



Télécommunication optique (ELE107)

Examen de Rattrapage 2014-2015

Durée : 2h :00



Documents et téléphones : STRICTEMENT INTERDITS

Exercice 1 Répondre très brièvement aux questions suivantes :

1. Quelles sont les 2 aspects physiques de la lumière ?
2. Quelles sont les deux grandes catégories des fibres optiques ?
3. Citez trois avantages de la fibre optique
4. Quelles sont les causes principales de dégradation du signal dans une fibre optique
5. Quelle est la différence entre les fibres à saut d'indice et celles à gradient d'indice
6. Quelle est l'influence de la dispersion sur la qualité de transmission dans fibre optique ?
7. Quelle est la relation entre la dispersion et la bande passante ?
8. Que signifie le mot LASER.
9. Donner 3 avantages des sources optoélectroniques.
10. Que veut dire courant de seuil d'une diode laser ?
11. Comment se comporte la diode laser au dessous de seuil.
12. Quelle est la définition générale de l'efficacité quantique d'une source optoélectronique
13. Quelle est l'influence de température sur le caractéristique flux- courant de diode laser
14. Que veut dire longueur d'onde de seuil d'une photodiode.
15. Que veut dire sensibilité spectrale d'une photodiode

Solution 1

1. Les 2 aspects physiques de la lumière sont : L'aspect ondulatoire (physique) et l'aspect corpusculaire (quantique).
2. Les deux grandes catégories des fibres optiques : monomode et multimode.
3. A citer 3 parmi les avantages suivants :
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...
4. Les causes principales de dégradation du signal dans une fibre optique sont : l'atténuation et la dispersion.
5. 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
6. La dispersion entraîne l'élargissement temporel du signal.
7. La relation entre la dispersion Δt et la bande passante B est : $B = \frac{A}{\Delta t}$, A est une constante qui dépend du type de modulation
8. Le mot **LASER** est une abréviation de : "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*"

9. 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.
10. C'est l'intensité du courant à partir de laquelle déclenche l'effet laser.
11. Au dessous d'une valeur de seuil du courant, la diode laser se comporte comme diode électroluminescente (l'émission est spontanée).
12. L'efficacité quantique représente le rendement du système. $\eta = \frac{\text{Nb des photons émis}}{\text{Nb des électrons injectés}}$
13. 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.
14. 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

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

15. La sensibilité spectrale d'une photodiode est définie par le photocourant généré par unité de puissance optique incidente $S_\lambda = \frac{I_p}{P_i}$

Exercice 2 On réalise une liaison par fibre optique, de longueur 15 km, en utilisant 2 diodes laser et une photodiode à avalanche

Une source laser émet des radiations de puissance moyenne $P_1 = 10 \text{ mW}$ à la longueur d'onde $\lambda_1 = 1300 \text{ nm}$ avec une largeur spectral $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$, l'autre émet de puissance $P_2 = 7 \text{ mW}$ à $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$ et $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$.

Les sources laser sont fabriquées à la base de $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ des permittivités diélectriques presque identiques $\epsilon = 13.2$ et les longueurs des cavités sont aussi égales $\ell = 500 \mu\text{m}$. les pertes intrinsèques sont équivalentes à $\alpha_{i1} = 600 \text{ m}^{-1}$ et $\alpha_{i2} = 500 \text{ m}^{-1}$.

Le coeur de la fibre à saut d'indice est de diamètre $2a = 30 \mu\text{m}$ et d'indice $n_1 = 1.6$, La différence relative des indices est $\Delta = 0.06$. Les facteurs d'atténuation pour λ_1 et λ_2 sont respectivement : $\alpha_1 = 0.5 \text{ dB/km}$ et $\alpha_2 = 0.3 \text{ dB/km}$. Les dispersions chromatiques sont équivalentes à $M_1 = 30 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ à 1300 nm et $M_2 = 20 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ à 1550 nm .

