GEL-10255 Corrigé de l'examen du 22 novembre 2001

Question # 1 (15 points) Principes de base

-a) Quelle serait l'énergie d'un électron dans le vide dont la longueur d'onde serait la même que celle d'un photon de 6.422 eV?

-b) Expliquer la notion de "puits quantique" en géométrie planaire et donner une conséquence de cette structure sur les propriétés physiques.

-c) Quels avantages présente le carbure de silicium pour l'électronique? Expliquer brièvement en le comparant au silicium.

-a) Le photon a hf = 6.422 eV = 6.422 x 1.6 x 10-19 J = 1.027 x 10-18 J.

On a (lphoton)microns = 1.24/6.422 = 0.193 micron = 193 nm.

On veut donc lélectron = 193 nm.

D'autre part, on a par la relation de de Broglie:

lélectron = h/p. On a donc p = 6.624 x 10-34/193 x 10-9 = 3.433 x 10-27 kg-m/s.

Avec p = mv, E = 1/2 mv2 = p2/2m, où m = 0.9109 x 10-30 kg, on trouve:

E = (3.433 x 10-27 kg-m/s)2/2 x 0.9109 x 10-30 kg = 6.469 x 10-24 J = 4.04 x 10-5 eV = 40.4 micro-électron-volts.

-b) On peut former un puits quantique d'énergie potentielle en "sandwichant" une mince couche d'un matériau comme le GaAs, par exemple, dont le gap est de 1.424 eV, entre deux couches de AlxGa1-xAs ayant un gap plus élevé, par exemple 2.0 eV. Les électrons deviennent confinés dans ce cas par une barrière de potentiel de l'ordre de 0.57 eV, ce qui a pour conséquence que leurs niveaux d'énergie deviennent quantisés. Le premier niveau quantique sera tel que la fonction d'onde sera une demi-longueur d'onde pour l'électron, le deuxième niveau sera tel que la fonction d'onde sera une longueur d'onde, et ainsi de suite. Comme la position des niveaux dépend de l'épaisseur du puits, on peut ajuster la longueur d'onde de lasers basés sur les puits quantiques en choisissant l'épaisseur de la couche de GaAs. De plus l'excellent confinement des électrons et des trous par le puits quantique facilite leur recombinaison radiative et rend l'action laser efficace.

-c) Le carbure de silicium SiC a un gap de 2.86 eV, ce qui est beaucoup plus élevé que celui du silicium qui est de 1.12 eV. Un premier avantage du SiC est que les dispositifs à base de SiC peuvent fonctionner à de plus hautes températures que le silicium parce que le nombres de porteurs intrinsèques est très faible, même à 600 K, par exemple. Un deuxième avantage est que le champ électrique seuil pour le claquage est 2300 kV/cm comparé à 300 kV/cm pour le silicium. Comme la tension de claquage est proportionnelle au carré de ce champ, le SiC pourra soutenir des tensions environ 50 fois plus élevées que le silicium

---

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. Les sections adjacentes dopées n et p sont en AlxG1-xAs 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, 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 EC dans la bande conduction?

-b) un pompage optique est appliqué afin de créer une densité de paires d'électrons-trous de 5 x 1017 /cm3 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 EC dans la bande conduction et de EV dans la bande de valence?

-c) pour la condition de b) quelle est la probabilité d'occupation d'un niveau qui est à 50 meV au dessus de EC? Quelle est la probabilité d'occupation d'un niveau qui est à 5 meV en-dessous de EV?

-d) on augmente l'intensité du pompage optique jusqu'à ce que la densité d'électrons-trous atteigne 1019/cm3. Calculer les positions des niveaux de Fermi pour les électrons et les trous, ainsi que la largeur de bande en électrons-volts et en THz sur laquelle on pourra observer l'action laser. Quelle sera l'impulsion la plus courte que ce laser pourrait thréoriquement produire?

