
EXAMEN FINAL - 2016

Chapitres 1 à 10

Note importante : Vous avez le droit d'utiliser une feuille synthèse de 8.5" × 11" (format lettre) écrite **recto/verso** de tout ce que vous voulez de la matière incluant les chapitres 1 à 10. La calculatrice est requise.

1 - Survol des chapitres 1 à 6

25

Instructions : Dans les questions à réponses rapides suivantes visant les chapitres 1 à 6, vous devez expliquer vos réponses avec des arguments physiques (la plupart du temps). On vous demandera cependant à l'occasion de faire un lien avec des sujets traités dans les chapitres 7, 8 et 10.

(a) [10 pts] **Hamiltonien électronique total et les approximations** : Présentez l'hamiltonien **électronique** incluant tous les termes d'énergie cinétique et potentielle en identifiant toutes les composantes (toutes les variables). Expliquez les hypothèses avancées pour en obtenir l'hamiltonien des électrons libres. Expliquez comment les termes d'énergie potentielle sont récupérés pour générer la structure de bande avec ouverture de bande interdite d'énergie.

(b) [7 pts] **Fréquence cyclotron** : Démontrez à l'aide des équations du mouvement électronique dans un métal que la fréquence cyclotron pour un électron libre avec une masse effective de m^* est donnée par $\omega_c = \frac{eB}{m^*}$.

(c) [2 pts] **Condition d'interférence** : Quelle est la condition d'interférence constructive pour la diffraction des rayons-X par un cristal ?

(d) [6 pts] **Potentiel d'interaction entre atomes voisins** : Faites un schéma du potentiel d'interaction entre deux atomes voisins dans une structure cristalline. Expliquez le lien entre ce potentiel et le comportement des atomes dans leur contribution aux modes de vibration du réseau. De ce potentiel, peut-on expliquer l'observation

d'expansion thermique dans les solides ? Expliquez votre réponse.

2 - Chapitre 7 - Structure de bandes

30

(a) [5 pts] **Origine des bandes** : Expliquez le lien entre les niveaux électroniques atomiques et la structure de bandes dans les solides.

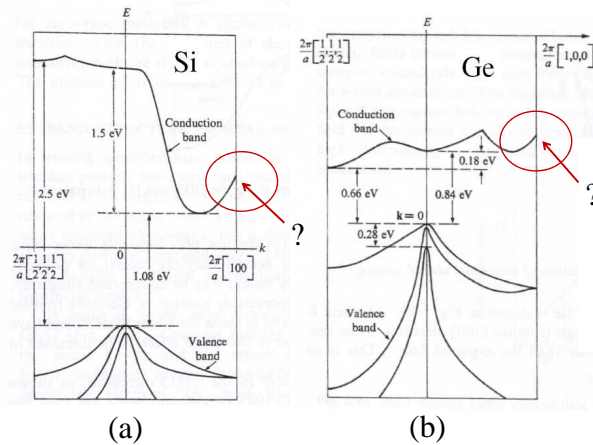
(b) [5 pts] **Fonction de Bloch et momentum cristallin** : Montrez que le momentum cristallin, qui demeure $m\vec{v}$ où $\vec{v} = \frac{1}{\hbar}\vec{\nabla}_{\vec{k}}E(\vec{k})$, n'est plus donné par $\hbar\vec{k}$ comme dans le cas des électrons libres lorsqu'un potentiel périodique mène à des fonctions d'onde électroniques de Bloch.

(c) [10 pts] **Équation centrale** : En démarrant avec l'équation centrale, montrez que l'énergie d'un électron de vecteur d'onde k (en 1D) est donnée par :

$$E_k \cong \lambda_{k-G_1} + \sum_{G \neq G_1} \frac{|U_{G-G_1}|^2}{\lambda_{k-G_1} - \lambda_{k-G}} + O(U^3) \quad (1)$$

(d) [5 pts] **Effet Hall positif de l'aluminium** : Comment expliquez-vous le coefficient de Hall positif de l'aluminium si chaque atome donne trois (3) électrons par atome ?

(e) [5 pts] **Vitesse non-nulle à la frontière de la zone de Brillouin** : La figure plus bas montre les relations de dispersion du silicium et du germanium. On remarque dans les deux cas que la pente (donc la vitesse de groupe des électrons) n'est pas nulle à la frontière de la première zone de Brillouin pour les électrons à $\vec{k} = \frac{2\pi}{a}(1, 0, 0)$ pour la bande de conduction (les zones correspondantes sont encerclées). Comment est-ce possible ?



3 - Chapitre 8 - Les semiconducteurs

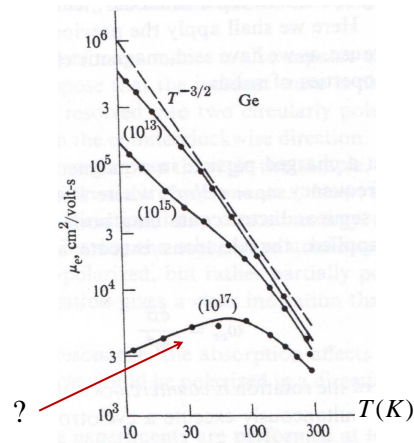
30

(a) [5 pts] **Gap direct vs indirect** : Décrivez la (les) différence(s) entre des semiconducteurs à bande interdite (gap) d'énergie directe et indirecte. Si un photon incident excite un électron du maximum de la bande de valence au minimum de la bande de conduction, quelles sont les conditions dans les deux cas pour que ça se réalise ?

(b) [5 pts] **Potentiel chimique dans un semiconducteur pur** : Comment a-t-on obtenu la dépendance en température du potentiel chimique d'un semiconducteur pur ? À titre indicatif, celui-ci est donné par :

$$\mu(T) = \frac{E_{gap}}{2} + \frac{3}{4}k_B T \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right) \quad (2)$$

(c) [10 pts] **Mobilité des porteurs** : Des mesures de la mobilité de Hall, $\mu_H \equiv \frac{R_H}{\rho}$, sur des échantillons de germanium dopés à plusieurs niveaux montrent une dépendance en température telle qu'illustrée à la Figure plus bas. Pourquoi le comportement à haute température en loi de puissance ($\mu_H \sim T^{-3/2}$) ne persiste pas à basse température pour le matériau le plus dopé ?



- (d) [10 pts] **Effet Hall dans les semiconducteurs dopés** : Tracez la dépendance en température des densités de porteurs (trous et électrons) pour un semiconducteur de type-p. Si la mobilité des électrons est plus grande que la mobilité des trous à toute température, quelle est la dépendance en température attendue de la résistivité et de l'effet Hall dans ce matériau ?

4 - Chapitre 10 - Supraconductivité

15

- (a) [5 pts] **Origine physique de H_c (ou I_c)** : Expliquez l'origine physique du champ critique H_c au-delà duquel l'écrantage parfait n'est plus possible dans un supraconducteur.
- (b) [5 pts] **Effet isotopique** : Quelle est l'origine de l'effet isotopique dans les supraconducteurs ? Pourquoi cet effet a été important pour valider la théorie microscopique expliquant la phase supraconductrice.
- (c) [5 pts] **Longueurs caractéristiques** : Expliquez la signification physique de la longueur de pénétration λ et de la longueur de cohérence ξ dans un supraconducteur. Quelles sont les dépendances en température de ces deux longueurs ?

Bon été!!!
