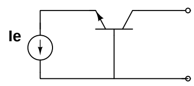
DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 22 Luglio 2014

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistore n^+pn^+ (simmetrico, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $W = 3$ μm, S=10 mm^2), è polarizzato come in figura: $I_E = 1$ mA, uscente. Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni con $V > 0$.

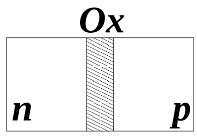


1) Determinare α_f, α_r, I_{ES}, I_{CS} (per queste ultime si può usare l'espressione valida per un diodo a base corta. NOTA: $V_{BC} > 0$, da verificare nel punto 2).[3]

2) Determinare V_{BC}.[4]

3) Determinare V_{BE} e V_{CE}.[3]

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Per il condensatore MOS in figura, la parte n è drogata con $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, la parte p è drogata con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm.



1) Calcolare la differenza di potenziale di contatto tra parte n e p e disegnare un diagramma di massima delle bande e del campo elettrico all'equilibrio ($V_{np} = 0$ V). [4]

2) Per $V_{np} = 0$ V determinare le cadute nel silicio ψ_{sn}, ψ_{sp} e la caduta di potenziale nell'ossido (SUGGERIMENTO: carica totale nulla). [3]

3) Per $V_{np} = 5$ V (ben oltre la tensione di soglia) determinare ψ_{sn}, ψ_{sp} e la caduta di potenziale nell'ossido. [3]

ESERCIZIO 3 (DTE)

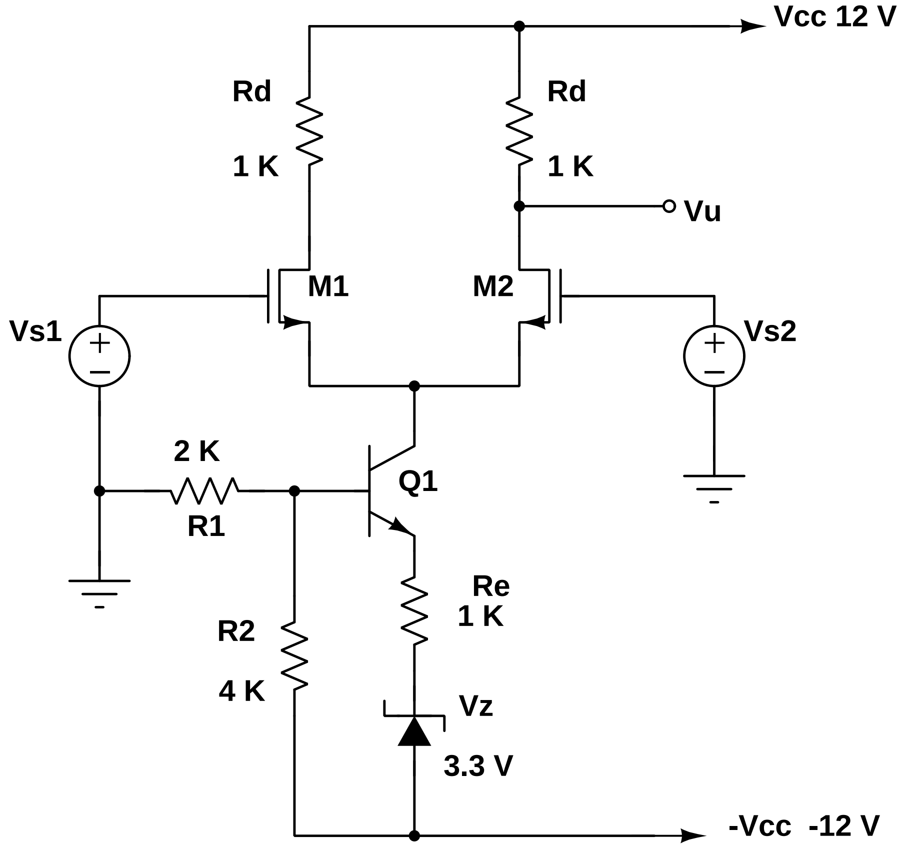
1) Descrivere i passi di processo necessari per la fabbricazione di una cella solare. [3]

2) Derivare una espressione per la corrente nella cella solare, in presenza di una G_{op} nota. [4]

3) Disegnare il circuito equivalente e la caratteristica $I - V$ di una cella solare, determinando graficamente la condizione di carico per la massima potenza in uscita.[3]

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, il transistore bipolare ha $\beta_{f\ minimo} = 300$, mentre M_1 e M_2 sono transistori n-MOS identici con gate in metallo ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $t_{ox} = 30$ nm, $W/L = 20$). Per misurare la tensione di soglia, i transistori MOS sono stati caratterizzati con $V_{GS} = 5$ V, ottenendo per basse V_{DS} una resistenza di quadro pari a $R_{quadro} = 2600\ \Omega$.

