

**GEL-3007 Physique des composants électroniques Examen du 18 avril 2012**

Salle PLT-2783 Michel Duguay, poste 3557

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

**Question #1 (25 points) Transistor à effet de champ 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,  $8000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ( $0.8 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ); largeur Z du canal (channel width) 150 microns; longueur L du canal entre source et drain (channel length) 1,2 micron; profondeur h du canal sous la grille (channel depth), 0,4 micron; dopage du canal  $N_d = 3 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ ; prendre 12,9 pour la valeur de la constante diélectrique (relative à celle du vide qui est  $8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ) 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:  $e\phi_F^M = k_B T \ln (N_C/N_d) = 0.026 \ln (4.7 \times 10^{17}/3 \times 10^{16})$  (7)

$$e\phi_F^M = 0.071 \text{ eV} \quad (8)$$

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:**  $V_{bi} = \phi_B - \phi_F = 0,8 - 0,071 = 0,729 \text{ volts}$  (9)

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

$$V_p = qN_d h^2 / 2\epsilon = 1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{22} \times (0.4 \times 10^{-6})^2 / (2 \times 12.9 \times 8,85 \times 10^{-12}) \quad (10)$$

$$V_p = 3,36 \text{ volts}$$

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

$$V_{bi} - V_G = V_p = 3,36 \text{ volts} \quad (11)$$

$$\text{ce qui donne: } V_G = -2,63 \text{ volts} \quad (12)$$

c) Pour une tension de grille  $V_G = -1,2 \text{ volt}$ , et une tension de drain  $V_D = +3 \text{ volts}$ , quel sera le courant de drain?

**Réponse:** Comme la tension inverse sur le canal près du drain est  $V_D + (-V_G) + V_{bi} = 3.0 + 1.2 + 0.729 = 4.929 \text{ volts}$  et qu'elle dépasse donc la valeur  $V_p = 3,36 \text{ volts}$ , 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:

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

$$g_0 = 1.6 \times 10^{-19} \times 0.8 \times 3 \times 10^{22} \times 150 \times 10^{-6} \times 0.4 \times 10^{-6} / 1.2 \times 10^{-6} = 0.192 \text{ ohm}^{-1} \quad (14)$$

$$I_{Dsat} = 0.192 [3.36/3 - 0.729 - 1.2 + 2(0.729 + 1.2)^{3/2} / 3 \times 3.36^{1/2}] \quad (16)$$

$$I_{Dsat} = 0.032 \text{ A} = 32 \text{ mA} \quad (17)$$

10 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  $7 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ . La grille en or est isolée du silicium par une couche de silice (oxide de silicium  $\text{SiO}_2$ , constante diélectrique 3.9) de 25 nm d'épaisseur. La longueur du canal sous la grille (gate length) est 0,25 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:

$$\phi_F = k_B T \ln(N_A/n_i) = 0.026 \times \ln(7 \times 10^{16}/10^{10}) = 0.41 \text{ volts} \quad (19)$$

$$\text{et } V_S = 2 \phi_F = 0.82 \text{ volts} \quad (20)$$

Finalement,  $V_{ox}$  est donné par:

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

$$\text{avec } Q_s = (4 \times 11,7 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 1,6 \times 10^{-19} \times 7 \times 10^{22} \times 0,41)^{1/2} \quad (21)$$

$$Q_s = 1,38 \times 10^{-3} \text{ Coulombs/m}^2 \quad (22)$$

$$\text{et } C_{ox} = \epsilon_{ox} / d_{ox} = 3,9 \times 8,85 \times 10^{-12} / 25 \times 10^{-9} = 1,38 \times 10^{-3} \text{ Farad/m}^2 \quad (23)$$

$$\text{donnant: } V_{ox} = 1,0 \text{ volt} \quad (24)$$

$$\text{L'équation (18) donne donc: } V_T = -0,15 + 0,82 + 1,0 = 1,67 \text{ volts} \quad (25)$$

**-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.

### Question # 3 (25 points). Le MOSFET.

On construit un MOSFET sur un substrat en silicium dopé de type p à  $10^{17} / \text{cm}^3$ . La grille en or est isolée du silicium par une couche de silice (oxide de silicium  $\text{SiO}_2$ , de constante diélectrique 3,9) de 20 nm d'épaisseur.

a) Calculer la tension  $V_T$  à appliquer sur la grille pour amener le MOSFET au seuil de conduction.

