Gel-17982 Communications Optiques

Examen partiel du 1er mars 2012

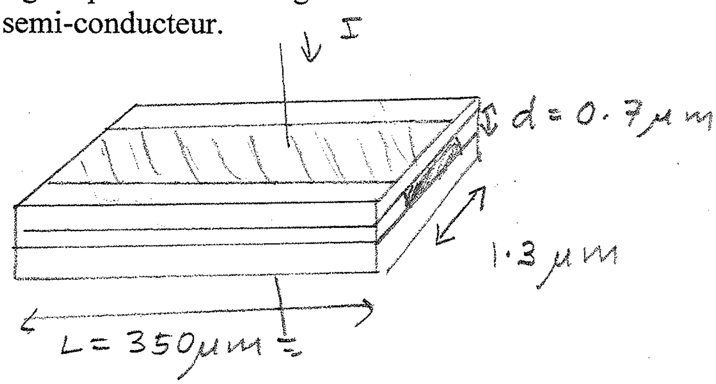
Tous les documents sont permis à l'examen. Pour la résolution des problèmes vous pouvez utiliser tous les graphiques et les équations des notes de cours, du livre et des solutions aux exercices sans les dériver à nouveau.

Constantes utiles :
$c=3\text{x}10^8$ m/s
$h=6.6\text{x}10^{-34}$ Js
$q=1.6\text{x}10^{-19}$ C

Cet examen comporte ***trois pages*** et ***trois questions***.

Question #1 (60 points) :

On considère un laser à semi-conducteur de type Fabry-Perot opérant à 980 nm dont la région active a une épaisseur d=0.7 μm, une largeur w=1.3 μm et une longueur L=350 μm. Le coefficient de pertes en puissance dans la cavité est de $\bar{\alpha} = 4\ \text{cm}^{-1}$ et le temps de vie par désexcitation radiative est de τ_R=4.5 ns. L'indice de réfraction dans la région active est $n \cong n_{eff} \cong n_g \cong 3.5$. Lorsque l'on injecte le maximum de courant, le coefficient de gain en puissance du milieu de gain peut atteindre $\Gamma g=50\ \text{cm}^{-1}$. Aucun miroir ou revêtement n'est appliqué sur les surfaces du semi-conducteur.



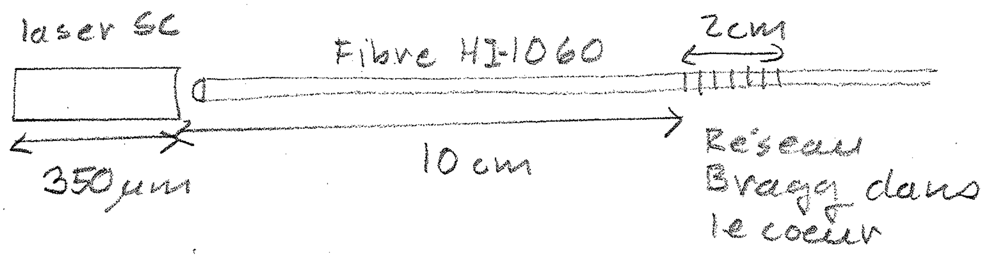
a) Quelle est la réflectivité en puissance aux facettes du laser?

b) Quel sera l'espacement des modes de la cavité, exprimez votre réponse en GHz et en nm?

c) Quel est le temps de vie des photons dans la cavité?

d) Est-ce que le gain est suffisant pour obtenir une émission laser?

On considère le même système où l'on applique maintenant un revêtement anti-reflet à une extrémité du laser. À cette même extrémité, on introduit une micro-lentille suivie d'une fibre optique HI-1060 dont les caractéristiques sont données ci-bas. Dans la fibre optique se trouve un réseau de Bragg qui est placé à une distance de 10 cm de l'extrémité du laser. La distance entre la micro-lentille et le laser à semi-conducteur, ainsi que l'épaisseur de la lentille sont négligeables.