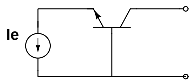
1) Determinare la funzione di lavoro del metallo.[4]



2) Calcolare il punto di riposo dei transistori e le correnti nel circuito.[4]

3) Determinare V_u per $V_{S1} = -12$ V in continua, verificando la polarizzazione dei transistori.[2]

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistore n^+pn^+ (simmetrico, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $W = 3$ μm, S=10 mm^2), è polarizzato come in figura: $I_E = 1$ mA, uscente. Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni con $V > 0$.



1) Determinare α_f, α_r, I_{ES}, I_{CS} (per queste ultime si può usare l'espressione valida per un diodo a base corta. NOTA: $V_{BC} > 0$, da verificare nel punto 2).[3]

2) Determinare V_{BC}.[4]

3) Determinare V_{BE} e V_{CE}.[3]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo i parametri:

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.82 \qquad \mu\text{m} \end{aligned}$$

La giunzione base-emettitore è in diretta, poichè la corrente di emettitore è uscente, e $V_{BC} > 0$, quindi $W_{eff} = W$. Il transistore è a base corta e, visto che è simmetrico, avremo:

$$\begin{aligned} \alpha_f &= \alpha_r = \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n}} = 0.998265 \\ I_{ES} &= I_{CS} = qS\frac{D_n}{W}\frac{n_i^2}{N_A} = 31.1 \qquad \text{pA} \end{aligned}$$

2) Si può fare riferimento alle equazioni di Ebers-Moll:

$$\begin{aligned} I_E &= -I_{ES}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) + \alpha_r I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right) \\ I_C &= \alpha_f I_{ES}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) - I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right) \end{aligned}$$

Svolgendo alcuni semplici passaggi, simili a quelli necessari per ricavare la caratteristica di uscita a base comune, e imponendo $I_C = 0$, otteniamo (NOTA: I_E uscente, quindi negativa secondo le convenzioni dei segni usate nelle equazioni di EB):

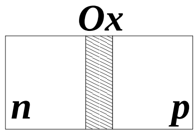
$$
\begin{aligned}
I_C &= -\alpha_f I_E - (1-\alpha_f\alpha_r)\, I_{CS} \left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right) \\
V_{BC} &= V_T \, ln \left(\frac{\alpha_f \mid I_E \mid}{(1-\alpha_f\alpha_r)\, I_{CS}} + 1 \right) = 0.594 \qquad \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

3) Dalla prima equazioen di Ebers-Moll otteniamo:

$$
\begin{aligned}
I_E &= -I_{ES}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) + \alpha_r I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right) \\
I_{ES}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) &= I_E + \alpha_r I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right) \\
V_{BE} &= V_T \, ln \left(\frac{I_E + \alpha_r I_{CS}\left(e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1\right)}{I_{ES}} + 1 \right) = 0.594
\end{aligned}
$$

Quindi la caduta di tensione $V_{CE} \simeq 0$.

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Per il condensatore MOS in figura, la parte n è drogata con $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, la parte p è drogata con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm.



1) Calcolare la differenza di potenziale di contatto tra parte n e p e disegnare un diagramma di massima delle bande e del campo elettrico all'equilibrio ($V_{np} = 0$ V). [4]

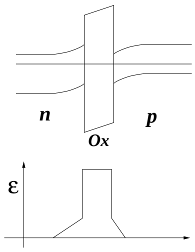
2) Per $V_{np} = 0$ V determinare le cadute nel silicio ψ_{sn}, ψ_{sp} e la caduta di potenziale nell'ossido (SUGGERIMENTO: carica totale nulla). [3]

3) Per $V_{np} = 5$ V (ben oltre la tensione di soglia) determinare ψ_{sn}, ψ_{sp} e la caduta di potenziale nell'ossido. [3]

SOLUZIONE 2

1) Qualitativamente, l'andamendo delle bande all'equilibrio è come in figura, a causa della V_0 (o impropriamente ϕ_{MS}) dovuta alla differenza tra i livelli di Fermi del silicio n e p. Il campo elettrico è lineare (pendenza proporzionale al drogaggio, maggiore nella parte p) nel silicio, e costante nell'ossido. La discontinuità è pari al rapporto tra le costanti dielettriche. Avremo semplicemente:

$$V_0 = V_T \; ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) = 0.677 \qquad \text{V} \tag{1}$$



Il campo elettrico ha una pendenza maggiore nella parte più drogata, è discontinuo all'interfaccia ossido-silicio, poichè il campo elettrico nell'ossido è circa 3 volte quello nel silicio, ed è costante nell'ossido.