Les sensibilités spectrales de photodiode sont $S_1 = 0.66 \text{ A/W}$ et $S_2 = 0.5 \text{ A/W}$ respectivement à λ_1 et λ_2 et le facteur du gain est $M_p = 55$

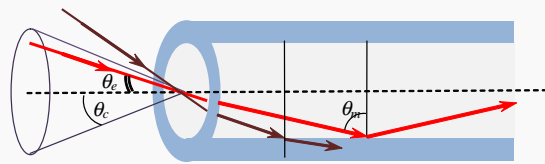
1. Montrer que pour avoir de modes guidés, il faut injecter la lumière dans la fibre, du côté de l'air, dans un cône de révolution d'angle au sommet θ_c , Donner, alors la définition de l'ouverture numérique et calculer sa valeur. Déduire θ_c
2. Comparer le nombre maximale des modes guidés dans la fibre pour chaque source.
3. Etablir l'expression de la dispersion intermodale.
4. Calculer les valeur des élargissements temporels des impulsions optiques à la sortie de la fibre si on suppose que le coeur de la fibre introduit de plus une dispersion du guide dont le facteur est : $D_g = \frac{8.37 \lambda}{a^2 n_1} \text{ ps km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ si a et λ sont exprimés en μm .
5. Démontrer que l'effet laser déclenche à partir d'une valeur de seuil du gain g_s qu'on déterminera l'expression. Calculer g_s de chaque source.

6. En négligeant la dispersion dans la couche active, déterminer le nombre des modes excités (M) dans la diode laser, En déduire l'intervalle de fréquence (Δf) entre deux modes successifs.
Comparer les valeurs de M pour les sources.
7. Calculer les intensités des photocourants générés par la photodiode.

Solution 2

1. Ouverture Numérique

La propagation dans la fibre ne peut se faire que pour des rayons se présentant sur l'extrémité de la fibre un cône de révolution (Cône d'acceptance) d'angle au sommet θ_c d'une façon que l'angle de propagation du mode θ_m soit plus grand que l'angle limite θ_ℓ .



Cône d'acceptance

Pour $\theta_\ell = \theta_c$ on a $\theta_m = \theta_\ell = \arcsin(n_2/n_1)$ et θ_i (Figure) est maximale :

$\sin \theta_c = n_1 \sin \theta_i = n_1 \cos \theta_\ell = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_\ell}$ d'où :

$$\sin \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

La quantité $ON = \sin \theta_c$ est dite l'ouverture numérique de la fibre

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{ON^2}{2n_1^2} \implies ON = n_1 \sqrt{2\Delta} = 1.6 \sqrt{2(0.06)} = 0.55426$$

$$\theta_c = \arcsin(ON) = \arcsin(0.55426) = 0.58747 \text{ rad} = 33.660^\circ.$$

2. $N = \frac{V^2}{2} \frac{\alpha}{\alpha + 2}$ La fibre est à saut d'indice ($\alpha = \infty$) donc :

$$N = \frac{V^2}{2} = k^2 a^2 n_1^2 \Delta = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} a^2 n_1^2 \Delta = \frac{(2\pi a_{\mu\text{m}} n_1)^2}{\lambda_{\mu\text{m}}^2} \Delta = \frac{(2\pi \times 15 \times 1.6)^2}{\lambda^2} (0.06) = \frac{1364.4}{\lambda_{\mu\text{m}}^2}$$

$$N_1 = \frac{1364.4}{\lambda_1^2} = \left\lfloor \frac{1364.4}{(1.55)^2} \right\rfloor = 567$$

$$N_2 = \frac{1364.4}{\lambda_2^2} = \left\lfloor \frac{1364.4}{(1.3)^2} \right\rfloor = 807$$

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 :

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

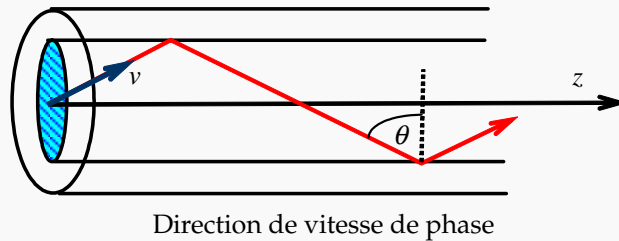
$$0 < m \leq N \text{ et } \theta_\ell \leq \theta_m \leq \pi/2$$

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

$$v_{mz1} = \frac{c}{n_1} \sin \theta_\ell = \frac{c}{n_1} \frac{n_2}{n_1} = \frac{cn_2}{n_1^2}$$

Ce mode traverse une distance L pendant le temps τ_1 :

$$\tau_1 = \frac{L}{v_{mz1}} = \frac{Ln_1^2}{cn_2}$$



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 :

$$\tau_2 = \frac{Ln_1}{c}$$

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 :

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

$$4. \Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_n^2 + \Delta\tau_m^2 + \Delta\tau_g^2}$$

$$\Delta\tau_n = \frac{Ln_1\Delta}{c} = \frac{15 \times 10^3 \times 1.6 \times 0.06}{3 \times 10^8} = 4.8 \times 10^{-6} \text{ s} = 4.8 \mu\text{s}$$

$$\Delta\tau_m = M_d L \Delta \lambda$$

$$\Delta\tau_g = D_g L \Delta \lambda \text{ avec } D_g = \frac{8.37 \lambda}{a^2 n_1} = \frac{8.37 \lambda}{(15)^2 (1.6)} = 0.02325 \lambda \text{ ps km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$$

$$- \lambda_1 = 1300 \text{ nm} :$$

$$\Delta\tau_m = M_d L \Delta \lambda = 30 \times 15 \times 2 = 900 \text{ ps} = 900 \times 10^{-12} \text{ s}$$

$$D_g = 0.02325 \times 1300 = 30.225 \text{ ps km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$$

$$\rightarrow \Delta\tau_g = 30.225 \times 15 \times 2 = 906.75 \text{ ps} = 906.75 \times 10^{-12} \text{ s}$$

$$\Delta\tau_{1\text{ps}} = \sqrt{(4.8 \times 10^6)^2 + (900)^2 + (906.75)^2} = 4.8 \times 10^6 \text{ ps} = 4.8 \mu\text{s}$$

$$- \lambda_2 = 1550 \text{ nm} :$$

$$\Delta\tau_m = 20 \times 15 \times 2 = 600 \text{ ps} = 600 \times 10^{-9} \text{ s}$$

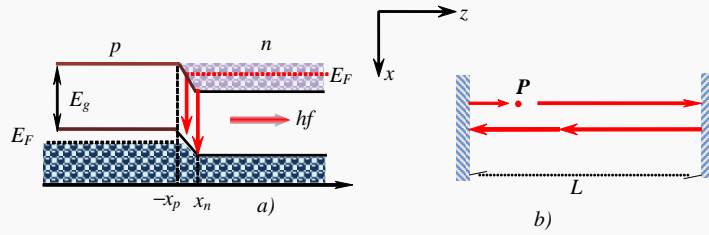
$$D_g = 0.02325 \times 1550 = 36.038 \text{ ps km}^{-1} \text{ nm}^{-1}$$

$$\rightarrow \Delta\tau_g = 36.038 \times 15 \times 2 = 1081.1 \text{ ps}$$

$$\Delta\tau_{2\text{ps}} = \sqrt{(4.8 \times 10^6)^2 + (600)^2 + (1081.1)^2} = 4.8 \times 10^6 \text{ ps} = 4.8 \mu\text{s}$$

5. Cours :

Au voisinage du plan de jonction les densités de porteurs sont élevées, de sorte que les recombinaisons radiatives sont très nombreuses. Un gain d'émission stimulée peut être obtenu à l'intérieur d'une couche mince parallèle à la jonction d'épaisseur d c'est la couche active. Cette forte densité de porteurs entraîne une faible augmentation de l'indice de réfraction dans la couche active par rapport au reste du semiconducteur et la couche active joue le rôle d'un guide d'onde plan et fait le confinement optique.



