

- Nota Bene :**
- Documents non autorisés
 - Nombre de pages totales : 8
 - Nombre de pages annexes : 3 (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 la structure **Métal-Isolant-Semiconducteur (MIS)** représentée sur la figure 1. L'isolant et le substrat utilisés sont respectivement de l'oxyde de silicium (SiO_2) et du silicium (Si) dopé N.

Montrer, **en une page maximum** que suivant le signe de la polarisation V_G appliquée sur le métal, différents régimes de fonctionnement peuvent apparaître dans une telle structure. On expliquera en particulier comment l'inversion de population se produit et quelles en sont les conséquences sur le mécanisme d'apparition du courant dans un transistor MOSFET.

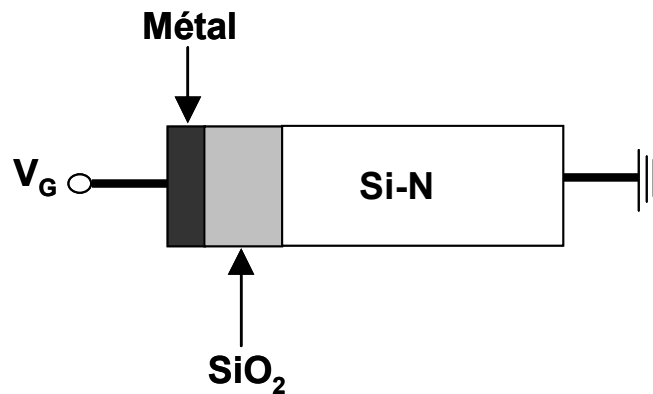


Figure 1

Mots-clés à utiliser dans votre discussion : appauvrissement, désertion, faible inversion, forte inversion, inversion de population, canal, tension de seuil.

Applications : on considère une structure de type $\text{Al/SiO}_2/\text{Si}$ à substrat silicium de type N. L'épaisseur d'oxyde est $d=150$ nm. L'énergie de bande interdite, la constante diélectrique et l'affinité électronique du silicium sont respectivement : $E_g=1,12$ eV, $\epsilon_r(\text{Si})=12$ et $q\chi=4$ eV. La constante diélectrique relative de la silice est $\epsilon_r(\text{SiO}_2)=2$. Le travail de sortie de l'aluminium est $q\phi_m=4,3$ eV. On rappelle que la permittivité du vide est $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12}$ S.I.

1) Calculer la capacité surfacique C_{ox} de l'oxyde en F/m^2 .

- 2) Sachant que l'écart énergétique $E_F - E_{Fi}$ entre le niveau de Fermi et le niveau de Fermi intrinsèque est de 0,26 eV, calculer la tension de bande plate V_{FB} de cette structure MIS. Conclure.

EXERCICE (6 points)

Sur la figure 2, on considère la structure simplifiée d'un transistor JFET à canal N ayant les propriétés suivantes : $N_A = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $a = 0,2 \text{ }\mu\text{m}$.

- 1) Pour réaliser la grille, on dépose une couche de silicium laquelle peut être dopée avec un semi-conducteur de type P ou de type N. Selon vous, quel dopant faut-il choisir pour réaliser un JFET à canal N ? Comment doit être polarisée la jonction grille-canal dans un JFET à canal N ? Préciser le sens de circulation des électrons puis celui du courant dans la structure.
- 2) Calculer la tension de diffusion V_d de la jonction grille-canal.
- 3) Calculer l'extension de la zone de charge d'espace h , à l'équilibre thermodynamique de cette jonction. En déduire la hauteur du canal en nm.
- 4) Calculer la tension de pincement V_p .
- 5) On polarise négativement la grille de sorte que $V_{GS} = V_p$
 - a. Calculer l'extension de la zone de charge d'espace côté grille x_p .
 - b. En considérant que le courant inverse de grille est essentiellement un **courant de génération**, calculer la valeur de ce courant I_g . On supposera un canal de largeur $Z = 1 \text{ }\mu\text{m}$ (non représenté sur le schéma de la figure 2) et de longueur $L = 1 \text{ }\mu\text{m}$. Le temps de vie des porteurs sera de $\tau = 20 \text{ ns}$. Que pouvez-vous en conclure quant à l'impédance d'entrée équivalente du transistor ?

