

PREMIERE PARTIE : JONCTION PN (CCINP PSI 2009 – Extrait)

A.1 En utilisant les unités des différentes grandeurs physiques : $\vec{f} = -\frac{\overset{\text{kg}}{\hat{m}}}{\tau} \vec{v}$ on voit que la constante τ est en seconde.

On peut aussi remarquer que $m\vec{v}$ est une quantité de mouvement et que, d'après la RFD, une quantité de mouvement divisée par un temps est bien une force.

A.2 Le principe fondamental de la dynamique appliqué à l'électron dans le référentiel du matériau supposé galiléen conduit à $m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - \frac{m}{\tau} \vec{v}$. En régime permanent, obtenu au bout de quelques τ , la vitesse ne dépend plus du temps, $\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0}$ et $\vec{v}_{\text{lim}} = -\frac{e\tau}{m} \vec{E}$.

A.3 D'après la définition du vecteur densité de courant volumique : $\vec{j}_{el} = -en_e \vec{v}_{\text{lim}} = \frac{e^2 \tau n_e}{m} \vec{E}$.

D'après l'expression de la loi d'Ohm locale, $\vec{j}_{el} = \sigma \vec{E}$, il vient $\sigma = \frac{e^2 \tau n_e}{m}$.

A.4 Le cuivre libère un électron par atome, soit N_A électrons par mole et comme la masse volumique du cuivre vaut $d * \rho_{eau}$, $n_e = \frac{d * \rho_{eau}}{M_{Cu}} N_A$.

A.N : $n_e = \frac{8,9.1000.(6.02)10^{23}}{63.5.10^{-3}}$; $n_e = 8,4 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.

C'est 8400 fois celle du silicium ; rappelons cependant que la comparaison du nombre de porteurs ne suffit pas à comparer les caractéristiques de conduction de Cu et Si ; il faut en effet connaître les mobilités respectives des porteurs ; voir ci-dessous, **A.7**.

A.5 $R = \rho \frac{\ell}{S}$, voir cours pour la démonstration (non demandée ici).

A.6 On trace $\ln \rho$ en fonction de $\frac{1}{T}$ et on obtient une droite de pente B et d'ordonnée à l'origine $\ln A$.

On trouve $B \approx 110 \text{ K}$ et $A \approx 2,5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$.

A.7 A 300K, la résistivité du silicium vaut, par extrapolation de la relation vue à la question précédente, $\rho(300K) = 3,7.10^{-6} \Omega \cdot m$

Le silicium est 370 fois plus résistif que le cuivre à 300K ; on en conclut que la mobilité des porteurs est plus grande pour Si que pour Cu en synthétisant les résultats de A.4 et A.7.

A.8 Pour un métal : si T augmente, l'agitation des atomes du réseau cristallin augmente et les électrons vont voir leur mobilité diminuer : tout se passe comme si les « frottements fluides » augmentaient, donc la résistivité augmente.

Dans le cas du silicium, d'après la relation de la question **A.6**, on remarque que si T augmente, ρ diminue : en effet l'augmentation de température permet de promouvoir plus facilement les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction et donc d'augmenter n_e donc la conductivité.

A.9 On a $\sigma = \frac{e^2 \tau n_e}{m}$ donc $n_e = \frac{m}{e^2 \tau} \sigma = \frac{m}{e^2 \tau \rho} = \frac{m}{\frac{e^2 \tau A}{n_e^0}} \cdot e^{-\frac{B}{T}} = n_e^0 \cdot e^{-\frac{E_S}{k_B T}}$.

avec $E_S = k_B B = 9,5 \text{ meV}$.

A.10 Un trou possède une charge $+e$.

A.11 Si : 4 électrons de valence P : 5 électrons de valence B : 3 électrons de valence

Les ions formés sont : P^+ et B^- .

A.12 Lors d'un dopage au phosphore la densité électronique augmente (dopage N)

Traduisons la neutralité électrique de l'ensemble ; il y a p trous et N_p ions positifs de charge e et n charges électroniques $-e$, donc : $p + N_p = n$.

D'autre part, $n_i^2 = n \cdot p$ soit $n_i^2 = n \cdot (n - N_p)$ ou encore $n^2 - n \cdot N_p - n_i^2 = 0$, soit $n = \frac{N_p \pm \sqrt{N_p^2 + 4n_i^2}}{2}$ et en négligeant n_i devant N_p on obtient $n \approx N_p$ et $p \approx \frac{n_i^2}{N_p}$.

