Prova scritta dell'11/01/07

ESERCIZIO 1

Un metallo ha una struttura FCC con costante reticolare $a = 0.45$ nm. Il tempo di rilassamento vale 1.1×10^{-14} s.

1) Calcolare la resistività in $\Omega \times$cm.

2) Calcolare l'energia media degli elettroni in eV. Si utilizzi la Fermi-Dirac a 0 K.

3) Se il campo applicato vale 100 mV/m calcolare il flusso di elettroni specificando le unità di misura.

ESERCIZIO 2

Una giunzione p^+n è definita da: $N_A = 10^{19}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{15}$ cm^{-3}, $\tau_h = 10^{-5}$ s, $\mu_h = 480$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}, $S = 500 \times 500$ μm^2. La lunghezza della zona n è di 4 μm.

1) Calcolare la corrente quando $V = -6$ volt nei due modi possibili:

i) con il modello del controllo di carica;

ii) utilizzando la derivata del profilo dei minoritari.

2) Se il diodo fosse realizzato in GaAs, in condizioni di polarizzazione diretta emetterebbe luce? Spiegare.

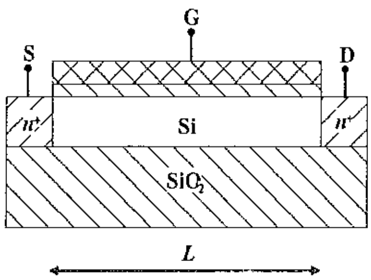
ESERCIZIO 3

La struttura in figura è realizzata su un substrato di silicio su ossido (SOI, silicon on insulator) che ha uno spessore $t = 200$ nm ed è drogato di tipo n ($N_D = 10^{15}$ cm^{-3}). La struttura MOS è ideale (spessore dell'ossido $t_{ox} = 50$ nm), $L = 5$ μm, $W = 5$ μm (in direzione perpendicolare al foglio), la mobilità degli elettroni può essere considerata costante e pari a 900 cm^2/Vs. Per piccoli valori di V_{DS}:

1) calcolare la resistenza per $V_{GS} = 0$;

2) calcolare la resistenza per $V_{GS} = 1$ V (si assuma trascurabile la caduta nel Si);

3) calcolare la resistenza per $V_{GS} = -5$ V.



SOLUZIONE 1

1)

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu}$$

con

$$\mu = \frac{e\tau}{m_0} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1.1 \times 10^{-14}}{9.1 \times 10^{-31}} = 1.934 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^2V^{-1}s^{-1}}$$

$$n = \frac{4}{(4.5 \times 10^{-10})^3} = 4.39 \times 10^{28}\ \mathrm{m^{-3}}$$

$$\rho = \frac{1}{4.39 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.934 \times 10^{-3}} = 7.36 \times 10^{-8}\ \Omega\times\mathrm{m} = 7.36 \times 10^{-6}\ \Omega\times\mathrm{cm}.$$

2)

$$\langle E \rangle = \frac{\int_0^{E_F} En(E)dE}{\int_0^{E_F} n(E)dE} = \frac{\int_0^{E_F} ED(E)f(E)dE}{\int_0^{E_F} D(E)f(E)dE} = \frac{\int_0^{E_F} EE^{\frac{1}{2}}dE}{\int_0^{E_F} E^{\frac{1}{2}}dE} = \frac{\int_0^{E_F} E^{\frac{3}{2}}dE}{\int_0^{E_F} E^{\frac{1}{2}}dE} = \frac{\frac{2}{5}E_F^{\frac{5}{2}}}{\frac{2}{3}E_F^{\frac{3}{2}}} = \frac{3}{5}E_F.$$

Si deve adesso calcolare E_F.

$$n = 2\int_0^{E_F} D(E)dE = 4\pi \left(\frac{2m_0}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{E_F} E^{\frac{1}{2}}dE = \frac{8}{3}\pi \left(\frac{2m_0}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} E_F^{\frac{3}{2}}$$

da cui

$$E_F = \frac{h^2}{2m_0}\left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{\frac{2}{3}} = \frac{(6.62 \times 10^{-34})^2}{2 \times 9.1 \times 10^{-31}} \left(\frac{3 \times 4.39 \times 10^{28}}{8\pi}\right)^{\frac{2}{3}} = 7.26 \times 10^{-19}\ \text{joule}$$

pari a $\frac{7.26}{1.6}$: 4.54 eV. L'energia media richiesta vale quindi $\frac{3}{5} \times 4.54 = 2.72$ eV.

3) La densità di corrente di drift è data da $J = \sigma\mathcal{E}$ e quindi il flusso $F = \frac{\sigma\mathcal{E}}{q}$;

$$F = \frac{\sigma\mathcal{E}}{q} = \frac{10^{-3}}{7.36 \times 10^{-6} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 8.49 \times 10^{20}\ \text{elettroni cm}^{-2}\text{s}^{-1}.$$

SOLUZIONE 2

1) Per avere la lunghezza L della zona neutra si deve calcolare W a -6 volt.

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_0 - V)}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.817 + 6)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 2.98 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}$$

con

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{19} \times 10^{15}}{2.25 \times 10^{20}}\right) = 0.817\ \mathrm{V};$$

$L = 4 - 2.98 = 1.02\ \mu$m.

i)

$$I = \frac{Q}{\tau_t} = -qS\frac{p_{n0}L}{2\tau_t}$$

in cui τ_t è il tempo di transito dato, come è noto da $\frac{L^2}{2D_h}$;

$$\tau_t = \frac{L^2}{2D_h} = \frac{(1.02 \times 10^{-6})^2}{2 \times 0.026 \times 480 \times 10^{-2}} = 4.17 \times 10^{-12} \text{ s}$$

$$I = -1.6 \times 10^{-19} \times 2.5 \times 10^5 \times 10^{-12} \times \frac{2.25 \times 10^{32} \times 1.02 \times 10^{-6}}{10^{21} \times 2 \times 4.17 \times 10^{-12}} = -1.1 \times 10^{-9} \text{ A}$$

ii)

$$I = -qSD_h\frac{d\delta p(x)}{dx}$$

con

$$\delta p(x) = -p_{n0}\left(1 - \frac{x}{L}\right)$$

e quindi

$$I = -qSD_h\frac{p_{n0}}{L}$$

che è uguale all'espressione precedente.

SOLUZIONE 3

1) La struttura si comporta come un resistore, del quale è immediato calcolare il valore ($n = N_D$):

$$R = \frac{1}{q\mu_n n}\frac{L}{Wt} = 390 \text{ k}\Omega$$

2) La struttura MOS è in accumulazione. La tensione V_{GS} può essere scritta con l'espressione usuale:

$$V_{GS} = \frac{Q_n + Q_W}{C_{ox}} + \psi_S$$

dove $Q_W = 0$ poichè non c'è regione di svuotamento. Trascurando ψ_S l'espressione si modifica nella semplice forma:

$$V_{GS} = \frac{Q_n}{C_{ox}}$$

e quindi:

$$Q_n = V_{GS}C_{ox}$$

La resistenza del canale può essere calcolata come:

$$R_{CANALE} = \frac{1}{\mu_n Q_n}\frac{L}{W} = \frac{1}{\mu_n V_{GS} C_{ox}} = 18100 \ \Omega$$

che va in parallelo alla resistenza calcolata precedentemente: quindi la resistenza R_{DS} è praticamente quella del canale in accumulazione.

3) In questo caso la struttura MOS è in inversione ed un canale (di lacune) è presente all'interfaccia ossido-silicio. Questo canale non contribuisce alla conduzione poichè collega due regioni di tipo n^+, che avviene nello strato di silicio come nel punto 1. Lo spessore è però ridotto di una quantità pari alla regione di svuotamento della struttura MOS:

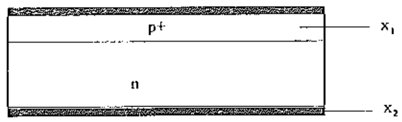
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S 2\psi_B}{qN_D}} = 870 \text{ nm}$$

Quindi lo strato di silicio risulta completamente svuotato e la resistenza è molto elevata.

