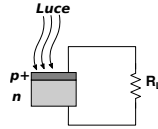


PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 9 Luglio 2018

ESERCIZIO 1

Nel circuito in figura, il diodo p^+n è illuminato alla superficie. La base p^+ è corta, $W_p = 5 \mu\text{m}$, la base n è lunga. Abbiamo: $N_A = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.05 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-5} \text{ s}$, $S = 10 \text{ cm}^2$. L'illuminazione produce alla superficie (in $x = -W_p$) una generazione ottica che impone $\delta_{opt} = \delta n(-W_p) = 10^{19} \text{ m}^{-3}$.



- 1) Determinare il profilo di portatori minoritari nella parte n e nella parte p^+ , in funzione della tensione applicata V . Si trascuri l'iniezione di elettroni dalla parte n alla parte p^+ ($\delta n(0) \approx 0$ per ogni condizione di polarizzazione). [4]
- 2) Determinare l'espressione della corrente I nel diodo, in funzione di V , calcolando i vari termini. [4]
- 3) Determinare la tensione a circuito aperto V_{CA} e la corrente di corto circuito I_{CC} . [2]

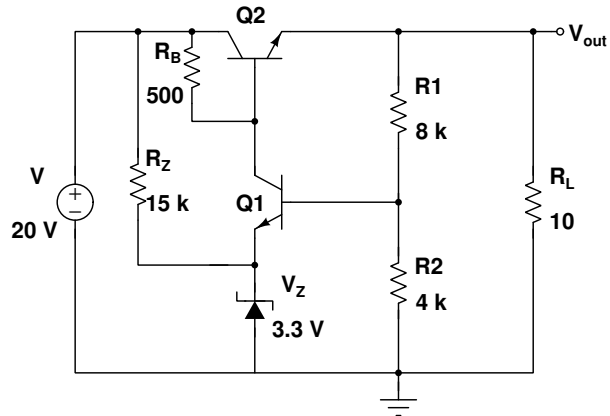
ESERCIZIO 2

Un transistor n -MOS polysilicon gate ha il gate in polisilicio di tipo p^+ , $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.075 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6}$, $L = 3 \mu\text{m}$, $W = 5 \mu\text{m}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$. Il transistor è polarizzato con $V_{GS} = 4 \text{ V}$.

- 1) Per $V_{DS} = 5 \text{ V}$ si consideri la lunghezza effettiva del canale. Si determinino la corrente di polarizzazione ed i parametri per piccolo segnale del transistor: g_m , C_{GS} , la frequenza di taglio f_t , nonché la resistenza differenziale r_d . [4]
- 2) Sapendo che il campo elettrico di break-down del substrato p è pari a 15 MV/m , si determini la V_{DS} massima applicabile al dispositivo, e si disegni qualitativamente la caratteristica (I_{DS}, V_{DS}) per $V_{GS} = 3 \text{ V}$. [3]
- 3) Sapendo che l'area del contatto della giunzione drain-substrato è pari a $16 \mu\text{m}^2$, determinare la corrente per $V_{DS} = -0.65 \text{ V}$ ($V_{GS} = 3 \text{ V}$). [3]

ESERCIZIO 3

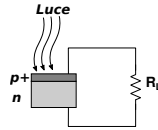
Nel circuito in figura, il transistorore $Q1$ ha un $\beta_{fminimo} = 300$. Il transistorore $Q2$ è un n^+pn con $N_{Abase} = N_{Dcollettore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$. Prima di inserirlo nel circuito, è stato testato polarizzandolo con $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$, $V_{CE} = 5 \text{ V}$. Sono state misurate $I_C = 1 \text{ A}$ e $I_B = 4 \text{ mA}$.



- 1) Facendo riferimento alle condizioni di test, determinare la lunghezza metallurgica della base, nonché il $\beta_{fminimo}$ garantito di Q_2 . [3]
 - 2) Determinare l'area S del transistorore Q_2 . [3]
 - 3) Determinare la tensione V_{out} di uscita, le correnti e le tensioni ed il punto di riposo dei transistori del circuito in figura. [4]
- NOTA: il circuito è uno stabilizzatore di tensione.

ESERCIZIO 1

Nel circuito in figura, il diodo p^+n è illuminato alla superficie. La base p^+ è corta, $W_p = 5 \mu\text{m}$, la base n è lunga. Abbiamo: $N_A = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.05 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-5} \text{ s}$, $S = 10 \text{ cm}^2$. L'illuminazione produce alla superficie (in $x = -W_p$) una generazione ottica che impone $\delta_{opt} = \delta n(-W_p) = 10^{19} \text{ m}^{-3}$.



