

N.B.: Notation utilisée dans les notes de cours: $e = q = 1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb.

Question # 1 (25 points). Transistor bipolaire.

Un transistor bipolaire en silicium de type npn est dopé comme suit: $N_{de} = 3 \times 10^{19} / \text{cm}^3$; $N_{ab} = 2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ et $N_{dc} = 2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$. Prendre la dimension épaisseur X_e de l'émetteur comme étant 0.8 micron, la dimension épaisseur W de la base comme étant 0.6 micron, et l'épaisseur du collecteur comme étant 100 microns. Le collecteur est polarisé à + 5 volts relativement à l'émetteur qui est à la masse.

-a) Calculer le gain de courant β ;

Réponse : Le gain en courant est donné par:

$$\beta = (D_n N_{de} X_e) / (D_p N_{ab} W) = (37.5 \times 3 \times 10^{19} \times 0.8) / (13 \times 2 \times 10^{17} \times 0.6) = \mathbf{577} \quad (1)$$

-b) Calculer la densité d'électrons n_{b0} dans la base en l'absence de tension V_{be} appliquée entre l'émetteur et la base;

Réponse : On a: $n_{b0} = n_i^2 / N_{ab} = 10^{20} / 2 \times 10^{17} = \mathbf{500 / cm^3}$ (2)

-c) On applique une tension $V_{be} = + 0.6$ volt en polarisation directe (forward bias). Calculer pour cette tension la densité d'électrons injectés dans la base près de l'interface avec l'émetteur et la densité de courant de diffusion des électrons (en Ampères/m²);

Réponse : Avec l'application de V_{be} la densité d'électrons à l'interface émetteur/base est multipliée par le facteur $\exp(V_{be}/k_B T) = \exp(0.6/0.026) = 1.05 \times 10^{10}$, ce qui donne 5.26×10^{12} électrons/cm³ = 5.26×10^{18} électrons/m³ (3)

La densité du courant de diffusion sera donc:

$$I_e / S = q D_n \times 5.26 \times 10^{18} \text{ électrons/m}^3 / W \quad (4)$$

$$I_e / S = 1.6 \times 10^{-19} \times 37.5 \times 10^{-4} \times 5.26 \times 10^{18} \text{ électrons/m}^3 / 0.6 \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$I_e / S = \mathbf{5.26 \times 10^3 \text{ A/m}^2} \quad (6)$$

-d) Décrire les deux cheminements possibles de trous qui sont injectés dans la base à partir du circuit extérieur.

Réponse : Le cheminement le plus important est celui où des trous injectés dans la base diffusent à travers la jonction émetteur/base et vont **se recombiner avec des électrons dans l'émetteur**. Un autre cheminement possible est celui où des trous **se recombinent avec des électrons dans la base** lors du passage de ceux-ci en chemin vers le collecteur.

–e) Par des techniques spécialisées un semiconducteur tel que le phosphore d'indium peut être joint au niveau des plans atomiques (wafer bonding) à un substrat en silicium afin de réaliser une hétérojonction InP-Si. Quel serait l'avantage d'une telle hétérojonction dans la construction d'un transistor bipolaire?

Réponse : Avec une hétérojonction on peut avoir une barrière de potentiel entre l'émetteur et la base qui est plus grande pour les trous que pour les électrons. **Cela réduit le courant d'injection de trous par le facteur $\exp(\Delta E_g/k_B T)$** , où ΔE_g est la différence des gaps énergétiques entre les deux semiconducteurs. **Le facteur de gain β en courant en est donc augmenté par ce même facteur.**

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 cm²/V-s (0.8 m²/V-s); largeur Z du canal (channel width) 200 microns; longueur L du canal entre source et drain (channel length) 1.5 micron; profondeur h du canal sous la grille (channel depth), 0.5 micron; dopage du canal $N_d = 2 \times 10^{16}$ /cm³; prendre 12.9 pour la valeur de la constante diélectrique (relative à celle du vide qui est 8.85×10^{-12} F/m) du GaAs. Dans le circuit la source est à la masse.

