Prova scritta del 12/01/05

ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

In una giunzione p^+n brusca il campo elettrico all'equilibrio ha l'andamento seguente (asse x orientato da p a n):

$$\begin{cases} E(x) = -E_{MAX}\left(1 - \frac{ax}{x_0}\right), & 0 \leqslant x \leqslant x_0 \\ E(x) = -k\,(x - x_1)^2, & x_0 \leq x \leqslant x_1 \end{cases}$$

con $E_{MAX} = 1.64 \times 10^6$ V/m, $a = 0.7$, $k = 1.366 \times 10^{18}$ V/m^3, $x_1 = 1.3\ \mu$m, $x_0 = 0.7\ \mu$m:

1) Calcolare V_0;

2) Determinare l'andamento della densità di carica $\rho(x)$ e farne il grafico; calcolare il valore del drogaggio del lato n.

3) Che valore avrebbe avuto E_{MAX} se fosse stata usata l'approssimazione di svuotamento completo?

ESERCIZIO 2 (μE I e DTE)

Una struttura MOS è realizzata su un substrato di silicio di tipo p uniformemente drogato ($N_A = 5 \times 10^{21}$ m^{-3}) con un gate in polisilicio di tipo p^+. E' stata effettuata una misura $C - V$ a bassa frequenza, ottenendo un valore per la capacità minima (per unità di superficie) di 146 μF/m^2 ad una tensione pari a 1.37 V.

1) Determinare lo spessore dell' ossido.

2) Determinare la concentrazione di impurezze (ioni sodio) per unità di superficie, supponendole concentrate all' interfaccia ossido/silicio.

ESERCIZIO 3 (μE I e DTE)

Disegnare le maschere necessarie per realizzare con un processo BJT SBC la porzione di circuito della figura. A e B sono delle metal che passano sopra l'ossido. Compatibilmente con il processo la V_{BD} deve essere la più alta possibile. Disegnare anche una sezione a processo ultimato.

SOLUZIONE 1

V_0 è dato dall'integrale del campo

$$V_0 = -\int_0^{x_1} E dx = E_{MAX} \int_0^{x_0} \left(1 - \frac{ax}{x_0}\right) dx + k \int_{x_0}^{x_1} (x - x_1)^2 dx =$$

$$E_{MAX} \left(x_0 - \frac{a x_0}{2}\right) - k \frac{(x_0 - x_1)^3}{3}$$

$$1.64 \times 10^6 \times \left(0.7 - \frac{0.7 \times 0.7}{2}\right) \times 10^{-6} - \frac{1.366 \times 10^{18} \times ((0.7 - 1.3) \times 10^{-6})^3}{3} = 0.845 \text{ V};$$

2)

$$\frac{d}{dx}(E(x)) = \frac{\rho(x)}{\varepsilon_s}.$$

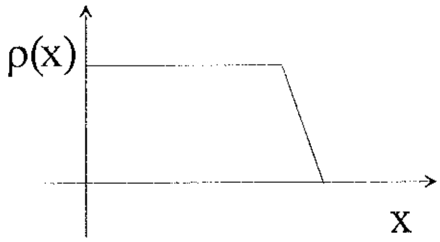
Fra 0 e x_0 si ottiene

$$\rho(x) = \varepsilon_s \frac{a E_{MAX}}{x_0} = \frac{11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.7 \times 1.64 \times 10^6}{0.7 \times 10^{-6}} = 171.27 \text{ Cm}^{-3}$$

corrispondentead un drogaggio $N_D = \frac{171.27}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.07 \times 10^{21}$ m^{-3}; fra x_0 e x_1

$$\rho(x) = -2k(x - x_1).$$

Il grafico è il seguente



3) Dato che V_0 è una costante per la giunzionesi avrà

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0}{q N_D}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.845}{1.6 \times 10^{-19} \times 1.07 \times 10^{21}}} = 1.01 \times 10^{-6} \text{ m}$$

e quindi

$$V_0 = \frac{E_{MAX} W}{2}$$

$$E_{MAX} = \frac{2V_0}{W} = \frac{2 \times 0.845}{1.01 \times 10^{-6}} = 1.67 \times 10^6 \text{ V/m}.$$

SOLUZIONE 2

1) Il minimo della curva $C - V$ si ha per $V_{GSubst} = V_T = 1.37$ V. Sappiamo che:

$$C_{\min} = \frac{C_{ox} C_{\text{Si}}}{C_{ox} + C_{\text{Si}}} = 146\ \mu\text{F/m}^2$$

dove è possibile determinare C_{Si} conoscendo il drogaggio ($n_i = 1.5 \times 10^{16}$ m^{-3}):

$$C_{\text{Si}} = \frac{\varepsilon_{\text{Si}}}{W(2\psi_B)}$$

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

$$W(2\psi_B) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\text{Si}}}{qN_A} 2\psi_B} = 0.416\ \mu\text{m}$$

$$C_{\text{Si}} = 253.3\ \mu\text{F/m}^2;$$

è allora immediato calcolare C_{ox} conoscendo $C_{\min}$:

$$C_{ox} = \frac{1}{1/C_{\min} - 1/C_{\text{Si}}} = 344.6\ \mu\text{F/m}^2$$

e lo spessore dell' ossido risulta:

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$t_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{C_{ox}} = 100\ \text{nm}$$

2) Il minimo della capacità nella curva $C - V$ si ha per $V_{GSubst} = V_T$, dove V_T dipende dalla carica nell'ossido. Il silicio è di tipo p, con gate di polisilicio di tipo p^+, per cui V_T risulta:

$$V_T = \frac{\sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}} q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + |\Phi_{MS}| - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

dove Q_{ox} e' positiva e, dato che il gate e' di tipo p^+:

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

quindi avremo:

$$V_T = 1.836 - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 1.836 - V_T = 1.84 - 1.37 = 0.47\ \text{V}$$

$$Q_{ox} = 0.47 C_{ox} = 1.620 \times 10^{-4}\ \text{C/m}^2$$

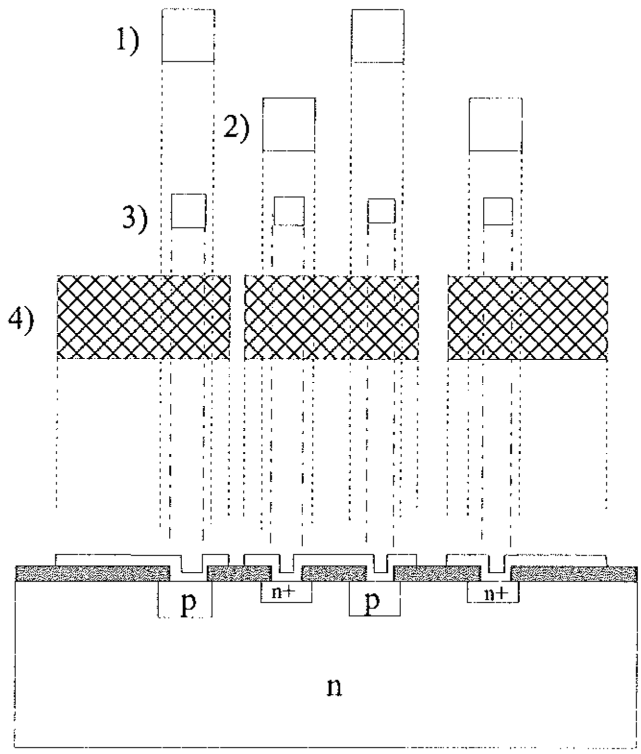
che corrisponde ad una concentrazione di impurezze (ioni di sodio) per unita' di superficie pari a:

$$Conc. = \frac{Q}{q} = 10^{15}\ \text{ioni/m}^2$$

SOLUZIONE 3

La tensione di breakdown è tanto minore quanto maggiore è il valore di E_{MAX} all'equilibrio. Se consideriamo per semplicità le giunzioni EB e BC come giunzioni brusche unilaterali n^+p e p^+n rispettivamente, avremo che $E_{MAX} = \frac{qNW}{\varepsilon_s} = \frac{qN}{\varepsilon_s}\sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0}{qN}}$, ovvero il campo è proporzionale a $\sqrt{N}$. Si deve utilizzare dunque la giunzione base/collettore ($N_E > N_B > N_C$). Nella figura:

1 è la mascera per la diffusione di base; 2 serve per la diffusione di emettitore che è usata per rendere ohmico il contatto sul lato n del diodo; 3 apre le finestre per i contatti nelle quattro diffusioni precedenti; 4 è la maschera della metal che realizza il collegamento fra i due diodi. Si noti che nella soluzione presentata c'è un resistore in parallelo di valore elevato, rappresentato dallo strato epi, fra i due pozzetti n^+. Se lo si vuole escludere completamente basta realizzare ciascuno dei due diodi in una zona isolata.



