

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 28 Gennaio 2016

ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

Un transistoro bipolare n^+pn ($N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dcollettore} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6}$, $S = 1 \text{ mm}^2$) è polarizzato con un generatore di corrente in base $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$, e con un generatore di tensione $V_{CE} = 10 \text{ V}$. La corrente di collettore è risultata pari a 5 mA.

- 1) Calcolare la lunghezza effettiva della base.[3]
- 2) Calcolare le tensioni ai terminali e la lunghezza metallurgica della base.[3]
- 3) V_{CE} viene posto a 0. Calcolare le tensioni e le correnti ai terminali.[4]

ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Un transistoro $n\text{MOS}$, con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ $W=10 \text{ }\mu\text{m}$, $L=1 \text{ }\mu\text{m}$, gate in Au ($\Phi_{Au} = 5.1 \text{ V}$), è polarizzato con $V_{GBulk} = 2 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ (zona lineare).

- 1) Per $V_{SBulk} = 0$ calcolare la corrente I_{DS} e le cariche fisse e mobili nel canale.[3]
- 2) Per $V_{SBulk} = 1 \text{ V}$ calcolare la corrente I_{DS} nonché le cariche fisse e mobili nel canale.[4]
- 3) Per $V_{SBulk} = -0.6 \text{ V}$ calcolare le correnti ai terminali di Source e di Drain, sapendo che l'area di ciascuno dei pozzetti di Drain e di Source è pari a $50 \text{ }\mu\text{m}^2$ e che $\mu_n \text{ bulk} = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$. [3]

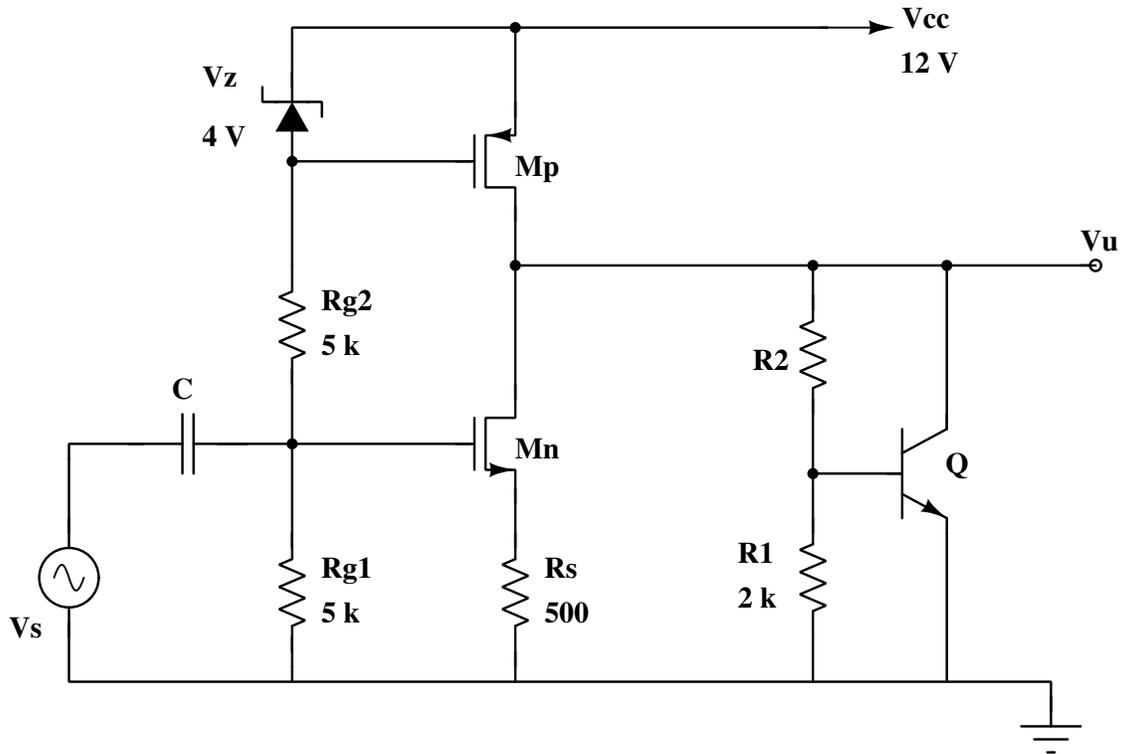
ESERCIZIO 3 (DTE)

