

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 9 Settembre 2013

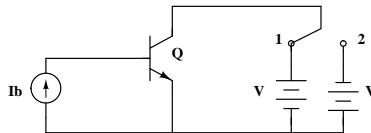
ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

Il transistoro bipolare in figura è caratterizzato da $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $W = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $S = 1 \text{ mm}^2$. La base è polarizzata con un generatore $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$, $V = 5 \text{ V}$. Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni polarizzate in diretta.

1) Supponendo che il BJT sia un n^+pn^+ , calcolare le tensioni e le correnti ai terminali con il commutatore nella posizione **1**. Per il calcolo della regione di svuotamento base-collettore, è necessario fare una approssimazione: SOLO per il calcolo della regione di svuotamento, si consideri un valore approssimato di $V_{BE} \simeq 0.5$. Lo si confronti con il valore esatto, da calcolare nell'esercizio.[3]

2) Calcolare le tensioni e le correnti ai terminali con il commutatore nella posizione **2**. [3]

3) Supponendo che il BJT sia un $nnpn^+$ ($N_{Abase} = N_{Demettitore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, emettitore lungo), calcolare le tensioni e le correnti ai terminali con il commutatore nella posizione **1**. SUGGERIMENTO: scrivere un'espressione di I_B in funzione di V_{BE} . [4]



ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Un transistoro MOS a canale n è realizzato con un condensatore MOS ideale, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $L = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$. Il Source ed il Drain sono cortocircuitati ($V_{DS} = 0$), e sono polarizzati con una tensione $V_{DS/Subst} = 3 \text{ V}$.

1) Per $V_{GSubst} = 0 \text{ V}$ determinare l'ampiezza della regione di svuotamento di Source che penetra sotto il Gate, e la concentrazione di portatori minoritari nel canale per $y = 50 \text{ }\mu\text{m}$. SUGGERIMENTO: considerare la giunzione polarizzata in inversa.[3]

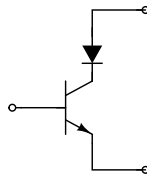
Per $V_{GSubst} = 2 \text{ V}$ determinare:

2) la caduta di tensione ψ_S nel silicio a metà del canale ($y = L/2$) (SUGGERIMENTO: trascurare la concentrazione di portatori minoritari);[4]

3) l'ampiezza della regione di svuotamento di Source che penetra sotto il Gate, e la concentrazione di portatori minoritari, all'interfaccia ossido-silicio, per $y = 50 \mu\text{m}$. [3]

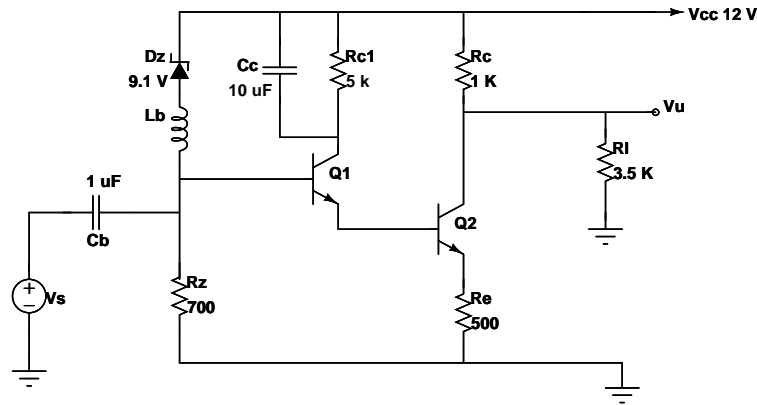
ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere il processo SBC per la fabbricazione di transistori $n\text{pn}$, e disegnare il profilo di drogaggio netto dal contatto di emettitore al collettore sepolto. [5]



2) Disegnare le maschere per la realizzazione della parte di circuito in figura, che verrà realizzato mediante processo SBC. [5]

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, Q_1 è un n^+pn ($W = 4 \mu\text{m}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6}$), Q_2 ha un $\beta_{f\text{minimo}} = 20$.



1) Calcolare il $\beta_{f\text{minimo}}$ del transistore 1, il punto di riposo dei transistori e le correnti nel circuito (condensatori aperti, induttanza corto-circuito). [4]

2) Disegnare il circuito equivalente (condensatori corto-circuitati e induttanza circuito aperto). [3]

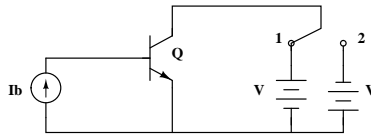
3) Determinare il valore massimo di R_{C1} affinché il transistore Q_1 sia correttamente polarizzato in zona attiva diretta. [3]

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Il transistoro bipolare in figura è caratterizzato da $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $W = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $S = 1 \text{ mm}^2$. La base è polarizzata con un generatore $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$, $V = 5 \text{ V}$. Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni polarizzate in diretta.