Prova scritta del 30/01/07

ESERCIZIO 1

Su un wafer di Si n ($N_D = 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_{hn} = 470$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}, $\tau_h = 10^{-6}$ s) è stato cresciuto uno strato epitassiale p^+. Un film di Al ricopre sia il front che il back. La ddp di contatto fra Al e Si vale 0.4 V.



1) Disegnare il diagramma a bande all'equilibrio nell'intervallo compreso fra x_1 e x_2.

2) Detta V_{12} la tensione, uguale in modulo a 4 volt, fra front e back, calcolare l'ampiezza della zds al contatto Al/Si nei due casi $V_{12} > 0$ e $V_{12} < 0$. Si assuma per la costante di Richardson il valore 120 A/cm^{2}K^2.

ESERCIZIO 2

In un sistema di esposizione step and repeat l'intensità sul fotoresist all'uscita della maschera è data da

$$I(x) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right)$$

con $I_0 = 50$ mW/cm^2 e $a = 1$ μm. Per il fotoresist: $\gamma = 2.5$ e $Q_F = 200$ mJ/cm^2. Se il tempo di esposizione è di 8 s:

1) calcolare l'ampiezza della zona completamente esposta.

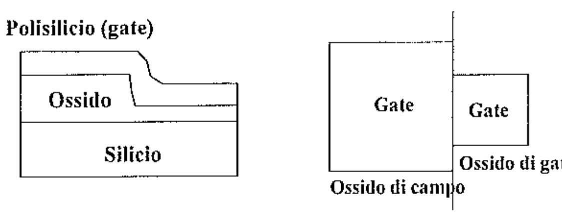
2) Quanto vale l'ampiezza totale della zona solo parzialmente esposta? Disegnare il profilo (qualitativo) del fotoresist dopo lo sviluppo.

ESERCIZIO 3

La figura rappresenta una struttura di test usata per caratterizzare l'ossido di gate di un processo LOCOS. Il substrato è Si di tipo p, $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, il gate è in poly di tipo n^+ e l'ossido di campo ha uno spessore di 500 nm, ed è privo di cariche. Il contatto sull'ossido di campo ha un'area di 100×100 μm^2, e sull'ossido di gate di 50×50 μm^2. Una caratterizzazione $C - V$ a bassa frequenza nel range $-3.0 \div 3.0$ V ha dato come risultato una capacità massima pari a 2.45 pF e, per una tensione $V_{GS} = 0.2$ V, una capacità minima di 1.15 pF.

1) Determinare lo spessore dell'ossido di gate;

2) determinare la concentrazione di ioni sodio per unità di superficie, considerandoli all'interfaccia ossido/silicio.



Sezione **Pianta**

SOLUZIONE 1

1)

2) Si tratta di due diodi, una giunzione pn e uno Schottky, in opposizione. Dato che hanno la stessa area basta calcolare le rispettive densità di corrente di saturazione.

$$J_1 = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} = \frac{1.6\times10^{-19}\times0.026\times470\times10^{-4}}{\sqrt{0.026\times470\times10^{-4}\times10^{-6}}}\frac{2.25\times10^{32}}{10^{21}} = 1.26\times10^{-6}\ \mathrm{A/m^2}$$

$$J_2 = AT^2 e^{-\frac{\Phi_{BN}}{kT}}$$

in cui $\Phi_{BN} = qV_0 + E_C - E_F = qV_0 + kT\ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) = 0.4 + 0.026\times\ln\left(\frac{2.8\times10^{19}}{10^{15}}\right) = 0.67$ eV;

$$J_2 = 120\times10^4\times300^2\times e^{-\frac{0.67}{0.026}} = 0.695\ \mathrm{A/m^2}.$$

i) $V_{12} > 0$; la pn è polarizzata direttamente, lo Schottky inversamente. Si scrive

$$J_1\left(e^{\frac{V_{pn}}{V_T}} - 1\right) = J_2$$

da cui

$$V_{pn} = V_T\ln\left(\frac{J_2}{J_1}+1\right) = 0.026\times\ln\left(\frac{0.695}{1.26\times10^{-6}}\right) = 0.34\ \mathrm{V};$$

la zds sarà (ai capi dello S. cadono $4 - 0.34 = 3.66$ V)

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_0 - V)}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\times11.8\times8.85\times10^{-12}\times(0.4+3.66)}{1.6\times10^{-19}\times10^{21}}} = 2.3\times10^{-6}\ \mathrm{m}$$

ii) $V_{12} < 0$; la pn è polarizzata inv., lo Schottky dir. Si scrive

$$J_2\left(e^{\frac{V_{Sc}}{V_T}} - 1\right) = J_1$$

$$V_{Sc} = V_T\ln\left(\frac{J_1}{J_2}+1\right) = 0.026\times\ln\left(\frac{1.26\times10^{-6}}{0.695}+1\right) = 4.7\times10^{-8}\ \mathrm{V},$$

che è come dire zero, per il calcolo da fare.

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\times11.8\times8.85\times10^{-12}\times0.4}{1.6\times10^{-19}\times10^{21}}} = 7.2\times10^{-7}\ \mathrm{m}.$$

SOLUZIONE 2

1) Dato che la dose Q_F determina la completa esposizione del fotoresist avremo

$$Q_F = I(x_i)t = I_0 t\exp\left(-\frac{x_i^2}{a^2}\right)$$

che può essere risolta in x_i

$$200 \times 10^{-3} = 50 \times 10^{-3} \times 8 \times \exp\left(-\frac{x_i^2}{1^2}\right)$$

$$x_i = \pm\sqrt{\ln\left(\frac{50 \times 10^{-3} \times 8}{200 \times 10^{-3}}\right)} = \pm 0.83\ \mu\text{m};$$

la zona completamente esposta vale dunque $2{\times}0.83 = 1.66\ \mu$m.

2) Dalla definizione di contrasto

$$\gamma = \frac{1}{\log\left(\frac{Q_F}{Q_i}\right)}$$

si ottiene Q_i :

$$\frac{Q_F}{10^{\frac{1}{\gamma}}} = Q_i = \frac{200 \times 10^{-3}}{10^{\frac{1}{2.5}}} = 79.6 \times 10^{-3}\ \text{mJ/cm}^2$$

$$Q_i = I(x_j)t = I_0 t \exp\left(-\frac{x_j^2}{a^2}\right)$$

$$79.6 \times 10^{-3} = 50 \times 10^{-3} \times 8 \times \exp\left(-\frac{x_i^2}{1^2}\right)$$

$$x_j = \pm\sqrt{\ln\left(\frac{50 \times 10^{-3} \times 8}{79.6 \times 10^{-3}}\right)} = \pm 1.27\ \mu\text{m};$$

$2\,(x_j - x_i) = 2 \times (1.27 - 0.83) = 0.88$ è dunque l'ampiezza richiesta.

SOLUZIONE 3

1) Presumibilmente nel range $-3.0 \div 3.0$ V la struttura MOS parassita dovuta all'ossido di campo non è in inversione. Infatti la tensione di soglia risulta:

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

$$\Phi_{MS} = \frac{E_g}{2q} - \psi_B = 0.211$$

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 6.906 \times 10^{-5}\ \text{F/m}^2$$

$$V_T = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| = 5.27\ \text{V}$$

quindi la struttura MOS parassita non è in inversione per tutto il range di tensione investigato. La capacità massima è data dal parallelo delle due capacità massime:

$$C_{Totale} = C_{OxCampo} + C_{OxGate}$$

$$C_{OxCampo} = \frac{S\varepsilon_{ox}}{t_{oxCampo}} = 0.691 \text{ pF}$$

$$C_{OxGate} = C_{Totale} - C_{OxCampo} = 1.76 \text{ pF}$$

$$t_{oxGate} = \frac{S\varepsilon_{ox}}{C_{OxGate}} = 49 \text{ nm}$$

2) La capacità minima si ha per una tensione di gate pari a quella di soglia. Se la concentrazione di cariche nell'ossido di gate fosse nulla, avremo che:

$$C_{oxGate} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{oxGate}} = 7.048 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

$$V_{TGate} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| = 0.92 \text{ V}$$

La presenza di cariche positive (ioni sodio) all'interfaccia ossido-silicio fa diminuire la tensione di soglia di una quantità pari a Q_{Na}/C_{ox}. Quindi:

$$\frac{Q_{Na}}{C_{ox}} = 0.92 - 0.2 = 0.72 \text{ V}$$

quindi:

$$Q_{Na} = C_{ox} \times 0.72 = 5.06 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

e la concentrazione di ioni sodio all'interfaccia, per unità di superficie, risulta:

$$\left[Na^+\right] = \frac{Q_{Na}}{q} = 316 \times 10^{15} \text{ ioni/m}^2$$

Prova scritta del 14/02/07

ESERCIZIO 1

Un transistore NMOS ($N_A = 10^{15}$ cm^{-3}) è polarizzato con una V_{GS} pari alla tensione di soglia e con una V_{DS} di 50 mV. Nell'ipotesi che la concentrazione degli elettroni nel canale abbia un andamento del tipo $\exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$, con $\lambda = 10$ nm, si calcoli la resistenza di strato del canale. $\mu_n = 750$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}.