- 1) Descrivere il processo di impiantazione ionica. Illustrare lo schema e il funzionamento di un impiantatore ionico. [5]
- 2) Descrivere e discutere i parametri fondamentali del processo di impiantazione attraverso uno strato amorfo.[5]

ESERCIZIO 4 (DE)

Nel circuito in figura, Q ha un $\beta_{fminimo} = 300$. Il $p\text{MOS}$ ha $V_{TH} = -1 \text{ V}$, $\mu_p = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W/L=10$. L' $n\text{MOS}$ (polysilicon gate con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_p = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W/L=10$) ha una carica parassita all'interfaccia ossido-silicio, dovuta a ioni sodio carichi positivamente la cui concentrazione per unità di superficie è risultata pari a $[N_A^+] = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (la carica si ottiene moltiplicando per q).

- 1) Determinare lo spessore dell'ossido del $n\text{MOS}$ affinché $V_{TH} = 1$. [3]
- 2) Determinare R_2 affinché $V_u = 6 \text{ V}$ (assumere $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$). [3]
- 3) Determinare il punto di riposo dei transistori. [4]



ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

Un transistor bipolare n^+pn ($N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dcollettore} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6}$, $S = 1 \text{ mm}^2$) è polarizzato con un generatore di corrente in base $I_B = 10 \mu\text{A}$, e con un generatore di tensione $V_{CE} = 10 \text{ V}$. La corrente di collettore è risultata pari a 5 mA .

- 1) Calcolare la lunghezza effettiva della base. [3]
- 2) Calcolare le tensioni ai terminali e la lunghezza metallurgica della base.[3]
- 3) V_{CE} viene posto a 0. Calcolare le tensioni e le correnti ai terminali.[4]

SOLUZIONE 1

1) Dai dati abbiamo subito:

$$\beta_f = \frac{I_C}{I_B} = 500 \quad (1)$$

Si può calcolare l' $\alpha_f = \alpha_T$ ($\gamma = 1$) o scrivere direttamente:

$$\begin{aligned}\beta_f &= \frac{\tau_n}{\tau_t} \\ \tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} \\ W^2 &= \frac{2\tau_n D_n}{\beta_f} \\ W &= \sqrt{\frac{2\tau_n D_n}{\beta_f}} \\ D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ W &= 3.22 \text{ } \mu\text{m}\end{aligned}$$

2) Possiamo calcolare V_{BE} dalla relazione:

$$\begin{aligned}I_B &= \frac{Q_B}{\tau_n} \\ I_B &= qS \frac{\delta_n(0)W}{2\tau_n} \\ I_B &= qS \frac{n_{p0} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} W}{2\tau_n} \\ e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} &= \frac{2I_B}{qS \frac{n_i^2}{N_A} W} \\ V_{BE} &= V_T \ln \left(\frac{2I_B \tau_n}{qS \frac{n_i^2}{N_A} W} \right) = 0.55 \text{ V}\end{aligned}$$

Quindi avremo $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 9.45 \text{ V}$. La regione di svuotamento base-collettore si calcola come:

$$\begin{aligned}V_{0BC} &= V_T \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = 0.635 \\ W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + V_{CB})} = 3.82 \text{ } \mu\text{m} \\ X_{BC} &= W_{BC} \frac{N_{Dcoll}}{N_{Abase} + N_{Dcoll}} = 0.347 \text{ } \mu\text{m}\end{aligned}$$

Quindi, trascurando la regione di svuotamento della giunzione base-emettitore polarizzata in diretta (si può comunque calcolare), avremo:

$$W_{met} = W + X_{BC} = 3.57 \quad \mu\text{m} \quad (2)$$

3) Avremo che $V_{BE} = V_{BC}$ ed il transistor è in saturazione. Entrambe le giunzioni sono polarizzate in diretta, e l'eccesso dei portatori all'estremo della giunzione base-emettitore e base-collettore è lo stesso. Trascurando le regioni di svuotamento di entrambe le giunzioni (polarizzate in diretta) avremo:

$$\begin{aligned} W_{effettiva} &= W_{metallurgica} \\ I_B &= qS \frac{n_{p0} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} W}{\tau_n} \\ V_{BE} \equiv V_{BC} &= V_T \ln \left(\frac{I_B \tau_n}{qS \frac{n_i^2}{N_A} W} \right) = 0.53 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Per quanto riguarda le correnti, possiamo assumere con un po' di approssimazione che I_B sia entrante, e si divida equamente tra I_C e I_E .

ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Un transistor $n\text{MOS}$, con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $W=10\mu\text{m}$, $L=1 \mu\text{m}$, gate in Au ($\Phi_{Au} = 5.1 \text{ eV}$), è polarizzato con $V_{GBulk} = 2 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ (zona lineare).

1) Per $V_{SBulk} = 0$ calcolare la corrente I_{DS} e le cariche fisse e mobili nel canale.[3]

2) Per $V_{SBulk} = 1 \text{ V}$ calcolare la corrente I_{DS} nonché le cariche fisse e mobili nel canale.[3]

3) Per $V_{SBulk} = -0.6 \text{ V}$ calcolare le correnti ai terminali di Source e di Drain, sapendo che l'area di ciascuno dei pozzetti di Drain e di Source è pari a $50 \mu\text{m}^2$ e che $\mu_n \text{ bulk} = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$.[4]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo innanzitutto la tensione di soglia. Con $V_{SBulk} = 0$, la tensione di inversione $V_{GBulk\ inv} = V_{TH}$ si calcola come:

$$\begin{aligned}\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \text{ V} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\ \Phi_{MS} &= \Phi_M - \Phi_S = \Phi_M - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B\right) = 0.113 \text{ V}\end{aligned}$$

Avremo:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 1.23 \text{ V} \quad (3)$$

La corrente risulta (zona lineare):

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = 0.071 \text{ mA} \quad (4)$$

Il transistor è in zona lineare, e quindi la carica è praticamente costante lungo il canale. La carica fissa è quella dovuta alla regione di svuotamento alla soglia $W(2\psi_B)$:

$$Q_W = \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = 4.84 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \quad (5)$$

La carica mobile si può calcolare con la formula:

$$Q_n = c_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 8.863 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \quad (6)$$

2) Per risolvere il caso di $V_{SBulk} = 1 \text{ V}$ possiamo far riferimento all'effetto body, calcolando la V_{TH} rispetto al Source, o considerare la V_{THbulk} sapendo che la caduta di tensione nel silicio all'inversione è pari a $V_{Si\ inv} = 2\psi_B + V_{SBulk} = 1.694$. Avremo dunque:

$$V_{TH\ bulk} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (v_{SBulk} + 2\psi_B)}}{C_{ox}} + V_{SBulk} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 2.46 \text{ V} \quad (7)$$

Oppure possiamo calcolare la V_{TH} , che per definizione è riferita al Source:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (V_{SBulk} + 2\psi_B)}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 2.46 \text{ V} = 1.46 \text{ V}$$

Vediamo che $V_{GBulk} = 2 \text{ V} < V_{TH \text{ bulk}}$, oppure che $V_{GS} = V_{GBulk} - V_{SBulk} = 1 \text{ V} < V_{TH} = 1.46 \text{ V}$. Il condensatore MOS non è in inversione, quindi la carica mobile nel canale è 0, e $I_{DS} = 0$. La carica fissa è quella dovuta alla regione di svuotamento $W(\psi_S)$. Per il calcolo della caduta di tensione nel silicio ψ_S dobbiamo scrivere l'equazione:

$$V_{GBulk} = 2 \text{ V} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_S}}{C_{ox}} + \psi_S + \Phi_{MS} \quad (8)$$

la cui soluzione accettabile è $\psi_S = 1.13 \text{ V}$. Dunque:

$$Q_W = \sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_S} = 6.18 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \quad (9)$$

