GCR1

ANNEE UNIVERSITAIRE 2021/2022

MERCREDI 12/01/2022
Durée : 2H00 ***Documents non autorisés.***
Enseignant responsable : Mr BENZINA.H

Devoir de Synthèse

PHYSIQUE POUR LES COMMUNICATIONS

L'usage de calculatrices standards est autorisé. Les téléphones mobiles ou smartphone sont interdits. Ne pas oublier les unités dans vos calculs sinon ils sont faux ; une réponse parachutée est considérée comme fausse.

I)On considère l'arséniure de gallium (GaAs) à la température ambiante T_o=300K:
La mobilité des électrons : 8,0 10^3 $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$.
La mobilité des trous : 4,0 10^2 $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$.
La concentration intrinsèque : 1,8 10^6 cm^{-3} .
La densité équivalente des états dans la bande de conduction : 4,7 10^{17} cm^{-3} .
La densité équivalente des états dans la bande de valence : 7,0 10^{18} cm^{-3} .
La permittivité relative : 10,9

1°) Calculez (**en eV**) la hauteur de la bande interdite de l'Arséniure de gallium.

2°) Calculez (**en Ω.cm**) à la température ambiante, la résistivité de l'Arséniure de gallium intrinsèque.

3°)

a) Trouver à partir de l'expression de Nc, une expression pour $(m_nkT)^{1/2}$; et une expression pour $(m_pkT)^{1/2}$ à partir de l'expression de Nv,

b) Etablir l'expression de la vitesse thermique quadratique moyenne v_{thn}en fonction de k, Tet $m_n$et l'expression de la vitesse thermique quadratique moyenne v_{thp} en fonction de k, T et m_p**.**

c) Calculer (**en µm**) le libre parcours moyen des porteurs négatifs et des porteurs positifs dans l'Arséniure de gallium intrinsèque à la température ambiante.

4°)On considère un échantillon de GaAs à la température ambiante dont la densité des porteurs positifs est 10^{10} fois plus grande que la densité des porteurs négatifs.

a)Calculez (**en cm^{-3}**) la densité des porteurs positifs et négatifs

b)Déterminez la position du niveau de Fermi (**en eV**) par rapport au maximum de la bande de valence .

c)Calculer la résistivité (**en Ω.cm**) de l'échantillon à la température ambiante.

II)Un matériau semi-conducteur à base de silicium à 300 K est dopé, à la fois avec des atomes de phosphore (P) de concentration 2,1.10^{15} cm^{-3} , qu'avec d'atomes de bore (B) de concentration 1,3.$10^{15}$$cm^{-3}$. (a) Le matériau est-il de type n ou de type p? justifiez votre réponse(b) Déterminer les concentrations à l'équilibre, n_0 et p_0. On prendra n_i=1,45.$10^{10}$$cm^{-3}$.

H.Benzina - GCR- ENIG

(c) Il faut ajouter des atomes de bore pour que la concentration en trous soit de $5.10^{15}cm^{-3}$. Quelle concentration en atomes de bore faut-il ajouter et quelle est la nouvelle valeur de n_0?

III) 1°)Soit une jonction pn abrupte en silicium non polarisée, à l'équilibre à T 300=K avec des concentrations de dopage de $N_A= 2,1.10^{16}\ cm^{-3}$ et $N_D=0,6.10^{16}cm^{-3}$. $n_i=1,45.10^{10}cm^{-3}$. $\varepsilon_r(Si)=11.7$;

1°)a)Etablir l'expression du champ E(x) dans la ZCE du côté p (entre $x=-x_p$ et x=0).

b) Etablir l'expression du champ E(x) dans la ZCE du côté n (entre x=0 et $x=x_n$)

c) Déduire l'expression du minimum de champ E_{min}.

2°)a)Déduire l'expression du potentiel $\psi(x)$.

b)Déduire l'expression du potentiel de barrière V_b.

c) Quelle relation existe-t-il entre E_{min} V_b et et la largeur de la RCE, w.

d)Calculer V_b.

