

Prova scritta del 16/09/09

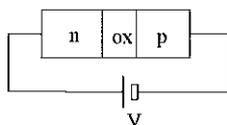
ESERCIZIO 1

Un metallo ha una concentrazione di elettroni liberi pari a  $4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  e una resistività di  $1.9 \mu\Omega \times \text{cm}$ .

- 1) Calcolare la mobilità e il tempo di rilassamento.
- 2) Ad un filo lungo 1 m e con una sezione di  $1 \text{ mm}^2$  viene applicata una ddp di 100 mV. Calcolare quanto tempo mediamente impiega un elettrone per passare da un'estremità all'altra del filo.
- 3) Scrivere l'equazione di Poisson in un punto qualunque all'interno del filo percorso da corrente.

ESERCIZIO 2

Si consideri la struttura della figura:  $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Per una certa tensione  $V$  uno dei due lati si trova alla soglia dell'inversione.

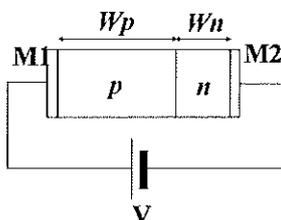


- 1) Calcolare la caduta di tensione nei due lati.
- 2) Se la tensione aumenta fino a portare anche l'altro lato alla soglia, quanto vale la carica mobile per unità di superficie nel lato opposto?

ESERCIZIO 3

Per la struttura in figura  $W_p = 800 \mu\text{m}$ ,  $W_n = 3 \mu\text{m}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ , contatto  $M_1/\text{Si}_p$  ohmico. Trascurare le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta. I contatti M/Si sono ideali.

- 1) Con  $\Phi_{M2} = 4.0 \text{ V}$  e  $V = 0.2 \text{ V}$ : a) eseguire un grafico quotato dei portatori minoritari nella zona  $n$ ; b) calcolare la densità di corrente nel dispositivo.
- 2) Con  $\Phi_{M2} = 5.1 \text{ V}$  e  $V = 5 \text{ V}$ : a) eseguire un grafico quotato dei portatori minoritari nella zona  $n$ ; b) determinare le cadute di tensione alle giunzioni  $pn$  e  $n$ -metallo.



SOLUZIONE 1

1)

$$\rho = \frac{1}{ne\mu} = \frac{m_0}{ne^2\tau}$$

$$\mu = \frac{1}{ne\rho} = \frac{1}{4 \times 10^{22} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.9 \times 10^{-6}} = 82.24 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1};$$

$$\mu = \frac{e\tau}{m_0}, \tau = \frac{\mu m_0}{e} = \frac{82.24 \times 10^{-4} \times 9.1 \times 10^{-31}}{1.6 \times 10^{-19}} = 4.67 \times 10^{-14} \text{ s.}$$

2) La velocità di trascinamento vale

$$v_d = \mu \mathcal{E} = 82.24 \times \frac{10^{-1}}{10^2} = 8.2 \times 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$$

per percorrere un metro

$$t = \frac{100}{8.2 \times 10^{-2}} = 1.22 \times 10^3 \text{ s} \simeq 20'.$$

3) Dato che nel filo la carica netta per unità di volume è nulla

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = 0$$

da cui si deduce banalmente che il campo è costante e pari al valore precedentemente calcolato.

SOLUZIONE 2

1) Per ogni condizione di polarizzazione deve essere  $|Q_N|$  (carica per unità di superficie nel lato  $n$ ) =  $|Q_P|$ . Nel nostro caso (in condizioni di svuotamento)

$$qN_D W_n = |qN_A W_p|$$

da cui

$$\frac{W_n}{W_p} = \frac{N_A}{N_D} \Rightarrow \Psi_{sn} > \Psi_{sp};$$

il lato che si trova alla soglia è quello  $n$ .

