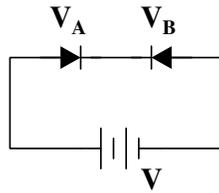


DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 14 Febbraio 2015

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) I due diodi in figura sono uno a base lunga (diodo A : p^+n , $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$) e uno a base corta e con superficie molto piú grande (diodo B : p^+n , $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 10^4 \text{ mm}^2$, $W = 3 \text{ }\mu\text{m}$).



- 1) Per $V = 5 \text{ V}$ determinare la corrente e le cadute di tensione sui diodi (nel calcolo delle regioni di svuotamento si trascuri V_A dove necessario).[5]
- 2) Per $V = -5 \text{ V}$ determinare la corrente e le cadute di tensione sui diodi (fare le approssimazioni opportune).[5]

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor n -MOS con gate in polisilicio ($t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W = L = 2 \text{ }\mu\text{m}$, $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$) è polarizzato con $V_{GS} = 4 \text{ V}$. Il Source non è cortocircuitato con il substrato: $V_{SBulk} = 1 \text{ V}$.

- 1) Determinare la tensione di soglia V_{TH} . [2]
- 2) Per $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ (regime lineare) determinare la carica fissa totale e la carica mobile totale nel canale. [4]
- 3) Considerando le stesse condizioni di polarizzazione, determinare il tempo di transito nel canale (SUGGERIMENTO: calcolare I_{DS} e usare la carica mobile nel canale). [4]

ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere il funzionamento di un CCD. [5]

2) Si consideri una giunzione p^+n illuminata uniformemente. Si ricavi l'espressione della corrente in presenza di una generazione ottica G_{opt} uniforme. [5]

ESERCIZIO 4 (DE) M_1 e M_2 del circuito in figura sono transistori con caratteristiche simili (uno a canale n e l'altro a canale p): stessa $V_{TH} = 1 \text{ V}$ in valore assoluto ($V_{THp} < 0$), $t_{ox} = 20 \text{ nm}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Il transistorore a canale p ha $W_p/L_p = 5$, mentre il canale n ha $W_n/L_n = 1$.

1) Determinare il punto di riposo dei transistori e la tensione di uscita V_u ($V_s = 0$).[6]

2) I generatori di corrente del circuito proposto nel punto 1, sono realizzati secondo lo schema riportato nella figura. Si progetti il circuito, facendo attenzione che i transistori bipolari lavorino in ZAD. (SUGGERIMENTO: scegliere un valore per R_E , determinare V_Z e scegliere un valore sensato per R_B).[4]

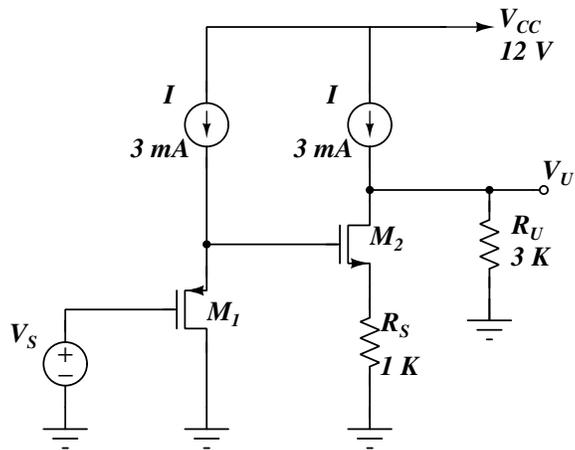


Figura 1: circuito

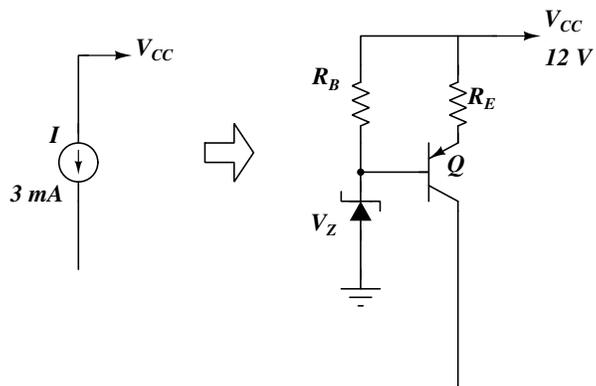
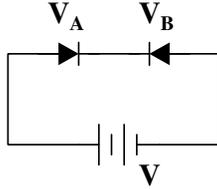


Figura 2: generatori di corrente



ESERCIZIO 1 (DE,DTE) I due diodi in figura sono uno a base lunga (diodo A : p^+n , $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$) e uno a base corta e con superficie molto piú grande (diodo B : p^+n , $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 10^4 \text{ mm}^2$, $W = 3 \text{ }\mu\text{m}$).

