

N.B. Prendre 1,12 eV pour le gap du Si, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

Question 1. Principes de base (25 points).

-a) Décrire un phénomène physique impliquant l'électron qui ne peut pas être expliqué en traitant l'électron seulement comme une "petite boule" (ou particule) d'électricité, mais qui fait plutôt appel à la notion de l'électron comme une onde dans le sens de la mécanique quantique. Donner une application pratique de ce phénomène.

Solutions possibles :

- 1. L'effet laser :** dans un puits de potentiel. Exemple : le laser dans une lame d'arséniure de gallium en sandwich entre des couches d'AlGaAs;
- 2. L'effet tunnel**, i.e. un électron qui passe à travers une couche de silice mince; ce phénomène entre en jeu dans les clés USB (les mémoires flash);
- 3. Le phénomène de création de paires d'électrons-trous dans la pile solaire photovoltaïque.**

-b) Donner et expliquer brièvement un exemple de phénomène physique qui ne peut pas avoir lieu dans un métal, mais qui a lieu dans des dispositifs à semiconducteur.

Parmi les solutions possibles on note :

- 1. L'effet laser :** il requiert une grande population d'électrons dans la bande de conduction et de trous dans la bande de valence, les électrons et les trous étant séparés par un gap énergétique;
- 2. La diode électroluminescente**, qui elle aussi requiert des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence;
- 3. Le transistor bipolaire** qui fait entrer en jeu l'amplification du courant électrique;
- 4. Le transistor à effet de champ** qui utilise un canal de conduction dont l'épaisseur est modifiable grâce à la zone déplétée. Celle-ci peut être contrôlée par une tension de grille;
- 5. La photodiode en polarisation inverse** (back-biased) qui sépare les électrons des trous grâce à un fort champ électrique interne et crée un courant;
- 6. Le phototransistor** dans lequel le courant produit par les paires d'électron-trous est amplifié;
- 7. Les photoconducteurs**, utilisés pour détecter la lumière et aussi dans les photocopieuses pour sélectivement attirer des particules d'encre sur une image faite d'électrons en surface;
- 8. Le thermistor** dont la conductivité est une mesure de la température. Plus il est chaud, plus il ya des électrons-trous à cause de l'agitation thermique.

-9. La pile solaire photovoltaïque, qui utilise la barrière interne de potentiel pour séparer les électrons des trous créés par les photons absorbés du soleil.

-c) Dans les dernières années une nouvelle famille de semiconducteurs fondée sur le nitrure de gallium, GaN, est apparue. Son gap est de 3,6 électronvolts et direct. On peut faire des alliages cristallins du GaN avec InN et AlN et ainsi obtenir des gaps directs de n'importe quelle valeur désirée entre 1.9 et 6.2 eV. Pour des diodes électroluminescentes ou des lasers réalisés avec ces alliages, calculer les valeurs de gap nécessaires pour générer de la lumière dans le rouge autour de 630 nm (0,63 micron) et du bleu autour de 488 nm.

Solution : pour $\lambda = 0,63$ micron, le photon a $hf = 1,24/0,63 = 1,97$ eV

pour $\lambda = 0,488$ micron, le photon a $hf = 1,24/0,488 = 2,54$ eV

-d) Dans un morceau de silicium très pur, dit «intrinsèque», tenu à une température sibérienne de – 50 degrés Celsius (223 kelvins), quelle est la densité d'électrons dans la bande de conduction? Quel phénomène physique explique leur présence?

Solution : À moins 50 Celsius $T = 223$ kelvins et $k_B T = 0,0192$ eV. Dans le silicium intrinsèque la densité d'électrons est :

$$n_i = (N_C N_V)^{1/2} \times \exp(-E_G/2k_B T)$$

Les constantes N_C et N_V dépendent de la température. On a :

$$N_C(223 \text{ K}) = N_C(300 \text{ K}) \times (223/300)^{3/2} = 3,22 \times 10^{19}/\text{cm}^3 \times 0,64 = 2,06 \times 10^{19}/\text{cm}^3$$

$$N_V(223 \text{ K}) = N_V(300 \text{ K}) \times (223/300)^{3/2} = 1,83 \times 10^{19}/\text{cm}^3 \times 0,64 = 1,17 \times 10^{19}/\text{cm}^3$$

$$\text{D'où : } n_i = (2,06 \times 10^{19} \times 1,17 \times 10^{19})^{1/2} \times \exp(-1,12/2 \times 0,0192) = 3,34 \times 10^6/\text{cm}^3.$$

Question 2. Jonction PIN en silicium utilisée en mode de photodiode (25 points).

