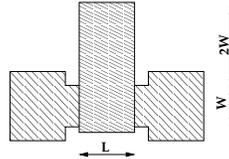


DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 20 Giugno 2011

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistor bipolare n^+pn , con $N_{Abase} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dcollettore} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$, è polarizzato con $I_B = 10 \mu\text{A}$ e $V_{CE} = 5 \text{ V}$; è stata misurata una corrente I_C pari a 2 mA .

- 1) Determinare la lunghezza effettiva di base e le tensioni ai morsetti (V_{CB} e V_{BE}).[4]
- 2) Determinare la lunghezza metallurgica di base (senza trascurare le regioni di svuotamento).[3]
- 3) A $t = 0$ il generatore di corrente viene scollegato ($I_B = 0$ per $t > 0$, V_{CE} costante). Facendo e discutendo le approssimazioni opportune, calcolare ed eseguire il grafico dell'andamento della corrente di collettore nel tempo.[3]

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un processo polysilicon gate (substrato p , $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{oxgate} = 30 \text{ nm}$) è utilizzato per realizzare un circuito, tra cui il transistor MOS in figura ($L = 5 \mu\text{m}$, $W = 5 \mu\text{m}$). Al di fuori dell'area attiva, è stato effettuato un drogaggio di channel stop $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. All'interfaccia silicio-ossido dell'ossido di gate è stata rilevata una concentrazione di ioni sodio (positivi) pari a $5 \times 10^{11} \text{ ioni/cm}^2$. 1) Sapendo che la tensione massima di alimentazione del

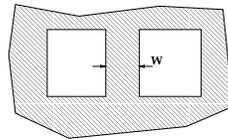


circuito sarà pari a $V_{CC} = 5 \text{ V}$, determinare il minimo spessore di ossido di campo che garantisce l'isolamento dei dispositivi.[5]

2) Viene eseguita una misura C-V ad alta frequenza sulla pista di gate del dispositivo in figura ($V_{THfield} = 5 \text{ V}$). Calcolare la capacità totale alle diverse tensioni ed eseguire un grafico quotato della curva C-V (struttura MOS, source e drain non collegati).[5]

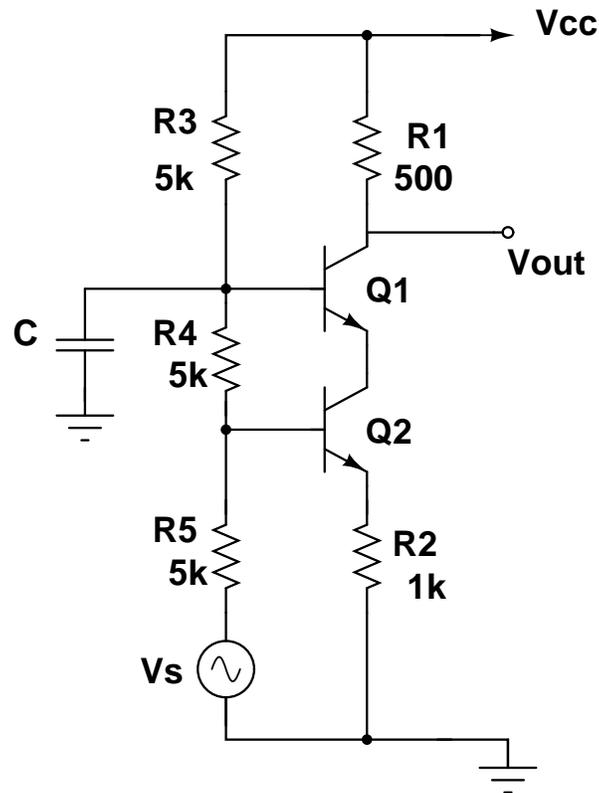
ESERCIZIO 3 (DTE) La maschera in figura viene utilizzata per effettuare una litografia su un substrato di tipo n , drogato 10^{16} cm^{-3} , e con un layer di ossido spesso 100 nm . Vengono poi effettuati i passi di processo seguenti: 1) attacco wet dell'ossido per 4 minuti (velocità di attacco 50 nm/min); 2) rimozione del resist; 3) predeposizione B (boro) $800 \text{ }^\circ\text{C}$ per 10 minuti ($D_{0j} = 0.75 \text{ cm}^2/\text{s}$, $E_{aj} = 3.5 \text{ eV}$, $C_s = 4.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$, profilo di predeposizione a delta di Dirac); 4) drive-in $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ per 1 minuto.

