

Question # 1 (25 points). Transistor bipolaire (BJT).

-a) Soit un transistor bipolaire de type npn dont le gain en courant est β . Expliquez ce qui arrive au niveau microscopique dans le transistor quand une impulsion échelon de trous est injectée dans la base. Qu'arrive-t-il à la barrière de potentiel entre l'émetteur et le collecteur ? Quelle est la nature des courants qui entrent en jeu ? Expliquer l'origine du gain en courant.

-b) Quelle est l'utilité d'une hétérojonction dans le transistor bipolaire, par exemple dans le système AlGaAs/GaAs ? Expliquer ce qui arrive au gain en courant.

-c) Dans des transistors bipolaires fondés sur des alliages cristallins $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ on peut ajuster le gap durant la croissance qui se fait couche atomique par couche atomique, chaque couche atomique ayant sa propre valeur de x . Dans le but d'atteindre de plus hautes fréquences d'opération dans le BJT au silicium-germanium, que fait-on au gap de la base ? Pourquoi cela permet-il de plus hautes fréquences d'opération ?

-d) On peut transformer un transistor de gain β en phototransistor en déconnectant le fil électrique reliant la base (base ouverte, open base) et en dirigeant la lumière à détecter sur la jonction collecteur-base. Quelle est la gamme de longueurs d'onde où un phototransistor au silicium peut être utilisé ?

-e) Le transistor BJT npn fournit non seulement un gain en courant mais aussi un gain en puissance considérable puisque les électrons dévalent une pente de potentiel allant jusque dans les kilovolts. Quel phénomène physique vient limiter la tension ultime qu'on puisse appliquer au collecteur d'un transistor ? Expliquer brièvement. Est-ce que ce phénomène a une autre utilité en électronique ou en opto-électronique ?

Question # 2 (25 points). Le MESFET.

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, $8000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; largeur du canal (channel width) 150 microns; longueur du canal sous la grille (channel length or gate length) $L = 1,1 \text{ micron}$; profondeur du canal (channel depth) $h = 0,3 \text{ micron}$; dopage du canal $N_d = 0.9 \times 10^{17} / \text{cm}^3$; prendre 12,9 pour la valeur de la constante diélectrique du GaAs.

–a) Est-ce qu'une tension de -- 3 volts appliquée à la grille pourra couper la conduction du MESFET (autrement dit le mettre à "off") ?

–b) Pour une tension de grille de - 2 volts, à quelle tension de drain $V_{D\text{sat}}$, le courant commencera-t-il à saturer ?

–c) Calculer la valeur du courant de saturation $I_{D\text{sat}}$.

–d) Donner une raison pour laquelle on cherche toujours à diminuer la longueur L du canal sous la grille.

Réponses:

-a) (10 points): $e\phi_F^M = E_C - E_F = 0.026 \ln(4.7 \times 10^{17}/0.8 \times 10^{17}) = 0.046 \text{ eV}$

$V_{bi} = \phi_b - \phi_F^M = 0.8 - 0.046 = 0.754 \text{ eV}$

$V_p = eN_d h^2 / 2\epsilon_r \epsilon_0 = 1,6 \times 10^{-19} \times 0,9 \times 10^{23} \times (0,3 \times 10^{-6})^2 / 2 \times 12,9 \times 8.85 \times 10^{-12} = 5,676$ volts
 Pour $V_D = 0$, la tension qui déplètera le canal complètement et donc coupera le MESFET (turn-off) sera :

$$V_T = V_{bi} - V_p = 0.754 - 5.676 = -4.922 \text{ volts}$$

Une tension $V_G = -3$ volts ne sera donc pas suffisante pour couper le MESFET.

On peut réécrire cette équation comme suit:

$$5.676 \text{ volts} = V_p = V_{bi} + (-V_T) = 0.754 \text{ volts} + 4.922 \text{ volts}$$

En mots: déplétion complète = déplétion "donnée" par le dopage + déplétion causée par la tension (négative) de la grille. Dans cette diode de Schottky sur substrat dopé n, le métal joue le rôle de la zone p dans une jonction pn.

