Matériaux et Ingénierie des surfaces

Polytech Lyon — Université Claude Bernard Lyon 1

Contrôle terminal de physique du solide
2024-2025

Durée : 2h

Les portables sont interdits.
Est autorisée une feuille A4 recto/verso de notes manuscriptes.

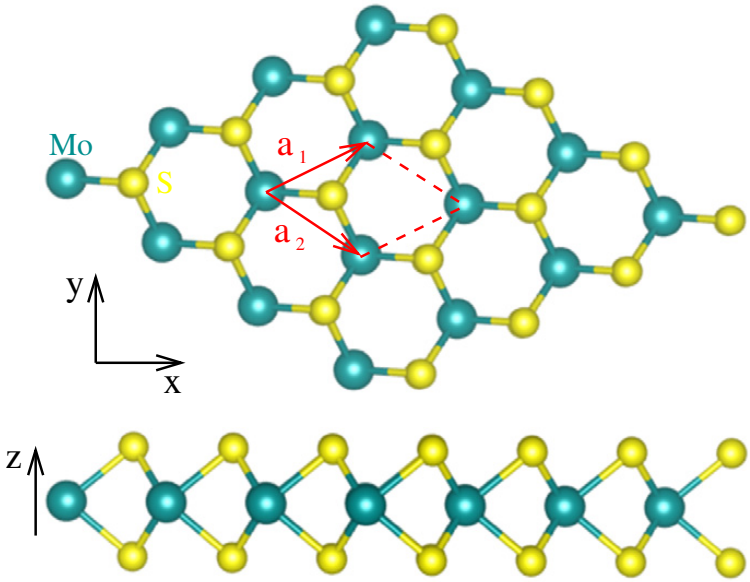
Conductivité électrique et effet Hall

On considère un cristal de GaAs dopé n et de dimensions $L_x = 1$ mm, $L_y = 1$ cm et $L_z = 2$ cm possédant une conductivité $\sigma = 100$ S/m.

1. Les électrons ont une masse effective $m^* = 0.06m_e$ où m_e est la masse de l'électron ($m = 9,109.10^{-31}$ kg) et leurs densité est 10^{18} cm^{-3}. Déterminer le temps de relaxation correspondant (on donne $e = 1,6022.10^{-19}$ C).
2. Définir le temps de relaxation et donner ses origines physiques.
3. On fait circuler un courant de 100 mA dans la direction z. En déduire la densité de courant.
4. On applique un champ magnétique de 100 mT dans la direction x. En déduire le champ de Hall E_H et la tension correspondante.

Structure de bande du disulfure de molybdène

On considère dans cet exercice le disulfure de molybdène qui, sous l'une de ses formes cristallines, à une structure à deux dimensions de type hexagonal schématisée ci-dessous.

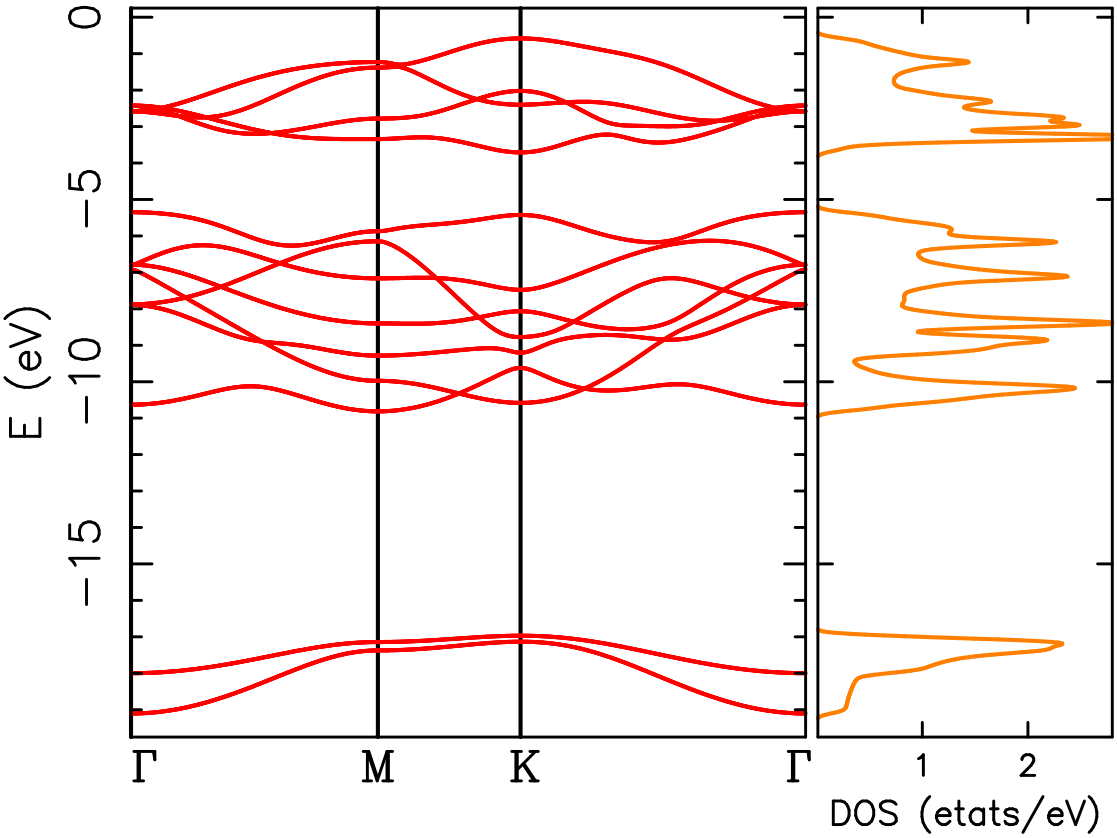


Les vecteurs de base $\vec{a}_1$ et $\vec{a}_2$ s'expriment en coordonnées cartésiennes par :

$$\vec{a}_1 = a \begin{vmatrix} \sqrt{3}/2 \\ 1/2 \\ 0 \end{vmatrix} \qquad \vec{a}_2 = a \begin{vmatrix} \sqrt{3}/2 \\ -1/2 \\ 0 \end{vmatrix}$$

où a représente la distance entre 2 atomes de Mo.