Question # 2 -a) Une réponse simple (quoique légèrement approximative) est que EF = EFi se trouve au centre du gap, donc à 1.424/2 = 0.712 eV au-dessus de EV, ou en-dessous de EC. La densité de porteurs intrinsèques (Appendix A7 de Shur) est ni = pi = 2.1 x 106/cm3 à la température ambiente. À partir de cette donnée on peut utiliser la formule de Joyce-Dixon, approximée à son premier terme, pour trouver plus précisément les écarts de Fermi. On a:

n = 2.1 x 106/cm3 = 4.7 x 1017 x exp[- (EC - EFn)/0.026] d'où l'on tire:

EC - EFn = 0.679 eV.

De même pour les trous on a:

p = 2.1 x 106/cm3 = 7 x 1018 x exp[- (EFp - EV)/0.026] d'où l'on tire:

EFp - EV = 0.750 eV.

Comme les deux écarts s'additionnent pour donner 1.429 eV, on voit que EFn et EFp coïncident et sont assez près du point "mid-gap".

Question # 2 -b) On applique Joyce-Dixon en page 17 et on obtient:

EFn - EC = 0.026 x [ln(5 x 1017/4.7 x 1017) + 0.353(5 x 1017/4.7 x 1017)] 11 meV

EV - EFp -= 0.026 x [ln(5 x 1017/7 x 1018) + 0.353(5 x 1017/7 x 1018)] = -68 meV

Comme Efn est à 11 meV au-dessus de EC, la probabilité quun niveau E tout près de EC soit occupé est F(E = EC) = 1/[1 + exp(EC EFn)/kBT] = 1/[1 + exp(-11/26)] = 0.60, i.e. 60%.

Pour la bance de valence:

F(E = EV) = 1/[1 + exp(EV EFp)/kBT] = 1/[1 + exp(-68/26)] = 0.93, i.e. 93%.

-c) On a: F(E = EC+ 50 meV) = 1/[1 + exp(50 11)/kBT] = 1/[1 + exp(39/26)] = 0.18, i.e. 18%.

Près de EV on a: On a: F(E = EV - 5 meV) = 1/[1 + exp(-68 5)/26] = 0.94, i.e. 94%.

-d) On suit le déroulement de la page 17:

EFn - EC = 0.026 x [ln(1019/4.7 x 1017) + 0.353(1019/4.7 x 1017)] = 275 meV

EV - EFp = 0.026 x [ln(1019/7 x 1018) + 0.353(1019/7 x 1018)] = 22 meV

Par la condition de Bernard-Duraffourg on aura laction laser sur une bande de 0. 275 + 0.022 eV = 0.297 eV = 0.297 x 1.6 x 10-19/6.626 x 10-34 = 72 THz. Supposant une forme gaussienne avec Df = 72 THz on pourrait éventuellement avoir une impulsion lumineuse avec un Dt = 0.44/72THz = 6 x 10-15 = 6 femtosecondes.

Question # 3 (25 points) Les diodes.

-a) Expliquer le déroulement des évènements impliquant les électrons et les trous quand deux régions dopées n et p sont mises en contact pour former une jonction pn. Durant ce processus supposer qu'un fil électrique relie à l'extérieur les deux régions n et p, le tout ayant lieu dans l'obscurité.

-b) Quelle est l'origine de la barrière d'énergie potentielle qVbi et quel rôle joue-t-elle dans le fonctionnement d'une diode? (q = 1.6 x 10-19 Coulomb).

-c) Faire le design d'une diode qui aura un qVbi de 1.37 eV à la température ambiente. Spécifier le matériau et les niveaux de dopants à être utilisés.

Question # 3 -a) Dans ce cas les figures de la page 27 sont pertinentes. Les électrons diffusent vers le côté p, et les trous diffusent vers le côté n. Les deux sortes de porteurs de charge se recombinent et forment un no mans landoù leur absence met en évidence deux champs de minesque constituent les régions de donneurs ionisés (charges positives fixes) et daccepteurs ionisés (charges négatives fixes). Dans lobscurité il ny a aucun courant, de sorte que le niveau de Fermi EF est parfaitement horizontal (la dérivée de EF suivant x donne le courant; avec celui-ci nul, la dérivée est nulle).

