

## DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 31 Gennaio 2013

**ESERCIZIO 1 (DE,DTE)** Una giunzione  $p^+n$  è polarizzata con  $V = 0.5$  V. I dati della giunzione sono:  $N_D = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>,  $\mu_p = 350$  cm<sup>2</sup>/Vs,  $\tau_p = 10^{-6}$  s. La distanza  $W$  tra piano della giunzione e contatto  $n$  è pari a  $30$   $\mu\text{m}$  ( $W = 30$   $\mu\text{m}$ , trascurare la regione di svuotamento per polarizzazione diretta).

- 1) Determinare l'espressione del profilo dei portatori minoritari in eccesso e la densità di corrente nella giunzione.[4]
- 2) Determinare la carica immagazzinata dovuta ai portatori minoritari (per unità di superficie).[3]
- 3) Determinare la frazione di portatori minoritari iniettati (rispetto al totale) che si ricombinano sul contatto.[3]

**ESERCIZIO 2 (DE,DTE)** Si consideri un condensatore MOS ideale con  $t_{ox} = 30$  nm, substrato  $N_A = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, mobilità degli elettroni nel canale  $\mu_n = 0.08$  m<sup>2</sup>/Vs,  $\tau_n = 0.1$  s (substrato raffreddato). Si applica un gradino di tensione a  $t = 0$ :  $V_{GS} = 0$  per  $t < 0$  e  $V_{GS} = 5$  V per  $t \geq 0$ .

- 1) Per  $t = 0^+$  (tempi  $t \ll \tau_n$ ) calcolare la carica fissa e mobile nel silicio per unità di superficie.[3]
- 2) Per  $t \rightarrow \infty$  ( $t \gg \tau_n$ ), facendo le opportune approssimazioni, calcolare la carica fissa e mobile nel silicio per unità di superficie.[3]
- 3) Il condensatore MOS viene utilizzato per realizzare un transistor MOS con  $W = L$ . Con  $V_{DS} = 0$ , viene applicato lo stesso gradino di tensione  $V_{GS} = 5$  V per  $t \geq 0$ . Calcolare la carica fissa e mobile nel canale per  $t = 0^+$  ( $t \ll \tau_n$ ) e  $t \rightarrow \infty$  ( $t \gg \tau_n$ ).[4]

### ESERCIZIO 3 (DTE)

- 1) Descrivere le maschere ed i passi di processo necessari per realizzare i transistori  $n$  MOS con il processo LOCOS con LDD.[6]
- 2) Sapendo che il drogaggio di channel stop è pari a  $10^{17}$  cm<sup>-3</sup>, e che l'alimentazione massima del circuito sarà pari a 5 V, determinare il minimo spessore di ossido di campo che garantisce l'isolamento tra i dispositivi.[4]

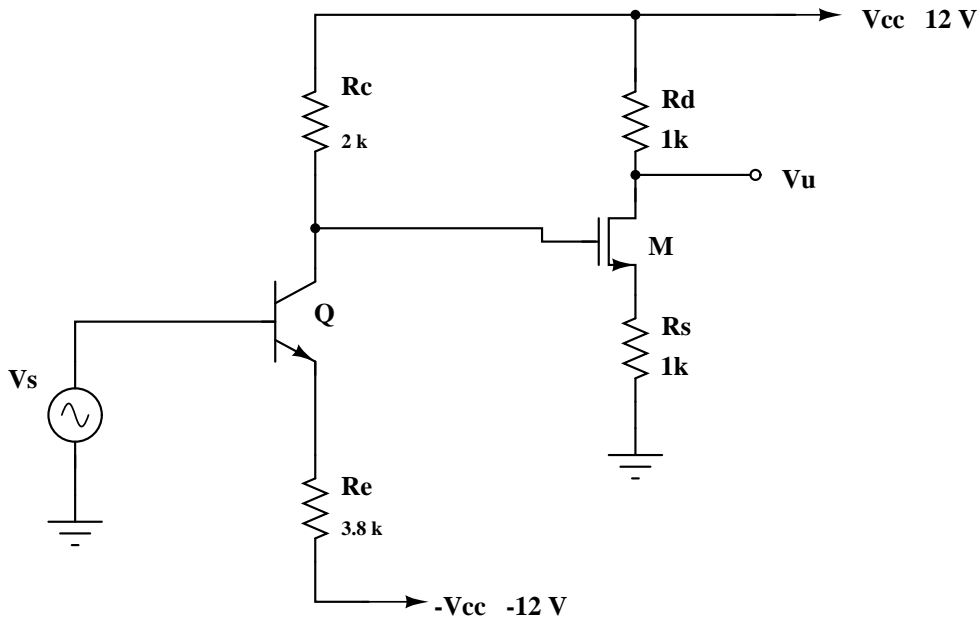
**ESERCIZIO 4 (DE)** Per l'amplificatore in figura, viene usato un tran-

