

- Nota Bene :**
- Documents non autorisés.
 - Nombre de pages totales : 6
 - Nombre de pages annexes : 1 (formulaire)
 - Nombre d'annexe à rendre avec la copie : 0

Le sujet comporte une question de cours, un exercice et un problème. Chaque partie est indépendante. La qualité, la clarté de la présentation ainsi que l'orthographe seront pris en considération dans la notation. Le barème est donné à titre indicatif.

QUESTION DE COURS (4 points)

On considère le **transistor Métal-Oxyde-Semiconducteur (MOS)** de type normalement non-conducteur (« normally off » en terminologie anglo-saxonne) représenté sur la figure 1. L'isolant et le substrat utilisés sont respectivement de l'oxyde de silicium (SiO_2) et du silicium (Si) dopé P. La grille est réalisée à partir d'aluminium (Al).

- 1) Donner le nom usuel des trois électrodes S, G, D caractérisant ce composant. Expliquer succinctement leur rôle respectif.
- 2) Quel est le signe de la tension à appliquer sur l'électrode G pour que le régime de conduction apparaisse dans le transistor de la figure 1 ? Dans quel sens le courant circule-t-il ?
- 3) Décrire qualitativement (**en 1 page maximum**) le mécanisme de fonctionnement et d'apparition du courant dans une telle structure. Tracer sommairement l'allure du réseau de caractéristiques $I_D=f(V_{DS})$ obtenues pour différentes valeurs de la tension V_{GS} . On notera V_{DS} la tension de polarisation entre les électrodes S et D, et V_{GS} la tension de polarisation entre les électrodes S et G.

Mots-clés à utiliser dans votre discussion : appauvrissement, désertion, faible inversion, forte inversion, canal, tension de seuil du MOS, régime ohmique, régime intermédiaire, régime saturé, pincement.

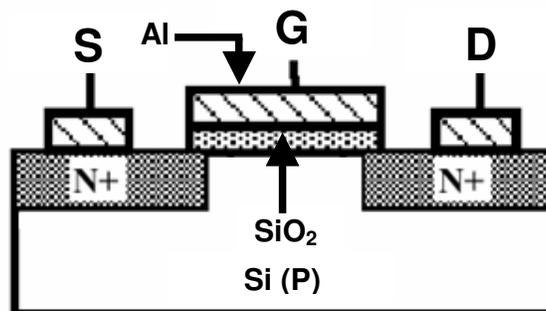


Figure 1

- 4) Quel est l'intérêt d'avoir un transistor avec une longueur de canal submicronique ? Justifier succinctement votre réponse.

EXERCICE N°1 (4 points)

Dans cet exercice, on se propose d'étudier le fonctionnement d'une diode Schottky dont le principe de base repose sur la juxtaposition d'un métal et d'un semiconducteur (**jonction métal-semiconducteur**). Le semiconducteur utilisé présente les caractéristiques suivantes :

- dopage du semiconducteur de type N : $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,
- densité de porteurs intrinsèque : $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,
- coefficient de diffusion des trous : $D_p = 7,5 \text{ cm}^2/\text{s}$,
- extension de la zone quasi-neutre : $W_N = 5 \text{ }\mu\text{m}$,
- section de la diode : $S = 1 \text{ mm}^2$
- constante de Richardson : $A = 120 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$.
- hauteur de la barrière métal-semiconducteur : $\phi_{BN} = 0,6\text{V}$
- potentiel thermodynamique à 300K : $V_T = 25 \text{ mV}$
- charge élémentaire de l'électron : $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- 1) Ecrire l'équation du courant I dans une diode Schottky en fonction du courant de saturation I_s , de la tension appliquée V et du potentiel thermodynamique V_T .
- 2) On rappelle que, dans une diode Schottky, la densité de courant de saturation J_s est obtenue à partir de **la loi de Richardson thermoionique** :

$$J_s = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{BN}}{V_T}\right) \quad (1)$$

où A représente la constante de Richardson, T la température exprimée en Kelvins et ϕ_{BN} la hauteur de la barrière métal-semiconducteur.

