



**MATERIAUX ET
NANOTECHNOLOGIES**

**4 MNT
DEVOIR SURVEILLE
PEOS-DEOS**

le mardi 15 janvier 2008
Durée : 2 heures

Nota Bene : Les documents ne sont pas autorisés. 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.

EXERCICE (5 pts)

On considère une structure MIS du type Al/I/Si. L'épaisseur de l'isolant I est $d=100$ nm. Le silicium est de type p avec une densité excédentaire d'accepteurs $N_A=10^{16}$ cm⁻³. L'énergie de transition (« gap »), la constante diélectrique relative, la densité de porteurs intrinsèques et l'affinité électronique du silicium sont respectivement : $E_g=1,2$ eV, $\epsilon_{Si}=12$, $n_i=10^{10}$ cm⁻³ et $\chi=4$ eV. La constante diélectrique relative de l'isolant est $\epsilon_i=2$. Le travail de sortie de l'aluminium est $\phi_m=4,3$ eV. L'étude est conduite à l'équilibre thermodynamique.

- 1) Calculer dans le silicium la distance $q\phi_{Fi}$ du niveau de Fermi au niveau de Fermi intrinsèque.
- 2) Calculer la capacité surfacique C_i de l'isolant.
- 3) Calculer la tension de bandes plates V_{FB} . Conclure.
- 4) La structure possède une tension de seuil V_{th} de 1 V. Discuter (en quelques lignes) de l'impact du signe de la tension de grille V_G sur les différents modes de fonctionnement de la structure MIS.

On donne pour la permittivité diélectrique du vide : $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12}$ S.I

PROBLEME : ETUDE D'UN TRANSISTOR BIPOLAIRE (15 pts)

L'objectif de ce problème est d'étudier le fonctionnement d'un transistor bipolaire de type NPN intégré sur substrat silicium (cf. figure 1). L'émetteur de type N⁺ et de largeur X_E est très dopé par de l'Arsenic de concentration N_{DE} . La zone de base de type P et de largeur X_B est dopée par du Bore de concentration N_A . Le collecteur est quant à lui constitué de

deux zones : l'une de type N^- faiblement dopée au Phosphore de concentration N_{DC}^- , et d'épaisseur X_C^- et l'autre de type N^+ de concentration N_{DC}^+ et d'épaisseur X_C^+ .

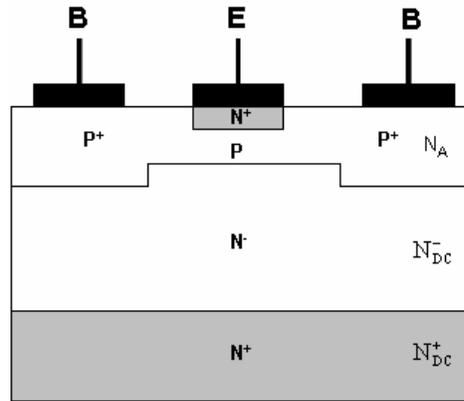


Figure 1

La « zone utile » du transistor se trouve en fait sous la zone de type N^+ de l'émetteur. A titre d'exemple la figure 2 montre une représentation plus complète en *coupe-perspective* d'un transistor bipolaire NPN. La zone N^+ enterrée sert à minimiser la résistance série du collecteur pour atteindre la « zone utile ». Dans la pratique cette zone N^+ est remontée latéralement à la surface pour établir le contact électrique avec le métal. Afin d'optimiser le comportement en fréquence du composant, les zones de type P^+ , encadrent la « zone utile » afin de minimiser la résistance série de base depuis le contact extérieur. Les contacts d'émetteur, de base et de collecteur sont, dans le cas étudié ici, réalisés en aluminium. Le contact de base entoure l'émetteur avec le même objectif de diminuer la résistance série.

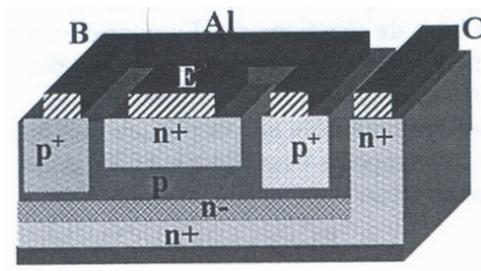


Figure 2

Dans tout le problème on ne considérera que des modèles plans (unidimensionnels) pour les jonctions et on négligera les phénomènes de recombinaisons. L'étude est conduite à la température de 300 K.

