DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 4 Giugno 2012

ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

Una giunzione *pn* ($N_A = N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $\mu_n = 1000$ cm^2/Vs, $\mu_p = 450$ cm^2/Vs, $S = 1$ mm^2) è polarizzata con $V = 0.5$ V.

1) Verificare l'ipotesi di bassa iniezione, calcolare la corrente totale e disegnare un grafico quotato della corrente di elettroni $I_n(x)$ e di lacune $I_p(x)$. [3]

2) Per $x = 10$ μm (trascurare la regione di svuotamento, $x = 0$ sul piano della giunzione), calcolare i valori delle correnti di diffusione di elettroni e lacune. [3]

3) Calcolare la corrente di trascinamento degli elettroni per $x = 10$ μm e $x = 0.5$ mm. Nei due casi calcolare: a) il campo elettrico; b) la corrente di trascinamento delle lacune, confrontandola con quella degli elettroni.[4]

ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Un transistore n-MOS è caratterizzato da: $N_A = 5{\times}10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_{n-canale} = 800$ cm^2/Vs, $t_{ox} = 30$ nm. Con $V_{GS} = 3$ V, è stata misurata la resistenza di quadro ($W = L$) per piccoli valori di V_{DS}, ed è risultata pari a 3.8 kΩ.

1) Determinare la funzione di lavoro del Gate.[3]

2) Per piccoli valori di V_{DS} (zona lineare, $V(y) \approx 0$, y lungo il canale) determinare l'espressione analitica del tempo di transito in funzione di V_{DS} utilizzando: 1) la carica nel canale (Q_n costante con y); 2) la velocità di drift degli elettroni (campo elettrico costante).[4]

3) Per piccole V_{DS} scrivere l'espressione del guadagno g_m e della capacità differenziale C_{GS}.[3]

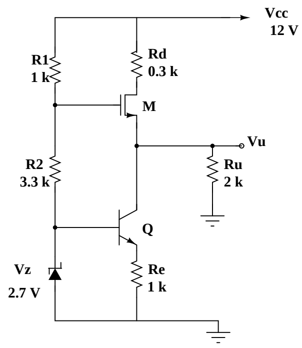
ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere i passi di processo e disegnare le maschere necessarie per realizzare un transistore n-MOS con il processo LOCOS con drain poco drogato (LDD).[6]

2) L'ossido di campo è fabbricato con una ossidazione wet a 920 ^{o}C ($A = 0.5$ μm, $B = 0.203$ μm^2/hr, $\tau = 0$) per 30'. Verificare che l'isolamento tra i dispositivi non è garantito (drogaggio del substrato $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, tensione massima di alimentazione $V_{CC} = 5$ V), ma che si rende necessario il drogaggio di channel stop: verificare se per l'isolamento sia sufficiente un drogaggio di channel stop pari a 5×10^{17} cm^{-3}. [4]

ESERCIZIO 4 (DE)

Con riferimento al circuito in figura, il transistore Q_1 n^+pn ha β_f=300, mentre il transistore M ha $t_{ox} = 50$ nm, $\mu_{n-canale} = 0.08$ m^2/Vs, $W/L = 6$, $V_{TH} = 1$ V (effetto body trascurabile).



1) Calcolare le correnti del transistore bipolare e la tensione di gate di M. [4]

2) Calcolare il punto di riposo (tensioni del bipolare, tensioni e correnti del mos). [6]

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 4 Giugno 2012

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Una giunzione pn ($N_A = N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s, $\mu_n = 1000$ cm^2/Vs, $\mu_p = 450$ cm^2/Vs, $S = 1$ mm^2) polarizzato con $V = 0.5$ V.

1) Verificare l'ipotesi di bassa iniezione, calcolare la corrente totale e disegnare un grafico quotato della corrente di elettroni $I_n(x)$ e di lacune $I_p(x)$. [3]

2) Per $x = 10$ μm (trascurare la regione di svuotamento, $x = 0$ sul piano della giunzione), calcolare i valori delle correnti di diffusione di elettroni e lacune. [3]

3) Calcolare la corrente di trascinamento degli elettroni per $x = 10$ μm e $x = 0.5$ mm. Nei due casi calcolare: a) il campo elettrico; b) la corrente di trascinamento delle lacune, confrontandola con quella degli elettroni.[4]

SOLUZIONE 1

1)Calcoliamo la differenza di potenziale di contatto V_0:

$$V_0 = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.695 \qquad \text{V} \tag{1}$$

