Institut des Sciences Appliquées et Economiques
Cnam Liban

le cnam

Télécommunication optique (ELE107)

Examen Final 2015-2016 - Semestre II Durée : 2h :00

Documents et téléphones : STRICTEMENT INTERDITS

Exercice 1 (15 points) **Répondre très brièvement aux questions suivantes :**

1. Quelle est le principe du fonctionnement d'une photodiode.$(2pts)$
2. Quelle est l'avantage d'une photodiode à avalanche ?.$(2pts)$
3. Quelle est l'influence de la dispersion sur la qualité de transmission dans fibre optique ?$(2pts)$
4. Quelles sont les deux grandes catégories des fibres optiques ?$(2pts)$
5. Quelles sont les causes principales de dégradation du signal dans une fibre optique ?$(2pts)$
6. Quelle est la différence entre la vitesse de groupe et la vitesse de phase.$(2pts)$
7. Citez 3 avantages de la fibre optique $(3pts)$

Solution 1

1. Conversion de l'énergie optique en énergie électrique
2. Amplification interne.
3. La dispersion limite la bande passante de la fibre.
4. Les deux grandes catégories des fibres optiques : monomode et multimode.
5. Les causes principales de dégradation du signal dans une fibre optique sont : l'atténuation et la dispersion.
6. La vitesse de groupe est celle du paquet d'onde (de l'enveloppe) et la vitesse de phase est la vitesse d'une onde unique.
7. Pertes faibles, Large bande passante, Immunité au bruit, Absence de rayonnement vers l'extérieur, Absence de diaphonie, Isolation électrique, Résistance aux températures élevées et aux produits corrosifs, Poids et dimensions réduites

Exercice 2 (35 points) On considère une photodiode PIN à hétérojonction, dans laquelle la couche intrinsèque est constituée du composé à petit gap $GaInAs$ $(E_g = 0.75\,\text{eV}, n = 3.5)$ de largeur $x_i = 5\,\mu\text{m}$,de coefficient d'absorption de α_i placée entre deux couches à grand gap en InP : $(E_g = 1.35\,\text{eV}, n' = 3.2)$, largeur x_p et de coefficient d'absorption α_p,

1. Dans quel domaine spectral peut-on utiliser cette photodiode pour avoir une efficacité quantique maximale.
2. La couche intrinsèque étant éclairée à travers la couche d'InP.
   (a) Etablire l'expression de l'efficacité quantique η de la photodiode en fonction de $x_i, \alpha_i, x_p, \alpha_p$

(b) La photodiode reçoit la lumière laser de longueur d'onde $\lambda = 1.15\,\mu$m pour laquelle le coefficient d'absorption de $GaInAs$ est équivalant à $\alpha_i = 5 \times 10^5\,\text{m}^{-1}$.Calculer la valeur numérique de η.

3. Définir la sensibilité spectrale, et calculer sa valeur pour la longueur d'onde utilisée.
4. Quelle est l'intensité du photocourant généré si la puissance incidente est d'ordre de 50 μW.

Solution 2

1. L'efficacité quantique est maximale si la zone InP est transparante et que le max d'absorption dans la zone intrinsèque par suite

   la zone InP est transparante si l'énergie du photon incident est $E_p = \dfrac{1.24}{\lambda_{(\mu\text{m})}} < E_{g(InP)(\text{eV})}$

   donc si $\lambda > \dfrac{1.24}{E_g} = \dfrac{1.24}{1.35} = 0.918\,52\,\mu$m **5 points**

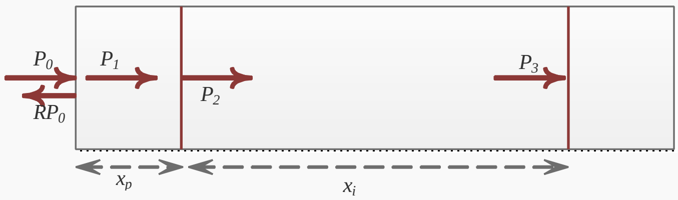
   d'autre part le photon est absorbé dans la zone I si son énergie est $> E_{g(GaInAs)}$ c.à.d. si $\lambda \leq \dfrac{1.24}{0.75} = 1.653\ \mu$m **5 points**

   alors le domaine spectral qui donne une efficacité quantique maximale est tella que :

$$0.918\,52\,\mu\text{m} < \lambda < 1.6533\,\mu\text{m}$$

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

$$R = \left(\frac{n'-1}{n'+1}\right)^2 = \left(\frac{3.2-1}{3.2+1}\right)^2 = 0.275$$