3°)a)Déduire l'expression w en fonction de V_b;

b) Trouver une expression de x_n en fonction de q, ε, V_b N_A et N_D. Puis calculer x_n.

c)Déduire la valeur de x_p.

4°)On applique maintenant une tension inverse V_R. Que devient la relation de la question 3°)

5°)a)Exprimer la quantité charge positive Q dans la RCE en fonction de xn.

b) déduire l'expression de dQ en fonction de dx_n.

c)En vous aidant de 3°)b) trouver l'expression de la capacité de la jonction $Cj=dQ/dV_R$.

d)Calculer Cj. On donne $V_R=6V$.

Bon travail

H Benzina - GCR- ENIG

FORMULAIRE DU MODULE PHYSIQUE POUR LES COMMUNICATIONS

Densité des états d'énergie :

$$\begin{cases} D(E) = 0 & \text{dans la B.I} \\ D_n(E) = 2\pi\left(\dfrac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2}(E-E_C)^{1/2} & \text{dans la BdC} \\ D_p(E) = 2\pi\left(\dfrac{2m_p}{h^2}\right)^{3/2}(E_V-E)^{1/2} & \text{dans la BdC} \end{cases}$$

Fonction de distribution de Fermi-Dirac:

$$F_n(E) = \frac{1}{1+\exp\left[\dfrac{E-E_F}{kT}\right]} \;;\; kT = 0{,}0259\,eV \text{ à } 300K$$

$$\int_0^\infty x^{1/2}e^{-x}dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \;;\; n = N_C \exp-\frac{(E_C-E_F)}{kT}$$

$$p = N_V \exp-\frac{(E_F-E_V)}{kT} \;;\; N_C = \frac{2}{h^3}(2\pi m_n kT)^{3/2}$$

Semiconducteur intrinsèque :

$$E_F = \frac{E_C+E_V}{2} + \frac{kT}{2}\text{Log}\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \;;$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\exp-\frac{E_g}{2kT}$$

Semiconducteur extrintrinsèque :

Cas usuel

Type N : $n_n \approx N_D$; $p_n \approx n_i^2 / N_D$

Type P : $p_p \approx N_A$; $n_p \approx n_i^2 / N_A$

Loi d'action de masse : $np = n_i^2$

Conduction dans les semiconducteurs :

$$\langle E_{cn}\rangle = \frac{3}{2}kT \;;\; l_n = \tau_n v^*_{thn} \;;\; l_p = \tau_p v^*_{thp}$$

$$\vec{v}_{dn} = -\mu_n \vec{E} \;;\; \mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n} \;;$$

$$\vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{E} \;;\; \mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p} \;;$$

Loi d'Ohm microscopique :

$$\vec{J}_c = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} \;;$$

Courant de diffusion pour les électrons:

$$\vec{J}_n(x) = qD_n \vec{\text{grad}}(n)$$

Loi d'Einstein : $\dfrac{D_n}{\mu_n} = \dfrac{D_p}{\mu_p} = \dfrac{kT}{q}$

Cas général pour les trous :

$$\vec{J}_p(x) = \mu_p\left(qp\vec{E} - kT\vec{\text{grad}}(p)\right)$$

Génération- recombinaison des porteurs :

Régime de faible injection

$\Rightarrow \Delta n = \Delta p << N_D$ pour un sc de type N

pour un sc de type N (cas de recombinaison directe), on a :

$$\frac{dp_n}{dt} = G - R = G_L + G_{th} - R = G_L - U;\; U = R - G_{th}$$

U : taux net de recombinaison

En régime stationnaire et de faible injection : $G_L = U = \dfrac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \mu_n \frac{\partial n_p}{\partial x}E + \mu_n n_p \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

JONCTION PN

Equation de Poisson:

$$E = -\frac{d\psi}{dx} \;;\; \frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\rho = (N_D + p - N_A - n)$$

$$p = n_i \exp[(E_i - E_F)/kT]$$

$$n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT] \;;$$

$$\frac{dE_F}{dx} = 0 \;;\; V_{b_i} = \frac{kT}{q}\text{Ln}\frac{N_A N_D}{n_i^2} \;;$$