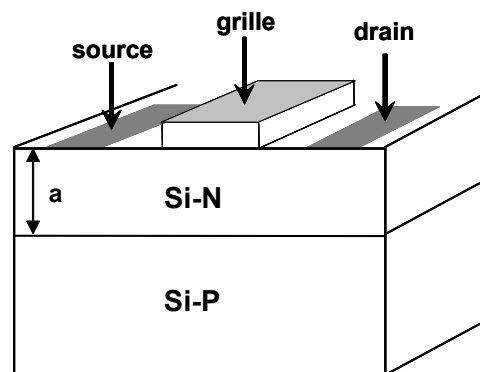


Figure 2

- Données :
- Permittivité du silicium : $\epsilon(\text{Si}) = \epsilon_r \epsilon_0 = 10^{-12} \text{ F/cm}$,
 - Potentiel thermodynamique $V_T = 26 \text{ mV}$ à 300K,
 - Densité de porteurs intrinsèque $n_i^2 = 2,5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-6}$,
 - Charge élémentaire de l'électron $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

PROBLEME : ETUDE D'UN TRANSISTOR PMOS DANS UNE TECHNOLOGIE SUBMICRONIQUE (10 points)

On considère un **transistor PMOS** de dimension submicronique (inférieure au micron) inclus dans un circuit CMOS dont la structure simplifiée est représentée en coupe sur la figure 3.

Les zones de source et de drain sont très dopées par du bore dont la concentration est égale à $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. A ce niveau de dopage, **on considèrera que la statistique de Boltzmann est toujours valable**. La zone de type N dans laquelle se forme le canal, appelée **caisson**, est dopée par du phosphore, et son niveau de dopage peut être ajusté pour tenir compte à la fois de la tenue en tension et de la tension de seuil du transistor. Le substrat de type P est peu dopé. On supposera que les dopages sont constants dans chacune des zones et que la température est constante et égale à 300K.

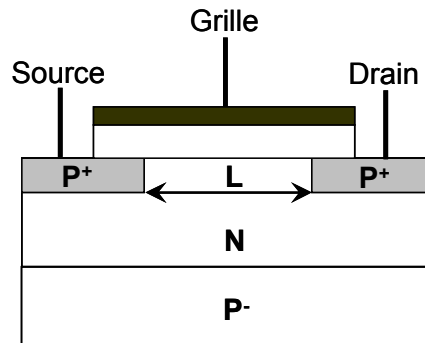


Figure 3

Données :

- Densités d'états en bande de conduction et de valence $N_C=N_V=3,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,
- Energie de bande interdite du silicium $E_g=1,12 \text{ eV}$,
- Potentiel thermodynamique $V_T=26 \text{ mV}$ à 300K,
- Permittivité du silicium $\epsilon(\text{Si})=\epsilon_r\epsilon_0=10^{-12} \text{ F/cm}$,
- Dopages : $N_A= 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (source et drain) et $N_{A\text{Sub}} = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (substrat).

On appellera dans le problème :

- ⇒ L la distance entre les deux jonctions pn métallurgiques,
- ⇒ W_{d0} l'extension de la zone de charge d'espace de la jonction drain-canal à l'équilibre thermodynamique,
- ⇒ W_d l'extension de la zone de charge d'espace de la jonction drain-canal,
- ⇒ W_{dc0} l'extension de la zone de charge d'espace de la jonction caisson-substrat à l'équilibre thermodynamique,
- ⇒ W_{dc} l'extension de la zone de charge d'espace de la jonction caisson-substrat,
- ⇒ L_{elec} , la longueur électrique, ou la distance entre les limites de zones de charge d'espace dans le canal.

