



**MATERIAUX ET**

**NANO TECHNOLOGIES**

**4 MNT  
DEVOIR SURVEILLE  
PEOS-DEOS**

le mardi 06 novembre 2007  
Durée : 1 heure

---

**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 N°I (6 points)**

On considère une jonction pn abrupte au silicium constituée de deux régions homogènes dopées respectivement avec  $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$  accepteurs et  $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$  donateurs. Les longueurs des régions n et p sont de plusieurs dizaines de micromètres. Les mobilités et les durées de vie des porteurs minoritaires sont respectivement  $\mu_n=1540 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ,  $\mu_p=770 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ,  $\tau_n=10^{-10} \text{ s}$  et  $\tau_p=10^{-8} \text{ s}$ . La densité de porteurs intrinsèque du silicium à température ambiante est  $n_i=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . On prendra  $V_T=26 \text{ mV}$  comme valeur du potentiel thermodynamique à 300 K.

- 1) Calculer dans chacune des régions la distance du niveau Fermi au niveau de Fermi intrinsèque.
- 2) Calculer le potentiel de diffusion de la jonction.
- 3) La jonction est polarisée par une tension directe  $V_F=260 \text{ mV}$ , calculer les densités de porteurs minoritaires injectés dans chacune des régions.
- 4) La jonction est maintenant polarisée en inverse par une tension  $V_R=-260 \text{ mV}$ , calculer les densités de porteurs minoritaires aux frontières de la zone de charge d'espace.
- 5) Calculer la densité de courant traversant la jonction pour des polarisations directe et inverse de 260 mV. On négligera les phénomènes de générations-recombinaisons dans la zone de charge d'espace.

**EXERCICE N°II (4 points)**

Une jonction abrupte idéale du type p<sup>+</sup>n courte et de section unité présente les caractéristiques suivantes :

- ⇒ une densité de courant de saturation  $I_s=3 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ,
- ⇒ une concentration d'impuretés dopantes dans la région p<sup>+</sup> :  $N_A=2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,
- ⇒ une profondeur de région N :  $W_N=1 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- ⇒ autres données :  $D_p=10 \text{ cm}^2/\text{s}$  (coefficient de diffusion des trous),  $V_T=26 \text{ mV}$ .

- 1) Sachant que l'on ne connaît pas la nature du semi-conducteur, calculer le potentiel de diffusion de la jonction (on supposera que  $j_p \gg j_n$ ).
- 2) Calculer la concentration  $N_D$  en impuretés dopantes de la région n dans le cas où le matériau semi-conducteur est du silicium, pour lequel  $n_i=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

**EXERCICE N°III (4 points)**

Une jonction abrupte idéale du type  $p^+n$  courte présente les caractéristiques suivantes :

Région p	Région n	Autres données
$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$N_D = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	Aire jonction = $22500 \mu\text{m}^2$
	$\tau_p = \tau = 10^{-5} \text{ s}$	$\epsilon = 10^{-12} \text{ F/cm}$
	$D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$	$V_T = 26 \text{ mV}$
	$W_N = 10 \mu\text{m}$	$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

On a effectué sur cette diode des mesures de capacité :

- A) En polarisation inverse, on a noté une valeur de capacité de transition de 0,75 pF.  
 B) En polarisation directe ( $V_F = 650 \text{ mV}$ ), on a relevé une valeur de capacité de diffusion de 2 nF.

Déterminer à partir de ces deux mesures :

- 1) La valeur de la tension inverse  $V_R$  correspondant à la première mesure de la capacité.
- 2) La valeur du courant de génération  $I_g$  dans la jonction.
- 3) La valeur du courant direct pour la polarisation directe  $V_F = 650 \text{ mV}$ . En déduire la valeur du courant inverse théorique de cette diode.

