Corrigé du TD Composant 1: Silicium et SC intrinsèque

Disclaimer : Ce corrigé n'a pas pour but de vous fournir un détail des calculs vus en TD, mais de vous résumer les notions clés dont vous aurez besoin pour résoudre ces exercices, les avertissements vis à vis de certaines erreurs classiques, quelques digressions vues en séances, les détails des passages les plus techniques ainsi que les réponses aux différentes questions. Pour obtenir un corrigé détaillé, il vous faudra donc vous référer aux notes prises en TD ou reprendre vous même les calculs à partir des notions présentées dans le présent corrigé.

En cas de difficultés, **n'hésitez pas à me contacter**, nous pourrons en discuter soit par mail soit en début de séance suivante. Ce corrigé n'a pour but que d'être une base de travail pour vous et de servir de complément par rapport à ce que vous avez sûrement noté en séance, il n'est en aucun cas fait pour se suffire à lui même.

Exercice 1

1. **Notion clé :** Pour n_{at} le nombre d'atome par unité de volume, on a $n_{at} = \frac{\rho \times \mathcal{N}_A}{M}$.

   ATTENTION. Lors de l'application numérique faites attention aux unités des différentes grandeurs.

   AN : $n_{at} = 5.10^{22}\ atomes.cm^{-3}$

2. **Notion clé :** Le silicium forme un cristal de type diamant.

   Pour une visualisation 3d de la maille, voici un `https://fr.wikipedia.org/wiki/Structure_diamant#/media/Fichier:Diamond_Cubic-F_lattice_animation.gif`lien (source wikipédia).

   ATTENTION. Un atome faisant partie d'un nombre q de mailles en même temps compte pour $\frac{1}{q}$ atomes dans la maille élémentaire.

   Résultat : Il y a $N_{maille} = 8$ atomes dans la mailles élémentaire.

3. **Notion clé :**
   * On note a le paramètre de la maille. Exprimez le volume V_{maille} de la maille en fonction de a.
   * On a $n_{at} = \frac{N_{maille}}{V_{maille}}$

   Résultat : $a = \sqrt[3]{\frac{8}{5.10^{22}}}$

   AN : $a = 5,43$ Å

4. **Notion clé :** Dans un cristal de type diamant, en posant un point origine O de coordonnées $(0;0;0)$, le plus proche voisin M du point O a pour coordonnées $\left(\frac{1}{4}a; \frac{1}{4}a; \frac{1}{4}a\right)$

   Résultat : $d = \frac{\sqrt{3}a}{4}$

   AN : $d = 2,35$ Å

5. **Notion clé :** $z = \frac{V_{atome\ dans\ la\ maille}}{V_{maille}}$

   Le volume d'une sphère de rayon r est $\frac{4}{3}\pi r^3$

   Résultat : $z = \frac{\sqrt{3}\pi}{16} = 0,34$

Exercice 2

1. **Notion clé :** Commencez par calculer $n_i p_i$ avec les formules données en énoncé en simplifiant ce qu'il est possible de simplifier.

   En remarquant que $n_i p_i = n_i^2$ puisque $p_i = n_i$ dans les SC intrinsèques, vous devriez aboutir à la réponse.

   Résultat : $n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_G}{2kT}}$

2. *ATTENTION.* Les quantités N_C et N_V sont données en cm^{-3}.

   AN : À $T = 300\ K$,
   * $n_i(Ge) = 2,05.10^{19}\ m^{-3}$
   * $n_i(Si) = 6,87.10^{15}\ m^{-3}$
   * $n_i(AsGa) = 2,07.10^{13}\ m^{-3}$

   remarque. Plus $E_G = E_C - E_V$ est élevée, plus n_i est faible.

   Notion clé : Pour $T = 373\ K$, utilisez les formules données à la fin de l'exercice pour calculer le rapport $\frac{n_i(373\ K)}{n_i(300\ K)}$.

   Résultat : $n_i(373\ K) = \left(\frac{373}{300}\right)^{\frac{3}{2}} exp\left(-\frac{E_G}{2k}\left(\frac{1}{373} - \frac{1}{300}\right)\right) n_i(300\ K)$

   AN : À $T = 373\ K$,
   * $n_i(Ge) = 3,4.10^{20}\ m^{-3}$
   * $n_i(Si) = 6,6.10^{17}\ m^{-3}$
   * $n_i(Ge) = 6,5.10^{15}\ m^{-3}$

   remarque. Plus E_G est élevée, plus n_i est sensible à la température.

3. **Notion clé :** Il va falloir utiliser les formules données en fin d'exercice.

