

Concours d'accès à la Formation de Troisième Cycle

Doctorat LMD 2013-2014

Technologie, structure & propriétés des solides

ÉPREUVE PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLIDES (1H30)

- 1- Qu'est-ce qu'un réseau réciproque ?
- 2- Expliquer le concept du théorème de Bloch.
- 3- Donner une petite définition du dopage d'un semiconducteur.
- 4- Tracer le schéma de la structure de bande d'un :
 - a) Semiconducteur Intrinsèque.
 - b) Semiconducteur Dopé N.
 - c) Semiconducteur Dopé P.
- 5- Donner l'expression de la masse effective d'une particule dans un semiconducteur et expliquer physiquement ce concept.
- 6- Donner une définition du niveau de Fermi et démontrer sa position dans un semiconducteur Intrinsèque.
- 7- Que veut dire le libre parcours moyen d'un électron dans un semiconducteur ?
- 8- Expliquer le principe de fonctionnement d'une diode Laser.
- 9- Qu'est-ce qu'un superréseau ?
- 10- Donner un schéma du profil de potentiel d'un superréseau.
- 11- Quel est l'élément responsable de la conductivité électrique d'un solide ?
- 12- Que veut dire matériaux réfractaire. Donner deux exemples de ces matériaux en précisant leurs domaines d'utilisations.
- 13- Parmi les modèles ayant servi à la description des propriétés thermiques et électriques des métaux, nous citons le modèle de Drude. Décrire brièvement ce modèle.
- 14- Que désigne le terme phonon ? Lorsqu'un mode de vibration du cristal est défini par la fréquence ν , donner l'expression de l'énergie portée par le phonon.

Concours d'accès à la Formation de Troisième Cycle

Doctorat LMD 2013-2014

Technologie, structure & propriétés des solides

SOLUTION : PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLIDES

1- Qu'est-ce qu'un réseau réciproque ?

0,5 pts

R1. C'est l'image **énergétique** du réseau cristallin. Théoriquement c'est la transformé de fourrier du réseau direct.

En cristallographie, le **réseau réciproque** d'un réseau de Bravais est l'ensemble des vecteurs \vec{K} tels que : $e^{i\vec{K}\cdot\vec{R}} = 1$, pour tous les vecteurs position \vec{R} du réseau de Bravais. Ce réseau réciproque est lui-même un réseau de Bravais, et son réseau réciproque est le réseau de Bravais de départ.

2- Expliquer le concept du théorème de Bloch.

1,5 pts

R2. Les **ondes de Bloch**, d'après Felix Bloch, sont les fonctions d'ondes décrivant les états quantiques des électrons soumis à un potentiel périodique. C'est notamment le cas du cristal parfait infini, les électrons sont soumis à un potentiel périodique ayant la symétrie de translation des atomes constituant le cristal.

Le théorème de Bloch donne les solutions de l'équation de Schrödinger indépendante du temps pour un potentiel donné périodique.

Un potentiel $V(x)$ de périodicité x_0 peut s'écrire sous la forme $V(x + x_0) = V(x)$, le théorème de Bloch dit alors que les fonctions d'onde, dite onde de Bloch, sont de la forme :

$$\psi(x) = e^{ikx} \cdot u_{\vec{k}}(x)$$

où $u_{\vec{k}}(x)$ est une fonction de période x_0 , c'est-à-dire $u_{\vec{k}}(x + x_0) = u_{\vec{k}}(x)$.

3- Donner une petite définition du dopage d'un semiconducteur.

1,5 pts

R3. Dans le domaine des semi-conducteurs, le **dopage** est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité.

