

Faculté des arts et des sciences  
Département de physique

PHY 3040

# LABORATOIRE D'OPTIQUE

NOTES DE TRAVAUX PRATIQUES  
AUTOMNE 2019

Andrea BIANCHI, David LAFRENIÈRE



# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>v</b>
<b>1 Faisceaux gaussiens</b>	<b>1</b>
1.1 But . . . . .	1
1.2 Objectifs . . . . .	1
1.3 Théorie . . . . .	1
1.4 Manipulations . . . . .	5
1.5 Matériel . . . . .	5
1.6 Instructions particulières . . . . .	6
1.7 Références . . . . .	6
<b>2 Absorption optique</b>	<b>7</b>
2.1 But . . . . .	7
2.2 Objectifs . . . . .	7
2.3 Théorie : approche matricielle . . . . .	7
2.4 Manipulations . . . . .	9
2.5 Matériel . . . . .	9
2.6 Références . . . . .	10
<b>3 Fibres optiques</b>	<b>11</b>
3.1 But . . . . .	11
3.2 Objectifs . . . . .	11
3.3 Manipulations . . . . .	11
3.4 Matériel . . . . .	13
3.5 Instructions particulières . . . . .	14
Annexe . . . . .	15
<b>4 Holographie</b>	<b>19</b>
4.1 But . . . . .	19
4.2 Objectifs . . . . .	19

4.3	Théorie . . . . .	19
4.4	Matériel . . . . .	21
4.5	Instructions particulières . . . . .	22
	Annexes . . . . .	25
	Notes pour développement des plaques du montage 1 . . . . .	25
	Manuel du montage d'holographie en lumière visible (montage 2) . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Optique non-linéaire</b>	<b>43</b>
5.1	But . . . . .	43
5.2	Théorie . . . . .	43
5.3	Manipulations . . . . .	46
5.4	Matériel . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Diffusion Raman</b>	<b>49</b>
6.1	But . . . . .	49
6.2	Objectifs . . . . .	49
6.3	Théorie . . . . .	49
6.4	Système de mesure . . . . .	52
6.5	Manipulations . . . . .	54
6.6	Matériel . . . . .	55
6.7	Instructions particulières . . . . .	55
6.8	Références . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Cohérence de la lumière</b>	<b>57</b>
7.1	But . . . . .	57
7.2	Objectifs . . . . .	57
7.3	Théorie . . . . .	57
7.4	Matériel . . . . .	57
<b>8</b>	<b>Rotation de Faraday</b>	<b>59</b>
8.1	Introduction . . . . .	59
8.2	Objectifs . . . . .	59
8.3	Manipulations . . . . .	59
8.4	Matériel . . . . .	60
	Annexes . . . . .	62
	Manuel du manufacturier du montage original . . . . .	62

<b>9 Effet Zeeman</b>	<b>69</b>
9.1 But . . . . .	69
9.2 Objectifs . . . . .	69
9.3 Introduction . . . . .	69
9.4 Théorie . . . . .	70
9.5 Interféromètre de Fabry-Pérot . . . . .	72
9.6 Manipulations . . . . .	74
9.7 Matériel . . . . .	75
9.8 Instructions particulières . . . . .	75
9.9 Références . . . . .	76
<b>10 Photons intriqués</b>	<b>77</b>
10.1 But . . . . .	77
10.2 Objectifs . . . . .	77
10.3 Théorie . . . . .	77
10.4 Manipulations . . . . .	80
10.5 Matériel . . . . .	80
<b>Annexes</b>	<b>81</b>
<b>A Ajustement par moindre carrés</b>	<b>83</b>
A.1 Théorie . . . . .	83
A.2 Exemple de minimisation avec Matlab . . . . .	84
A.3 Exemple de minimisation avec Python . . . . .	85
<b>B Réseaux de diffraction</b>	<b>87</b>
B.1 Équation du réseau de diffraction . . . . .	87
B.2 Intervalle spectral libre . . . . .	88
B.3 Résolution . . . . .	88
B.4 Dispersion angulaire . . . . .	89
B.5 Dispersion linéaire . . . . .	89
B.6 Distribution en énergie . . . . .	90
B.7 Blaze . . . . .	91