ESERCIZIO 2

Nella base di un BJT *npn* integrato ($S = 5 \times 10^3$ μm^2) e polarizzato in zona attiva diretta, il profilo dei minoritari è dato da $n(0) = 10^{14}$ cm^{-3} per $0 \le x \le x_0$ e da

$$n(x) = n(0)\left(1 - \frac{(x - x_0)^2}{(W - x_0)^2}\right)$$

nell'intervallo $x_0 \le x \le W$. $x_0 = 1.4$ μm e $W = 2$ μm.

1) Si calcoli la corrente I_E in modulo nell'ipotesi che I_B sia trascurabile.

2) Si calcoli il campo elettrico nell'intervallo $0 \le x \le x_0$, sapendo che $\mu_n = 750$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}.

3) Si verifichi se è giustificata l'ipotesi $I_B = 0$.

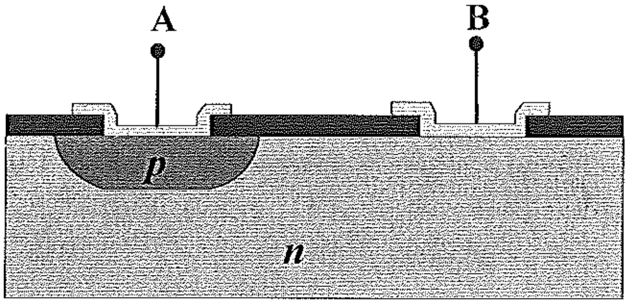
Il profilo non è soluzione di alcuna equazione. Deve essere utilizzato solo per la risoluzione dell'esercizio.

ESERCIZIO 3

La struttura in figura è stata realizzata su un substrato n 10^{15} cm^{-3} (μ_n =1200 cm^2/Vs, τ_n=10^{-7}s). Entrambe le finestre nell'ossido sono quadrate, di 10 μm di lato, e per le metallizzazioni è stato usato un metallo con funzione di lavoro $\Phi_M = 4.1$ V. La diffusione di atomi di boro segue il profilo $N_A(x) = N_{A0}e^{-\frac{x^2}{a^2}}$, con $N_{A0} = 10^{19}$ cm^{-3} e $a = 3.29$ μm.

1) Si determini l'area della giunzione *pn* (si assuma un processo di diffusione uniforme in tutte le direzioni e si trascurino gli angoli).

2) Assumendo i drogaggi bruschi, ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3} μ_p =400 cm^2/Vs, τ_p=10^{-8}s), si calcoli la corrente AB per $V_{AB} = 5$ V e $V_{AB} = -5$ V (costante di Richardson 120 A/cm^2 K^2).



SOLUZIONE 1

La resistenza di strato $R_\square$ è espressa da

$$R_\square = \frac{\overline{\rho}}{x_i}$$

in cui

$$\overline{\rho} = \frac{1}{\overline{\sigma}} = \frac{1}{\frac{1}{x_i}\int_0^{x_i} q\mu_n n(x)dx}$$

e quindi

$$R_\square = \frac{1}{\int_0^{x_i} q\mu_n n(x)dx};$$

bisogna calcolare

$$\int_0^{x_i} q\mu_n n(x)dx = q\mu_n n_s \int_0^{x_i} e^{\left(-\frac{x}{\lambda}\right)}dx = q\mu_n n_s \lambda \left(-e^{\left(-\frac{x_i}{\lambda}\right)} + 1\right).$$

Dato che siamo alla soglia $n_s = N_A$. Rimane da valutare x_i che si ottiene dalla sua definizione

$$n_s e^{\left(-\frac{x_i}{\lambda}\right)} = n_i;$$

in definitiva

$$R_\square = \frac{1}{q\mu_n n_s \lambda\left(-e^{\left(-\frac{x_i}{\lambda}\right)} + 1\right)} = \frac{1}{q\mu_n N_A \lambda\left(-\frac{n_i}{N_A} + 1\right)} \simeq \frac{1}{q\mu_n N_A \lambda}$$

$$\frac{1}{q\mu_n N_A \lambda} = \frac{1}{1.6\times10^{-19}\times750\times10^{-4}\times10^{21}\times10^{-8}} = 8.33\times10^{6}\ \Omega/\square.$$

SOLUZIONE 2

1) Dato che I_B è trascurabile $|I_C| = |I_E|$; $|I_C|$ si calcola come corrente di diffusione in W

$$\begin{aligned} |I_C| &= qSD_n\frac{dn(x)}{dx} = \frac{2qSD_n n(0)}{(W - x_0)} \\ &= \frac{2\times1.6\times10^{-19}\times5\times10^{3}\times10^{-12}\times0.026\times750\times10^{-4}\times10^{20}}{0.6\times10^{-6}} = 0.52\ \text{mA}. \end{aligned}$$

2) Data che il profilo è costante nell'intervallo $0 \leq x \leq x_0$ la corrente è solo di drift e quindi

$$qS\mu_n n(0)\mathcal{E} = |I_C|$$

$$\mathcal{E} = \frac{0.52\times10^{-3}}{1.6\times10^{-19}\times5\times10^{3}\times10^{-12}\times750\times10^{-4}\times10^{20}} = 8.67\times10^{4}\ \text{V/m}.$$

3) I_B si calcola con il modello a controllo di carica, tenendo conto che la ricombinazione avviene solo fra $x_0 \leq x \leq W$.

$$I_B = \frac{qSn(0)\int_{x_0}^{W}\left(1 - \frac{(x-x_0)^2}{(W-x_0)^2}\right)}{\tau_n}$$

$$qSn(0)\int_{x_0}^{W}\left(1 - \frac{(x-x_0)^2}{(W-x_0)^2}\right) = \frac{2qSn(0)\,(W-x_0)}{3}$$

e quindi

$$\left|\frac{I_B}{I_C}\right| = \frac{2qSn(0)\,(W-x_0)}{3\tau_n}\frac{(W-x_0)}{2qSD_n n(0)} = \frac{(W-x_0)^2}{3D_n\tau_n} = \frac{(W-x_0)^2}{3L_n^2}$$

$$\left|\frac{I_B}{I_C}\right| = \frac{(W-x_0)^2}{3L_n^2} = \frac{(0.6\times10^{-6})^2}{3\times750\times10^{-4}\times0.026\times10^{-6}} = 6.1\times10^{-5}.$$

L'ipotesi è giustificata.

SOLUZIONE 3

1) Calcoliamo la profondità di giunzione x_i dalla relazione:

$$N_A(x_i) = N_D$$

$$N_D = N_{A0}e^{-\frac{x_i^2}{a^2}}$$

$$x_i = a\sqrt{\ln\left(\frac{N_{A0}}{N_D}\right)} = 10\ \mu\text{m}$$

La superficie sarà costituita da una parte inferiore piatta, quadrata con lato $L = 10$ μm, e dalle sottodiffusioni con un raggio pari a $r = 10\ \mu$m : la loro superficie (trascurando gli angoli) sarà data da:

$$S_{sottodiffusione} = 4\times\frac{2\pi r}{4}L$$

e quindi la superficie totale della giunzione risulta:

$$S = 10\times10 + 4\times\frac{2\pi\ 10}{4}10 = 728\ \mu\text{m}^2$$

2) La funzione di lavoro del metallo è inferiore a quella del silicio sia di tipo n che di tipo p, essendo pari all'affinità elettronica. In questo caso la giunzione metallo-n è ohmica, mentre la giunzione metallo-p è rettificante. Quindi lo schema circuitale tra i due contatti è costituito da due giunzioni contrapposte: la giunzione metallo-silicio p e la giunzione pn.