Calculer la valeur du courant de saturation I_{S1} de la diode Schottky à $T=300 \text{ K}$.

- 3) Calculer la valeur du courant de saturation I_{S2} obtenu dans le cas d'une jonction P*N ($N_A \gg N_D$), de même section, courte et abrupte. Comparer cette valeur à celle trouvée à la question précédente.
- 4) Quels types de porteurs (majoritaires ou minoritaires) contribuent au courant dans une jonction PN ? Même question pour une jonction Schottky.
- 5) Calculer pour ces deux jonctions, la chute de tension, en polarisation directe, pour un courant de 10 mA. Conclusion.
- 6) Représenter le schéma des bandes d'énergie à l'équilibre thermodynamique de cette jonction Schottky lorsque le métal et le semiconducteur sont en contact. Justifier brièvement. Discuter qualitativement de l'effet d'une polarisation directe sur le diagramme d'énergie.

Devra être reporté sur le diagramme : niveau d'énergie du vide E_0 ; niveau de Fermi du métal E_{FM} ; niveau de Fermi du semiconducteur E_{FSC} ; énergie des bandes de conduction et de valence du semiconducteur E_C , E_V ; travail de sortie du métal $q\phi_M$; travail de sortie du semiconducteur $q\phi_{SC}$; affinité électronique $q\chi$.

PROBLEME (12 points)

On se propose d'étudier dans ce problème un **transistor à effet de champ de type JFET** (« Junction Field Effect Transistor » en terminologie anglo-saxonne). La partie A traite de la réalisation physique du transistor, la partie B du fonctionnement du JFET et la partie C de la polarisation du composant.

Partie A : réalisation physique du transistor

On veut réaliser un transistor à effet de champ à jonction JFET (figure 1). Le canal devra être de type N. On dispose d'une plaque de silicium dopée P de résistivité $\rho_P = 1,38 \cdot 10^2 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$.

- 1) Déterminer la concentration en dopant N_A dans la plaque.
- 2) On prévoit de réaliser un dépôt d'une couche de type N d'épaisseur $2a$ et de résistivité $\rho_N=6,25 \Omega.cm$. En vous aidant du schéma de la figure 1, indiquer en quelques lignes quel est le but de ce dépôt. Quelle concentration de dopants N_D doit être dissoute dans le silicium ?
- 3) Pour réaliser la grille, on dépose une couche de silicium laquelle peut être dopée avec un semiconducteur de type P ou de type N. Selon vous, quel dopant faut il choisir pour réaliser un JFET à canal N ?
- 4) Indiquer le sens de circulation des électrons puis celui du courant dans la structure réalisée ? Comment doit être polarisée la jonction grille-canal dans un JFET à canal N ?

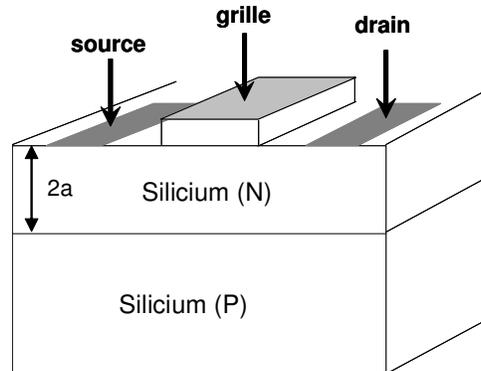


Figure 1

Données : - mobilité des électrons $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$,
 - mobilité des trous $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$,
 - charge élémentaire de l'électron $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Partie B : fonctionnement du JFET

On considère maintenant, sur la figure 2, la structure idéalisée du transistor JFET réalisé à la partie A. Les valeurs des concentrations en impuretés dopantes sont les mêmes que celles calculées précédemment : N_D dans la région N et N_A dans les régions P^+ . La mobilité μ_n des électrons dans le canal est toujours de $1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$.