Gli eccessi di lacune nella zona n e di elettroni nella zona p sono rispettivamente:

$$\begin{aligned} \delta_p(0) &= p_{n0}\, e^{\frac{V}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_D}\, e^{\frac{V}{V_T}} = 5.45 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \\ \delta_n(0) &= n_{po}\, e^{\frac{V}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_A}\, e^{\frac{V}{V_T}} = 5.45 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

quindi l'ipotesi di bassa iniezione è verificata. Calcoliamo i coefficienti e le lunghezze di diffusione:

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n = 2.59 \times 10^{-3}$$

$$
\begin{aligned}
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.9 \qquad \mu\text{m} \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.12 \times 10^{-3} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 33.5 \qquad \mu\text{m}
\end{aligned}
$$

La corrente totale nella giunzione risulta:

$$
I = I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = qS\, n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D}\right) \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 73.60\ \mu\text{A} \quad (2)
$$

Le componenti della corrente dovute agli elettroni e alle lacune, calcolate agli estremi della regione di svuotamento, sono simili e pari a:

$$
\begin{aligned}
I_n &= qS\, n_i^2\, \frac{D_n}{L_n N_A} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 44.4\ \mu\text{A} \\
I_p &= qS\, n_i^2\, \frac{D_p}{L_p N_D} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 29.20\ \mu\text{A}
\end{aligned}
$$

Le due correnti seguono un comportamento esponenziale, come riportato sulle dispense del corso.

2) La corrente di diffusione di lacune si può calcolare dalla derivata del profilo di portatori minoritari nel punto $x = 10\ \mu$m:

$$
\begin{aligned}
I_p(x) &= -SqD_p \frac{d\delta_p(x)}{dx} \\
I_p(x) &= -SqD_p \frac{d\delta_p(0)\ e^{\frac{-x}{L_p}}}{dx} \\
I_p(x) &= Sq\frac{D_p}{L_p}\delta_p(0) e^{\frac{-x}{L_p}} \\
I_p(x) &= I_p(0)\ e^{\frac{-x}{L_p}} \\
I_p(x = 10\ \mu\text{m}) &= 21.70\ \mu\text{A}
\end{aligned}
$$

La corrente di diffusione di elettroni, nella zona n, si può calcolare considerando la quasi-neutralità, per cui il profilo di eccesso di elettroni in prima approssimazione è coincidente con quello dei portatori minoritari (lacune):

$$
\delta_n(x) \simeq \delta_p(x) = \delta_p(0)\ e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (3)
$$

Quindi la corrente di diffusione dei portatori maggioritari (elettroni) risulta:

$$
\begin{aligned}
I_{n-diff}(x) &= SqD_n \frac{d\delta_n(x)}{dx} \\
I_{n-diff}(x) &= SqD_n \frac{d\delta_p(0)\ e^{\frac{-x}{L_p}}}{dx} \\
I_{n-diff}(x) &= -Sq\frac{D_n}{L_p}\delta_p(0)e^{\frac{-x}{L_p}} \\
I_{n-diff}(x) &= -I_p(0)\ e^{\frac{-x}{L_p}}\frac{D_n}{D_p} \\
I_{n-diff}(x = 10\ \mu\text{m}) &= -50.10\ \mu\text{A}
\end{aligned}
$$

3) La corrente nella regione n, per $x = 10\ \mu$m, è composta da: 1) corrente di diffusione degli elettroni, 2) corrente di diffusione delle lacune, 3) corrente di trascinamento degli elettroni. La corrente totale è costante, ed è la somma delle tre componenti:

$$I_{totale}(x) = I_{p-diff}(x) + I_{n-diff}(x) + I_{n-drift}(x) \tag{4}$$

quindi:

$$I_{n-drift}(x = 10\ \mu\text{m}) = I_{totale} - I_{p-diff} - I_{n-diff} = I_{totale} - I_{p-diff} + \mid I_{n-diff} \mid = 102 \quad \mu\text{A} \tag{5}$$

Per $x = 0.5$ mm le correnti di diffusione sono praticamente 0, e quindi la corrente totale è dovuta al drift degli elettroni:

$$I_{n-drift}(x = 0.5\ \text{mm}) = I_{totale} = 102.9\ \mu\text{A} \tag{6}$$

La corrente di drift si può scrivere in funzione del campo elettrico ε (a meno del segno):

$$I_{n-drift}(x) = S\ q\ n\ \mu_n\ \varepsilon(x) \tag{7}$$

da cui si può ricavare il campo elettrico nei due casi:

$$
\begin{aligned}
\varepsilon(x) &= \frac{I_{n-drift}(x)}{S\ q\ n\ \mu_n} \\
\varepsilon(x = 10\ \mu\text{m}) &= 0.64 \qquad \text{V/m} \\
\varepsilon(x = 0.5\ \text{mm}) &= 0.46 \qquad \text{V/m}
\end{aligned}
$$