sistore bipolare  $n^+pn$  con  $N_{Abase} = N_{Dcollettore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ .  
 Per il transistor  $n$ -MOS:  $\mu_n = 0.07 \text{ V/m}^2\text{s}$ ,  $C_{ox} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$ ,  $W=400 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $L=2 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $V_T = 1 \text{ V}$ .

1) Progettare la larghezza di base massima che garantisca un  $\beta_F$  minimo pari a 250 (trascurare la regione di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta).[3]

2) Calcolare il punto di riposo dei transistori.[4]

3) Calcolare il  $g_m$  del transistor MOS e disegnare il circuito equivalente alle variazioni dell'amplificatore.[3]



**ESERCIZIO 1 (DE,DTE)** Una giunzione  $p^+n$  è polarizzata con  $V = 0.5$  V. I dati della giunzione sono  $N_D = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>,  $\mu_p = 350$  cm<sup>2</sup>/Vs,  $\tau_p = 10^{-6}$  s, distanza  $W$  tra piano della giunzione e contatto  $n$  30  $\mu\text{m}$  ( $W = 30$   $\mu\text{m}$ , trascurare la regione di svuotamento per polarizzazione diretta).

1) Determinare l'espressione del profilo dei portatori minoritari in eccesso e la densità di corrente nella giunzione.[4]

2) Determinare la carica immagazzinata dovuta ai portatori minoritari (per unità di superficie).[3]

3) Determinare la frazione di portatori minoritari iniettati (rispetto al totale) che si ricombinano sul contatto.[3]

### SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo il coefficiente e la lunghezza di diffusione per le lacune iniettate:

$$\begin{aligned} D_p &= V_T \mu_p = 9.065 \times 10^{-4} \\ L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 30 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

La lunghezza di diffusione dei minoritari iniettati (lacune) è comparabile con l'ampiezza della base  $W = 30$   $\mu\text{m}$ . Quindi il diodo non è ne' a base lunga ne' a base corta. Bisogna risolvere l'equazione di continuità stazionaria:

$$\delta p(x) = A e^{\frac{x}{L_p}} + B e^{-\frac{x}{L_p}}$$

con condizioni al contorno  $\delta p(0) = p_{n0} \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = 5.45 \times 10^{18}$  m<sup>-3</sup> e  $\delta p(W) = 0$ . Otteniamo ( $W = L_p$ ):

$$\begin{aligned} A &= -\frac{\delta p(0)}{e^2} = -7.38 \times 10^{17} \\ B &= \delta p(0) \frac{e^2}{e^2 - 1} = 6.30 \times 10^{18} \end{aligned}$$

e quindi l'espressione dell'eccesso di portatori minoritari risulta:

$$\delta p(x) = -\frac{\delta p(0)}{e^2} e^{\frac{x}{L_p}} + \delta p(0) \frac{e^2}{e^2 - 1} e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (1)$$

Da ciò è immediato calcolare la densità di corrente nella giunzione:

$$j = -qD_p \frac{\partial \delta p(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \left( -\frac{A}{L_p} + \frac{B}{L_p} \right)$$

$$j = 34.06 \quad \text{A/m}^2$$

2) La carica immagazzinata dovuta ai portatori minoritari (per unità di superficie) si può calcolare come:

$$Q = \int_0^W q \delta p(x) dx = \int_0^W q A e^{\frac{x}{L_p}} + B e^{-\frac{x}{L_p}} dx$$

$$Q = q L_p A e^{\frac{x}{L_p}} \Big|_0^W - q L_p B \Big|_0^W = q L_p A (e - 1) + q L_p B \left( 1 - \frac{1}{e} \right)$$

che in numeri risulta  $Q = 1.3 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ .

3) Essendo la base “media” una parte dei portatori minoritari si ricombina nella base, una parte sul contatto. Quello che si ricombina nel semiconduttore da un contributo alla corrente pari a:

$$j_{semic} = \frac{Q}{\tau_p} = 13.04 \quad \text{A/m}^2 \quad (2)$$

Il restante della corrente esprime la frazione di portatori che si ricombinano sul contatto nell’unità di tempo (per unità di superficie). Quindi sul contatto si ricombinano:

$$\frac{j - j_{semic}}{j} = 0.62 \quad (3)$$

cioè il 62% dei portatori iniettati arriva sul contatto senza ricombinarsi (si ricombina direttamente al contatto).

**ESERCIZIO 2 (DE,DTE)** Si consideri un condensatore MOS ideale con  $t_{ox} = 30 \text{ nm}$ , substrato  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , mobilità degli elettroni nel canale  $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = 0.1 \text{ s}$  (substrato raffreddato). Si applica un gradino di tensione a  $t = 0$ ,  $V_{GS} = 0$  per  $t < 0$  e  $V_{GS} = 5 \text{ V}$  per  $t \geq 0$ .

- 1) Per  $t = 0^+$  (tempi  $t \ll \tau_n$ ) calcolare la carica fissa e mobile nel silicio per unità di superficie.[3]
- 2) Per  $t \rightarrow \infty$  ( $t \gg \tau_n$ ), facendo le opportune approssimazioni, calcolare la carica fissa e mobile nel silicio per unità di superficie.[3]
- 3) Il condensatore MOS viene utilizzato per realizzare un transistor MOS con  $W = L$ . Con  $V_{DS} = 0$ , viene applicato lo stesso gradino di tensione  $V_{GS} = 5$  V per  $t \geq 0$ . Calcolare la carica fissa e mobile nel canale per  $t = 0^+$  ( $t \ll \tau_n$ ) e  $t \rightarrow \infty$  ( $t \gg \tau_n$ ).[4]

## SOLUZIONE 2

- 1) Per  $t = 0^+$  la carica mobile  $Q_n$  non si è ancora formata, quindi il condensatore MOS è in svuotamento profondo  $Q_W = -\sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_s}$ . Avremo:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2$$

$$V_{GS} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_s}}{C_{ox}} + \psi_s$$

Questa equazione può essere risolta con  $V_{GS} = 5$  V, per determinare la caduta nel silicio  $\psi_s$ ; si ottengono due soluzioni,  $\psi_s = 3.99$  e  $\psi_s = 6.264$ , di cui la prima è valida. Avremo dunque  $Q_W = -\sqrt{2\epsilon_s q N_A \psi_s} = -1.16 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$ .

- 2) Per tempi molto lunghi, il condensatore MOS è in inversione. Si può usare l'approssimazione usuale  $\psi_s = 2\psi_B$ , per cui  $Q_W \simeq -\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}$ . A questo punto, la carica mobile si può calcolare come:  $Q_n = C_{ox} (V_{GS} - V_{TH})$ . Avremo dunque:

$$\psi_B = V_T \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad \text{V}$$

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

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 1.15 \quad \text{V}$$

$$|Q_n| = C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 4.43 \times 10^{-3} \quad \text{C/m}^2$$

- 3) Nel caso del transistor MOS, non è necessario aspettare la generazione termica per avere carica mobile nel canale, poichè gli elettroni sono forniti

dai pozzetti di Source e di Drain che sono drogati  $n^+$ . In questo caso avremo sia per  $t = 0^+$  che per  $t \rightarrow \infty$ :

$$\begin{aligned} Q_W &= -\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = -4.84 \times 10^{-4} \quad \text{C/m}^2 \\ |Q_n| &= C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 4.43 \times 10^{-3} \quad \text{C/m}^2 \end{aligned}$$

### ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere le maschere ed i passi di processo necessari per realizzare i transistori  $n$  MOS con il processo LOCOS con LDD.[7]

2) Sapendo che il drogaggio di channel stop è pari a  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , e che l'alimentazione massima del circuito sarà pari a 5 V, determinare il minimo spessore di ossido di campo che garantisce l'isolamento tra i dispositivi.[3]

### SOLUZIONE 3

1) La domanda è puramente scolastica, si rimanda alla dispensa, pag.122 e seguenti e pag. 175 per gli LDD.