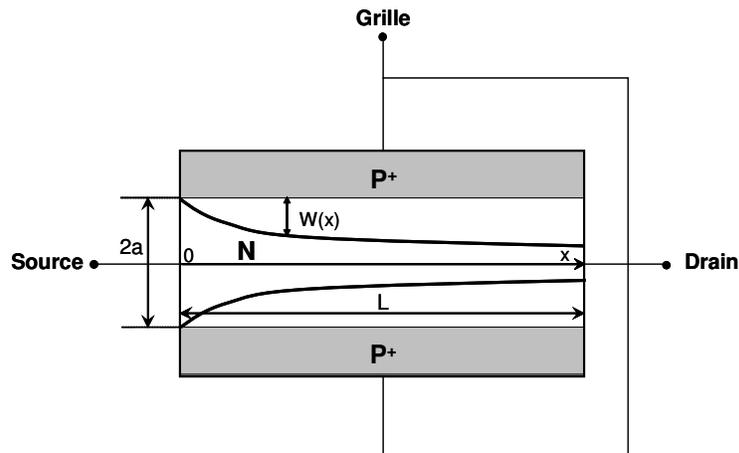


Figure 2

- 1) Calculer le potentiel de diffusion V_d des deux jonctions P^+N .

Données :

- densité de porteurs intrinsèque : $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,
- potentiel thermodynamique : $V_T = 25 \text{ mV}$ à 300 K

- 2) Exprimer la conductance G_0 du canal N seul en fonction de N_D , $2a$, L et b . On notera $2a$ l'épaisseur du canal, L la longueur et b la profondeur (non visible sur la représentation de la figure 2). Calculer G_0 dans le cas où $2a = 5 \mu\text{m}$, $b = 100 \mu\text{m}$ et $L = 10 \mu\text{m}$.
- 3) Montrer que la tension de pincement V_P du canal s'exprime par la relation :

$$V_P = V_d - \frac{qN_D a^2}{2\epsilon} \quad (1)$$

En utilisant les données de l'énoncé, effectuer l'application numérique.

- 4) Déterminer l'extension de la zone dépeuplée W coté N lorsque l'on applique les tensions $V_{GS} = V_P, -4V, -3V, -2V, -1V, 0V$. On reproduira le tableau ci-dessous sur la copie.

$V_{GS} \text{ (V)}$	V_P	-4	-3	-2	-1	0
$W \text{ (}\mu\text{m)}$						

Donnée : $\epsilon_{Si} = 10^{-12} \text{ F/cm}$ (permittivité du silicium).

- 5) Dans le cas où $V_{DS} \ll V_{GS}$, montrer que la conductance G du canal se met sous la forme

$$G = G_0 \left(1 - \frac{\sqrt{V_d - V_{GS}}}{\sqrt{V_d - V_P}} \right) \quad (2)$$

Déterminer les valeurs du rapport G/G_0 en fonction des valeurs prises par V_{GS} . On reproduira le tableau ci-dessous sur la copie. Conclure.

$V_{GS} \text{ (V)}$	V_P	-4	-3	-2	-1	0
G/G_0						

- 6) Lorsque la tension V_{DS} n'est plus négligeable devant V_{GS} , on montre que l'expression du courant drain-source I_{DS} prend la forme suivante :

$$I_{DS} = G_0 \left(V_{DS} + \frac{2(V_d - V_{GS})^{3/2}}{3(V_d - V_P)^{1/2}} - \frac{2(V_d + V_{DS} - V_{GS})^{3/2}}{3(V_d - V_P)^{1/2}} \right) \quad (3)$$

Donner la condition de saturation du transistor reliant la tension de saturation V_{Dsat} aux tensions V_P et V_{GS} . En déduire l'expression littérale du courant de saturation maximum du transistor I_{DSS} (obtenu lorsque $V_{GS} = 0 \text{ V}$) en fonction de V_d , V_P et G_0 . Calculer I_{DSS} .

