

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE NOVEMBRE 2014

Toute documentation permise  
Calculatrices : modèles autorisés seulement  
Durée de l'examen : 3 heures

14-PH-A6 PHYSIQUE DE L'ÉTAT SOLIDE

**Question 1 (10 points)**

Soit un réseau de cellules cristallines de type cubique à face centrée (FCC) de cuivre.

- Combien d'atomes possède la cellule unitaire ? (2 points)
- Calculer la concentration atomique (nombre d'atomes par unité de volume) dans ce cristal et la densité massique en unités  $\text{g.cm}^{-3}$  étant donné que la masse atomique du cuivre est  $63,55\text{g.mol}^{-1}$  et le rayon de l'atome de cuivre est  $0,128\text{nm}$ . (8 points)

**Question 2 (10 points)**

Expliquer brièvement les relations entre les phonons et

- la température de fusion d'un solide,
- la conductivité thermique,
- la conductivité électrique dans les solides non métalliques,
- la réflectivité optique,
- la diffusion (*scattering*) des rayons X.

Chaque réponse vaut 2 points.

**Question 3 (10 points)**

Le cuivre possède une conductivité électrique de  $5,9 \times 10^5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , une densité massique de  $8,96 \text{ g cm}^{-3}$  et une masse atomique de  $63,55\text{g.mol}^{-1}$ . Calculer, à la température ambiante :

- la mobilité de dérive (*drift*) du cuivre à la température ambiante, (5 points)
- le temps de diffusion moyen (*mean scattering time*). (5 points)

**Question 4 (10 points)**

L'énergie de Fermi des électrons de conduction dans le cuivre est de 7 eV. Quelle est la vitesse de ces électrons pour cette énergie ?

### Question 5 (10 points)

Dans un cristal de silicium la masse effective des électrons dans la bande de conduction est de  $0,26m_e$  où  $m_e$  est la masse de l'électron ( $m_e = 9,1 \times 10^{-31}\text{kg}$ ).

- Calculer la vitesse moyenne des électrons dans la bande de conduction à  $T = 300\text{ K}$ . (5 points)
- Soit  $a$  l'amplitude des vibrations du réseau cristallin. La théorie cinétique prédit que  $a$  est proportionnel à  $T^{1/2}$ , ou exprimé différemment, que l'énergie moyenne associée aux vibrations du réseau (proportionnel à  $a^2$ ) est proportionnel à  $T$ . Prédire la dépendance de la mobilité d'entraînement (*drift mobility*) en fonction de la température  $T$ . (5 points)

### Question 6 (15 points)

Le silicium cristallin est le semi-conducteur le plus utilisé dans la fabrication de composants électroniques. Dans ce matériau, concentration intrinsèque est de  $1 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ , les mobilités des électrons et des trous sont respectivement de  $1450$  et  $450\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  à la température de  $300\text{ K}$ . Soit un cristal de silicium dopé avec des atomes de phosphore à une concentration de  $10^{16}\text{ cm}^{-3}$ .

- Quel est le type de conductivité du matériau dopé ? Expliquer brièvement. (5 points)
- Calculer la conductivité électrique du matériau dopé à la température de  $300\text{ K}$ . (10 points)

### Question 7 (20 points)

Compléter le tableau suivant pour les types de matériaux du point de vue magnétisme :

Type	Explications brèves et exemple	La dépendance de la susceptibilité magnétique en fonction de la température	Valeurs typiques de susceptibilité magnétique
Diamagnétique			
Paramagnétique			
Ferromagnétique			
Antiferromagnétique			

**Question 8 (10 points)**

Pour les semi-conducteurs, expliquer brièvement :

- a) Un semi-conducteur dégénéré.
- b) La différence entre une bande interdite directe et indirecte.
- c) La tension induite (built-in voltage) dans les diodes.
- d) L'effet Zener dans les diodes.
- e) La capacité de diffusion dans une jonction p-n.

Chaque question vaut 2 points.

**Question 9 (5 points)**

L'énergie de formation d'une lacune dans un cristal d'aluminium est de 0,7 eV. Calculer la concentration de lacunes dans ce cristal à la température de 660 °C. La concentration atomique de l'aluminium est de  $6 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ .