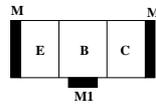


DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 23 Giugno 2012

ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

Un transistoro bipolare $nnpn$ ($N_{D-emettitore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{A-base} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{D-collettore} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, vedi figura) è polarizzato con $I_B = 0.5 \text{ mA}$, $V_{CE} = 3 \text{ V}$: la corrente I_C è 5 mA , $W_{eff-base} = 3 \text{ }\mu\text{m}$. L'emettitore ed il collettore sono entrambi corti: la distanza tra giunzione B-C e contatto di C è $W_{coll} = 3 \text{ }\mu\text{m}$.



1) Determinare la massima funzione di lavoro del metallo M che consente al transistoro di funzionare (giunzioni metallo-silicio ideali). [3]

2) Calcolare l'efficienza di emettitore e la distanza W_{em} tra giunzione B-E e contatto di emettitore (trascurare la regione di svuotamento B-E). [4]

3) Calcolare la tensione V_{BE} (SUGGERIMENTO: utilizzare il tempo di transito) e determinare la tensione V_{CE} massima che garantisce il funzionamento del transistoro in ZAD (quando il collettore è completamente svuotato, il transistoro è in punch-trough e la corrente non è più controllabile).[3]

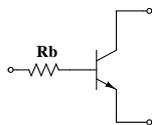
ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistoro n -MOS è caratterizzato da: $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{n-canale} = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, gate in polisilicio di tipo p^+ , $W = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $L = 2 \text{ }\mu\text{m}$.

1) Calcolare la corrente I_{DS} ($\varepsilon_C \rightarrow \infty$) per $V_{GS} = 3 \text{ V}$, $V_{DS} = 3 \text{ V}$; considerare la lunghezza effettiva di canale calcolando la distanza tra drain e punto di strozzamento P come regione di svuotamento dovuta a V_{DP} . [6]

2) Considerare un campo critico $\varepsilon_C = 10^5 \text{ V/m}$ (si assuma il canale molto corto). Disegnare la caratteristica quotata I_{DS}/V_{DS} per $V_{GS} = 3 \text{ V}$ e confrontarla con la caratteristica I_{DS}/V_{DS} del punto precedente ($\varepsilon_C \rightarrow \infty$). Disegnare inoltre, sullo stesso grafico, la caratteristica quotata per $V_{GS} = 5 \text{ V}$. [4]

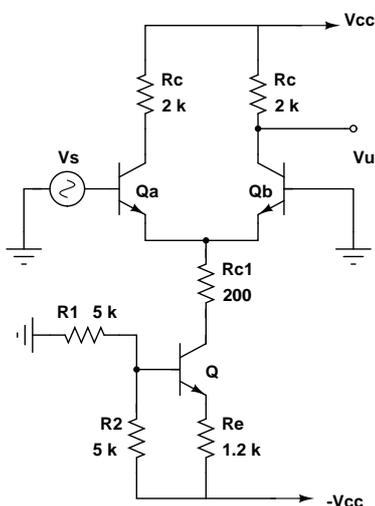
ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere le maschere necessarie per realizzare il circuito in figura, utilizzando il processo SBC; descrivere i passi di processo. [5]

2) La base è realizzata per diffusione di B ($D_{0j} = 0.75 \text{ cm}^2/\text{s}$, $E_{aj} = 3.5 \text{ eV}$): la predeposizione è tale da depositare una dose $Q = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$; viene



effettuato un drive-in per 2 h a 1100 °C. La zona di crescita epitassiale è uniformemente drogata $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Determinare la profondità di giunzione base-collettore e la resistenza di quadro della diffusione di base, considerando la mobilità delle lacune costante e pari a $450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. [5]

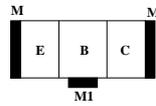
ESERCIZIO 4 (DE) Con riferimento al circuito in figura, i transistori Q_a , Q_b e Q_1 sono identici (n^+pn , $\beta_f=300$), e le due resistenze R_C sono identicamente uguali. $V_{CC} = 12 \text{ V}$.



- 1) Calcolare i punti di riposo dei transistori. [6]
 - 2) Disegnare il circuito equivalente per le variazioni ($h_{fe} \simeq \beta_f$, $h_{oe} \rightarrow 0$).
- [4]

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 23 Giugno 2012

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistor bipolare npn ($N_{D-emettitore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{A-base} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{D-collettore} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, vedi figura) è polarizzato con $I_B = 0.5 \text{ mA}$, $V_{CE} = 3 \text{ V}$: la corrente I_C è 5 mA , $W_{eff-base} = 3 \text{ }\mu\text{m}$. L'emettitore ed il collettore sono entrambi corti: la distanza tra giunzione B-C e contatto di C è $W_{coll} = 3 \text{ }\mu\text{m}$.