1) Per $V = 5 \text{ V}$ determinare la corrente e le cadute di tensione sui diodi (nel calcolo delle regioni di svuotamento si trascuri V_A dove necessario).[5]

2) Per $V = -5 \text{ V}$ determinare la corrente e le cadute di tensione sui diodi (fare le approssimazioni opportune).[5]

SOLUZIONE 1

1) Il diodo a base lunga è polarizzato in diretta, mentre il diodo a base corta è polarizzato in inversa. Avremo dunque:

$$I = I_{0A} \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) = I_{0B}$$

$$e^{\frac{V_A}{V_T}} = \frac{I_{0A} + I_{0B}}{I_{0A}}$$

$$V_A = V_T \ln \left(\frac{I_{0A} + I_{0B}}{I_{0A}} \right)$$

Questa ultima relazione diventa $V_B = V_T \ln 2 = 0.018 \text{ mV}$ se le due correnti di saturazione inversa fossero uguali. Nel caso presente, le due correnti sono diverse sia perchè i due diodi sono diversi fisicamente (uno a base lunga, l'altro a base corta), sia perchè le aree dei due diodi sono molto diverse). Per entrambi i diodi avremo $N_A = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$:

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = 1.036 \times 10^{-3}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 32.19 \text{ }\mu\text{m}$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = 0.855$$

Per il diodo a base lunga avremo:

$$I_{0A} = qS_A \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} = 2.32 \times 10^{-13} \quad \text{A} \quad (1)$$

Per il diodo a base corda bisogna calcolare la lunghezza effettiva W_{eff} della parte n . Per il calcolo della regione di svuotamento X_n possiamo considerare $V_B = V - V_A \simeq V$, come suggerito dal testo:

$$\begin{aligned} X_n &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_0 + V)} = 1.24 \quad \mu\text{m} \\ W_{eff} &= 3 - 1.24 = 1.76 \quad \mu\text{m} \\ I_{0B} &= qS_B \frac{D_p}{W_{eff}} \frac{n_i^2}{N_D} = 4.24 \times 10^{-8} \quad \text{A} \end{aligned}$$

La corrente risulta molto più grande sia perchè la base è corta, sia perchè l'area è molto più grande. Avremo dunque:

$$\begin{aligned} V_A &= V_T \ln \left(\frac{I_{0A} + I_{0B}}{I_{0A}} \right) = 0.313 \quad \text{V} \\ V_B &= V - V_A = 4.686 \quad \text{V} \end{aligned}$$

2) In questo caso, la situazione si inverte e avremo:

$$\begin{aligned} -I &= I_{0B} \left(e^{\frac{V_B}{V_T}} - 1 \right) = I_{0A} \\ e^{\frac{V_B}{V_T}} &= \frac{I_{0A} + I_{0B}}{I_{0B}} \\ V_B &= V_T \ln \left(\frac{I_{0A} + I_{0B}}{I_{0B}} \right) \end{aligned}$$

La tensione ha segno opposto rispetto al caso precedente. La corrente di saturazione inversa del diodo a base lunga non cambia, mentre quella del diodo a base corta cambia perchè adesso la regione di svuotamento è molto più piccola (è polarizzato in diretta). Per calcolare la regione di svuotamento bisogna fare una approssimazione, poichè essa dipende dalla caduta di tensione V_B che sarà piccola (il diodo ha un' area molto grande). Quindi possiamo

assumere $X_n(V_0 + V_B) \simeq X_n(V_0)$. Una approssimazione un po' più brutale può essere quella di trascurare la regione di svuotamento in diretta.

