Université Joseph Fourier
DESS Techniques et applications de la Physique,
spécialité "Optique et photonique" 2002-2003

Spectroscopie, Photométrie, Détecteurs

Correction de l'examen du 20 Janvier 2003:

Détection à distance par fluorescence laser de pollution marine par des hydrocarbures

1. $l_a = \frac{1}{n\sigma}$

$n = \frac{800kg/m^3}{12.10^{-3}} \times 6.10^{23}$ atomes de Carbone/m^3=4.10^{28} at. de C/m^3

Avec $\sigma = 10^{-23}$m^2 on a donc $l_a = 2{,}5.10^{-6}$m=2,5μm.

2. A 400nm l'absorption de la lumière de fluorescence par le pétrole est négligeable. Alors chaque tranche d'épaisseur dz reçoit une intensité laser

$$I_{laser}(z) = I_0 \exp(-z/l_a)$$

et donne donc une contribution au signal de fluorescence qui est

$$dI_{fluo} = K_{fluo}.I_{laser}(z).dz = K_{fluo}.I_0 \exp(-z/l_a).dz$$

Ainsi

$$I_{fluo} = K_{fluo} \int_0^l I_0 \exp(-z/l_a).dz = K_{fluo} I_0.l_a(1 - \exp(-l/l_a))$$

Dès que l dépasse quelques l_a on a $\exp(-l/l_a) << 1$ et donc
$I_{fluo} \rightarrow K_{fluo} I_0 l_a$, indépendant de l.

3. On a $\Delta E = \frac{1}{\lambda_{laser}} - \frac{1}{\lambda_{Raman}}$. Avec la conversion $E(cm^{-1} = 10^7/\lambda(nm)$, on tire donc:
$\Delta E = 10^7(1/308 - 1/344) = 3400cm^{-1}$
L'intensité de la raie Raman est relativement forte parce que le rayonement à 308nm n'est en fait, contrairement au pétrole, qu'assez faiblement absorbé par l'eau de mer ($l_a^{H20}(308nm) \sim$ plusieur cm). Une fois franchie la nappe de pétrole il y pénètre donc assez profondément, ce qui fait qu'un grand nombre de molécules d'eau participent à cette diffusion

4. En supposant l'absorption de la lumière Raman à 344nm par le pétrole négligeable on a:

$I_{Raman} = K_{Raman} I_{laser}(l)$
Dans le même temps on a vu que:
$I_{fluo} = K_{fluo} I_0.l_a(1 - \exp(-l/l_a))$
Ainsi:

$$\frac{I_{fluo}}{I_{Raman}} = \frac{K_{fluo}}{K_{Raman}} \frac{l_a(1 - \exp(-l/l_a))}{\exp(-l/l_a)} = \frac{K_{fluo}}{K_{Raman}} l_a(\exp(l/l_a) - 1)$$

Le rapport des 2 intensités est donc sensible à l. Cependant $K_{fluo}(\lambda = 450nm)$ dépend de la nature des hydrocarbures constituant le pétrole de même que leur spectre de fluorescence. l ne pourra donc être extrait de la mesure du rapport qu'après connaissance de la composition de la nappe d'hydrocarbures.

5. Avantages de la technique de fluorescence:
–sensibilité (pétrole en nappe fine n'absorbe pas la lumière visible)
–possibilité de faire de l'analyse qualitative de la composition de la nappe de pétrole et de mesurer son épaisseur

Inconvénients de la technique de fluorescence:
–mesure point par point, difficile dans ces conditions d'avoir une image 2D de la surface de la mer
–coût et difficulté de mise en oeuvre

6. La dispersion linéaire du spectromètre est donnée par la formule:

$$D(nm/mm) = \frac{100}{f(cm).N(10^3 traits/mm)}$$

Le détecteur a une longueur de 2048×0,0125=25,6mm. Pour que la zone spectrale d'intérêt, d'extension 450-340=210nm soit juste couverte par le détecteur, il faut donc: D = 210/25,6 = 8,2nm/mm,ce qui avec une focale de f = 5cm donne N = 100/(5.8,2) = 2,440.10^3 = 2440 traits par mm. On prendra donc un réseau de 2400 traits/mm, ce qui nous donnera finalement D = 8,33nm/mm.

Si l'on veut une résolution de 10nm, la largeur de la fente d'entrée devra être de 10/8,33=1,20mm. On fabriquera donc le spectre à cette résolution en additionnant le signal provenant de 1,2/0,0125=96 pixels adjacents.

L'ouverture numérique de la fibre devra correspondre à celle du spectromètre: un nombre d'ouverture de $f/4$, correspond en fait à une ouverture numérique qui vaut:
$ON = \sin(\arctan 0{,}5 \times \frac{1}{4}) = 0{,}12$
Son diamètre devra également correspondre à la hauteur de la fente d'entrée focalisée sur la hauteur des pixels du détecteur, soit 1mm d'après les specifications données dans l'énoncé.

7. Avec le spectromètre de 20cm de focale, l'étendue du détecteur est cette fois-ci de 1024.20=20,5mm. Pour couvrir l'intervalle spectral de 210nm il faut donc $D = 210/20{,}5 = 10{,}25 nm/mm$ soit $N = 100/(20.10{,}25) = 488$ traits/mm. Le réseau standard le plus proche aura 600 traits/mm, ce qui nous donnera finalement un $D = 8{,}33$nm/mm.

Si l'on veut une résolution de 10nm, la largeur de la fente d'entrée devra être de 10/8,33=1,20mm. On fabriquera donc le spectre à cette résolution en additionnant le signal provenant de 1,2/0,20=60 pixels adjacents.

