Photodiodes

Exercice 1 *On considère une photodiode PIN à hétérojonction, dans laquelle la couche I est constituée du composé à petit gap $GaInAs$ ($E_g = 0,75\,\mathrm{eV}$) placé entre deux couches à grand gap en InP ($E_g = 1,35\,\mathrm{eV}$). La couche intrinsèque étant éclairée à travers la couche d'InP, dans quel domaine spectral peut-on utiliser cette photodiode ?*

Solution 1

Il faut que la lumière traverse la première couche sans être absorbée dans cette couche. La couche d'InP ($E_g = 1,35\,\mathrm{eV}$) est transparente pour les photons d'énergie $h\nu < 1.35\,\mathrm{eV} \longrightarrow$
$\lambda > \dfrac{1.24}{1.35} = 0.918\,52\,\mu\mathrm{m}$
Mais la lumière est absorbée dans la couche de $GaInAs$ ($E_g = 0,75\,\mathrm{eV}$) si $h\nu > 0.75\,\mathrm{eV} \rightarrow$
$\lambda < \dfrac{1.24}{0.75} = 1.653\,3\,\mu\mathrm{m}$
Alors on peut utiliser la photodiode dans le domaine : $0.92\,\mu\mathrm{m} < \lambda < 1.65\,\mu\mathrm{m}$.

Exercice 2 *L'efficacité quantique d'une photodiode à avalanche, fabriqué à la base d'un semi-conducteur d'énergie de gap* 1.3 *eV, est* 80% *pour la lumière de longueur d'onde* $\lambda = 0.9\mu m$*. Si la puissance optique incidente est* 0.05 mW *l'intensité du courant multiplié est* 1.1 mA
Calculer :

1. *la longueur d'onde de seuil du dispositif,*
2. *la valeur du facteur de multiplication,*
3. *la valeur de la sensibilité spectrale*

Solution 2

1. La longueur d'onde de seuil du dispositif est λ_s telle que $\dfrac{hc}{\lambda_s} = E_g$

   $$\lambda_s = \frac{hc}{E_{g(J)}} = \frac{hc}{eE_{g(eV)}} = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{E_{g(eV)}} \text{ m}$$

   ou $\lambda_{(\mu m)} = \dfrac{1.24}{E_{g(eV)}} = \dfrac{1.24}{1.3} = 0.953\,85\mu m$

   Par définition on a $\eta = \dfrac{I_p h\nu}{eP_i} \Longrightarrow$

   $$I_p = \frac{\eta e\lambda P_i}{hc} = \eta\frac{P_i}{1.24}\lambda_{(\mu m)}$$
   $$= \frac{0.8 \times 0.05 \times 0.9}{1.24} = 2.903\,2 \times 10^{-2} mA$$

2. $M = \dfrac{I_M}{I_p} = \dfrac{1.1}{0.029} = 37.931 \simeq 38$

3. $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_i} = \dfrac{2.903 \times 10^{-2}}{0.05} = 0.580\,6 \text{ A/W}$

Exercice 3 *On considère une photodiode à avalanche d'énergie de gap* $E_g = 1.43\,\mathrm{eV}$

1. *Calculer la longueur d'onde de seuil*
2. *La photodiode reçoit* 3×10^{11} *photons de longueur d'onde* $0.85\mu m$ *sous forme d'une impulsion de durée* $100\ \mu s$*. et fait générer* 1.8×10^{11} *photoélectrons. Calculer la sensibilité spectrale et l'efficacité quantique.*
3. *Si l'intensité du courant sorti est* $6.5mA$*. Calculer le facteur du gain.*

Solution 3

1. $\lambda_{s(\mu m)} = \dfrac{1.24}{E_{g(eV)}} = \dfrac{1.24}{1.43} = 0.867\,13\ \mu m$
2. L'efficacité quantique est $\eta = \dfrac{N_e}{N_p} = \dfrac{1.8}{3} = 0.6 = 60\%$

   $S_\lambda = \eta \dfrac{\lambda_{(\mu m)}}{1.24} = \dfrac{0.6 \times 0.85}{1.24} = 0.411\,29\ \mathrm{A/W}$
3. on a $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_i}$.

