

SEMI CONDUCTEUR ET JONCTION PN

(CCINP - PSI - 2009)

A1. Analyse dimensionnelle: $[\vec{F}] = [m\vec{a}] = \left[\frac{m\vec{v}}{\tau} \right]$ donc $[\tau] = T$

τ en s

A2. Forces appliquées à l'électron: $\vec{F} = -e\vec{E}$
 $\vec{f} = -\frac{m\vec{v}}{\tau}$

P.F.D: $m\vec{v} = -e\vec{E} - m\frac{\vec{v}}{\tau} \rightarrow \vec{v} + \frac{1}{\tau}\vec{v} = -\frac{e\tau}{m}\vec{E}$

Solution: $\vec{v} = Cte e^{-t/\tau} + \frac{e\tau}{m}\vec{E} \rightarrow -\frac{e\tau}{m}\vec{E}$ vitesse limite

A3. $\vec{j}_{el} \stackrel{dy}{=} -ne\vec{v}$ soit $\vec{j}_{el} = \frac{nee^2\tau}{m}\vec{E}$

Loi d'Ohm locale: $\vec{j}_{el} = \gamma\vec{E}$, donc par identification: $\gamma = \frac{nee^2\tau}{m}$

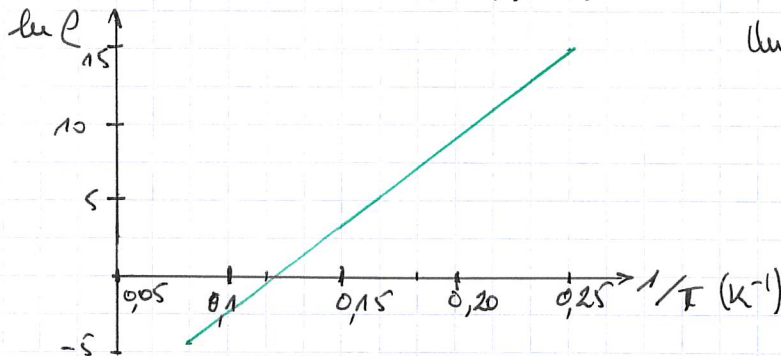
A4. La densité électronique est identique ici à la densité d'atomes de cuivre (pour ce qui est des électrons participant à la conduction)

$\Rightarrow n_e = \frac{\rho_{Cu}}{m_{Cu}} = \frac{\rho_{eau} \cdot N_A}{M_{Cu}}$ où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau.

A.N: $n_e = 8,4 \cdot 10^{28} m^{-3} \gg n_e, si$

A5. $R = \rho \frac{l}{S}$

A6. Traçons $\ln(\rho) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ pour valider graphiquement la loi



Une regression linéaire donne

$\ln \rho = \frac{140}{T} - 13$

les points expérimentaux étant visuellement bien alignés, ce qui valide la loi

$\ln \rho = \frac{B}{T} + \ln A$; on identifie: $B = 140 K$

$A = e^{-13} = 2,3 \cdot 10^{-6} \Omega.m$

A7. $\rho(300K) = 4,5 \cdot 10^{-6} \Omega.m \gg \rho_{Cu}$

A8. -x Dans le cas d'un métal, l'augmentation de l'agitation thermique (hausse de la température) augmente la fréquence des interactions entre les électrons et le réseau (diminution de τ). Ceci entraîne l'augmentation de la résistivité.

Dans le cas des silicium semi-conducteurs, l'augmentation de la température fait diminuer la résistivité. En fait l'augmentation de l'agitation thermique augmente la densité de porteurs de charges mobiles.

A9 - $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{n_e e^2 \tau} \Rightarrow n_e = \frac{m}{\rho e^2 \tau} = \frac{m}{A e^2 \tau} e^{-B/T}$

Par identification $B = \frac{E_s}{k_B} \rightarrow E_s = k_B B \left| \begin{array}{l} E_s = 1,5 \cdot 10^{-21} \text{ J} \\ = 9,5 \text{ meV} \end{array} \right|$

A10. Trou = lacun électronique : $q_{\text{trou}} = -q_e = +e$

A11. Configurations électroniques : $^{14}\text{Si} : 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$: 4 e de valence

$^5\text{B} : 1s^2 2s^2 2p^1$: 3 e de valence

$^{15}\text{P} : 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$: 5 e de valence.

. Cation du phosphore : P^+

. Anion du bore : B^-

A12. Le dopage au phos. apporte un électron de valence supplémentaire par rapport au silicium.

* Électroneutralité : $p + N_p = n$

e^- libérant p trous

e^- apportés par ionisation du phosphore.