-a) Une diode à jonction PIN est fabriquée de silicium avec les dopages suivants : en zone N avec $N_d = 10^{18}$ donneurs/ cm^3 , en zone P avec $N_a = 10^{17}$ accepteurs/ cm^3 , la section du milieu «I» étant non-dopée, donc intrinsèque, et d'épaisseur un micron (10^{-4} cm). Sur la base de la théorie pour une simple jonction PN, quelle est la valeur de la barrière interne de potentiel (built-in potential barrier) V_{bi} ?

Solution : on a $V_{bi} = E_G - (\text{écart Fermi en zone N}) - (\text{écart Fermi en zone P})$
 $= 1,12 - 0,090 - 0,136 = 0,894$ eV.

-b) La diode PIN est mise en polarisation inverse (back-bias) de 5 volts afin de servir de photodiode. Au foyer d'un télescope la photodiode est un des nombreux pixels photosensibles qui servent à enregistrer le faible flux de photons provenant des galaxies. Quelle est la valeur de la barrière de potentiel à laquelle fait face un électron de la zone N ? Est-ce qu'il y aura un courant de diffusion appréciable des électrons en zone N vers la zone P?

Solution : La barrière de potentiel vue par les électrons en zone N est $5 \text{ eV} + eV_{bi} = 5,894 \text{ eV}$. Face à une barrière de potentiel aussi élevée le facteur $\exp(-5,894/0,026)$ réduit le courant de diffusion des électrons en zone N vers la zone P complètement négligeable.

-c) Dans les conditions de **-b)** décrire le phénomène qui a lieu quand un photon est absorbé dans la zone intrinsèque I.

Solution : Quand un photon est absorbé dans la zone intrinsèque I, une paire d'électrons-trous est créée. L'électron est propulsé par le champ électrique vers la zone N et le trou vers la zone P.

-d) Dans les conditions de **-b)**, pour un photon absorbé au milieu de la zone intrinsèque combien de temps sera requis pour que les porteurs de charge atteignent le bord des régions dopées?

Solution : Le champ électrique en zone I est proche de $5 \text{ volts/micron} = 50 \text{ kV/cm}$. Pour cette valeur de champ la vitesse de l'électron est environ 100 nm/ps , celle du trou environ 60 nm/ps . Traverser le demi-micron (500 nm) de la zone I prendra donc 5 ps pour l'électron et 8 ps pour le trou.

-e) Les galaxies très éloignées émettent dans l'infrarouge à des longueurs d'onde plus grandes que 2 microns . Dans ce cas pourra-t-on se servir de cette photodiode au foyer du télescope?

Solution : NON, parce que le photon aura une énergie $hf = 1,24/2 = 0,62 \text{ eV}$, ce qui est moins que le gap du silicium. Le silicium est donc transparent au rayonnement infrarouge au-delà de 2 microns et la photodétection est impossible.

Question 3. Pile solaire au silicium dans l'espace (25 points)

L'idée de mettre des centrales solaires dans l'espace a été beaucoup étudiée. Le flux moyen de puissance solaire est environ $1,36 \text{ kW/m}^2$ dans l'espace parce qu'il n'y a pas l'absorption atmosphérique que l'on connaît sur terre. Supposez que l'on mette un astronef en orbite autour du soleil à la moitié de la distance Terre-Soleil, où le flux est quatre fois plus fort.