-a) Calculer l'écart $e\phi_F^M$ entre le niveau de Fermi dans le canal du MESFET et E_C , le fond de la bande de conduction;

Réponse : L'écart $e\phi_F^M$ est donné par: $e\phi_F^M = k_B T \ln (N_C/N_d) = 0.026 \ln (4.7 \times 10^{17}/2 \times 10^{16})$

(7)

$$e\phi_F^M = 0.082 \text{ eV} \quad (8)$$

-b) Calculer la tension V_G (valeur et signe) qui appliquée sur la grille viendra complètement dépléter le canal de conduction et ainsi couper la conduction (condition "off");

Réponse: $V_{bi} = \phi_B - \phi_F = 0.8 - 0.082 = 0.718$ volts

(9)

La barrière de potentiel V_p présentée par un canal complètement déplété est:

$$V_p = qN_d h^2 / 2\epsilon = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{22} \times (0.5 \times 10^{-6})^2 / (2 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12}) \quad (10)$$

$$V_p = 3.504 \text{ volts}$$

Pour dépléter complètement le canal il faut donc avoir sur la grille une tension V_G (nombre négatif) telle que:

$$V_{bi} - V_G = V_p = 3.504 \text{ volts} \quad (11)$$

$$\text{ce qui donne: } \mathbf{V_G = - 2.786 \text{ volts}} \quad (12)$$

-c) Pour une tension de grille $V_G = - 1.2$ volt, et une tension de drain $V_D = + 3$ volts, quel sera le courant de drain?;

Réponse : Comme la tension inverse sur le canal près du drain est $V_D + (- V_G) + V_{bi} = 3.0 + 1.2 + 0.718 = 4.918$ volts et qu'elle dépasse donc la valeur $V_p = 3.504$ volts, le MESFET est en régime de saturation, i.e. le canal est pincé près du drain. On utilise la formule pour le courant en régime de saturation qui est:

$$I_{Dsat} = g_0 [V_p/3 - V_{bi} + V_G + 2(V_{bi} - V_G)^{3/2} / 3V_p^{1/2}] \quad (13)$$

On calcule:

$$g_0 = q\mu_n N_d Z h / L$$

$$g_0 = 1.6 \times 10^{-19} \times 0.8 \times 2 \times 10^{22} \times 200 \times 10^{-6} \times 0.5 \times 10^{-6} / 1.5 \times 10^{-6} = 0.171 \text{ ohm}^{-1} \quad (14)$$

$$I_{Dsat} = 0.171 [3.5/3 - 0.718 - 1.2 + 2(0.718 + 1.2)^{3/2} / 3 \times 3.5^{1/2}] \quad (16)$$

$$\mathbf{I_{Dsat} = 0.033 \text{ A} = 33 \text{ mA}} \quad (17)$$

-d) Pour une tension de grille $V_G = - 1.2$ volt, décrire les différents régimes d'opération sur les courbes courant vs. tension de drain V_D quand on passe de V_D faible, à V_{Dsat} , puis à V_D maximum. Quel phénomène limite ce V_D maximum?

Réponse : Dans la région où V_D est faible devant V_{Dsat} , le régime est linéaire, i.e. le courant **augmente linéairement** avec la tension de drain. **À la tension V_{Dsat} le canal devient pincé** près du drain. Dans la région de V_{Dsat} à V_{Dmax} on est en présence d'un régime de saturation où le canal de conduction comprend **une couche mince "d'accumulation"** avec une forte densité d'électrons se déplaçant à la vitesse limite. Finalement quand la tension de drain atteint V_{Dmax} des phénomènes de **multiplication de porteurs de charge (avalanche, claquage)** se produisent qui viennent augmenter le courant extrêmement rapidement.

Question # 3 (25 points). Le MOSFET.