1) Supponendo che il BJT sia un n^+pn^+ , calcolare le tensioni e le correnti ai terminali con il commutatore nella posizione **1**. ATTENZIONE! Per il calcolo della regione di svuotamento base-collettore, è necessario fare una approssimazione: SOLO per il calcolo della regione di svuotamento, si consideri un valore approssimato di $V_{BE} \simeq 0.5$. Lo si confronti con il valore esatto, da calcolare nell'esercizio.[3]

2) Calcolare le tensioni e le correnti ai terminali con il commutatore nella posizione **2**. [3]

3) Supponendo che il BJT sia un $nnpn^+$ ($N_{Abase} = N_{Demettitore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, emettitore lungo), calcolare le tensioni e le correnti ai terminali con il commutatore nella posizione **1**. SUGGERIMENTO: scrivere un'espressione di I_B in funzione di V_{BE} . [4]



SOLUZIONE 1

1) Usando l'approssimazione suggerita dal testo:

$$V_{CB} = 5 - 0.5 = 4.5 \quad \text{V} \quad (1)$$

La regione di svuotamento base-collettore risulta:

$$V_{0BC} = \frac{E_g}{q} - \frac{E_f - E_V}{q} = 1.08 - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_{Abase}} \right) = 0.901 \quad \text{V}$$

$$X_{BC} = W_{BC} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_{Abase}}} (V_{0BC} + V_{CB}) = 0.84 \quad \mu\text{m}$$

Si può adesso ricavare la lunghezza effettiva di base ed il guadagno del transistoro ($\gamma = 1$):

$$\begin{aligned} W_{eff} &= 3 - 0.84 = 2.16 \quad \mu\text{m} \\ D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n = 0.00259 \quad \text{m}^2/\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \quad \mu\text{m} \\ \alpha_f &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n^2}} = 0.9991000 \\ \beta_f &= \frac{\alpha_f}{1 - \alpha_f} = 1110 \end{aligned}$$

Le correnti risultano dunque in valore assoluto (I_C entrante, I_B entrante e I_E uscente):

$$\begin{aligned} I_C &= \beta_f I_B = 11.1 \quad \text{mA} \\ I_E &= I_C + I_B = 11.1 \quad \text{mA} \end{aligned}$$

A questo punto possiamo calcolare la tensione base-collettore in maniera esatta:

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{S}{\tau_n} q \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \frac{W_{eff}}{2} \\ e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} &= \frac{2I_B \tau_n}{Sq \frac{n_i^2}{N_A} W_{eff}} \\ V_{BE} &= 0.56 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Il valore di V_{BE} è molto vicino a quello approssimato usato per il calcolo della lunghezza effettiva di base.

2) Con il commutatore in posizione **2**, V_{CE} cambia di segno, che è equivalente a scambiare il collettore con l'emettitore. Poichè il transistoro è perfettamente simmetrico, molto semplicemente cambiano i segni delle correnti di collettore e di emettitore (ZONA ATTIVA INVERSA = ZONA ATTIVA DIRETTA). In modo particolare I_C è uscente ed I_E è entrante (I_B rimane la stessa, fissata dal generatore di corrente). Come valori avremo, rispetto a quelli con il commutatore in posizione **1**:

$$\begin{aligned} I_{C2} &= I_{E1} \\ I_{E2} &= I_{C1} \end{aligned}$$

Avremo inoltre che la giunzione base collettore è polarizzata in diretta, con $V_{BC} = 0.56$ V, e la giunzione base-emettitore è polarizzata in inversa, con $V_{EB} = 5 - V_{CB} = 4.44$ V.

3) La lunghezza effettiva di base è la stessa dei due punti precedenti, $W_{eff} = 2.16$ μm . La corrente di base I_B , imposta dal generatore, è composta da due fattori: la carica in base, diviso il tempo di vita media dei minoritari, e l'iniezione dalla base all'emettitore:

$$I_B = \frac{Q_B}{\tau_n} + qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_{Demettitore}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$I_B = e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} qS \left(\frac{n_i^2}{N_{Abase}} \frac{W_{eff}}{2\tau_n} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_{Demettitore}} \right)$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = 0.0011655$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 34.13 \quad \mu\text{m}$$

Da ciò si ricava $V_{BE} = 0.48$ V, e quindi $V_{BC} = 4.52$ V. Avremo dunque (β_f è lo stesso del punto precedente):

$$I_C = \frac{Q_B}{\tau_n} \beta_f = qS \frac{n_i^2}{N_{Abase}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \frac{W_{eff}}{2\tau_n} \beta_f = 0.97 \quad \text{mA}$$

$$I_E = I_C + I_B = 0.98 \quad \text{mA}$$

Alternativamente, si poteva procedere calcolando l'efficienza di emettitore γ .

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor MOS a canale n è realizzato con un condensatore MOS ideale, $t_{ox} = 30$ nm, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3} , $L = 0.5$ mm, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs , $\tau_n = 10^{-6}$ s. Il Source ed il Drain sono cortocircuitati ($V_{DS} = 0$), e sono polarizzati con una tensione $V_{DS/Subst} = 3$ V.

1) Per $V_{GSubst} = 0$ V determinare l'ampiezza della regione di svuotamento di Source che penetra sotto il Gate, e la concentrazione di portatori minoritari nel canale per $y = 50$ μm . SUGGERIMENTO: considerare la giunzione polarizzata in inversa.[3]

Per $V_{GSubst} = 2$ V determinare:

2) la caduta di tensione ψ_S nel silicio a metà del canale ($y = L/2$) (SUGGERIMENTO: trascurare la concentrazione di portatori minoritari);[4]

3) l'ampiezza della regione di svuotamento di Source che penetra sotto il Gate, e la concentrazione di portatori minoritari, all'interfaccia ossido-silicio, per $y = 50 \mu\text{m}$. [3]

SOLUZIONE 2

1) La differenza di potenziale di contatto tra Source (Drain) e substrato risulta:

$$\begin{aligned}\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad \text{V} \\ V_0 &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \quad \text{V}\end{aligned}$$

La regione di svuotamento sotto il Gate ($\psi_S = 0$) si calcola semplicemente considerando la giunzione Source-substrato polarizzata in inversa, con $V_{SD/Subst} = 3 \text{ V}$:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_0 + V_{DS/Subst})} = 0.715 \quad \mu\text{m} \quad (2)$$

La concentrazione di portatori minoritari nel canale per $y = 50 \mu\text{m}$ si può calcolare considerando l'espressione di portatori minoritari per un diodo polarizzato in inversa:

$$\begin{aligned}n_p(y) &= n_{p0} \left(1 - e^{-\frac{y}{L_n}} \right) \\ D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2/\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \quad \mu\text{m} \\ n_p(50 \mu\text{m}) &= \frac{n_i^2}{N_A} \left(1 - e^{-\frac{(50-0.715) \times 10^{-6}}{L_n}} \right) = 1.40 \times 10^{10} \quad \text{m}^{-3}\end{aligned}$$

2) Se $V_{GSubst} < V_{SD/Subst}$ la concentrazione di portatori minoritari è molto bassa, perchè le due giunzioni Source-substrato e Drain-substrato (polarizzate in inversa) svuotano il canale, non consentendo alla generazione termica di

aumentare la concentrazione di portatori minoritari. Quindi la carica mobile nel canale è 0. Per V_{GSubst} avremo dunque la seguente espressione:

$$V_{GSubst} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_S}}{C_{ox}} + \psi_S \quad (3)$$

dove ψ_S è la caduta di tensione nel silicio. Risolvendo l'equazione otteniamo:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\ 2 &= 0.505 \sqrt{\psi_S} + \psi_S \\ \psi_S &= 1.40 \quad \text{V} \end{aligned}$$

3) A questo punto l'interfaccia ossido-silicio si trova ad un potenziale di 1.40 V più alto rispetto al bulk. Quindi la giunzione Source-canale risulta essere pari a $3-1.40=1.60$ V. La penetrazione della regione di svuotamento sotto il gate risulta dunque:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_0 + V_{DS/Canale})} = 0.228 \quad \mu\text{m} \quad (4)$$

Poichè la giunzione Source-canale è polarizzata in inversa, come nel punto 1, la concentrazione di portatori minoritari lungo il canale ha la stessa espressione, cambia solo l'ampiezza della regione di svuotamento

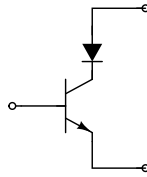
$$n_p(50 \mu\text{m}) = \frac{n_i^2}{N_A} \left(1 - e^{-\frac{(50-0.228) \times 10^{-6}}{L_n}} \right) = 1.40 \times 10^{10} \quad \text{m}^{-3} \quad (5)$$

e quindi è praticamente coincidente a quella del punto 1.

ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere il processo SBC per la fabbricazione di transistori *npn*, e disegnare il profilo di drogaggio netto dal contatto di emettitore al collettore sepolto.[5]

2) Disegnare le maschere per la realizzazione della parte di circuito in figura, che verrà realizzato mediante processo SBC.[5]



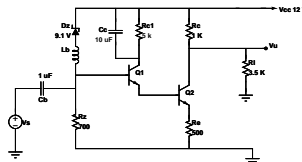
SOLUZIONE 3

1) Si rimanda alla dispensa del Prof. Diligenti per una dettagliata descrizione del processo SBC, e per il profilo netto di drogaggio dall'emettitore al collettore sepolto.

