

Question # 1 (25 points). Diodes Schottky.

Une diode Schottky est fabriquée en déposant une couche de platine sur un substrat en silicium dopé n avec $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ de donneurs.

-a) Calculer la valeur théorique de la barrière d'énergie potentielle telle que vue du métal et l'épaisseur de la zone déplétée pour le cas d'une polarisation zéro (zero bias).

Réponse (9 points):

À la page 62 des notes on voit que la fonction de travail Φ_m du platine est $\Phi_m = 5.65$ eV. La formule (1) p. 39 donne :

$$q\phi_b = \Phi_m - X_s = 5.65 - 4.01 = 1.64 \text{ eV}$$

L'écart de Fermi (mesuré à partir de E_c) $e\phi_F^M = 0.025 \ln (3.22 \times 10^{19}/5 \times 10^{17}) = 0.104$ eV, ce qui donne pour eV_{bi} vu du semiconducteur :

$$eV_{bi} = 5.65 - 4.01 - 0.104 = 1.53 \text{ eV}$$

De la formule (3) p. 39 on tire l'épaisseur de la zone déplétée :

$$x_n = (2\epsilon_s V_{bi}/qN_d)^{1/2} = (2 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.53 / 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{23})^{1/2}$$

$$x_n = 63 \text{ nm}$$

-b) Illustrer par des dessins le diagramme de E_c et E_v en fonction de la distance, en indiquant les échelles d'énergie et de distance appropriées à ce problème, pour les trois tensions suivantes appliquées à la diode: 1-, polarisation zéro (zero bias); 2-, 0.4 volt de polarisation directe (forward bias); et 3-, 4 volts de polarisation inverse (reverse bias). Expliquer sur une base microscopique pourquoi la conduction est forte dans un sens et presque zéro dans le sens opposé.

Réponse (9 points): voir les notes p. 40. L'échelle de distance pour zéro volt doit faire ressortir le $x_n = 63$ nm. Pour 0.4 volt en direct (forward) la zone de déplétion est légèrement moindre (54 nm) et pour 4 volts en renverse (reverse bias) la zone est de 120 nm. Le gap du silicium est 1.12 eV.

-c) Comment devrait-on modifier cette diode pour que la conduction par effet tunnel devienne dominante?

Réponse (7 points): il faudrait fortement doper le silicium afin d'amincir la barrière de Schottky et permettre la conduction par effet tunnel.

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, $8000 \text{ cm}^2/\text{V-s}$; largeur du canal (channel width) 150 microns; longueur du canal sous la grille (channel length or gate length) $L = 1.1$ micron; profondeur du canal (channel depth) $h = 0.3$ 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_{Dsat} , le courant commencera-t-il à saturer?
- c) Calculer la valeur du courant de saturation I_{Dsat} .
- d) Donner une raison pour laquelle on cherche toujours à diminuer la longueur L du canal sous la grille.

Réponses:

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

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

$$V_p = eN_d h^2 / 2\epsilon_r \epsilon_0 = 1.6 \times 10^{-19} \times 0.9 \times 10^{23} \times (0.3 \times 10^{-6})^2 / 2 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12} = 5.676 \text{ volts}$$

Pour $V_D = 0$, la tension qui déplétera le canal complètement et donc coupera le MESFET (turn-off) sera (voir p. 36 (fig. 4.8.2) et p. 50 (équation 8.3) des notes):

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

Une tension $V_G = -3 \text{ volts}$ 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 (equ. (3) p. 54):

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

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

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

-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 polysilicium 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 $Q = - 50\,000 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb} = 8.0 \times 10^{-15} \text{ C}$.

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

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

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.