Prova scritta del 28/01/05

ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

Misure $I-V$ su un diodo Schottky a due diverse temperature T_1 e T_2 hanno dato i risultati seguenti (le tensioni sono in volt e le correnti in ampère):

	T_1	T_2
0.1		9.4×10^{-5}
0.15	7.0×10^{-5}	5.4×10^{-4}
0.2	4.8×10^{-4}	3.1×10^{-3}
0.25	3.29×10^{-3}	1.8×10^{-2}
0.3	2.25×10^{-2}	

1) Determinare graficamente le correnti di saturazione alle due temperature; si usi come scala per le tensioni 4 qfp = 0.1 volt.

2) Calcolare dai dati la T_2;

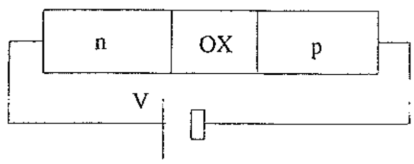
3) se il diodo è polarizzato con un generatore di corrente I e dette C_1 e C_2 le capacità differenziali alle due diverse temperature dire se $C_1 \lesseqgtr C_2$.

ESERCIZIO 2 (μE I e DTE)

Data la struttura della figura ($N_A = N_D = 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm) in cui la parte n fa da gate:

1) Disegnare il diagramma a bande all'equilibrio;

2) determinare il valore di V che provoca l'inversione.



ESERCIZIO 3

In un transistore bipolare n^+pn ($N_{DEm} = 10^{19}$ cm^{-3}, $N_{ABase} = N_{DColl} = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\tau_n = 10^{-7}$ s, $\mu_n = 1000$ cm^2/Vs, lunghezza metallurgica della base $X = 4$ μm, $S = 1$ mm^2), l'emettitore è cortocircuitato con la base.

1) Si disegni qualitativamente la caratteristica $I_{EC} - V_{EC}$ del dispositivo e il profilo dei portatori minoritari nella base per tensioni positive e negative.

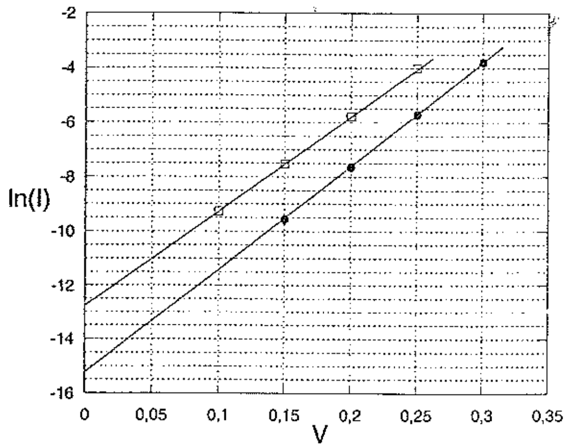
2) Si calcoli la corrente nel dispositivo per $V_{EC} = -10$ V. Se la tensione aumenta in valore assoluto, rimanendo negativa, la corrente aumenta o diminuisce? Perchè?

SOLUZIONE 1

1) La caratteristica dello Schottky è

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

che per $V >> V_T$ si riduce a $I = I_0 e^{\frac{V}{V_T}}$. Riportando sull'asse delle ordinate i valori di $\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{V}{V_T}$ si ottengono due rette e quindi la condizione anzidetta è verificata.



Estrapolando per $V = 0$ si ottengono le intercette $\ln(I_{01})$ e $\ln(I_{02})$ che valgono all'incirca -15.3 e -12.7. Passando agli esponenziali $e^{-15.3} = 2.27 \times 10^{-7}$ e $e^{-12.7} = 3.0 \times 10^{-6}$.

2) Dalla $\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{V}{V_T}$ si vede che $\frac{1}{V_T}$ è la pendenza della retta su scala logaritmica

$$\frac{1}{V_T} = \frac{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{V_2 - V_1} = \frac{\ln\left(\frac{1.8 \times 10^{-2}}{9.4 \times 10^{-5}}\right)}{0.25 - 0.1} = 35.03$$

da cui $V_T = \frac{1}{35.03}$; $\frac{2.855 \times 10^{-2}}{8.63 \times 10^{-5}} = 330.82$ K.

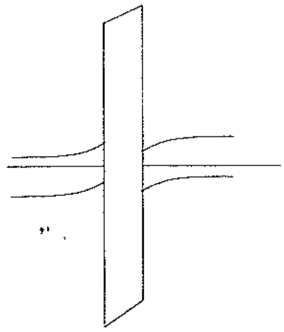
3) A parità di corrente sul diodo che si trova a temperatura più alta cade una tensione minore. Dato che l'unica capacità dello Schottky è quella della zds, data da

$$C_D = \frac{\varepsilon_s}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_0 - V)}{q N_D}}}$$

si vede che ad una V minore corrisponde una C minore. Quindi $C_2 < C_1$.

SOLUZIONE 2

1) Il diagramma a bande è, qualitativamente, il seguente.



2) Per il calcolo della V_T ideale, poiché deve essere indotta la stessa carica per unità di superficie $|Q_W|$ in entrambi i lati:

$$V_T = 2\Psi_{Bn} + 2\Psi_{Bp} + V_{ox};$$

dato poi che i drogaggi hanno lo stesso valore

$$V_T = 4\Psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q 2\Psi_B N}}{C_{ox}} =$$

$$4 \times 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) + \frac{\sqrt{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.578 \times 10^{21}}}{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}} \times 20 \times 10^{-9}$$

$$= 1.24 \text{ V}.$$

A questa deve essere sottratta la $\Phi_{MS} = E_g - \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_C}{N}\right) - \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_V}{N}\right) = 1.08 - 0.026 \times \ln\left(\frac{2.8\times 10^{19}}{10^{15}}\right) - 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{19}}{10^{15}}\right) = 0.574$. In definitiva $V_T = 1.24 - 0.574 = 0.666 =$ V.