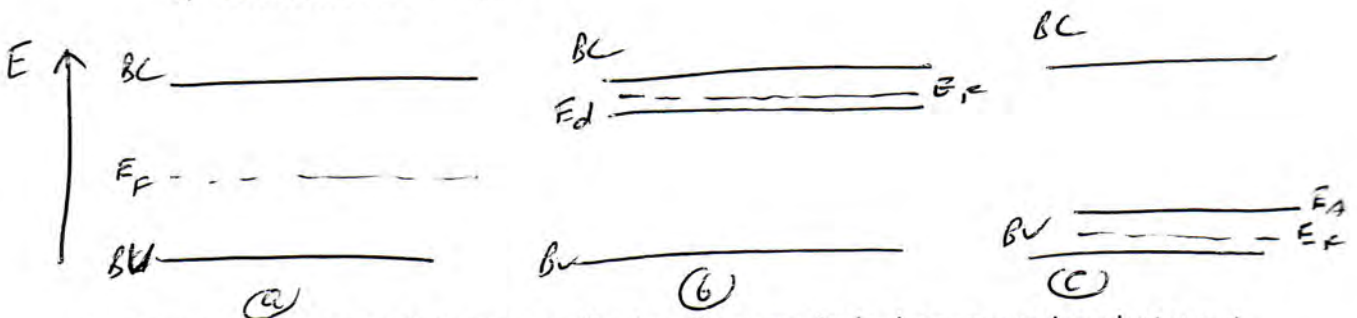
Les propriétés des semi-conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de *porteurs de charge* qu'ils contiennent. Ces porteurs sont les électrons ou les trous. Le dopage d'un matériau consiste à introduire, dans sa matrice, des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous.

Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

4- Tracer le schéma de la structure de bande d'un :

1,5 pts

- Semiconducteur Intrinsèque.
- Semiconducteur Dopé N.
- Semiconducteur Dopé P.



5- Donner l'expression de la masse effective d'une particule dans un semiconducteur et expliquer physiquement ce concept.

1,5 pts

R5. La **masse effective** est une notion utilisée en physique du solide pour l'étude du transport des électrons. Plutôt que de décrire des électrons de masse fixée évoluant dans un potentiel donné, on les décrit comme des électrons libres dont la masse effective varie. Cette masse effective peut-être positive ou négative, supérieure ou inférieure à la masse réelle de l'électron.

La notion de masse effective est notamment utile dans l'étude des semiconducteurs ou des liquides de Fermi.

La masse effective est définie par le tenseur d'ordre 2 des dérivées secondes de l'énergie E par rapport au vecteur d'onde \mathbf{k} :

3- Donner une petite définition du dopage d'un semiconducteur.

1,5 pts

R3. Dans le domaine des semi-conducteurs, le **dopage** est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité.

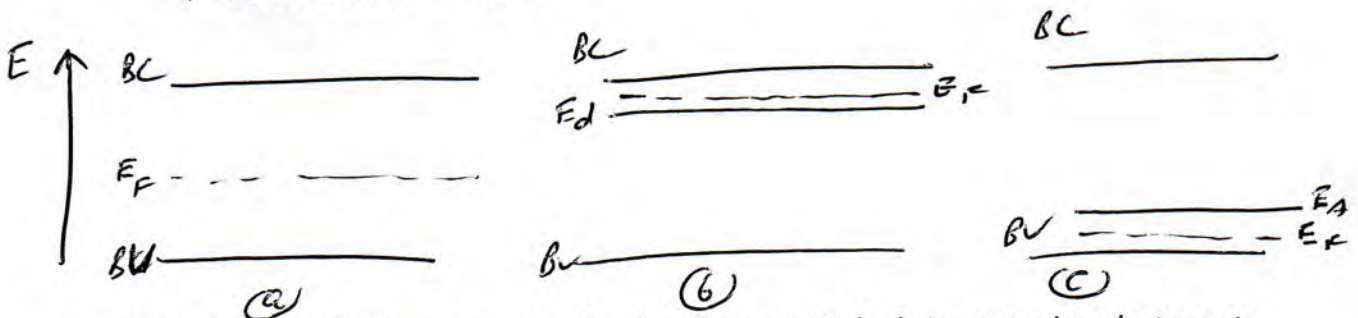
Les propriétés des semi-conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de *porteurs de charge* qu'ils contiennent. Ces porteurs sont les électrons ou les trous. Le dopage d'un matériau consiste à introduire, dans sa matrice, des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous.

Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

4- Tracer le schéma de la structure de bande d'un :

1,5 pts

- a) Semiconducteur Intrinsèque.
- b) Semiconducteur Dopé N.
- c) Semiconducteur Dopé P.



5- Donner l'expression de la masse effective d'une particule dans un semiconducteur et expliquer physiquement ce concept.

1,5 pts

R5. La **masse effective** est une notion utilisée en physique du solide pour l'étude du transport des électrons. Plutôt que de décrire des électrons de masse fixée évoluant dans un potentiel donné, on les décrit comme des électrons libres dont la masse effective varie. Cette masse effective peut-être positive ou négative, supérieure ou inférieure à la masse réelle de l'électron.

La notion de masse effective est notamment utile dans l'étude des semiconducteurs ou des liquides de Fermi.