   $P_i = \dfrac{E}{\Delta t} = \dfrac{N_p \times hc}{\lambda \Delta t} = \dfrac{3 \times 10^{11} \times 6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{0.85 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^{-6}}$

   $= 6.988\,2 \times 10^{-4} W = 0.698 mW$

   $\Longrightarrow I_p = S_\lambda P_i = 0.411 \times 0.6988 = 0.287\,21\ \mathrm{mA}$

   $M = \dfrac{I_M}{I_p} = \dfrac{6.5}{0.287} = 22.648 \simeq 23$

Exercice 4 *Déterminer l'efficacité quantique d'une photodiode qui fait collecter* $3,6 \times 10^6$ *électrons quand-t-elle reçoit une impulsion lumineuse de* $100\ ns$ *contenant* 6×10^6 *photons chacun d'énergie* $1,53 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$

Solution 4

$\mathrm{N}_e = 3.6 \times 10^6$, $N_p = 6 \times 10^6$ $\Delta t = 100 ns$ $E_p = 1.53 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$.

$\eta = \dfrac{N_e}{N_p} = \dfrac{3.6 \times 10^6}{6 \times 10^6} = 0.6$

$I_p = \dfrac{N_e \times e}{\Delta t} = \dfrac{3.6 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{100 \times 10^{-9}} = 5.76 \times 10^{-6} A = 5.76\ \mu A$

$P_i = \dfrac{N_p \times E_p}{\Delta t} = \dfrac{6 \times 10^6 \times 1.53 \times 10^{-19}}{100 \times 10^{-9}} = 9.18 \times 10^{-6} W = 9.18\ \mu W$

$S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_i} = \dfrac{5.76}{9.18} = 0.627\,45\ \mathrm{A/W}$

Exercice 5 *Une photodiode de sensibilité spectrale* $0.65A/W$*, reçoit des photons d'énergie* $1,53 \times 10^{-19}$ J *chacun et de puissance* $10mW$*. Calculer l'intensité du photo-courant et l'efficacité quantique.*

Solution 5

$I_p = S_\lambda P_i = 0.65 \times 10 = 6.5$ mA

$$E_p = \frac{hc}{\lambda} \implies \lambda = \frac{hc}{E_p} = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.53 \times 10^{-19}}$$

$= 1.298 \times 10^{-6} m = 1.298 \mu m$

$$S_\lambda = \eta \frac{\lambda_{(\mu m)}}{1.24} \implies \eta = \frac{1.24 S_\lambda}{\lambda_{(\mu m)}} = \frac{1.24 \times 0.65}{1.298} = 0.62096$$

Exercice 6 *L'efficacité quantique d'une photodiode à avalanche est 60% pour les photons d'énergie* $1.5 \times 10^{-19} J$

1. *Calculer la puissance optique qui fait générer un photocourant d'intensité* $2.5\mu A$
2. *Que devient l'intensité du photocourant si la puissance incidente devient* 3 *fois plus faible*
3. *Calculer le facteur de multiplication si l'intensité du courant après avalanche* $120\mu A$ *avec la puissance optique incidente est* $4.5\ \mu W$
4. *Calculer la largeur maximale possible de la bande interdite.*

Solution 6

$$E_p = 1.5 \times 10^{-19} J = \frac{1.5 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.9375 \text{ eV}$$

1. $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_i} = \eta \dfrac{\lambda_{(\mu m)}}{1.24} = \dfrac{\eta}{E_{p(eV)}} = \dfrac{0.65}{0.9375} = 0.69333$

   $\implies P_i = \dfrac{I_p}{S_\lambda} = \dfrac{2.5}{0.69333} = 3.6058 \mu W$
2. $P'_i = \dfrac{P_i}{3} \implies I'_p = \dfrac{I_p}{3} = \dfrac{2.5}{3} = 0.83333$

   $I_p = S_\lambda P_i = 0.69333 \times 4.5 = 3.12 \mu A$
3. $M = \dfrac{I_M}{I_p} = \dfrac{120}{3.12} = 38.462$
4. La longueur d'onde utilisée est λ telle que : $\lambda = \dfrac{hc}{E_p} \leq \lambda_s = \dfrac{hc}{E_g} \implies E_g$ doit être $\leq E_p$

Exercice 7 *On considère une photodiode d'efficacité quantique* $\eta = 85\%$ *. Elle reçoit un signal lumineux de* $50\ mW$ *de puissance dont la longueur d'onde est* $\lambda = 1.3\mu m$*.*