   (a) La puissance émergente dans la région P est $P_1 = (1-R)\,P_0$, en traversant la distance x_p la puissance devient $P_2 = (1-R)\,P_0 \exp\left(-\alpha_p x_p\right)$, et en traversant la zone désertée la puissance devient : $P_3 = (1-R)\,P_0 \exp\left(-\alpha_p x_p\right) \exp\left(-\alpha_i x_i\right)$ **5 points**

   donc la puissance absorbée dans la zone désertée et qui se transforme en courant est donc : $P_u = P_3 - P_1 = (1-R)\,P_0 \exp\left(-\alpha_p x_p\right)\left[1 - \exp\left(-\alpha_i x_i\right)\right]$ d'où l'efficacité quantique **5 points**

$$\eta = \frac{P_u}{P_0} = (1-R)\exp\left(-\alpha_p x_p\right)\left(1 - \exp\left(-\alpha_i x_i\right)\right)$$

   (b) Pour $\lambda = 1.15\,\mu$m la zone InP est transparante c-à-d. $\alpha_p = 0$ donc :
   $\eta = (1-R)\left(1 - \exp\left(-\alpha_i x_i\right)\right) = (1-0.275)\left(1 - e^{-2.5}\right) \simeq 0.665 \simeq 66.5\%$ **5 points**
   on a $\alpha_i x_i = \left(5 \times 10^5\right)\left(5 \times 10^{-6}\right) = 2.5$

3. La sensibilité spectrale d'une photodiode représente le photocourant généré I_p par unité de puissance incidente P_i : **5 points**

   $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_i} = \eta\dfrac{\lambda}{1.24} = 0.665\dfrac{1.15}{1.24} \simeq 0.62\ \text{A/W}$ **3 points**

4. $I_p = S_\lambda P_i = 0.62 \times 50 = 31\ \mu$A **2 points**

Exercice 3 (25 points) Soit une fibre optique à profil parabolique de l'indice de réfraction du coeur. Au voisinage de l'axe l'indice vaut $n_1 = 1.5$, l'indice de gaine est $n_2 = 1.35$ le diamètre du coeur est $2a = 90\,\mu$m

1. Etablir la formule de l'ouverture numérique et calculer sa valeur numérique et la valeur de l'angle d'acceptance avec la longueur d'onde $\lambda = 1.15\,\mu$m .
2. Calculer le nombre des modes guidés dans la fibre pour la longueur d'onde $\lambda = 1.15\,\mu$m
3. Calculer les valeurs de l'élargissement temporel dû à la dispersion intermodale. Pourquoi peut-on négliger la dispersion chromatique devant la dispersion intermodal ?

Exercice 4 (15 points) On considère une photodiode de bande passante $\Delta f = 5\,$MHz et fonctionnant à la longueur d'onde $\lambda = 1\,\mu$m. On suppose que l'efficacité quantique de photodiode $\eta = 90\%$.

1. Trouver l'intensité du photocourant en fonction de la puissance optique incidente.
2. Calculer la puissance optique incidente nécessaire pour telle photodiode pour avoir un rapport signal-bruit de 50 dB (on neglige le bruit thermique et le bruit d'obscurité).

Exercice 5 (10 points) :

1. Quelles sont les sortes de pertes à l'interface émetteur fibre ? et à l'interface fibre-fibre ?
2. Faire le bilan de puissance et de calculer la distance maximale d'un système de transmission par fibre optique fonctionnant à la longueur d'onde de 1.3 μm à 100 $Mb/$ s.

   La puissance moyenne injectée dans la fibre est de 0.1 mW. Supposons que les pertes dans le fibres sont de 1dB/ km, les pertes de liaison fibre-fibre sont de 0.2 dB tous les 2 km, et les pertes au niveau source et récepteur sont de 1dB chacun. Sachant que la sensibilité du récepteur est 100 nW. Laisser la marge du système 6 dB.