La masse effective est définie par le tenseur d'ordre 2 des dérivées secondes de l'énergie E par rapport au vecteur d'onde \mathbf{k} :

$$\left(\frac{1}{m}\right)_{i,j} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j}$$

où \hbar est la constante de Planck réduite. Pour un électron libre, la masse effective est bien entendu constante et égale à la masse réelle de l'électron.

- 6- Donner une définition du niveau de Fermi et démontrer sa position dans un semiconducteur Intrinsèque. (1,5 pts)

R6. Le **niveau de Fermi** est une caractéristique propre à un système qui traduit la répartition des électrons dans ce système en fonction de la température. La notion de niveau de Fermi est utilisée en physique et en électronique, notamment dans le cadre du développement des composants semi-conducteurs. Concrètement, le niveau de Fermi est une fonction de la température mais il peut être considéré, en première approximation, comme une constante, laquelle équivaldrait alors au niveau de plus haute énergie occupé par les électrons du système à la température de 0 K.

Dans un semiconducteur Intrinsèque le niveau de fermi est décrit par la relation :

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_v}{m_c}\right)$$

Puisque le deuxième terme est très négligeable, donc le niveau de Fermi se trouve au milieu de la bande interdite (gap)

- (1 pt) 7- Que veut dire le libre parcours moyen d'un électron dans un semiconducteur ?

R7. En Physique, le **libre parcours moyen** est la distance moyenne parcourue par une particule se déplaçant (telle qu'un atome, une molécule, un photon) entre deux impacts successifs (collisions) ¹ modifiant sa direction, son énergie ou d'autres propriétés.

- 8- Expliquer le principe de fonctionnement d'une diode Laser. (1,5 pts)

R8. En Physique, le **libre parcours moyen** est la distance moyenne parcourue par une particule se déplaçant (telle qu'un atome, une molécule, un photon) entre deux

impacts successifs (collisions) ¹ modifiant sa direction, son énergie ou d'autres propriétés.

Comme tout laser, une diode laser fonctionne à l'aide d'un milieu amplificateur (amplification dans les semi-conducteurs par émission stimulée), d'une structure résonante (cavité de Fabry-Pérot ou autre types) et d'un processus de pompage (courant électrique).

L'émission lumineuse est basée sur le phénomène de l'électroluminescence qui comprend l'émission d'un photon par recombinaison d'une paire électron-trou et le peuplement de la bande de conduction par injection d'un courant. La longueur d'onde d'émission est donnée par l'application du principe de conservation de l'énergie : celle du photon sera approximativement égale à la largeur de la bande interdite du matériau. Un autre principe incontournable de la physique est la conservation du moment lors d'une recombinaison ou d'une absorption ; cela entraîne la nécessité d'utiliser des matériaux dits « à gap direct » : le minimum de la bande de conduction est à la verticale du maximum de la bande de valence dans l'espace des moments.

9- Qu'est-ce qu'un superréseau ?

01,5 pts

R9. Les Superréseaux Semiconducteurs sont des structures artificielles obtenues par empilement de couches ultrafines alternées périodiquement dans une direction de croissance privilégiée de deux semiconducteurs.

(1 pt) 10- Donner un schéma du profil de potentiel d'un superréseau.

11- Quel est l'élément responsable de la conductivité électrique d'un solide ?

01,5 pts

R11. L'élément responsable de la conductivité électrique d'un solide est l'électron libre.

12- Que veut dire matériaux réfractaire. Donner deux exemples de ces matériaux en précisant leurs domaines d'utilisations.

01,5 pts

R12.

matériaux qui résiste à la chaleur.

W, V
Brique

13- Parmi les modèles ayant servi à la description des propriétés thermiques et électriques des métaux, nous citons le modèle de Drude. Décrire brièvement ce modèle. (015 pt)

R13. Dans le modèle de Drude, un métal est formé d'un réseau d'ions et d'un gaz d'électrons. Les électrons mis à la disposition du gaz par chaque atome sont au nombre de Z_c . Ce sont ceux situés sur les couches électroniques externes. Ils sont appelés électrons de conduction.

14- Que désigne le terme phonon ? Lorsqu'un mode de vibration du cristal est défini par la fréquence ν , donner l'expression de l'énergie portée par le phonon. (15 pt)

R14. Le terme phonon désigne le quantum d'énergie de vibration dans un solide cristallin. L'expression de l'énergie est : $h\nu$, avec h la constante de Planck.