

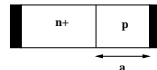
DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 27 Gennaio 2014

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) La giunzione n^+p in figura ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3} , $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs , $\tau_n = 10^{-6}$ s, $\mu_p = 0.045$ m^2/Vs , $\tau_p = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2), distanza giunzione-contatto $a = 30$ μm , è illuminata uniformemente con una intensità luminosa tale da generare 10^{16} coppie elettrone-lacuna per cm^3 , per secondo. Trascurare la regione di svuotamento.

1) Nel caso $V = 0.3$ V determinare il profilo di portatori minoritari nella giunzione.[4]

2) Determinare la corrente per $V = 0.3$ V. [3]

3) Determinare la corrente per $V = -5$ V. [3]



ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor n -MOS con gate in polisilicio è caratterizzato da $N_A = 10^{16}$ cm^{-3} , $t_{ox} = 30$ nm, $W = 3$ μm , $L = 1$ μm , $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs . Viene polarizzato con $V_{GS} = 5$ V.

1) Nel caso $V_{DS} = 0.1$ V (regime lineare) determinare la carica totale fissa e mobile nel canale, e l'andamento del potenziale e del campo elettrico nel canale.[4]

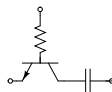
2) Nel caso $V_{DS} = 2$ V determinare l'andamento del potenziale e del campo elettrico nel canale ($\epsilon_{critico} \rightarrow \infty$). [4]

3) Considerare l'espressione del campo elettrico ottenuta nel punto (2). Supponendo che il campo elettrico critico sia invece pari a $\epsilon_C = 10^6$ V/m dire se l'espressione è corretta.[2]

ESERCIZIO 3 (DTE)

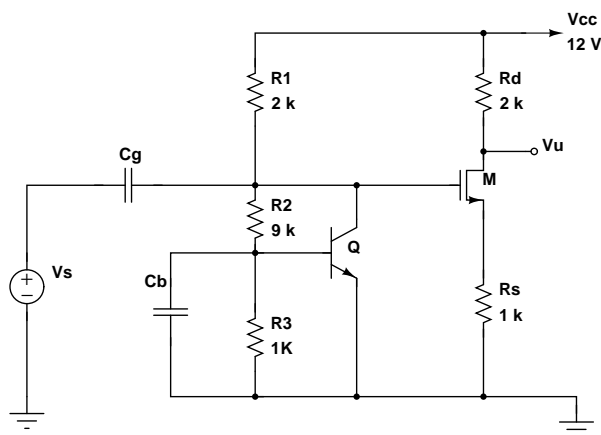
1) Descrivere le maschere per la fabbricazione, mediante il processo SBC, del circuito illustrato in figura.[5]

2) Disegnare il profilo di drogaggio netto a) dall'emettitore al silicio bulk di tipo p e b) dal contatto di collettore al silicio bulk di tipo p , per un transistor realizzato mediante processo SBC.[5]



ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, Q è un transistor bipolare con $\beta_{fmin.} = 300$, $h_{oe} \rightarrow 0$. M è un transistor n -MOS con $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W = L$; il condensatore MOS con cui è realizzato è stato caratterizzato con una misura $C-V$ a bassa frequenza da cui è risultata una capacità massima per unità di superficie pari a $8 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$, mentre la capacità minima è stata misurata per $V_{GSubstrato} = 1 \text{ V}$:

1) Determinare lo spessore dell'ossido e la funzione di lavoro del gate.[4]



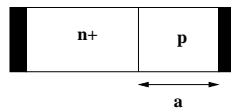
- 2) Calcolare il punto di riposo dei transistori ($V_{BE} = 0.7 \text{ V}$).[4]
 3) Disegnare il circuito equivalente per le variazioni.[2]

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) La giunzione n^+p in figura ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$), $a = 30 \text{ }\mu\text{m}$. La giunzione è illuminata uniformemente con una intensità luminosa tale da generare 10^{16} coppie elettrone-lacuna per cm^3 , per secondo. Trascurare la regione di svuotamento.