Per V_{AB} grande e positiva la giunzione Schottky è polarizzata in inversa, e quindi la corrente è pari alla corrente di saturazione inversa della stessa giunzione Schottky. L'altezza di barriera risulta ($\Phi_M = E_C/q$):

$$V_0 = \frac{E_g}{q} - \frac{Ef - E_V}{q}$$

$$\Phi_M = V_0 + \frac{Ef - E_V}{q} = \frac{E_g}{q}$$

da cui:

$$I_{0Sch} = SAT^2 e^{-\frac{\Phi_M}{V_T}} = 8.39 \times 10^{-18} \text{ A}$$

dove $S = 10 \times 10\ \mu\text{m}^2$. Se V_{AB} è grande e negativa la corrente è determinata dalla giunzione pn che risulta polarizzata inversamente. Per la giunzione pn si procede in modo solito:

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n = 31.08$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 17.6\ \mu\text{m}$$

$$D_p = \frac{kT}{q}\mu_p = 10.36$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 3.21\ \mu\text{m}$$

La larghezza della zona p, pari a 10 μm, è tre volte la lunghezza di diffusione delle lacune, quindi il diodo può essere considerato a base lunga (siamo al limite):

$$I_{0pn} = Sq\left(\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D}\right) = 8.93 \times 10^{-15} \text{ A}$$

Prova scritta del 7/06/07

ESERCIZIO 1

Un *pnp* a drogaggi costanti ($N_A = 10^{19}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}) con lo spessore della zona n pari a 4 μm è polarizzato con $V_{EB} = 0.65$ V e $V_{CB} = -9$ V. Si assuma $\gamma = 1$ e $L_h = 40$ μm. $I_{ES} = I_{CS} = 10^{-13}$ A.

1) Calcolare la corrente I_B.

2) Se V_{CB} viene posto uguale a -20 V calcolare la V_{EB} in modo che I_B resti costante.

ESERCIZIO 2

Ad una struttura n ($N_D = 10^{16}$ cm^{-3}), SiO_2, p ($N_A = 10^{15}$ cm^{-3}) viene applicata una tensione V_{np} tale che il lato n si trovi esattamente all'inversione.

1) Calcolare l'ampiezza della zds nel lato p.

2) Calcolare la resistenza di strato degli elettroni nel lato p, ipotizzando un valore ragionevole per la mobilità.

3) Assumendo che gli elettroni mobili nel lato p abbiano un andamento del tipo

$$n(x) = n(0)e^{-\frac{x}{a}}$$

con $a = 100$ Å, calcolare $n(0)$.

ESERCIZIO 3

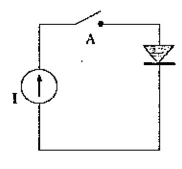
Una giunzione p^+/n ($N_A = 10^{19}$ cm^{-3}, N_D =10^{16} cm^{-3}, $\mu_P = 400$ cm^2/Vs, τ_P=10^{-6} s, $S = 1$ mm^2) viene polarizzata da un generatore di corrente di 1 mA, tramite il tasto A (vedi figura).

Il tasto A viene chiuso a $t = 0$, ed aperto dopo un certo tempo T.

1) Calcolare l'andamento della tensione ai capi della giunzione se $T = 2\times10^{-5}$ s;

2) calcolare l'andamento della tensione ai capi della giunzione se $T = 10^{-6}$ s.

3) Il generatore di corrente utilizzato è capace erogare una tensione massima in uscita pari a 10 V. Nel caso in cui venga applicato in senso contrario a quello indicato nella figura calcolare la tensione e la corrente nel diodo a tasto A chiuso (per tempi lunghi).



SOLUZIONE 1

1) I_B si ottiene dalle equazioni di Ebers e Moll

$$I_E = I_{ES}\left(e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} - 1\right) - \alpha_R I_{CS}\left(e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1\right)$$

$$I_C = -\alpha_F I_{ES}\left(e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} - 1\right) + I_{CS}\left(e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1\right)$$

una volta noto $\alpha_F = \alpha_R$.

$$\alpha_F = \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_h^2}}$$

con

$$W = 2 \times 10^{-6} - \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_0 - V_{EB})}{qN_D}} - \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_0 - V_{CB})}{qN_D}}$$

$$W = 4\times 10^{-6} - \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 - 0.65)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}} - \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 + 9)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}}$$

$$\alpha_F = \frac{1}{1 + \frac{2.69^2}{2 \times 40^2}} = 0.997$$

$$I_E = 10^{-13} \times \left(e^{\frac{0.65}{0.026}} - 1\right) - 0.997 \times 10^{-13} \times \left(e^{-\frac{5}{0.026}} - 1\right) = 7.2 \times 10^{-3}\ \text{A}$$

$$I_C = -0.997 \times 10^{-13} \times \left(e^{\frac{0.65}{0.026}} - 1\right) + 10^{-13} \times \left(e^{-\frac{5}{0.026}} - 1\right) = -7.18 \times 10^{-3}\ \text{A}$$

$$I_B = -7.2 \times 10^{-3} + 7.18 \times 10^{-3} = -2.0 \times 10^{-5}\ \text{A}.$$

2)

$$W' = 4 \times 10^{-6} - \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 - 0.}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}}$$

$$-\sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 + 20)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}} = 2.18 \times 10^{-6}\ \text{m};$$

si noti che è stata lasciata costante la tensione V_{EB}: questo è lecito dato che ci si aspetta una piccola variazione e quindi un effetto tracurabile su W'. Devono essere uguali le aree sottese dai profili dei minoritari il che implica

$$e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} W = e^{\frac{V'_{EB}}{V_T}} W'$$

$$V_{EB} + V_T \ln \frac{W}{W'} = V'_{EB}$$

$$0.65 + 0.026 \times \ln \frac{2.95 \times 10^{-6}}{2.18 \times 10^{-6}} = V'_{EB} = 0.658\ \text{V}.$$

SOLUZIONE 2

1) Dato che le cariche in n e in p devono essere uguali in valore assoluto si avrà

$$Q_{Wn} = Q_{Wp} + Q_{np}$$

e quindi banalmente

$$W_p = \sqrt{\frac{4\varepsilon_s V_T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5\times10^{10}}\right)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 0.87\ \mu\text{m}.$$

2)

$$Q_{Wn} - Q_{Wp} = Q_{np}$$

$$qN_D W_n - qN_A W_p = Q_{np}$$

$$\sqrt{1.08 \times 10^{-11} \times \ln\left(\frac{10^{16}}{1.5 \times 10^{10}}\right) \times 1.6}$$

$$-\sqrt{1.08 \times 10^{-11} \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}} \;=\; 3.42 \times 10^{-4}\ \text{Cm}^{-2}$$

$$R_\square = \frac{1}{750 \times 10^{-4} \times 3.42 \times 10^{-4}} = 3.89 \times 10^{4}\ \Omega/\square$$

3)

$$Q_{np} = qn(0)\int_0^\infty e^{-\frac{x}{a}}dx = qn(0)a\int_0^\infty e^{-\frac{x}{a}}d\left(\frac{x}{a}\right) = qn(0)a$$

$$\frac{Q_{np}}{qa} = n(0)$$

$$\frac{3.42 \times 10^{-4}}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-8}} = 2.14 \times 10^{23}\ \text{m}^{-3} = 2.14 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}.$$