E' inutile dire che la corrente di trascinamento delle lacune è trascurabile in entrambi i casi. Infatti avremo nel primo caso:

$$\delta_p(x = 10\ \mu\mathrm{m}) = \delta_p(0)\ e^{-\frac{x}{L_p}} = 4.4 \times 10^{18} \qquad \begin{aligned} I_{p-drift} &= q\mu_p\delta_p(x)\varepsilon(x) \\ I_{p-drift} &= 18 \quad \mathrm{nA} \end{aligned}$$

Nel secondo caso:

$$\begin{aligned} I_{p-drift} &= q\mu_p p_{n0}\varepsilon(x) \\ I_{p-drift} &= 1 \times 10^{-16} \quad \mathrm{A} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Un transistore n-MOS è caratterizzato da: $N_A = 5{\times}10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_{n-canale} = 800$ cm^2/Vs, $t_{ox} = 30$ nm. Con $V_{GS} = 3$ V, è stata misurata la resistenza di quadro ($W = L$) per piccoli valori di V_{DS}, ed è risultata pari a 3.8 kΩ.

1) Determinare la funzione di lavoro del Gate.[3]

2) Per piccoli valori di V_{DS} (zona lineare, $V(y) \approx 0$, y lungo il canale) determinare l'espressione analitica del tempo di transito in funzione di V_{DS} utilizzando: 1) la carica nel canale (Q_n costante con y); 2) la velocità di drift degli elettroni (campo elettrico costante).[4]

3) Per piccole V_{DS} scrivere l'espressione del guadagno g_m e della capacità differenziale C_{GS}.[3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia ideale:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \quad \mathrm{F/m^2} \\ \psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.329 \quad \mathrm{V} \\ V_{THid} &= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 0.947 \quad \mathrm{V} \end{aligned}$$

La misura della resistenza di quadro (resistenza di canale per piccole V_{DS} con $W/L = 1$ ad una data $V_{GS} > V_{TH}$) è una misura indiretta della V_{TH} reale:

$$R = \frac{1}{\mu_n C_{OX} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)}$$

e quindi:

$$\begin{aligned} V_{GS} - V_{TH} &= \frac{1}{R\ \mu_n C_{OX}} = 2.86 \quad \text{V} \\ V_{TH} &= V_{GS} - 2.86 = 0.14 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Quindi:

$$\begin{aligned} V_{TH} &= V_{THid} + \Phi_{MS} \\ \Phi_{MS} &= V_{TH} - V_{THid} = -0.807 \quad \text{V} \\ \Phi_S &= \chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 4.97 \quad \text{V} \\ \Phi_M &= \Phi_S - 0.807 = 4.16 \quad \text{V} \end{aligned}$$

2) Per piccole V_{DS}:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) V_{DS}$$

e la carica totale del canale è pari a:

$$Q_n = C_{OX}\ W\ L \left(V_{GS} - V_{TH}\right)$$

Avremo quindi:

$$\begin{aligned} I_{DS} &= \frac{Q_n}{\tau_t} \\ \tau_t &= \frac{Q_n}{I_{DS}} = \frac{C_{OX}\ W\ L \left(V_{GS} - V_{TH}\right)}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) V_{DS}} \\ \tau_t &= \frac{L^2}{\mu_n V_{DS}} \end{aligned}$$

Considerando la velocià di drift degli elettroni:

$$
\begin{aligned}
\tau_t &= \frac{L}{v_{drift}} \\
\tau_t &= \frac{L}{\mu_n \varepsilon} \\
\tau_t &= \frac{L}{\mu_n \frac{V_{DS}}{L}} \\
\tau_t &= \frac{L^2}{\mu_n V_{DS}}
\end{aligned}
$$

Ovviamente otteniamo la stessa espressione.

3) Avremo:

$$
\begin{aligned}
g_m &= \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} |_{V_{DS}=Cost} \\
g_m &= \frac{\partial \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) V_{DS}}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS}
\end{aligned}
$$

mentre per la f_t dovremo calcolarci C_{GS} per piccole V_{DS}:

$$
\begin{aligned}
C_{GS} &= \frac{dQ_n}{dV_{GS}} = \frac{dC_{OX}\ W\ L \left(V_{GS} - V_{TH}\right)}{dV_{GS}} \\
C_{GS} &= C_{OX}\ W\ L
\end{aligned}
$$

ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere i passi di processo e disegnare le maschere necessarie per realizzare un transistore n-MOS con il processo LOCOS con drain poco drogato (LDD).[6]

2) L'ossido di campo è fabbricato con una ossidazione wet a 920 ^{o}C ($A = 0.5\ \mu$m, $B = 0.203\ \mu$m^2/hr, $\tau = 0$) per 30'. Verificare che l'isolamento tra i dispositivi non è garantito (drogaggio del substrato $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, tensione massima di alimentazione $V_{CC} = 5$ V), ma che si rende necessario il drogaggio di channel stop: verificare se per l'isolamento sia sufficiente un drogaggio di channel stop pari a 5×10^{17} cm^{-3}. [4]

SOLUZIONE 3

1) Per le maschere, si rimanda alla dispensa di Dispositivi. La fabbricazione degli LDD non richiede maschere aggiuntive.