- 7) Pour $V_{GS} = -1V$, donner un ordre de grandeur de la capacité totale C_T . En déduire les valeurs des capacités C_{GS} et C_{GD} . Pour ce faire, on supposera que le barreau de semiconducteur est une équipotentielle (i.e $V_{DS} \ll V_{GS}$).
- 8) Calculer la valeur du courant de fuite de la grille I_g pour une tension $V_{GS} = -1V$.

Partie C : polarisation du JFET

En pratique, on assimile souvent la caractéristique de transfert à une parabole et l'expression du courant de saturation I_{DSat} est donné par la relation empirique :

$$I_{DSat} = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2 \quad (4)$$

On donne, dans le tableau ci-après, les valeurs approchées prises par le courant I_{DSat} en fonction de V_{GS} pour le transistor étudié précédemment :

V_{GS} (V)	V_P	-4	-3	-2	-1	0
I_{DSat} (μA)	0	4	65	225	490	890

- 1) Vérifier que la valeur du courant I_{DSS} reportée dans le tableau ci-dessus est en accord avec celle que vous avez déterminé à la question 6) de la partie B.
- 2) On réalise maintenant le montage de la figure 3 dans lequel $R_G=5M\Omega$. On désire que le **point de fonctionnement du JFET** corresponde à $V_{GS} = -2V$ et $V_{DS} = 2V$. Calculer les valeurs à donner aux résistances R_D et R_S .

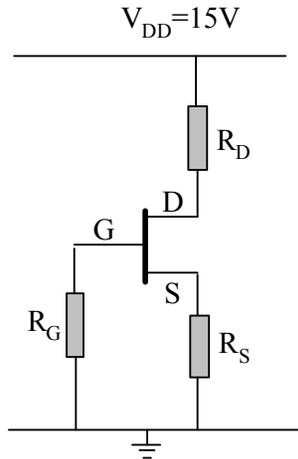


Figure 3

- 3) Si $R_S=0,7k\Omega$ et $R_D=0,3k\Omega$, déterminer les valeurs du point de fonctionnement (I_{DS} , V_{GS} , V_{DS}).


FIN DU SUJET


ANNEXE : Formulaire

- **Potentiel de diffusion V_d d'une jonction PN :**

$$V_d = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

avec $V_T=25$ mV à $T=300$ K, n_i la densité de porteurs intrinsèque, N_A et N_D les concentrations des dopages dans les zones P et N.

- **Extension de la zone de charge d'espace d'une jonction PN :**

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_d - V_a)}$$

avec ϵ la permittivité du matériau, N_A et N_D les concentrations des dopages dans les zones P et N, V_d le potentiel de diffusion et V_a la tension appliquée à la jonction (polarisation directe $V_a > 0$, polarisation inverse $V_a < 0$).

- **Extension de la zone de charge d'espace coté N (x_N) et coté P (x_P) d'une jonction PN :**

$$x_N = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q N_D} \frac{N_A}{N_A + N_D} (V_d - V_a)}$$

$$x_P = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q N_A} \frac{N_D}{N_A + N_D} (V_d - V_a)}$$

- **Quelques relations supplémentaires :**

$$W = x_N + x_P$$

$$N_D x_N = N_A x_P$$

- **Courant de saturation d'une jonction PN courte (sans recombinaisons) :**

$$I_s = q S n_i^2 \left[\frac{D_n}{N_A W_P} + \frac{D_p}{N_D W_N} \right]$$

avec q la charge élémentaire, S la section de la diode, n_i la densité de porteurs intrinsèque, N_A et N_D les concentrations des dopages dans les zones P et N, D_n et D_p les coefficients de diffusion des électrons et des trous, W_N et W_P les extensions des zones quasi-neutres.

- **Courant de génération dans la zone de transition d'une jonction PN :**

$$I_g = S q n_i \frac{W}{2\tau}$$

avec S la section de la diode, q la charge élémentaire, n_i la densité de porteur intrinsèque, W l'extension de la zone de charge d'espace et τ la durée de vie de porteurs qui sera prise à 1 μ s dans le problème.