$$N_D W_n = N_A W_p$$

$$N_D \sqrt{\frac{2\epsilon_s 2\Psi_{Bn}}{qN_D}} = N_A \sqrt{\frac{2\epsilon_s \Psi_{sp}}{qN_A}}$$

$$\sqrt{2\Psi_{Bn} N_D} = \sqrt{\Psi_{sp} N_A}$$

$$2\Psi_{Bn} \frac{N_D}{N_A} = \Psi_{sp}$$

$$2\Psi_{Bn} = 2 \times 0.026 \times \ln \left( \frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}} \right) = 0.577 \text{ V}$$

$$\Psi_{sp} = 0.057 \text{ V.}$$

2) Si dovrà scrivere

$$qN_D W_n + Q_p = qN_A W_p$$

da cui

$$Q_p = q(N_A W_p - N_D W_n) = \sqrt{4\epsilon_s q} \left( \sqrt{N_A \Psi_{Bp}} - \sqrt{N_D \Psi_{Bn}} \right)$$

$$Q_p = \sqrt{4 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \left( \sqrt{10^{22} \times 0.349} - \sqrt{10^{21} \times 0.288} \right)} = 3.44 \times 10^{-4} \text{ Cm}^{-2}.$$

SOLUZIONE 3

1.a) Calcoliamo le lunghezze di diffusione degli elettroni e delle lacune:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

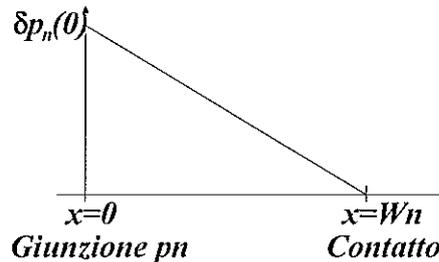
$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = 1.04 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 32.25 \text{ } \mu\text{m}$$

la zona  $p$  risulta dunque 'lunga' per l'iniezione di elettroni, la zona  $n$  risulta invece corta. Entrambe le giunzioni metallo-semiconduttore si comportano come contatto ohmico. Infatti  $\Phi_{M2} = 4 \text{ V} < \Phi_{\text{Si}n}$  poichè la funzione di lavoro del silicio è senz'altro maggiore dell'affinità elettronica ( $\Phi_{\text{Si}n} > \chi_{\text{Si}}$ ). Poichè  $L_p \gg W_n$  il profilo di portatori minoritari (lacune) nella zona  $n$  si può approssimare con un andamento lineare. In prossimità del contatto avremo che l'eccesso di lacune è nullo, mentre alla giunzione ( $x = 0$ , trascurando la regione di svuotamento) l'eccesso di lacune è determinato dall'equazione di Shockley:

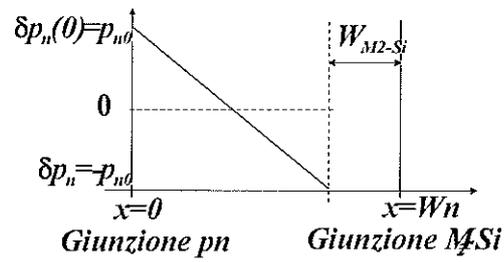
$$\delta p_n(0) = p_{n0} \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = \frac{n_i^2}{N_D} \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = 5.08 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}.$$



1.b) La densità di corrente si ricava immediatamente, sapendo che la zona  $n$  è corta mentre la zona  $p$  è lunga:

$$J = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{W_n L_p} \right) \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = 3.23 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2.$$

2.a) Nel caso di  $\Phi_{M2} = 5.1 \text{ V}$  la giunzione  $M_2/\text{Si}n$  è una giunzione Schottky, che per  $V = 5 \text{ V}$  applicata come in figura risulta polarizzata in inversa. In questo caso nella zona  $n$  l'eccesso totale di carica deve essere 0. In prossimità della regione di svuotamento della giunzione Schottky l'eccesso sarà  $\delta p_n = -p_{n0}$  mentre alla giunzione  $pn$  l'eccesso sarà pari a  $\delta p_n(0) = p_{n0}$  in maniera tale che l'integrale dell'eccesso nella zona  $n$  sia nullo. In altre parole la struttura si comporta come un transistor con base  $n$  aperta.



2.b) In questo caso avremo, per la giunzione  $pn$ :

$$\delta p_n(0) = p_{n0} \left( e^{\frac{V_{pn}}{V_T}} - 1 \right) = p_{n0}$$

e quindi la caduta sulla giunzione  $pn$  polarizzata in diretta sarà  $V_{pn} = V_T \ln(2) = 0.018$  V. Sulla giunzione metallo-semiconduttore cade la maggior parte della tensione applicata, ovvero sia  $5 - 0.018 \simeq 5$  V da cui può essere ricavata l'ampiezza della regione di svuotamento metallo-silicio  $n$ .