- 1) Eseguire un disegno di una sezione longitudinale, dopo l'attacco dell'ossido.[3]
- 2) Calcolare la profondità di giunzione.[4]
- 2) Sapendo che la diffusione laterale è pari al 70 % della profondità di giunzione, calcolare la minima distanza W necessaria a garantire l'indipendenza delle due aree di diffusione.[3]



ESERCIZIO 4 (DE) I transistori del circuito in figura hanno $\beta = 200$, $V_{CC} = 12 \text{ V}$.

- 1) Determinare il punto di riposo dei transistori (condensatore aperto).[6]
- 2) Disegnare il circuito equivalente per le variazioni (condensatore chiuso, $h_{oe} \rightarrow 0$).[4]



ESAME DE e DTE del 20 Giugno 2011

SOLUZIONE 1

1) Dalle condizioni di polarizzazione è possibile ricavare immediatamente il β e l' α_f :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = 200$$

$$\beta = \frac{\alpha_f}{1 - \alpha_f}$$

$$\alpha_f = \frac{\beta}{\beta + 1} = 0.995024875$$

Ricordando che $\gamma = 1$, poichè l'emettitore è pesantemente drogato, avremo che il parametro α_f è il fattore di trasporto in base α_t , che dipende direttamente dalla lunghezza effettiva di base W .

$$\alpha_f = \alpha_t = \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n^2}}$$

dove:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{\frac{kT}{q} \mu_n \tau_n} = 50.89 \text{ } \mu\text{m}$$

Quindi:

$$W = L_n \sqrt{2 \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)} = 5.1 \mu\text{m}$$

Per determinare le tensioni ai morsetti, bisogna determinare la carica immagazzinata in base, che dipende dall'eccesso di portatori minoritari $\delta n_p(0)$ alla giunzione base-emettitore, e quindi dalla tensione di polarizzazione base-emettitore.

$$Q_B = \frac{qS\delta n_p(0)W}{2} = I_B\tau_n$$

$$\delta n_p(0) = \frac{2I_B\tau_n}{qSW} = 4.89 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

Dalla relazione di Shockley ($n_{p0} = n_i^2/N_{Abase}$):

$$\delta n_p(0) = n_{p0} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \simeq n_{p0} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$V_{BE} = V_T \ln \left(\frac{\delta n_p(0)}{n_i^2/N_{Abase}} \right) = 0.54 \text{ V}$$

e di conseguenza $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 4.46 \text{ V}$.

2) Basta calcolare le regioni di svuotamento nella base e sommarle alla lunghezza effettiva di base, calcolata al punto precedente. Per la regione di svuotamento base-emettitore:

$$V_{0BE} = \frac{E_g}{q} - \frac{E_F - E_{Vbase}}{q} = 1.08 - V_T \ln \left(\frac{N_V}{N_{Abase}} \right) = 0.883 \text{ V}$$

$$X_{BE} = W_{BE} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_{Abase}} (V_{0BE} - V_{BE})} = 0.3 \mu\text{m}$$

La regione di svuotamento base-collettore si determina come:

$$V_{0BC} = V_T \ln \left(\frac{N_{Abase} N_{Dcollettore}}{n_i^2} \right) = 0.617 \text{ V}$$

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_{Abase}} + \frac{1}{N_{Dcollettore}} \right) (V_{0BC} + V_{CB})} = 2.83 \mu\text{m}$$

Questa regione di svuotamento si ripartisce tra base e collettore. La parte che interessa la base sarà data da:

$$X_{BC} = W_{BC} \frac{N_{Dcollettore}}{N_{Abase} + N_{Dcollettore}} = 0.47 \mu\text{m}$$

Quindi la lunghezza metallurgica W_{met} della base risulta:

$$W_{met} = W + X_{BC} + X_{BE} = 5.9 \mu\text{m}$$

3) È immediato valutare l'andamento della carica di base nel tempo:

$$Q_B(t) = Q_B(t = 0^+) e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

$$Q_B(t) = I_B(t = 0^-) \tau_n e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

