Prova scritta del 15/06/09

ESERCIZIO 1

Per un BJT npn integrato la corrente di collettore in funzione di V_{CE} è data in *zona attiva*, quando $I_B = 20\ \mu$A, dalla relazione

$$I_C = I_{C1} + k_1 V_{CE}$$

con $I_{C1} = 3$ mA e $k = 1.25 \times 10^{-4}$ A/V.

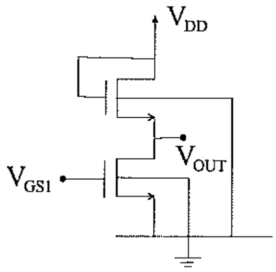
1) Determinare la tensione di Early.

2) Calcolare β_F a $V_{CE} = 20$ V.

3) Determinare I_{C2} e k_2 quando $I_B = 30\ \mu$A.

ESERCIZIO 2

Il circuito della figura è realizzato con due NMOS uguali per i quali $W/L = 1$. La tensione di soglia vale 0.35 V e $V_{DD} = 2.5$ V. $\mu_n C_{ox} = 1.2 \times 10^{-4}$ A/V^2, $V_{GS1} = 1$ V.



1) Determinare graficamente V_{OUT}.

2) Verificare analiticamente il risultato ottenuto.

3) Se si considera l'effetto body il valore di V_{OUT} è maggiore, minore oppure uguale a quello calcolato nel punto due? Spiegare.

ESERCIZIO 3

Considerare una giunzione p^+n: $\mu_p(300\text{ K}) = 400$ cm^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s, $\mu_n(300\text{ K}) = 1200$ cm^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $N_D = 10^{15}$ cm^{-3}, $S = 0.1$ mm^2, W_n (distanza fra giunzione metallurgica e contatto ohmico) = 5 mm.

1) Considerando la resistenza serie R, determinare l'espressione della corrente, a temperatura ambiente, e disegnarne la caratteristica (procedere graficamente per punti).

2) Determinare l'espressione del campo elettrico, funzione di V, nella regione n a corrente costante (fare le approssimazioni opportune).

3) Determinare l'espressione della corrente a $T = 400$ K (supporre che i tempi di vita media non dipendano dalla temperatura).

N.B. La mobilità diminuisce con la temperatura come $T^{\frac{3}{2}}$.

SOLUZIONE 1

1) Quando $I_C = 0$ si ottiene immediatamente

$$V_{EA} = -\frac{I_{C1}}{k_1} = -\frac{3 \times 10^{-3}}{1.25 \times 10^{-4}} = -24 \text{ V.}$$

2) In zona attiva

$$I_C = I_{C1} + k_1 V_{CE} = \beta_F I_B$$

da cui

$$\beta_F = \frac{I_{C1} + kV_{CE}}{I_B} = \frac{3 \times 10^{-3} + 1.25 \times 10^{-4} \times 20}{2 \times 10^{-5}} = 275.$$

3) Si avrà, per $V_{CE} = 0$,

$$I_C = I_{C1} = \beta_F I_B$$

e quindi

$$\beta_F = \frac{I_{C1}}{I_B} = \frac{3 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-5}} = 150$$

da cui $I_{C2} = 150 \times 3 \times 10^{-5} = 4.5$ mA. Per $V_{CE} = 20$ V segue $I_C = 275 \times 3 \times 10^{-5} = 8.25 \times 10^{-3}$ Si ha infine

$$k_2 = \frac{I_{C2} - I_{C1}}{20} = \frac{8.25 \times 10^{-3} - 4.5 \times 10^{-3}}{20} = 1.875 \times 10^{-4} \text{ A/V.}$$

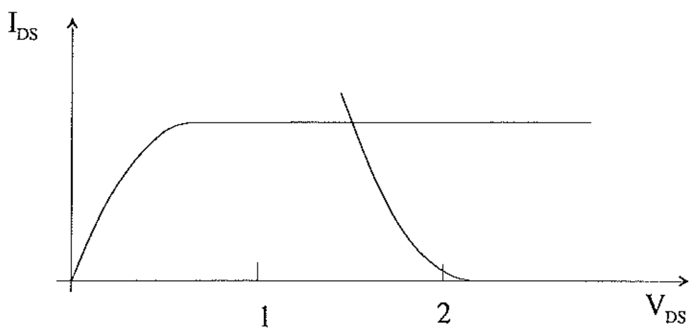
SOLUZIONE 2

1) Si tracciano per punti le due caratteristiche in funzione di $V_{DS1} = V_{OUT}$:

$$I_{DS1} = 1.2 \times 10^{-4} \times \left((V_{GS1} - V_{TH}) V_{DS1} - \frac{V_{DS1}^2}{2} \right);$$

l'NMOS di carico è sempre in saturazione

$$I_{DS2} = \frac{1.2 \times 10^{-4}}{2} \times \left((V_{DD} - V_{DS1} - V_{TH})^2 \right)$$



si trova che il punto di lavoro cade nella zona di saturazione di NMOS1 e vale circa 1.5 V.

