

Télécommunication optique (ELE107)
Examen Final 2009-2010 sem.2
SOLUTIONS

Exercice 1 ($16 \times \frac{1}{4} = 4$ points) *Questions de compréhensions générales*

1. Quelles sont les 2 aspects physiques de la lumière?

Réponse. Ondulatoire et corpusculaire ■

2. Quelle est la différence entre la vibration et l'onde?

Réponse. L'onde est une vibration qui se propage dans l'espace ■

3. Une onde caractérisée par la fonction de la forme

$$u(r, t) = \frac{u_0}{\sqrt{1 + x^2 + y^2 - z^2}} \exp\left(-j\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}\right)$$

est-elle harmonique.?

Réponse. Oui car c'est la forme complexe de l'écriture en sinus ou cosinus. ■

4. Quelle est la relation entre la puissance optique et l'intensité de la lumière.?

Réponse. l'intensité de la lumière est la puissance optique par unité de surface. ■

5. Quelle est la polarisation d'une onde électromagnétique, qui se propage dans un guide d'onde planaire, dont le plan de propagation est le plan (xOz) et les vecteurs du champ électromagnétique sont tels que: $\vec{E}(E_x, 0, E_z)$ et $\vec{H}(0, H_y, 0)$?

Réponse. c'est une onde TM ■

6. Quelle est la particularité de l'angle de Brewster?

Réponse. L'angle de Brewster est $\theta_B = \arctan(n_1/n_2)$, pour lequel les ondes transmises et réfléchies sont des polarisations différentes. ■

7. Quelle est l'influence de la dispersion sur la qualité de transmission dans fibre optique?

Réponse. La dispersion limite la bande passante ■

8. Quelle est l'importance de la condition de synchronisation de phase?

Réponse. Les ondes qui se propagent en vérifiant la C.S.P. ne se déforment pas ■

9. Quelle est la différence entre les fibres à saut d'indice et celles à gradient d'indice.

Réponse. fibres à saut d'indice: indice du coeur constant, trajet en ZigZag, fibre à gradient d'indice: indice du coeur variable en fonction de la distance à l'axe, trajet sinusoidal ■

10. Citez 3 avantages de la fibre optique

Réponse. 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 ■

11. Que veut dire Bande de Valence.? Bande de Conduction?

Réponse. Bande de Valence : la dernière bande pleine, Bande de Conduction: la première bande vide ■

12. Comment on distingue les conducteurs, semi-conducteurs et le isolants?

Réponse. Par la largeur de la bande interdite ■

13. Comment on détermine expérimentalement que les niveaux d'énergie des atomes sont discrets?

Réponse. D'après le spectre d'émission ■

14. D'où vient le mot LASER.

Réponse. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ■

15. Quelle est le principe du fonctionnement d'une photodiode

Réponse. Conversion de l'énergie optique en énergie électrique ■

16. Quelle est l'avantage d'une photodiode à avalanche?

Réponse. Amplification interne ■

Exercice 2 (8 points) *On transmet sur une même fibre optique:*

- Dans un sens, un signal vidéo en bande de base (6 MHz), en utilisant à l'émission une diode laser à $\lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$ couplant une puissance optique de 1 mW, à la réception une photodiode de sensibilité spectrale $S_\lambda = 0.8 \text{ A/W}$

- Dans l'autre sens, des données à bas débit, en utilisant à l'émission une diode laser à $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$ couplant une puissance optique de 0.6 mW, à la réception une photodiode de sensibilité spectrale $S_\lambda = 0.5 \text{ A/W}$

La fibre optique a pour caractéristiques :

Longueur: $L = 20 \text{ km}$, Rayon du cœur: $a = 10 \mu\text{m}$, ouverture numérique; $ON = 0.38$, différence relative des indices: $\Delta = 3.3\%$, et :

	à $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$	à $\lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$
<i>Atténuation intrinsèque</i>	2.5 dB/km	0.6 dB/km
<i>Disperssion chromatique</i>	100 ps nm ⁻¹ km ⁻¹	2 ps nm ⁻¹ km ⁻¹

le cablage de la fibre ajoute des atténuations par microcourbures de 0.05dB/km et il y a tous les 5 km des copleurs, chacune introduit de plus une atténuation maximale 0.2 dB.