Hypothèses : Dans la RCE on a : n« et p« ; Dans les régions neutres, on a E=0 ;

Cas d'une jonction abrupte :

$$V_b = \frac{1}{2}E_c w$$

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{qN_D}}$$

H Benzina - GCR- ENIG

Corrigé DS - SC 2021-2022

1) E_g ? $n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \Rightarrow -\frac{E_g}{kT} = \ln \frac{n_i^2}{N_C N_V}$

$\Rightarrow E_g = -kT \ln \frac{n_i^2}{N_C N_V} \Rightarrow E_g = kT \ln\left(\frac{N_C N_V}{n_i^2}\right)$ (II)

A.N $E_g = 1,43168$ eV (II)

2) $\sigma = q n_i (\mu_n + \mu_p) \Rightarrow \rho = \frac{1}{\sigma}$ (I) ; A.N $\rho = 4,1336 \cdot 10^{8}$ ($\Omega \cdot cm$) (II)

3) a) $(m_n kT)^{1/2}$? on a : $N_C = \frac{2}{h^3}(2\pi m_n kT)^{3/2} \Rightarrow h\sqrt[3]{\frac{N_C}{2}} = (2\pi m_n kT)^{1/2}$ (I)

$\Rightarrow (m_n kT)^{1/2} = \frac{h}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{N_C}{2}\right)^{1/3}$; de même, on a : $N_V = \frac{2}{h^3}(2\pi m_p kT)^{3/2} \Rightarrow$ (III)

$(m_p kT)^{1/2} = \frac{h}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{N_V}{2}\right)^{1/3}$ (II)

b) $\frac{1}{2} m_n (v_{th_n})^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v_{th_n} = \sqrt{\frac{3kT}{m_n}}$ (II)

$\frac{1}{2} m_p (v_{th_p})^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v_{th_p} = \sqrt{\frac{3kT}{m_p}}$ (II)

c) $l_n = \tau_n v_{th_n}$ (I) ; sachant que $\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n} \Rightarrow \tau_n = \frac{m_n \mu_n}{q}$ (I)

d'où $l_n = \frac{m_n \mu_n}{q} v_{th_n} = \frac{m_n \mu_n}{q}\sqrt{\frac{3kT}{m_n}} = \frac{\mu_n}{q}\sqrt{3kT m_n}$ (II)

d'après a), $l_n = \frac{\mu_n}{q}\sqrt{3} \times \frac{h}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{N_C}{2}\right)^{1/3}$ (II) A.N $l_n = 14,125\,\mu m$ (II)

Il en est de même pour l_p qui sera

$l_p = \frac{\mu_p}{q}\sqrt{3}\frac{h}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{N_V}{2}\right)^{1/3}$ étant donné que (II)

$l_p = \tau_p v_{th_p}$ (I) et que $\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p}$ (I)

A.N $l_p = 1,738\,\mu m$ (II)

H Benzina - GCR - ENIG

4°) $p = 10^{10} n$ (1)

a) $pn = n_i^2$ (1) $\Rightarrow 10^{10} n^2 = n_i^2 \Rightarrow n = \frac{n_i}{10^5} = 18\ cm^{-3}$ (1) (II)

$p = 10^{10} n \Rightarrow p = 1{,}8\ 10^{11}\ cm^{-3}$ (II)

b) $E_F - E_V$? on a $p = N_V \exp -\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$ (1)

$\Rightarrow \frac{E_F - E_V}{kT} = \ln \frac{p}{N_V} \Rightarrow E_F - E_V = kT \ln \frac{N_V}{p}$ (II)

A.N $E_F - E_V = 0{,}45263\ eV$ (II)

c) $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$; $\rho = \frac{1}{\sigma}$ (II) A.N : $\rho = 8{,}6806\ 10^4\ (\Omega.cm)$ (II)

45 pts

II)

a) $N_D = 2{,}1\ 10^{15}\ cm^{-3}$; $N_A = 1{,}3\ 10^{15}\ cm^{-3}$ (II)

le sc est de type N en effet.