   Résultat : $m_n^* = \left(\frac{N_C}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{h^2}{2\pi kT}$

   $m_p^* = \left(\frac{N_V}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{h^2}{2\pi kT}$

   ATTENTION. On connait la constante de Planck $h = 6,62.10^{-34}\ J.s$, il va donc falloir mettre la constante de Boltzmann non plus en $eV.K^{-1}$, mais en $J.K^{-1}$, par la formule suivante :

   $$k = 8,625.10^{-5} \times 1,6.10^{-19}\ J.K^{-1}$$

   AN : À $T = 300\ K$,
   * $m_n^*(Ge) = 4,9.10^{-31}\ kg$
     $m_p^*(Ge) = 3,11.10^{-31}\ kg$
   * $m_n^*(Si) = 9,55.10^{-31}\ kg$
     $m_p^*(Si) = 5,25.10^{-31}\ kg$
   * $m_n^*(AsGa) = 12,24.10^{-31}\ kg$
     $m_p^*(AsGa) = 5,86.10^{-31}\ kg$

   remarque. Cela reste dans les même ordres de grandeur que la masse d'un électron au repos $m_e = 9,1.10^{-31}\ kg$.

   Cependant, il n'y a pas de règles simples quand au fait que ces masses effectives sont supérieures ou inférieures à la masse au repos, cela va dépendre de la température et du matériaux.

4. **Notion clé :** Commencez par calculer $\frac{n_i}{p_i}$ avec les formules données en énoncé en simplifiant ce qu'il est possible de simplifier.

   En remarquant que $\frac{n_i}{p_i} = 1$ puisque $p_i = n_i$ dans les SC intrinsèques, vous devriez aboutir à la réponse.

   remarque. On n'attend pas ici une réponse numérique à la question mais une distance à un niveau d'énergie de référence, on prendra par la suite E_C.

   Résultat : $E_F = \frac{E_C+E_V}{2} + \frac{3kT}{4}\ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) = \frac{E_C+E_V}{2} - \frac{3kT}{4}\ln\left(\frac{m_n^*}{mp^*}\right)$

   On note par la suite $\Delta E = \frac{3kT}{4}\ln\left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right)$.

   À $T = 0\ K$, $E_F = \frac{E_C+E_V}{2}$, l'énergie de Fermi est au milieu de la bande interdite.

   AN : À $T = 300\ K$,

   * $\Delta E(Ge) = 0,00896\ eV$ et $E_C(Ge) - E_F(Ge) = 0,339\ eV$
   * $\Delta E(Si) = 0,012\ eV$ et $E_C(Si) - E_F(Si) = 0,572\ eV$
   * $\Delta E(AsGa) = 0,0145\ eV$ et $E_C(AsGa) - E_F(AsGa) = 0,732\ eV$

   remarque. * Si $m_n^* = m_p^*$, $E_C - E_F$ reste constant.

   * Si $m_n^* > m_p^*$, $E_C - E_F$ augmente linéairement avec la température.
   * Si $m_n^* < m_p^*$, $E_C - E_F$ diminue linéairement avec la température.

5. **Notion clé :** D'après la théorie cinétique de la thermodynamique statistique, on a la vitesse thermique vérifiant l'égalité :

$$\frac{1}{2}m_e^* v_{th}^2 = \frac{3}{2}kT$$

   Résultat : $v_{th} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e^*}}$

   AN : $v_{th} = 153.10^3\ m.s^{-1}$

   Notion clé : La vitesse de conduction est donnée par l'égalité :

$$\vec{v}_n = \mu_n \vec{E}$$

   AN : $v_n = 36\ m.s^{-1}$

   remarque. $v_{th} \gg v_n$

   Cependant, la vitesse thermique est due à des mouvements chaotiques que l'on considère comme aléatoire et isotropes. Ainsi la moyenne de v_{th} est nulle.

   À l'inverse $\vec{v}_n$ est colinéaire à $\vec{E}$. Il n'est donc pas toujours possible de négliger v_n par rapport à v_{th} en fonction de ce que l'on cherche à étudier.

6. **Notions clés :**
   * $\vec{j} = \sum_{porteurs\ i} c_i q_i \vec{v}_i$, pour c_i la concentration en porteur de charge i
   * $j = \sigma E$ et $\rho = \frac{1}{\sigma}$
   * Pour un SC intrinsèque, $n_i = p_i$.

   Résultat : $\rho = \frac{1}{en_i(|\mu_n| + |\mu_p|)}$

   AN : À $T = 300\ K$,

   * $\rho(Ge) = 0,56\ \Omega.m$
   * $\rho(Si) = 4971\ \Omega.m$
   * $\rho(AsGa) = 3,43\ M\Omega.m$

remarque. Si E_G est élevé, alors ρ est élevé et donc σ est faible.

Notion clé : D'après les formules de l'exercice, $n_i \propto exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) T^{\frac{3}{2}}$

On a également $\mu \propto T^{-\frac{3}{2}}$

Résultat : $\rho \propto exp\left(\frac{E_G}{kT}\right)$

remarque. La résistivité des SC intrinsèques diminue donc quand la température augmente.

Ainsi, ces SC ne sont pas utiles pour l'électronique, cependant ils peuvent être des outils efficaces de mesure de la température par l'intermédiaire d'une mesure de leur résistivité qui y est directement reliée.