1. Calculer les valeurs des indices de réfraction des couches cœur et gaine. Quelle est la valeur de l'angle d'acceptance.

Réponse. $\Delta = 3.3 \times 10^{-2}$ $ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0.38$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{(ON)^2}{2n_1^2} \implies n_1 = \frac{ON}{\sqrt{2\Delta}} = \frac{0.38}{\sqrt{2 \times 3.3 \times 10^{-2}}} = \mathbf{1.4791} \simeq \mathbf{1.48}$$

$$ON^2 = n_1^2 - n_2^2 \implies n_2 = \sqrt{n_1^2 - (ON)^2} = \sqrt{(1.4791)^2 - (0.38)^2} = \mathbf{1.4295} \simeq \mathbf{1.43}$$

$$\alpha_c = \arcsin ON = \arcsin(0.38) = 0.38980 \text{ rad} = 22.334^\circ. \blacksquare$$

2. Combien des modes peut-on guider pour chaque longueur d'onde.

Réponse. $M = \frac{V^2}{2} = \frac{(kaON)^2}{2} = 2 \left(\frac{\pi a ON}{\lambda} \right)^2$

$$M_1 = 2 \left(\frac{\pi a ON}{\lambda_1} \right)^2 = 2 \left(\frac{\pi \times 10 \times 0.38}{1.3} \right)^2 = 168 \text{ modes}$$

$$M_2 = 2 \left(\frac{\pi a ON}{\lambda_2} \right)^2 = 2 \left(\frac{\pi \times 10 \times 0.38}{0.85} \right)^2 = 394 \text{ modes} \blacksquare$$

3. Que doit être la valeur du rayon du cœur pour considérer la fibre comme monomode dans les deux sens.

Réponse. monomode si $V < 2.4$

$$V = kaON = \frac{2\pi a}{\lambda} ON < 2.4 \implies a < \frac{\lambda}{2\pi ON}$$

$$a_1 < \frac{1.3}{2\pi \times 0.38} = \mathbf{0.54448} \mu\text{m}$$

$$a_1 < \frac{0.85}{2\pi \times 0.38} = \mathbf{0.356} \mu\text{m}$$

dans les deux sens il faut que $a < 0.356 \mu\text{m}$ \blacksquare

4. Etablir pour cette fibre l'expression de la dispersion intermodale $\Delta\tau_n$. Exprimer $\Delta\tau_n$ en fonction de Δ et calculer sa valeur numérique pour chaque source.

Réponse. Question de cours: il faut démontrer la formule:

$$\Delta\tau_n = \frac{Ln_1\Delta}{c} = \frac{20 \times 10^3 \times 1.48 \times 3.3 \times 10^{-2}}{3 \times 10^8} = 3.256 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$\Delta\tau_n$ **est indépendante de la source.** \blacksquare

5. Calculer, pour chacune des sources, la largeur maximale de la bande passante de cette fibre en négligeant les dispersions du guide et de polarisation.

Réponse. Calculons la dispersion chromatique pour chacune des sources:

$$\Delta\tau_m = M_d L \Delta\lambda \text{ et on a } \Delta\lambda = 100 \text{ nm} \text{ pour les deux sources}$$

$$\text{Pour } \lambda_1 = 1.3 \mu\text{m} : M_d = 2 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$$

$$\implies \Delta\tau_{m1} = 2 \times 20 \times 100 = 4000 \text{ ps} = 4 \times 10^{-9} \text{ s}$$

$$\text{Pour } \lambda_2 = 0.85 \mu\text{m} : M_d = 100 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$$

$$\Rightarrow \Delta\tau_{m1} = 100 \times 20 \times 100 \times 10^{-12} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ s}$$

La dispersion totale est : $\Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_n^2 + \Delta\tau_m^2}$ et $B = \frac{1}{\Delta\tau}$

$$\lambda_1 \rightarrow \Delta\tau_1 = \sqrt{(3.256 \times 10^{-6})^2 + (4 \times 10^{-9})^2} = 3.256 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\Rightarrow B_{1\max} = \frac{1}{3.256 \times 10^{-6}} = 3.0713 \times 10^5 \text{ Hz}$$

$$\lambda_2 \rightarrow \Delta\tau_2 = \sqrt{(3.256 \times 10^{-6})^2 + (2.0 \times 10^{-7})^2} = 3.2621 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\Rightarrow B_{2\max} = \frac{1}{3.2621 \times 10^{-6}} = 3.0655 \times 10^5 \text{ Hz. } \blacksquare$$

6. Cette fibre est-elle capable de transmettre le signal vidéo? pourquoi?

Réponse. Non, la bande passante est inférieure que celle du signal vidéo. ■

7. Calculer l'intensité du photocourant généré par chacune des photodiodes.

Réponse. Pour calculer l'intensité du photocourant généré il faut tout d'abord calculer la puissance optique incidente sur la photodiode.