SOLUZIONE 3

Valutiamo i parametri della giunzione:

$$D_p = V_T\mu_p = 0.0259 \times 0.04 = 1.036 \times 10^{-3}\ \text{m}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p\tau_p} = 32.19\ \mu\text{m}$$

$$I_0 = \frac{qSD_p p_{n0}}{L_p} = 1.16 \times 10^{-13}\ \text{A}.$$

1) Ricordiamo che, nell'approssimazione di profilo di regime, la tensione $v(t)$ ai capi della giunzione può essere messa in relazione alla carica immagazzinata:

$$Q\left(t\right) = qSL_p p_{n0}\left(e^{v(t)/V_T} - 1\right) = I_0\tau\left(e^{v(t)/V_T} - 1\right)$$

e la carica è legata alla corrente secondo l'equazione di continuità:

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{\tau}$$

Per determinare V_D basta risolvere l'equazione di continuità con la dovuta condizione a contorno ($i(t) = 0$ per $t < 0$, e $i(t) = I$ per $t > 0$):

$$Q(t) = 0,\ t < 0$$

Quindi, se il tasto rimanesse sempre chiuso:

$$Q(t) = I\tau,\ t \to \infty$$

da ciò avremo semplicemente:

$$Q(t) = I\tau \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

da cui è immediato ricavare $v(t)$ (tasto sempre chiuso):

$$I_0\tau \left(e^{v(t)/V_T} - 1\right) = I\tau \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

$$v(t) = V_T \ln\left(\frac{I}{I_0}\left(1 - e^{-t/\tau}\right) - 1\right).$$

Relativamente alla domanda 1, il tasto si apre dopo che il transitorio della $v(t)$ dovuto alla chiusura si è esaurito, quindi per il transitorio di apertura l'equazione di continuità si risolve con le condizioni al contorno:

$$Q(t) = I\tau,\ t < T$$

$$Q(t) = 0,\ t \to \infty$$

e quindi è immediato ricavare:

$$Q(t) = Q(t = T)\, e^{-(t-T)/\tau} = I\tau e^{-(t-T)/\tau}$$

$$v(t) = V_T \ln\left(\frac{I}{I_0}\left(e^{-(t-T)/\tau}\right) - 1\right).$$

2) Relativamente alla domanda 2, invece, il tasto si apre mentre il transitorio precedente non si è ancora esaurito. La soluzione è la stessa, ma la condizione iniziale (a $t = T$) è diversa:

$$Q(t = T) = I\tau \left(1 - e^{-T/\tau}\right) = I\tau \left(1 - \frac{1}{e}\right)$$

Quindi la tensione ai capi del diodo raggiunge un massimo per $t = T$ pari a:

$$v(T) = V_T \ln \left(\frac{I}{I_0} \left(1 - e^{-1}\right) - 1 \right) = 0.581 \text{ V}$$

e poi decrementa secondo l'espressione (per $t > T$):

$$v(t) = V_T \ln \left(\frac{I\left(1 - \frac{1}{e}\right)}{I_0} \left(e^{-(t-T)/\tau}\right) - 1 \right).$$

3) Se il generatore di corrente è applicato al contrario, non sarà in grado di polarizzare il diodo con una corrente pari a 1 mA. Quindi applicherà al diodo tutta la tensione che è in grado di erogare (pari a 10 V) fornendo la corrente che il diodo è in grado di far passare, pari alla corrente inversa di saturazione I_0

Prova scritta del 27/06/07

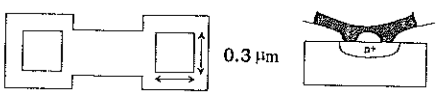
ESERCIZIO 1

Un processo di predeposizione dà luogo ad un profilo di atomi di B descritto da: $C_s = 1.0 \times 10^{20}$ cm^{-3}, $D = 1.58 \times 10^{-13}$ cm^{2}s^{-1}, $t_0 = 15'$. 1) Scrivere l'espressione del profilo e a partire da questa calcolare la dose, svolgendo i calcoli necessari.

2) Facendo uso del profilo normalizzato allegato calcolare la profondità di giunzione se $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}. 3) Calcolare la concentrazione superficiale dopo un drive-in di 2 h alla stessa temperatura.

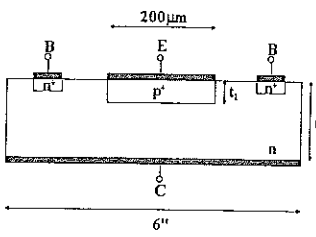
ESERCIZIO 2

Un transistore NMOS è definito da $W/L = 1$, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 800$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}, $V_{TH} = 0.3$ V; il layout relativo ai contatti di S e D è mostrato in figura. La resistenza specifica di contatto vale $10^{-5}\Omega\cdot$cm^2. Durante lo sputtering dell'Al si forma sul contatto di drain un vuoto di forma semisferica con un raggio di 0.15 μm (vedi figura). Si assuma la resistenza di contatto del S uguale a zero. 1) Calcolare la V_{DS} necessaria a portare l'NMOS in saturazione quando $V_{GS} = 3$ V. 2) Disegnare la caratteristica e confrontarla con quella dell'NMOS ideale. 3) Come si sarebbe modificata la caratteristica se il difetto fosse stato presente sul source invece che sul drain?



ESERCIZIO 3

La struttura in figura (non in scala) è realizzata su un campione di Si (supposto circolare) di 6" di diametro (1" = 25.4 mm). Il drogaggio è di tipo n ($N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 1000$ cm^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $\mu_p = 400$ cm^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s) e il pozzetto di tipo p^+ è circolare, con un raggio di 0.1 mm (si consideri solo la corrente che scorre attraverso il fondo). $t_1 = 1$ μm, $t_2 = 4$ μm. Il metallo con cui sono stati realizzati i contatti ha una funzione di lavoro di 4.6 eV (costante di Richardson 31 A/cm^{2}K^2). 1) Disegnare il circuito equivalente in continua del dispositivo fra i terminali E e C. 2) Con B aperto, determinare la corrente per $V_{EC} = 0.6$ V. 3) Con un generatore di corrente di 1 mA posto fra B e C, determinare la corrente in uscita dal contatto inferiore per $V_{EC} = 0.6$ V.



SOLUZIONE 1
1)

$$C(x,t_0) = C_s \,\mathrm{erf\,c}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt_0}}\right)$$

il cui integrale fra 0 e infinito (vedi appunti) dà la dose cercata

$$Q = C_s\frac{2\sqrt{Dt_0}}{\sqrt{\pi}} = 1.0\times10^{20}\times\frac{2\times\sqrt{1.58\times10^{-13}\times15\times60}}{\sqrt{\pi}} = 1.34\times10^{15}\ \mathrm{cm}^{-2}.$$

2) Dal grafico si ottiene, quando $\frac{C(x_j,t_0)}{C_s} = 10^{16}$, $\frac{x_j}{2\sqrt{Dt_0}} \simeq 2.76$ e quindi

$$x_j \simeq 2.76\times2\times\sqrt{1.58\times10^{-13}\times15\times60} = 6.58\times10^{-5}\ \mathrm{cm} = 0.658\ \mu.$$

3) Il profilo di drive-in è dato da

$$\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}e^{-\frac{x^2}{4Dt}} = C_s e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

e quindi

$$C_s = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} = \frac{1.34\times10^{15}}{\sqrt{\pi\times1.58\times10^{-13}\times7200}} = 2.24\times10^{19}\ \mathrm{cm}^{-3}.$$