A.13 Par analogie (le raisonnement est strictement le même) : $p \approx N_B$ et $n \approx \frac{n_i^2}{N_B}$.

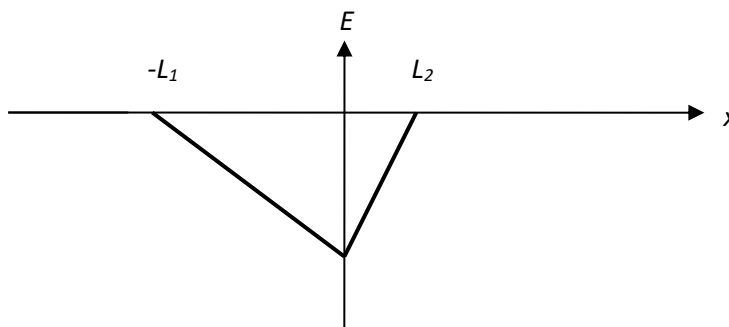
A.14 Le milieu est globalement neutre donc : $\rho_1 L_1 + \rho_2 L_2 = 0$.

A.15 Maxwell-Gauss : $\text{div} \vec{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon} \Rightarrow \frac{dE}{dx} = \frac{\rho_c}{\epsilon}$.

En intégrant cette équation dans les différentes zones et en écrivant la continuité du champ électrique (assurée par l'absence de charges surfaciques), on obtient :

$x < -L_1$	$0 > x > -L_1$	$0 < x < L_2$	$x > L_2$
$E = 0$	$E = \frac{\rho_1}{\epsilon}(x + L_1)$	$E = \frac{\rho_2}{\epsilon}(x - L_2)$	$E = 0$

Représentation graphique :



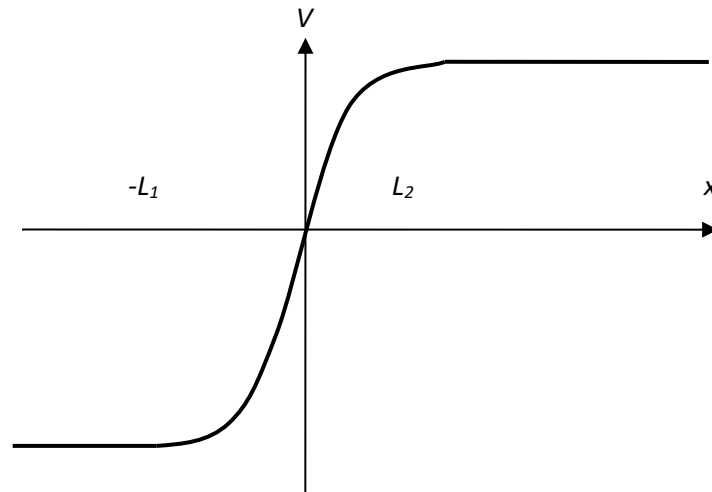
A.16 En régime stationnaire, $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V = -\frac{dV}{dx} \vec{e}_x = E(x) \vec{e}_x$.

L'énoncé impose : $V(x=0) = 0$.

En intégrant dans les différentes zones et en écrivant la continuité du potentiel V , on obtient :

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

Représentation graphique :



A.17
$$V_0 = \frac{\rho_2 L_2^2}{2\epsilon} - \frac{\rho_1 L_1^2}{2\epsilon}.$$

A.18 On a immédiatement : $\rho_1 = -eN_1$ et $\rho_2 = eN_2$

Or $\rho_1 L_1 + \rho_2 L_2 = 0$ soit $N_2 L_2 = N_1 L_1$.

Si $N_1 \gg N_2$ alors $L_1 \ll L_2$

La largeur de la ZCE est $\delta = L_1 + L_2 \approx L_2$.

A.19 On a

$$V_0 = \frac{\rho_2 L_2^2}{2\epsilon} - \frac{\rho_1 L_1^2}{2\epsilon} = \frac{\rho_2 L_2 L_2 - \overbrace{\rho_1 L_1 L_1}^{=\rho_2 L_2}}{2\epsilon} = \rho_2 L_2 \frac{L_2 + L_1}{2\epsilon} \approx \rho_2 \frac{L_2^2}{2\epsilon} = eN_2 \frac{\delta^2}{2\epsilon}.$$

D'où $\delta = \sqrt{2 \frac{\epsilon V_0}{e N_2}}$ Application numérique : $\delta = \sqrt{2 \frac{(1,4 \cdot 10^{-10}) 0,3}{(1,6 \cdot 10^{-19}) 1,6 \cdot 10^{21}}} = 0,57 \mu\text{m}$