

**GEL-3007 Physique des composants électroniques, examen du 24 avril 2013 Salle PLT-2765, Questions et solutions. Michel Duguay**

**Question 1 (25 points)**

Un transistor bipolaire en silicium de type npn est dopé comme suit:  $N_{de} = 1.4 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ;  $N_{ab} = 1.3 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ . Prendre la dimension épaisseur de l'émetteur  $X_e$  comme étant 0.65 micron, la dimension épaisseur  $W$  de la base comme étant 0.3 micron, et l'épaisseur du collecteur comme étant 80 microns. Le collecteur est polarisé à + 5 volts relativement à l'émetteur qui est à la masse.

-a) Calculer le gain de courant ;

**Solution :**

$$\beta = (D_n N_{de} X_e) / (D_p N_{ab} W) = (37.5 \times 1.4 \times 10^{19} \times 0.65) / (13 \times 1.3 \times 10^{17} \times 0.3) = 673 \quad (1)$$

-b) Expliquer pourquoi les ratios  $N_{de}/N_{ab}$  et  $D_n/D_p$  apparaissent dans la formule pour le gain de courant.

**Solution.** Le ratio  $N_{de}/N_{ab}$  contribue au gain de façon dominante parce que cette asymétrie du dopage est tel que l'abaissement de la barrière de potentiel en polarisation directe (forward bias) permettra aux électrons beaucoup plus nombreux de diffuser de l'émetteur vers la base qu'à des trous moins nombreux de diffuser de la base vers l'émetteur. Le ratio  $D_n/D_p$  des coefficients de diffusion va dans la même direction : les électrons plus mobiles que les trous diffusent plus rapidement et donc forment un courant de diffusion plus fort que celui des trous.

-c) On applique une tension  $V_{be} = + 0,6$  volt en polarisation directe (forward bias). Calculer pour cette tension la densité de trous injectés dans l'émetteur près de l'interface avec la base. Quel mécanisme physique assure le courant de trous dans l'émetteur, et quelle dimension physique peut augmenter ou diminuer ce courant ?

**Solution.** En l'absence de polarisation directe la densité de trous dans l'émetteur est

$$p = n_i^2 / N_{de} = (10^{10})^2 / 1.4 \times 10^{19} = 7 / \text{cm}^3 \quad (2)$$

L'application d'une polarisation directe de 0,6 volt multiplie cette densité par le très grand facteur  $\exp(0,6/0,026) = 1,05 \times 10^{10}$  (3)

On a donc alors  $7,3 \times 10^{10}$  trous par  $\text{cm}^3$  à la frontière base/émetteur.

Le mécanisme physique en jeu est le courant de diffusion. Plus l'épaisseur  $X_e$  de l'émetteur sera faible, plus le gradient de population de trous sera grand et plus le courant de diffusion des trous sera grand. Cette épaisseur  $X_e$  de l'émetteur peut donc contribuer à contrôler la valeur du courant de diffusion.

-d) Afin d'utiliser ce transistor en mode de phototransistor on débranche la base qu'on laisse flottante et on dirige la lumière à mesurer dans la couche du collecteur qui a 80 microns d'épaisseur. Supposons que cette lumière crée dans le collecteur un courant de trous de deux microampères. Où iront ces trous et quelle sera leur destination finale dans le transistor ? Quel sera la valeur du courant d'électrons injectés dans la base et recueillis au collecteur ?

**Solution.** Le champ électrique dans le collecteur dirige les trous vers la base, ce qui fait baisser la barrière de potentiel entre la base et l'émetteur. Ceci cause la diffusion d'électrons de l'émetteur vers la base. Comme ce courant de deux microampères de photo-trous injecté dans la base est tout comme un courant de trous injecté dans la base par un circuit extérieur, le gain de 673 calculé plus haut s'applique, de sorte que le courant d'électrons atteignant le collecteur sera

$$2 \times 10^{-6} \times 673 = 1,346 \text{ mA.} \quad (4)$$

Soit un MESFET en GaAs construit sur un substrat de type N ayant les caractéristiques suivantes: barrière de Schottky, 0,8 V; mobilité des électrons,  $8000 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ ; largeur du canal (channel width) 200 microns; longueur du canal (channel length L) 0,7 micron; profondeur du canal (channel depth), 0,3 micron; dopage du canal  $N_d = 1,4 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ ; prendre 12.9 pour la valeur de la constante diélectrique  $\epsilon_r$  (relative à celle du vide qui est  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ) du GaAs.

Est-ce qu'une tension de - 4 volts appliquée à la grille pourra couper la conduction du MESFET (autrement dit le mettre à "off")?