8. $P_{crete} = \frac{10mJoule}{20ns} = \frac{10^{-2}}{2.10^{-8}} = 5.10^5$ Watt.

$P_{moyenne} = 10mJoule \times 100Hz = 1$ Watt.

Surface du spot: $= 1000m \times 10mrad = 10$ m.

9. Pendant l'impulsion toute l'énergie laser reçue par la nappe épaisse est absorbée. Une fraction de 10% est rayonnée quasi-simultanément à l'irradiation laser dans 4π stéradians, sur une plage spectrale de 100nm, par une surface de 10m de diamètre, d'aire 78,5m^2. D'où une brillance spectrale de la nappe fluorescente:

$$L_{crete} = \frac{5.10^5 Watt \times 0{,}1}{78{,}5.4\pi.100} = 0{,}5W/(m^2.nm.std)$$

La brillance spectrale moyennée dans le temps vaut alors
$L_{moyenne} = L_{crete} \times \frac{P_{moyenne}}{P_{crete}} = 10^{-4}W/(m^2.nm.std)$

10. Le soleil envoie un éclairement spectral de 0,16W/(cm^2.μm), soit $\frac{0{,}16 \times 10^4 cm^2/m^2}{10^3 nm/\mu m}$ =1,6W/(m^2.nm). Après diffusion la puissance spectrale correspondante est redistribuée sur 2π stéradians, atténuée d'un facteur 10 (facteur d'albédo), d'où la brillance spectrale de la mer éclairée par le soleil:

$$L_{mer} = \frac{1{,}6 \times 0{,}1}{2\pi} = 0{,}025W/(m^2.nm.std)$$

Cette brillance spectrale est très petite devant L_{crete} mais très grande devant $L_{moyenne}$. Pour distinguer la fluorescence de la lumière ambiante il sera donc indispensable de disposer d'un système de déclenchement rapide s'ouvrant sélectivement pendant la durée de l'impulsion laser (Un tel système (galette de microcanaux) n'est actuellement pas disponible sur les spectromètres miniatures à fibres optiques).

11. A h = 1000m d'altitude, la flaque de 10m est vue sous un angle de 10/1000=10mrd. L'image de cette flaque dans le plan focal du télescope de focale 1m a donc pour diamètre 1×10.10^{-3}=0,01m, soit 1cm, d'aire 0,78cm^2.

L'énergie E recueillie par le télescope pendant la durée Δt = 20ns d'une impulsion laser vaut:

$$E = L_{crete}\delta\Omega\Delta t$$

où $\delta\Omega$ est l'angle solide intercepté par le télescope de diamètre d:
$\delta\Omega = \pi d^2/4h^2 = 0{,}71.10^{-8}$std.
Ainsi $E = 0{,}5W \times 7{,}1.10^{-8} std \times 20.10^{-9} s = 0{,}71.10^{-15}$Joule.
Cela correspond donc à un nombre de photons qui vaut:
$N_{h\nu} = 0{,}71.10^{-15}/(3 \times 1{,}6.10^{-19}) = 1{,}5.10^3$ photons par impulsion laser.

La fraction des photons qui seront injectés dans les spectromètres est donnée par le rapport de l'aire illuminée au niveau de la fente d'entrée à la surface éclairée dans le plan focal du téléscope, qui est vaut 0,78cm^2.
Pour le spectromètre A, la surface illuminée aura une aire correspondant au diamètre de la fibre optique utilisée, qui est de l'ordre du mm^2. La fraction injectée n'est donc que de l'ordre de 10^{-4}

Pour le spectromètre B, la situation est plus favorable, car le détecteur à une hauteur qui lui permet d'accepter toute la hauteur de la surface éclairée dans le plan focal. Avec une fente d'entrée de 1,2mm de large, la fraction collectée vaut donc $0{,}12 \times 1cm^2/0{,}78cm^2$ =15%.
Le nombre de photons recueillis est donc de $0{,}15 \times 1500 = 225$.

(On remarquera par ailleurs que le nombre d'ouverture du télescope, f/3 est bien adapté à celui du spectromètre).

12. Si la fluorescence est dispersée sur 100nm, chaque élément spectral de 10nm de large reçoit le 1/10ème du total. Pour le système B, le nombre N_e de photoélectrons produits par impulsion dans chaque élément spectral est donc de $225 \times 0{,}5 \times 0{,}4/10$ soit 4,5 photons par impulsion.

13. Chaque photon transporte une énergie $h\nu = hc/\lambda$. La puissance NEP équivalente au bruit correspond alors à un nombre de photons incidents de $NEP \times \lambda/hc$. Cela correspond à un nombre N_s de photoélectrons qui est η fois ce nombre.

14. La variance σ_N du nombre d'électrons comptés sur chaque élément spectral sera donné par la formule:

$$\sigma_N = \sqrt{N_s^2 + N_e}$$

soit $\sigma_N = \sqrt{9 + 4{,}5} = 3{,}7$. Le signal sur bruit est donc dans ce cas de 4,5/7,3=0,6.

15. Avec 7 impulsions laser, le nombre moyen de photoélectrons générés dans chaque élément spectral est de $7 \times 4{,}5 = 31{,}5$. La variance correspondante vaut alors $\sqrt{9 + 31{,}5} = 6{,}4$, et le signal sur bruit 4,9. Il semble donc possible de détecter des flaques de pétrole de 10m de diamètre avec ce dispositif.