

Question # 1 (25 points) Principes de base

-a) Donner deux exemples de phénomènes où l'électron a un comportement qui reflète sa nature ondulatoire. Quelle est la longueur d'onde d'un électron d'énergie 0,1 eV dans le vide?

Solution.

-1) **L'effet tunnel** où l'électron peut passer à travers une barrière de potentiel comme celle que présente la silice dans une clé USB.

-2) **Les niveaux d'énergie observés dans un puits de potentiel**, comme dans une mince couche de GaAs en sandwich entre deux couches de AlGaAs.

Pour un électron de 0,1 eV dans le vide on a :

$$\text{On a } \lambda = h/p \quad p = mv \quad (1/2)mv^2 = 0,1 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1)$$

$$v = [(2 \times 0,1 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}) / 0,91 \times 10^{-30}]^{1/2} \quad (2)$$

$$v = 187\,523 \text{ m/s} \quad p = mv = 1,706 \times 10^{-25} \text{ kg-m/s} \quad (3)$$

$$\text{Il résulte: } \lambda = 6,626 \times 10^{-34} / 1,706 \times 10^{-25} \text{ kg-m/s} = 3,88 \times 10^{-9} = \mathbf{3,9 \text{ nm}}$$

-b) Soit un cube de silicium cristallin intrinsèque dont le volume est un millimètre cube. À la température ambiante et dans l'obscurité combien d'électrons se trouvent dans la bande de conduction? Où se trouvent les niveaux de Fermi E_{Fn} et E_{Fp} ? Pour un électron dans la bande de conduction de ce cube quelle est sa longueur d'onde quand il occupe le niveau le plus bas, ie le plus près de E_C ?

Solution :

La densité d'électrons est $10^{10}/\text{cm}^3$ dans la bande de conduction du silicium intrinsèque. Un mm^3 vaut 10^{-3} cm^3 , donc le nombre sera **10^7 dans un mm^3** .

Les niveaux de Fermi E_{Fn} et E_{Fp} sont **au mid-gap**, soit 0,56 eV sous E_C . On peut vérifier avec la formule de Joyce-Dixon avec $N_C = 3,2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$:

$$E_{Fn} - E_C = 0,026 \times [\ln(n/N_C) + 0,353(n/N_C)] = 0,026 \times [-21,9 + 0] = -0,57 \text{ eV}$$

Dans le niveau le plus bas l'électron aura une demi-longueur d'onde égale à un millimètre, donc **deux mm de longueur d'onde**.

-c) En ce qui concerne le contrôle de la conduction électrique quelle est la différence essentielle entre un semiconducteur et un métal? Donnez l'explication physique de cette différence.

Solution :

Un métal conduit toujours l'électricité. Le métal n'ayant pas de gap énergétique, le moindre champ électrique va faire avancer les électrons, qui sont **présents en grands nombres**, et ainsi produire un courant. Le champ électrique accélère les électrons et ceux-ci montent les niveaux d'énergie disponibles en énormes quantités dans le métal.

Dans un semi-conducteur la présence d'un **gap énergétique** permet d'avoir beaucoup ou peu d'électrons dans la bande de conduction. En l'absence d'alimentation il y a seulement 10^{10} électrons/cm³ dans le silicium intrinsèque, ce qui fait qu'il conduit peu. En contraste, si on injecte beaucoup d'électrons dans la bande de conduction, soit par injection de courant comme dans une jonction PN, soit par illumination, eg dans une pile solaire, les **électrons en grands nombres** et la **très bonne mobilité des électrons** permettront à un grand courant de circuler.

-d) Soit un électron très lent (énergie presque zéro) qui s'approche d'un fil en or jusqu'au contact. Que lui arrivera-t-il du point de vue énergétique?

Solution :

L'électron très lent a l'énergie tout juste plus que niveau du vide qui est zéro dans les notes de cours. L'or métallique est un **puits de potentiel de 5,1 eV de profondeur**. L'électron va donc **«tomber» dans ce puits**. En quelques picosecondes il va descendre les niveaux d'énergie et atteindre le niveau de Fermi du métal or, à 5,1 eV sous le niveau du vide.

Question # 2 (25 points) Jonction PN

-a) Soit une jonction PN dans le silicium cristallin dont les concentrations de dopants sont $N_d = 4 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ et $N_a = 5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$. Quand cette jonction est court-circuitée dans l'obscurité calculez les écarts de Fermi dans les deux sections P et N.

Solution :

$$\text{On a } E_{Fn} - E_C = 0,026[\ln(4 \times 10^{17} / 3,2 \times 10^{19}) + 0,353(4 \times 10^{17} / 3,2 \times 10^{19})] \quad (1)$$

$$E_{Fn} - E_C = 0,026 \times [-4,382 + 0,0044] = -0,114 \text{ eV} \quad (2)$$

$$\text{On a } E_V - E_{Fp} = 0,026[\ln(5 \times 10^{16} / 1,8 \times 10^{19}) + 0,353(5 \times 10^{16} / 1,8 \times 10^{19})] \quad (3)$$

$$E_V - E_{Fp} = 0,026 \times [-5,886 + 0,001] = -0,153 \text{ eV} \quad (4)$$

-b) Pour la condition de -a) quelle est la valeur de la barrière de potentiel eV_{bi} ? Quelle est l'épaisseur de la zone déplétée du côté P ?