Structure d'une diode à jonction p-n

Dans la structure de la figure, soient $\alpha_i \text{ m}^{-1}$ la perte d'absorption de la couche active par unité de longueur et R_1 et R_2 les réflexivités des miroirs tels que pour l'incidence normale et d'indice de réfraction n :

$$R_1 = R_2 = R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1)$$

Soit une onde, créée en un point P (figure) de la couche active, de puissance P_0 , en traversant une distance z à l'intérieure de la couche active cette puissance subit des variations :

- Décroissance à cause de perte intrinsèque suivant la loi : $e^{-\alpha_i z}$
- Croissance due à l'émission stimulée suivant la loi e^{gz} où g (en m^{-1}) est le gain net à chaque trajet par unité de longueur produit par émission stimulée.

de plus la lumière subit des réflexions sur les miroirs :

Donc la variation de la puissance, sur un trajet de longueur z après une réflexion sur chaque miroirs, est suivant la loi

$$R_1 R_2 \exp(-\alpha_i z) \exp(gz)$$

après traverser la cavité, de longueur ℓ , une fois aller-retour la puissance devient

$$P_1 = P_0 R_1 R_2 \exp(2(g - \alpha_i) \ell)$$

L'oscillation laser commence si $P_1 \geq P_0$ c.à.d. si :

$$R_1 R_2 \exp(2(g - \alpha_i) \ell) > 1$$

donc si g est plus grand ou égal à une certaine valeur de seuil g_s :

$$g_s = \alpha_i + \frac{1}{2\ell} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_i + \alpha_m$$

α_m est les pertes de couplage par les miroirs.

on a : $R_1 = R_2 = R$ donc

$$g_s = \alpha_i - \frac{1}{\ell} \ln R = \alpha_i + \alpha_m$$

$$n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{13.2} = 3.6332$$

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{2.6332}{4.6332} \right)^2 = 0.323$$

$$g_{s1} = 600 - \frac{10^6}{500} \ln(0.323) = 2860.2 \text{ m}^{-1}$$

$$g_{s2} = 500 - \frac{10^6}{500} \ln(0.323) = 2760.2 \text{ m}^{-1}$$

6. condition de résonance : $2n\ell = m\lambda$ avec $m \in \mathbb{N}$.

$d(2n) = d(m\lambda)$ si le milieu est non dispersif, on aura $d(m\lambda) = 0$ ou bien $md\lambda + \lambda dm = 0$.

$$\text{En valeur absolue } M = \Delta m = \frac{m}{\lambda} \Delta \lambda = \frac{2n\ell}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

$$M_1 = \left[\frac{2 \times 3.6332 \times 500}{(1.3)^2} \times 2 \times 10^{-3} \right] = 4$$

$$M_2 = \left\lfloor \frac{2 \times 3.6332 \times 500}{(1.55)^2} \times 2 \times 10^{-3} \right\rfloor = 3$$

on a $f = \frac{c}{\lambda} \implies \Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$ Pour les modes successives $\Delta m = 1$ donc : $\frac{\Delta \lambda}{\lambda^2} = \frac{1}{2n\ell}$

$$\Delta f = \frac{c}{2n\ell} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3.6332 \times 500 \times 10^{-6}} = 8.2572 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

7. $S_\lambda = \frac{I_p}{P}$

$$I_M = M_p I_p = M_p S_\lambda P$$

$$P = P_0 \times 10^{-\alpha z/10} \implies I_M = M_p S_\lambda P_0 \times 10^{-\alpha z/10}$$

$$I_{M1} = 55 \times 0.66 \times 10 \times 10^{-0.5 \times 15/10} = 64.552 \text{ mA}$$

$$I_{M2} = 55 \times 0.5 \times 10 \times 10^{-0.3 \times 15/10} = 97.574 \text{ mA}$$