# Préface

Le laboratoire d'optique a été développé par le Professeur John Low Brebner. Il a su monter une série d'expériences fascinantes et il a instauré dans ce laboratoire des méthodes qui laissent une large part à l'initiative et à la créativité des étudiants. John n'a jamais ménagé ses efforts pour captiver les étudiants et leur donner le maximum d'information. Atteint d'une grave maladie, il n'a jamais cessé de fournir un enseignement de grande qualité.

Le Professeur Brebner est décédé en janvier 2001. Nous espérons être à la hauteur des standards élevés qui le guidaient et nous lui dédions ces notes de travaux pratiques.

La version originale de ces notes a été rédigée par Richard Leonelli et Sjoerd Roorda. Au fil des années, d'autres professeurs y ont apporté diverses modifications et faits quelques ajouts, notamment David Lafrenière, Rikard Blunck et Carlos Silva. Enfin, notons la contribution de l'étudiant au baccalauréat Jean-Luc Shaw à l'été 2015 à qui l'on doit l'ajout de plusieurs éléments d'information et l'harmonisation de la présentation des diverses expériences.





# Laboratoire 1

## Propagation de faisceaux gaussiens

### 1.1 But

Étudier les propriétés et la propagation de faisceaux optiques à section gaussienne dans l'approximation paraxiale. Se familiariser avec la technique de la matrice ABCD.

### 1.2 Objectifs

- Pour un montage sans lentille, avec une lentille et avec deux lentilles, mesurer le profil de propagation du faisceau laser et déterminer ses paramètres  $\omega_0$ ,  $z_0$ ,  $q_0$  et  $\theta_0$  ;
- Pour les montages avec lentilles, comparer les valeurs expérimentales aux valeurs calculées théoriquement par la méthode de la matrice ABCD.

### 1.3 Théorie

#### Optique géométrique

Vous êtes déjà familiers avec les lois de l'optique géométrique dans l'approximation paraxiale et en particulier avec les lois de combinaison de lentilles. Il existe toutefois une façon plus puissante d'évaluer les trajets optiques dans le cas de systèmes optiques complexes : la technique de la matrice ABCD.

Soit un faisceau optique qui se déplace de gauche à droite le long de l'axe  $z$  et qui rencontre une surface ayant un rayon de courbure  $R$ . Par convention, on place l'origine du système de coordonnées au point de rencontre de la surface et de l'axe  $z$ . Si le centre de courbure de la surface est à gauche de l'origine,  $R$  sera négatif. En une position  $z$  donnée, un rayon optique est décrit par une position  $x$  et un angle  $\gamma$ . La propagation du rayon dans un milieu d'indice de réfraction constant est décrite par une matrice de transfert  $\mathbf{T}$  et la réfraction à la surface par une matrice de réfraction  $\mathbf{R}$ . La matrice ABCD, ou matrice du système, est égale au produit de toutes les matrices impliquées par le déplacement du rayon d'un point  $a$  à un point  $b$  :

$$\begin{pmatrix} x' \\ \gamma' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{n+1} \mathbf{R}_n \mathbf{T}_n \mathbf{R}_{n-1} \mathbf{T}_{n-1} \dots \mathbf{R}_1 \mathbf{T}_1 \begin{pmatrix} x \\ \gamma \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

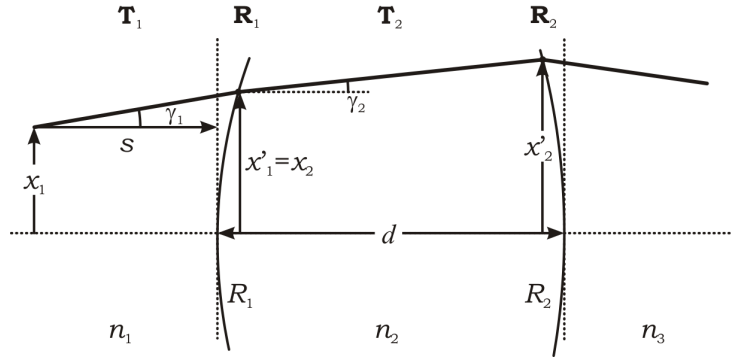


Figure 1.1 : Construction pour la propagation d'un rayon dans trois milieux d'indices différents.