1. Déterminer les vecteurs $\vec{b}_1$ et $\vec{b}_2$ du réseau réciproque.
2. Le cristal possède N_1 cellules dans la direction $\vec{a}_1$ et N_2 cellules dans la direction $\vec{a}_2$. Rappeler l'expression du vecteur d'onde cristallin $\vec{k}$ en fonction de $\vec{b}_1$, $\vec{b}_2$, N_1, N_2 et de deux indices que vous définirez. Conbien a-t-on de vecteurs d'onde possibles dans la première zone de Brillouin ?
3. La structure électronique du molybdène est $[\mathrm{Kr}](4\mathrm{d})^5(5\mathrm{s})^1$ et celle du soufre $[\mathrm{Ne}](3\mathrm{s})^2(4\mathrm{p})^4$. Combien a-t-on d'électrons de valence par maille et au total ?
4. Sachant que la distance entre deux molybdène est de $3,198$ Å, calculer la densité électronique en cm^{-2}. On rappelle que $\widehat{\vec{a}_1;\vec{a}_2} = 60°$.

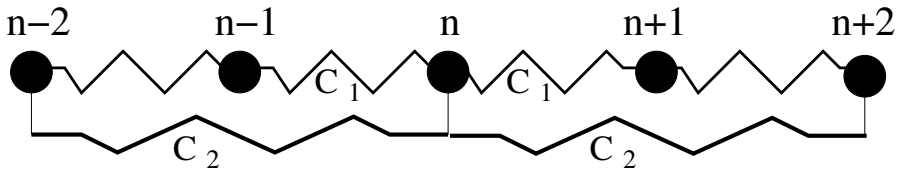


5. La figure ci-dessus repésente la structure de bande de MoS_2 ainsi que sa densité d'état. Compte tenu du nombre d'électrons de valence, combien de bandes seront occupées ?
6. A partir de la structure de bande, déterminer si MoS_2 est un isolant ou un métal. Vous justifierez votre réponse.

Modes de vibration dans une molécule linéaire

Dans ce problème on va considérer les modes de vibration des atomes dans un cristal à une dimension correspondant à une chaîne de N atomes (numérotées de 0 à $N-1$) de masse M ayant une maille élémentaire de longueur a.

On considère dans cet exercice que les atomes effectuent uniquement des mouvements colinéaires à l'axe de la molécule. On note u_n le déplacement des atomes par rapport à leurs positions d'équilibre.



En plus des interactions entre atome plus proche voisin, on considère les interactions entre atomes second voisin. Ainsi, la force de rappel entre l'atome n et l'atome $n+1$ est donnée par $-C_1(u_n - u_{n+1})$ et la force de rappel entre l'atome n et l'atome $n+2$ est donnée par $-C_2(u_n - u_{n+2})$

1. Dans ces expressions, que représentent les grandeurs C_1 et C_2 ?
2. Justifier que la force de rappel totale s'exerçant sur l'atome n est donnée par :

$$F_n = C_1\left(u_{n+1} + u_{n-1} - 2u_n\right) + C_2\left(u_{n+2} + u_{n-2} - 2u_n\right) . \tag{1}$$

3. Les solutions des équations du mouvement sont de la forme : $u_n(t) = U_n e^{i\omega t}$.
   Que représentent les grandeurs U_n et ω ? Donner leurs unités.
4. Donner, à l'aide du théorème de Block, le lien entre U_{n+1} et U_n.
5. On considère dans un premier temps uniquement les couplages entre premiers voisins ($C_2 = 0$). Ecrire l'équation du mouvement et montrer que la relation de dispersion peut se mettre sous la forme $\omega(k) = \sqrt{\frac{4C_1}{M}}\,|\sin(ka/2)|$. Faire un schéma représentant $\omega(k)$ dans la première zone de Brillouin. On rappelle que $1 - \cos(x) = 2\sin^2(x/2)$.

   Dans le cas ou C_2 n'est pas nul, la relation de dispersion s'exprime sous la forme :

$$\omega^2(k) = \frac{4C_1}{M}\sin^2(ka/2) + \frac{4C_2}{M}\sin^2(ka) . \tag{2}$$

6. Quelles sont les valeurs de $\omega(k)$ pour $k = 0$ et $k = \pi/a$.
7. Monter que la relation de dispersion est linéaire au voisinage de $k = 0$ (de la forme $\omega = ck$). On rappelle qu'au voisinage de 0, $\sin(x) = x + O(x^3)$. Expliciter c en fonction de C_1, C_2, M et a.
8. Que représente la vitesse c dans ce cas ? La calculer pour $C_1 = 10^{-8}$ N/m, $C_2 = C_1/4$, $M = 2.10^{-30}$ kg et $a = 5$ Å.
9. Il existe des chaînes atomiques pour lesquelles la constante C_2 est négative. Commenter l'effet sur la vitesse c lorsque $|C_2|$ augmente à partir de zéro et approche la valeur de $C_1/4$?