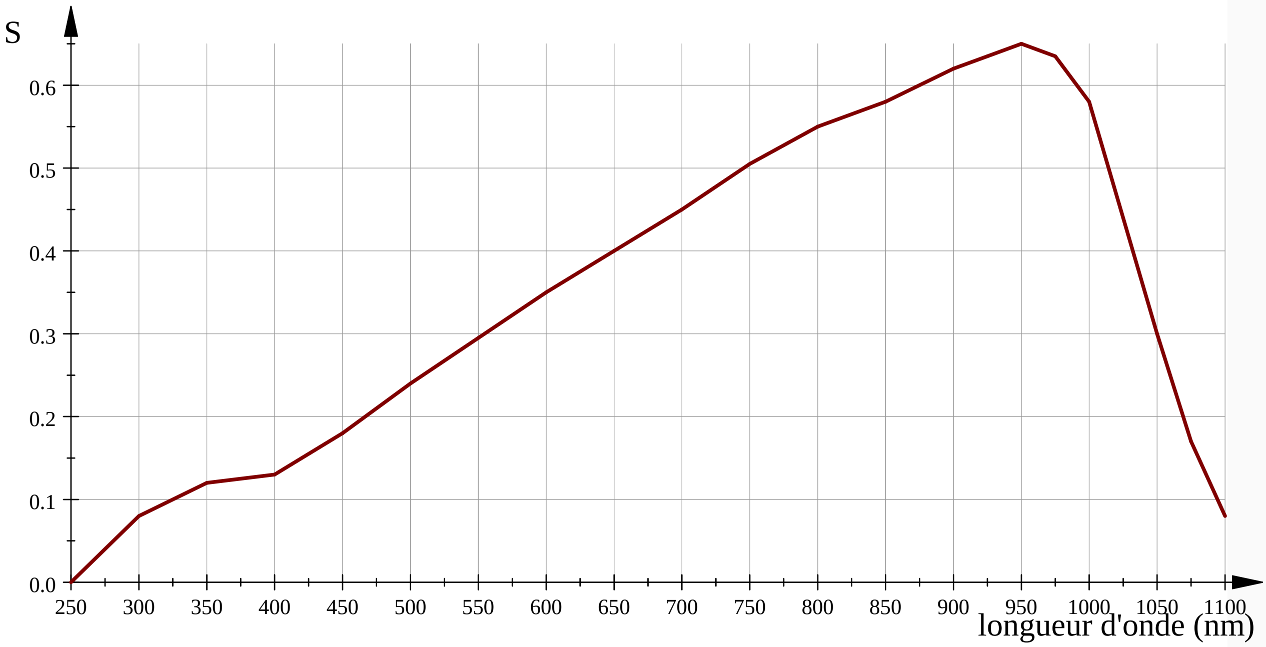
1. *Que doit être la largeur de la bande interdite pour que la photodiode puisse fonctionner avec la longueur d'onde utilisée*
2. *Calculer la sensibilité spectrale et on déduit l'intensité du photocourant généré par la photodiode.*

Solution 7

1. l'énergie de la lumière incidente est $E_p = \dfrac{1.24}{1.3} = 0.953\,85$ eV donc il faut utiliser une photodiode avec une bande interdite de largeur au maximum $E_g = 0.953\text{eV}$
2. $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_i} = \eta\dfrac{\lambda_{(\mu m)}}{1.24} = \dfrac{0.85 \times 1.3}{1.24} = 0.891\,13\ A/W$
   $I_p = S_\lambda P_i = 0.89113 \times 50 = 44.557mA$

Exercice 8 *Trois lasers à semi-conducteurs éclairent simultanément une photodiode PIN en silicium dont la sensibilité spectrale est donnée sur la figure suivante et la surface efficace est* $5.1\,\mathrm{mm}^2$*. Leurs longueurs d'onde d'émission sont respectivement de* $420\,\mathrm{nm}$*,* $850\ \mathrm{nm}$ *et* $1300\,\mathrm{nm}$*. Leurs irradiances respectives sont* $3\,\mathrm{mW/cm^2}$*,* $10\ \mathrm{mW/cm^2}$ *et* $5\,\mathrm{mW/cm^2}$*. Les faisceaux sont suffisamment larges pour couvrir toute la superficie du détecteur.*

1. *Quelle est la responsivité du photodétecteur à chacune de ces longueur d'onde ?*
2. *Quel est le rendement quantique du photodétecteur à chacune de ces longueur d'onde ?*
3. *Quel est le photocourant total ?*



$S(\lambda)$

Solution 8

1. D'après la courbe :
$S_{420} \approx 0.17\,\mathrm{A/W}, \qquad S_{850} \approx 0.6\,\mathrm{A/W}, \qquad S_{1300} = 0\,\mathrm{A/W}$