Formulaires

Optique physique, Guide d'onde plan :

1. Coefficients de réflexion et de transmission
   $r_{\perp} = \frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2}$
   $r_{//} = \frac{n_1 \cos\theta_2 - n_2 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_2 + n_2 \cos\theta_1}$
   $t_{//} = \frac{2 n_1 \cos\theta_1}{n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2}$
   $t_{\perp} = \frac{2 n_1 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2}$
2. Constante de propagation
   $\beta = kn \sin\theta$
   $\beta_m = \sqrt{k^2 n^2 - (m+1)^2 \frac{\pi^2}{h^2}}$
3. Ordre maximal des modes guidés
   $M = \frac{V}{\pi}$
   $V = \frac{2\pi h}{\lambda}\sqrt{n^2 - n_2^2}$
4. Décalage de Goos-Hänschen
   $z_i = \frac{\tan\theta}{k\sqrt{n^2 \sin^2\theta - n_i^2}}$
   $x_m = \frac{1}{\sqrt{\beta_m^2 - k^2 n_i^2}}$
5. Relation de dispersion $k^2 = \varepsilon \mu_0 \omega^2$
6. Différence de marche optique : $2kh\cos\theta$

Fibre optique :

1. Profil et Différence d'indice
   (a) $n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}}$
   (b) $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$
2. Ouverture Numérique : $ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$
3. Nombre de modes
   (a) $N = \frac{V^2}{2}\frac{\alpha}{\alpha+2}$
   (b) monomode pour $V < 2.405$
4. Coefficient d'atténuation $\alpha = \frac{10}{L}\log\left(\frac{P_s}{P_i}\right)$
5. Groupe d'onde
   (a) Vitesse $v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$
   (b) Indice $N_g = \frac{c}{v_g} = n - \lambda\frac{dn}{d\lambda}$
   (c) La différence de transit $\Delta\tau = \frac{d\tau}{d\lambda}\Delta\lambda$
6. Dispersion
   (a) intermodale $\Delta\tau_n = \frac{L}{2cn_1}(ON)^2$
   (b) du matériau $\Delta\tau_m = M_d L \Delta\lambda$
   $M_d = -\frac{\lambda}{c}\frac{d^2 n}{d\lambda^2}$

Atomique, Constantes Physiques :

Formule de Ritz : $\frac{1}{\lambda_n} = R\left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2}\right)$
Moment cinétique quantifié $mvr = n\hbar$
Force centrifuge $= \frac{mv^2}{r}$
Force de Coulombe $\overrightarrow{F} = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\overrightarrow{r}$
Rayon de Bohr : $r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0 n^2 \hbar^2}{me^2}$
Constante de Rydberg $R = \frac{me^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2 hc}$

$R \simeq 1.09 \times 10^7\ \mathrm{m^{-1}}$
Constante de Planck : $h = 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\,s}$
Célérité dans le vide : $c = 3 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$
Charge de l'électron : $e = 1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$
Masse de l'électron : $m = 9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$
$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{F\,m^{-1}}$
$1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \mathrm{m}$

Photodiode :

1. Sensibilité : $S_\lambda = \eta\frac{\lambda}{1.24}$
2. Efficacité quantique :
   (a) $\eta = (1-R)\,e^{-\alpha_s w_p}\left(1 - e^{-\alpha_s w_d}\right)$
   (b) $\eta = \frac{I_p h\nu}{eP_i}$
3. Tension $V = -\frac{e}{2\varepsilon}\left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2\right)$
4. Facteur de multiplication
   $M_n = \frac{I_n(x_d)}{I_{no}} = \frac{1}{1 - \alpha.x_d}$

Diode Laser :

