

GEL-3007 Physique composants électroniques, Examen 1 mars 2017

Question # 1 (20 points) Principes de base

- a) Quand on fait passer un gros courant dans un fil de cuivre on ne voit pas d'électrons «déborder» du fil. Quelle en est la raison? Justifier la raison par un calcul.
- b) Expliquer la notion de "puits quantique" en géométrie planaire et donner une conséquence de cette structure sur les niveaux d'énergie que l'électron peut occuper.
- c) Quels avantages présente le carbure de silicium pour l'électronique? Expliquer brièvement en le comparant au silicium.

Réponse :-a) Pour «déborder» l'électron a besoin par agitation thermique de sauter par-dessus une barrière de 5 eV. La formule de Fermi-Dirac (p. 12) donne la probabilité d'occupation du niveau $E = 0$ (électron lent dans le vide) comme étant : $f(E) = 1/[1 + \exp(E - E_F)/k_B T] = 1/[1 + \exp(0 + 5)/0.026] = \exp(-192) = 0$

-b) Un puits quantique peut résulter de mettre une couche mince d'AsGa (gap 1,424 eV), par exemple, en sandwich entre deux couches d'AlGaAs, où l'alliage est choisi pour donner un gap de 2,0 eV. Au plus bas niveau d'énergie la fonction d'onde aura une demi-longueur d'onde entre les parois du puits en AsGa, au prochain niveau plus haut ce sera une longueur d'onde, ainsi de suite en multiples de $\lambda/2$ (λ de l'électron).

-c) Le SiC a un gap de 2,86 eV ce qui lui permet de soutenir un champ électrique de 2300 kV/cm ce qui est excellent pour l'électronique de puissance. Le silicium a un gap de 1,12 eV et peut subir un claquage pour des champs électriques au-dessus de 300 kV/cm.

Question # 2 (30 points) Niveaux de Fermi et action laser.

Soit un laser semi-conducteur dont la région active est fabriquée de GaAs très pur, donc intrinsèque. Les sections adjacentes dopées n et p sont en $Al_xGa_{1-x}As$ et servent principalement à transporter le courant et à définir les frontières du puits d'énergie potentielle que constitue la zone active en GaAs. Les questions ci-dessous concernent seulement la zone active en GaAs.

-a) en l'absence de toute tension ou de pompage optique (ie dans l'obscurité), où se trouve le niveau de Fermi et quelle est la densité d'électrons dans la bande de conduction? Quelle est la probabilité d'occupation d'un niveau qui est dans le voisinage immédiat de E_C dans la bande conduction?

Réponse : Le niveau de Fermi est le même pour les électrons et les trous et se trouve au mid-gap, ie à mi-chemin entre E_V et E_C . Pour $E = E_C$ on aura :

$$f(E=E_C) = 1/[1 + \exp(0,712/0,026)] = 1/[1 + \exp(27,4)] = 1,3 \times 10^{-12}$$

-b) par injection de courant on crée une densité de paires d'électrons-trous de $5 \times 10^{18} /cm^3$ dans la région active. Calculer la position du niveau de Fermi pour les électrons et du niveau de Fermi pour les trous. Quelle est dans ce cas la probabilité d'occupation d'un niveau qui est dans le voisinage immédiat de E_C dans la bande conduction et de E_V dans la bande de valence?

Réponse : Joyce-Dixon nous donne :

$$E_{Fn} - E_C = 0,026 [\ln(5 \times 10^{18}/4,7 \times 10^{17}) + 0,353(5 \times 10^{18}/4,7 \times 10^{17})] = 0,026[2,36 + 0,353 \times 10,6] = 0,158 \text{ eV}$$
$$E_V - E_{Fp} = 0,026 [\ln(5 \times 10^{18}/7 \times 10^{18}) + 0,353(5 \times 10^{18}/7 \times 10^{18})] = 0,026[-0,336 + 0,353 \times 0,714] = -0,084 \text{ eV}$$

La probabilité d'occupation du niveau E_C est

$$f(E = E_C) = 1/[1 + \exp(-0,158/0,026)] = 1/[1 + 2,3 \times 10^{-3}] = 0,998 \quad (\text{plein d'électrons})$$

La probabilité d'occupation du niveau E_V est

$$f(E = E_V) = 1/[1 + \exp(-0,084/0,026)] = 1/[1 + 0,039] = 0,96 \quad (\text{plein de trous})$$

-c) on augmente le courant injecté jusqu'à ce que la densité d'électrons-trous atteigne $10^{19}/\text{cm}^3$. Calculer les positions des niveaux de Fermi pour les électrons et pour les trous. Quelle sera la plus courte longueur d'onde à laquelle l'effet laser pourra être obtenu?

Question # 3 (30 points): "Candle Power", électricité à partir de chandelles.

Durant une panne d'électricité on allume six chandelles et on les dispose à 52 cm (voir l'illustration) devant un panneau solaire photovoltaïque ayant les caractéristiques suivantes:

nombre de cellules individuelles en série électrique: 33;

dimensions de chaque cellule: 10 cm x 10 cm x 0.01 cm;

densité des dopants: $N_d = N_a = 2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$;

temps de vie des porteurs minoritaires: 10 microsecondes.

-a) Avec le panneau en court-circuit on mesure un courant de 4,5 mA. Calculer le nombre de photons absorbés par seconde dans chaque cellule individuelle.

Réponse : Le courant mesuré $4,5 \times 10^{-3}$ A signifie que $4,5 \times 10^{-3} / 1,6 \times 10^{-19} = 2,8 \times 10^{16}$ électrons par seconde font le tour du circuit, ou $2,8 \times 10^{14}$ électrons-trous générés par seconde par cm^2 .

-b) Calculer le voltage produit par le panneau mis en circuit ouvert. En utilisant le même "fill factor" que pour le panneau exposé au soleil, i.e. 0,65, calculer la puissance qui sera produite par le panneau à son point optimum d'opération.

Réponse : Avec un temps de vie de 10 microsecondes on déduit n_p comme suit :

$$n_p = 2,8 \times 10^{14} \times 10 \times 10^{-6} \times 0,01 \text{ cm}^3 = 2,8 \times 10^{11} \text{ électrons/cc}$$

Les écarts de Fermi du côté P sont :

$$E_C - E_{Fn} = 0,026 [\ln(3,22 \times 10^{19} / 2 \times 10^{16})] = 0,026 [2,36] = 0,192 \text{ eV}$$

$$E_{Fp} - E_V = 0,026 [\ln(1,83 \times 10^{19} / 2,8 \times 10^{11})] = 0,026 [2,36] = 0,468 \text{ eV}$$

$$\text{Donc } E_{Fn} - E_{Fp} = 1,12 - 0,192 - 0,486 = 0,46 \text{ eV}$$

$$\text{Le produit } 0,65 \times 33 \times 0,46 \times 4,5 \times 10^{-3} = 0,044 \text{ mW}$$

-c) Au point d'opération optimum combien de courants d'électrons différents peut-on identifier dans la photopile? Expliquer leur nature et leur origine, et donner leur ratio en supposant la même forme de courbe photo-courant versus photo-voltage qui est observée en plein soleil.

-d) Avec des photopiles au silicium, quelle serait la longueur d'onde d'un faisceau laser qu'on pourrait convertir en puissance électrique avec le maximum de rendement, celui-ci étant défini par le ratio (puissance électrique produite par la photopile)/(puissance du faisceau laser incident)? Expliquer. Calculer dans ce cas le rendement maximum pour une cellule photovoltaïque ayant les mêmes paramètres que ci-dessus.