Les caractéristiques du transistor sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Emetteur	Base	Collecteur	Données du silicium
$N_{DE} = 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$N_A = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$N_{DC}^- = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$E_g = 1,12 \text{ eV}$
$\mu_p = 50 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$N_{DC}^+ = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$\epsilon_{Si} = 10^{-12} \text{ F/cm}$
$X_E = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$	$X_B = 0,2 \text{ }\mu\text{m}$	$X_C^- = 2 \text{ }\mu\text{m}$	$V_T = 26 \text{ mV à } 300 \text{ K}$
			$n_i = 1,55 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
			$N_C = N_V = 3,5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

I. ETUDE A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE

- 1) Calculer à 300 K la position du niveau de Fermi dans l'émetteur, dans la base de type P et dans les deux zones de collecteur. On exprimera, en meV, les quantités $(E_C - E_F)_{\text{émetteur}}$, $(E_C - E_F)_{\text{collecteur(-)}}$, $(E_C - E_F)_{\text{collecteur(+)}}$ et $(E_F - E_V)_{\text{base}}$.
- 2) Calculer la tension de diffusion de la jonction émetteur-base, V_{dEB} .
- 3) Calculer l'extension de la zone de charge d'espace de la jonction émetteur-base dans la base (x_{pEB}) et dans l'émetteur (x_{nEB}). Donner la valeur de la dimension totale de la zone de charge d'espace de cette jonction $W_{EB} = x_{pEB} + x_{nEB}$. Ce résultat était-il prévisible ?
- 4) Calculer la tension de diffusion de la jonction collecteur-base (PN'), V_{dCB} .
- 5) Calculer l'extension (x_{nCB}) de la zone de charge d'espace de la jonction collecteur-base (PN') du côté collecteur. En déduire l'extension de la zone de charge d'espace côté base (x_{pCB}). Donner la valeur de la dimension totale de la zone de charge d'espace de cette jonction collecteur-base (PN') $W_{CB} = x_{pCB} + x_{nCB}$.
- 6) Déduire des questions précédentes la longueur électrique de la base à l'équilibre thermodynamique.

II. EFFET DE LA POLARISATION COLLECTEUR-BASE

- 1) Exprimer le champ électrique en fonction de la position dans la zone de charge d'espace de la jonction collecteur-base (PN') à l'équilibre thermodynamique. Calculer la valeur du champ électrique maximal E_{max} à la jonction métallurgique.
- 2) On polarise la jonction collecteur-base en inverse. En utilisant les approximations légitimes, exprimer et calculer la tension inverse V_R , correspondant à la désertion complète de la zone N'.

- 3) Exprimer, puis calculer pour cette tension le champ électrique maximal à la jonction.
- 4) Sachant que le phénomène d'avalanche par ionisation par impact se produit dans ce matériau et dans ces conditions pour un champ voisin de $E_{av} = 350 \text{ kV/cm}$, quel devrait être le dopage N_{Cmax} de la couche N^- pour que ce phénomène se produise lorsque cette couche est à la limite d'une désertion complète ? Quelle est la valeur de la tension inverse appliquée correspondante V_{Rav} ? On négligera la variation de la tension de diffusion lors de la modification de dopage.