$$\begin{aligned} X_n &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} V_0} = 0.47 \quad \mu\text{m} \\ W_{eff} &= 3 - 0.47 = 2.53 \quad \mu\text{m} \\ I_{0B} &= qS_B \frac{D_p}{W_{eff}} \frac{n_i^2}{N_D} = 2.95 \times 10^{-8} \quad \text{A} \end{aligned}$$

Quindi avremo (in valore assoluto):

$$\begin{aligned} -V_B &= V_T \ln \left(\frac{I_{0A} + I_{0B}}{I_{0B}} \right) = 0.2 \quad \mu\text{V} \\ -V_A &= V - V_B = 5 \quad \text{V} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistoro n -MOS con gate in polisilicio ($t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W = L = 2 \text{ }\mu\text{m}$, $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$) è polarizzato con $V_{GS} = 4 \text{ V}$. Il source non è cortocircuitato con il substrato: $V_{SBulk} = 1 \text{ V}$.

- 1) Determinare la tensione di soglia V_{TH} . [2]
- 2) Per $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ (regime lineare) determinare la carica fissa totale e la carica mobile totale nel canale. [4]
- 3) Considerando le stesse condizioni di polarizzazione, determinare il tempo di transito nel canale (SUGGERIMENTO: calcolare I_{DS} e usare la carica mobile nel canale). [4]

SOLUZIONE 2

1) La tensione di soglia deve tener conto che il source non è a massa, quindi all'inversione $\psi_s = 2\psi_B + V_{SBulk}$. La tensione V_{GBulk} che porta all'inversione è:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\ \psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.329 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\phi_{MS} &= \frac{E_g}{q} - \frac{E_F - E_V}{q} = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) = 0.883 \quad \text{V} \\
\psi_{S \text{ inv}} &= 2\psi_B + V_{SBulk} = 1.658 \\
V_{GBulk \text{ inv}} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a \psi_{S \text{ inv}}}}{C_{ox}} + \psi_{S \text{ inv}} - \phi_{MS} = 1.235 \quad \text{V}
\end{aligned}$$

Poichè la tensione di soglia è la tensione di inversione riferita al Source, avremo:

$$V_{TH} = V_{G \text{ inv}} - V_{SBulk} = 0.235 \quad \text{V} \quad (2)$$

Si poteva raggiungere lo stesso risultato applicando direttamente la formula della tensione di soglia in presenza di effetto body (vedi dispensa).

2) A questo punto la carica mobile (costante nel canale, poichè siamo in regime lineare) si può calcolare con la formula solita (basta fare due passaggi per dimostrare che la formula è la stessa, con V_{TH} riferita al Source):

$$Q_n = W L C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 1.73 \times 10^{-14} \quad \text{C} \quad (3)$$

La carica fissa, invece, risente della polarizzazione del Source rispetto al substrato. La caduta di tensione nel silicio si può approssimare non con $2\psi_B$ ma con $\psi_{S \text{ inv}} = 2\psi_B + V_{SBulk} = 1.658 \text{ V}$. Avremo semplicemente:

$$Q_W = W L q N_A W (2\psi_B + V_{SBulk}) = \sqrt{2\epsilon_s q N_a \psi_{S \text{ inv}}} = 2.11 \times 10^{-15} \quad \text{C} \quad (4)$$

3) Avremo semplicemente:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = 43.29 \quad \mu\text{A} \quad (5)$$

E quindi:

$$\begin{aligned}
I_{DS} &= \frac{Q_n}{\tau_t} \\
\tau_t &= \frac{Q_n}{I_{DS}} = 0.40 \quad \text{ns}
\end{aligned}$$

ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere il funzionamento di un CCD. [5]

2) Si consideri una giunzione p^+n illuminata uniformemente. Si ricavi l'espressione della corrente in presenza di una generazione ottica G_{opt} uniforme.[5]

SOLUZIONE 3

- 1) Si rimanda alla dispensa per la trattazione dettagliata del CCD.
- 2) Si rimanda alla dispensa per la trattazione della cella solare, in cui viene riportato il calcolo in oggetto.