1. Le rendement quantique : $\eta_i = \frac{R_r}{R_r+R_{nr}}$
2. Gain de seuil : $g_s = \alpha_i + \frac{1}{L}\ln\frac{1}{R}$
3. Condition de résonance : $2nL = m\lambda$
4. Durée de vie du photon : $\tau_p = \frac{n}{cg_s}$
5. Efficacité quantique :
   (a) différentielle : $\eta_d = \frac{1}{E_g}\frac{\Delta P}{\Delta I}$
   (b) interne : $\eta_i = \eta_d \frac{\alpha_i+\alpha_m}{\alpha_m}$
   (c) externe : $\eta_{ext} = \frac{P}{IE_g} = \eta_d\left(1-\frac{I_s}{I}\right)$
6. Courant de seuil :
   (a) $\phi_s = \frac{\tau_p}{ed}(J-J_s)$
   (b) $N_s = \frac{8\pi\nu_0^2 n^2\tau_e\Delta\nu}{c^2}\left(\alpha_i+\frac{1}{L}\ln\frac{1}{R}\right)$
   (c) $J_s = \frac{8\pi cen^2}{\lambda^4\eta_i}d\Delta\lambda\left(\alpha_i+\frac{1}{L}\ln\frac{1}{R}\right)$
   (d) $I_s = I_0\exp\left(\frac{T}{T_0}\right)$
7. La puissance
   (a) interne $P_i = \eta_i\frac{\hbar\omega}{e}(I-I_s)$
   (b) sortie : $P_e = \frac{P_i}{2}\frac{\alpha_m}{\alpha_i+\alpha_m}$
8. délais de polarisation :
   (a) $t_d = \tau_e\ln\frac{I_0}{I_0-I_s}$
   (b) $t_d = \tau_e\ln\frac{I_0-I_p}{I_0-I_s}$
9. DEL :
   (a) puissance interne : $P_i = \eta_i E_g I$
   (b) puissance externe$P_e = \eta_e P_i$
   (c) $\eta_e \approx \frac{1}{n(1+n)^2}$
   (d) $I(\theta) = I_0\cos\theta$
   (e) $\phi = 2\pi\int_0^{\theta\ell} I(\theta)\sin\theta d\theta$

Systèmes de transmissions

1. Bilan d'énergie : $\alpha_t = 10.\log\left(\frac{P_r}{P_e}\right)$
   $= \alpha_{ef} + \alpha_{fo} + N.\alpha_{ff} + \alpha_{fr} + M$
   (a) $\alpha_{ef} = \alpha_{ON} + \alpha_g + \alpha_F + \alpha_S$
      i. $\alpha_{ON} = 20\log\left(\frac{ON_e}{ON_f}\right)$
      ii. $\alpha_S = 20\log\left(\frac{S_e}{S_f}\right)$
      iii. $\alpha_g = 10.\log\left(\frac{1+\frac{2}{\alpha_f}}{1+\frac{2}{\alpha_e}}\right)$
      iv. $\alpha_F = 10.\log\left(\frac{4n_f}{(n_f+1)^2}\frac{(n_e+1)^2}{4n_e}\right)$
   (b) $\alpha_{ff} = \alpha_{ON} + \alpha_g + 2\alpha_F + \alpha_S + \alpha_{con}$
2. Bilan de dispersion
   $\Delta\tau_t = \sqrt{\Delta\tau_m^2 + \Delta\tau_n^2 + \Delta\tau_d^2 + \Delta\tau_r^2}$
3. bruits
   (a) thermique : $\langle i_{th}^2\rangle = \frac{4kT}{R_L}\Delta f$
   (b) d'obscurité : $\langle i_o^2\rangle = 2.e.\Delta f.I_o$
   $I_o = I_s.\exp\left(\frac{qV_d}{kT}-1\right)$
   (c) Schottky : $\langle i_q^2\rangle = 2.e.\Delta f.I_p$
4. Rapport signal à bruit : $\frac{S}{N} = \frac{\langle I_p^2\rangle}{\langle i_q^2\rangle + \langle i_o^2\rangle + \langle i_{th}^2\rangle}$
5. Probabilité d'erreur :
   $P_e = P(1)\times P(0/1) + P(0)\times P(1/0)$
   (a) $P(0/1) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{|i_S - i_d|}{\sqrt{2\langle i_N^2\rangle}}\right)$
   (b) $P(1/0) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{|-i_d|}{\sqrt{2\langle i_N^2\rangle}}\right)$
   (c) si $i_d = \frac{i_S}{2}$
      i. $P_e = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{i_S}{2\sqrt{2\langle i_N^2\rangle}}\right)$
      ii. $P_e = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{S/N}}{2\sqrt{2}}\right)$
   (d) Facteur de qualité
      i. $P_e(Q) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{\sqrt{2\pi}Q}$
      ii. $Q = \sqrt{\frac{(i-i_S)^2}{2\langle i_N^2\rangle}}$
6. Capacité d'information $C = B\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right)$