-b) (10 points) : Quand la tension de drain V_D atteint la saturation V_{Dsat} on a un canal complètement déplété qui est caractérisé par une barrière de potentiel V_p qui comprend trois contributions:

$$V_p = V_{bi} + (-V_G) + V_{Dsat} \quad (\text{trois nombres positifs dans le présent exemple})$$

d'où l'on tire:

$$V_{Dsat} = 5.676 - 0.754 - 2.0 = 2.922 \text{ volts}$$

Le courant dans ce cas est donné par :

$$I_{Dsat} = g_0 \times [V_p/3 - V_{bi} + V_G + 2(V_{bi} - V_G)^{3/2} / 3V_p^{1/2}]$$

$$g_0 = e\mu_n N_d Z h / L = 1.6 \times 10^{-19} \times 0.8 \times 0.9 \times 10^{23} \times 150 \times 10^{-6} \times 0.3 / 1.1 = 0.471 \text{ Siemens}$$

$$I_{Dsat} = 0.471 \times [1.892 - 0.754 - 2.0 + 1.280] = 197 \text{ mA}$$

-c) (5 points) : les trois raisons suivantes sont valables :

- 1- une longueur L plus petite conduit à un temps de transit plus court pour les électrons, donc à une meilleure performance aux hautes fréquences.
- 2- Une longueur L plus courte donne une meilleure transconductance, donc plus de courant pour une impulsion de tension donnée.
- 3- Un L plus petit permet d'augmenter la densité des dispositifs.

Question # 3 (25 points). Le MOSFET.

-a) On construit un MOSFET sur un substrat en silicium dopé de type p à $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$. La grille en or est isolée du silicium par une couche de silice (oxide de silicium SiO_2) de 40 nm d'épaisseur. Les dimensions latérales de la grille sont 2 et 0.8 micron. Calculer la tension de seuil V_T qui amènera un régime d'inversion dans le canal de conduction.

–b) Dans le but de réaliser une cellule de mémoire Flash on introduit au milieu de la couche de silice une mince couche de poly-silicium constituant une grille flottante dans laquelle on injecte au temps voulu 50 000 électrons pour constituer un bit de mémoire. Calculer l'effet sur la tension de seuil du MOSFET de la présence de ces 50 000 électrons. Donner la valeur et le signe du changement ΔV_T . Quel phénomène pourra être utilisé pour décharger la grille flottante afin de changer le bit d'information?

-a) Calculons la tension de seuil V_T du MOSFET.

Réponse (14 points): On a $V_T = V_{fb} + V_S + V_{ox}$

(18)

À partir des courbes données à la page 62 des notes on trouve $V_{fb} = -0.1$ volt. D'autre part on a:

$$\phi_F = k_B T \ln(N_A/n_i) = 0.026 \times \ln(5 \times 10^{16}/10^{10}) = 0.401 \text{ volts}$$

$$\text{et } V_S = 2 \phi_F = 0.802 \text{ volt}$$

Finalement, V_{ox} est donné par:

$$V_{ox} = Q_s/C_{ox}$$

$$\text{avec } Q_s = (4 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{22} \times 0.401)^{1/2}$$

$$Q_s = 1.15 \times 10^{-3} \text{ Coulombs/m}^2$$

$$\text{et } C_{ox} = \epsilon_{ox}/d_{ox} = 3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}/40 \times 10^{-9} = 0.863 \times 10^{-3} \text{ Farad/m}^2$$

$$\text{donnant: } V_{ox} = 1.33 \text{ volts}$$

$$\text{L'équation (18) donne donc: } V_T = -0.1 + 0.802 + 1.33 = \mathbf{2.03 \text{ volts}}$$

-b) Mémoire Flash, réponse (11 points) :

La formule à la page 67 donne :

$$V_T = K - Q/C_{ox}$$

où K est une constante qui dépend des paramètres du MOSFET. L'introduction de 50 000 électrons correspond à une charge $Q = -50\,000 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb} = 8.0 \times 10^{-15} \text{ C}$.

$$\text{La capacité } C_{ox} = \epsilon A/d = 3.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^{-6} \times 0.8 \times 10^{-6} = 1.38 \times 10^{-15} \text{ Fd}$$

$$\text{Le changement } \Delta V_T \text{ est donc : } \Delta V_T = + 8.0 \text{ fC}/1.38 \text{ fF} = \mathbf{+ 5.8 \text{ volts}}$$

Le signe plus s'explique par le fait que 50 000 trous positifs supplémentaires doivent être amenés sur la grille de contrôle afin de neutraliser le champ électrique produit dans le silicium par la grille flottante qui supporte 50 000 électrons et donc mettre le MOSFET en conduction.

Question # 4 (25 points). Travail de créativité.

-a) Décrivez l'aspect innovateur de votre miniprojet.

-b) Au cours des quelques années à venir, quel aspect du progrès continu en opto-électronique/photonique pourrait, soit rendre obsolète votre idée de projet, soit au contraire augmenter son envergure ou faciliter sa mise en marché? Expliquer et justifier.

-c) Décrire un point faible de votre miniprojet en terme de sa réalisation technique ou de la possibilité de sa mise en marché. Comment pourrait-on y remédier?

-d) Sans donner aucun nom, décrire une activité d'équipe dans votre miniprojet qui a bien fonctionné. Dans des miniprojets de futures générations d'étudiant-e-s comment ce genre d'activité pourrait-il être facilité?