1) Nel caso $V = 0.3 \text{ V}$ determinare il profilo di portatori minoritari nella giunzione.[4]

2) Determinare la corrente per $V = 0.3 \text{ V}$. [3]

3) Determinare la corrente per $V = -5 \text{ V}$. [3]



SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo i vari parametri:

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

$$L_n = \sqrt{D_p \tau_p} = 50.89 \quad \mu\text{m}$$

L'equazione di continuità per l'eccesso di elettroni, a regime, risulta ($\tau = \tau_p$):

$$0 = D_n \frac{d^2 \delta n}{dx^2} - \frac{\delta n}{\tau} + G_{OP} \quad (1)$$

La soluzione generale può essere scritta come:

$$\delta n(x) = A e^{-\frac{x}{L_n}} + B e^{\frac{x}{L_n}} + G_{OP} \tau \quad (2)$$

Dalle condizioni a contorno in $x = 0$ (relazione di Shockley) e $x = a$ avremo:

$$A + B + G_{OP} \tau = n_{p0} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

$$A e^{-\frac{a}{L_n}} + B e^{\frac{a}{L_n}} + G_{OP} \tau = 0$$

Quindi:

$$\begin{aligned}A + B + 10^{16} &= 2.41 \times 10^{15} \quad \text{m}^{-3} \\0.555A + 1.80B + 10^{16} &= 0\end{aligned}$$

Svolgendo i conti otteniamo:

$$\begin{aligned}A &= -2.93 \times 10^{15} \\B &= -4.66 \times 10^{15}\end{aligned}$$

Da cui si può scrivere:

$$\delta n(x) = -2.93 \times 10^{15} e^{-\frac{x}{L_n}} - 4.66 \times 10^{15} e^{\frac{x}{L_n}} + 10^{16} \quad (3)$$

2) Per il calcolo della corrente si procede nel modo usuale, cioè si calcola la corrente di diffusione di lacune in $x = 0$ (cioè all'estremo della regione di svuotamento, la cui ampiezza è stata trascurata):

$$\begin{aligned}I &= +qSD_n \frac{d\delta n}{dx} \Big|_{x=0} \\I &= +qS \frac{D_n}{L_n} (-A + B) \\I &= +1.41 \times 10^{-8} \quad \text{A}\end{aligned}$$

la tensione di polarizzazione $V = 0.3$ V è ovviamente da considerarsi in diretta (+ alla parte p), quindi la corrente (positiva) scorre in inversa. Questo è dovuto alla presenza dell'illuminazione.

3) Nel caso di $V = -5$ V (polarizzazione inversa, - alla parte p), bisogna ripetere tutti i passaggi, con la diversa condizione a contorno in $x = 0$. L'esercizio suggerisce di trascurare la regione di svuotamento, per semplificare i conti. Questa approssimazione è sicuramente valida per i primi due punti. Per questo punto sarebbe bene mettere in conto la regione di svuotamento. Seguiamo comunque il suggerimento del testo:

$$\begin{aligned}A + B + G_{OP}\tau &= -n_{p0} \\Ae^{-\frac{a}{L_n}} + Be^{\frac{a}{L_n}} + G_{OP}\tau &= 0\end{aligned}$$

Avremo:

$$\begin{aligned}A &= -1.357 \times 10^{16} \\B &= 3.57 \times 10^{15}\end{aligned}$$

Quindi la corrente risulta:

$$\begin{aligned}I &= +qSD_n \frac{d\delta n}{dx} \Big|_{x=0} \\I &= +qS \frac{D_n}{L_n} (-A + B) \\I &= +1.39 \times 10^{-7} \quad \text{A}\end{aligned}$$

La corrente scorre ancora dalla parte n alla parte p (è positiva), come nel caso precedente e, in valore assoluto risulta, maggiore della precedente.

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor n -MOS con gate in polisilicio è caratterizzato da $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $L = 1 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$. Viene polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$.

1) Nel caso $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ (regime lineare) determinare la carica totale fissa e mobile nel canale, e l'andamento del potenziale e del campo elettrico nel canale.[4]

2) Nel caso $V_{DS} = 2 \text{ V}$ determinare l'andamento del potenziale e del campo elettrico nel canale ($\epsilon_{critico} \rightarrow \infty$).[4]

3) Considerare l'espressione del campo elettrico ottenuta nel punto (2). Supponendo che il campo elettrico critico sia invece pari a $\epsilon_C = 10^6 \text{ V/m}$ dire se l'espressione è corretta.[2]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia (Φ_{MS} in valore assoluto, si sottrae dalla V_{TH}):

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

$$\begin{aligned}\Phi_{MS} &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \quad \text{V} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \Phi_{MS} = 0.23 \quad \text{V}\end{aligned}$$

In zona lineare (per piccole V_{DS}) il potenziale lungo il canale può essere considerato praticamente lineare, che vuol dire campo elettrico costante:

$$\begin{aligned}\epsilon &= \frac{V_{DS}}{L} = 10^5 \quad \text{V/m} \\ V(y) &= \frac{V_{DS}}{L}y\end{aligned}$$

