

## PHS1102 – CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

### DEVOIR

À faire individuellement ou en groupe de deux étudiants du même groupe de travaux pratiques.  
À remettre avant 15h00, le lundi 19 janvier 2018 dans la boîte de remise près du B-549.

La figure 1 illustre un transistor à effet de champ JFET (*junction field effect transistor*) constitué d'un bloc de matériau semi-conducteur de résistivité  $\rho = 0,085 \, \Omega \cdot \text{cm}$ , de largeur  $a = 0,80 \, \mu\text{m}$ , de hauteur  $b = 0,70 \, \mu\text{m}$  et de profondeur  $e = 25 \, \mu\text{m}$ .

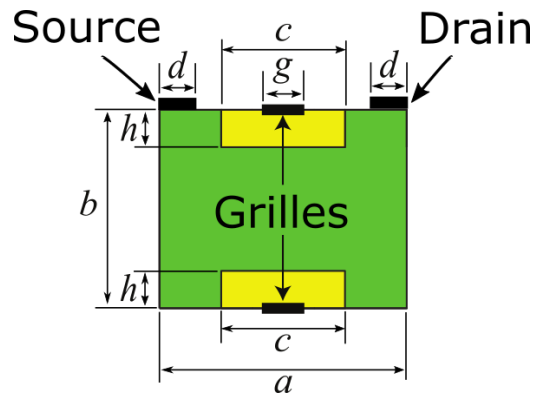


Figure 1 – Géométrie du transistor JFET étudié.

On a déposé quatre rubans métalliques sur les faces du transistor : la source de largeur  $d = 0,15 \, \mu\text{m}$  située au haut de la face gauche, le drain de largeur  $d = 0,15 \, \mu\text{m}$  situé sur le bas de la face droite et deux grilles centrées sur les faces du haut et du bas d'une largeur  $g = 0,20 \, \mu\text{m}$ . La position des différentes bandes métalliques est indiquée sur la figure 1 par des traits noirs prononcés.

Le bloc est entouré d'air (conductivité  $\sigma = 0$ ). Sous la grille du haut et au-dessus de la grille du bas, des zones de déplétion de charge (en jaune, conductivité  $\sigma = 0$ ) se forment à cause du potentiel appliqué aux grilles. Ces zones rectangulaires (en première approximation) ont une largeur  $c = 0,40 \, \mu\text{m}$ , une hauteur  $h = 0,20 \, \mu\text{m}$  et une profondeur  $e$ . La source et le drain sont à des potentiels de  $+150 \, \text{mV}$  et de  $-150 \, \text{mV}$  respectivement.

1. **(7 points)** En utilisant la figure de la page 3 (à remettre), faire une esquisse du champ électrique en identifiant bien les lignes de courant et les lignes équipotentielles. Calculer la valeur numérique de la résistance  $R$  entre la source et le drain à partir de votre esquisse.
2. **(8 points)** En utilisant la technique des différences finies, calculer la distribution de potentiel dans le transistor avec un maillage à intervalle constant entre les points de  $0,05 \, \mu\text{m}$  selon  $x$  et selon  $y$  et une tolérance de  $0,01 \, \text{mV}$ . Utiliser un tableau de 17 colonnes  $\times$  15 lignes pour représenter le potentiel (il y a  $16 \times 14$  cellules carrées, mais il y a une valeur de potentiel de plus qu'il y a de cellules dans chaque direction).

La zone de déplétion est **exclue** des calculs, car il n'y passe aucun courant. Les conditions aux frontières sont :

- Condition de Dirichlet avec un potentiel de  $+150 \, \text{mV}$  sur le ruban source ;
- Condition de Dirichlet avec un potentiel de  $-150 \, \text{mV}$  sur le ruban drain ;
- Condition de Neumann avec dérivée normale de potentiel nulle sur les autres frontières (régions de conductivité nulle  $\sigma = 0$ ).