$n_p = n_i^2 \rightarrow (p + N_p)p = n_i^2$

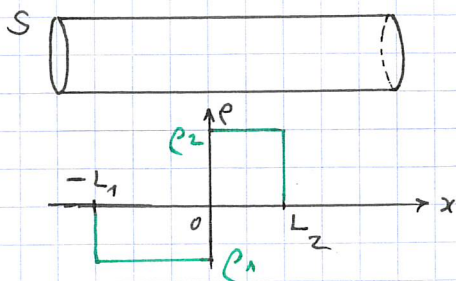
$p^2 + N_p p = n_i^2 \rightarrow p = \frac{1}{2} \left(-N_p + \sqrt{N_p^2 + 4n_i^2} \right)$
 $= \frac{N_p}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{n_i^2}{N_p^2}} \right)$

$\left| p \approx \frac{n_i^2}{N_p} \right|$ et $p \approx \frac{n_p}{N_p} \Rightarrow n \approx N_p \quad p \ll N_p \text{ d'où } n \gg p$

A13. Le dopage au bore apporte un trou supplémentaire. On inverse donc les rôles de n et p dans le calcul précédent, ou N_p devient N_B

$\rightarrow n \approx \frac{n_i^2}{N_B} \ll N_B ; p \approx N_B ; p \gg n$

A14. Électroneutralité d'un cylindre de section S, entre $x_1 < L_1$ et $x_2 > L_2$



$Q = \rho_1 L_1 S + \rho_2 L_2 S = 0$

$\Rightarrow \rho_1 L_1 + \rho_2 L_2 = 0$

ANS - Equation de Maxwell-Gauss : $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$

Soit M un point quelconque de la jonction.

Symétries : Tout plan contenant $(M, \vec{e}_x)$ est plan de symétrie
 $\Rightarrow \vec{E} = E \vec{e}_x$

Invariance par translation quelconque dans le plan $oyz \Rightarrow \vec{E}(M) = \vec{E}(x)$

d'où $\text{div } \vec{E} = \frac{dE}{dx}$

* $-L_1 < x < 0$: $\frac{dE}{dx} = \frac{\rho_1}{\epsilon} \Rightarrow E(x) = \frac{\rho_1}{\epsilon} x + \alpha$

* $0 < x < L_2$: $\frac{dE}{dx} = \frac{\rho_2}{\epsilon} \Rightarrow E(x) = \frac{\rho_2}{\epsilon} x + \beta$

Par analogie avec un plan chargé en surface,

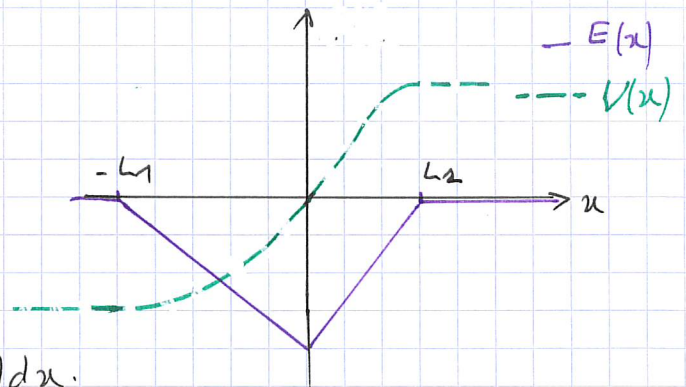
* $x < -L_1$: $E(x) = -\frac{\sigma}{2\epsilon} \vec{e}_x$ or $\sigma = 0$ (électronutralité)

la continuité du champ en $x = -L_1$ donne $0 = -\frac{\rho_1 L_1}{\epsilon} + \alpha$

d'où $\alpha = \frac{\rho_1 L_1}{\epsilon}$

* $x > L_2$: $E(x) = \frac{\sigma}{2\epsilon} \vec{e}_x = 0 \Rightarrow \beta = -\frac{\rho_2 L_2}{\epsilon}$

$\Rightarrow E(x) = \begin{cases} \frac{\rho_1}{\epsilon} (x + L_1) \\ \frac{\rho_2}{\epsilon} (x - L_2) \end{cases}$



A16 - Relation champ-potentiel

$\vec{E} = -\text{grad } V$

$\rightarrow E(x) = -\frac{dV}{dx} \rightarrow dV = -E(x)dx$

De plus le potentiel est continu.

$\Rightarrow V(x) = \begin{cases} x < -L_1 : \frac{\rho_1 L_1^2}{2\epsilon} \\ -L_1 < x < 0 : -\frac{\rho_1}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} + L_1 x \right) \\ 0 < x < L_2 : -\frac{\rho_2}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} - L_2 x \right) \\ x > L_2 : \frac{\rho_2 L_2^2}{2\epsilon} \end{cases}$

A17 - $V_0 = V(L_2) - V(-L_1) = \frac{\rho_2 L_2^2 - \rho_1 L_1^2}{2\epsilon}$

A18 -x $\varphi_1 = -eN_1$; $\varphi_2 = eN_2$

x Or $\varphi_1 L_1 + \varphi_2 L_2 = 0 \rightarrow -N_1 L_1 + N_2 L_2 = 0$

soit $\frac{N_1}{N_2} = \frac{L_2}{L_1} \gg 1$

d'où $\delta = L_1 + L_2 \approx L_2$

A19 $V_0 = \frac{\varphi_2 L_2^2 - \varphi_1 L_1^2}{2\epsilon} = \frac{e}{2\epsilon} (N_2 L_2^2 + N_1 L_1^2) = \frac{eN_2}{2\epsilon} \left(L_2^2 + \frac{N_1}{N_2} L_1^2 \right)$
 $= \frac{eN_2}{2\epsilon} (L_2^2 + L_1 L_2) \approx \frac{eN_2 \delta^2}{2\epsilon} \rightarrow \delta = \sqrt{\frac{2\epsilon V_0}{eN_2}} \quad \delta = 0,57 \mu m$