Pour fixer les idées, prenons trois milieux d'indices  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  séparés par deux surfaces de rayons de courbures  $R_1$  (positif) et  $R_2$  (négatif), voir figure 1.1. Pour la propagation du faisceau à partir d'un point une distance  $s$  devant la première surface, on a, dans l'approximation des angles paraxiaux ( $\sin \gamma = \gamma$ ), que :

$$x'_1 = x_1 - s\gamma_1, \quad (1.2)$$

et donc,

$$\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} 1 & -s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

(N'oubliez pas que, par convention,  $s$  est négatif et donc  $-s$  positif). Il n'est pas trop difficile de montrer que la matrice de réfraction de la première surface est telle que :

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_2 R_1} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_1 \\ \gamma'_1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Puis, la matrice de transfert d'une surface à l'autre et la matrice de réfraction à la deuxième surface s'écriront :

$$\mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_3}{n_3 R_2} & \frac{n_2}{n_3} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

et ainsi de suite.

Quelques matrices ABCD de base sont données dans la table suivante.

Table 1.1 : Matrices ABCD pour quelques opérations de base.

Opération	Matrice
Transfert sur une distance $d$	$\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Réfraction par lentille mince de focale $f$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$
Réfraction à une surface de rayon de courbure $R$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$
Réflexion sur un miroir sphérique de rayon de courbure $R$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} & -1 \end{pmatrix}$

## Faisceaux gaussiens

L'optique géométrique simple décrite ci-dessus ne tient pas compte de la nature ondulatoire de la lumière, ce qui conduit à des prédictions non physiques. Par exemple, selon l'optique géométrique, un faisceau parallèle sera focalisé par une lentille en un point de taille infinitésimale, ce que les lois de la diffraction empêchent. Pour aller au-delà de l'optique géométrique, il faut résoudre explicitement l'équation d'onde déduite de l'électromagnétisme. Dans l'approximation paraxiale, qui implique une symétrie cylindrique et des angles de convergence ou divergence petits, une solution robuste de l'équation d'onde s'écrit,

$$E(\vec{r}) = \Psi(x, y, z)e^{-ikz}, \quad (1.6)$$

avec,

$$\Psi(x, y, z) = E_0 \exp \left\{ \frac{-(x^2 + y^2)}{w(z)^2} \right\}. \quad (1.7)$$

La fonction enveloppe du faisceau est donc une gaussienne, d'où le nom d'*optique gaussienne* pour décrire cette théorie. La quantité  $w(z)$  représente la demi-largeur à  $1/e$  de cette gaussienne. L'optique gaussienne prédit que (voir l'annexe),

$$w(z)^2 = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right] \quad \text{avec} \quad z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (1.8)$$

où  $w_0$  est la demi-largeur minimale qu'atteindra le faisceau en  $z = 0$ .  $z_R$  est appelée la portée de Rayleigh, distance pour laquelle la largeur du faisceau a augmenté d'un facteur  $\sqrt{2}$  (pour les amateurs de photographie,  $z_R$  correspond à la profondeur de champ). On définit aussi  $b = 2z_R$ , le paramètre confocal.

De même, le rayon de courbure du front d'onde est donné par,

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z_R}{z} \right)^2 \right] \quad (1.9)$$

Dans un régime où  $z \gg z_R$ , on a que,

$$w(z) \approx \frac{\lambda z}{\pi w_0}, \quad (1.10)$$

donc la largeur du faisceau augmente linéairement avec  $z$ , l'angle de divergence étant donné par  $\theta = \lambda/\pi w_0$ . De même dans ce régime,  $R(z) \approx z$ .

#### ATTENTION

Les équations qui précèdent sont relatives au champ électrique de l'onde alors que vous en mesurerez l'intensité ! N'oubliez donc pas que  $I \propto E^2$ .

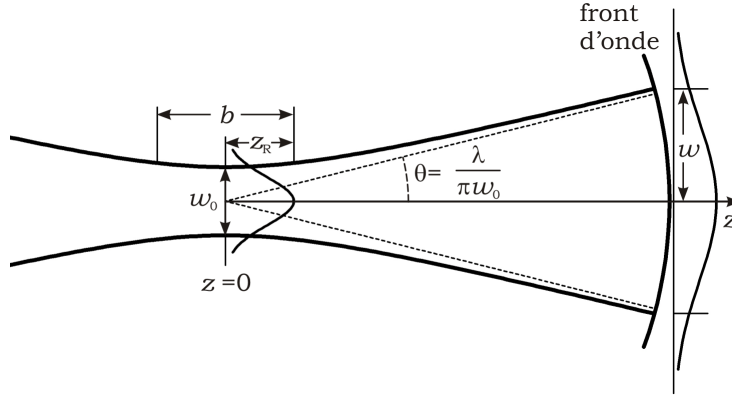


Figure 1.2 : Propagation d'un faisceau gaussien.

Beaucoup de faisceaux optiques peuvent être décrits adéquatement par l'optique gaussienne. En particulier, tous les faisceaux lasers dont la cavité résonante est à symétrie cylindrique auront une section gaussienne.

On peut combiner la théorie des faisceaux gaussiens et celle de la matrice ABCD en introduisant le paramètre de taille complexe  $q'$  :

$$q'(z) = z + iz_R \quad (1.11)$$

En multipliant par  $(z - iz_R)/(z - iz_R)$  et en utilisant les équations ci-dessus, on obtient que,

$$\frac{1}{q'(z)} = \frac{1}{R(z)} - \frac{i\lambda}{\pi w(z)^2}. \quad (1.12)$$

C'est donc dire que la partie réelle de l'inverse de  $q'$  est l'inverse du rayon de courbure et que sa partie imaginaire est reliée à la demi-largeur du faisceau. Finalement, le paramètre de taille complexe obéit à la loi :

$$q'(z_2) = \frac{Aq'(z_1) + B}{Cq'(z_1) + D}, \quad (1.13)$$

où les valeurs  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont les éléments de la matrice ABCD relative à la propagation du faisceau de  $z_1$  à  $z_2$ . De façon équivalente, cette expression peut s'écrire :

$$\frac{1}{q'(z_2)} = \frac{C + D/q'(z_1)}{A + B/q'(z_1)} \quad (1.14)$$

## Méthode de mesure

On peut mesurer avec précision la demi-largeur d'un faisceau gaussien en déplaçant une lame de rasoir placée devant un détecteur (une photodiode). Le signal enregistré par le détecteur (i.e. le courant) en fonction de la position  $x$  de la lame le long de l'axe de déplacement sera alors proportionnel à l'intégrale d'une fonction gaussienne, c'est-à-dire la fonction d'erreur :

$$I(x) = \frac{I_{\max}}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\sqrt{2}(x - x_0)}{w} \right] \right) \quad (1.15)$$

où  $I_{\max}$  est le courant maximal (faisceau laser non occulté),  $x_0$  est la position où l'intensité du faisceau est maximale et  $w$  est la demi-largeur à  $1/e^2$  du faisceau laser. On peut ainsi trouver  $w$  en ajustant la fonction ci-dessus sur les données mesurées ; consultez l'annexe A sur l'ajustement par moindres carrés au besoin. Une façon approximative mais rapide d'estimer un point de départ pour  $w$  pour faire l'ajustement est de mesurer la distance entre les points où le signal vaut 10% et 90% de  $I_{\max}$  : cette distance est égale à  $1.28w$ .

La prise de mesures se fait par ordinateur : le déplacement de la lame, la mesure du courant, et la sauvegarde dans un fichiers sont fait automatiquement. Pour démarrer le logiciel de contrôle et de prise de mesures, cliquez sur l'icône FGA. Notez que les positions de la lame sauvegardées dans le fichier sont en  $\mu\text{m}$ . Les données seront sauvegardées en format ASCII sous la forme de deux colonnes. La première ligne donne le nombre de points et le nombre de balayage. Les autres lignes contiennent les positions et amplitudes du signal mesuré. Vous pouvez prédire le comportement de votre système de lentilles à l'aide de la routine Matlab `propagation.m`. Vous pouvez aussi lire vos données dans Matlab avec la routine `lecture.m`.

## 1.4 Manipulations

1. Caractérisez le faisceau laser : déterminez sa demi-largeur à plusieurs positions le long du rail optique (en ajustant l'équation (1.15) sur vos mesures de courant en fonction de la position de la lame de rasoir), et ensuite déterminez sa demi-largeur minimale  $w_0$  et la position  $z_0$  de ce minimum ( $w(z_0) = w_0$ ), son paramètre confocal  $b$  (en ajustant l'équation (1.8) sur vos mesures de  $w(z)$ ) ; déterminez aussi l'angle de divergence du laser.
2. Une fois le laser caractérisé, placez une lentille convergente de votre choix sur le rail et mesurez la demi-largeur  $w(z)$  en plusieurs points au voisinage du point focal de façon à pouvoir déterminer les nouvelles valeurs de  $w_0$ ,  $z_0$  et  $b$  après passage du faisceau par la lentille (toujours en ajustant l'équation (1.8) sur vos mesures de  $w(z)$ ). Comparez vos résultats expérimentaux des nouvelles valeurs de  $w_0$ ,  $z_0$  et  $b$  aux valeurs prédites en utilisant le formalisme ABCD appliqué aux faisceaux gaussiens (équations (1.11) à (1.14)). Vous pouvez utiliser la routine `propagation.m` pour faire vos calculs de prédiction.
3. Répétez maintenant l'étape précédente avec deux lentilles de votre choix.

## 1.5 Matériel

Le montage de l'expérience de faisceaux gaussiens contient le matériel suivant. À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

1. Laser HeNe 10 mW
2. Photodiode avec filtre
3. Picoampèremètre
4. Ordinateur
5. 2 lentilles
6. Cible d'alignement
7. Tournevis hexagonal 1/4
8. Tournevis à tête plate

## 1.6 Instructions particulières

### Alignement

Il est important que toutes les pièces optiques soient bien centrées sur un axe optique commun. Commencez par aligner le faisceau laser par rapport au rail optique. Centrez le faisceau laser sur une cible et déplacez celle-ci le long du banc en vous assurant que le faisceau y demeure toujours centré. Du même coup, assurez-vous que le faisceau est bien centré sur le détecteur, de façon à ce que le signal détecté lorsque la lame de rasoir est à mi-course soit approximativement la moitié du signal maximum (faisceau non occulté). Ne touchez plus par la suite à l'orientation du faisceau laser.

De même, pour introduire une lentille sur le banc, placez la lentille sur son support et ajustez celui-ci de façon à ce que le faisceau laser ne soit pas dévié par la lentille ; vous pouvez vérifier ceci à l'aide de la cible utilisée précédemment, placée au bout du rail. De même, vous pouvez vérifier que la réflexion du laser par la lentille recoupe la sortie du laser.

## 1.7 Références

Robert D. Guenther *Modern Optics* (Wiley, 1990).

Alexander Hornberg *Propagation of Gaussian beams – A comprehensive introduction*, Laser Technik Journal **2**, no. 2, 1613 (2005) doi:10.1002/latj.200790044.