SOLUZIONE 3

1) Il transistore è montato a diodo, quindi in prima approssimazione la caratteristica $I_{EC} - V_{EC}$ è quella di un diodo, polarizzato in diretta per $V_{EC} > 0$ ed in inversa per $V_{EC} < 0$. Per le concentrazioni dei portatori in base bisogna distinguere il caso $V_{EC} > 0$, in cui la giunzione base- collettore è polarizzata in diretta, e il caso $V_{EC} < 0$ in cui la giunzione base-collettore è polarizzata in inversa. Nei due casi avremo rispettivamente:

2) Per calcolare la corrente del dispositivo (corrente di collettore) quando $V_{EC} = -10$ V, possiamo far riferimento al profilo dei portatori minoritari nel caso in cui la giunzione base-collettore è polarizzata in inversa:

$$I = I_C = -SqD_n\frac{\partial n}{\partial x} = +SqD_n\frac{n_{p0}}{W}$$

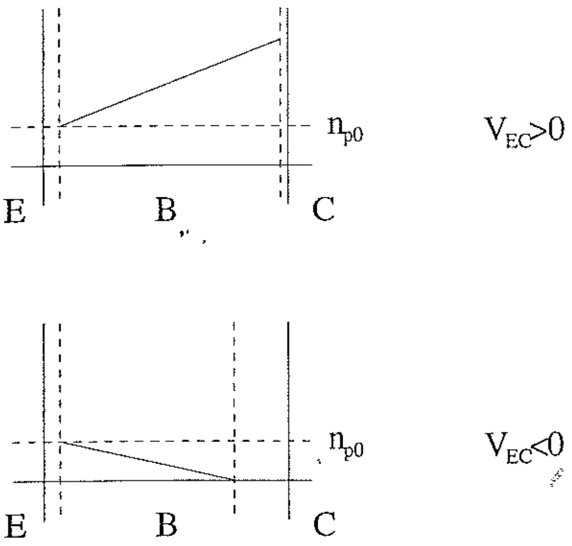


Figure 0.1:

dove W è la lunghezza effettiva della base, supposta corta rispetto a L_n. Il coefficiente di diffusione può essere immediatamente calcolato:

$$D_n = \mu_n V_T = 0.0259 \times 1000 = 25.9 \text{ cm}^2/\text{s}$$

La lunghezza di diffusione è allora:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 16.1 \ \mu\text{m}$$

quindi l'ipotesi di base corta, per cui il profilo di portatori può essere considerato lineare, è confermata. La lunghezza effettiva della base può essere calcolata conoscendo le condizioni di polarizzazione:

$$W = X - X_{BE} - X_{BC}$$

Calcoliamo l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni base-collettore e base-emettitore:

$$V_{0BE} = V_T \ln\left(\frac{N_{DEm} N_{ABase}}{n_i^2}\right) = 0.856 \text{ V}$$

$$W_{BE} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{q_{N_{ABase}}} V_{0BE}} = 0.474 \ \mu\text{m}$$

e quindi, dal momento che l' emettitore è pesantemente drogato:

$$X_{BE} = W_{BE} = 0.474 \ \mu\text{m}$$

$$V_{0BC} = V_T \ln\left(\frac{N_{ABase}N_{DColl}}{n_i^2}\right) = 0.659 \text{ V}$$

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{q}\left(\frac{1}{N_{ABase}} + \frac{1}{N_{DColl}}\right)(V_{0BC} + |V_{BC}|)} = 2.37\ \mu\text{m}$$

Essendo il drogaggio della base numericamente uguale a quello di collettore, la regione di svuotamento si ripartisce in parti uguali tra la base e collettore. Quindi avremo:

$$X_{BC} = \frac{W_{BC}}{2} = 1.184\ \mu\text{m}$$

$$W = 4 - 0.474 - 1.184 = 2.342\ \mu\text{m}$$

Avremo inoltre:

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{n_i^2}{N_{ABase}} = 4.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

Quindi la corrente risulta, a meno del segno:

$$I = 10^{-6} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.00259 \times \frac{4.5 \times 10^{10}}{2.342 \times 10^{-6}} = 7.96 \times 10^{-12} \text{ A}$$

piccola, perchè è la corrente di saturazione inversa di un diodo a base corta.

All' aumentare della tensione di polarizzazione inversa , avremo che W diminuisce, poiché aumenta la regione di svuotamento base-collettore. Quindi la corrente di saturazione inversa aumenta, analogamente a quanto accade in un diodo a base corta.

Prova scritta del 16/02/05

ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

Un contatto Me/Si(n) è caratterizzato da una ddp di contatto di 0.45 volt. Il drogaggio del Si vale 10^{15} cm^{-3} fino ad $x_0 = 0.4$ μm, poi, per $x > x_0$, vale 10^{16} cm^{-3}.

1) Si disegni l'andamento di $\mathcal{E}(x)$ nel Si dopo averne ricavata l'espressione analitica, utilizzando l'approssimazione di svuotamento completo.

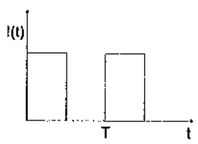
2) Scrivere l'espressione di W, coordinata alla quale il campo si annulla.

ESERCIZIO 2 (μE I e DTE)

Un campione di Si p ($N_A = 10^{15}$ cm^{-3}) è illuminato uniformemente da un laser la cui intensità è tale da causare una G_{op} di 10^{14} cm^{-3} s^{-1}. $\tau_n = 10^{-5}$ s.

1) Determinare la concentrazione di elettroni nel Si a regime.

2) Si supponga poi che l'intensità vari in funzione del tempo come indicato in figura. $f = 1$ MHz. Si calcoli la concentrazione di elettroni al tempo $t = T$.



ESERCIZIO 3 (μE I e DTE)

Un transistore MOS standard a tre terminali (substrato p, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_{nCanale} = 700$ cm^2/Vs, $\mu_{nBulk} = 1100$ cm^2/Vs, $\tau_{nBulk} = 10^{-7}$ s, $t_{ox} = 50$ nm, gate in polisilicio di tipo p^+, $W = L = 1$ mm) è polarizzato in modo da avere, per piccole V_{DS}, una resistenza di quadro pari a 5500 $\Omega/\Box$.

1) Determinare la tensione di gate.

2) Si sa poi che la giunzione drain-substrato ha un'area di 1 mm^2, che si può considerare indipendente dalle condizioni di polarizzazione. Per la tensione di gate di cui al punto 1) determinare la corrente I_{DS} per $V_{DS} = 500$ mV e $V_{DS} = -500$ mV (si assuma valida l' ipotesi di bassa iniezione).

SOLUZIONE 1

1) Se il drogaggio fosse costante e pari a 10^{15} cm^{-3}, per sostenere una ddp di 0.45 V sarebbe necessaria una zds pari a

$$X = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.45}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 0.766\ \mu\text{m}.$$

Dato che x_0 è $<$ 0.766 μm bisogna che la zds si estenda anche nella zona a drogaggio più elevato.

a) $\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\varepsilon_s}$, $(0, x_0) \Rightarrow \frac{dV(x)}{dx} = -\frac{qN_D x}{\varepsilon_s} + C_1$

e

b) $\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{qN_D^+}{\varepsilon_s}$, $(x_0, W) \Rightarrow \frac{dV(x)}{dx} = -\frac{qN_D^+ x}{\varepsilon_s} + C_2$

con le condizioni di annullamento del campo in W e di continuità del medesimo inx_0.