	HI-1060
Ouverture numérique (NA)	0.14
Longueur d'onde de coupure du mode LP_{11} (λ_c)	920 nm

e) Combien de modes LP_{lm} à 980 nm sont guidés par la fibre optique HI-1060?

f) Considérant que la fibre HI-1060 est une fibre à saut d'indice dont la gaine est faite de silice (n_{silice}=1.453 à 980 nm), quel est l'indice effectif du mode fondamental? Vous pouvez utiliser une solution graphique.

g) Quel est le rayon modal du mode fondamental à 980 nm?

h) Quelle fraction de la puissance du mode fondamental à 980 nm se propage dans le cœur ? Faites le calcul à partir de la valeur trouvée en g).

i) Quelle doit être la période du réseau de Bragg pour réfléchir le signal à 980 nm ?

j) Si la modulation d'indice du réseau de Bragg est de $\Delta n=0.5\times10^{-4}$ et que la longueur du réseau est de 2 cm, quelle est sa réflectivité à 980 nm? On considère que la perturbation d'indice est uniforme dans le cœur de fibre optique et nulle dans la gaine.

k) Considérant des pertes de couplage de 0.5 dB entre la diode laser et la fibre optique, et considérant de plus que les revêtements anti-reflet sur la diode et la micro-lentille sont idéaux, est-ce qu'il y aura une émission laser? Justifiez votre réponse.

l) Selon les conditions décrites en k), quel est maintenant le gain Γg au seuil?

m) Quelle est la largeur spectrale du pic de réflexion principal du réseau de Bragg (entre les deux premiers zéros)? Exprimez votre réponse en nm et GHz.

n) Quel est l'espacement des modes longitudinaux en présence de la cavité externe?

o) D'après-vous l'émission laser sera-t-elle monomode ou multimode?

Question #2 (25 points) :

On considère une fibre optique dopée avec des ions d'erbium permettant d'amplifier un signal à λ=1550 nm à l'aide d'un laser pompe à 980 nm. Les sections efficaces d'absorption et d'émission à la longueur d'onde du signal sont $\sigma_a=3.0\times10^{-25}$ m^2 et $\sigma_e=3.7\times10^{-25}$ m^2. En vous référant à l'équation d'évolution de la puissance signal vue en classe (p.5-22):

$$g(z)=\Gamma_s\left[\sigma_{e,s}N_2(z)-\sigma_{a,s}N_1(z)\right] \qquad \text{et} \qquad \frac{dP_s(z)}{dz}=g(z)P_s(z)$$

Où $N_2(z)$ est la population d'ions excités au niveau métastable (niveau 2) et $N_1(z)$ est la population d'ions dans le niveau fondamental (niveau 1), et de plus $N_2(z)+N_1(z)=N_{tot}$ où N_{tot} est la densité d'ions erbium dans la fibre (en m^{-3}).

a) Lorsqu'un très court segment de fibre optique (10 cm) est pompé de façon à obtenir une inversion complète, le gain G d'un très faible signal à 1550 nm est de 1 dB.

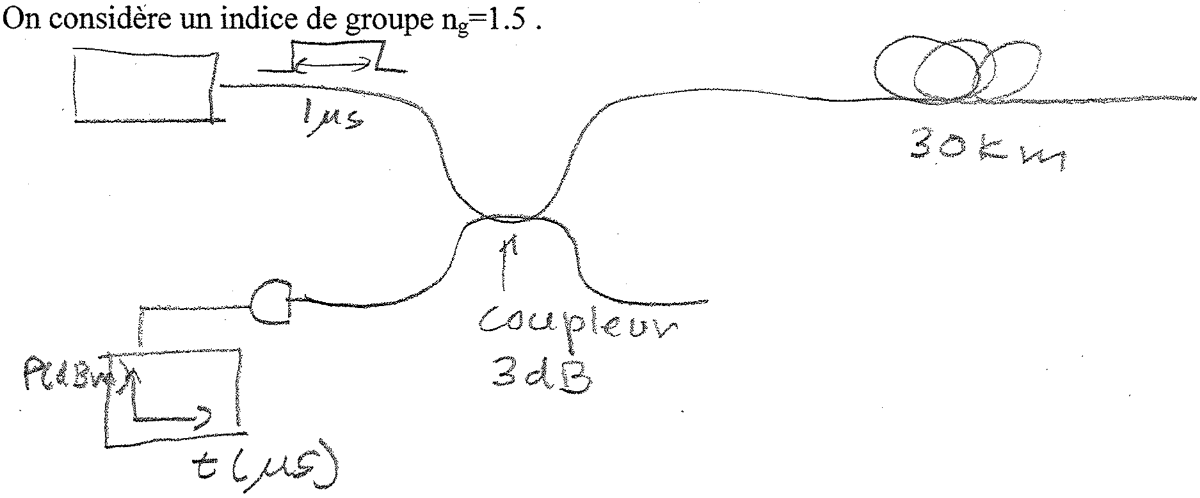
   Quel est alors le coefficient de gain g en m^{-1}? Quelle hypothèse faites-vous pour déduire cette valeur?