Partie A : étude à l'équilibre thermodynamique

On analyse les jonctions drain-caisson (ou source-caisson) et la jonction caisson-substrat. On considère que le dopage du caisson est constant et égal à $N_D=5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

- 1) Donner l'expression et calculer la tension de diffusion des jonctions drain-canal V_{dD} et substrat-canal (ou caisson) V_{dC} .
- 2) Déterminer la position du niveau de Fermi dans la zone de drain (et source), dans la zone de canal (ou caisson) et dans le substrat. On exprimera en particulier les quantités E_C-E_F ou E_F-E_V selon les cas.
- 3) Pour la jonction drain-canal, de quel côté s'étend principalement la zone de charge d'espace ? Même question pour la jonction substrat-caisson. Justifier vos réponses.

- 4) Reproduire sur votre copie le schéma de la figure 3. Dessiner en pointillé les zones de charges d'espace à l'équilibre thermodynamique (et sans polarisation de grille par rapport au substrat) des jonctions source-canal et drain-canal. On ne représentera que leurs extensions dans le caisson. Représenter par une flèche la longueur électrique L_{elec} du futur canal PMOS.
- 5) A l'équilibre thermodynamique, donner l'expression puis calculer l'extension des zones de charges d'espace W_{d0} et W_{dc0} des jonctions drain-canal et caisson-substrat en faisant les approximations habituelles.
- 6) Dans ces conditions, quelle est la valeur minimale que doit avoir L pour que la zone de canal puisse exister (L_{elec} non nulle) ? Si $L=0,35 \mu\text{m}$, calculer L_{elec} .
- 7) Indiquer à quel type de transistor correspondrait le diagramme d'énergie dans le silicium entre le drain, le caisson et le substrat (perpendiculairement à la surface). Quelles seraient les hauteurs en eV des barrières d'énergie correspondantes ?
- 8) Indiquer à quel type de transistor correspondrait le diagramme d'énergie entre la source et le drain (parallèlement à la surface). Quelles seraient les hauteurs en eV des barrières d'énergie correspondantes ?
- 9) Donner l'expression du champ électrique E_{max} à la jonction métallurgique. Calculer E_{max} et l'exprimer en V/cm.

Partie B : la jonction drain-canal est polarisée

On polarise maintenant le drain négativement à la tension V_{DS} , c'est-à-dire négativement par rapport aux zones de canal et de source qui sont considérées reliées électriquement.

- 1) Comment est polarisée la jonction drain-canal ?
- 2) Donner l'expression de W_d correspondant à l'extension de la zone de charge d'espace de la jonction drain-canal. En prenant $|V_{DS}|=1 \text{ V}$, calculer W_d . En déduire L_{elec} ainsi que la valeur du champ électrique maximum E_{max} en V/cm.
- 3) Comment faut-il intervenir sur le dopage de la zone de canal pour diminuer l'extension des zones de charge d'espace W_d ? Justifier.
- 4) On souhaite diminuer la longueur du canal L . Pour un dopage de la zone de canal de $N_D=1,25 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, considéré constant, si à l'équilibre thermodynamique $L_{elec}=0,18 \mu\text{m}$, calculer la longueur L entre les zones de drain et source.

Partie C : transistor bipolaire parasite source-canal-drain

On considère le transistor bipolaire parasite source-canal-drain. Sous l'effet de charges parasites créées par des radiations, on suppose que la zone de canal se charge par création de porteurs. La concentration d'électrons et de trous générés est égale à $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$. Cet excès de porteurs entraîne une polarisation de la jonction émetteur-base (source-canal) équivalente.

- 1) Quel est le type de ce transistor bipolaire ?
- 2) En appliquant l'approximation de Boltzmann, calculer la polarisation induite V_{in} à la jonction émetteur-base, la base étant dopée à $N_D=1,25 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

La durée de vie des électrons dans la zone de source est $\tau_n=4 \times 10^{-10} \text{ s}$ alors que la durée de vie des trous dans la zone de canal dopée à $1,25 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ est $\tau_p=4 \times 10^{-9} \text{ s}$. La mobilité des trous et des électrons dans ces zones est respectivement $\mu_n=150 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et $\mu_p=80 \text{ cm}^2/\text{V.s}$. La longueur équivalente de la source est de $W_p=0,1 \mu\text{m}$.