Segue dalla b) (campo nullo in W)

$$\frac{dV(x)}{dx} = -\frac{qN_D^+ x}{\varepsilon_s} + \frac{qN_D^+ W}{\varepsilon_s},$$

$$\mathcal{E}(x) = \frac{qN_D^+ x}{\varepsilon_s} - \frac{qN_D^+ W}{\varepsilon_s};$$

per la continuità in x_0

$$-\frac{qN_D x_0}{\varepsilon_s} + C_1 = -\frac{qN_D^+ x_0}{\varepsilon_s} + \frac{qN_D^+ W}{\varepsilon_s}$$

si ha

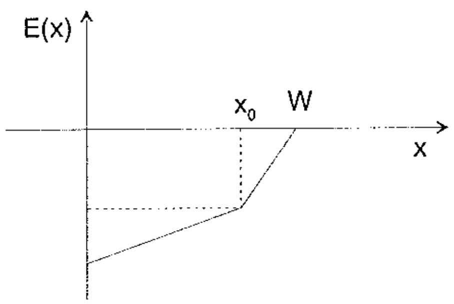
$$C_1 = -\frac{qN_D^+ x_0}{\varepsilon_s} + \frac{qN_D^+ W}{\varepsilon_s} + \frac{qN_D x_0}{\varepsilon_s}$$

e quindi

$$\frac{dV(x)}{dx} = -\frac{qN_D x}{\varepsilon_s} - \frac{qN_D^+ x_0}{\varepsilon_s} + \frac{qN_D^+ W}{\varepsilon_s} + \frac{qN_D x_0}{\varepsilon_s},$$

$$\mathcal{E}(x) = \frac{qN_D x}{\varepsilon_s} + \frac{qN_D^+ x_0}{\varepsilon_s} - \frac{qN_D^+ W}{\varepsilon_s} - \frac{qN_D x_0}{\varepsilon_s}$$

L'andamento del campo è quello della figura $\left(\mathcal{E}(x) = -\frac{dV(x)}{dx}\right)$



2) V_0 è data ed è uguale all'area sottesa dal campo:

$$-V_0 = x_0\mathcal{E}(x_0) + \frac{(W - x_0)\,\mathcal{E}(x_0)}{2} + \frac{(\mathcal{E}_{MAX} - \mathcal{E}(x_0))\,x_0}{2} =$$

$$x_0\mathcal{E}(x_0) + \frac{W\mathcal{E}(x_0) - x_0\mathcal{E}(x_0)}{2} + \frac{\mathcal{E}_{MAX}x_0 - \mathcal{E}(x_0)x_0}{2} = \frac{W\mathcal{E}(x_0)}{2} + \frac{\mathcal{E}_{MAX}x_0}{2} =$$

$$\frac{W}{2}\left(\frac{qN_D^+x_0}{\varepsilon_s} - \frac{qN_D^+W}{\varepsilon_s}\right) + \frac{x_0}{2}\left(\frac{qN_D^+x_0}{\varepsilon_s} - \frac{qN_D^+W}{\varepsilon_s} - \frac{qN_Dx_0}{\varepsilon_s}\right) =$$

$$\frac{WqN_D^+x_0}{2\varepsilon_s} - \frac{qN_D^+W^2}{2\varepsilon_s} + \frac{x_0}{2}\frac{qN_D^+x_0}{\varepsilon_s} - \frac{x_0}{2}\frac{qN_D^+W}{\varepsilon_s} - \frac{x_0}{2}\frac{qN_Dx_0}{\varepsilon_s} =$$

$$-\frac{qN_D^+W^2}{2\varepsilon_s} + \frac{x_0}{2}\frac{qN_D^+x_0}{\varepsilon_s} - \frac{x_0}{2}\frac{qN_Dx_0}{\varepsilon_s}$$

da cui

$$\frac{qN_D^+W^2}{2\varepsilon_s} = \frac{x_0}{2}\frac{qN_D^+x_0}{\varepsilon_s} - \frac{x_0}{2}\frac{qN_Dx_0}{\varepsilon_s} + V_0$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_sV_0 + qx_0^2\left(N_D^+ - N_D\right)}{qN_D^+}}$$

che, per $N_D^+ = N_D$ si riduce a

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_sV_0}{qN_D}}$$

SOLUZIONE 2

1) La concentrazione di regime si ottiene dalla equazione di continuità

$$\frac{dn_p}{dt} = G_{op} + G - R = 0$$

in cui, come è noto, il termine $G - R$ è dato da $-\frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$. A regime

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} + G_{op}\tau_n = \frac{2.25\times10^{20}}{10^{15}} + 10^{14}\times10^{-5} = 2.25\times10^5 + 10^9 \simeq 10^9cm^{-3}$$

2) Avremo per $t = T/2$

$$n_p\left(\frac{T}{2}\right) = n_{p0} + G_{op}\tau_n\left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau_n}}\right)$$

e per $t = T$

$$n_p(T) = n_{p0} + G_{op}\tau_n \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau_n}}\right) e^{-\frac{T}{2\tau_n}};$$

$$\begin{aligned} n_p(T) &= 2.25 \times 10^5 + 10^9 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{10^{-6}}{2 \times 10^{-5}}\right)\right) \times \exp\left(-\frac{10^{-6}}{2 \times 10^{-5}}\right) = 2.25 \times 10^5 + 4.64 \\ &= 4.66 \times 10^7. \end{aligned}$$

SOLUZIONE 3

1) Per piccole V_{DS} (regime lineare) avremo che:

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

e quindi:

$$R_\square = \frac{1}{\mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T)}$$

$$V_{GS} - V_T = \frac{1}{\mu_n C_{ox} R} = 3.76 \text{ V}$$

dove la mobilita' e' quella degli elettroni nel canale. Calcoliamo la tensione di soglia, considerando il gate di tipo p_+:

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 6.91 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

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

gate di polisilicio di tipo p^+:

$$\Phi_{MS} = \frac{E_g}{2q} - \psi_B = 0.193$$

$$V_T = \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + |\Phi_{MS}| = 1.12 \text{ V}$$

e quindi:

$$V_{GS} = V_T + \frac{1}{\mu_n C_{ox} R} = 4.88 \text{ V}$$

2) Per calcolare la corrente drain-source per $V_{DS} = 0.5$ V, si puo' usare la resistenza di quadro ($W = L$), poiche' la tensione e' abbastanza piccola. Volendo essere piu' precisi, si deve usare la formula quadratica:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right] = 85 \ \mu\text{A}$$

Nel caso di $V_{DS} = -0.5$ V la corrente del dispositivo MOS e' la stessa. Ma in parallelo al dispositivo MOS conduce anche il diodo substrato-drain, che risulta polarizzato in diretta. Basta calcolare la corrente di questa giunzione e sommarla alla corrente I_{DS} del transistore. Nel caso del diodo substrato-drain (di tipo n^+/p) avremo:

$$I_0 = q\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_A}S$$

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n = 0.0259 \times 0.1100 = 2.849 \times 10^{-3}$$

dove per la mobilita' si e' usato il valore nel bulk.

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 16.88\ \mu\text{m}$$

da notare che la lunghezza di diffusione degli elettroni risulta maggiore della lunghezza di canale.Quindi avremo:

$$I_0 = 1.6 \times 10^{-19} \times \frac{2.849 \times 10^{-3}}{16.88 \times 10^{-6}}\frac{2.25 \times 10^{32}}{10^{21}} \times 10^{-6} = 6.08 \times 10^{-12}\ \text{A}$$

Il contributo alla corrente I_{DS} dovuto alla giunzione bulk-drain e' dunque dato da (trascurando il "-1"):

$$I_{DS} = I_0 e^{\frac{V}{V_T}} = 1.47\ \text{mA};$$

risulta quindi trascurabile la corrente del transistore MOS.

Prova scritta dell'8/06/05

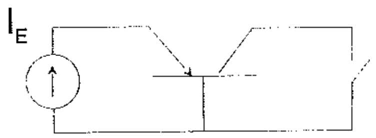
ESERCIZIO 1 (μE I e DTE)

Nel *pnp* della figura $I_{ES} = 10^{-14}$ A, $\alpha_F = 0.98$, $\alpha_R = 0.57$, $I_E = 1$ mA.

1) calcolare V_{EB} quando l'interruttore è chiuso;

2) calcolare V_{EB} quando l'interruttore è aperto.

3) In quale dei due casi è maggiore l'eccesso dei minoritari nella base?



ESERCIZIO 2 (DTE)

In un NMOS ($N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}) il S e il D hanno un drogaggio costante di 10^{20} cm^{-3}. Si supponga la struttura MOS ideale e le giunzione di S e D di profondità infinita secondo x. La distanza fra le giunzioni metallurgiche vale $L = 1.6$ μm.