2) Come in una struttura MOS, possiamo scrivere:

$$V_{np} = \psi_{sn} + \frac{|\,Q\,|}{C_{ox}} + \psi_{sp} - V_0 \tag{2}$$

Quindi all'equilibrio ($V_{np} = 0$) avemo:

$$V_0 = \psi_{sn} + \frac{|\,Q\,|}{C_{ox}} + \psi_{sp} \tag{3}$$

Questa equazione ha come incognite ψ_{sn} e ψ_{sp}. Una seconda equazione si può ottenere ricordando che la carica positiva nel silicio n deve essere uguale alla carica negativa nel silicio p:

$$|\,Q_n\,| \;\; = \;\; |\,Q_p\,|$$

$$\begin{aligned}\sqrt{2\epsilon_s q N_D \psi_{sn}} &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_{sp}}\\ \psi_{sn} &= \frac{N_A}{N_D}\psi_{sp}\end{aligned}$$

Quindi l'equazione sopra si può riscrivere come:

$$V_0 = \frac{N_A}{N_D}\psi_{sp} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_{sp}}}{C_{ox}} + \psi_{sp} \tag{4}$$

Risolvendo questa equazione è possibile ottentere $\psi_{sp} = 0.159$ V. Quindi $\psi_{sn} = 0.318$ V e $V_{ox} = V_0 - \psi_{sn} - \psi_{sp} = 0.201$ V. In alternativa, possiamo calcolare $V_{ox} = \sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_{sp}}/C_{ox} = 0.201$ V.

3) Per $V_{np} > 0$ alla parte n vengono richieste cariche positive, e alla parte p cariche negative. Dato che siamo ben oltre la tensione di soglia (non è richiesta la verifica) sia la parte n che la parte p sono oltre l'inversione, per cui avremo:

$$\begin{aligned}\psi_{sn} &= 2\psi_{Bn} = 2V_T\ ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 0.658\\ \psi_{sp} &= 2\psi_{Bp} = 2V_T\ ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.694\end{aligned}$$

La caduta nell'ossido risulta dunque $V_{ox} = V_{np} - \psi_{sn} - \psi_{sp} + V_0 = 4.32$ V.

ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere i passi di processo necessari per la fabbricazione di una cella solare. [3]

2) Derivare una espressione per la corrente nella cella solare, in presenza di una G_{op} nota. [4]

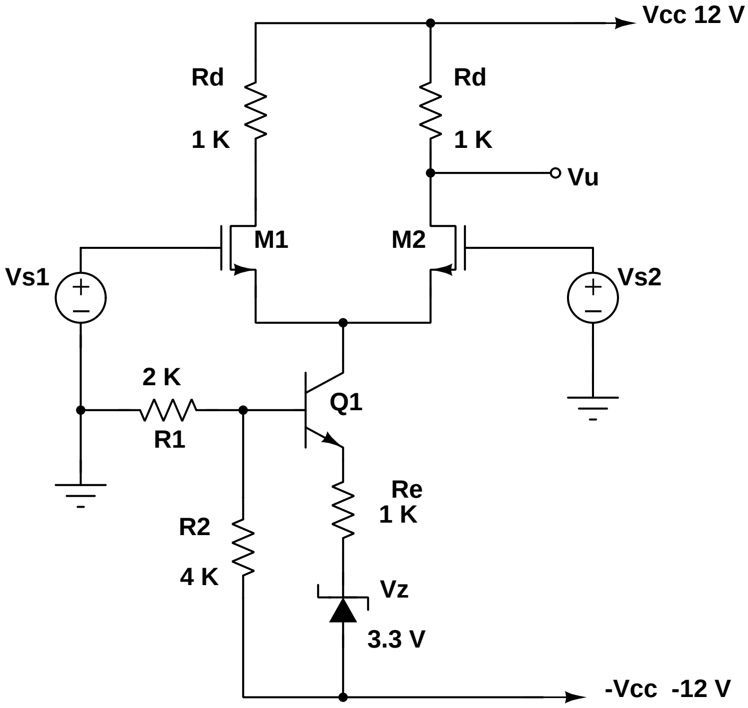
3) Disegnare il circuito equivalente e la caratteristica $I - V$ di una cella solare, determinando graficamente la condizione di carico per la massima potenza in uscita.[3]

SOLUZIONE 3

Si rimanda alla dispensa per la trattazione completa della cella solare, compresa una sezione del dispositivo, da cui è immediato ricavare i passi di processo.