Dato che V_{DS} è piccola e si può trascurare, la carica nel canale è data da:

$$\begin{aligned}Q_n &= WLC_{ox}(V_{GS} - V_{TH}) = 1.64 \times 10^{-14} \quad \text{C} \\ Q_W &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}WL = 1.45 \times 10^{-15} \quad \text{C}\end{aligned}$$

2) Per $V_{DS} = 2 \text{ V}$ e $V_{GS} = 5 \text{ V}$ il transistor è in zona triodo. Quindi avremo:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = 2.08 \quad \text{mA} \quad (4)$$

Sarà anche vero che, per ogni generico punto y del canale:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{y} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V(y) - \frac{V(y)^2}{2} \right] = 2.08 \quad \text{mA} \quad (5)$$

Da questa equazione di secondo grado possiamo ricavarci $V(y)$, in funzione di y , ottenendo:

$$V(y) = 4.77 - \sqrt{22.75 - 15.08 \times 10^6 y} \quad (6)$$

Che da correttamente $V(L) = V_{DS} = 2 \text{ V}$. Per ottenere il campo elettrico basta fare la derivata:

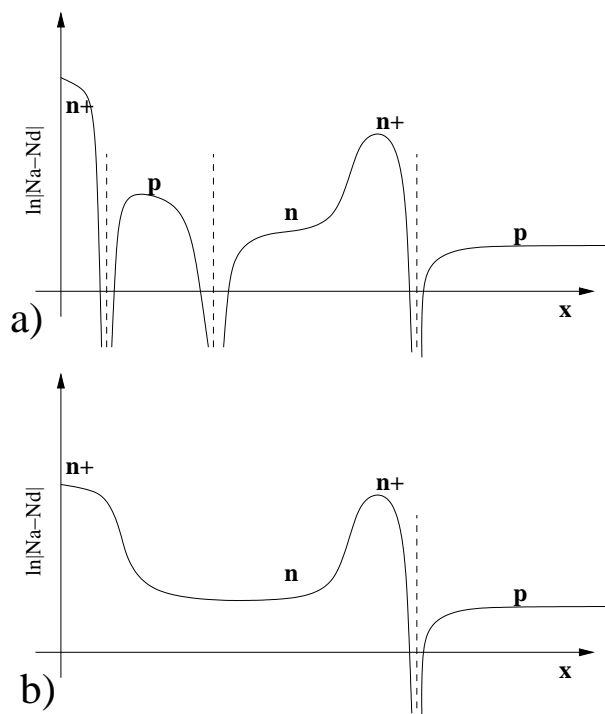
$$\epsilon(y) = -\frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{15.08 \times 10^6}{2\sqrt{22.75 - 15.08 \times 10^6 y}} \quad (7)$$

3) Il campo elettrico massimo risulta in prossimità del drain, per $y = 1 \mu\text{m}$, e risulta $\varepsilon_{max} = 2.7 \text{ MV/m}$, molto più grande del campo elettrico critico. Quindi il transistor è ampiamente in saturazione di velocità, e in questo caso l'espressione usata per il calcolo della corrente non è corretta.

ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere le maschere per la fabbricazione, mediante il processo SBC, del circuito illustrato in figura.[5]

2) Disegnare il profilo di drogaggio netto a) dall'emettitore al silicio bulk di tipo p e b) dal contatto di collettore al silicio bulk di tipo p , per un transistor realizzato mediante processo SBC.[5]

