

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE NOVEMBRE 2015

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)

- a) Soit un réseau de cellules cristallines de type cubique centré (CC) de molybdène possédant une densité de $10,22 \text{ g cm}^{-3}$. La masse de ce solide est de $95,94 \text{ g mol}^{-1}$. Calculer la concentration atomique, le paramètre de maille du réseau a et le rayon atomique de l'atome de molybdène. (5 points)
- b) L'or cristallin possède une structure cubique à face centrée (CFC) avec une densité de $19,3 \text{ g cm}^{-3}$ et une masse atomique de $196,97 \text{ g mol}^{-1}$. Calculer la concentration atomique, le paramètre de maille du réseau a et le rayon atomique de l'atome d'or. (5 points)

Question 2 (10 points)

- a) Expliquer brièvement la signification de la température de Debye T_D . (2 points)
- b) Décrire brièvement la variation de la conductivité électrique en fonction de la température dans les métaux pour les températures supérieures à T_D . (4 points)
- c) Décrire brièvement la variation de la conductivité électrique en fonction de la température dans les métaux pour les températures inférieures à T_D . (4 points)

Question 3 (20 points)

L'énergie de Fermi des électrons dans le cuivre à la température de 300 K est $E_F = 7 \text{ eV}$. La mobilité de dérive (*drift mobility*) des électrons est $33 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

- a) Quelle est la vitesse de Fermi v_F des électrons de conduction ayant une énergie proche de E_F dans le cuivre ? Comparez cette vitesse avec la vitesse thermique v_t des électrons si ces derniers se comportent comme un gaz idéal (obéissant aux statistiques de Maxwell-Boltzmann). Expliquer pourquoi v_F et v_t diffèrent autant. (10 points)
- b) Quelle est la longueur d'onde De Broglie des électrons de conduction ? Est-ce que ces électrons subiront une diffraction dû aux plans du réseau cristallin de cuivre dont la séparation est de $0,21 \text{ nm}$? (5 points)
- c) Calculer le libre parcours moyen des électrons autour de l'énergie E_F (5 points)

Question 4 (10 points)

- a) Un cristal de silicium a été dopé par des atomes d'arsenic à une concentration de 10^{17} atomes cm^{-3} . Pour ce matériau, calculer la conductivité électrique à la température de 27°C et la position du niveau de Fermi par rapport au niveau de Fermi intrinsèque. (5 points)
- b) Le matériau est ensuite dopé par des atomes de bore à une concentration de 9×10^{16} atomes cm^{-3} . Quelle est la nouvelle position du niveau de Fermi à la température de 27°C ? Le cristal ayant subi ces deux dopages est-il de type n ou p ? (5 points)

Question 5 (10 points)

Soit une jonction pn de silicium. Du côté p le dopage (concentration des atomes accepteurs) est de 10^{18} atomes cm^{-3} et du côté n le dopage (concentration des atomes donneurs) est de 10^{16} atomes cm^{-3} . Calculer la tension induite (*built-in potential*) de la jonction.

Question 6 (20 points)

Expliquer brièvement :

- La masse effective des porteurs de charge dans les semi-conducteurs (5 points)
- La piézo-électricité (5 points)
- La zone dépeuplée (ou zone de charge d'espace) d'une jonction pn (5 points)
- La capacité de dépeuplement d'une jonction pn (5 points)

Question 7 (10 points)

Dans les métaux le paramagnétisme dépend du nombre d'électrons de conduction dont les spins peuvent s'aligner avec le champ magnétique appliqué. Ces électrons possèdent une énergie proche du niveau de Fermi E_F et leur nombre est déterminé par la densité d'états $g(E_F)$. Si β représente le moment magnétique dû au spin, la susceptibilité paramagnétique est :

$$\chi_{para} \approx \mu_0 \beta^2 g(E_F)$$

où μ_0 est la perméabilité du vide. Estimer la susceptibilité paramagnétique du calcium dont l'énergie de Fermi est de 4,68 eV.

Question 8 (10 points)

En technologie de fabrication de dispositifs électroniques, le silicium subit des dopages fréquents par diffusion d'impuretés à haute température, typiquement entre 950 et 1200°C . L'énergie de formation de lacunes dans un cristal de silicium est de 3,6 eV. Quelle est la concentration de lacunes à l'équilibre dans un cristal de silicium à 1000°C ? Négliger la variation de la densité du cristal avec la température (moins de 1 %).