DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 9 Gennaio 2012

ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

Un transistore n-MOS ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 800$ cm^2/Vs nel canale, $W = L = 5$ μm, $t_{ox} = 50$ nm), realizzato con un processo polysilicon gate, è polarizzato con $V_{GS} = 5$ V e $V_{DS} = V_{DSSat}$ (da determinare). Come ipotesi semplificativa, si assuma che il campo elettrico ε sia lineare nella direzione y del canale e che $\varepsilon = 0$ V/m in prossimita' del Source (NOTA: questa ipotesi serve per il solo svolgimento dell'esercizio e non corrisponde al caso reale).

1) Con le approssimazioni usuali, si calcoli l'andamento del potenziale $V(y)$ e della concentrazione di carica mobile $Q_n(y)$ (carica per unità di superficie) lungo il canale.[5]

2) Facendo l'ipotesi che in direzione x la carica sia distribuita uniformemente tra 0 e x_j per ogni y ($Q_n(x,y) = Q_n(y)/x_j$, con $Q_n(x,y)$ carica per unita' di volume), determinare l'espressione della corrente di diffusione nel canale in direzione y.[3]

3) Calcolare la corrente di diffusione per $y = L$ e confrontarla con la corrente di drift calcolata nel modo usuale. [2]

SOLUZIONE 1

1) Essendo il Gate di polisilicio drogato contemporaneamente ai pozzetti di Drain e di Source, e quindi di tipo n^+:

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

È immediato calcolare la tensione di soglia V_{TH}:

$$\begin{aligned}C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 6.90 \times 10^{-4} \qquad \text{F/m}^2 \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| = 0.508 \qquad \text{V}\end{aligned}$$

Quindi il transistore è polarizzato con $V_{DS} = V_{DSSat} = V_{GS} - V_{TH} 4.49$ V. Poiché il testo suggerisce come ipotesi semplificativa di assumere lineare il campo elettrico lungo il canale, e pari a 0 per $y = 0$ (in prossimità del Source) esso avrà come espressione ($0 \leq y \leq L$):

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -A\ y \\ \frac{dV}{dy} &= A\ y \end{aligned}$$

dove A è una costante da determinare. Il potenziale è dato da:

$$V(y) = A\ \frac{y^2}{2}\ +\ Cost.$$

Assumendo $V(0) = 0$ avremo $Cost. = 0$:

$$V(y) = A\ \frac{y^2}{2}$$

Poiché $V_{DS} = V_{DSSat}$ e quindi $V(L) = V_{DSSat}$:

$$\begin{aligned} V_{DSSat} &= A\ \frac{L^2}{2} \\ A &= \frac{2\ V_{DSSat}}{L^2} \end{aligned}$$

Avremo dunque:

$$V(y) = \frac{V_{DSSat}}{L^2} y^2$$

Con le approssimazioni usuali è immediato calcolare la carica mobile nel canale in funzione di y:

$$\begin{aligned} V_{GS} &= -\frac{Q_W(2\psi_B) + Q_n(y)}{C_{ox}} + 2\psi_B + V(y) - |\Phi_{MS}| \\ V_{GS} &= V_{TH} + V(y) - \frac{Q_n(y)}{C_{ox}} \\ -Q_n(y) &= C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH} - V(y)\right) \\ -Q_n(y) &= C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DSSat}}{L^2} y^2\right) \end{aligned}$$

che per $y = L$ da come risultato 0: infatti per $V_{DS} = V_{DSSat}$ la carica mobile in prossimità del Drain é 0 ed il canale é strozzato.