1) Disegnare il diagramma a bande quotato S/sub/D secondo y per $x = 0$ quando $V_{GS} = 0$ e $V_{DS} = 0$.

2) Evidenziare le modifiche del diagramma quando $V_{GS} = V_T$ e $V_{DS} = 0$.

3) Utilizzando un modello a condivisione di carica (*charge sharing model*) scrivere un'espressione della tensione di soglia.

ESERCIZIO 3 (μE I e DTE)

Una giunzione p^+/n ($N_D = 10^{15}$ cm^{-3}) viene polarizzata in diretta con una tensione di 0.5 V. La sezione è pari a 1 mm^2, mentre la distanza giunzione-contatto nella zona n vale W =10 μm. La mobilità delle lacune nella zona n è uguale a 390 cm^2/Vs ed il tempo di vita medio è 0.1 μs.

1) Determinare l' espressione del profilo dei portatori minoritari iniettati (si trascuri la regione di svuotamento).

2) Calcolare il valore della corrente nella giunzione.

SOLUZIONE 1

1) Con l'interruttore chiuso ($V_{CB} = 0$) dalla prima delle equazioni di Ebers-Moll

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

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

$$V_{EB} = V_T \ln\left(\frac{I_E}{I_{ES}} + 1\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{-3}}{10^{-14}} + 1\right) = 0.658 \text{ V}.$$

2) Con l'interruttore aperto dalle caratteristiche a base comune con $I_C = 0$

$$0 = -\alpha_F I_E + I_{CS}\left(e^{\frac{V_{CB}}{V_T}} - 1\right)(1 - \alpha_F \alpha_R)$$

si ottiene il valore di V_{CB} mediante l'espressione

$$V_{CB} = V_T \ln\left(\frac{\alpha_F I_E}{I_{CS}(1 - \alpha_F \alpha_R)} + 1\right)$$

dove tutto è noto ad eccezione di I_{CS} , che si determina ricordando la relazione di reciprocità del bipolare

$$\alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS}$$

$$I_{CS} = \frac{\alpha_F I_{ES}}{\alpha_R} = \frac{0.98 \times 10^{-14}}{0.57} = 1.72 \times 10^{-14};$$

$$V_{CB} = 0.026 \times \ln\left(\frac{0.98 \times 10^{-3}}{1.72 \times 10^{-14} \times (1 - 0.98 \times 0.57)} + 1\right) = 0.665 \text{ V}.$$

Sempre dalla prima

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

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

$$0.026 \times \ln\left(\frac{10^{-3} + 0.57 \times 1.72 \times 10^{-14} \times \left(e^{\frac{0.665}{0.026}} - 1\right)}{10^{-14}} + 1\right) = 0.679 \text{ V}.$$

3) Evidentemente nel caso di interruttore aperto e per due motivi: perché V_{EB} è maggiore e perché $V_{CB} > 0$.

SOLUZIONE 2

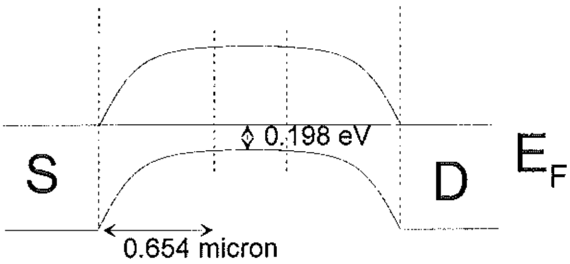
1) L'ampiezza della zona svuotata S, D/sub vale

$$W_{S,D} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0}{qN_A}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.026 \times \ln\left(\frac{5\times10^{21}\times10^{26}}{2.25\times10^{32}}\right)}{1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{21}}} = 0.489\ \mu\text{m}$$

e si estende tutta nel sub. La distanza $E_F - E_V$ nel sub si calcola con la relazione

$$E_F - E_V = kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{19}}{5 \times 10^{15}}\right) = 0.198\ \text{eV}.$$

Il diagramma richiesto è

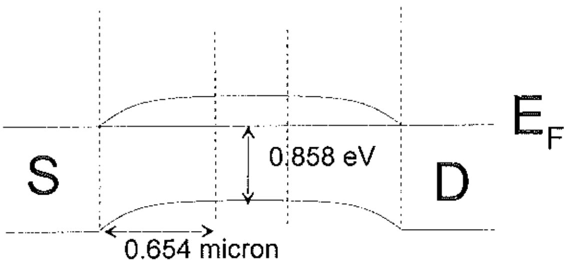


e la zona neutra nel canale è lunga $1.6 - 0.489 \times 2 = 0.622 = \mu$m.

2) Quando $V_{GS} = V_T$ nel sub cade una tensione pari a

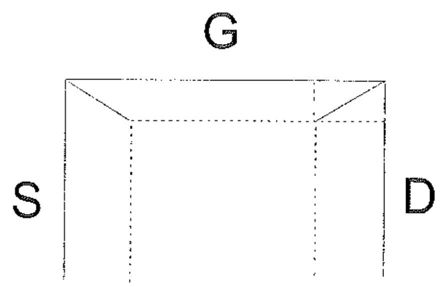
$$2\Psi_B = 2\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 2 \times 0.026 \times \ln\left(\frac{5 \times 10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.66\ \text{V}$$

per cui la banda di conduzione (e quella di valenza) si spostano verso il basso di 0.66 eV. La distanza di 0.198 nel disegno precedente diviene quindi $0.66 + 0.198 = 0.858$ eV.



3) L'ampiezza della zona svuotata sotto il gate alla soglia vale

$$W_G = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s 2\Psi_B}{qN_A}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.66}{1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{21}}} = 0.415\ \mu\text{m};$$



la zona di svuotamento alla soglia appare come da figura. Se si attribuisce al S e al D la carica del rettangolo avremo per la carica totale Q_{TOT} sottesa dal gate

$$Q_{TOT} = WLW_G qN_A - WW_G W_{S,D} qN_A = qN_A WW_G L\left(1 - \frac{W_{S,D}}{L}\right)$$

e, per la carica Q_s per unità di superficie,

$$Q_s = qN_A W_G\left(1 - \frac{W_{S,D}}{L}\right);$$

la V_T è dunque

$$V_T = \frac{qN_A W_G\left(1 - \frac{W_{S,D}}{L}\right)}{C_{ox}} + 2\Psi_B$$

che, per $L >> W_{S,D}$ (canale lungo) si riduce alla consueta espressione.

SOLUZIONE 3

1) La lunghezza di diffusione delle lacune iniettate risulta:

$$D_p = \frac{kT}{q}\mu_p = 10.01 \quad \text{cm}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 10.01 \times 10^{-4} \text{ m} = 10.01 \ \mu\text{m}$$

avremo dunque $W = L_p$. Il diodo non può essere considerato a base lunga, né a base corta. Bisogna allora risolvere l'equazione di continuità considerando entrambi i termini esponenziali:

$$\delta p(x) = A\ e^{\frac{x}{L_p}} + \ B\ e^{-\frac{x}{L_p}}$$

dove si suppone l'origine alla giunzione (trascurando la zona di svuotamento). Per le condizioni a contorno avremo:

$$\delta p(0) = p_{n0}\ (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) = \frac{n_i^2}{N_D}\ (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) = 5.45 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

mentre sul contatto ($x = W$) la concentrazione di minoritari sarà pari a p_{n0}:

$$\delta p(W) = 0$$

Quindi avremo il sistema lineare di due equazioni in due incognite:

$$A + B = 5.45 \times 10^{13}$$

e $(W = L_p)$

$$Ae + B/e = 0$$

dalla seconda avremo:

$$e^2 A + B = 0$$
$$B = -e^2 A$$

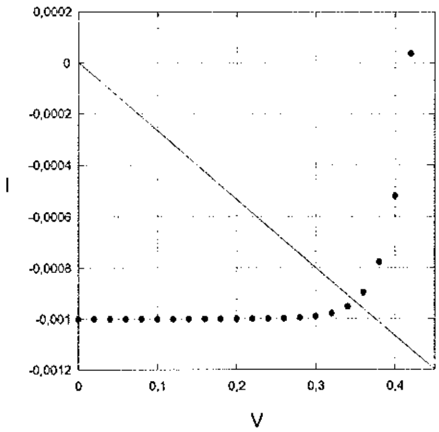
sostituendo nella prima:

$$A(1 - e^2) = 5.45 \times 10^{13}$$
$$A = -8.53 \times 10^{12} \ \ \mathrm{cm}^{-3}$$
$$B = 6.30 \times 10^{13} \ \mathrm{cm}^{-3}$$

che determina il profilo dei portatori minoritari (lacune) nella parte n.