- 1) Determinare la massima funzione di lavoro del metallo M che consente al transistor di funzionare (giunzioni metallo-silicio ideali). [3]
- 2) Calcolare l'efficienza di emettitore e la distanza W_{em} tra giunzione B-E e contatto di emettitore (trascurare la regione di svuotamento B-E). [4]
- 3) Calcolare la tensione V_{BE} (SUGGERIMENTO: utilizzare il tempo di transito) e determinare la tensione V_{CE} massima che garantisce il funzionamento del transistor in ZAD (quando il collettore è completamente svuotato, il transistor è in punch-through e la corrente non è più controllabile). [3]

SOLUZIONE 1

1) Le due giunzioni M -emettitore ed M -collettore devono essere entrambi contatti ohmici. Dato che sia l'emettitore che il collettore sono drogati di tipo n , considerando giunzioni metallo-silicio ideali, dovremo avere che $\Phi_M < \Phi_S$. L'emettitore è più drogato del collettore, quindi la Φ_S è minore nell'emettitore che rappresenta la condizione più stringente. Avremo:

$$\begin{aligned} \Phi_{S-emettitore} &= \chi + \frac{E_C - E_F}{q} \\ \frac{E_C - E_F}{q} &= kT \ln \frac{N_C}{N_{D-emettitore}} = 0.206 \quad \text{V} \end{aligned}$$

e quindi per garantire il contatto ohmico sia sull'emettitore che sul collettore dovrà essere:

$$\Phi_M < \Phi_{S-emettitore} = 4.3 \quad \text{V}$$

2) Dalle correnti è immediatamente calcolabile il parametro α_F ($I_E = I_C + I_B = 5.5 \text{ mA}$):

$$\alpha_F = \frac{I_C}{I_E} = 0.909090 = \gamma\alpha_T$$

Il fattore di trasporto in base α_T può essere facilmente calcolato conoscendo la lunghezza effettiva della base $W_{eff} = 3 \mu\text{m}$:

$$\begin{aligned} \alpha_T &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n^2}} \\ D_n &= V_T\mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \\ L_n &= \sqrt{D_n\tau_n} = 50.89 \quad \mu\text{m} \\ \alpha_T &= 0.998265 \end{aligned}$$

da cui si ricava l'efficienza di emettitore:

$$\begin{aligned} \alpha_F &= \gamma\alpha_T \\ \gamma &= \frac{\alpha_F}{\alpha_T} = 0.9167 \end{aligned}$$

L'emettitore deve essere considerato corto. Trascurando la regione di svuotamento base-emettitore, che è polarizzata in diretta, avremo:

$$\gamma = \frac{q \frac{D_n}{W_{base}} n_{p0}}{q \frac{D_p}{W_{emettitore}} p_{n0} + q \frac{D_p}{W_{emettitore}} p_{n0}}$$

Svolgendo alcuni semplici passaggi ($n_{p0} = p_{n0}$ poichè i drogaggi della base e dell'emettitore sono numericamente uguali):

$$W_{emettitore} = \frac{D_p W_{base}}{D_n (1 - \gamma)}$$

e quindi avremo $W_{emettitore} = 15 \mu\text{m}$.

3) La tensione V_{BE} fissa la carica immagazzinata in base. La corrente di base, però, è legata sia alla carica in base che all'iniezione verso l'emettitore. La corrente di collettore dipende invece solo dalla carica in base:

$$I_C = \frac{Q_B}{\tau_t}$$

dove:

$$\tau_t = \frac{W^2}{2D_n} = 1.74 \times 10^{-9} \quad \text{s}$$

e quindi:

$$Q_B = I_C \tau_t = 8.7 \times 10^{-12} \quad \text{C}$$

Avremo:

$$Q_B = \frac{1}{2} q S p_{n0} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} W_{base}$$

$$V_{BE} = V_T \ln \left(\frac{2Q_B}{q S p_{n0} W_{base}} \right) = 0.55 \quad \text{V}$$

Quando la regione di svuotamento nel collettore raggiunge il contatto, il transistor non funziona più perchè la corrente aumenta per piccoli valori di V_{CE} , esattamente come in un diodo a base corta polarizzato in inversa con grosse tensioni di polarizzazione. Basta calcolare V_{CB} tale che $X_{Collettore}(V_{CB}) = W_{CB}(V_{CB}) \left(\frac{1+N_D}{N_A} \right) = 3 \mu\text{m}$.