**EXERCICE N°IV (6 points)**

Après avoir reproduit le tableau ci-dessous sur votre copie, indiquer si les affirmations proposées relatives au transistor bipolaire sont vraies aux fausses. Dans le cas où l'assertion est fausse, proposer une justification en quelques lignes.

	Question 1	Question 2	Question 3	Question 4	Question 5	Question 6
<b>Vrai</b>						
<b>Faux</b>						

1) Le profil de dopage typique d'un transistor bipolaire consiste en un émetteur très dopé, une base moyennement dopée et un collecteur constitué de deux zones (faiblement dopée et très dopée).

2) En régime normal de fonctionnement :

La jonction Emetteur-Base (E-B) d'un transistor bipolaire est polarisée en inverse,  
 La jonction Collecteur-Base (C-B) d'un transistor bipolaire est polarisée en direct.

3) En régime normal de fonctionnement, il y a injection de porteurs depuis la base vers l'émetteur et depuis l'émetteur vers la base

4) En régime normal de fonctionnement, au niveau de la jonction (C-B), les injections de porteurs dues à la polarisation sont très importantes et le champ électrique dans la zone de charge d'espace est faible.

5) L'effet transistor consiste à transférer vers le collecteur la majeure partie des porteurs diffusant de la base dans l'émetteur.

6) L'épaisseur de la base doit être faible par rapport à la longueur de diffusion des porteurs dans la base.



**MATERIAUX ET**

**NANOTECHNOLOGIES**

**4 MNT  
DEVOIR SURVEILLE  
PEOS-DEOS**

le mercredi 06 novembre 2007  
Durée : 1 heure

## 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<sup>-1</sup>

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**

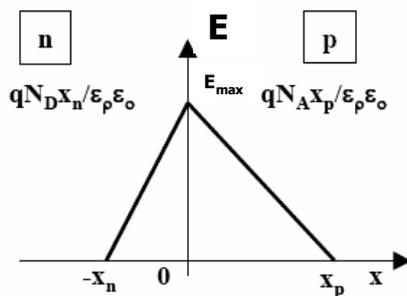
$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q N_D} \frac{N_A}{N_A + N_D} |V_D - V|}$$

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

$$W = x_n + x_p$$

$$N_D x_n = N_A x_p$$

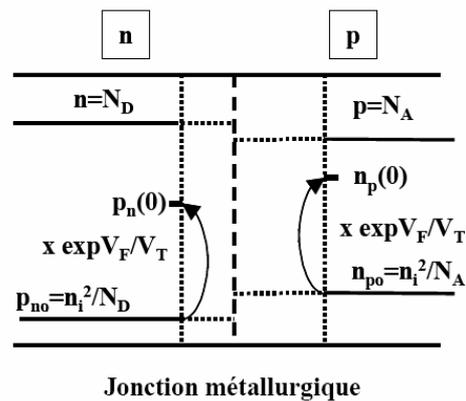
• **Champ électrique dans une jonction PN**



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

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**



- **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**

$$|I_s| = |J_s|S = qSn_i^2 \left[ \frac{D_n}{N_A W_p} + \frac{D_p}{N_D W_n} \right]$$

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**

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

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.

- **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  $\tau$  la durée de vie des porteurs.

- **Capacité de diffusion d'une jonction courte P<sup>+</sup>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 longue P<sup>+</sup>N**

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

avec  $I$  le courant,  $V_T$  le potentiel thermodynamique,  $W_N$  la dimension de la zone quasi-neutre coté N et  $\tau$  la durée de vie des trous.

• **Evolution de la capacité de transition d'une jonction longue P<sup>+</sup>N en fonction de la polarisation inverse**

$$C_T = \frac{C_{T0}}{\sqrt{1 - \frac{V_R}{V_D}}}$$

avec  $C_{T0}$  la capacité de transition à l'équilibre thermodynamique,  $V_D$  le potentiel de diffusion de la jonction et  $V_R$  la polarisation inverse ( $V_R < 0$ ).