2) La corrente può essere ricavata immediatamente conoscendo il profilo dei portatori minoritari, facendo l'usuale approssimazione di neutralità di carica. La derivata del profilo di portatori minoritari in $x = 0$ è proporzionale alla corrente.

$$I = -SqD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x=0} = -SqD_p \frac{A - B}{L_p} = 1.1 \text{ mA}$$



$$\left(I_0\left(\exp\left(\frac{V}{V_T}\right)-1\right)-I_{CC}\right)V$$

$$\left(10^{-10}\left(\exp\left(\frac{V}{0.026}\right)-1\right)-10^{-3}\right)V$$

a) $V = 0.35$

$$\left(10^{-10}\times\left(\exp\left(\frac{0.35}{0.026}\right)-1\right)-10^{-3}\right)\times 0.35 = 3.25\times 10^{-4}\ \mathrm{W}$$

b) $V = 0.36$

$$\left(10^{-10}\times\left(\exp\left(\frac{0.36}{0.026}\right)-1\right)-10^{-3}\right)\times 0.36 = 3.23\times 10^{-4}\ \mathrm{W}$$

c) $V = 0.34$

$$\left(10^{-10}\times\left(\exp\left(\frac{0.34}{0.026}\right)-1\right)-10^{-3}\right)\times 0.34 = 3.237\times 10^{-4}\ \mathrm{W}.$$

In definitiva $R = V/I = \frac{0.34}{9.52\times 10^{-4}} \simeq 357\ \Omega$.

SOLUZIONE 2

Il profilo di drive-in è dato da

$$N_A(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}}e^{-\frac{x^2}{4Dt}};$$

si deve calcolare il coefficiente di diffusione a 1100 ^{o}C.

Avremo

$$4.48\times 10^{-15} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

da cui

$$D_0 = \frac{4.48 \times 10^{-15}}{\exp\left(-\frac{3.46}{8.63\times10^{-5}\times(950+273)}\right)} = 0.773 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}.$$

A 1100 °C

$$D = 0.773 \times \exp\left(-\frac{3.46}{8.63 \times 10^{-5} \times (1100 + 273)}\right) = 1.61 \times 10^{-13} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}.$$

1) La profondità di giunzione è fissata dalla relazione

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

$$x = \sqrt{4Dt \ln \frac{Q}{N_D\sqrt{\pi D t}}}$$

$$x = \sqrt{4 \times 1.61 \times 10^{-13} \times 3000 \times \ln \frac{8 \times 10^{14}}{10^{15} \times \sqrt{\pi \times 1.61 \times 10^{-13} \times 3000}}} = 1.38\ \mu\text{m};$$

$$N_A(0) = \frac{8 \times 10^{14}}{\sqrt{\pi \times 1.61 \times 10^{-13} \times 3000}} = 2.05 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}.$$

2) La funzione di lavoro del Si vale

$$\Phi_{\text{Si}} = 4 + 1.08 = 5.08$$

in quanto il silicio può essere considerato p^+. Quindi $\Phi_{\text{Si}} > \Phi_{Al}$; si ha un piegamento delle bande verso il basso e il contatto sarebbe rettificante da questo punto di vista. Tuttavia l'ampiezza della zona di svuotamento

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0}{qN_A}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (5.08 - 4.5)}{1.6 \times 10^{-19} \times 2.05 \times 10^{25}}} = 6.1 \text{ nm}$$

fà sì che il contatto sia ohmico (o quasi).

SOLUZIONE 3

1) Calcoliamo la lunghezza effettiva della base:

$$V_{0BC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) = 0.659V$$

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_{0BC} + V_{BC})} = 1.72\ \mu\text{m}$$

$$W_{eff} = 11 - W_{BC}/2 = 10.14\ \mu\text{m}$$

40

La lunghezza di diffusione dei portatori minoritari in base risulta:

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

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 10.18\ \mu\text{m}$$

quindi la base non è lunga né corta. Bisogna dunque risolvere l'equazione di continuità per i portatori minoritari nella base:

$$p(x) = A\ e^{\frac{x}{L_p}} +\ B\ e^{-\frac{x}{L_p}}$$

con le condizioni a contorno date dalla polarizzazione base-emettitore e base-collettore (trascurando la regione di svuotamento emettitore-base):

$$p(0) = p_{n0}\ e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_{DBase}}\ e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = 1.09 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$$

$$p(W_{eff}) = 0$$

quindi avremo, dato che $W_{eff} \simeq L_p$:

$$A + B = 1.09 \times 10^{13}$$

$$Ae + B/e = 0;$$

dalla seconda equazione:

$$B = -Ae^2$$

e quindi:

$$A(1 - e^2) = 1.09 \times 10^{13}$$
$$A = -1.71 \times 10^{12}$$
$$B = 1.26 \times 10^{13}$$

2) Il calcolo delle correnti è immediato, dato il profilo dei portatori:

$$I_E = -SqD_p \left.\frac{\partial p(x)}{\partial x}\right|_{x=0} = -SqD_p \frac{A - B}{L_p} = 0.233\ \text{mA}$$

$$I_C = SqD_p \left.\frac{\partial p(x)}{\partial x}\right|_{x=W_{eff}} = SqD_p \frac{Ae - B/e}{L_p} = -0.151\ \text{mA}$$

da cui la corrente di base:

$$I_B = 0.233 - 0.15 = 0.082\ \text{mA}$$

Prova scritta del 20/07/05

ESERCIZIO 1 (DTE e μE I)

In una giunzione p^+n a sezione costante polarizzata direttamente, detta J_{TOT} la densità di corrente totale, scrivere l'espressione:

1) della densità di corrente di lacune in funzione di x, sia nella zona p che nella zona n;

2) della velocità di diffusione delle lacune, verificando dimensionalmente il risultato;

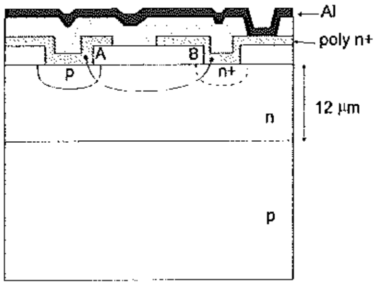
3) della densità di corrente totale di elettroni in funzione di x;

4) della velocità che compete a quest'ultima densità di corrente.

Il tutto nell'ipotesi di bassa iniezione.

ESERCIZIO 2 (DTE)

A partire da un substrato di tipo p si indichino tutti i passi di processo necessari alla realizzazione della struttura integrata della figura. Si disegni inoltre il diagramma a bande lungo il percorso AB.