Considérer le MOSFET classique construit sur un substrat en silicium dopé de type p à $8 \times 10^{16} / \text{cm}^3$. La grille en or est isolée du silicium par une couche de silice (oxide de silicium SiO_2 , constante diélectrique 3.9) de 30 nm d'épaisseur. La longueur du canal sous la grille (gate length) est 0.2 micron.

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

Réponse : On a $V_T = V_{fb} + V_S + V_{ox}$ (18)

À partir des courbes données à la page 62 des notes on trouve $V_{fb} = -0.15$ volt. D'autre part on a:

$$\phi_F = k_B T \ln(N_A/n_i) = 0.026 \times \ln(8 \times 10^{16}/10^{10}) = 0.413 \text{ volts} \quad (19)$$

$$\text{et } V_S = 2 \phi_F = 0.826 \text{ volts} \quad (20)$$

Finalement, V_{ox} est donné par:

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

$$\text{avec } Q_s = (4 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 8 \times 10^{22} \times 0.413)^{1/2} \quad (21)$$

$$Q_s = 1.48 \times 10^{-3} \text{ Coulombs/m}^2 \quad (22)$$

$$\text{et } C_{ox} = \epsilon_{ox}/d_{ox} = 3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}/30 \times 10^{-9} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ Farad/m}^2 \quad (23)$$

$$\text{donnant: } V_{ox} = 1.286 \text{ volts} \quad (24)$$

$$\text{L'équation (18) donne donc: } V_T = -0.15 + 0.826 + 1.286 = \mathbf{1.962 \text{ volts}} \quad (25)$$

-b) Expliquer à partir de graphiques des courbes d'énergie des électrons pourquoi un canal de conduction se forme sous la silice. Quand on applique la tension V_T sur la grille du MOSFET d'où proviennent les électrons?

Réponse : Quand V_G est suffisamment positif sur la grille du MOSFET les trous du substrat sont chassés et dégagent, électriquement parlant, des ions négatifs qui forment une charge d'espace, le "champ de mines". Plus **cette zone déplétée** s'élargit, plus la barrière de potentiel qu'elle présente devient importante et plus **elle courbe vers le bas les bandes d'énergie des électrons**. À la tension de grille $V_G = V_T$ le fond de la bande de conduction E_c près de la grille est suffisamment bas que de nombreux électrons s'y retrouvent et ont une densité volumique égale à celle des trous dans le substrat profond non-déplété. Les électrons proviennent rapidement de la source où ils sont en abondance. La source n'est qu'à 200 nm du drain, i.e. très proche.

-c) Quel sera le temps minimum que mettront les électrons pour aller de la source au drain? En plus de ce temps limite quel autre facteur viendra limiter le temps de montée (risetime) du courant fourni par le MOSFET?

Réponse : La vitesse maximum des électrons est $100 \text{ km/s} = 100 \text{ nm/ps}$, de sorte qu'ils couvriront la longueur de la grille (gate length) en **2 ps**. La capacité C de la grille et la résistance R du circuit de grille viendront limiter le temps de montée du courant allant au drain à RC.

-d) Quel est l'avantage d'avoir une couche de silice très mince dans l'opération du MOSFET?

Réponse : Plus la couche d'oxide de silicium est mince, **plus la chute de tension "perdue" dans l'épaisseur de cette couche est faible**. Une couche mince de silice rend donc le MOSFET capable de fonctionner à de faibles tensions et d'avoir ainsi un meilleur rendement.

Question # 4 (25 points). Miniprojet.

-a) Décrivez l'idée principale qui a été retenue pour votre miniprojet.

-b) Faire un calcul approximatif qui montre que l'idée est ou sera réalisable dans un avenir pas trop éloigné. Si des calculs ne s'appliquent pas, décrire un scénario qui conduirait à un test et éventuellement à la commercialisation de cette idée.

-c) Quelles sont les premières étapes à couvrir dans le but de s'assurer de la propriété intellectuelle mise en jeu dans un projet de design?

-d) Comment pourrait-on à l'avenir améliorer le déroulement d'un miniprojet de design dans le cadre de ce cours?