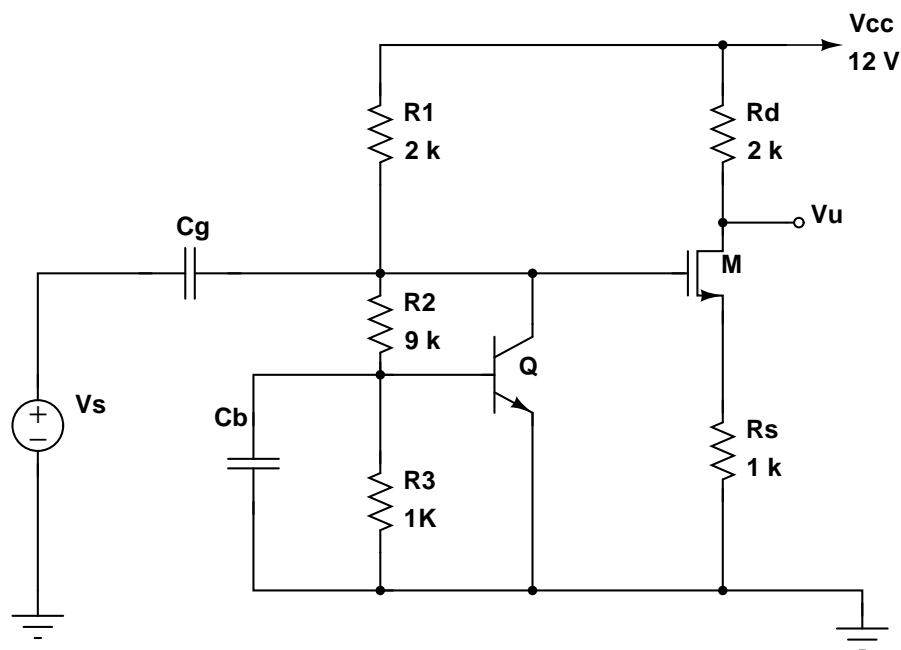
SOLUZIONE 3



1) Innanzitutto tutti e tre i dispositivi (transistore, condensatore e resistenza) possono essere fabbricati nella stessa well di isolamento. Il condensatore sul collettore può essere realizzato sfruttando, come armatura inferiore, la diffusione n^+ del contatto di collettore; come armatura superiore può essere sfruttata una metal. La maschera del contatto di collettore, e la metal per il contatto di collettore, può essere disegnata appositamente. La resistenza può essere realizzata mediante la diffusione di base, la cui maschera, con il relativo contatto, può essere facilmente disegnata.

2) Un disegno di massima dei due profili di drogaggio netto (logaritmo del valore assoluto della differenza tra le concentrazioni di droganti, $\ln|N_A - N_D|$, in funzione della profondità x) appare come segue:

ESERCIZIO 4 (DE)



Nel circuito in figura, Q è un transistore bipolare con $\beta_{fmin.} = 300$, $h_{oe} \rightarrow 0$. M è un transistore n -MOS con $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $W = L$, $\mu_n = 0.08$

$\text{m}^2/\text{V s}$; il condensatore MOS con cui è realizzato è stato caratterizzato con una misura $C - V$ a bassa frequenza da cui è risultata una capacità massima per unità di superficie pari a $8 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$, mentre la capacità minima è stata misurata per $V_{G\text{Substrato}} = 1 \text{ V}$:

1) Determinare lo spessore dell'ossido e la funzione di lavoro del gate.[4]

SOLUZIONE 4

1) Dalla caratterizzazione $C - V$ otteniamo subito $C_{ox} = 8 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$, da cui:

$$t_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 43 \quad \text{nm} \quad (8)$$

Ancora dalla caratterizzazione $C - V$ abbiamo che il minimo della capacità si ha per $V_{G\text{Subst}} = V_{TH} = 1 \text{ V}$. Quindi:

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.329 \quad \text{V}$$

$$V_{th} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS}$$

$$\Phi_{MS} = V_{th} - \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B = 0.07 \quad \text{V}$$

$$\Phi_M = \Phi_S + 0.07 = \chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B + 0.07 = 5.04 \quad \text{V}$$

2) Per il punto di riposo, dobbiamo calcolare la tensione di collettore, che è imposta dalla tensione di base $V_B = V_{BE} = 0.7 \text{ V}$:

$$V_C = V_{CE} = 0.7 \frac{R_3 + R_2}{R_3} = 7 \quad \text{V}$$

$$V_G = V_C$$

Da qui possiamo risolvere il resto del circuito:

$$I_{R1} = \frac{V_{CC} - V_B}{R_1} = 2.5 \quad \text{mA}$$

$$I_{R2-R3} = \frac{V_B}{R_2 + R_3} = 0.7 \quad \text{mA}$$

$$I_C = I_{R1} - I_{R2-R3} = 1.8 \quad \text{mA}$$

Dove si è fatto uso dell'approssimazione di partitore pesante $I_B = I_C / \beta_{fmin} = 2.3 \mu\text{A} \ll I_{R2-R3}$. A questo punto possiamo calcolarci la corrente nel transistor MOS, ipotizzando che sia in saturazione:

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

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

Risolvendo l'equazione di secondo grado otteniamo $I_{DS} = 0.85 \text{ mA}$, da cui risulta $V_{DS} = V_{CC} - R_D I_{DS} - R_S I_{DS} = 9.45$, per cui il MOS è sicuramente in saturazione. Riassumendo, per Q :

$$I_C \simeq I_E = 1.8 \quad \text{mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{fmin}} = 2.3 \quad \mu\text{A}$$

$$V_{BE} \simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V}$$

$$V_{CE} = 7 \quad \text{V}$$

Per M :

$$I_{DS} = 0.85 \quad \text{mA}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_S I_{DS} = 6.15 \quad \text{V}$$

$$V_{DS} = 9.45 \quad \text{V}$$

3) Il circuito equivalente risulta (condensatori cortocircuitati):

