GEL-3007 Physique des composants électroniques Examen du 27 février 2014

Solutionnaire Michel Duguay

Question # 1 (25 points). Silice (SiO_2) et silicium.

-a) La silice a un gap énergétique de 7,2 eV. En supposant une couche de silice de seulement 20 nm d'épaisseur entre deux couches de silicium dopés, comment un électron peut-il franchir cette barrière de potentiel ?

Réponse : Un électron peut franchir cette barrière par **effet tunnel**.

-b) Comment pourrait-on créer des électrons dans la bande de conduction de la silice ?

Réponse : On pourrait illuminer la silice avec de **l'ultraviolet de longueur d'onde 172 nm** ou plus court (donc hf = 7,2 eV ou davantage) pour y créer des paires d'électron-trous, les électrons étant dans la bande de conduction de la silice.

-c) Admettons que dans une couche épaisse de silice on a introduit dans sa bande de conduction des électrons. Vont-ils bien conduire l'électricité si on applique une tension à travers cette couche ? Expliquer.

Réponse : Non, il n'y aura pratiquement pas de conduction électrique. La silice est **pleine de pièges** dans laquelle les électrons iront se loger et y demeurer même si on applique un champ électrique.

-d) Quel est le champ électrique maximum que peut soutenir la silice sans claquer (breakdown field strength) ? Même question pour le silicium intrinsèque (très pur). Dans ce dernier cas que se passe-t-il si des électrons se trouvent dans un champ électrique très élevé, comme dans une photodiode PIN, mais sous le seuil du claquage destructif ?

Réponse : Pour la silice le champ de claquage est **10 millions de volts par centimètre**. Pour le silicium intrinsèque ce champ est de 300 kV/cm.

-e) Quel est le mécanisme de conductivité pour un petit bloc de silicium intrinsèque soumis à une faible tension ?

Réponse : C'est le mécanisme **de courant de dérive**. Le champ électrique exerce une force sur les électrons en agitation thermique qui les font dériver dans le sens opposé du champ électrique.

Question #2 (25 points) . Niveaux de Fermi.

-a) En exposant une couche de GaAs intrinsèque à un flux lumineux on crée 4,7 x 10^{17} électrons/cm^3 dans la bande de conduction. Calculer la position de E_{Fn} par rapport à E_C.

Réponse : La formule de Joyce-Dixon donne :

E_{Fn} - E_C = 0,026 [ln(4,7 x 10^{17}/ 4,7 x 10^{17} + 0,353 x ratio)]= 9 meV

-b) Calculer la position de E_{Fp} par rapport à E_V.

E_V - E_{Fp} = 0,026 [ln(4,7 x 10^{17}/ 7 x 10^{18} + 0,353 x ratio)]= 9 meV

= 0,026 x [-2,7 + 0,024] = -70 meV

-c) Est-ce que la condition de Bernard-Duraffourg pour l'effet laser est satisfaite ? En général, quelle est l'autre condition qui doit être respectée pour que l'effet laser soit possible dans un semiconducteur ?

Réponse : on a E_{Fn} - E_{CFp} =1,424 + 0,009 – 0,070 = 1,363 eV

Cette séparation inférieure au gap signifie que l'effet laser n'aura pas lieu, la condition de Bernard-Duraffourg n'étant pas satisfaite.

L'autre condition est d'avoir un gap direct, ce qui est le cas pour le GaAs.

Question #3 (25 points). Diode Schottky.

Soit une diode Schottky fabriquée en déposant une couche d'or métallique sur du silicium dopé pour donner n = 10^{16} électrons par cm^3. Le travail de sortie Φ_m de l'or est 5,1 eV. L'affinité électronique du silicium est X_S = 4,01 eV.

-a) Dans le cas où aucune tension n'est appliquée à la diode Schottky, justifier le niveau de Fermi horizontal traversant la diode;

Réponse : Aucune tension n'étant appliquée, aucun courant ne circule et la dérivée du niveau de Fermi par rapport à x est zéro. On a donc l'horizontale pour le niveau de Fermi à travers la diode.

-b) Calculer la position du niveau de Fermi E_{Fn} par rapport à E_C.

Réponse : E_{Fn} - E_C = 0,026 [ln(10^{16}/3,2 x 10^{19}) + 0,353 x ratio)]= -0,21 eV

Donc **E_{Fn} est sous E_C = par 0,21 eV**.