2. $S_\lambda = \frac{I_p}{P_i} = \eta \frac{\lambda}{1.24} \Longrightarrow \eta = \frac{1.24}{\lambda} S_\lambda$
$S_{420} \approx 0.17\,\mathrm{A/W} \Longrightarrow \eta = \frac{1.24}{0.42} \times 0.17 = 0.501\,9 = 50.2\%$
$S_{850} \approx 0.6\,\mathrm{A/W} \Longrightarrow \eta = \frac{1.24}{0.85} \times 0.6 = 0.875\,29 = 87.5\%$
$S_{1300} = 0\,\mathrm{A/W} \Longrightarrow \eta = 0\%$

3. $Intensité = \frac{Puissance}{Surface}$; $surface = 5.1\,\mathrm{mm}^2 = 5.1 \times 10^{-2}\,\mathrm{cm}^2$
$\Longrightarrow puissance = Intensité \times surface = 5.1 \times 10^{-2} Intensité$
$I_p = S_\lambda P$
$P_{420} = 5.1 \times 10^{-2} \times 3 = 0.153\ \mathrm{mW} \Longrightarrow I_p = 0.17 \times 0.153 = 0.026\,01\,\mathrm{mA}$
$P_{850} = 5.1 \times 10^{-2} \times 10 = 0.51\,\mathrm{mW} \Longrightarrow I_p = 0.6 \times 0.51 = 0.306\ \mathrm{mA}$
$P_{1300} = 5.1 \times 10^{-2} \times 5 = 0.255\ \mathrm{mW} \Longrightarrow I_p = 0 \times 0.255 = 0\,\mathrm{mA}$
$I_{tot} = 0.026\,01 + 0.306 = 0.332\,01$

Exercice 9 *On fabrique une photodiode PIN à la base de GaAs d'indice de réfraction $n = 3,5$. La zone P est de largeur $x_p = 5\mu m$ dont les pertes par absorptions sont équivalentes à $10^5 m^{-1}$. la zone intrinsèque est de largeur $15\mu m$ et le coefficient d'absorption est égale à $5 \times 10^5 m^{-1}$.*

1. *Calculer l'efficacité quantique de diode*
2. *Trouver la potentielle au bornes de la jonction sachant que la zone N est de même largeur que la zone P et $N_D = 10^{20}(m^{-3}), N_A = 10^{19}(m^{-3}),\ \varepsilon = \frac{13.2}{36\pi} 10^{-9}$*
3. *Calculer l'intensité du champ maximal dans la zone P.*

Solution 9

1. $R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{3.5-1}{3.5+1}\right)^2 = .308\,64$
L'efficacité quantique est donnée par :
$\eta = (1-R) \exp(-\alpha_p x_p) (1 - \exp(-\alpha_d x_d))$
$= (1 - 0.30864) \times \exp(-5 \times 10^{-6} \times 10^{-5}) \times (1 - \exp(-5 \times 10^5 \times 15 \times 10^{-6}))$
$= 0.691\,36 \exp\left(-\frac{1}{20\,000\,000\,000}\right) \left(1 - e^{-\frac{15}{2}}\right) = 0.690\,98$

2. La potentielle aux bornes de la photodiode est :
$V_{pin} = -\frac{e}{2\varepsilon} \left[N_D x_n (x_n + x_d) + N_A x_p (x_p + x_d)\right]$
$= \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 36\pi}{2 \times 13.2 \times 10^{-9}} (10^{20} \times 5 \times (5+15) \times 10^{-18} + 10^{19} \times 5 \times (5+15) \times 10^{-18})$
$= 7.539\,8 \times 10^{-6}\ \mathrm{V}$

3. L'intensite du champ maximale dans la zone P :

$$E_M = \frac{eN_A x_p}{\varepsilon} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{19} \times 5 \times 10^{-6}}{13.2 \times 10^{-9}} \times 36\pi$$
$$= 68544.V/m$$

Exercice 10 *Le facteur de multiplication du courant électronique d'une photodiode à avalanche est donné par :* $M = \dfrac{(1-k)\exp\left[\alpha_n x_a (1-k)\right]}{1 - k\exp\left[\alpha_n x_a (1-k)\right]}$ *avec* α_n *le coefficient d'ionisation des électron,* α_p *celui des trous,* $k = \alpha_p/\alpha_n$ *. et* x_a *la largeur de la zone d'avalanche. Calculer* Mn *si* $\alpha_n = 2,46 \times 10^5 m^{-1}$ *et* $x_a = 10\mu m$ *dans les deux cas :* $k = 1$ *et* $k << 1$