SOLUZIONE 2
1) La resistenza di contatto vale

$$R_C = \frac{\rho_c}{S} = \frac{10^{-5}}{(1-\pi\times0.15^2)\times10^{-8}} = 1.07\ \mathrm{k}\Omega.$$

mentre la corrente di saturazione si calcola nel modo solito

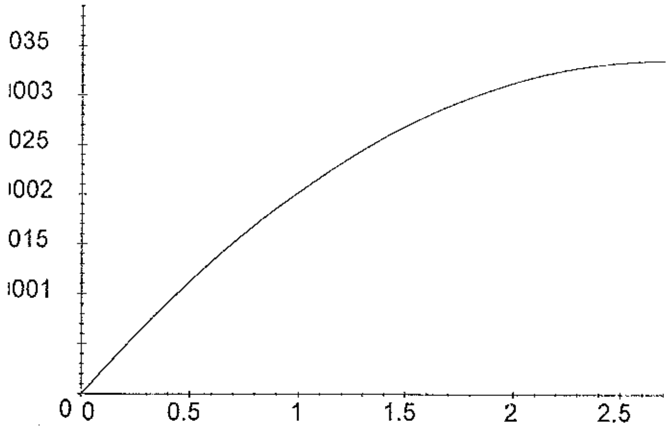
$$I_{DSAT} = 0.08\times\frac{3.9\times8.85\times10^{-12}}{2\times30\times10^{-9}}\times(3-0.3)^2 = 3.35\times10^{-4}\ \mathrm{A}$$

e poi banalmente

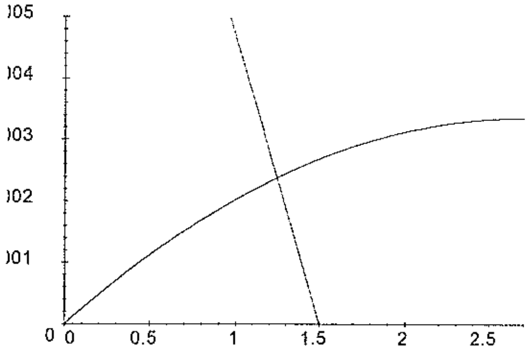
$$V_{DS} = V_{DSAT} + R_C I_{DSAT} = 2.7 + 1.07\times10^3\times3.35\times10^{-4} = 3.06\ \mathrm{V}.$$

2) In assenza di R_C si utilizza l'espressione

$$I_{DSAT} = 0.08\times\frac{3.9\times8.85\times10^{-12}}{30\times10^{-9}}\times\left((3-0.3)\,V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right)$$



mentre in presenza di R_C è necessario ricorrere al metodo grafico (retta di carico):



Se ad esempio $V_{DS} = 1.5$ V la corrente relativa si ottiene dall'intersezione fra la retta di c. e la caratteristica e così via per ogni V_{DS}.

3) In questo caso bisogna anche tenere conto che la caduta sulla R_C fra S e massa fa sì che la V_{GS} effettiva sia minore di quella applicata.

SOLUZIONE 1

1) I_B si ottiene dalle equazioni di Ebers e Moll

$$I_E = I_{ES}\left(e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} - 1\right) - \alpha_R I_{CS}\left(e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1\right)$$

$$I_C = -\alpha_F I_{ES}\left(e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} - 1\right) + I_{CS}\left(e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1\right)$$

una volta noto $\alpha_F = \alpha_R$.

$$\alpha_F = \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_h^2}}$$

con

$$W = 2 \times 10^{-6} - \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_0 - V_{EB})}{qN_D}} - \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_0 - V_{CB})}{qN_D}}$$

$$W = 4\times10^{-6} - \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 - 0.65)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}} - \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 + 9)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}}$$

$$\alpha_F = \frac{1}{1 + \frac{2.69^2}{2\times40^2}} = 0.997$$

$$I_E = 10^{-13} \times \left(e^{\frac{0.65}{0.026}} - 1\right) - 0.997 \times 10^{-13} \times \left(e^{-\frac{5}{0.026}} - 1\right) = 7.2 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$I_C = -0.997 \times 10^{-13} \times \left(e^{\frac{0.65}{0.026}} - 1\right) + 10^{-13} \times \left(e^{-\frac{5}{0.026}} - 1\right) = -7.18 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$I_B = -7.2 \times 10^{-3} + 7.18 \times 10^{-3} = -2.0 \times 10^{-5} \text{ A.}$$

2)

$$W' = 4 \times 10^{-6} - \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 - 0.}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}}$$

$$-\sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (0.877 + 20)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}} = 2.18 \times 10^{-6} \text{ m;}$$

si noti che è stata lasciata costante la tensione V_{EB}: questo è lecito dato che ci si aspetta una piccola variazione e quindi un effetto tracurabile su W'. Devono essere uguali le aree sottese dai profili dei minoritari il che implica

$$e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} W = e^{\frac{V'_{EB}}{V_T}} W'$$

$$V_{EB} + V_T \ln \frac{W}{W'} = V'_{EB}$$

$$0.65 + 0.026 \times \ln \frac{2.95 \times 10^{-6}}{2.18 \times 10^{-6}} = V'_{EB} = 0.658 \text{ V.}$$

SOLUZIONE 2

1) Dato che le cariche in n e in p devono essere uguali in valore assoluto si avrà

$$Q_{Wn} = Q_{Wp} + Q_{np}$$

e quindi banalmente

$$W_p = \sqrt{\frac{4\varepsilon_s V_T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5\times10^{10}}\right)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 0.87\ \mu\text{m.}$$

2)

$$Q_{Wn} - Q_{Wp} = Q_{np}$$

$$qN_DW_n - qN_AW_p = Q_{np}$$

$$\sqrt{1.08 \times 10^{-11} \times \ln\left(\frac{10^{16}}{1.5 \times 10^{10}}\right) \times 1.6}$$

$$-\sqrt{1.08 \times 10^{-11} \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}} \;=\; 3.42 \times 10^{-4}\ \mathrm{Cm}^{-2}$$

$$R_{\square} = \frac{1}{750 \times 10^{-4} \times 3.42 \times 10^{-4}} = 3.89 \times 10^{4}\ \Omega/\square$$

3)

$$Q_{np} = qn(0)\int_0^{\infty} e^{-\frac{x}{a}}dx = qn(0)a\int_0^{\infty} e^{-\frac{x}{a}}d\left(\frac{x}{a}\right) = qn(0)a$$

$$\frac{Q_{np}}{qa} = n(0)$$

$$\frac{3.42 \times 10^{-4}}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-8}} = 2.14 \times 10^{23}\ \mathrm{m}^{-3} = 2.14 \times 10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}.$$

SOLUZIONE 3

1) Il dispositivo, come circuito equivalente, è un transistore bipolare con il collettore metallico. La differenza tra le aree delle giunzioni emettitore-base e collettore-base è però considerevole. Infatti l'area della giunzione emettitore-base è pari a:

$$S_{EB} = \pi \times \left(100 \times 10^{-6}\right)^2 = 3.14 \times 10^{-8}\ \mathrm{m}^2$$

mentre l'area della giunzione base-collettore è pari a:

$$S_{BC} = \pi \times \left(3 \times 25.4 \times 10^{-3}\right)^2 = 1.8 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}^2$$

con una differenza di circa 6 ordini di grandezza.

2) Le giunzioni metallo-p^+ e metallo-n^+ sono sicuramente ohmiche. La giunzione inferiore è rettificante, poichè sarà sicuramente $\Phi_M < \Phi_{\mathrm{Si}-n}$ con:

$$V_o = \Phi_M - \chi - \frac{E_c - E_f}{q}$$

$$\Phi_{Bn} = V_o + \frac{E_C - E_f}{q}$$

$$\frac{E_c - E_f}{q} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) = 0.206\ \mathrm{V}$$

$$V_o = 0.3\ \mathrm{V}$$

$$\Phi_{Bn} = 0.5\ \mathrm{V}$$

ma la corrente inversa di saturazione sarà enorme, vista la grande superficie di 180 cm^2:

$$I_0 = SAT^2 e^{-\frac{\Phi_{Bn}}{V_T}} = 2.07 \text{ A}$$

quindi il contatto inferiore si comporta a tutti gli effetti come un contatto ohmico, con correnti 'normali' dell'ordine del mA. In modo particolare con le condizioni indicate la giunzione di base p^+/n si comporta come una giunzione polarizzata in diretta, a base corta, e la caduta sulla giunzione base-collettore sarà praticamente nulla (molto piccola). Trascurando la regione di svuotamento emettitore-base (che volendo è semplice da calcolare), la regione di svuotamento del contatto collettore-base risulta:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S V_0}{qN_D}} = 0.256 \ \mu\text{m}$$

e quindi la lunghezza di base risulta:

$$W_B = 3 - 0.256 = 2.744 \ \mu\text{m}$$

Avremo dunque:

$$D_p = V_T \mu_p = 0.0259 \times 0.04 = 1.036 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 32.19 \ \mu\text{m}$$