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor n -MOS è caratterizzato da: $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{n\text{-canale}} = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, gate in polisilicio di tipo p^+ , $W = 5 \mu\text{m}$, $L = 2 \mu\text{m}$.

1) Calcolare la corrente I_{DS} ($\varepsilon_C \rightarrow \infty$) per $V_{GS} = 3 \text{ V}$, $V_{DS} = 3 \text{ V}$; considerare la lunghezza effettiva di canale calcolando la distanza tra drain e punto di strozzamento P come regione di svuotamento dovuta a V_{DP} . [6]

2) Considerare un campo critico $\varepsilon_C = 10^5 \text{ V/m}$ (si assuma il canale molto corto). Disegnare la caratteristica quotata I_{DS}/V_{DS} per $V_{GS} = 3 \text{ V}$ e confrontarla con la caratteristica I_{DS}/V_{DS} del punto precedente ($\varepsilon_C \rightarrow \infty$). Disegnare inoltre, sullo stesso grafico, la caratteristica quotata per $V_{GS} = 5 \text{ V}$. [4]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2$$

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.329 \quad \text{V}$$

$$V_{THid} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 0.947 \quad \text{V}$$

La Φ_{MS} in questo caso è positiva (gate di tipo p^+) e pari a:

$$\Phi_{MS} = \frac{E_F - E_V}{q} = V_T \ln \frac{N_V}{N_A} = 0.197$$

e quindi:

$$V_{TH} = V_{THid} + \Phi_{MS} = 1.14 \quad \text{V}$$

Avremo $V_{DS} = 3 \text{ V} > V_{GS} - V_{TH}$. Per calcolare la lunghezza effettiva di canale:

$$V_P = V_{DSsat} = V_{GS} - V_{TH} = 1.86 \quad \text{V}$$

$$V_{DP} = V_{DS} - V_{DSsat} = 1.14 \quad \text{V}$$

L'ampiezza della regione di svuotamento drain-punto P:

$$V_0 = \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.869 \quad \text{V}$$

$$W_{DP} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_0 + V_{DP})} = 0.73 \quad \mu\text{m}$$

quindi il canale è molto corto, e la lunghezza effettiva di canale è $L_{eff} = 2 - 0.73 = 1.27 \mu\text{m}$. La corrente I_{DS} in saturazione risulta:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 1.25 \quad \text{mA}$$

2) Si chiede di considerare la saturazione della velocità (nell'esercizio è indicato un campo ϵ_C leggermente inferiore di quello reale). In questo caso avremo:

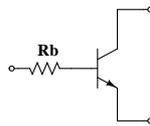
$$V_{DSsat} = \sqrt{2(V_{GS} - V_{TH})\epsilon_C L}$$

dove L è la lunghezza NOMINALE del canale, cioè $2 \mu\text{m}$. Avremo: $V_{DSsat} = 0.86 \text{ V}$, minore rispetto al caso precedente. La corrente di saturazione risulta:

$$I_{DSsat} = \mu_n C_{OX} W \varepsilon_C (V_{GS} - V_{TH}) = 86 \quad \mu\text{A}$$

La caratteristica quindi in questo caso raggiunge prima la saturazione, e con una corrente di saturazione molto più bassa.

ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere le maschere necessarie per realizzare il circuito in figura, utilizzando il processo SBC; descrivere i passi di processo. [5]



2) La base è realizzata per diffusione di B ($D_{0j} = 0.75 \text{ cm}^2/\text{s}$, $E_{aj} = 3.5 \text{ eV}$): la predeposizione è tale da depositare una dose $Q = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$; viene effettuato un drive-in per 2 h a $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. La zona di crescita epitassiale è uniformemente drogata $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Determinare la profondità di giunzione base-collettore e la resistenza di quadro della diffusione di base, considerando la mobilità delle lacune costante e pari a $450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. [5]

SOLUZIONE 3

1) Le maschere sono quelle proprie del processo SBC, descritto sulla dispensa. Basta avere l'accortezza di "allontanare" il contatto di base per realizzare R_b con una diffusione di base sufficientemente lunga.