2) Dall'espressione della carica mobile in funzione di y é immediatamente calcolabile l'espressione della corrente di diffusione, che risulta anch'essa funzione di y. Da notare: la dipendenza da x scompare:

$$\begin{aligned}
I_{DSDiff}(y) &= -q\ S\ D_n \frac{dQ_n(x,y)/x_j}{dy} \\
I_{DSDiff}(y) &= -q\ W\ x_j\ D_n \frac{dQ_n(x,y)/x_j}{dy} \\
I_{DSDiff}(y) &= -q\ W\ D_n \frac{dQ_n(x,y)}{dy}
\end{aligned}$$

Questa è una buona approssimazione per ottenere una stima della corrente di diffusione nel canale. Svolgendo i conti troviamo ($D_n = \frac{kT}{q}\mu_n$):

$$I_{DSDiff}(y) = 2WC_{ox}\ \frac{kT}{q}\mu_n \frac{V_{DSSat}}{L^2} y$$

3) A questo punto è immediato calcolare la corrente di diffusione in corrispondenza del Drain ($y = L$):

$$\begin{aligned}
I_{DSDiff}(L) &= 2WC_{ox}\ \frac{kT}{q}\mu_n \frac{V_{DSSat}}{L} \\
I_{DSDiff}(L) &= 13.8 \qquad \mu\text{A}
\end{aligned}$$

mentre la corrente di drift calcolata con l'espressione usuale risulta:

$$\begin{aligned}
I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{2L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 \\
I_{DS} &= 0.56 \qquad \text{mA}
\end{aligned}$$

ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Una giunzione p^+n brusca ha le seguenti caratteristiche: $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_p = 400$ cm^2/Vs, τ_p=10^{-7} s, lunghezza W della zona n (distanza giunzione - contatto n) = 10 μm, sezione 1 mm^2. La giunzione è polarizzata con $V = 0.5$ V.

1) Calcolare il profilo dei portatori minoritari (trascurare l'ampiezza della regione di svuotamento). [5]

2) Calcolare la corrente nella giunzione. [2]

3) Calcolare la corrente nella giunzione con il metodo a controllo di carica. Perchè viene diversa? (giustificare la risposta). [3]

SOLUZIONE 2

1) Come suggerito dal testo, il diodo non è né a base lunga, né a base corta. Infatti:

$$\begin{aligned} D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.04 \times 10^{-3} \\ L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 10.2 \qquad \mu\text{m} \end{aligned}$$

Per determinare la corrente, bisogna determinare il profilo dei portatori partendo dall'equazione di continuità:

$$\delta_p(x) = A\ e^{x/L_p} + B\ e^{-x/L_p}$$

con le condizioni a contorno:

$$\begin{aligned} \delta_p(0) &= \frac{n_i^2}{N_D}\left(e^{\frac{V}{V_t}} - 1\right) = 5.45 \times 10^{18} = A + B \\ \delta_p(W) &= = 0 = A\ e^{W/L_p} + B\ e^{-W/L_p} \end{aligned}$$

Risolvendo il sistema avremo:

$$\begin{aligned} A &= -8.17 \times 10^{17} \quad \text{m}^{-3} \\ B &= 6.26 \times 10^{18} \quad \text{m}^{-3} \\ \delta_p(W) &= 0 = A\ e^{W/L_p} + B\ e^{-W/L_p} \end{aligned}$$

2) La corrente è calcolabile nel modo consueto:

$$I = -qSD_p \frac{d\delta_p}{dx}_{\ x=0}$$

$$
\begin{aligned}
I &= -qSD_p \frac{dA\ e^{x/L_p} + B\ e{-x/L_p}}{dx}_{x=0} \\
I &= -qSD_p \left(\frac{A}{L_p} - \frac{B}{L_p} \right) = 0.11 \quad \text{mA}
\end{aligned}
$$

3) Secondo il modello a controllo di carica:

$$I = \frac{Q}{\tau_p}$$

dove Q è la carica immagazzinata della giunzione e dovuta ai portatori minoritari iniettati:

$$Q = Sq \int_0^W \delta_p(x) dx$$

e quindi, svolgendo i conti:

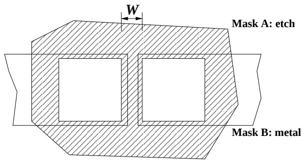
$$
\begin{aligned}
Q &= SqL_p \left[A\left(e-1\right) - B\left(\frac{1}{e} - 1\right) \right] \\
Q &= 4.17 \times 10^{-12}
\end{aligned}
$$

La corrente, calcolata con il metodo del controllo di carica, risulta dunque:

$$I = 41.7 \qquad \mu\text{A}$$

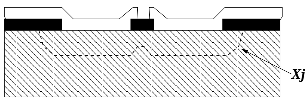
Risulta più piccola della corrente totale del diodo perchè tiene conto solo dei portatori minoritari che si ricombinano nel silicio. Essendo pero' il diodo a base media, una parte consistente di minoritari arriva al contatto e si ricombina direttamente qui.

ESERCIZIO 3 (DTE) Su un substrato drogato con B ($N_A = 10^16$ cm^{-3}) si cresce termicamente un layer di ossido di 1 μm di spessore (si supponga il drogaggio p uniforme anche dopo il processo di ossidazione). Viene poi eseguito un passo di litografia e di dry etch perfettamente anisotropo, usando la maschera A di figura 1. Viene effettuato un processo di predeposizione di P a 900 ^{o}C per 10' ($C_s = 5 \times 10^{20}$ cm^{-3}, $D_{0j} = 4.7$ cm^2/s, E_{aj}=3.68 eV. e di drive-in per 60' a 1100 ^{o}C. Si consideri la diffusione uniforme in tutte le direzioni. Viene poi deposta una metal e definita secondo la maschera in figura. 1) Per $W = 2$ μm si esegua un disegno qualitativo della sezione finale e si indichi il dispositivo ottenuto. [6] 2) Si determini la minima distanza W tale che le due giunzioni siano indipendenti (con la parte p a comune). [4]



SOLUZIONE 3

1) Qualitativamente, la sezione finale del dispositivo appare come in figura: in cui è evidenziata la linea x_j della giunzione per cui $N_D x_j = N_A$. Il



dispositivo quindi si presenta come un resistore di silicio drogato di tipo n. Per verificare che le due regioni di diffusione non sono indipendenti, bisogna calcolare x_j.
Calcoliamo il coefficiente di diffusione D_j alla temperatura di predeposizione (900 ^{o}C=1173 K):

$$\begin{aligned} D_j &= D_{0j} e^{-\frac{E_{aj}}{kT}} \\ D_j &= 7.21 \times 10^{-16} \qquad \mathrm{cm}^2/\mathrm{s} \end{aligned}$$

La dose predeposta Q_s risulta dunque:

$$\begin{aligned} Q_s &= C_s \frac{2\sqrt{D_j t_{predep}}}{\sqrt{\pi}} \\ Q_s &= 3.7 \times 10^{14} \qquad \mathrm{cm}^{-2} \end{aligned}$$

Il profilo gaussiano finale dopo il drive-in sarà dato da:

$$D_j(1100\ ^oC) = 1.5 \times 10^{-13}$$

$$
\begin{aligned}
Q(x) &= \frac{Q_s}{\sqrt{\pi D_j t_{drive-in}}}\; e^{-\frac{x^2}{4D_j t_{drive-in}}} \\
Q(x) &= 8.98 \times 10^{18}\; e^{-\frac{x^2}{4D_j t_{drive-in}}}
\end{aligned}
$$

e la profondità di giunzione x_j risulta:

$$
\begin{aligned}
x_j &= \sqrt{4D_j t_{drive-in} \ln\left(\frac{8.98 \times 10^{18}}{10^{16}}\right)} \\
x_j &= 1.2 \times 10^{-4} \quad \text{cm} \\
x_j &= 1.2 \quad \mu\text{m}
\end{aligned}
$$

Quindi i due pozzetti di tipo n sono uniti per la sottodiffusione.

2) La minima distanza W per avere due giunzioni np con substrato p a comune risulta dunque 2.4 μm.

ESERCIZIO 4 (DE)

Con riferimento al circuito in figura, i due transistori hanno entrambi β_f=300; $V_{CC} = 12$ V; $V_Z = 4.7$ V.