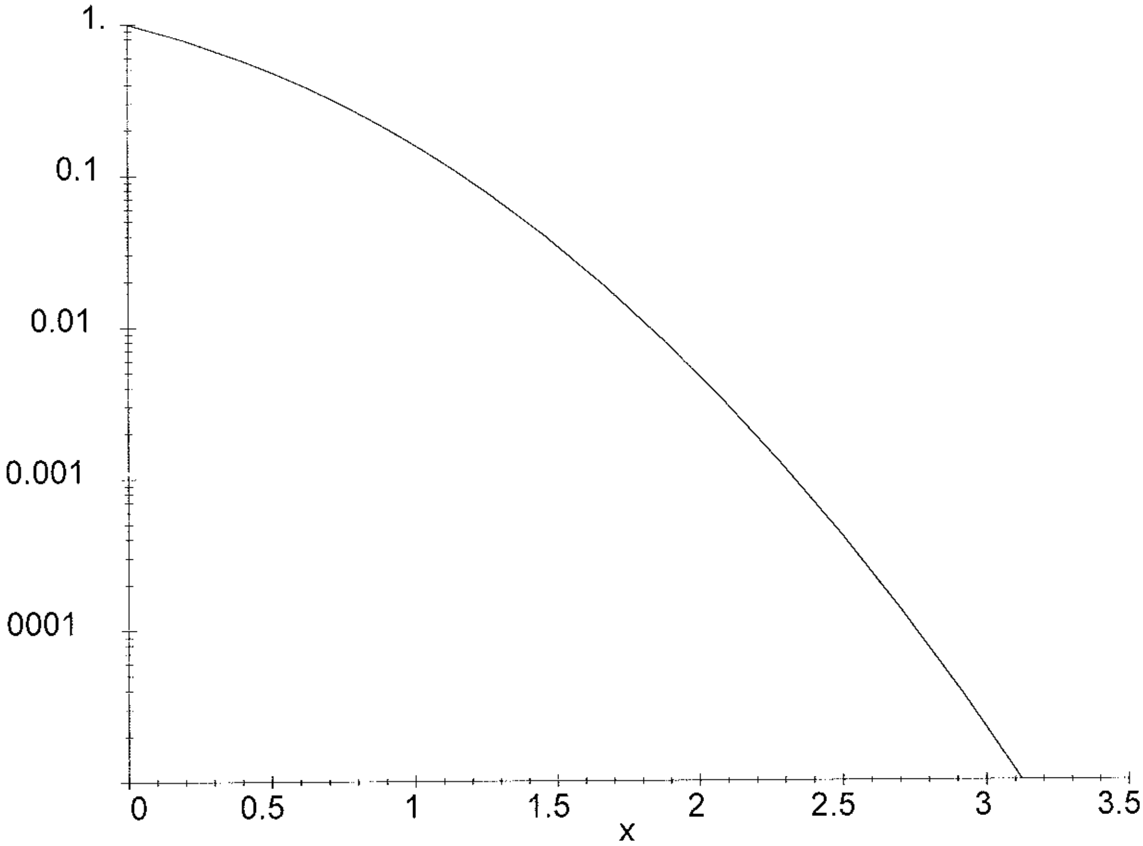
usando la relazione del diodo a base corta (la caduta sul collettore è praticamente nulla, se la corrente risulta dell'ordine del mA):

$$I = \frac{qSD_p}{W_B} \frac{n_i^2}{N_D} \left(e^{\frac{V_{EC}}{V_T}} - 1 \right) = 4.27 \times 10^{-14} \left(e^{\frac{V_{EC}}{V_T}} - 1 \right)$$

$$I = 4.27 \times 10^{-14} \left(e^{\frac{0.6}{V_T}} - 1 \right) = 4.91 \times 10^{-4} \text{ A}$$

che equivale a circa mezzo milliampere.

3) Nel caso in base venga iniettata una corrente pari a 1 mA, niente cambia rispetto al caso precedente per quanto riguarda la giunzione base-collettore: la caduta sarà ancora praticamente nulla. In questo caso le due correnti (la corrente iniettata dalla giunzione p^+/n e la corrente iniettata dal contatto di base) semplicemente si sommano.


1.
0.1
0.01
0.001
0001
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
x

Prova scritta del 18/07/07

ESERCIZIO 1

Misure $I - V$ effettuate su una giunzione pn polarizzata direttamente hanno fornito i valori della tabella seguente

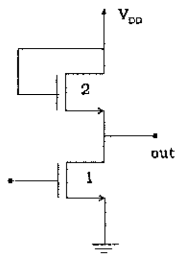
V (V)	I (A)	V (V)	I (A)
0.01	5.9×10^{-15}	0.2	2.8×10^{-11}
0.05	7.4×10^{-14}	0.3	1.3×10^{-9}
0.1	5.8×10^{-13}	0.4	6.1×10^{-8}

1) Determinare I_0.

2) Se la giunzione è brusca con $N_A = N_D$ e τ_n (zona p) $= \tau_h$ (zona n) contribuiscono maggiormente alla I_0 gli elettroni o le lacune?

ESERCIZIO 2

1) Disegnarè le maschere necessarie per la realizzazione della parte di circuito mostrata in figura. $W_1 = W_2$, $L_2 = 4L_1$. Il processo è di tipo LOCOS.



2) Il terminale out è schematizzabile con una capacità verso massa. Disegnare il circuito equivalente DC quando $V_{GS1} < V_{TH}$.

3) Quando $V_{GS1} = V_{DD}$ descrivere il metodo grafico mediante il quale è possibile trovare $V_{out} = V_{DS1}$.

[4)]Che valore massimo può assumere V_{out}?

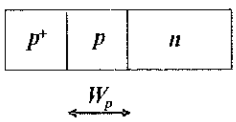
ESERCIZIO 3

Nella struttura (diodo) in figura le zone a drogaggio normale n e p hanno una concentrazione di drogante di 10^{15} cm^{-3} ($\mu_n = 1000$ cm^2/Vs, $\mu_p = 400$ cm^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s). La zona p ha una estensione W_p pari a 2 μm.

1) Per una tensione di polarizzazione inversa pari a 5 V (in valore assoluto) determinare il valore del campo elettrico massimo.

2) Per tensioni di polarizzazione inversa superiori a 6 V (in valore assoluto) disegnare l'andamento qualitativo del campo elettrico. Il campo elettrico massimo è inferiore o superiore rispetto al caso W_p tendente a infinito (giunzione brusca standard)? Giustificare la risposta.

3) Determinare l'espressione della corrente nel diodo (per polarizzazione diretta, $S = 1$ mm^2).



SOLUZIONE 3

1) In caso di polarizzazione inversa, finchè la regione di svuotamento rimane nella zona poco drogata la giunzione si comporta 'normalmente' e le espressioni da utilizzare per il campo elettrico e l'ampiezza della W sono quelle usuali. Calcoliamo la tensione V_W per cui $x_p = 2\ \mu$m, che significa $W = 4\ \mu$m poichè i drogaggi sono numericamente uguali.

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.575 \text{ V}$$

Dall'espressione:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + |V_W|)}$$

si ricava:

$$V_0 + |V_W| = \frac{qW^2}{2\varepsilon_S\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)} = 6.08 \text{ V}$$

e quindi:

$$|V_W| = 5.506 \text{ V}$$

Per una tensione applicata pari a 5 V (inferiore rispetto a V_W) il campo elettrico massimo può essere determinato con la formula delle dispense:

$$E_{MAX} = \frac{qN_D}{\varepsilon_S}x_n = \frac{qN_D}{\varepsilon_S}\frac{W(5)}{2}$$

$$W(5) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + 5)} = 3.8\ \mu\text{m}$$

$$E_{MAX} = 2.89 \text{ MV/m}$$

2) Nel caso di tensione inversa applicata maggiore di 6 V, la regione di svuotamento è tale da superare W_p =2 μm e il grafico qualitativo del campo elettrico risulta: L'area sotto la curva deve essere pari alla differenza di potenziale applicata, quindi rispetto al caso di W_p molto grande (giunzione brusca 'normale') il campo elettrico massimo dovrà essere superiore.