Solution 10

Si $k << 1 \Longrightarrow 1 - k \approx 1$

$$\Longrightarrow \frac{(1-k)\exp(\alpha_n x_a (1-k))}{1 - k\exp(\alpha_n x_a (1-k))} \approx \frac{\exp(\alpha_n x_a)}{1 - k\exp(\alpha_n x_a)} \approx \exp(\alpha_n x_n)$$
$$= \exp\left(2.46 \times 10^5 \times 10 \times 10^{-6}\right) = 11.705$$

Si $k \to 1 \Longrightarrow 1 - k \to 0$;

soit $X = (1-k)\alpha_n x_a \to 0 \Longrightarrow e^X \approx 1 + X$

$$\Longrightarrow M = \frac{(1-k)e^X}{1 - ke^X} \approx \frac{(1-k)(1+X)}{1 - k(1+X)} = \frac{(1-k)(1+X)}{1 - k - kX}$$
$$= \frac{(1-k)(1 + (1-k)\alpha_n x_a)}{1 - k - k(1-k)\alpha_n x_a} = \frac{(1-k)(1 + (1-k)\alpha_n x_a)}{(1-k)(1 - k\alpha_n x_a)}$$
$$= \frac{1 + (1-k)\alpha_n x_a}{1 - k\alpha_n x_a}$$

alors si $k \to 1 \Longrightarrow (1-k)\alpha_n x_a \to 0$

$$\Longrightarrow M \to \frac{1}{1 - \alpha_n x_a} = \frac{1}{1 - 2.46 \times 10^5 \times 10 \times 10^{-6}}$$
$$= -0.68493$$

Exercice 11 *On fabrique une photodiode à GaAs d'énergie de gap* $E_g = 1.43\ eV$ *à* 300 K, *d'indice de réfraction* $n = 3.5$ *. Le coefficient d'absorption à la longueur d'onde* $\lambda = 0.85\mu m$ *est* $\alpha_s = 10^5 m^{-1}$*, la largeur de la zone désertée est* $w_d = 10\mu m$*, la photodiode reçoit des photons du côté de la zone* P *de largeur :* $w_p = 10\mu m$

1. *Quelle est la longueur d'onde de seuil de cette photodiode.*
2. *Etablir l'expression de l'efficacité quantique en fonction de* α_s, w_d, w_p *et* n *. Calculer sa valeur numérique.*
3. *Définir la sensibilité spectrale de photodiode et calculer sa valeur numérique et en déduire l'intensité du photocourant généré en absorbant la puissance optique de* $3mW$*.*
4. *On désigne par* N_D *et* N_A *les densités des atomes donneurs et accepteurs dans la jonction. Le champ électrique est* $E = E(x)$ *;* $\dfrac{dE}{dx} = -\dfrac{d^2V}{dx^2} = \dfrac{\rho}{\varepsilon}$*,* ρ *la densité des charges électriques et* ε *la permitivité diélectrique. La zone désertée de largeur* w_d *est constituée de la zone désertée de la région* P *de largeur* x_p *;* $0 \le x \le x_p$ *et de celle de la région* n *de largeur* x_n *;* $-x_n \le x \le 0$ *et* $w_d = x_n + x_p$

(a) *Calculer l'intensité du champ électrique* $E_n(x)$ *dans la zone* N *en un point d'abscisse* x *en fonction de* e, N_D, ε, x_n.

(b) *Trouver l'expression analogue* $E_p(x)$ *pour la zone* P. *En déduire la différence de potentiel aux bornes de la jonction.*

(c) *Si* $N_D = 10^{22}(m^{-3})$ *et* $N_A = 10^{21}(m^{-1})$ *et pour un champ maximal* $E_M = 10^7 V/m$ *Calculer* w_d *et la difference de potentiel aux bornes de la jonction.*

On donne $\varepsilon = 1.1687 \times 10^{-10}$ F$/m$

Solution 11

1. La photodiode de largeur de bande interdite E_g est sensible aux photons d'énergie $\hbar\omega \geq E_g$ ou $\dfrac{hc}{\lambda} \geq E_g \Longrightarrow \lambda \leq \dfrac{hc}{E_g} = \dfrac{1.24}{E_g}$ E_g en eV et λ en μm
$\lambda_s = \dfrac{1.24}{E_g} = \dfrac{1.24}{1.43} = 0.86713\mu m$