1) Determinare il profilo di portatori minoritari nella parte n e nella parte p^+ , in funzione della tensione applicata V . Si trascuri l'iniezione di elettroni dalla parte n alla parte p^+ ($\delta n(0) \approx 0$ per ogni condizione di polarizzazione).

[4]

2) Determinare l'espressione della corrente I nel diodo, in funzione di V , calcolando i vari termini. [4]

3) Determinare la tensione a circuito aperto V_{CA} e la corrente di corto circuito I_{CC} . [2]

SOLUZIONE 1

1) Nella parte n il diodo si comporta come una normale giunzione p^+n a base lunga, quindi risolvendo l'equazione di continuità come usuale avremo (vedi dispense):

$$\delta p(x) = \frac{n_i^2}{N_D} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) e^{\frac{-x}{L_p}} \quad (1)$$

Nella parte p^+ corta avremo che l'equazione di continuità per gli elettroni (minoritari) è la stessa che del caso senza illuminazione. Le condizioni a contorno sono però diverse:

$$0 = D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{\delta n}{\tau_n}$$

$$\delta n(x) = C e^{\frac{x}{L_n}} + D e^{\frac{-x}{L_n}} \approx A + B \frac{x}{L_n}$$

Applicando le condizioni a contorno avremo:

$$\delta n(0) \approx 0 \text{ Iniezione trascurabile}$$

$$\begin{aligned}
\delta n(-W_n) &= \delta_{opt} \\
A &= 0 \\
B \frac{-W_n}{L_n} &= G_{opt} \\
B &= -G_{opt} \frac{L_n}{W_n} \\
\delta n(x) &= -\delta_{opt} \frac{x}{W_n}
\end{aligned}$$

2) Il contributo alla corrente dato dalla parte n è quello usuale, dato dall'iniezione di lacune da p^+ a n :

$$\begin{aligned}
I_p &= I_{Sp} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \\
I_{Sp} &= qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \\
D_p &= \frac{kT}{q} \mu_p = 1.03 \times 10^{-3} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 101.68 \text{ } \mu\text{m} \\
I_{Sp} &= 73.02 \text{ pA}
\end{aligned}$$

La parte p^+ non contribuisce con l'iniezione, ma con l'illuminazione. Calcoliamo la corrente dalla derivata del profilo di portatori minoritari $\delta n(x)$ calcolata in $x = 0$:

$$\begin{aligned}
I_n &= qSD_n \frac{d\delta n(x)}{dx} \Big|_{x=0} = -qS \frac{D_n}{W_n} \delta_{opt} \\
D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n = 1.29 \times 10^{-3} \\
I_n &= -413.3 \text{ mA} \\
I_n &= -I_{light}
\end{aligned}$$

Avremo dunque:

$$I = I_{Sp} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) - I_{light} \quad (2)$$

3) In condizioni di circuito aperto avremo $I = 0$:

$$I_{Sp} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) - I_{light} = 0$$

$$V_{CA} = V_T \ln \frac{I_{light} + I_{Sp}}{I_{Sp}} = 0.58 \text{ V}$$

In condizioni di corto circuito avremo che $V = 0$ e quindi:

$$I_{CC} = 0 - I_{light} = -413.3 \text{ mA} \quad (3)$$

ESERCIZIO 2

Un transistor n -MOS polysilicon gate ha il gate in polisilicio di tipo p^+ , $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.075 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6}$, $L = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $W = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$. Il transistor è polarizzato con $V_{GS} = 4 \text{ V}$.

1) Per $V_{DS} = 5 \text{ V}$ si consideri la lunghezza effettiva del canale. Si determinino la corrente di polarizzazione ed i parametri per piccolo segnale del transistor: g_m , C_{GS} , la frequenza di taglio f_t , nonché la resistenza differenziale r_d . [4]

2) Sapendo che il campo elettrico di break-down del substrato p è pari a 15 MV/m , si determini la V_{DS} massima applicabile al dispositivo, e si disegni qualitativamente la caratteristica (I_{DS}, V_{DS}) per $V_{GS} = 3 \text{ V}$. [3]

3) Sapendo che l'area del contatto della giunzione drain-substrato è pari a $16 \text{ }\mu\text{m}^2$, determinare la corrente per $V_{DS} = -0.65 \text{ V}$ ($V_{GS} = 3 \text{ V}$). [3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \\ \psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\ \Phi_{MS} &= \frac{E_G}{2q} - \psi_B = 0.213 \text{ V} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 1.33 \text{ V} \end{aligned}$$