3) Nel caso di polarizzazione diretta, il diodo può essere considerato a base corta per la parte p (la parte p^+ si comporta come contatto) e a base lunga per la parte n. Infatti:

$$D_p = \frac{kT}{q}\mu_p = 0.001036$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 32.2\ \mu\text{m}$$

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n = 0.002589$$

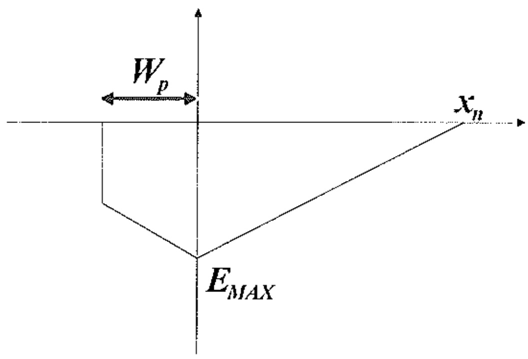


Figure 0.1:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89\ \mu\text{m}$$

quindi l'espressione della corrente risulta:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

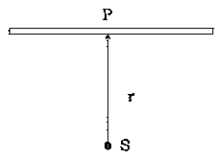
con:

$$I_0 = \frac{qSD_p}{W_p} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qSD_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} = 20.50\ \text{pA}$$

Prova scritta del 26/07/07

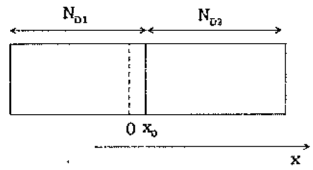
ESERCIZIO 1

1) Disegnare schematicamente un sistema di vuoto per l'evaporazione di film di Al, indicando quali sono le operazioni da eseguire a partire dalla condizione in cui nella camera di lavoro c'è la pressione atmosferica. 2) La sorgente sia puntiforme ed emetta uniformemente in tutto l'angolo solido $N = 1.6 \times 10^{21}$ atomi/s. Se $r = 30$ cm qual'è la velocità di crescita del film nel punto P sapendo che $N_{Al} = 6 \times 10^{22}$ cm^{-3}?



ESERCIZIO 2

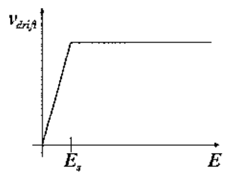
Nella struttura della figura i drogaggi a destra e sinistra di x_0 sono costanti e pari, rispettivamente, a $N_{D1} = 10^{15}$ cm^{-3} e $N_{D2} = 10^{18}$ cm^{-3}. 1) Calcolare la ddp di contatto. 2) Si faccia l'ipotesi che la concentrazione di elettroni attraverso la giunzione vari come $n(x) = N_{D1} + (N_{D2} - N_{D1})\left(1 - e^{-\frac{x}{L}}\right)$ con $L = 0.01$ μm; calcolare x_0.



ESERCIZIO 3

Un transistore NMOS è realizzato su un substrato p con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} =$ 50 nm, struttura MOS ideale, $L = 200$ nm, $W = 1$ μm. La relazione tra velocità di drift e campo elettrico è riportata in figura ($E_a = 2.5$ MV/m), e, per bassi campi, la mobilità risulta di 20000 cm^2/Vs (valore tipico di alcuni semiconduttori composti). L'ossido è SiO_2 e si assumano, ad eccezione della mobilità, i valori tipici del silicio. 1) Per $V_{GS} = 5$ V, e per piccoli valori di V_{DS}, determinare la resistenza di strato.

Si assuma che il potenziale vari sempre ($\forall\ V_{DS}$) linearmente lungo il canale (da source a drain) e che la carica sia costante lungo il canale e pari a quella dovuta alla V_{GS} (V_{DS} trascurabile per il calcolo della carica). 2) Disegnare la caratteristica per $V_{GS} = 5$ V, $V_{DS} < 3$ V. 3) Determinare la corrente di saturazione ($V_{GS} = 5$ V).



SOLUZIONE 1

2) Il flusso F in r vale evidentemente

$$F = \frac{N}{4\pi r^2} = \frac{1.6 \times 10^{21}}{4\pi \times 30^2} = 1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

e la velocità di crescita si ottiene dall'uguaglianza

$$Fdt = N_{Al}dx$$

e quindi

$$\frac{dx}{dt} = \frac{F}{N} = \frac{1.4 \times 10^{17}}{1.6 \times 10^{21}} = 8.75 \times 10^{-5} \text{ cms}^{-1}$$

SOLUZIONE 2

A sinistra di x_0 si ha accumulazione di elettroni, a destra svuotamento.

Dovrà essere, per le cariche superficiali a destra e sinistra,$|Q_n| = Q_h$. L'eccesso di carica fra 0 e x_0 è dato da

$$\delta n(x) = n(x) - N_{D1}$$

e quindi

$$|Q_n| = q\left(N_{D2} - N_{D1}\right) \int_0^{x_0} \left(1 - e^{-\frac{x}{L}}\right) dx$$

$$qL\left(N_{D2} - N_{D1}\right) \int_0^{x_0} \left(1 - e^{-\frac{x}{L}}\right) d\left(\frac{x}{L}\right) =$$

$$q\left(N_{D2} - N_{D1}\right) x_0 - qL\left(N_{D2} - N_{D1}\right) \int_0^{x_0} e^{-\frac{x}{L}} d\left(\frac{x}{L}\right) =$$

$$q\left(N_{D2} - N_{D1}\right) x_0 + qL\left(N_{D2} - N_{D1}\right)\left(e^{-\frac{x_0}{L}} - 1\right)$$

mentre per l'eccesso a destra di x_0

$$\delta p(x) = qN_{D2} - qN_{D1} - q\left(N_{D21} - N_{D1}\right)\left(1 - e^{-\frac{x}{L}}\right)$$

$$Q_h = q\left(N_{D21} - N_{D1}\right) \int_{x_0}^{\infty} e^{-\frac{x}{L}} dx = q\left(N_{D21} - N_{D1}\right) L e^{-\frac{x_0}{L}}$$

e infine

$$x_0 + L\left(e^{-\frac{x_0}{L}} - 1\right) = Le^{-\frac{x_0}{L}}$$

$$x_0 = L$$

SOLUZIONE 3

1) Per piccoli valori di V_{DS} il MOS si comporta normalmente in regime lineare e quindi:

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

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

$$V_T = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 0.916 \text{ V}$$

$$R_{\square} = \frac{1}{\mu_n C_{OX}\left(V_{GS} - V_T\right)} = 177\ \Omega$$

2) Se il campo elettrico è inferiore a E_a il transistore si comporta normalmente (velocità di drift proporzionale al campo elettrico), e l'approssimazione di carica costante lungo il canale implica che il MOS funzioni in regime lineare. Se il campo elettrico è superiore a E_a, che significa $V_{DS} > E_a L = 0.5$ V, la corrente rimane costante (saturazione della velocità). Quindi la caratteristica è simile a quella standard, solo che la saturazione si raggiunge per $V_{DS} = 0.5$ V.

3) La corrente di saturazione si può calcolare dalla velocità di drift massima $v_{\max} = \mu_n E_a = 5 \times 10^6$ m/s:

$$J = qnv_{\max} = Qv_{\max}$$

dove Q è la carica per unità di volume. Seguendo la simbologia standard:

$$J = q\frac{1}{x_i}v_{\max}\int_0^{x_i} n\left(x\right)dx$$

dove n è funzione solo di x, data l'ipotesi semplificativa di carica costante lungo il canale. La corrente si ottiene moltiplicando per la superficie:

$$I = q\frac{1}{x_i}v_{\max}x_i W\int_0^{x_i} n\left(x\right)dx$$

e quindi:

$$I = Q_n v_{\max} W$$

dove:

$$Q_n = C_{ox}\left(V_{GS} - V_T\right)$$

Svolgendo i conti avremo una corrente pari a 14 mA.