III. ANALYSE DE LA JONCTION EMETTEUR-BASE

- 1) Les durées de vie des porteurs minoritaires de l'émetteur et de la base sont respectivement de 1 ns et 50 ns. Calculer les longueurs de diffusion dans chacune des zones. Que pouvez-vous en conclure quant au modèle de diode à utiliser pour les deux zones ?
- 2) On polarise en direct la jonction émetteur-base à $V_F = 0,72 \text{ V}$. Calculer l'extension de la zone de charge d'espace de la jonction émetteur-base dans la base (x_{pEB}) et dans l'émetteur (x_{nEB}). Donner la nouvelle valeur de la dimension totale de la zone de charge d'espace de cette jonction $W_{EB} = x_{pEB} + x_{nEB}$. Que constatez-vous par rapport à la valeur calculée à l'équilibre thermodynamique ?
- 3) Calculer les densités de porteurs minoritaires injectés dans l'émetteur et dans la base lorsque la polarisation directe de la jonction émetteur-base est $V_F = 0,72 \text{ V}$. Quelle est la nouvelle largeur électrique de la base lorsque les tensions appliquées aux jonctions émetteur-base et collecteur-base sont respectivement V_F et V_R (cf. II.2).
- 4) Sans tenir compte des zones dépeuplées des jonctions, calculer les courants de saturation I_{sNE} et I_{sPE} . On prendra pour la section du transistor $S = 10^{-4} \text{ cm}^2$. On rappelle que les courants de saturation I_{sNE} et I_{sPE} sont liés à la diffusion des porteurs majoritaires respectivement de l'émetteur dans la base et de la base dans l'émetteur.

IV. ANALYSE DU TRANSISTOR

Le transistor bipolaire est habituellement décrit à partir du modèle d'Ebers-Moll. Dans sa forme la plus simple, ce modèle conduit au schéma équivalent représenté sur la figure 3.

- 1) En utilisant les conventions de signe de la figure 3, montrer que les courants émetteur et collecteur I_E et I_C s'expriment selon les relations :

$$I_E = I_{F0} \left(e^{V_F/V_T} - 1 \right) - \alpha_I I_{R0} \left(e^{V_R/V_T} - 1 \right)$$

$$I_C = -\alpha_N I_{F0} \left(e^{V_F/V_T} - 1 \right) + I_{R0} \left(e^{V_R/V_T} - 1 \right)$$

avec α_N et α_I les gains en courant respectivement dans le sens normal et dans le sens inverse de fonctionnement. On note I_{FO} et I_{RO} les courants de saturation des jonctions émetteur-base et collecteur-base (PN) polarisées respectivement par les tensions V_F et V_R .

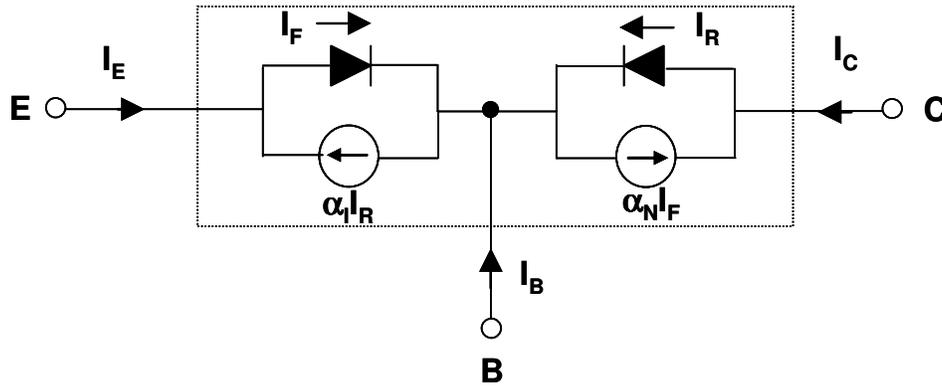


Figure 3

2) Simplifier les expressions précédentes dans le cas où le transistor bipolaire opère en régime normal de fonctionnement.

3) En négligeant tout phénomène de recombinaisons (i.e $I_{snC} = \alpha_N I_{snE} \equiv I_{snE}$), donner les expressions finales des courants I_C , I_E et I_B en fonction de I_{snE} , I_{spE} , V_F et V_T . En déduire les valeurs des gains en courant $\alpha_N = -I_C/I_E$ et $\beta = I_C/I_B$. Expliquer en quelques mots comment évolue le gain en courant β lorsque les zones dépeuplées des jonctions émetteur-base et base-collecteur (PN) ne sont plus négligées. Comment s'appelle cet effet ?

4) Pour quelles raisons les zones latérales de base sont-elles très dopées ?