2) Il gate è di polisilicio di tipo  $n^+$ , il substrato è drogato  $p$ ,  $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Quindi:

$$\begin{aligned} \psi &= V_T \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) = 0.407 \quad \text{V} \\ |\phi_{MS}| &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.950 \quad \text{V} \\ V_{TH} &= 5 \quad \text{V} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\phi_{MS}| \\ C_{ox} &= \left( \frac{V_{TH} - 2\psi_B + |\phi_{MS}|}{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}} \right)^{-1} = 3.23 \times 10^{-4} \quad \text{F/m}^2 \end{aligned}$$

Da cui si ricava:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$t_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 107 \quad \text{nm}$$

#### ESERCIZIO 4 (DE)

Per l'amplificatore in figura, viene usato un transistoro bipolare  $n^+pn$  con  $N_{Abase} = N_{Dcollettore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ .

Per il transistoro  $n$ -MOS:  $\mu_n = 0.07 \text{ V/m}^2\text{s}$ ,  $C_{ox} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$ ,  $W=400 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $L=2 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $V_T = 1 \text{ V}$ .

1) Progettare la larghezza di base massima che garantisca un  $\beta_F$  minimo pari a 250 (trascurare la regione di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta).[3]

2) Calcolare il punto di riposo dei transistori.[4]

3) Calcolare il  $g_m$  del transistoro MOS e disegnare il circuito equivalente alle variazioni dell'amplificatore.[3]

#### SOLUZIONE 4

1) Basta calcolare:

$$\alpha_F = \frac{\beta_F - 1}{\beta_F} = 0.996$$

$$\alpha_F = \alpha_T = \frac{1}{1 + \frac{W_{max}^2}{2L_p^2}}$$

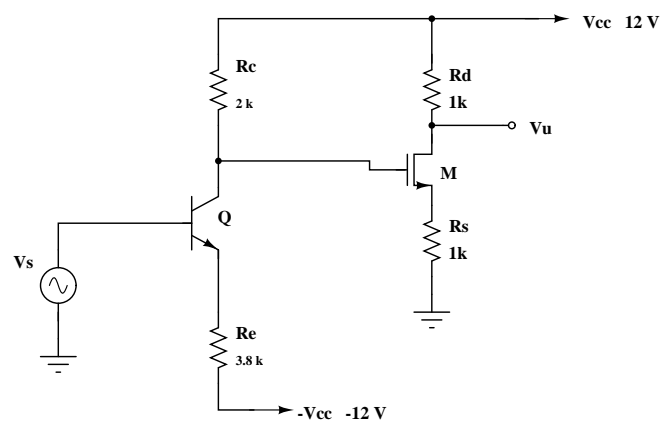
$$W_{max} = L_p \sqrt{2 \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F}}$$

e quindi:

$$L_p = \sqrt{V_T \mu_n \tau_n} = 50.9 \quad \mu\text{m}$$

$$W_{max} = 4.6 \quad \mu\text{m}$$

La lunghezza metallurgica deve essere inferiore a questa per garantire  $\beta_F = 250$  anche per  $V_{CB}=0$ , che è la condizione più sfavorevole.



2) Partendo dalla base:

$$V_E = -V_\gamma = -0.7 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{-V_\gamma - (-V_{CC})}{R_E} \simeq 3 \text{ mA}$$

Questo fissa la corrente di collettore e la tensione collettore-emettitore:

$$I_C \simeq I_E = 3 \text{ mA}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 6 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 6.7 \text{ V}$$



Il transistoro bipolare è dunque in zona attiva diretta ed avremo:

$$\begin{aligned}I_C &\simeq I_E = 3 \quad \text{mA} \\I_{BMax} &= \frac{I_C}{\beta_{min}} = 12 \quad \mu\text{A} \\V_{BE} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V} \\V_{CE} &= 6.7 \quad \text{V}\end{aligned}$$

Per il transistoro MOS avremo  $V_G = V_C = 6 \text{ V}$ . Quindi, supponendo sia in saturazione, possiamo scrivere:

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

Risolvendo questa equazione di secondo grado si ottengono due valori per  $V_S$ , il cui unico accettabile è  $V_S = 3.1 \text{ V}$ , e quindi  $I_{DS} = 3.1 \text{ mA}$ . Avremo dunque:  $V_D = 8.9 \text{ V}$ ,  $V_{DS} = 5 > V_{GS} - V_{TH} = 1.9 \text{ V}$ , quindi il MOS è in saturazione. Avremo:

$$\begin{aligned}V_{GS} &= 6 - 3.1 = 2.9 \quad \text{V} \\I_{DS} &= 3.1 \quad \text{mA} \\V_{DS} &= 1.9 \quad \text{V}\end{aligned}$$