b) On réalise un amplificateur optique de plusieurs mètres à l'aide de cette fibre. Démontrez que le gain G de l'amplificateur pour le signal dépend de l'inversion moyenne des populations, c'est-à-dire $\bar{N}_2-\bar{N}_1$ où le surligné représente la moyenne des populations faite sur la longueur de la fibre de 0 à L.

c) Considérant que l'inversion moyenne normalisée par la population totale d'ions erbium $(\bar{N}_2-\bar{N}_1)/N_{tot}$ est de 0.2, quel sera le gain G de l'amplificateur pour un signal à 1550 nm si la longueur de fibre optique est de 10 m?

Question #3 (15 points) : OTDR

On injecte une impulsion OTDR de 1 μs avec une puissance crête de 15 dBm dans une fibre optique d'une longueur de 30 km caractérisée par un coefficient d'atténuation de 0.2 dB/km. Si la puissance rétrodiffusée par les premières dizaines de mètres de fibres au photodétecteur est de -40 dBm, faites le graphique de la **puissance détectée** (en dBm) en fonction du **temps (en µs)**. On considère un indice de groupe n_g=1.5 .



MARS 2012 : EXAMEN PARTIEL

1.a) $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \left(\frac{2.5}{4.5}\right)^2 = 30.9\% = 31\%$

b) $\Delta\nu = \frac{c}{2nL} = 122.45\ GHz \qquad \Delta\lambda = \frac{\Delta\nu\lambda^2}{c} = 0.39\ nm$

c) $\frac{1}{\tau_p} = v_g(\bar{\alpha} + \alpha_{mirr}) = v_g\left(\bar{\alpha} + \frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R^2}\right)\right)$

$\frac{1}{\tau_p} = \frac{3\times10^8}{3.5}\frac{m}{s}\left(4\frac{1}{cm}\frac{100\ cm}{m} + \frac{1}{2}\frac{1}{0.35\ mm}\frac{\times10^3\ mm}{m}\ln\left(\frac{1}{0.309^2}\right)\right)$

$\Rightarrow \tau_p = 3.1\ ps$

d) seuil $\quad \Gamma g \geq \bar{\alpha} + \alpha_m = 4 + \frac{1}{2}\frac{1}{0.035}\ln\left(\frac{1}{0.309^2}\right)$

$\Gamma g \gtrsim 37.6 \qquad \underline{oui}$

e) 1 seul, LP_{01}

f) $V = \frac{2\pi a}{\lambda}NA = 2.4 \times \frac{0.92}{0.98} = 2.25$

graphique $\Rightarrow b \simeq 0.45 = \frac{n_{eff} - 1.453}{\Delta n}$

avec $\quad NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \simeq (2n\Delta n)^{1/2}$

$\Delta n \simeq \frac{NA^2}{2n} = 0.0067 \qquad$ ou $n_1 \simeq 1.4597$

$n_{eff} = 0.45 \times 0.0067 + 1.453 = 1,456$

g) $r_0 = a\left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6}\right) = 1.15a = 2.89\mu m$

avec $a = \frac{2.25 \times 0.98}{2\pi NA} = 2.5\mu m$

h) $\Gamma = \frac{\int_0^a e^{-2r^2/r_0^2}\, r\,dr}{\int_0^\infty e^{-2r^2/r_0^2}\, r\,dr} = 1 - e^{-2a^2/r_0^2} = 1 - e^{-2/(1.15)^2}$

$\boxed{\Gamma = 78\%}$

j) $\lambda = 2n\Lambda \Rightarrow \Lambda = \dfrac{0.98}{2\times 1.456} = 0.336\,\mu m = 336\,nm$

ii) $\kappa = \dfrac{\pi \Delta n}{\lambda}\Gamma = 125\,m^{-1}$ $\quad \kappa L = 2.5 \quad R = \tanh^2(\kappa L)$

$\underline{\underline{R = 97\%}}$

k) pertes maintenant $\quad R_{equi} = 0.89\times 0.97\times 0.89$

$R_{equi} = 0.77$

oui il y aura émission laser.