-c) Calculer la hauteur de la barrière de potentiel Schottky $q\phi_b$, (q = e = 1,6 x 10^{-19} Coulomb) telle que vue du point de vue du métal ;

Réponse : on a $q\phi_b$ = Φ_m - X_S = 5,1 – 4,01 = 1,09 eV

-d) Calculer la hauteur de la barrière de potentiel qV_{bi}, telle que vue du point de vue du silicium, en l'absence de tension appliquée à la diode ;

Réponse : on a $qV_{bi} = \Phi_m - \Phi_S = 5{,}1 - (\chi_S + 0{,}21) = 5{,}1 - 4{,}01 = 0{,}88$ eV

-e) Expliquer au niveau microscopique des courants pourquoi une tension négative appliquée au silicium induit un fort courant, tandis qu'une tension positive appliquée au silicium ne laisse passer qu'un très faible courant.

Réponse : une tension négative appliquée au silicium dopé n réduit la barrière de potentiel qV_{bi} vue par les électrons dans la bande de conduction du silicium, de sorte qu'un grand nombre d'entre eux peuvent diffuser vers le métal.

Au contraire, une tension V positive appliquée au silicium augmente la barrière de potentiel à $qV_{bi} + V$ de sorte que très peu d'électrons du silicium peuvent franchir la barrière en direction du métal. Cependant des électrons du métal peuvent franchir la barrière de 1,09 eV vue de ce côté, ce qui constitue le courant de polarisation inverse.

Question #4 (25 points). Piles solaires photovoltaïques.

Une approche que certains groupes favorisent pour l'électricité solaire photovoltaïque est d'utiliser un miroir parabolique asservi au mouvement du soleil pour concentrer le flux lumineux sur une pile PV de petites dimensions. Supposons qu'un tel concentrateur livre à une petite pile d'un centimètre carré une puissance lumineuse de 20 watts. En faisant les mêmes hypothèses que dans les notes de cours, sauf pour l'intensité lumineuse :

-a) Calculer le nombre de photons créant des paires d'électron-trous;

Réponse : On suppose un flux de 0,47 x 20 watts à $\lambda = 0{,}8$ micron, hf = 1,55 eV.

Le nombre de photons est $(0{,}47 \times 20)/(1{,}55 \times 1{,}6 \times 10^{-19}) = 3{,}79 \times 10^{19}$ /seconde/cm^2

-b) Calculer les écarts de Fermi avec la formule de Joyce-Dixon;

Réponse :

On conserve seulement les électron-trous des 20 dernières microsecondes et on divise par le volume 0,01 cm^3, ce qui donne $n_{photo} = p_{photo} = 0{,}76 \times 10^{17}$ /cm^3 . Du côté dopé N, ajouté au dopage de 5×10^{17} cela donne $n = 5{,}76 \times 10^{17}$ /cm^3 . En calculant du côté N on a avec Joyce-Dixon :

$$E_{Fn} - E_C = 0{,}026\,[\ln(5{,}76 \times 10^{17}/3{,}2 \times 10^{19}) + 0{,}353 \times \text{ratio}\,)]$$

$$E_{Fn} - E_C = 0{,}026\,[\ln(0{,}018) + 0{,}353 \times 0{,}018] = 0{,}026(-4{,}017 + 0{,}006) = -0{,}104 \text{ eV}$$

Pour les trous du côté N on a $p = p_{photo} = 0{,}76 \times 10^{17}$ /cm^3 , de sorte que Joyce-Dixon donne :

$E_V - E_{Fp} = 0{,}026\,[\ln(0{,}76 \times 10^{17}/1{,}83 \times 10^{19}) + 0{,}353 \times 0{,}004]$

$E_V - E_{Fp} = 0{,}026\,[-5.484 + 0{,}001] = -0{,}142$ eV

La séparation des niveaux de Fermi est donc : 1,12 – 0,104 – 0,142 = 0,874 eV

La tension PV est donc 0,874 volt en circuit ouvert.

-d) Calculer le courant produit par cette photopile en court-circuit;

Réponse : en une seconde $3{,}79 \times 10^{19}$ photons absorbés produisent autant d'électrons qui font le tour du circuit pour se recombiner avec le même nombre de trous. Le courant est donc $3{,}79 \times 10^{19}$ p x $1{,}6 \times 10^{-19}$ A = 6,06 ampères.

-e) Calculer la puissance électrique au point optimum d'opération; utiliser le *fill factor* de 0,65.

Réponse : La puissance optimum est 0,874 x 6,06 x 0,65 = 3,44 watts

-f) Au point d'opération optimum expliquer la nature microscopique des courants qui entrent en jeu.

Il y quatre sortes de courant, deux d'électrons et deux de trous. Un photocourant d'électrons «solaires» provient des électrons qui créés par le soleil dérivent vers la droite (voir notes de cours) à cause de la barrière de potentiel. Un anticourant est produit par les électrons du côté qui diffusent vers la gauche parce que la diode est en forward bias (polarisation directe). Heureusement le photocourant domine largement au point optimum.

Les mêmes remarques s'appliquent aux trous.