usando il modello a controllo di carica otteniamo:

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{Q_B}{\tau_t} \\ I_C &= \frac{qS\delta n(0) \frac{W}{2}}{\frac{W^2}{2D_n}} \\ I_C &= \frac{qS\delta n(0) 4D_n}{W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W &= \frac{qS\delta n(0)4D_n}{I_C} \\
\delta n(0) &= \frac{n_i^2}{N_{Abase}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = 5.76 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \\
D_n &= V_T \mu_n = 2.33 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{Vs} \\
W &= 4.3 \text{ } \mu\text{m}
\end{aligned}$$

La parte di corrente di base che controlla Q_B è data da:

$$I_B = \frac{Q_B}{\tau_n} = 40 \text{ } \mu\text{A} \quad (1)$$

3) Conoscendo $V_{CB} = 5 \text{ V}$ avremo:

$$\begin{aligned}
V_{0BC} &= V_T \ln \frac{N_{Abase} N_{Dcoll}}{n_i^2} = 0.634 \text{ V} \\
W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_{Abase}} + \frac{1}{N_{Dcoll}} \right) (V_0 + V_{CB})} = 2.85 \text{ } \mu\text{m} \\
x_{pBC} &= W_{BC} \frac{N_{Dcoll}}{N_{Abase} + N_{Dcoll}} = 0.26 \text{ } \mu\text{m} \\
W_{met} &= W + x_{pBC} = 4.56 \text{ } \mu\text{m}
\end{aligned}$$

ESERCIZIO 2

Si consideri un transistor n -MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W/L = 10$, $L = 5 \text{ } \mu\text{m}$. Il transistor viene polarizzato con $V_{Sbulk} = 3 \text{ V}$, $V_{Dbulk} = 6 \text{ V}$ e $V_{Gbulk} = 0 \text{ V}$.

1) A $t = 0$ V_{Gbulk} viene portata a 3 V ($V_{Gbulk} = 3 \text{ V}$ per $t \geq 0$). Calcolare la caduta di tensione nel silicio, a metà del canale, nonché la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ e per $t \rightarrow \infty$ (nel caso che le condizioni di polarizzazione vengano mantenute). [3]

2) A $t = t_s = 10 \text{ ms}$ la tensione V_{Sbulk} viene portata a 1 V (V_{Gbulk} viene mantenuta a 3 V e $V_{Dbulk} = 6 \text{ V}$). Calcolare la carica fissa e mobile totale nel canale per $t \rightarrow \infty$. [4]

3) Determinare una stima del tempo di accensione del canale, per $t \geq t_s$. [3]

SOLUZIONE 2

1) Per avere l'inversione dovremo avere $V_{Si} = 2\psi_B + V_{Sbulk}$, e quindi sicuramente nel caso di $V_{Gbulk} = V_{Sbulk}$ siamo lontani dall'inversione. Il condensatore MOS non ha dunque carica mobile, e tutta la carica sotto il gate è data dalla regione di svuotamento. Lontano dai contatti avremo dunque:

$$V_{GBulk} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_{Si}}}{C_{ox}} + V_{Si} + \Phi_{MS} \quad (2)$$

Da questa equazione possiamo ricavare V_{Si} .

$$\begin{aligned} \psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\ \Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} + \psi_B = -0.91 \text{ V} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \end{aligned}$$

Quindi si ricava $V_{Si} = 2.01 \text{ V}$ come unica soluzione accettabile. Quindi sia a $t = 0^+$ che a $t \rightarrow \infty$ avremo:

$$\begin{aligned} Q_n &= 0 \\ Q_W &= -\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_{Si}} = 8.24 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \end{aligned}$$

2) Possiamo lavorare con la tensione di soglia riferita al Bulk o riferita al Source. Supponendo di lavorare con V_{TH} del transistor MOS (cioè riferita al Source) abbiamo:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{Sbulk})}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.44 \text{ V} \quad (3)$$

Quindi il canale è formato, poiché $V_{GS} = V_{Gbulk} - V_{Sbulk} = 2 > V_{TH}$. La carica mobile totale è dunque data da $Q_{n \text{ tot}} = \frac{2}{3} W L C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 3 \times 10^{-13} \text{ C}$. La carica fissa è quella dovuta alla caduta di tensione nel silicio. Pur non essendo costante con y , l'approssimazione usata per il calcolo delle caratteristiche del MOS la considera costante. Seguendo questa approssimazione

avremo dunque:

$$\begin{aligned}V_{Si} &= V_{Sbulk} + 2\psi_B = 1.694 \text{ V} \\Q_W &= -\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_{Si}} = 7.56 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \\Q_{W tot} &= WLQ_W = 1.89 \times 10^{-13} \text{ C}\end{aligned}$$