ESERCIZIO 4 (DE) M_1 e M_2 del circuito in figura sono transistori con caratteristiche simili (uno a canale n e l'altro a canale p): stessa $V_{TH} = 1$ V in valore assoluto ($V_{THp} < 0$), $t_{ox} = 20$ nm, $\mu_n = 800$ cm²/Vs, $\mu_p = 300$ cm²/Vs. Il transistor a canale p ha $W_p/L_p = 5$, mentre il canale n ha $W_n/L_n = 1$.

1) Determinare il punto di riposo dei transistori e la tensione di uscita V_u ($V_s = 0$).[6]

2) I generatori di corrente del circuito proposto nel punto 1, sono realizzati secondo lo schema riportato nella figura. Si progetti il circuito, facendo attenzione che i transistori bipolari lavorino in ZAD. (SUGGERIMENTO: scegliere un valore per R_E , determinare V_Z e scegliere un valore sensato per R_B).[4]

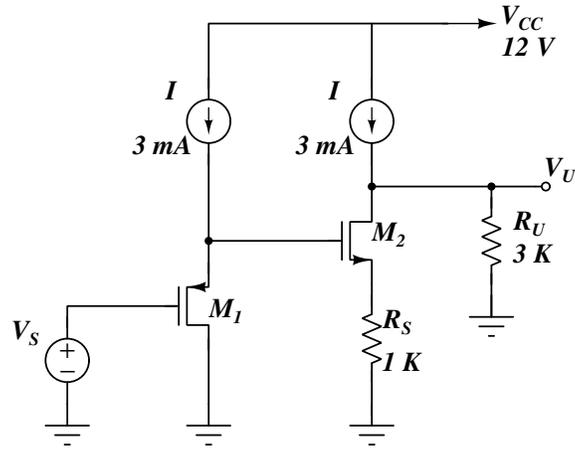


Figura 3: circuito

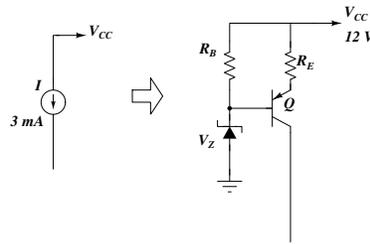


Figura 4: generatori di corrente

SOLUZIONE 4

1) Sapendo la corrente $I_{SD1} = 3 \text{ mA}$, possiamo calcolare $V_{S1} = V_{G2}$ ($C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox} = 1.73 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$):

$$I_{SD1} = \frac{\mu_p C_{ox} W_p}{2 L_p} (V_{SG1} + (-V_{TH}))^2$$

$$(V_{SG1} + (-V_{TH}))^2 = \frac{2I_{SD1}}{\mu_p C_{ox} \frac{W_p}{L_p}} = 23.12$$

$$V_{SG1} = 5.8 \text{ V}$$

Quindi $V_{S1} = V_{G2} = 5.8$ V. A questo punto è semplice calcolare I_{DS2} , o V_{S2} :

$$\frac{V_{S2}}{R_S} = \frac{\mu_n C_{ox} W_n}{2 L_n} (V_{G2} - V_{S2} - V_{TH})^2 \quad (6)$$

Risolvendo l'equazione abbiamo come soluzione utile $V_{S2} = 0.98$ V, e quindi $I_{DS2} = 0.98$ mA. Avremo dunque $V_{D2} = V_U = R_U (I - I_{DS2}) = 6.06$ V.

2) Possiamo scegliere, in maniera sensata, $R_E = 1$ k Ω (o $R_E = 0.5$ k Ω), cosicchè la tensione sull'emettitore risulta $V_E = 12 - R_E I = 9$ V ($V_E = 12 - R_E I = 10.5$ V). In entrambi i casi avremo $V_E - V_C > V_\gamma$, poichè entrambi i collettori sono ad una tensione di circa 6 V: infatti $V_C \equiv V_{G2}$ per il primo generatore e $V_C \equiv V_U$ per il secondo. Quindi i transistori bipolari sono entrambi polarizzati in ZAD ($V_{EC} > V_{EC sat}$). A questo punto, $V_Z = 8.3$ V per $R_E = 1$ k Ω . R_B deve essere scelta in maniera tale da polarizzare lo zener con almeno 1 mA, quindi un valore sensato può essere $R_B = 3$ k Ω cosicchè $I_Z = (12 - 8.3)/R_B = 1.2$ mA (trascurando la corrente di base).