Calcoliamo la lunghezza effettiva di canale, assumendo la regione di svuotamento Drain- punto di strozzamento approssimabile come $W(V_{DS} - V_{DS\ Sat})$:

$$\begin{aligned} V_{DS\ Sat} &= V_{GS} - V_{TH} = 4 - 1.33 = 2.67 \text{ V} \\ V_{0\ D\ Bulk} &= \frac{E_G}{2q} + \psi_B = 0.907 \text{ V} \\ W_{D\ P} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_{0DB} + (V_{DS} - V_{DS\ Sat}))} \\ L_{eff} &= L - W_{D\ P} = 2.348 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

Il transistor è in saturazione, e avremo:

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0.65 \text{ mA}$$

Da cui calcolare:

$$\begin{aligned} g_m &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH}) = 4.9^{-4} \\ C_{GS} &= \frac{2}{3} C_{ox} W L_{eff} = 9 \times 10^{-15} \text{ F} \end{aligned}$$

Il tempo di transito τ_t :

$$\tau_t = \frac{4 L_{eff}^2}{3 \mu_n} \frac{1}{V_{GS} - V_{TH}} = 15.6 \text{ ps} \quad (4)$$

Il parametro più laborioso è r_d , che richiede il calcolo di I_{DS} per un altro valore di V_{DS} , per esempio per $V_{DS} = 7 \text{ V}$:

$$\begin{aligned} r_d &= \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{I_{DS2} - I_{DS1}} \\ V_{DS1} &= 5 \text{ V} \quad I_{DS1} = 0.65 \text{ mA} \\ W_{D\ P}(V_{DS2} = 7) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_{0DB} + (V_{DS2} - V_{DS\ Sat}))} = 0.830 \text{ }\mu\text{m} \\ L_{eff2} &= L - W_{D\ P} = 2.17 \text{ }\mu\text{m} \\ I_{DS2} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0.71 \text{ mA} \\ r_d &= 33.3 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

2) La massima V_{DS} applicabile è quella al di sotto della tensione di break-down della giunzione drain- substrato. Calcoliamo $V_{DS \text{ break-down}}$ ($V_{DBulk} = V_{DS}$):

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_A}{\epsilon_s} W_{DBulk} = \sqrt{2 \frac{qN_A}{\epsilon_s} (V_{0DBulk} + V_{DB})} \\ V_{DB \text{ break-down}} &= \frac{\epsilon_s}{2qN_A} \mathcal{E}_{BD}^2 - V_{0DBulk} = 6.49 \text{ V}\end{aligned}$$

La caratteristica (I_{DS}, V_{DS}) è come usuale, a parte il repentino aumento della corrente per $V_{DB \text{ break-down}}$.

3) Per $V_{DS} = -0.65 \text{ V}$ deve essere considerata la corrente della giunzione drain substrato n^+p , che va in parallelo alla corrente di canale (si sommano):

$$\begin{aligned}D_n &= V_T \mu_n = 1.94 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 44.04 \text{ }\mu\text{m} \\ I_{DS \text{ } p^+n} &= qS \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = 21.14 \text{ nA}\end{aligned}$$

Questa corrente è negativa. A questa corrente si aggiunge quella del canale, che è in parallelo. Possiamo considerare il MOS in zona lineare (o in zona parabolica), con la lunghezza di canale pari a $3 \text{ }\mu\text{m}$:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = -0.27 \text{ mA}$$

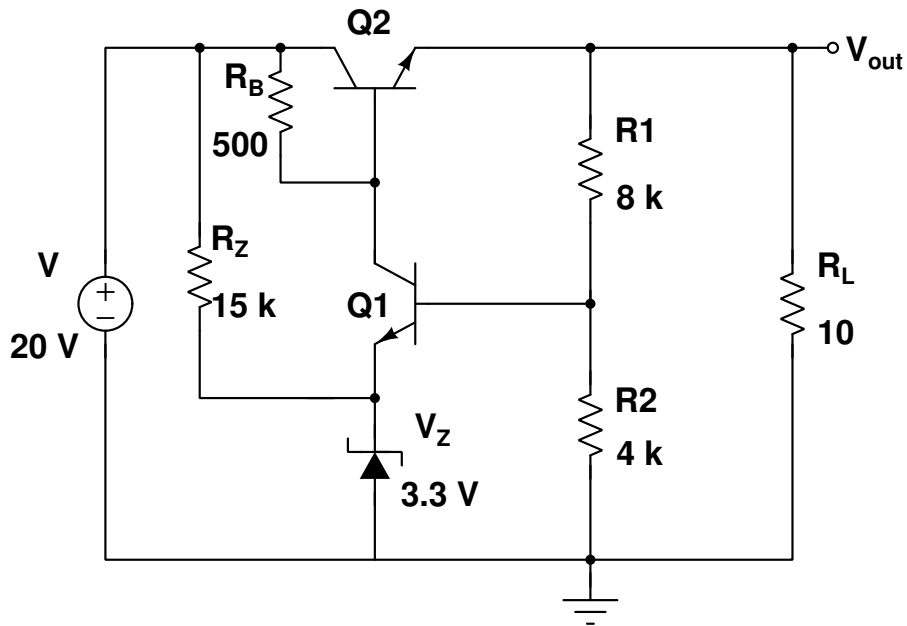
La corrente è la somma delle due.