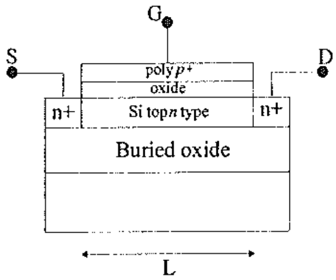
ESERCIZIO 3 (DTE e μE I)

Il dispositivo in figura è realizzato su un substrato Silicon On Insulator (SOI). Lo spessore del layer superiore di silicio, drogato di tipo n ($N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, μ_n =1000 cm^2/Vs) è pari a 800 nm, lo spessore dell' ossido di gate è pari a 50 nm, il gate è realizzato in polisilicio drogato p^+. Le dimensioni del dispositivo sono $L = 10$ μm (indicato in figura) e (in direzione perpendicolare) $W = 50$ μm. All' interfaccia Si/Buried oxide le bande sono piatte.

Per piccoli valori di V_{DS}, usando le approssimazioni convenzionali per la struttura MOS:

1) si calcoli la resistenza V_{DS}/I_{DS} per $V_{GS} = -5$ V;

2) si calcoli la resistenza V_{DS}/I_{DS} per $V_{GS} = 5$ V.



SOLUZIONE 1

1) Nella zona p^+ J_{TOT} è solo di drift: $J_h(x) = J_{TOT}$; nella zona n: $J_h(x) = -qD_h \frac{d\delta p(x)}{dx} = q\frac{D_h}{L_h}\delta p(0)e^{-\frac{x}{L_h}}$;

2) $J_h(x) = q\frac{D_h}{L_h}\delta p(0)e^{-\frac{x}{L_h}} = q\delta p(x)v(x)$ (l'espressione della densità di corrente si scrive in generale $J = \rho(x)v(x)$, in cui ρ è la densità di carica mobile), da cui

$$v(x) = \frac{D_h}{L_h} = \frac{D_h}{\sqrt{D_h\tau_h}}\frac{\tau_h}{\tau_h} = \frac{L_h^2}{L_h\tau_h} = \frac{L_h}{\tau_h};$$

3) $J_{TOT} = J_{nTOT}(x) + J_h(x)$; $J_{nTOT}(x) = J_{TOT} - q\frac{D_h}{L_h}\delta p(0)e^{-\frac{x}{L_h}} = J_{TOT}\left(1 - e^{-\frac{x}{L_h}}\right)$;

4) $J_{nTOT}(x) = J_{TOT}\left(1 - e^{-\frac{x}{L_h}}\right) = qv(x)n_{n0}$, dato che siamo in condizioni di bassa iniezione; segue immediatamente

$$v(x) = \frac{D_h}{L_h}\frac{\delta p(0)}{n_{n0}}\left(1 - e^{-\frac{x}{L_h}}\right).$$

SOLUZIONE 2

1)

1) Crescita epi dello strato n;

2) ossidazione termica;

3) passo litografico per l'apertura della finestra del p;

4) drogaggio p;

5) ossidazione termica;

6) passo litografico per l'apertura della finestra dell'n^+;

7) drogaggio n^+;

8) ossidazione termica;

9) passo litografico per l'apertura delle finestre in corrispondenza di p e n^+;

10) deposizione CVD del poly;

11) drogaggio del poly;

12) processo litografico per la definizione del poly;

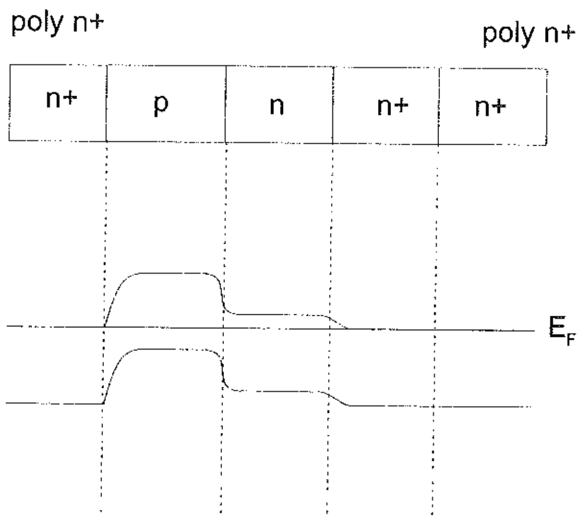
13) deposizione CVD di SiO_2;

14) passo litografico per l'apertura della finestra di contatto sul poly;

15) deposizione di Al (evaporazione o sputtering);

16) passo litografico per la definizione della metal.

2)



SOLUZIONE 3

1) Iniziamo col calcolare la tensione di soglia della struttura MOS.

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

$$C_{OX} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 6.906 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

$$V_{Tideale} = -\frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_D 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B = -1.14 \text{ V}$$

$$V_T = V_{Tideale} + \left(\frac{E_g}{2q} + \psi_B\right) = -0.27 \text{ V}$$

Per $V_{GS} = -5$ V la struttura MOS risulta in inversione, e si genera un canale p, che però non contribuisce alla conduzione perché tra due regioni di tipo n^+. La connessione tra le due regioni n^+ avviene attraverso lo spessore del top layer non interessato dalla regione di svuotamento, che in caso di struttura MOS all' inversione possiamo approssimare con $W(2\psi_B)$. Calcoliamo lo spessore dello strato non svuotato S:

$$S = 800 \text{ nm} - W(2\psi_B) = 800 \text{ nm} - \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_D} 2\psi_B} = 800 \text{ nm} - 416 \text{ nm} = 384 \text{ nm}$$

La resistenza vale dunque:

$$R = \frac{1}{q\mu_n n} \frac{L}{WS} = 6502 \ \Omega$$

2) Nel caso di $V_{GS} = 5$ V, la struttura MOS è in accumulazione, quindi sotto il gate si ha un aumento della concentrazione di elettroni. Con ragionamenti

analoghi a quelli fatti per il canale di conduzione di un transistore MOS convenzionale, possiamo dire che:

$$R = \frac{1}{\int q\mu_n n(x)\, dx} \frac{L}{W}$$

$$R = \frac{1}{\mu_n \int qn(x)\, dx} \frac{L}{W}$$

$$R = \frac{1}{\mu_n Q_n} \frac{L}{W}$$

dove Q_n è la carica nel canale per unità di superficie, che nel caso di accumulazione può essere calcolata in maniera diretta, considerando la struttura MOS come un condensatore a facce piane e parallele (basti pensare alle curve $C - V$ in accumulazione):

$$Q_n = C_{OX} V$$

$$Q_n = 3.453 \times 10^{-3}\ \mathrm{C/m^2};$$

dunque:

$$R = \frac{1}{\mu_n Q_n} \frac{L}{W} = 579\ \Omega$$

Questa resistenza va in parallelo alla resistenza propria del top layer di silicio, presente per $V_{GS} = 0$ ($S = 800$ nm):

$$R_{V_{GS}=0} = \frac{1}{q\mu_n n} \frac{L}{WS} = 3121\ \Omega$$

Quindi:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{579} + \frac{1}{3121}} = 488\ \Omega.$$

Prova scritta del 15/09/05

ESERCIZIO 1 (DTE e μE I)

Un diodo n^+p ($N_A = 10^{15}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{19}$ cm^{-3}, $\mu_n = 1000$ cm^{2}V^{-1}s^{-1}, lunghezza X della zona metallurgica= 1.2 μm, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $S = 100 \times 100$ μm^2) è polarizzato in modo che venga iniettato un elettrone ogni volta che il precedente arriva al contatto ohmico.

1) Calcolare la corrente che corrisponde a questa situazione. Si supponga non dipendente dalla tensione la zona di svuotamento.

2) Calcolare l'eccesso dei minoritari all'inizio della zona neutra.