3) Una stima del tempo di accensione del canale, a partire da t_s in cui la tensione di Source viene abbassata a 1 V, è data dal tempo di transito nel canale τ_t . Il transistor è in saturazione poiché $V_{DS} = 3 \text{ V} > V_{GS} - V_{TH} = 1.56 \text{ V}$, e Q_n è quella calcolata nel punto precedente:

$$\begin{aligned}I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 1.12 \text{ mA} \\I_{DS} &= \frac{Q_n}{\tau_t} \\ \tau_t &= \frac{Q_n}{I_{DS}} = 0.27 \text{ ns}\end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

1) Si progetti un raddrizzatore a semplice semionda capace di fornire in uscita una tensione massima pari a 10 V, con una corrente massima di 120 mA e un ripple residuo pari a 0.5 V. [2]

2) Un processo per la fabbricazione di diodi zener consente di avere $V_Z = 10 \text{ V}$, dovuta al break-down a valanga, con un drogaggio pari a $N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Determinare il drogaggio che si deve avere per ottenere un diodo zener con $V_Z = 7 \text{ V}$. Si può trascurare V_0 . [5]

3) Usando questo diodo zener, si disegni lo schema elettrico e si progetti uno stabilizzatore che, utilizzando il raddrizzatore del punto 1, possa fornire in uscita una corrente massima di 100 mA. [3]

SOLUZIONE 3

1) Avremo che in uscita dal raddrizzatore si può mettere una resistenza di carico che prelevi al massimo 120 mA, e quindi la resistenza di carico minima

R_L è pari a $10/0.12=83 \Omega$. Il valore del condensatore dipende dalla tensione di ripple $V_r = 0.5 \text{ V}$:

$$V_r = \frac{V_P}{fRC}$$

$$C = \frac{V_P}{fRV_r} = 4.8 \text{ mF}$$

2) Sapendo che il break-down (a valanga) si verifica per $V_Z = V_{BD} = 10 \text{ V}$, possiamo calcolare il campo elettrico di break-down, che è il campo elettrico massimo della giunzione polarizzata in inversa con $V = 10 \text{ V}$.

$$V_0 = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.812 \text{ V}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V_Z)} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{2}{N} (V_0 + V_Z)} = 0.533 \text{ } \mu\text{m}$$

$$x_n = x_p = \frac{W}{2}$$

$$\mathcal{E}_{break\ down} = \mathcal{E}_{max} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n = 40.5 \text{ MV/m}$$

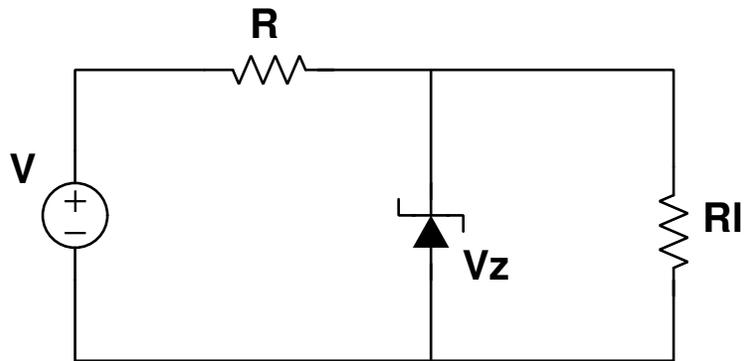
Assumiamo che i drogaggi rimangano uguali numericamente $N = N_A = N_D$. Basta fare il processo inverso per ottenere il drogaggio in maniera tale da ottenere lo stesso campo elettrico massimo per una tensione inversa pari a $V_Z = 7 \text{ V}$. Trascurando la V_0 otteniamo:

$$\mathcal{E}_{max} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n$$

$$\mathcal{E}_{max} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \frac{\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{2}{N} V_Z}}{2} \sqrt{\frac{q}{\epsilon_s} N V_Z}$$

da cui possiamo ricavare $N = N_A = N_D = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

3) Il circuito è quello classico, fatto a lezione. La resistenza di carico R_L è determinata dalla tensione $V_Z = 7 \text{ V}$ e dalla corrente massima $I = 100 \text{ mA}$,



quindi R_L minima è pari a 70Ω . Se R_L è infinito, cioè l'alimentatore zener non è caricato, il diodo zener deve essere polarizzato con tutta la corrente che può essere fornita al carico. Poiché $V = 9.5 \text{ V}$, cioè la tensione minima in uscita dal raddrizzatore, abbiamo che $R = \frac{9.5-7}{0.1} = 25 \Omega$.