5) Quelle aurait été la conséquence sur le gain, si la base intrinsèque (partie centrale) avait été dopée comme les zones latérales de base ($2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) ?

6) Evaluer le paramètre hybride $h_{11} = \left. \frac{\partial V_F}{\partial I_B} \right)$ pour $I_B = 10 \mu\text{A}$.

7) Calculer pour $I_C = 1 \text{ mA}$ et $V_{CE} = 5 \text{ V}$ les capacités de transition des jonctions émetteur-base et collecteur-base (PN). Evaluer également la capacité de diffusion de la jonction émetteur-base.



**MATERIAUX ET
NANO TECHNOLOGIES**

**4 MNT
DEVOIR SURVEILLE
PEOS-DEOS**

le mardi 15 janvier 2008
Durée : 2 heures

Formulaire

- **Constantes fondamentales :**

Charge élémentaire de l'électron : $q=1,602 \cdot 10^{-19}$ C

Constante de Boltzmann : $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹

Potentiel thermodynamique : $V_T=26$ mV à 300K

Energie thermique : $kT =26$ meV à 300K

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

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

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

avec n et p les densités d'électrons et de trous, 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.

- **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.

- **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 n_i la densité de porteurs intrinsèques, 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 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 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 ($V = V_F > 0$ ou $V = V_R < 0$ 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**

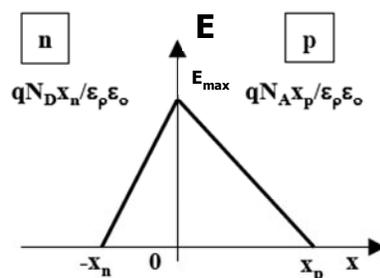
$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q N_D} \frac{N_A}{N_A + N_D} |V_D - V|}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q N_A} \frac{N_D}{N_A + N_D} |V_D - V|}$$

$$W = x_n + x_p \quad N_D x_n = N_A x_p$$

avec $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 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 ($V = V_F > 0$ ou $V = V_R < 0$ suivant la polarisation de la jonction).

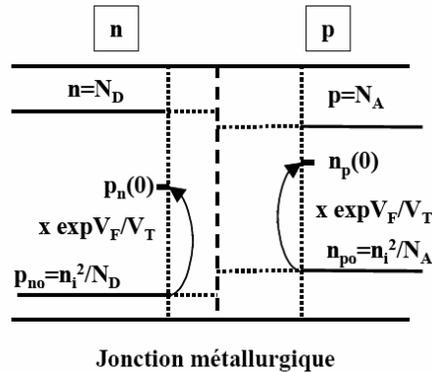
• **Champ électrique dans une jonction PN**



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

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**



- **Equation de la caractéristique d'une diode**

$$I = I_s (e^{V/V_T} - 1) \approx I_s e^{V/V_T} \quad \text{si } V = V_F \gg 3V_T$$

- **Courant de saturation d'une jonction PN courte**

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

avec q la charge élémentaire 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 saturation d'une jonction PN longue**

$$|I_s| = |J_s| S = q S n_i^2 \left[\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right]$$

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.

- **Capacité de diffusion d'une jonction courte P*N**

$$C_d \approx \frac{I}{V_T} \frac{W_N^2}{2D_p}$$

avec I le courant, V_T le potentiel thermodynamique, W_N la dimension de la zone quasi-neutre coté N et D_p le coefficient de diffusion des trous.

- **Capacité de diffusion d'une jonction courte N⁺P**

$$C_d \approx \frac{I}{V_T} \frac{W_P^2}{2D_n}$$

avec I le courant, V_T le potentiel thermodynamique, W_P la dimension de la zone quasi-neutre coté P et D_n le coefficient de diffusion des électrons.

- **Capacité de diffusion d'une jonction longue P⁺N**

$$C_d \approx \frac{I}{2V_T} \tau_p$$

avec I le courant, V_T le potentiel thermodynamique et τ_p la durée de vie des trous.

- **Capacité de diffusion d'une jonction longue N⁺P**

$$C_d \approx \frac{I}{2V_T} \tau_n$$

avec I le courant, V_T le potentiel thermodynamique et τ_n la durée de vie des électrons.