Vous avez *le choix* d'utiliser l'*une* des deux approches suivantes :

- Écrire un programme dans un langage de programmation au choix et remettre le tableau de potentiel ainsi que l'intégralité du code que vous avez rédigé et utilisé pour calculer le potentiel ;
  - Utiliser le chiffrier Excel (approche suggérée) et remettre le tableau de potentiel avec une liste des formules de différences finies accompagnée d'un dessin illustrant leur position dans le tableau. Pour utiliser Excel, il faut activer la fonction de calcul itératif. La procédure d'activation dépend de la version d'Excel (2007, 2010, 2013 ou 2016). Pour Excel 2016, il faut aller dans **Fichier** ▶ **Options** ▶ , onglet **Formules** ▶ , cocher l'option **Activer le calcul itératif** et entrer les valeurs du nombre maximal d'itérations (**10000**) et de l'écart maximal (**0,01** ou plus bas).
3. **(5 points)** En utilisant le tableau de potentiel précédent, calculer la densité de courant  $J$  et le courant total  $I$  sur la surface du ruban source en contact avec le semi-conducteur (voir remarques ci-dessous). À partir de ce dernier résultat, calculer la résistance  $R$  entre les rubans source et drain. Comparer avec la valeur obtenue à la question 1 (cartographie des champs) et expliquer toute différence.

### Remarques sur le calcul du courant

Pour déterminer le courant  $I$  circulant entre la source et le drain, il s'agit de remplacer l'intégrale de la densité de courant sur une surface  $S$  qui intercepte tout le courant, par une sommation de la densité de courant sur l'ensemble des éléments de surface  $\Delta \vec{S}_i$  composant  $S$  :

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \cong \sum_i \vec{J}_i \cdot \Delta \vec{S}_i.$$

Pour ce faire, on choisit une surface  $S$  verticale traversant le canal du transistor (zone verte entre les deux zones de déplétion en jaune) : tout le courant traverse nécessairement celle-ci. Les éléments de surface  $\Delta \vec{S}_i$  sont orientés selon  $x$  et seule la composante en  $x$  de la densité de courant contribue au courant. La densité de courant  $\vec{J}_i$  pour le bloc de la ligne  $i$  est obtenue à partir du champ électrique estimé en évaluant numériquement la dérivée du potentiel par rapport à  $x$  :

$$E_{x,i} = -\frac{\partial V_i}{\partial x} \approx -\frac{\Delta V_i}{\Delta x_i},$$

où  $\Delta x_i$  est la largeur de la cellule et  $\Delta V_i$  est la différence de potentiel entre les faces gauche et droite de la cellule. La surface  $\Delta S_i$  correspond au produit de la hauteur d'une cellule  $\Delta y_i$  par la profondeur  $e$  du bloc. Ainsi,

$$I \approx \sum_i \sigma E_{x,i} \Delta S_{x,i} = -\sigma e \sum_i \frac{\Delta V_i}{\Delta x_i} \Delta y_i.$$

Comme les cellules du maillage sont carrées ( $\Delta x_i = \Delta y_i$ ), le courant se ramène à une sommation des différences de potentiel. Pour une distribution de potentiel décrite par une matrice  $V_{ij}$  de 17 colonnes  $\times$  15 lignes, on peut considérer la colonne  $i = 8$  qui correspond à une surface verticale  $S$  qui traverse tout le canal du transistor. On calcule le courant total traversant  $S$  en additionnant les courants traversant chaque cellule  $j$  qui compose  $S$  :

$$I \approx -\sigma e \sum_j \Delta V_j = -\sigma e \sum_j \left( \frac{V_{9,j} + V_{9,j+1}}{2} - \frac{V_{8,j} + V_{8,j+1}}{2} \right),$$

où  $(V_{8,j} + V_{8,j+1})/2$  et  $(V_{9,j} + V_{9,j+1})/2$  sont les potentiels moyens sur les faces gauche et droite de la cellule  $j$ , respectivement.

NOM: ..... SECTION : .....

NOM: ..... SECTION : .....

+150 mV

-150 mV