2. On désigne par P_0 la puissance incidente sur la zone P une partie de cette puissance subit une réflexion partielle sur le dioptre air-semiconducteur de réflexivité
$R = \left(\dfrac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\dfrac{3.5-1}{3.5+1}\right)^2 = 0.30864$.
La puissance émergente dans la région P est $(1-R)\,P_0$, en traversant la distance w_p la puissance devient $(1-R)\,P_0 \exp(-\alpha_s w_p)$, et entraversant la zone désertée la puissance devient :
$(1-R)\,P_0 \exp(-\alpha_s w_p) \exp(-\alpha_s w_d)$
donc la puissance absorbée dans la zone désertée et qui se transforme en courant est donc :
$P_u = (1-R)\,P_0 \exp(-\alpha_s w_p)\,[1-\exp(-\alpha_s w_d)]$
d'où l'efficacité quantique
$\eta = \dfrac{P_u}{P_0} = (1-R)\exp(-\alpha_s w_p)\,[1-\exp(-\alpha_s w_d)]$
$= (1-0.30864) \times \exp(-10^5 \times 10 \times 10^{-6}) \times [1-\exp(-10^5 \times 10 \times 10^{-6})]$
$= 0.69136 e^{-1}\,[1-e^{-1}] = 0.161$

3. La sensibilité spectrale d'une photodiode représente le photocourant généré I_p par unité de puissance incidente P_i :
$S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_i} = \eta\dfrac{\lambda}{1.24} = 0.161\dfrac{0.85}{1.24} = 0.11036$ A/W
$I_p = S_\lambda P_i = 0.11036 \times 3 = 0.33108$ mA

4. On a : $\dfrac{dE_n}{dx} = \dfrac{\rho}{\varepsilon} = \dfrac{eN_D}{\varepsilon}$

   (a) En intégrant entre $x = -x_n$ et x on obtient :
   $E_n(x) = \displaystyle\int_{-x_n}^{x} \frac{eN_D}{\varepsilon}dx = eN_D\frac{x+x_n}{\varepsilon} = E_M\left(1+\frac{x}{x_n}\right)$
   avec $E_M = \dfrac{eN_D x_n}{\varepsilon}$. et $-x_n \leq x \leq 0$

(b) de même on trouve

$$E_p(x) = \int_x^{x_p} \frac{eN_A}{\varepsilon} dx = -eN_A \frac{-x_p + x}{\varepsilon}$$

$$\frac{dV}{dx} = -E(x) \Longrightarrow$$

$$V = -\int_{-x_n}^{0} eN_D \frac{x + x_n}{\varepsilon} dx - \int_0^{x_p} -eN_A \frac{-x_p + x}{\varepsilon} dx$$

$$= -\frac{e}{2\varepsilon}\left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2\right)$$

(c) Dans la région N :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{eN_D}{\varepsilon} = \frac{1.60217733 \times 10^{-19} \times 10^{22}}{13.2 \times 8.854187817 \times 10^{-12}} = 1.3708 \times 10^{13} \text{ V/m}^2$$

$$E_M = \frac{eN_D x_n}{\varepsilon} \Longrightarrow x_n = \frac{\varepsilon E_M}{eN_D} = \frac{E_M}{dE/dx}$$

$$= \frac{10^7}{1.3708 \times 10^{13}} = 7.295 \times 10^{-7}\text{M} = 0.7295\,\mu\text{m}.$$

Dans la région P :

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{eN_A}{\varepsilon} = -\frac{1.60217733 \times 10^{-19} \times 10^{21}}{13.2 \times 8.854187817 \times 10^{-12}}$$

$$= -1.3708 \times 10^{12} \text{ V/M}^2.$$

$$x_p = \frac{E_M}{dE/dx} = \frac{10^7}{1.3708 \times 10^{12}} = 7.295 \times 10^{-6}\text{m} = 7.295\,\mu\text{m}$$

La largeur de la zone de déplétion est

$$w_d = x_p + x_n = 7.295 + 0.7295 = 8.0245\mu\text{m}.$$

$$V = -\frac{e}{2\varepsilon}\left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2\right)$$

$$= \frac{-1.60217733 \times 10^{-19}}{2 \times 13.2 \times 8.854187817 \times 10^{-12}}\left(10^{22} \times (7.295 \times 10^{-7})^2 + 10^{21} \times (7.295 \times 10^{-6})^2\right)$$

$$= -40.124\,\text{V}.$$