2) Il profilo di diffusione è dato da:

$$N_A(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_j t}} e^{-\frac{x^2}{4D_j t}}$$

dove:

$$D_j = D_{0j} e^{-\frac{E_{aj}}{kT}} = 1.07 \times 10^{-13}$$

e quindi avremo:

$$N_A(x) = 2.9 \times 10^{17} e^{-\frac{x^2}{1.54 \times 10^{-9}}} \quad \text{cm}^{-3}$$

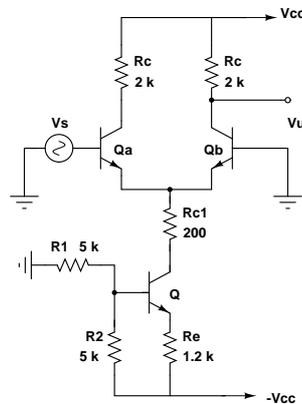
e quindi:

$$x_j = \sqrt{1.54 \times 10^{-9} \ln \frac{2.9 \times 10^{17}}{10^{14}}} = 1.1 \times 10^{-4} \quad \text{cm}$$

quindi $x_j = 1.1 \mu\text{m}$. La resistenza di quadro si calcola molto semplicemente considerando la dose di drogante Q :

$$R_q = \frac{1}{qQ\mu_p} = 1387 \quad \Omega/q$$

ESERCIZIO 4 (DE) on riferimento al circuito in figura, i transistori Q_a , Q_b e Q_1 sono identici (n^+pn , $\beta_f=300$), e le due resistenze R_C sono identicamente uguali. $V_{CC} = 12 \text{ V}$.



- 1) Calcolare i punti di riposo dei transistori. [5]
- 2) Disegnare il circuito equivalente per le variazioni ($h_{fe} \simeq \beta_f$, $h_{oe} \rightarrow \infty$) e calcolare V_u/V_s . [5]

SOLUZIONE 4

1) La tensione di base di Q_1 è -6 V, la tensione di emettitore è -6.7 V. La corrente $I_{E1} \simeq I_{C1} = e$ e $I_{E1} = (-6.7 - (-12))/R_E = 4.4$ mA. Questa corrente si divide in parti uguali tra Q_A e Q_B , poichè R_C sono identiche. Sarà quindi:

$$\begin{aligned} I_{C1} &\simeq I_{E1} \\ I_{EA} &= I_{EB} = \frac{I_{C1}}{2} = 2.2 \quad \text{mA} \end{aligned}$$

Avremo quindi:

$$\begin{aligned} V_{CA} = V_{CB} &= V_{CC} - I_{CA}R_C = 7.6 \quad \text{V} \\ V_{EA} = V_{EB} &= 0.7 \quad \text{V} \\ V_{C1} &= V_{EA} - R_{C1}I_{C1} = -1.58 \quad \text{V} \\ V_{CEA} &= V_{CEB} = 8.3 \quad \text{V} \\ V_{CE1} &= -1.58 - (-6.7) = 5.12 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Tutti i transistori sono dunque in zona attiva diretta con $V_{BE} > 0$ e $V_{CE} > V_{BE}$. Verifichiamo l'ipotesi di partitore pesante. La corrente di base $I_{B1} = I_{C1}/\beta_f = 4.4/300 = 14.7 \mu\text{A}$, da confrontare con la corrente che scorre in R_1 e R_2 $I_{R1-R2} = V_{CC}/(R_1 + R_2) = 1.2$ mA. Dunque $I_{B1} \ll I_{R1-R2}$ e il partitore pesante è verificato.

Riassumendo. I transistori A e B sono esattamente simmetrici:

$$\begin{aligned} I_{EA} \simeq I_{CA} &= 2.2 \quad \text{mA} \\ I_{BA} &= 7.3 \quad \mu\text{A} \\ V_{CEA} &= 8.3 \quad \text{V} \\ V_{BEA} &= 0.7 \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

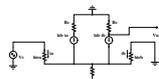
e:

$$\begin{aligned} I_{EB} \simeq I_{CB} &= 2.2 \quad \text{mA} \\ I_{BB} &= 7.3 \quad \mu\text{A} \\ V_{CEB} &= 8.3 \quad \text{V} \\ V_{BEB} &= 0.7 \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

Per il transistoro 1:

$$\begin{aligned} I_{E1} \simeq I_{C1} &= 4.4 \quad \text{mA} \\ I_{B1} &= 14.7 \quad \mu\text{A} \\ V_{CE1} &= 5.12 \quad \text{V} \\ V_{BE1} &= 0.7 \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

2) Il circuito equivalente delle variazioni può essere disegnato come: Da



notare che il transistore 1 ha la base cortocircuitata, quindi visto dal collettore si comporta come un circuito aperto per le variazioni.