Per determinare la corrente di collettore, possiamo far uso del modello a controllo di carica:

$$I_C(t) = \frac{Q_B(t)}{\tau_t}$$

dove il tempo di transito τ_t dipende dal coefficiente di diffusione D_n e dalla lunghezza effettiva di base W :

$$\tau_t = \frac{W(t)^2}{2D_n}$$

In questa relazione è stato messo in evidenza che la lunghezza effettiva di base cambia nel tempo, poichè per V_{CE} costante cambia V_{BE} e quindi anche V_{BC} . Di conseguenza si modificano le regioni di svuotamento, ed in particolare la regione base-emettitore che è comparabile con quella base-collettore per il basso drogaggio del collettore. L'approssimazione da fare è che W rimanga quasi costante. Con questa approssimazione:

$$\tau_t = 5 \times 10^{-9} \text{ s}$$

e quindi:

$$I_C(t) = I_B(t = 0^-) \frac{\tau_n}{\tau_t} e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

$$I_C(t) = \beta I_B(t = 0^-) e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

SOLUZIONE 2

1) L'isolamento è garantito se la struttura MOS poly- n^+ del gate - ossido di campo - silicio $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ha una tensione di soglia maggiore di quella massima di alimentazione. Avremo dunque:

$$\psi_B(10^{17}) = V_T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.41 \text{ V}$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{\epsilon_{ox}} t_{field} + 2\psi_b + \Phi_{MS}$$

dove:

$$\Phi_{MS} = -(E_g/2q + \psi_B) = -0.91$$

$$V_{TH} = 5 \text{ V}$$

Da qui possiamo immediatamente ricavare t_{field} :

$$t_{field} = \frac{\epsilon_{ox} (V_{TH} - 2\psi_B + 0.91)}{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}} = 106 \text{ nm}$$

2) Indichiamo con:

$$C_{ox-field} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{field}} = 3.2 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

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

Per tensioni negative entrambe le strutture MOS sono in accumulazione, e la capacità totale risulta (le capacità dell'ossido di campo e dell'ossido di gate nell'area attiva sono ovviamente in parallelo):

$$C = C_{ox-field} \times 2WL + C_{ox} \times WL = 4.5 \times 10^{-14} \quad \text{F}$$

Quando la struttura MOS dell'area attiva è invertita, ad una tensione pari a:

$$\begin{aligned} \psi_B(10^{16}) &= V_T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad \text{V} \\ \Phi_{MS} &= -(E_g/2q + \psi_B) = -0.887 \quad \text{V} \\ Q_{ox} &= 5 \times 10^{15} \times q = 8.01 \times 10^{-4} \text{C/m}^2 \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_b + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 0.441 \quad \text{V} \end{aligned}$$

Per questa tensione, la struttura MOS dovuta all'ossido di campo è ancora in accumulazione, mentre la struttura MOS dell'area attiva ha una capacità data da:

$$\begin{aligned} C_{tot} &= \frac{C_{ox} C_{Si}}{C_{ox} + C_{Si}} \\ C_{Si} &= \frac{\epsilon_s}{W(2\psi_B)} \\ W(2\psi_B) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}} 2\psi_B = 0.302 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

Da ciò risulta:

$$\begin{aligned} C_{Si} &= 3.49 \times 10^{-4} \quad \text{F/m}^2 \\ C_{tot} &= 2.67 \times 10^{-4} \quad \text{F/m}^2 \end{aligned}$$

La capacità totale risulta dunque (parallelo capacità MOS di campo e MOS area attiva):

$$C = C_{ox-field} \times 2WL + C_{tot} \times WL = 2.27 \times 10^{-14} \quad \text{F}$$

L'altro punto saliente è per $V = V_{THfield} = 5 \text{ V}$, per cui avremo che anche la struttura MOS con l'ossido di campo è invertita:

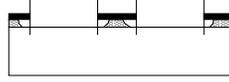
$$\begin{aligned} C_{tot-field} &= \frac{C_{ox-field} C_{Si}}{C_{ox-field} + C_{Si}} \\ C_{Si} &= \frac{\epsilon_s}{W(2\psi_{B-field})} \\ W(2\psi_{B-field}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}} 2\psi_{B-field} = 0.103 \quad \mu\text{m} \\ C_{Si} &= 1.01 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\ C_{tot-field} &= 2.27 \times 10^{-4} \quad \text{F/m}^2 \end{aligned}$$

e quindi la capacità totale risulta:

$$C = C_{tot-field} \times 2WL + C_{tot} \times WL = 1.81 \times 10^{-14} \quad \text{F}$$