2) Dato che sono entrambi in saturazione si ha

$$\frac{k_1}{2}\left(V_{GS1}-V_{TH}\right)^2=\frac{k_2}{2}\left(\left(V_{DD}-V_{DS1}-V_{TH}\right)^2\right)$$

e poiché $k_1 = k_2$,

$$\left(V_{GS1}-V_{TH}\right)=\left(V_{DD}-V_{DS1}-V_{TH}\right)$$
$$V_{DS1}=V_{DD}-V_{GS1}=2.5-1=1.5 \text{ V.}$$

3) Il source dell'NMOS2 si trova ad un potenziale positivo rispetto a massa, quindi V_{TH2} aumenta. La caratteristica di carico parabolica si trova spostata verso sinistra e quindi V_{DS1} diminuisce.

SOLUZIONE 3

1) La regione in cui I_n è costante e pari a I ($I_p = 0$) si comporta come un resistore. Poichè $W_n = 5$ mm mentre L_p:

$$D_p=\frac{kT}{q}\mu_p=1.036\times10^{-3}\ \mathrm{m^2s^{-1}}$$
$$L_p=\sqrt{D_p\tau_p}=32.19\ \mu\mathrm{m}$$

si può trascurare la zona in cui le correnti variano esponenzialmente ($W_n >> L_p$). Il calcolo della resistenza serie diventa:

$$R=\rho_n\frac{W_n}{S}$$

dove:

$$\rho_n=\frac{1}{q\mu_n N_D}=0.052\ \Omega\cdot\mathrm{m}$$
$$R=2600\ \Omega.$$

Considerando la resistenza serie, l'espressione della corrente nel diodo risulta:

$$I=I_0\left(e^{\frac{V-RI}{V_T}}-1\right)$$

dove:

$$I_0=S\frac{qD_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D}=1.16\times10^{-13}.$$

Per quanto riguarda il disegno della caratteristica, si faccia riferimento alle pagine 98-99 della dispensa. Si disegni la caratteristica del diodo con $R = 0$ (si calcolino alcuni valori opportuni), e le rette di carico dovute a R per alcuni valori di tensione. Si disegni poi per punti la caratteristica.

2) Nella regione in cui $I_n = I$, la cui ampiezza è approssimativamente uguale a $W_n = 5$ mm, il campo elettrico è costante e pari a:

$$E=\mu_n J=\mu_n\frac{I}{S}=\mu_n\frac{qD_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D}\left(e^{\frac{V-RI}{V_T}}-1\right)$$

3) La dipendenza dalla temperatura è dovuta a n_i e alla mobilità (da cui dipendono D_p e L_p):

$$n_i\,(400\ \mathrm{K})=\left.\sqrt{N_C(300)N_V(300)\left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}}e^{-\frac{E_g}{2kT}}}\right|_{T=400}$$

$$n_i\,(400\text{ K}) = \left(\frac{T}{300}\right)^3 \sqrt{N_C(300)N_V(300)}e^{-\frac{E_g}{2kT}} = 6.42\times10^{18}\text{ m}^{-3}$$

e questo è il contributo maggiore alla variazione della corrente del diodo con la temperatura. Volendo considerare anche il contributo dovuto alla variazione di mobilità:

$$\mu_p\,(400\text{ K}) = \mu_p\,(300\text{ K})\left(\frac{300}{400}\right)^{\frac{3}{2}} = 0.026\text{ m}^2/\text{Vs}$$

diminuita rispetto al valore a temperatura ambiente.

$$D_p = V_T\frac{400}{300}\mu_p = 8.98\times10^{-4}$$

$$L_p = \sqrt{D_p\tau_p} = 29.96\ \mu\text{m}$$

La resistenza R aumenta con la temperatura, per la diminuzione della mobilità degli elettroni:

$$R = \frac{1}{q\mu_n(300)\left(\frac{300}{400}\right)^{\frac{3}{2}}N_D}\frac{W_n}{S} = 0.08\frac{W_n}{S} = 4004\ \Omega$$

Quindi la corrente nel diodo varia sia per la variazione di I_0, sia per la variazione di $V_T = V_T(300)\frac{400}{300}$, sia per la variazione di R, che è significativa:

$$I = I_0\left(e^{\frac{V-RI}{V_T\frac{400}{300}}} - 1\right)$$

dove:

$$I_0 = S\frac{qD_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D} = 2.00\times10^{-8}\text{ A.}$$