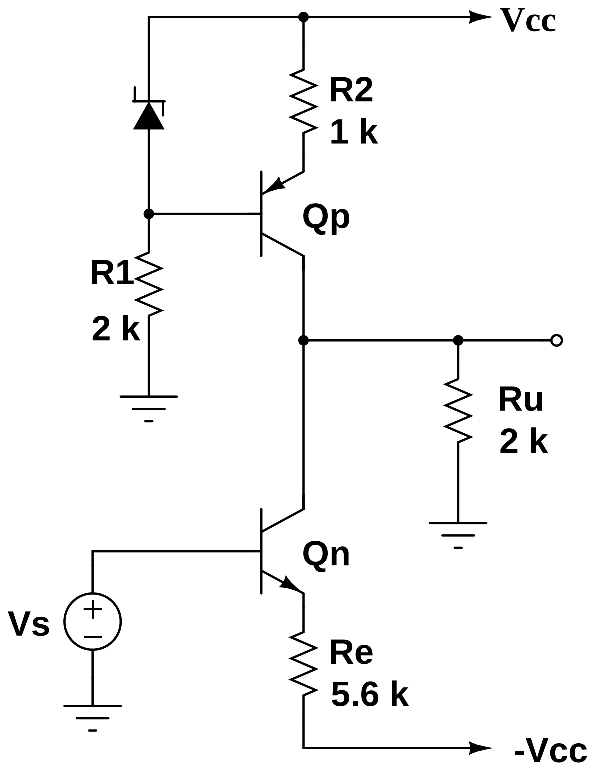
1) Calcolare il punto di riposo.

2) Considerando il diodo zener ideale (corto circuito per le variazioni) e $h_{oe} \to \infty$ per entrambi i transistori, disegnare il circuito equivalente per le variazioni.

SOLUZIONE 4

1) Il transistore Q_p è polarizzato in modo tale da funzionare da generatore di corrente, poichè la sua tensione di base è fissata dal diodo zener. La caduta di tensione sulla resistenza R_2 risulta pari a $V_Z - V_\gamma$= 4 V e la corrente $I_{Ep} \simeq I_{Cp}$ risulta pari a 4/1 k= 4 mA. Il diodo zener è polarizzato con una corrente pari a:

$$I_Z = \frac{V_{CC} - V_Z}{R_1} = 3.65 \text{ mA}$$



e quindi risulta correttamente polarizzato oltre il ginocchio.
Anche la corrente di Q_n risulta fissata dal fatto che la base è a massa per il calcolo del punto di riposo, la tensione V_E sull'emettitore risulta $0-V_\gamma = -0.7$ V e quindi la corrente $I_{En} \simeq I_{Cn}$ risulta pari a:

$$\frac{-V_\gamma - (-V_{CC})}{R_E} = 2.1 \text{ mA}$$

La corrente che scorre in R_u è data dalla differenza tra le due correnti di collettore:

$$I_{Ru} = I_{Cp} - I_{Cn} = 1.9 \text{ mA}$$

Questo fissa la tensione di uscita a riposo, nonchè la tensione dei due collettori:

$$V_u = V_{Cn} = V_{Cp} = 3.8\ (V)$$

Avremo dunque per il transistore p i seguenti dati per il punto di riposo:

$$V_{CEp} \;=\; V_{Ep} - V_{Cp} = 12 - 4 - 3.8 = 4.2\ (V)$$

$$
\begin{aligned}
I_{Cp} &\simeq I_{Ep} = 4 \text{ mA} \\
I_{Bp} &= \frac{I_{Cp}}{\beta_f} = 13.3\ \mu\text{A} \\
V_{BEp} &\simeq V_\gamma = 0.7 \text{ V}
\end{aligned}
$$

Mentre per il transistore n avremo:

$$
\begin{aligned}
V_{CEn} &= V_{Cn} - V_{En} = 3.8 - 0.7 = 3.1\ (V) \\
I_{Cn} &\simeq I_{En} = 1.9 \text{ mA} \\
I_{Bn} &= \frac{I_{Cn}}{\beta_f} = 6.3\ \mu\text{A} \\
V_{BEn} &\simeq V_\gamma = 0.7 \text{ V}
\end{aligned}
$$

2) Il circuito equivalente delle variazioni risulta come in figura. Da notare che il transistore p non svolge alcuna funzione per le variazioni, in quanto i_{bp} è fissa: il transistore si comporta come generatore di corrente ideale, poichè abbiamo trascurato h_{oep}.