SOLUZIONE 3

1) Dal momento che l'attacco wet dell'ossido viene protratto per un tempo doppio rispetto a quello necessario per rimuovere il layer, avremo la situazione in figura, dove l'area di silicio libera da ossido è recessa rispetto alla maschera:



La recessione r dell'ossido approssimativamente è 100 nm, in realtà si può calcolare come:

$$r = \sqrt{200^2 - 100^2} = 173 \quad \text{nm} \quad (1)$$

2) Nel processo di predeposizione avremo una dose Q (atomi di drogante per unità di superficie):

$$Q = C_s \frac{2\sqrt{D_J t}}{\sqrt{\pi}}$$

dove ($T = 1073$ K):

$$D_J = D_{0j} e^{-\frac{E_{aj}}{kT}} = 2.69 \times 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{s}$$

e quindi avremo una $Q = 6.16 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Dopo il processo di drive-in, avremo che il profilo di drogaggio, in direzione perpendicolare alla superficie, sarà dato da (t_{di} tempo di drive-in):

$$N_D(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_J t_{di}}} e^{-\frac{x^2}{4D_J t_{di}}}$$

dove ($T = 1373$ K):

$$\begin{aligned} D_J &= D_{0j} e^{-\frac{E_{aj}}{kT}} = 1.05 \times 10^{-13} \quad \text{cm}^2/\text{s} \\ D_J t_{di} &= 6.32 \times 10^{-12} \quad \text{cm}^2 \\ N_D(x) &= 1.38 \times 10^{18} e^{-\frac{x^2}{2.52 \times 10^{-11}}} \quad 1/\text{cm}^3 \end{aligned}$$

La profondità di giunzione x_j è la coordinata per cui $N_D(x_j) = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$:

$$x_j = \sqrt{2.52 \times 10^{-11} \log \left(\frac{1.38 \times 10^{18}}{10^{15}} \right)} = 11.1 \times 10^{-6} \quad \text{m}$$

La W minima deve tener conto della diffusione da entrambe le parti, e del sottoattacco della maschera.

$$W_{min} = 2 \times 0.173 + 2 \times 0.7 \times 11.1 = 15.89 \quad \mu\text{m}$$

SOLUZIONE 4

1) Facendo l'approssimazione di partitore pesante, la base del transistor 2 si trova ad un potenziale di 4 V ($12 \text{ V} \times 1/3$). Quindi l'emettitore ha un potenziale di 3.3 V ($V_{BE} \simeq V_\gamma = 0.7 \text{ V}$) e la corrente di emettitore è pari a:

$$I_{E2} = \frac{3.3}{R_2} = 3.3 \text{ mA}$$

Facendo l'approssimazione $I_{E2} \simeq I_{C2} = I_{E1} \simeq I_{C1}$, possiamo calcolare immediatamente il potenziale del collettore 1:

$$V_{C1} = V_{CC} - R_1 \times I_{C1} = 10.3 \text{ V}$$

Il potenziale dell'emettitore 1 può essere determinato conoscendo il potenziale di base: $12 \times 2/3 = 8 \text{ V}$. Di conseguenza il potenziale di emettitore è pari a 7.3 V, con l'approssimazione usuale della $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$. Avremo dunque:

$$V_{CE1} = 10.3 - 7.3 = 3 \text{ V}$$

$$V_{CE2} = V_{E2} - V_{E1} = 7.3 - 3.3 = 4 \text{ V}$$

I transistori risultano dunque entrambi in zona attiva diretta, con una corrente di base $I_B = 3.3/200 = 16.5 \mu\text{A}$. La corrente che scorre nel partitore R_3, R_4, R_5 risulta pari a $12/15 = 0.8 \text{ mA}$, molto più grande delle due correnti di base.

2) La base del transistor 1 va a massa, mentre il collettore del transistor 2 è connesso con l'emettitore del transistor 1 (montaggio cascode):