La perte totale est $\alpha = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_i} \right) \Rightarrow P_s = P_i \times 10^{-\alpha/10}$

$$S_\lambda = \frac{I_p}{P_s} \Rightarrow I_p = S_\lambda P_s$$

pour $\lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$: **la perte linéique totale est:** $\alpha_{dB/km} = 0.6 + 0.05 = 0.65 \text{ dB/km}$
de plus on a 3 coupleurs,

alors la perte totale est $\alpha_1 = 0.65 \times 20 + 3 \times 0.2 = 13.6 \text{ dB}$

$$P_s = 1 \times 10^{-1.36} = 4.3652 \times 10^{-2} \text{ mW}$$

$$I_p = 0.8 \times 4.3652 \times 10^{-2} = 3.4922 \times 10^{-2} \text{ mA}$$

pour $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$: **la perte linéique totale est:** $\alpha_{dB/km} = 2.5 + 0.05 = 2.55 \text{ dB/km}$

la perte totale est $\alpha_2 = 2.55 \times 20 + 3 \times 0.2 = 51.6 \text{ dB}$

$$P_s = 0.6 \times 10^{-5.16} = 4.1510 \times 10^{-6} \text{ mW}$$

$$I_p = 0.5 \times 4.1510 \times 10^{-6} = 2.0755 \times 10^{-6} \text{ mA } \blacksquare$$

8. Etablir l'expression de l'efficacité quantique apparente de photodiode. calculer sa valeur numérique.

$$\text{Réponse. } \eta_a = \frac{N_e}{N_p} = \frac{I_p h\nu}{eP} = \frac{I_p hc}{P e\lambda} = \frac{I_p 1.24}{P \lambda_{\mu\text{m}}} = S_\lambda \frac{1.24}{\lambda_{\mu\text{m}}}$$

$$\text{pour } \lambda_1 = 1.3 \mu\text{m} : \eta_a = 0.8 \times \frac{1.24}{1.3} = 0.76308 = 76.3\%$$

$$\text{pour } \lambda_2 = 0.85 \mu\text{m} : \eta_a = 0.5 \times \frac{1.24}{0.85} = 0.72941 = 72.9\% \blacksquare$$

9. Les informations sont injectées dans la fibre sous forme des impulsions de durée de 10 ns dont l'énergie optique est uniformément répartie sur la toute la section de la fibre. Combien des photons doit contenir chaque impulsion.

Réponse. $N_p = \frac{E}{h\nu} = \frac{P \times \delta t}{h\nu} = \frac{P \times \delta t \times \lambda}{hc}$

pour $\lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$: $N_p = \frac{1 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-9} \times 1.3 \times 10^{-6}}{6.6260755 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 6.5398 \times 10^7 \text{ photons}$

pour $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$: $N_p = \frac{0.6 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-9} \times 0.85 \times 10^{-6}}{6.6260755 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 2.5656 \times 10^7 \text{ photons}$ ■

10. Sachant que le seuil de la puissance de rupture est 2 GW cm^{-2} , est-ce que les sources utilisées répondent aux conditions de sécurité.

Réponse. la section de la fibre est $\sigma = \pi a^2 = \pi (10 \mu\text{m})^2 = \pi \times 10^{-6} \text{ cm}^2$

La densité de puissance est $I = \frac{P}{\sigma}$

pour $\lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$: $P = 10^{-3} \text{ W}$

$\Rightarrow I_1 = \frac{10^{-3}}{\pi \times 10^{-6}} = 318.31 \text{ W cm}^{-2} < \text{puissance de rupture}$

pour $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$: $P = 0.6 \times 10^{-3} \text{ W}$

$\Rightarrow I_2 = \frac{0.6 \times 10^{-3}}{\pi \times 10^{-6}} = 190.99 \text{ W cm}^{-2} < \text{puissance de rupture}$