3) Per $V_{SBulk} < 0$ le giunzioni n^+p Source-Bulk e Drain-Bulk entrano in conduzione. In modo particolare avremo $V_{SBulk} = -0.6 \text{ V}$ e $V_{DBulk} = V_{DS} + V_{SBulk} = -0.5 \text{ V}$. Quindi avremo:

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q} \mu_{n \text{ bulk}} = 2.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \text{ } \mu\text{m} \\ I_{0 \text{ } n^+ \text{ } Sub} &= qS \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} = 9.17 \times 10^{-18} \text{ A} \\ I_{bulk \text{ } S} &= I_0 \left(e^{\frac{V_{bulk \text{ } S}}{V_T}} - 1 \right) = 105 \text{ nA} \\ I_{bulk \text{ } D} &= I_0 \left(e^{\frac{V_{bulk \text{ } D}}{V_T}} - 1 \right) = 2.22 \text{ nA} \end{aligned}$$

Data la piccola superficie dei pozzetti, le correnti dovute alle giunzioni sono piccole. Calcoliamo la corrente nel canale. Dobbiamo considerare adesso una V_{TH} pari a:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (V_{SBulk} + 2\psi_B)}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 2.46 \text{ V} = 0.362 \text{ V}$$

Inoltre $V_{GS} = V_{Gbulk} + V_{Sbulk} = 2.6 \text{ V}$, e quindi:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = 0.21 \text{ mA}$$

ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere il processo di impiantazione ionica. Illustrare lo schema e il funzionamento di un impiantatore ionico. [5]

2) Descrivere e discutere i parametri fondamentali del processo di impiantazione attraverso uno strato amorfo.[5]

SOLUZIONE 3

1) e 2) Si rimanda alla dispensa del Prof. Diligenti.

ESERCIZIO 4 (DE)

Nel circuito in figura, Q ha un $\beta_{fminimo} = 300$. Il p MOS ha $V_{TH} = -1$ V, $\mu_p = 0.08$ m²/Vs, $t_{ox} = 30$ nm, $W/L=10$. L' n MOS (polysilicon gate con $N_A = 10^{16}$ cm⁻³, $\mu_p = 0.08$ m²/Vs, $W/L=10$) ha una carica parassita all'interfaccia ossido-silicio, dovuta a ioni sodio carichi positivamente la cui concentrazione per unità di superficie è risultata pari a $[N_A^+] = 10^{11}$ cm⁻² (la carica si ottiene moltiplicando per q).

1) Determinare lo spessore dell'ossido del n MOS affinché $V_{TH} = 1$. [3]

2) Determinare R_2 affinché $V_u = 6$ V (assumere $V_{BE} = 0.7$ V). [3]

3) Determinare il punto di riposo dei transistori. [4]

SOLUZIONE 4

1) La carica parassita nell'ossido è pari a $Q_{ox} = q \cdot 10^{15} = 1.602 \times 10^{-4}$ C/m². La tensione di soglia si scrive come:

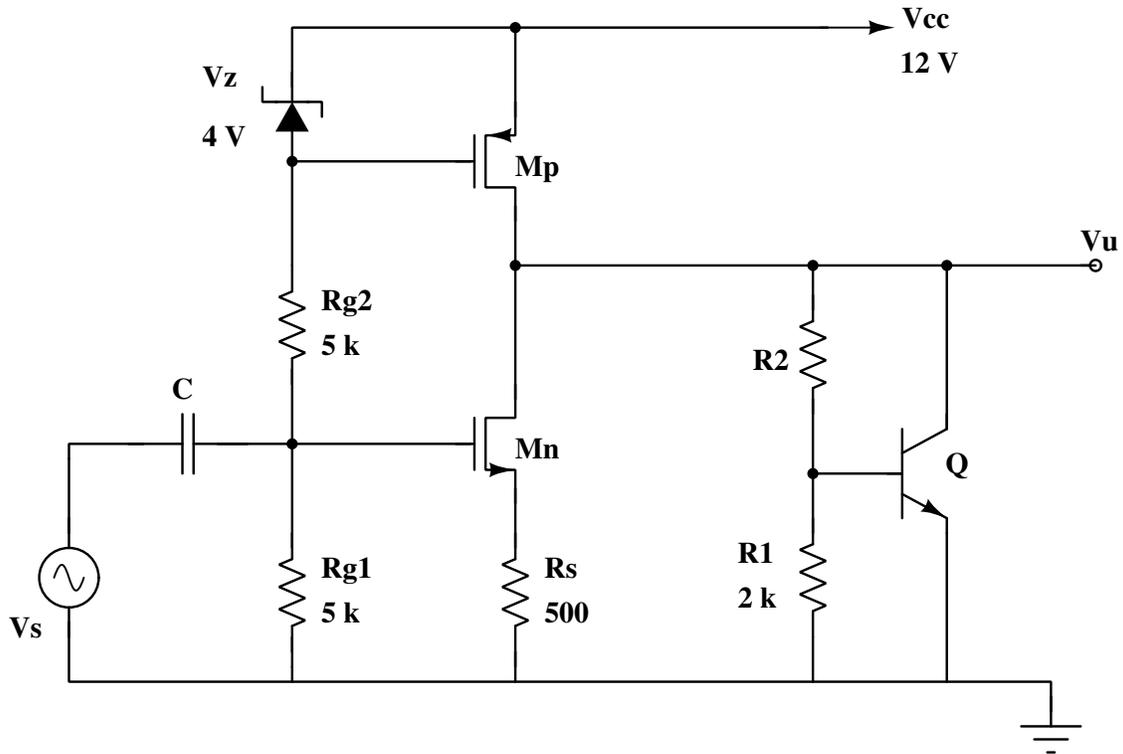
$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (10)$$

e quindi:

$$C_{ox} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} - Q_{ox}}{V_{TH} - 2\psi_B - \Phi_{MS}} \quad (11)$$

Calcolando i vari parametri:

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



$$C_{ox} = 4.057 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

$$t_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 127 \text{ nm}$$

2) Avremo:

$$V_u = V_\gamma \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 6 \text{ V}$$

$$R_2 = 15 \text{ k}\Omega$$

3) Per il transistor M_p avremo $V_{GS} = 8 - 12 = -4\text{V}$, che in valore assoluto risulta più grande di $V_{TH} = -1\text{V}$, e quindi il transistor conduce. Avremo ($C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox} = 1.151 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$):

$$V_{SD} = \frac{\mu_p C_{ox} W}{2 L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 4.1 \text{ mA} \quad (12)$$

E $V_D = V_u = 6$ V, quindi $V_{SD} = 6$ V, in valore assoluto maggiore di $V_{GS} - V_{TH}$. Per Mn avremo:

$$V_G = 8 \frac{R_{g1}}{R_{g2} + R_{g1}} = 4 \text{ V}$$

$$I_{DS} = \frac{V_S}{R_S} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_G - V_S - V_{TH})^2$$

Risolvendo l'ultima equazione otteniamo $V_S = 0.5$ V, e quindi $I_{DS} = 1$ mA. Poichè $V_D = V_u = 6$ V avremo $V_{DS} = 6 - 0.5 = 5.5$ V $> V_{GS} - V_{TH}$. La corrente nel bipolare sarà data da:

$$I_{R1 R2} = \frac{6}{R_1 + R_2} = 0.35 \text{ mA}$$

$$I_C = I_{SDp} - I_{DSn} - I_{R1 R2} = 2.75 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_f} = 9.2 \text{ } \mu\text{A} \ll I_{R1 R2}$$

Dunque:

$$V_B = 0.7 \text{ V}$$

$$I_E \simeq I_C = 2.7 \text{ mA}$$

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 6 \text{ V}$$

$$I_{SDp} = 4.1 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = -4 \text{ V}$$

$$V_{SD} = 6 \text{ V}$$

$$I_{DSn} = 1 \text{ mA}$$

$$V_{GSn} = 3.5 \text{ V}$$

$$V_{DSn} = 5.5 \text{ V}$$