Solution :

De ci-haut en -a) on déduit: $eV_{bi} = 1,12 - 0,114 - 0,153 = 0.853 \text{ eV}$ (5)

-c) Dans le cas d'une jonction PN dans le GaAs en polarisation directe (forward bias) quels phénomènes optoélectroniques peut-on observer? Expliquez au niveau microscopique.

Solution : On peut observer les phénomènes suivants :

-1. Les électrons injectés en zone N vont aller se recombiner avec des trous qui sont injectés en zone P. La recombinaison électron-trou, produite dans le voisinage de l'interface PN, génère des photons. Dans une diode électroluminescente (DEL) les photons sont émis de façon incohérente dans toutes les directions.

-2. Quand le courant est assez fort dans la jonction PN on peut observer un effet laser dû à la recombinaison électron-trou. Dans un laser l'émission sera surtout dans une direction privilégiée

-d) Dans le silicium, quel phénomène limite la vitesse maximum de l'électron en présence de champ électrique très fort?

Solution [-1) ou -2) sont acceptables comme réponse]:

-1). Quand l'électron acquiert beaucoup de vitesse et d'énergie il va commencer à émettre des phonons, lesquels sont des vibrations du cristal silicium. Cette génération de phonons constitue une perte d'énergie des électrons sous forme de chaleur.

-2). Pour des électrons dits «chauds», ie accélérés à des énergies d'un électronvolt et plus, un électron peut générer le phénomène d'avalanche, ie il peut promouvoir un électron de la bande de valence à la bande de conduction. L'électron chaud perd ainsi de son énergie.

Question # 3 (25 points) Piles solaires

Supposez qu'on vous confie au Québec la mission d'installer une petite centrale à base de panneaux solaires photovoltaïques sur un terrain d'un kilomètre carré de superficie. Les panneaux sont à base de silicium et ont un rendement de 20%, ie pour chaque kilowattheure d'énergie solaire incidente ils produisent 0,2 kWh d'énergie électrique.

-a) Dans quelle région du Québec sera-t-il préférable de localiser la centrale solaire afin de maximiser le nombre de kilowattheures par année? Justifiez par des données.

Solution :

La région la plus favorable pour l'énergie solaire est portion de la province voisine de Montréal, en Estrie et dans les Laurentides. Dans cette région des panneaux PV produisant un kilowatt en plein soleil pourront générer entre 1200 et 1300 kilowattheures sur un an.

-b) Quel sera l'angle optimum des panneaux? Si un mécanisme permettait un ajustement de l'angle durant l'année, quel serait le meilleur angle en hiver?

Solution : L'angle optimum est celui de la latitude, ie 45 degrés pour la région avoisinante de Montréal. En hiver la meilleure orientation sera la verticale parce que le soleil est bas et parce que la position verticale élimine presque l'accumulation de neige.

-c) Calculez le nombre de kilowattheures par année auquel on peut s'attendre pour l'angle fixe optimum.

Solution :

-1). Pour un panneau fixe à 45 degrés. Le phénomène de l'ombrage entre panneaux exige un certain espacement. Pour une mini-centrale couvrant un kilomètre carré, on peut prendre 0,15 comme la fraction de ce km^2 qui représente la superficie photovoltaïque. En plein soleil on a 1 kW/m^2 d'énergie lumineuse incidente, donc sur 0,15 km^2 , ou 150 000 m^2 , on a :

$$\text{Puissance crête} = 1 \text{ kW/m}^2 \times 150\,000 \times 0,2 \times 0,5 = 15\,000 \text{ kW} = 15 \text{ MW}$$

où le facteur 0,2 est le rendement du panneau (20%)., et le facteur 0,5 tient compte du fait que le panneau fixe ne fait pas face au soleil toute la journée.

L'énergie électrique récoltée sur un an sera : 1200 heures \times 15 MW = 18 GWh

-2) Si un mécanisme maintient le panneau face au soleil toute la journée, on double la production à 36 GWh par an.

-d) Dans une pile solaire PV en opération, combien de sortes de courants peut-on distinguer à l'échelle microscopique? Expliquer la nature de ces courants.

Solution (les réponses 4 sortes et 6 sortes de courant sont acceptables) :

Si on s'en tient aux mécanismes on peut distinguer deux sortes de courants avec électrons comme porteurs de charge. Dans la zone N, en dehors de la zone déplétée, les électrons se déplacent par dérive vers la zone P, ie leur mouvement est causé par un champ électrique. À travers la zone déplétée le phénomène de diffusion explique la conduction. Comme une pile solaire est en polarisation directe (forward bias) un courant «anti-solaire» circule qui est dû aux nombreux électrons de la zone N diffusant de N vers P. Mais les photoélectrons produits en zone P par le soleil diffusent vers la zone déplétée et dérivent à travers celle-ci vers la zone N.

Conclusion : sur la base des mécanismes de conduction il y a deux sortes de courants, dérive et diffusion. Sur la base de l'origine des porteurs de charge et de leurs mouvements on peut dire qu'il y a trois sortes de courants d'électrons. Avec les trous on multiplie par deux : $2 \times 2 = 4$, $2 \times 3 = 6$.

Question # 4 (25 points) Travail de créativité.

- a) Décrivez et justifiez votre idée pour une nouvelle application de dispositifs électroniques ou optoélectroniques. Donnez l'ordre de grandeur pour les paramètres en jeu.
- b) En supposant un progrès considérable de l'électronique et de l'optoélectronique, peut-être d'ici 10 ans, quel impact pourrait avoir ce progrès sur votre application?