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, il transistore bipolare ha $\beta_{f\ minimo} = 300$, mentre M_1 e M_2 sono transistori n-MOS con gate in metallo ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $t_{ox} = 30$ nm, $W/L = 20$). Per misurare la tensione di soglia, sono stati caratterizzati con $V_{GS} = 5$ V, ottenendo per basse V_{DS} una resistenza di quadro pari a $R_{quadro} = 2600\ \Omega$.

1) Determinare la funzione di lavoro del metallo.[4]



2) Calcolare il punto di riposo dei transistori e le correnti nel circuito.[4]

3) Determinare V_u per $V_{S1} = -12$ V, verificando la polarizzazione dei transistori.[2]

SOLUZIONE 4

1) Ricordiamo che per piccole V_{DS} e per $W = L$ ($C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox} = 1.15 \times 10^{-3}$ F/m^2):

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}$$

$$
\begin{aligned}
R_{quadro} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox}\left(V_{GS}-V_{TH}\right)} \\
V_{TH} &= V_{GS}-\frac{1}{\mu_n C_{ox} R_{quadro}} = 0.82 \qquad \text{V}
\end{aligned}
$$

Quindi avremo:

$$
\begin{aligned}
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} \\
\psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \qquad \text{V} \\
\Phi_{MS} &= V_{TH} - \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B = -0.29 \quad \text{v} \\
\Phi_M &= \Phi_S - 0.29 = 4.1 + 0.54 + 0.347 - 0.29 = 4.70 \qquad \text{V}
\end{aligned}
$$

2) Iniziamo dalla base di Q_1, $V_B = -4$ V con l'approssimazione di partitore pesante, conseguentemente $V_E = -4.7$ V. L'anodo dello zener si trova ad una tensione pari a $-12+3.3=-8.7$ V, e quindi $I_E = (-4.7-(-8.7))/1$ k=4 mA. Poichè lo stadio è simmetrico, avremo $I_E \simeq I_C$ $I_{S1} = I_{S2} = I_C/2$. Quindi $V_{GS1} = V_{GS2}$:

$$
\begin{aligned}
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_{GS}-V_{TH}\right)^2 \\
V_{GS} &= \sqrt{\frac{2I_{DS}}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}} + V_{TH} = 2.3 \quad \text{V}
\end{aligned}
$$

Quindi $V_{G1} = V_{G2} = 0$ V, $V_{S1} = V_{S2} = V_C = -2.3$ V, $V_{CE} = 2.40$ V. $V_{D1} = V_{D2} = V_{CC} - R_D I_{DS} = 10$ V, $V_{DS1} = V_{DS2} = 10-(-2.3) = 12.3$ V $> V_{GS} - V_{TH}$. Avremo inoltre $I_{R1\ R2} = 12/6 = 2$ mA e $I_{B\ max} = I_C/\beta_{f\ minimo} =$ 13 μA, quindi il partitore pesante è verificato. Avremo per i due MOS:

$$
\begin{aligned}
I_{DS} &= 2 \qquad \text{mA} \\
V_{GS} &= 2.3 \qquad \text{V} \\
V_{DS} &= 12.3 \qquad \text{V}
\end{aligned}
$$

E per il bipolare:

$$
I_C \simeq I_E = 4 \qquad \text{mA}
$$

$$
\begin{aligned}
I_{B\ max} &= \frac{I_C}{\beta_{fmin}} = 13 \qquad \mu\text{A} \\
V_{BE} &\simeq V_\gamma = 0.7 \qquad \text{V} \\
V_{CE} &= 2.4 \qquad \text{V}
\end{aligned}
$$

3) Per $V_G = -12$ V il transistore M_1 è sicuramente interdetto. Se M_1 è interdetto, tutta la corrente I_C scorre in M_2, e quindi avremo $I_{DS2} = 4$ mA e quindi:

$$
V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_{DS}}{\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}}} + V_{TH} = 2.9 \qquad \text{V} \tag{5}
$$

Avremo dunque che $V_{S2} = V_C = -2.9$ V, $V_{CE} = 1.8$ V, $V_u = V_{D1} = 8$ V, $V_{DS1} = 10.9$ V, $> V_{GS1} - V_{TH}$. Quindi i transistori M_2 e Q rimangono polarizzati correttamente (in saturazione il MOS e in zona attiva diretta il bipolare).