



Télécommunication optique (ELE107)

Examen Final 2014-2015 - Semestre II

Durée : 2h :00



SOLUTIONS

Exercice 1 (10 points) Répondre très brièvement aux questions suivantes :

1. Citez trois avantages de la fibre optique
2. Quelle est la différence entre les fibres à saut d'indice et celles à gradient d'indice
3. Donner 3 avantages des sources optoélectroniques.
4. Que veut dire courant de seuil d'une diode laser ?
5. Comment se comporte la diode laser au dessous de seuil.
6. Quelle est la définition générale de l'efficacité quantique d'une source optoélectronique
7. Quelle est l'influence de température sur le caractéristique flux- courant de diode laser
8. Que veut dire longueur d'onde de seuil d'une photodiode.
9. Que veut dire sensibilité spectrale d'une photodiode
10. Parlez des techniques de multiplexage temporel et de multiplexage en longueur d'onde

Solution 1

1 point \times 10

1. A citer 3 parmi :
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...
2. fibres à saut d'indice : indice du coeur constante, trajet en ZigZag, fibre à gradient d'indice : indice du coeur variable en fonction de la distance à l'axe, trajet sinusoidal
3. Les avantages des sources optoélectroniques (on demande 3 parmi les suivants)
 - petites dimensions en rapport avec celles du coeur des fibres optiques,
 - de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant,
 - le spectre optique est relativement étroit
 - les longueurs d'onde disponibles compatibles avec les fenêtres spectrales des fibres optiques
 - faible consommation énergétique.
4. C'est l'intensité du courant à partir de laquelle déclenche l'effet laser
5. Au dessous d'une valeur de seuil du courant, la diode laser se comporte comme diode électroluminescente (l'émission est spontanée).

6. L'efficacité quantique représente le rendement du système. $\eta = \frac{\text{Nb des photons émis}}{\text{Nb des électrons injectés}}$
7. Avec l'augmentation de la température, l'intensité du courant de seuil augmente et par suite on aura un décalage à droite du caractéristique flux- courant de diode laser.
8. Seuls les photons d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite du semi-conducteur sont absorbés de manière utile ce qui correspond à la longueur d'onde de seuil

$$\lambda_s \mu\text{m} = \frac{1.24}{E_g \text{ eV}}$$

9. La sensibilité spectrale d'une photodiode est définie par le photocourant généré par unité de puissance optique incidente $S_\lambda = \frac{I_p}{P_i}$
10. Le multiplexage consiste à transporter sur un même support physique, ici la fibre optique, les signaux destinés à un grand nombre d'abonnés.
 - (a) Le principe du WDM (Wavelength Division Multiplexing) ou multiplexage en longueur d'onde est d'acheminer plusieurs longueurs d'ondes sur une même fibre, chaque longueur d'onde correspondant à un canal de transmission.
 - (b) Le multiplexage temporel (Time Division Multiplexing) consiste à imbriquer temporellement les informations de chaque abonné en trames successives.
La technologie TDM permet d'échantillonner les signaux de différentes voies à faibles débits et de les transmettre successivement sur une voie à haut débit en leur allouant la totalité de la bande passante.

Exercice 2 (35 points) On considère une diode laser dont la couche active est à la base de GaAs de largeur de la bande interdite $E_g = 1.3 \text{ eV}$ et d'indice de réfraction $n = 3.6$; les pertes intrinsèques sont équivalentes à $\alpha_i = 300 \text{ m}^{-1}$, les dimensions de la cavité : longueur $L = 400 \mu\text{m}$, largeur $w = 1.3 \mu\text{m}$ et épaisseur $d = 0.2 \mu\text{m}$, largeur spectrale $\Delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$

1. Quelle est la longueur d'onde de la lumière émise.
2. Démontrer 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.
3. Etablir la formule donnant le nombre des modes longitudinaux excités M , Calculer M , et l'intervalle en fréquence entre les modes voisins.
4. En tenant compte de la perte due à la réflexion sur les miroirs de la cavité, exprimer en fonction de n , L , et α_i la durée de vie du photon (τ_p) à l'intérieur de la cavité. Calculer τ_p .
5. Sachant que l'intensité du courant de seuil est $I_s = 40 \text{ mA}$ et l'efficacité interne est de 75%, calculer la puissance optique sortant d'une face en appliquant un courant d'intensité $I = 60 \text{ mA}$