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, il transistorore $Q1$ ha un $\beta_{fminimo} = 300$. Il transistorore $Q2$ è un n^+pn con $N_{Abase} = N_{Dcollettore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$. Prima di inserirlo nel circuito, è stato testato polarizzandolo con $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$, $V_{CE} = 5 \text{ V}$. Sono state misurate $I_C = 1 \text{ A}$ e $I_B = 4 \text{ mA}$.

1) Facendo riferimento alle condizioni di test, determinare la lunghezza metallurgica della base, nonché il $\beta_{fminimo}$ garantito di Q_2 . [3]

2) Determinare l'area S del transistorore Q_2 . [3]



3) Determinare la tensione V_{out} di uscita, le correnti e le tensioni ed il punto di riposo dei transistori del circuito in figura. [4]

NOTA: il circuito è uno stabilizzatore di tensione.

SOLUZIONE 3

1) Calcoliamo il β_f in condizioni di test, ed da questo ricaviamo W_{eff} :

$$D_n = V_T \mu_n = 2.068 \times 10^{-3}$$

$$\beta_f = \frac{I_C}{I_B} = 250$$

$$\beta_f = \frac{\tau_n}{\tau_t} = \frac{\tau_n}{\frac{W^2}{2D_n}}$$

$$W = \sqrt{\frac{\tau_n 2D_n}{\beta_f}} = 4.1 \mu\text{m}$$

$$V_{CB} = 4.4 \text{ V}$$

$$V_{0CB} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.695 \text{ V}$$

$$\begin{aligned}
X_{CB} &= \frac{W_{CB}}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{0CB} + V_{CB})} = 0.58 \text{ } \mu\text{m} \\
W_{met} &= 4.1 + 0.58 = 4.68 \text{ } \mu\text{m} \\
\beta_{fmin} &= \frac{\tau_n}{\frac{W_{met}^2}{2D_n}} = 189
\end{aligned}$$

2) Avremo:

$$\begin{aligned}
Q &= \tau_n I_B = qS\delta n(0) \frac{W}{2} \\
S &= \frac{\tau_n I_B}{q\delta n(0) \frac{W}{2}} \\
\delta n(0) &= \frac{n_i^2}{N_{Abase}} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) = 2.71 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \\
S &= 45 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

3) La tensione di uscita si può determinare assumendo che Q_1 sia correttamente polarizzato. Avremo allora $V_{B1} = V_Z + V_\gamma = 4 \text{ V}$ e quindi $V_{out} = V_{B1} \frac{R_2 + R_1}{R_2} = 12 \text{ V}$. La corrente sulla resistenza di carico R_L è pari a $12/10 = 1.2 \text{ A}$, sul partitore $R_1 R_2$ $I_{R_1 R_2} = 12/12 = 1 \text{ mA}$. Avremo per Q_1 :

$$\begin{aligned}
I_{C1} &\approx I_{E1} = I_{R_L} + I_{R_1 R_2} = 1.2 \text{ A} \\
I_{B1max} &= \frac{I_{C1}}{\beta_{fmin}} = 6.35 \text{ mA} \\
V_{CE1} &= V - V_{out} = 8 \text{ V} \\
V_{B1} &= V_{out} + V_\gamma = 12.7 \text{ V}
\end{aligned}$$

Quindi Q_1 è correttamente polarizzato in zona attiva diretta. Calcoliamo la corrente che scorre in R_B : $I_{R_B} = \frac{V - V_{B1}}{R_B} = 14.6 \text{ mA}$. Parte di questa corrente va nella base di Q_1 , parte costituisce la corrente di collettore di Q_2 . Quindi avremo:

$$\begin{aligned}
I_{E2} &\approx I_{C2} = I_{R_B} - I_{B1} = 8.25 \text{ A} \\
I_{B2max} &= \frac{I_{C2}}{\beta_{fmin}} = 27.5 \text{ } \mu\text{A} \ll I_{R_1 R_2} \text{ OK pp} \\
V_{CE2} &= V_{B1} - V_Z = 8.7 \text{ V}
\end{aligned}$$

La corrente nello zener è pari ad almeno I_{E2} , e quindi è correttamente polarizzato. La resistenza R_Z garantisce che nello zener passano almeno $\frac{V-V_Z}{R_Z} = 1.1$ mA, che si sommano a I_{E2} .