3 -b) Les régions de charges fixes non-neutralisées donnent lieu à un champ électrique qui pousse les électrons vers la droite, les trous vers la gauche. Ce champ crée une barrière de potentiel telle que montrée dans la figure, de hauteur Vbi. La hauteur de la barrière en terme dénergie dun électron est qVbi, où q = 1.60 x 10-19 Coulomb.

La barrière qVbi est lorigine du comportement rectificateur de la diode. En polarisation directe (forward) la barrière est réduite et beaucoup plus délectrons vont diffuser à travers la jonction conduisant ainsi un courant (figure du haut p.29), tandis quen polarisation inverse (figure du bas p. 31) la barrière est augmentée et très peu délectrons peuvent diffuser et ainsi conduire un courant.

3 -c) Utilisant le graphique au bas de la page 27 on prend une diode de type n+-p de GaAs dopé à un niveau de 1018 accepteurs/cm3.

Question # 4 (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: Nd = Na = 2 x 1016/cm3;

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.

-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.

-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 photocourant vs. photovoltage qui est observée au 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.

#4 Candle power-a) Un courant mesuré de 4.5 mA signifie 4.5 x 10-3 Coulomb/seconde, ce qui veut donc dire que 4.5 x 10-3/1.60 x 10-19 = 2.81 x 1016 électrons quittent le côté n de la photopile, passent par le circuit externe, et vont se recombiner avec un nombre égal de trous produits du côté p de la photopile. Le nombre de photons absorbés dans chaque cellule 10cm x 10cm est égal au nombre de paires délectrons-trous et est donc 2.81 x 1016 . Avec les cellules en série cest le même courant de 4.5 mA qui traverse les 33 cellules.

-b) On suit la démarche de la page 33. Le nombre de photons absorbés par cm2 est 2.81 x 1014 par seconde. Comme ils ne vivent que 10 microsecondes la densité des porteurs minoritaires (électrons en région p, trous en région n) est:

pn = np = (2.81 x 1014 x 10 x 10-6)/(0.01 cm3) = 2.81 x 1011 /cm3.

Du côté n on a: EC - EFn = 0.026 x ln(3.22 x 1019/2 x 1016) = 0.192 eV

EFn -EV = 0.026 x ln(1.83 x 1019/2.81 x 1011) 0.468 eV

La tension maximum que la photopile pourra produire en circuit ouvert est donc:

EFn -EFp = 1.12 0.192 0.468 = 0.46 eV.

Avec 33 piles en série la tension maximum du panneau sera 33 x 0.46 = 15 volts.

-b) Le fill factorà la page 32 est 0.65. Cest le ratio de la superficie à lintérieur du pointillé divisé par la superficie Imax x Emax. Il représente le compromis quil faut faire pour tirer la puissance maximum de la photopile. On a donc:

Puissance = 0.65 x 4.5 x 10-3 x 15 = 68 mWatts.

-c) Il y a un courant de dérive de photo-électrons qui descendent la pente de ski vers la droite (fig. de la page 33) qui vaut (2.4/2.8) x 4.5 mA 3.8 mA, et un autre courant délectrons qui diffusent vers la gauche en surmontant la pente de ski, ce dernier ayant pour valeur 4.5 3.8 = 0.7 mA. Le ratio des deux est donc 3.8/0.7 = 5.4.

La même déclaration sapplique pour les trous sauf que le sens est inversé.

-d) Ce serait un laser dont la longueur donde est tout juste suffisante pour produire une paire délectrons-trous avec un excédent dénergie très faible (juste assez pour avoir de labsorption optique) au-dessus du gap, i.e $hf = 1.12 + 0.1 = 1.22$ eV. Dans ce cas les deux premières causes de perte de rendement énoncées à la page 32 des notes ne sappliquent pas et la seule perte de rendement est le fill factorégal à 0.65. Le rendement maximum avec un tel laser sapprocherait donc de 65%.