Donc les sources utilisées répondent aux conditions de sécurité. ■

Exercice 3 (8 points) On considère une diode laser dont la couche active est à la base d'alliages quaternaires $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ où x et y sont les fractions molaires des composés. Les largeurs des bandes interdites se déterminent par la relation empirique:

$$E_g[\text{eV}] = 1.350 - 0.765y + 0.212y^2$$

la relation entre les proportions x et y qui permet d'obtenir un alliage dont le paramètre de maille est identique au phosphore d'indium (InP) est:

$$x \simeq 0.454y + 0.014y^2$$

Les dimensions de la cavité sont: $200 \times 1.5 \times 0.6 \mu\text{m}^3$, la permittivité diélectrique est $\varepsilon = 13,2$ toutes les pertes intrinsèques sont équivalentes à 600 m^{-1} .

1. Quelle est la longueur d'onde émise pour la fraction molaire $x = 0.46$.

Réponse. $0.454y + 0.014y^2 = 0.46 \Rightarrow 0.454y + 0.014y^2 - 0.46 = 0 \Rightarrow$ **la valeur acceptable est** $y = 0.98339$

$E_g = 1.350 - 0.765(0.98339) + 0.212(0.98339)^2 = 0.80272 \text{ eV}$

$\lambda_{\mu\text{m}} = \frac{1.24}{E_{g\text{eV}}} = \frac{1.24}{0.80272} = 1.5447 \mu\text{m}$ ■

2. Montrer que l'effet laser déclenche à partir d'une valeur de seuil du gain (g_s). Déterminer l'expression de g_s et calculer sa valeur numérique.

Réponse. Question de cours, à démontrer la formule : $g_s = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{13.2} = 3.6332 \rightarrow R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{3.6332-1}{3.6332+1} \right)^2 = 0.323$$

$$g_s = 600 + \frac{1}{200 \times 10^{-6}} \ln \left(\frac{1}{0.323} \right) = 6250.5 \text{ m}^{-1} \blacksquare$$

3. Démontrer que la durée de vie d'un photon dans la diode est : $\tau_p = \frac{n}{cg_s}$ et calculer sa valeur numérique.

Réponse. $P(z) = P_0 \exp(-g_s z) = P_0 \exp(-g_s vt) = P_0 \exp\left(-g_s \frac{c}{n} t\right) = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$

$$\Rightarrow \tau_p = \frac{n}{cg_s} = \frac{3.6332}{3 \times 10^8 \times 6250.5} = 1.9376 \times 10^{-12} \text{ s} \blacksquare$$

4. Quelle est la distance maximale traversée par un photon le long de la cavité.

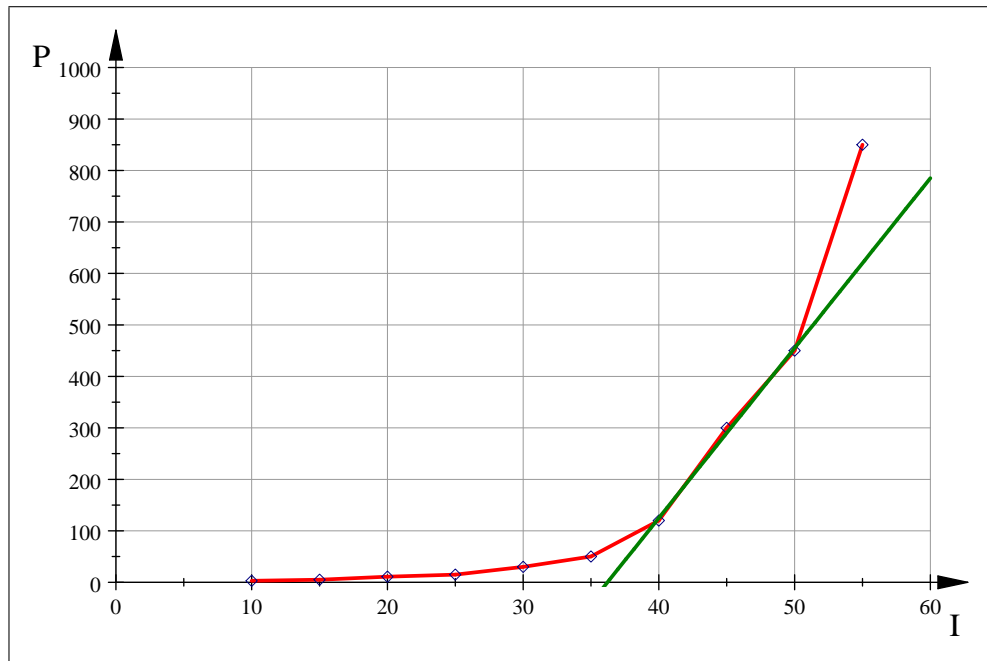
Réponse. $z_{\max} = v\tau_p = \frac{c}{n}\tau_p = \frac{3 \times 10^8}{3.6332} \times 1.9376 \times 10^{-12}$
 $= 1.5999 \times 10^{-4} \text{ m} = 159.99 \mu\text{m} \blacksquare$