l) on doit avoir

$$e^{2\Gamma g L_{sc}} R_1 \eta R_2 \eta e^{2\bar{\alpha} L_{sc}} = 1$$

$$\Gamma g \geq \bar{\alpha} + \frac{1}{2L_{sc}} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2 \eta^2}\right)$$

$$\geq 4 + 20.5 \Rightarrow \text{seuil } \Gamma g = 24.5\,cm^{-1}$$

m) $\Delta\lambda_{FWO} = \dfrac{\lambda^2}{n_{eff}L}\sqrt{\left(\dfrac{\kappa L}{\pi}\right)^2 + 1} = \dfrac{0.98\times 10^{-6}\times 980}{1.456\times 0.02}\sqrt{\left(\dfrac{2.34}{\pi}\right)^2 + 1}$

$\Delta\lambda_{FWO} = 0.044\,nm \quad \Delta\nu = 13.6\,GHz$

n) $\Delta\nu = \dfrac{c}{2(n_{sc}L_{sc} + n_f L_f)} \simeq \dfrac{c}{2n_f L_f} \simeq \dfrac{3\times 10^8}{2\times 1.456\times 0.1}$

$\Delta\nu \cong 1\,GHz \quad \Delta\lambda \simeq 0.003\,nm$

o) Probablement multimode.

Q2 (3)

1 . $\lambda_s = 1550\ nm$, $\sigma_{as} = 3\times10^{-25}\ m^2$, $\sigma_{es} = 3.7\times10^{-25}\ m^2$

$\lambda_p = 980\ nm$

$g(z) = \Gamma_s\left[\sigma_{es} N_2(z) - \sigma_{as} N_1(z)\right]$ et $\frac{dP_s(z)}{dz} = g(z)P_s(z)$

$N_1(z) + N_2(z) = N_{tot}$

a) sous l'hypothèse d'émission stimulée négligeable et de gain uniforme et constant : $g(z) = g_0$

$\frac{dP_s}{dz} = g_0 P_s \Rightarrow P_s(L) - P_s(0) = e^{g_0 L}$

$G = 10\log_{10}\left(\frac{P_s(L)}{P_s(0)}\right) = 10\, g_0 L \log_{10} e$

$g_0 = \frac{1}{10\, L \log_{10} e} = \frac{1}{\log_{10} e} = 2.3$

$\boxed{g_0 = 2.3\ m^{-1}}$

) En utilisant les équations données

$$\int_{P_s(0)}^{P_s(L)} \frac{dP_s}{P_s} = \int_0^L \Gamma_s\left(\sigma_{es} N_2(z) - \sigma_{as} N_1(z)\right) dz$$

$$\ln\left(\frac{P_s(L)}{P_s(0)}\right) = \Gamma_s L\left(\sigma_{es}\frac{\int_0^L N_2(z)dz}{L} - \sigma_{as}\frac{\int_0^L N_1(z)}{L}\right)$$

$$P_s(L) = P_s(0)\ e^{\Gamma_s L(\sigma_e \bar{N}_2 - \sigma_a \bar{N}_1)}$$

$$\underset{\text{en dB}}{G} = 10\log_{10}\left(\frac{P_s(L)}{P_s(0)}\right) = 10\,\Gamma_s L(\sigma_e\bar{N}_2 - \sigma_a\bar{N}_1)\log_{10} e$$

c) $L = 10\ m$, $\frac{\bar{N}_2 - \bar{N}_1}{N_{tot}} = 0.2$ et on sait $\frac{\bar{N}_1 + \bar{N}_2}{N_{TOT}} = 1$

d'où $\frac{\bar{N}_2}{N_{TOT}} = 0.6$ $\frac{\bar{N}_1}{N_{TOT}} = 0.4$

$G = 10\,\Gamma_s L\, N_{TOT}(\sigma_e 0.6 - \sigma_a 0.4)\log_{10} e$

$G = 10\,\underbrace{\Gamma_s N_{tot}\sigma_e}_{g_0} L\left(0.6 - \frac{\sigma_a}{\sigma_e}0.4\right)\log_{10} e$ $\boxed{G = 28\,dB}$

$G = 10\times10\times2.3\left(0.6 - \frac{\sigma_a}{\sigma_e}0.4\right)\log_{10} e$

Q3

3 pente : $0.2 \frac{dB}{km} \times 2 = 0.4 \frac{dB}{km}$

après 30 km : pertes = 12 dB

pour aller retour $t_g = \frac{2L}{c/n_g} = \frac{3}{3 \times 10^8 \, m/s} L$

$t_g = \cancel{7}0 \frac{\mu s}{km} L(km)$

$P_R(0) = -40 dBm$