-a) En faisant les mêmes hypothèses que dans les notes de cours, sauf pour le flux de puissance solaire, calculer le voltage maximum qu'une pile solaire au silicium pourra afficher;

Solution : Avec les hypothèses des notes de cours le flux de puissance solaire de 920 Watts/m^2 produit une densité d'électrons et de trous de $3.48 \times 10^{14} / \text{cm}^3$. Dans l'espace près de la terre le flux solaire est $1,36 \text{ kW/m}^2$, et à la moitié de la distance Terre-Soleil le flux est $4 \times 1,36 = 5,44 \text{ kW/m}^2$.

Avec un flux $5,44/0,92 = 5,9$ fois plus fort on aura $5,9 \times 3,48 \times 10^{14} / \text{cm}^3 = 20,5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ de paires d'électrons-trous.

Du côté N de la jonction PN on aura pour une pile individuelle :

$$E_C - E_{Fn} = 0,026 \times \ln (3,22 \times 10^{19} / 5 \times 10^{17}) = 0,108 \text{ eV}$$

$$E_{Fp} - E_V = 0,026 \times \ln (1,83 \times 10^{19} / 20,5 \times 10^{14}) = 0,236 \text{ eV}$$

La séparation des niveaux de Fermi, et donc la tension produite en circuit ouvert par la pile individuelle :

$$E_{Fn} - E_{Fp} = 1,12 - 0,108 - 0,236 = 0,776 \text{ eV}$$

-b) Calculer le courant en court-circuit pour chaque centimètre carré de pile, et calculer la puissance électrique maximum qui sera possible;

Solution : Dans les notes de cours on a un courant de $2,79 \text{ A}$ pour une pile de 100 cm^2 en court-circuit, donc $0,0279 \text{ A}$ pour un cm^2 . Avec un flux solaire $5,44$ fois plus fort le courant sera $0,152 \text{ A}$. Prenant $0,65$ pour le «fill factor» on obtient $0,076 \text{ Watts}$ pour une pile individuelle d'un cm^2 . Pour 100 cm^2 on aurait 76 Watts .

-c) Au niveau microscopique, expliquer le rôle de la barrière de potentiel interne (built-in potential barrier) dans la pile solaire. Des quatre sortes de courants présents, lesquels sont utiles pour l'alimentation électrique solaire?

Solution : Le soleil crée des paires d'électrons-trous. La barrière de potentiel est essentielle pour séparer physiquement les électrons photocréés des trous photocréés. S'ils n'étaient pas physiquement séparés ils se recombineraient en dégageant principalement des phonons qui constituent une perte sous forme de chaleur.

Le courant d'électrons qui va de la zone P vers la zone N, puis de la zone N dans le circuit extérieur est le courant utile. Au point d'opération à puissance maximum un courant d'électrons à partir de la zone N traverse par diffusion la barrière de potentiel vers la zone P et s'oppose ainsi au courant «solaire». Ce deuxième courant nuit donc au courant solaire utile. La même chose se produit pour les trous. Le courant utile de trous est constitué par les trous qui vont de la zone N vers la zone P et circulent dans le

circuit extérieur. Le courant de trous de diffusion de la zone P vers la zone N s'oppose au courant solaire utile.

-d) Quand de la lumière dans l'ultraviolet ($\lambda = 300 \text{ nm}$) est absorbée par le silicium, que se passe-t-il à l'échelle microscopique? Quelle fraction de l'énergie du photon sert à produire de l'énergie électrique utile?

Solution : Un photon de 4,13 eV a beaucoup plus d'énergie que nécessaire pour créer une paire d'électrons-trous dans le silicium dont le gap est 1,12 eV. L'électron dans la bande de conduction descend rapidement les niveaux d'énergie jusqu'au niveau E_C en dégageant des phonons, ce qui est une forme de chaleur. La fraction d'énergie électrique stockée par la paire électron-trou est $1,12/4,13 = 0,27$.

Question # 4. Travail de créativité (25 points).

Décrivez l'idée de base de votre nouvelle application des dispositifs électroniques et/ou optoélectroniques et son ou ses champs d'application. Donnez des résultats de calculs approximatifs qui montrent que l'idée est techniquement réalisable.