5. Dans les conditions normales, on relève la puissance optique en fonction de l'intensité du courant appliquée:

I mA	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
P μ W	3	5	11	15	30	50	120	300	450	850

- (a) Tracer le graphe de P en fonction de I (voir page 5)

Réponse.



■

- (b) Déterminer l'intensité du courant de seuil I_s . Vérifier graphiquement cette valeur.

Réponse. $P_i = \eta_i \frac{\hbar\omega}{e} (I - I_s)$

$$P_e = \frac{P_i}{2} \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} = \eta_i \frac{\hbar\omega}{2e} (I - I_s) \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} = K (I - I_s)$$

$$I_1 = 40 \text{ mA} \longrightarrow P_1 = 120 \mu\text{W}$$

$$I_2 = 50 \text{ mA} \longrightarrow P_2 = 450 \mu\text{W}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 - I_s}{I_1 - I_s} \implies \frac{450}{120} = \frac{50 - I_s}{40 - I_s} \implies 45(40 - I_s) = 12(50 - I_s)$$

$$45 \times 40 - 12 \times 50 = (45 - 12) I_s$$

$$I_s = \frac{45 \times 40 - 12 \times 50}{45 - 12} = 36.364 \text{ mA} \quad \blacksquare$$

- (c) Déduire la valeur de l'efficacité quantique.

Réponse. $P_e = \eta_i \frac{\hbar\omega}{2e} (I - I_s) \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} = \eta_i \frac{\hbar\omega}{2e} (I - I_s) \frac{g_s - \alpha_i}{g_s} = \eta_i \frac{g_s - \alpha_i}{2g_s E_{eV}} (I - I_s)$

$$\eta_i = \frac{2g_s E_{eV} P_e}{(g_s - \alpha_i)(I - I_s)} = \frac{2 \times 6250.5 \times 0.80272 \times 120 \times 10^{-6}}{(6250.5 - 600)(40 - 36.364) \times 10^{-3}} = 5.8611 \times 10^{-2}$$

■

6. Pour réaliser les confinement des porteurs de charge et des photons, la couche active est assimilée à un guide d'onde plan quand est placée entre deux couches en **InP** à grand gap $E_g = 1.35 \text{ eV}$, et d'indice de réfraction $n' = 3.3$.

- (a) Calculer le nombre des modes transversaux et longitudinaux excités dans cette couche.

Réponse. par analogie avec les guides d'onde le nombre des modes transversaux est

$$M = \frac{2h}{\lambda} \sqrt{n^2 - n_1^2} = \frac{2 \times 0.6}{1.5447} \sqrt{(3.6332)^2 - (3.3)^2} = 1 \text{ mode}$$

c'est le mode fondamental

Condition de résonance: $2nL = m\lambda$

$$\implies m = \frac{2nL}{\lambda} = \frac{2 \times 3.6332 \times 200}{1.5447} = 940 \text{ modes} \quad \blacksquare$$

- (b) Calculer la largeur spectrale de la lumière émise.

Réponse. $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} = \frac{(1.5447)^2}{2 \times 3.6332 \times 200} = 1.6419 \times 10^{-3} \mu\text{m} \quad \blacksquare$

- (c) Calculer l'intervalle en fréquence entre deux modes voisins.

Réponse. $\Delta f = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{c}{2nL} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.6332 \times 200} = 2.0643 \times 10^5 \text{ Hz} \quad \blacksquare$