ESERCIZIO 2 (DTE)

In un processo di impiantazione ionica (100 kV, 10^{-5} s) metà degli ioni B che costituiscono il fascio all'uscita del sistema di accelerazione è doppiamente ionizzata. Si misura una corrente di 0.2 mA su una superficie di 10×10 μm^2. R_p e ΔR_p sono ricavabili dalla figura.

Calcolare la concentrazione di B in $x = 0.35$ μm.

ESERCIZIO 3 (DTE e μE I)

Una struttura MOS ideale ($t_{ox} = 50$ nm) è stata realizzata su un substrato p ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}) con opportuni accorgimenti in maniera tale che il tempo di generazione termica sia molto lungo (superiore a diversi secondi: qualsiasi variazione può essere considerata ad alta frequenza). La struttura MOS viene polarizzata con $V_{GS} = 5$ V a $t = 0$ s.

1) Determinare ψ_s.

La struttura MOS è illuminata uniformemente con luce infrarossa ($\lambda = 800$ nm, infrarosso vicino), con potenza pari a 1 mW/m^2. L'efficienza di generazione è unitaria (ciascun fotone genera una coppia elettrone-lacuna).

2) Determinare ψ_s ad un tempo $t = 1$ s.

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo l'ampiezza della zona di svuotamento all'equilibrio.

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)}{qN_A}} =$$

$$\sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15}\times 10^{19}}{2.25\times 10^{20}}\right)}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 1.03 \times 10^{-6}\ \text{m} = 1.03\ \mu\text{m}.$$

La zona neutra ha una lunghezza di $X - W = 1.2 - 1.03 = 0.17\ \mu$m, mentre L_n, lunghezza di diffusione degli elettroni, è pari a $\sqrt{0.026 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 5.099 \times 10^{-5}$ m $= 51\ \mu$m. Si tratta dunque di un diodo a base corta. Con il modello del controllo di carica $I = \frac{Q}{\tau_t}$, dove τ_t è il tempo di transito dato dall'espressione

$$\tau_t = \frac{(X-W)^2}{2D_n} = \frac{(0.17 \times 10^{-6})^2}{2 \times 0.026 \times 0.1} = 5.56 \times 10^{-12}\ \text{s}.$$

La corrente vale

$$I = \frac{Q}{\tau_t} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{5.56 \times 10^{-12}} = 2.88 \times 10^{-8}\ \text{A}.$$

2) La tensione necessaria per avere 2.88×10^{-8} A si ottiene dall'espressione della caratteristica

$$I = \frac{SqD_n n_{p0}}{(X-W)}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = \frac{10^{-8} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.026 \times 0.1 \times 2.25 \times 10^{11}}{0.17 \times 10^{-6}}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) =$$

$$5.5 \times 10^{-12}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \simeq 5.5 \times 10^{-12} e^{\frac{V}{V_T}}$$

$$V = 0.026 \times \ln\left(\frac{2.88 \times 10^{-8}}{5.5 \times 10^{-12}}\right) = 0.22\ \text{V}.$$

L'eccesso

$$\delta n(0) = n_{p0} e^{\frac{V}{V_T}} = 2.25 \times 10^{11} \times e^{\frac{0.22}{0.026}} = 1.06 \times 10^{15}\ \text{m}^{-3}.$$

SOLUZIONE 2

Per uno ione con una sola carica l'energia di impianto è evidentemente 100 keV, mentre per quello con carica doppia è 200 keV. Dai grafici si ricava: R_p (100) = 0.32 μm, ΔR_p (100) = 0.07 μm ; R_p (200) = 0.55 μm, ΔR_p (200) = 0.09 μm.

La densità di corrente vale $0.2 \times 10^{-3}/10^{-6} = 200$ A/cm^2 che corrisponde ad una carica impiantata per unità di superficie di

$200 \times 10^{-5} = 0.002$ C/cm^2. Poichè sull'unità di superficie arriva lo stesso numero Q di ioni dei due tipi avremo $Q \times 1.6 \times 10^{-19} + Q \times 2 \times 1.6 \times 10^{-19} = 0.002$ e quindi la dose $Q = \frac{0.002}{3 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 4.17 \times 10^{15}$ cm^{-2}.

I due profili sono del tipo

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left(-\frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right)^2$$

$$N_{TOT}(0.35) = \frac{4.17 \times 10^{15}}{\sqrt{2\pi} \times 0.07 \times 10^{-4}} \exp\left(-\frac{0.35 - 0.32}{0.07 \times \sqrt{2}}\right)^2 + \frac{4.17 \times 10^{15}}{\sqrt{2\pi} \times 0.09 \times 10^{-4}} \exp\left(-\frac{0.35 - 0.55}{0.09 \times \sqrt{2}}\right)^2$$

4.4×10^{21} cm^{-3}.

SOLUZIONE 3

1) A $t = 0$ viene applicata una tensione $V_{GS} = 5$ V. La carica accumulata nel silicio è solo carica fissa, prodotta dalla zona di svuotamento, in quanto gli elettroni non vengono generati (il tempo di generazione è molto lungo; in ogni caso stiamo chiedendo ψ_s a $t = 0$). Dalla relazione:

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

possiamo scrivere, dato che $Q_n = 0$.

$$Q_W + \psi_s C_{ox} = V_{GS} C_{ox}$$

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 6.904 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

dato che:

$$Q_W = \sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_s}$$

avremo:

$$\sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_s} = V_{GS} C_{ox} - \psi_s C_{ox}$$

elevando al quadrato entrambi i membri, svolgendo i conti avremo una equazione di secondo grado:

$$4.76 \times 10^{-7} \psi_s^2 - 5.1 \times 10^{-6} \psi_s + 1.19 \times 10^{-5} = 0$$

le cui soluzioni sono:

$$\psi_{s1} = 3.43 \text{ V}$$

$$\psi_{s2} = 7.28 \text{ V}$$

La seconda soluzione è da scartare, perché assurda ($\psi_{s2} > V_{GS}$). Avremo dunque:

$$\psi_s = 3.43 \text{ V}$$

2) In questo caso, ciascun fotone che arriva genera coppie elettrone-lacuna. Le lacune vengono portate via dal campo elettrico, e vanno a finire sulla batteria che fornisce V_{GS}. Gli elettroni, invece, si accumulano all' interfaccia silicio-ossido (siamo in inversione) e costituiscono una Q_n, che, seguendo le approssimazioni usuali, possiamo immaginare concentrata tutta all' interfaccia. Avremo che:

$$\text{n. fotoni (= n. elettroni)} = \frac{\text{Energia arrivata in 1 s}}{\text{Energia di un fotone}} = \frac{1\ \text{mJ/m}^2}{hc/\lambda} = 4\times 10^{16}\ \text{fotoni/m}^2$$

quindi:

$$Q_n = q \times \text{n. elettroni} = q \times 4 \times 10^{16} = 6.45 \times 10^{-4}\ \text{C/m}^2$$

A questo punto l' esercizio continua come il punto precedente, questa volta basta mettere in conto Q_n:

$$Q_W = V_{GS}C_{ox} - Q_n - \psi_s C_{ox}$$

$$\sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_s} = V_{GS}C_{ox} - Q_n - \psi_s C_{ox}$$

Procedendo come sopra:

$$4.76 \times 10^{-7}\psi_s^2 - 4.21 \times 10^{-6}\psi_s + 7.87 \times 10^{-6} = 0$$

da cui:

$$\psi_{s1} = 2.68\ \text{V}$$

$$\psi_{s2} = 6.16\ \text{V}$$

La seconda soluzione è ancora da scartare, perché assurda ($\psi_{s2} > V_{GS}$):

$$\psi_s = 2.68\ \text{V}$$

che é minore del caso precedente, come deve essere data la presenza di carica mobile.