2) Lo spessore dell'ossido di campo x_o risulta:

$$\begin{aligned} x_o &= \frac{A}{2}\left(-1+\sqrt{1+\frac{4B}{A^2}t}\right) \\ x_0 &= 155 \quad \text{nm} \end{aligned}$$

La tensione di soglia della struttura MOS parassita poly-n^+/ Field Oxide/ Substrato risulta:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 2.23\times 10^{-4} \quad \text{F/m}^2 \\ \psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.347 \quad \text{V} \\ \mid \Phi_{MS} \mid &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \quad \text{V} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \mid \Phi_{MS} \mid = 1.98 \quad \text{V} \end{aligned}$$

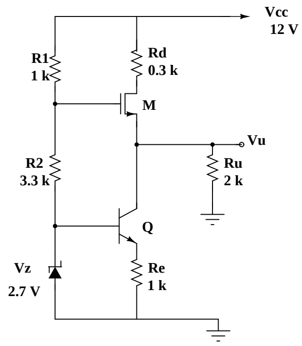
Quindi la tensione di soglia è minore della tensione massima applicabile al circuito, e l'isolamento non è garantito.
Per $N_A = 5\times 10^{17}$ cm^{-3} basta ripetere i conti:

$$\begin{aligned} \psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.449 \quad \text{V} \\ \mid \Phi_{MS} \mid &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.989 \quad \text{V} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \mid \Phi_{MS} \mid = 17.35 \quad \text{V} \end{aligned}$$

che garantisce l'isolamento.

ESERCIZIO 4 (DE)

Con riferimento al circuito in figura, il transistore Q_1 n^+pn ha β_f=300, mentre il transistore M ha t_{ox} = 50 nm, $\mu_{n-canale}$ = 0.08 m^2/Vs, W/L = 6, V_{TH} = 1 V (effetto body trascurabile). Calcolare i punti di riposo dei transistori, consideran



1) Calcolare le correnti del transistore bipolare e la tensione di gate di M. [4]

2) Calcolare il punto di riposo (tensioni del bipolare, tensioni e correnti del mos). [6]

SOLUZIONE 4

1) La tensione di base di Q è fissata dal diodo zener (2.7 V). La tensione di emettitore è dunque pari a 2 V, e quindi la corrente $I_E \simeq I_C = 2/1 = 2$ mA. La corrente di base risulta dunque $I_B = 6.7$ μA.
La tensione V_G si può trovare in questo modo:

$$\begin{aligned} V_G - V_Z &= (V_{CC} - V_Z)\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 7.1 \text{ V} \\ V_G &= V_Z + 7.1 = 9.8 \text{ V} \end{aligned}$$

2) Per calcolare il punto di riposo del MOS, facciamo l'ipotesi che sia in saturazione:

$$\begin{aligned} I_{DS} &= \frac{k}{2}\frac{W}{L}(V_{GS} - V_{TH})^2 \\ k &= \mu_n C_{ox} = \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 5.52 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

La tensione di Source può essere scritta come:

$$V_S = R_u \left(I_{DS} - I_C\right)$$

Quindi ($I_C = 2$ mA):

$$I_{DS} = \frac{V_S}{R_u} + I_C$$

Quindi bisogna risolvere l'equazione di secondo grado in V_S:

$$\frac{V_S}{R_u} + I_C = \frac{k}{2}\frac{W}{L}\left(V_G - V_S - V_{TH}\right)^2$$

Svolgendo i conti, si ottengono due soluzioni per V_S:

$$\begin{aligned} V_{S1} &= 3.91 \text{ V} \\ V_{S2} &= 16.7 \text{ V} \end{aligned}$$

La prima è quella valida, per cui si ha $V_{GS} = 5.9$ V e $I_{DS} = 4$ mA. In questo caso avremo anche $V_D = 12 - 0.3 \times 4 = 10.8$ V, e avremo il MOS in saturazione $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH} = 4.9$ V. Ci rimane da calcolare la V_{CE} del bipolare: $V_{CE} = V_S - V_E = 1.91$ V, sufficiente per mantenere il bipolare in zona attiva diretta.