$p \cdot n = n_i^2$ (1)

$q(N_D + p - N_A - n) = 0$ (1) $\Big\} p = n_i^2/n \Rightarrow$

$(N_D - N_A) - n + \frac{n_i^2}{n} = 0 \Rightarrow -n^2 + (N_D - N_A)n + n_i^2 = 0$

$\Delta = (N_D - N_A)^2 + 4n_i^2 \Rightarrow n_{1,2} = \frac{-(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{-2}$

$\Rightarrow n = \frac{+N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2}$ $(N_D - N_A)^2 \gg 4n_i^2$

$\Rightarrow n \simeq N_D - N_A$ (IIII) et $p \simeq \frac{n_i^2}{N_D - N_A}$ (1)

A.N $n = 8.10^{14}\ cm^{-3}$ (II) et $p = 2{,}628\ 10^5\ cm^{-3}$ (II)

c) $P_2 = 5\ 10^{15}\ cm^{-3}$

$P_2 \simeq N_{A_2} - N_D \Rightarrow N_{A_2} = P_2 + N_D = 5\,10^{15} + 2{,}1\,10^{15} = 7{,}1\,10^{15}\ cm^{-3}$ (I)

Il faut ajouter $N_{A_2} - N_A = 7{,}1\,10^{15} - 1{,}3\,10^{15} = 5{,}8\,10^{15}\ cm^{-3}$ (III)

H Benzina - GCR- ENIG

dans ce cas $n_2 = \frac{n_i^2}{p_2} = 42050\ cm^{-3}$ (1) 19pts

---

III) 1°) a) $\operatorname{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \Rightarrow \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon}$ (1)

du côté p $\rho = \begin{cases} -qN_A & \text{pour } -x_p \leq x \leq 0 \\ 0 & \text{pour } -\infty < x \leq -x_p \end{cases}$ (1)

$dE = \frac{\rho}{\varepsilon} dx$ (1) $\Rightarrow \int dE = \int -q\frac{N_A}{\varepsilon} dx \Rightarrow$ (1)

$E(x) = -q\frac{N_A}{\varepsilon} x + cte$; en $x = -x_p \Rightarrow E(x) = 0$ (1)

d'où $E(-x_p) = qN_A\frac{x_p}{\varepsilon} + cte = 0 \Rightarrow cte = -qN_A\frac{x_p}{\varepsilon}$ (1)

d'où $E(x) = -q\frac{N_A}{\varepsilon}(x + x_p)$ (1)

b) du côté n $\rho(x) = \begin{cases} qN_D & \text{pour } 0 \leq x \leq +x_n \\ 0 & \text{pour } x_n \leq x < +\infty \end{cases}$ (1)

$E(x) = -q\frac{N_D}{\varepsilon} x + cte$ (1) ; en $x = +x_n \Rightarrow E(x) = 0$ (1)

d'où $E(+x_n) = qN_D\frac{x_n}{\varepsilon} + cte = 0 \Rightarrow cte = -qN_D\frac{x_n}{\varepsilon}$ (1)

d'où $E(x) = qN_D\frac{(x - x_n)}{\varepsilon}$ (1)

c) Le champ E est maximum (en valeur absolue), en $x = 0$ (1)

$E_{min} = -qN_A\frac{x_p}{\varepsilon} = -qN_D\frac{x_n}{\varepsilon}$ (1)

2°) a) $E = -\frac{d\psi}{dx}$ (1) ; $d\psi = -E(x)dx$ (1)

du côté p : $\psi(x) = +q\frac{N_A}{\varepsilon}\frac{(x + x_p)^2}{2} + cte$ (1)

en $x = -x_p$ $\psi = \psi_p \Rightarrow \psi_p = cte$ (1) (1) $\Rightarrow \psi(x) = +q\frac{N_A}{\varepsilon}\frac{(x + x_p)^2}{2} + \psi_p$ (1)