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

La graphique à la page 68 des notes donne  $V_{fb} = -0,16$  volt

On calcule  $\phi_F = 0,026 \times \ln(10^{17}/10^{10}) = 0,419$  volt

$V_S = 2 \phi_F = 0,838$  volt  $(4\epsilon_S e N_a \phi_F)^{1/2}$

On a:  $V_T = V_{fb} + 2 \phi_F + Q_s/C_{ox}$

$Q_s = \text{charge}/\text{m}^2 = e N_a W_{\max} = e N_a \times [(4\epsilon_S \phi_F)/(e N_a)]^{1/2} = (4\epsilon_S e N_a \phi_F)^{1/2}$

$Q_s = (4 \times 11,7 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 1,6 \times 10^{-19} \times 10^{23} \times 0,419)^{1/2}$

$Q_s = 0,00166$  Coulomb/ $\text{m}^2$

$C_{ox} = \text{capacité}/\text{m}^2 = \epsilon_{ox}/d_{ox} = 3,9 \times 8,85 \times 10^{-12}/(20 \times 10^{-9}) = 0,00172$  Fd/ $\text{m}^2$

$V_{ox} = Q_s/C_{ox} = 0,00166/0,00172 = 0,965$  volt

Ajoutant les trois :  $V_T = -0,16 + 0,838 + 0,965 = 1,643$  volt

b) Dans la condition du seuil ( $V_G = V_T$ ) indiquer la valeur de l'écart de Fermi (i.e.  $E_C - E_{Fn}$ ) sous le canal de conduction et sa relation avec l'écart de Fermi (i.e.  $E_{Fp} - E_v$ ) dans la partie neutre du substrat.

Réponse :

Puisque  $e\phi_F = 0,419$  eV, qui est  $E_{Fn} - E_{Fi}$ , on aura  $E_C - E_{Fn} = 1,12/2 - 0,419 = 0,141$  eV

Cet écart doit être égal à l'écart de Fermi en zone P puisqu'au seuil on doit avoir la même densité en électrons/ $\text{cm}^3$  dans le canal de conduction qu'on a de trous/ $\text{cm}^3$  dans le substrat. On a donc  $E_{Fp} - E_v = 0,141$  eV.

La dimension W de la zone déplétée est  $W = [(4\epsilon_S \phi_F)/(e N_a)]^{1/2} = 104$  nm

-c) Sur un dessin du MOSFET, indiquer la nature de toutes les charges présentes (i.e. dire si mobiles ou fixes, et donner le signe) pour les régions suivantes : source, canal de conduction, zone déplétée, zone non-déplétée du substrat dopé p, drain.

-d) Dans une mémoire flash basée sur un MOSFET avec les paramètres ci-dessus, quelles devraient être les dimensions latérales de la grille flottante pour que le seuil soit augmenté par au moins deux

volts par l'injection de seulement 200 électrons? Expliquer pourquoi le seuil est augmenté plutôt que diminué par la présence de ces 200 électrons.

**Réponse :** Par l'équation (1) à la page 72 des notes, la charge  $Q = - 200 \times 1,6 \times 10^{-19}$  sur l'électrode flottante déplacera le seuil du MOSFET par 2 volts si on a :

$$3,2 \times 10^{-17} / C_{\text{pixel}} = 2 \text{ volt}$$

$$\text{d'où } C_{\text{pixel}} = 1,6 \times 10^{-17} \text{ Farad}$$

Si les dimensions latérales de l'électrode flottante (supposée être carrée) sont  $t \times t$ , et l'épaisseur de la silice est 20 nm, on a :

$$C_{\text{pixel}} = 1,6 \times 10^{-17} \text{ Farad} = 3,9 \times 8,85 \times 10^{-12} t^2 / (20 \times 10^{-9}) = 0,001725 t^2$$

$$\text{D'où } t = [(1,6 \times 10^{-17}) / 0,001725]^{1/2} = 96 \text{ nm}$$