Solution 2

1. La plupart des photons émis sont d'énergie $h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_{g(J)}$
donc $\lambda = \frac{hc}{eE_g(\text{eV})}$

$$\frac{hc}{e} = \frac{6.6260755 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.60217733 \times 10^{-19}} = 1.2407 \times 10^{-6}$$

$$\text{Soit } \lambda_{\mu\text{m}} = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} = \frac{1.24}{1.3} = 0.95385 \mu\text{m} \quad \boxed{5 \text{ points}}$$

2. Soit un point M , de la cavité où née une onde de puissance P_0 . En traversant une fois la cavité (aller-retour) et après deux réflexions sur les miroirs l'amplitude en M sera $P_0 R_1 R_2 \exp(-2\alpha_i L) \exp(2gL)$. où L la longueur de la cavité et R_1, R_2 les réflectivités des miroirs, g le facteur de gain net. Pour la diode laser $R_1 = R_2 = R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$.

L'effet laser déclenche lorsque le gain compense toutes les pertes donc lorsque :

$$P_0 R^2 \exp(2(g - \alpha_i)L) \geq P_0 \implies 2(g - \alpha_i)L \geq \ln \frac{1}{R^2}$$

$$\implies g \geq g_s = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad \boxed{7 \text{ points}}$$

$$n = 3.6 \implies R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{3.6-1}{3.6+1}\right)^2 = 0.31947$$

$$g_s = 300 + \frac{1}{400 \times 10^{-6}} \times \ln \left(\frac{1}{0.31947}\right) = 3152.7 \text{ m}^{-1} \quad \boxed{3 \text{ points}}$$

3. Condition de résonance : $2nL = m\lambda \implies 0 = md\lambda + \lambda dm \implies \Delta m = m \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2nL}{\lambda^2} \Delta\lambda$

$$M = m_{\text{max}} - m_{\text{min}} = \frac{2nL}{\lambda^2} \Delta\lambda = \left[\frac{2 \times 3.6 \times 400 \times 10^{-6}}{(0.95385 \times 10^{-6})^2} \times 0.01 \times 10^{-6} \right] = 31 \quad \boxed{5 \text{ points}}$$

Intervalle en fréquence :

$$\Delta f = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = 3 \times 10^8 \frac{0.01 \times 10^{-6}}{(0.95385 \times 10^{-6})^2} = 3.2973 \times 10^{12} \text{ Hz} \quad \boxed{3 \text{ points}}$$

4. La variation de la puissance optique en fonction du temps est donnée par

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

et en fonction de la distance traversée :

$$P(z) = P_0 \exp(-g_s z)$$

à la distance z et à l'instant t , $z = vt$ on a

$$P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) = P_0 \exp(-g_s z) \text{ donc } \frac{t}{\tau_p} = g_s z = g_s vt = g_s \frac{c}{n} t \quad \boxed{5 \text{ points}}$$

$$\text{d'où : } \tau_p = \frac{n}{g_s c} = \frac{3.6}{3152.7 \times 3 \times 10^8} = 3.8063 \times 10^{-12} \text{ s} = 3.8063 \text{ ps} \quad \boxed{2 \text{ points}}$$

5. La puissance interne est

$$P_i = \eta_i \frac{h\nu}{e} (I - I_s) = \eta_i E_g (I - I_s) = 0.75 \times 1.3 \times (60 - 40) = 19.5 \text{ mW}$$

$$P_e = \frac{P_i}{2} \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} = \frac{1}{2} P_i \frac{\alpha_m}{g_s}$$

$$\alpha_m = g_s - \alpha_i = 3152.7 - 300 = 2852.7 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Alors } P_e = \frac{1}{2} 19.5 \times \frac{2852.7}{3152.7} = 8.8222 \text{ mW} \quad \boxed{5 \text{ points}}$$

Exercice 3 (30 points) Soit une fibre optique à saut d'indice de longueur $L = 10$ km, de rayon du coeur $a = 40\mu\text{m}$ et de différence relative d'indice $\Delta = 1\%$. Cette fibre peut guider au maximum 1000 modes de longueur d'onde $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