**Solution.**

On calcule d'abord l'écart de Fermi :

$$e\phi_F^M = k_B T \times \ln(N_C/N_d) = 0.026 \ln(4.7 \times 10^{17}/1.4 \times 10^{17}) = 31 \text{ meV} \quad (1)$$

$$\text{On a donc : } eV_{bi} = e(\phi_b - \phi_F^M) = 0.8 - 0.031 = 0.769 \text{ eV} \quad (2)$$

La zone de déplétion sous la grille a l'épaisseur :

$$d(x) = [2\epsilon(V_{bi} - V_G)/qN_d]^{1/2} \quad (3)$$

$$\text{Avec } V_G = 0 \text{ on a : } d(x) = [2 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.769 / (1.6 \times 10^{-19} \times 1.2 \times 10^{23})]^{1/2}$$

$$d(x) = 95 \times 10^{-9} \text{ m} = 95 \text{ nm} \quad (4)$$

$$\text{Avec } V_G = -4 \text{ volts on a : } d(x) = [2 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 4.769 / (1.6 \times 10^{-19} \times 1.4 \times 10^{23})]^{1/2}$$

$$d(x) = 220 \times 10^{-9} \text{ m} = 220 \text{ nm} \quad (5)$$

Le canal profond de 300 nm ne sera donc pas complètement déplété. On peut aussi voir ça en calculant  $V_p$ , la barrière de potentiel quand le canal est complètement déplété.

On a :

$$V_p = eN_d h^2 / 2\epsilon_r \epsilon_0 = [1.6 \times 10^{-19} \times 1.4 \times 10^{23} \times (0.3 \times 10^{-6})^2] / (2 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12}) = 8.83 \text{ volts} \quad (6)$$

Une tension de grille  $V_G = -4$  volts ne sera donc pas suffisante pour couper la conduction dans le MESFET.

**Pour une tension de grille de  $-2.5$  volts, qu'arrive-t-il au courant de drain quand on augmente la tension de drain jusqu'à 6 volts?**

$$\text{Solution : On a : } V_p = V_{bi} + (-V_G) + V_{Dsat} \quad (7)$$

$$\text{Donc } V_{Dsat} = 8.83 - 2.5 - 0.769 = 5.56 \text{ volts} \quad (8)$$

À une tension de drain de 6 Volts le MESFET sera donc saturé, le courant ayant déjà atteint un plateau pour  $V_D = 5.56$  volts.

Calculer le courant de drain pour les conditions de -b);

Solution : On a :  $I_{Dsat} = g_0[V_p/3 - V_{bi} + V_G + 2(V_{bi} - V_G)^{3/2}/3V_p^{1/2}]$  (9)

On calcule d'abord  $g_0$ :

$$g_0 = q\mu_n N_d Z h / L = 1.6 \times 10^{-19} \times 0.8 \times 1.4 \times 10^{23} \times 200 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 10^{-6} / 0.7 \times 10^{-6} = 1.536 \text{ Siemens}$$

$$I_{Dsat} = 1.536[8.83/3 - 0.769 - 2.5 + 0.6666 \times (0.769 + 2.5)^{3/2}/8.83^{1/2}]$$
 (10)

$$I_{Dsat} = 1.538 \text{ A}$$

Donner et expliquer quels sont deux avantages de réduire la longueur de grille (gate length) du point de vue des performances électroniques.

Solution.

-1) Un premier avantage est que la transconductance est importante quand la longueur de grille  $L$  est petite. Cela signifie qu'un petit changement de tension de grille donnera un grand changement de courant au drain.

-2) Une petite longueur de grille  $L$  réduira le temps de transit des électrons, et augmentera donc la fréquence maximum d'utilisation du MESFET.

~~QUESTION 10 (20 points). La mémoire Flash.~~

Expliquer le principe de fonctionnement d'un élément (ou pixel) de mémoire flash;

Solution.

Le pixel de la mémoire Flash est un minuscule transistor MOSFET auquel on a ajouté une grille flottante complètement entourée de silice et localisée sous la grille métallique. Si on injecte des électrons dans la grille flottante, on va changer le seuil du MOSFET. En effet les électrons injectés dans la grille flottante vont opposer l'effet de charges positives qu'on amène sur la grille pour mettre le MOSFET en conduction. Il faudra donc mettre davantage de charges positives sur la grille afin de produire un champ électrique qui pourra inverser le canal. Le seuil du MOSFET sera donc déplacé vers une tension de grille plus élevée. Le circuit de mémoire pourra interpréter le seuil augmenté comme un bit «1», le seuil sans électrons de grille flottante étant le bit «0».

-b) Expliquer deux phénomènes physiques qui servent à charger ou à décharger les électrons en lien avec la grille flottante;

-c) Les plus petites dimensions maintenant possibles en laboratoire avec la lithographie à faisceau d'électrons est environ 25 nm. En supposant un «pixel» de mémoire flash a les dimensions 25 nm x 25 nm, avec une épaisseur de silice (prendre  $\epsilon_r = 3,9$ ) de 20 nm, calculer combien d'électrons il faudrait injecter dans la grille flottante pour déplacer seuil de 2 volts.

**Question #4 (25 points). Créativité.**

-a) Décrire brièvement la nouvelle application proposée et sa justification;

-b) Donner quelques résultats de calculs qui montrent que l'application est techniquement réalisable;

-c) Quelle nouvelle percée technologique rendrait cette application encore plus intéressante?