

Question #1 (25 points) Le transistor à effet de champ MESFET.

-a) Considérez un MESFET construit sur un substrat semi-isolant de GaAs recouvert par une couche épitaxiale d'épaisseur h égale à 250 nm, dopée n avec $N_d = 1,2 \times 10^{17}$ donneurs/cm³. On utilise l'or comme électrode de grille. La barrière de Schottky est 0,8 électron-volt, la source est à la masse. Pour une tension de grille à la masse ($V_G = 0$) calculez la barrière d'énergie potentielle eV_{bi} qui confine les électrons sous la grille. Quelle est dans ce cas l'épaisseur de la zone déplétée sous la grille?

Réponse : On calcule d'abord l'écart de Fermi :

$$e\phi_F^M = k_B T \times \ln(N_C/N_d) = 0.026 \ln(4.7 \times 10^{17}/1,2 \times 10^{17}) = 35 \text{ meV} \quad (1)$$

$$\text{On a donc : } eV_{bi} = e(\phi_b - \phi_F^M) = 0,8 - 0,035 = 0,765 \text{ eV.} \quad (2)$$

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

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

$$\text{Avec } V_G = 0 \text{ on a : } d(x) = [2 \times 12,9 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,765 / (1,6 \times 10^{-19} \times 1,2 \times 10^{23})]^{1/2}$$

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

-b) Quelle tension de grille (valeur et signe) minimum pourra complètement dépléter le canal de conduction n ?

Réponse : En (3) on prend $d(x) = 250 \text{ nm}$, ce qui donne pour $V_{bi} - V_G$:

$$V_{bi} - V_G = qN_d d^2(x)/2\varepsilon = 1,6 \times 10^{-19} \times 1,2 \times 10^{23} \times (250 \times 10^{-9})^2 / (2 \times 12,9 \times 8,85 \times 10^{-12}) = 5,2 \text{ volts.}$$

$$\text{D'où } V_G = V_T = 0.765 - 5,2 = -4,435 \text{ volts} \quad (5)$$

Notez que la formule (3) pour V_p à la page 52 des notes, avec $h = d(x)$ donne le même résultat.

-c) Les régions immédiatement sous les électrodes sont dopées n^+ (i.e. 2×10^{18} et davantage donneurs par cm³), dans quel but? Expliquez brièvement.

Réponse : le dopage très fort vise à éliminer ou grande emnt réduire l'effet rectificateur de la barrière de Schottky qui se manifeste quand un métal est déposé sur un semiconducteur. Quand le dopage est très fort la zone déplétion sous la barrière de Schottky est très mince et les électrons la traversent aisément par effet tunnel.

:Question # 3 (35 points) Le MOSFET. Considérer le MOSFET classique construit sur un substrat en silicium dopé de type p à $4 \times 10^{16} / \text{cm}^3$. La grille est isolée du silicium par une couche de silice (oxide de silicium SiO_2 , constante diélectrique 3.9) de 45 nm d'épaisseur. Supposer que le choix du matériau est tel que V_{fb} (flat band voltage) est nul.

-a) Comparer à l'aide de dessins l'effet d'appliquer une tension d'une part négative et d'autre part positive à la grille sur les courbes décrivant les bandes d'énergie et sur la densité d'électrons et de trous en fonction de x , l'axe x étant perpendiculaire à la grille.

-b) quelle doit être la valeur de la tension V_G (valeur et signe) sur la grille pour créer un canal d'inversion sous la silice (tension de seuil V_T); expliquez l'origine du "2" dans $V_s = 2 \phi_F$.

Réponse : On a :

$$V_T = V_{fb} + V_{ox} + V_s \quad (1)$$

$$\text{Ici } V_{fb} = 0 \text{ et } V_s = 2 \phi_F = 2 \times k_B T \times \ln(N_a/n_i) = 2 \times 0.026 \ln(4 \times 10^{16}/10^{10}) = 2 \times 0.395 = 0.79 \text{ volt} \quad (2)$$

$$V_{ox} = Q_s/C_{ox} = Q_s d_{ox}/\epsilon_{ox} = (4\epsilon_s e N_a \phi_F)^{1/2} d_{ox}/\epsilon_{ox}$$

$$Q_s = (4 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^{22} \times 0.395)^{1/2} = 1.074 \times 10^{-3} \text{ Coulomb/m}^2 \quad (3)$$

$$V_{ox} = 1.074 \times 10^{-3} \times 45 \times 10^{-9} / (3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}) = 1.40 \text{ volt} \quad (4)$$

$$V_T = 0.79 + 1.4 = 2.19 \text{ volt} \quad (5)$$

-c) pour les conditions en –b) porter en graphique avec les valeurs numériques, la densité de toutes les charges en fonction de x en indiquant brièvement leur nature et leur rôle;

-d) Quel élément physique distingue fondamentalement la construction d'un MOSFET par rapport à un MESFET et quel est son paramètre d'importance vitale.