1. Calculer les indices des couches coeur (n) et gaine (n_1)
2. Montrer qu'il faut injecter la lumière dans la fibre à l'intérieure d'une cône de révolution d'angle au sommet α_c pour avoir de modes guidés. Exprimer α_c en fonction des indices n_1 et n . Calculer α_c
3. Etablir l'expression de la dispersion intermodale. En négligeant les dispersions intramodales et chromatiques, de combien s'étale l'impulsion à la sortie de la fibre
4. On suppose que toute la puissance optique initiale $P_0 = 10$ mW est équi-distribuée entre les modes de la fibre, quelle est la puissance portée par chaque mode à la sortie de la fibre d'atténuation linéaire $\alpha_{dB} = 0.3$ dB/km

Solution 3

1. Fibre à saut d'indice donc $M = \frac{2\pi^2 a^2 (n^2 - n_1^2)}{\lambda^2}$

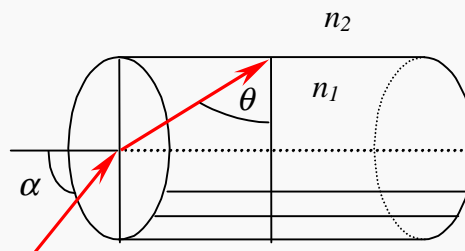
$$\Rightarrow ON^2 = (n^2 - n_1^2) = \frac{M\lambda^2}{2\pi^2 a^2} = \frac{1000 \times (1.55)^2}{2 \times \pi^2 \times (40)^2} = 0.07607$$

$$\Rightarrow ON = \sqrt{0.07607} = 0.27581$$

$$\Delta = \frac{n^2 - n_1^2}{2n^2} \Rightarrow n = \sqrt{\frac{ON^2}{2\Delta}} = \sqrt{\frac{0.07607}{0.02}} = 1.9503 \simeq 1.95 \quad \boxed{3 \text{ points}}$$

$$n_1 = \sqrt{n^2 - ON^2} = \sqrt{(1.9503)^2 - 0.07607} = 1.9307 \simeq 1.93 \quad \boxed{2 \text{ points}}$$

2. Si θ est l'angle d'incidence sur l'interface coeur-gaine, on aura de réflexion interne totale si $\theta > \theta_\ell$



alors si $\sin \theta \geq \frac{n_1}{n}$ donc il faut injecter la lumière dans la fibre sous l'angle α tel que

$$\sin \alpha \leq \sin \alpha_c = n \cos \theta \leq n \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n^2}} = \sqrt{n^2 - n_1^2} = ON \quad \boxed{5 \text{ points}}$$

$$\alpha_c = \arcsin(ON) = \arcsin(0.27581) = 0.27943 \text{ rad} = 16.01^\circ \quad \boxed{2 \text{ points}}$$

3. Dans une fibre à saut d'indice, les différents modes se propagent le long de la fibre avec une vitesse $v = c/n_1$. Le mode d'ordre m se propagent avec une vitesse v_{mz} dans la direction oz telle que :

$$v_{mz} = \frac{c}{n_1} \sin \theta_m$$

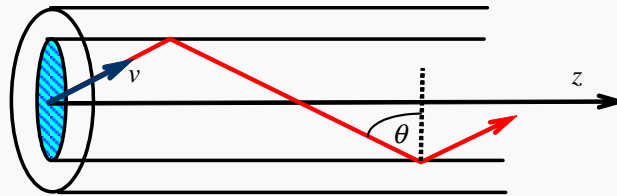
$$0 < m \leq N \text{ et } \theta_\ell \leq \theta_m \leq \pi/2$$

v_{mz} est minimale si θ_m minimale, alors le mode le plus lent se propage avec $\theta_m = \theta_\ell$ dont la vitesse est : v

$$v_{mz1} = \frac{c}{n_1} \sin \theta_\ell = \frac{c}{n_1} \frac{n_2}{n_1} = \frac{cn_2}{n_1^2} \quad \boxed{3 \text{ points}}$$

Ce mode traverse une distance L pendant le temps τ_1 :

$$\tau_1 = \frac{L}{v_{mz1}} = \frac{Ln_1^2}{cn_2} \quad \boxed{2 \text{ points}}$$