- 3) En supposant que la tension de drain appliquée est $|V_{DS}|=1,5 \text{ V}$ et que la longueur entre les zones dopées P^+ est de $0,18 \mu\text{m}$, calculer la longueur W_N de la base équivalente.
- 4) Après avoir calculé les longueurs de diffusion des porteurs, indiquer quels sont les modèles de jonction qu'il faut adopter pour les électrons et les trous.

- 5) Dans ces conditions, exprimer puis calculer les densités de courant J_N et J_p injectées au niveau de cette jonction. Si la section à prendre en compte est $S=0,1 \mu\text{m}^2$, calculer le courant total parasite I_p qui peut être observé.

 FIN DU SUJET 

ANNEXE : Formulaire

- **Expression des concentrations des porteurs dans les bandes d'énergie**

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (\text{électrons})$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (\text{trous})$$

avec N_C et N_V les densités d'états électroniques dans les bandes de conduction et de valence, E_C l'énergie du bas de la bande de conduction, E_V l'énergie du sommet de la bande de valence, E_F le niveau de Fermi, k la constante de Boltzmann et T la température. L'énergie thermique kT sera prise égale à 26 meV à 300K.

- **Expression de la densité de porteurs intrinsèque en fonction du gap du matériau**

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

avec N_C et N_V les densités d'états électroniques dans les bandes de conduction et de valence, E_g l'énergie de bande interdite du matériau, k la constante de Boltzmann T la température. L'énergie thermique kT sera prise égale à 26 meV à 300K.

- **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 $V_T=26$ 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**

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

avec $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_T$ la permittivité du matériau, q la charge élémentaire de l'électron, N_A et N_D les concentrations des dopages dans les zones P et N, V_d le potentiel de diffusion et V la tension appliquée à la jonction ($V>0$ ou $V<0$ suivant la polarisation de la jonction).

• **Extension de la zone de charge d'espace côté N (x_n) et côté P (x_p) d'une jonction PN**

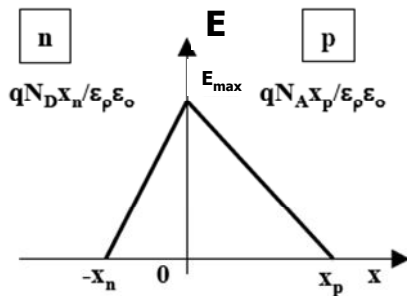
$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} \frac{N_A}{N_A + N_D} (V_d - V)}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_A} \frac{N_D}{N_A + N_D} (V_d - V)}$$

$$W = x_n + x_p$$

$$N_D x_n = N_A x_p$$

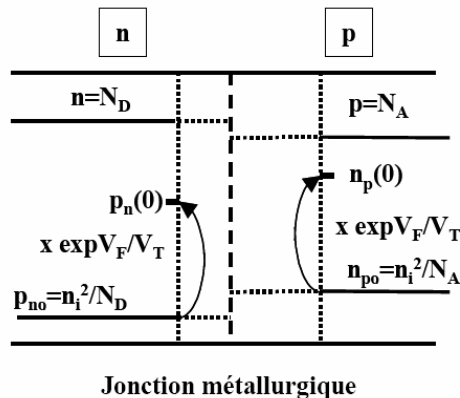
• **Champ électrique dans une jonction PN**



$$E(x) = \underbrace{\frac{qN_D}{\varepsilon} (x + x_n)}_{\text{Côté n}} = - \underbrace{\frac{qN_A}{\varepsilon} (x - x_p)}_{\text{Côté p}}$$

avec $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, q la charge de l'électron, N_A et N_D les concentrations des dopages dans les zones p et n, x_n et x_p les extensions de la zone de charge d'espace côté n et côté p de la jonction.

• **Porteurs majoritaires et minoritaires dans la jonction PN sous polarisation directe**



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

$$|J_S| = qS n_i^2 \left[\frac{D_n}{N_A W_P} + \frac{D_p}{N_D W_N} \right]$$

avec q la charge élémentaire de l'électron, 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**

$$I_g = Sq n_i \frac{W}{2\tau}$$

avec S la section de la diode, q la charge élémentaire de l'électron, n_i la densité de porteur intrinsèque, W l'extension de la zone de charge d'espace et τ la durée de vie des porteurs.