H Benzina - GSR-ENG

(4)

Dans Zone n $\Psi(x) = -\frac{qN_D}{\varepsilon}\left(x - \frac{x_n}{2}\right)^2 + cte$ (1)

en $x = x_n$ $\Psi = \Psi_n \Rightarrow cte = \Psi_n$ d'où (1) (1)

$$\Psi(x) = -\frac{qN_D}{2\varepsilon}(x - x_n)^2 + \Psi_n$$ (1) (1)

en $x = 0$ $\Psi_-(0) = \Psi_+(0) \Rightarrow + \frac{qN_A}{2\varepsilon} x_p^2 + \Psi_p = \frac{qN_D}{2\varepsilon} x_n^2 + \Psi_n$ (1)

$$V_b = \Psi_n - \Psi_p = \frac{q}{2\varepsilon}\left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2\right)$$ (II)

c) on a vu que $N_A x_p = N_D x_n$ d'où (1)

$$V_b = q\frac{N_A x_p}{2\varepsilon}\left(\underbrace{x_n + x_p}_{W}\right) = \frac{1}{2} E_{max} W$$ (1) (III)

d) $V_b = \frac{kT}{q} L_n \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0{,}025\, L_n \frac{2{,}1.10^{16} \times 0{,}6.10^{16}}{(1{,}45.10^{10})^2}$ (1)

$$V_b = 0{,}7024\ V$$ (II)

3) on $W = x_n + x_p$ et $N_A x_p = N_D x_n \Rightarrow x_n = \frac{N_A}{N_D} x_p$

a) $W = x_p\left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right) \Rightarrow x_p = \frac{W}{1 + \frac{N_A}{N_D}}$ d'où (II)

$$W = \frac{2\varepsilon V_b}{qN_A x_p} = \frac{2\varepsilon V_b}{qN_A \frac{W}{1 + \frac{N_A}{N_D}}} \Rightarrow W^2 = \frac{2\varepsilon V_b (N_A + N_D)}{qN_A N_D}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{q}\left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)}$$ (III)

b) $x_n = \frac{W}{1 + \frac{N_D}{N_A}} \Rightarrow$ (II)

$$x_n = \left[\sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{q}\left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)}\right] \frac{N_A}{(N_A + N_D)}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_b}{q} \frac{N_A}{N_D (N_A + N_D)}}$$ (II) ; A.N $x_n = 3{,}4337.10^{-5}$ cm (1)

H Benzina - GCR-ENIG

$x_p = \frac{N_D}{N_A} x_n$; AN : $x_p = 9{,}8104\ 10^{-6}$ cm

4°) Il suffit, dans ce cas, de remplacer V_b par $V_b + V_R$

5°) a) la grandeur de charge positive Q $\rho = \frac{dq}{dx}$

$dq = \rho dx$ du côté n $dq = q N_D dx_n$

$$Q = q N_D \int_0^{x_n} = q N_D x_n$$

5) $dQ = q N_D dx_n$;

dans 3) b) on a $x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_b+V_R)}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}}$

$$dx_n = \frac{1}{2} \times \frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)} \left(2\varepsilon \frac{(V_b+V_R)}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)} \right)^{-1/2} dV_R$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}} \times \frac{1}{(V_b+V_R)} \, dV_R$$

d'où

$$dQ = q N_D \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)} \frac{1}{(V_b+V_R)} \right)} \, dV_R$$

$$\frac{dQ}{dV_R} = \sqrt{\frac{q\varepsilon}{2} \frac{N_A N_D}{(N_A+N_D)(V_b+V_R)}}$$

H Benzina - GCR ENIG

d) $C_j = 7,596 \quad 10^{-9} F$ (11)

(6)

$136\,\mu s \Rightarrow 1\,\mu t = 0,149$

Προφ $1\,\mu t = 0,225 \Rightarrow$ πολε /30,1Γ

H Benzina - GCR- ENIG