Direction de vitesse de phase

Tandis que le mode le plus rapide se propage avec l'angle $\theta_M = \pi/2$ et $v_{mz2} = \frac{c}{n_1}$ donc il parcourt la même distance L pendant τ_2 :

$$\tau_2 = \frac{Ln_1}{c} \quad \boxed{2 \text{ points}}$$

Après traverser le trajet L le long de la fibre la différence des temps de transit $\Delta\tau_n$ est : $\Delta\tau_n = \tau_1 - \tau_2$
et on écrit :

$$\begin{aligned} \Delta\tau_n &= \frac{Ln_1^2}{cn_2} - \frac{Ln_1}{c} = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \\ &= \frac{Ln_1\Delta}{c} = \frac{L}{2cn_1} (ON)^2 \quad \boxed{5 \text{ points}} \end{aligned}$$

La cause principale de dispersion est donc celle intermodale

$$\Delta\tau_n = \frac{Ln_1\Delta}{c} = \frac{10^4 \times 1.93 \times 0.01}{3 \times 10^8} = 6.4333 \times 10^{-7} \text{ s} \simeq 0.64 \mu\text{s} \quad \boxed{2 \text{ points}}$$

4. $\alpha_{dB} = -0.3\text{dB/km}$ la longueur de la fibre est 10 km donc la perte est de 3dB c-à-d. la puissance devient la moitié à la sortie c.à.d. 5mW la puissance de chaque mode est donc 5μW. 3 points

Exercice 4 (25 points) Soit à réaliser une liaison par fibre optique d'une source laser avec une photodiode avec 106 Mbits/s et un taux d'erreur 10^{-10} . La puissance optique incidente nécessaire est

$$\begin{aligned} P &= -53 + 10 \log f \quad \text{pour une diode PIN} \\ P' &= -67 + 10 \log f \quad \text{pour une diode PIIPN} \end{aligned}$$

Les puissances étant exprimées en dBm et f en Mbits/s.

1. Calculer en dBm et en Watts, P et P' dans le cas envisagé et discuter les résultats obtenus.
2. Etant donnée la fréquence de modulation, il est nécessaire d'utiliser une diode laser. La puissance émise par cette diode étant de 5 mW et l'atténuation de couplage dans la fibre est de -4 dB. Les connecteurs d'émission et de réception ont une atténuation unitaire de 1 dB. Une marge de 2 dB doit être ménagée pour compenser les dégradations des composants avec le temps.

Etablir le budget de liaison optique pour chaque photodiode

On utilise une fibre d'atténuation 4 dB/km raccordée tous les 500 m (atténuation de connexion 0.3dB/connexion).

3. Combien de fibres de 600m de longueur peut-on installer si on utilise une photodiode PIIPN. Quelle est la distance maximale de la liaison ?

Solution 4

1. $10 \log_{10}(106) = 20.25$

$$P = -53 + 20.25 = -32.75 \text{ dBm}$$

$$= 10^{-3.275} = 5.3088 \times 10^{-4} \text{ W} \simeq 53 \text{ mW}$$

$$P' = -67 + 20.25 = -46.75 \text{ dBm}$$

$$= 10^{-4.675} = 2.1135 \times 10^{-5} \text{ W} \simeq 21 \text{ nW} \quad \boxed{5 \text{ points}}$$

La puissance optique incidente nécessaire pour photodiode PIIPN est plus petite que celle de PIN, elle est donc plus sensible.

2. Puissance injectée de la source laser : 5 mW $\rightarrow 10 \log_{10}(5) = 6.9897 \text{ dBm}$

pertes de couplage dans la fibre = -4 dBm

pertes des connexions = $2 \times (-1) = -2 \text{ dBm}$

Marge = -2 dBm

$$\text{TOTAL} = 6.9897 - 4 - 2 - 2 = -1.0103$$

La puissance de seuil de PIN est -32.75 donc le budget est $-32.75 + 1 = -31.75 \text{ dBm}$

pour la diode PIIPN : $-46.75 + 1 = -45.75 \quad \boxed{10 \text{ points}}$

3. les pertes sur les fibres sont 4 dB/km , donc sur 600 m : $\alpha_f = 0.6 \times 4 = 2.4 \text{ dB/600 m}$

avec les atténuation de connexion on aura : $2.4 + 0.3 = 2.7$

Le budget d'énergie pour la diode PIIPN est -45.75 :

$$\frac{45.75}{2.7} = 16.944$$

On peut utiliser 17 fibres/600 m avec 16 coupleurs : $17 \times 2.4 + 16 \times 0.3 = 45.6$

La distance sur 17 fibres est $d = 17 \times 600 = 10200 \text{ m} = 10.2 \text{ km} \quad \boxed{10 \text{ points}}$