2) A fianco del transistor, basta aggiungere una diffusione di tipo p , che viene realizzata contemporaneamente alla diffusione di base. Il contatto di collettore viene prelevato dalla diffusione di tipo p , cosicchè tra contatto e collettore c'è una giunzione pn .

ESERCIZIO 4 (DE)

Nel circuito in figura, Q_1 è un n^+pn ($W = 4 \mu\text{m}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6}$), Q_2 ha un $\beta_{f\text{minimo}} = 20$.



1) Calcolare il $\beta_{f\text{minimo}}$ del transistore 1, il punto di riposo dei transistori e le correnti nel circuito.[4]

2) Disegnare il circuito equivalente (condensatori corto-circuitati e induttanza circuito aperto).[3]

3) Determinare il valore massimo di R_{C1} affinché il transistore Q_1 sia correttamente polarizzato.[3]

SOLUZIONE 4

1) Considerando una lunghezza effettiva di base massima pari a $W = 4 \mu\text{m}$ avremo:

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n = 0.00259 \quad \text{m}^2/\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \quad \mu\text{m} \\ \alpha_f &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n^2}} = 0.996920 \\ \beta_f &= \frac{\alpha_f}{1 - \alpha_f} = 324 \end{aligned}$$

Per il punto di riposo, abbiamo che $V_{B1} = 12 - 9.1 = 2.9 \text{ V}$. Possiamo ricavare le tensioni dei due emettitori:

$$\begin{aligned} V_{E1} &= V_{B1} - 0.7 = 2.2 \quad \text{V} \\ V_{B2} &= V_{E1} \\ V_{E2} &= V_{B2} - 0.7 = 1.5 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Da ciò otteniamo una corrente di emettitore $I_{E2} = 1.5/0.5 = 3 \text{ mA}$ ($\simeq I_{C2}$). La corrente che scorre in R_L può essere determinata come:

$$I_{R_L} = \frac{V_{CC} - R_C I_C}{R_C + R_L} = 2 \quad \text{mA} \quad (6)$$

E quindi $I_{R_C} = 5 \text{ mA}$. Avremo dunque $V_{C2} = 7 \text{ V}$ e:

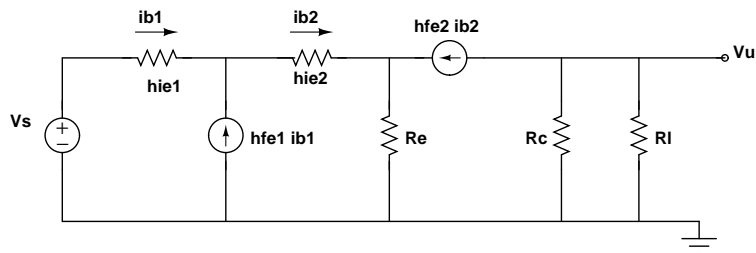
$$\begin{aligned} I_{C2} &\simeq I_{E2} = 3 \quad \text{mA} \\ I_{B2} &= \frac{I_{C2}}{\beta_{fmin}} = 150 \quad \mu\text{A} \\ V_{BE2} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V} \\ V_{CE2} &= V_{C2} - V_{E2} = 7 - 1.5 = 5.5 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Avremo inoltre che $I_{B2} = I_{E1} \simeq I_{C1}$, $V_{C1} = V_{CC} - R_{C1} I_{C1} = 11.25 \text{ V}$:

$$\begin{aligned} I_{C1} &\simeq I_{E1} = 150 \quad \mu\text{A} \\ I_{B1} &= \frac{I_{C1}}{\beta_{fmin}} = 0.46 \quad \mu\text{A} \\ V_{BE1} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V} \\ V_{CE1} &= V_{C1} - V_{E1} = 11.25 - 2.2 = 9.05 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Entrambi i transistori sono correttamente polarizzati in zona attiva diretta. Per lo Zener, avremo che $\frac{I_Z = V_{CC} - V_Z}{R_Z = 4.12}$ mA, che è \gg di $I_{B1} = 0.46 \mu\text{A}$. Quindi lo zener è polarizzato correttamente ($I_Z > 1 \text{ mA}$).

2) Il circuito equivalente è il seguente:



3) Affinchè il transistore 1 funzioni correttamente in zona attiva diretta, è necessario che $V_{CE} > V_{CEsat} \simeq 0.3 \div 0.7 \text{ V}$. Facendo il conto con 0.7 V :

$$\begin{aligned}
 V_{Cminima} &= V_{E1} + 0.7 = 2.9 \quad \text{V} \\
 R_{C1massima} I_{C1} &= V_{CC} - V_{Cminima} \\
 R_{C1massima} &= 61 \quad \text{K}\Omega
 \end{aligned}$$