## Laboratoire 2

# Absorption optique

### 2.1 But

Le but de cette expérience est de familiariser les étudiants avec certaines techniques de spectroscopie optique. L'équipement principal se compose d'une source de lumière «blanche», d'un monochromateur, d'une photodiode au silicium comme détecteur et d'un amplificateur à détection synchrone interfacé à un ordinateur. Vous devriez vous référer aux notes de travaux pratiques du cours PHY 2476 pour vous en remémorer le fonctionnement. Dans un premier temps, vous vous familiariserez avec les propriétés des réseaux (annexe B) et caractériserez la résolution du spectromètre en tentant de résoudre les raies du sodium. (Le réseau du spectromètre actuel comporte 1200 traits/mm.)

### 2.2 Objectifs

- Mesurer le spectre d'absorption d'un échantillon de GaSe et déterminer la bande d'énergie interdite ;
- Mesurer le spectre d'absorption d'une multicouche SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/verre et déterminer l'épaisseur des couches ;
- Mesurer le spectre d'absorption d'un échantillon d'or colloïdal et déterminer la densité de particules.

### 2.3 Théorie : approche matricielle

Il est possible de générer des filtres diélectriques taillés sur mesure par le dépôt d'une succession de couches minces de matériaux d'épaisseur et d'indice de réfraction différents : miroirs de réflectance supérieure à 99.5 %, miroirs «chauds» et «froids», filtres interférentiels, etc.

$$\begin{array}{c|cc|c}
 n_0 & & n_1 & n_2 \\
 \hline
 \begin{array}{c} E_+^0 \\ \xrightarrow{\quad} \\ \xleftarrow{\quad} E_-^0 \end{array} & \begin{array}{cc} \begin{array}{c} E_+^1 \\ \xrightarrow{\quad} \\ \xleftarrow{\quad} E_-^1 \end{array} & \begin{array}{c} A_+^1 \\ \xrightarrow{\quad} \\ \xleftarrow{\quad} A_-^1 \end{array} \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{c} E_+^2 \\ \xrightarrow{\quad} \\ \xleftarrow{\quad} E_-^2 \end{array} \end{array} \\
 \hline
 \end{array}$$

Soit le système illustré ci-dessus, comportant trois couches séparées par deux interfaces parallèles. Pour simplifier, une incidence normale a été illustrée mais le cas général où l'onde incidente arrive sur la première interface avec un angle d'incidence sera traité. Il faut distinguer les deux états de polarisation possible : i) polarisation *s* (de l'allemand «senkrecht», perpendiculaire) où est perpendiculaire au plan d'incidence, et ii) polarisation *p* (de l'allemand «parallel») où est parallèle au plan d'incidence. Les conditions aux frontières imposent, à l'interface entre les milieux *i* et *i* + 1 :

$$\begin{aligned} n_i \cos \theta_i (E_{s+}^i - E_{s-}^i) &= n_{i+1} \cos \theta_{i+1} (E_{s+}^{i+1} - E_{s-}^{i+1}) \\ E_{s+}^i + E_{s-}^i &= E_{s+}^{i+1} + E_{s-}^{i+1} \\ \cos \theta_i (E_{p+}^i - E_{p-}^i) &= \cos \theta_{i+1} (E_{p+}^{i+1} - E_{p-}^{i+1}) \\ n_i (E_{p+}^i + E_{p-}^i) &= n_{i+1} (E_{p+}^{i+1} + E_{p-}^{i+1}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Ça donne pour le **cas p** :

$$\begin{aligned} r_{i,p} &= \frac{n_{i+1} \cos \theta_i - n_i \cos \theta_{i+1}}{n_{i+1} \cos \theta_i + n_i \cos \theta_{i+1}} \\ t_{i,p} &= \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_{i+1} \cos \theta_i + n_i \cos \theta_{i+1}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Et pour le **cas s** :

$$\begin{aligned} r_{i,s} &= \frac{n_i \cos \theta_i - n_{i+1} \cos \theta_{i+1}}{n_i \cos \theta_i + n_{i+1} \cos \theta_{i+1}} \\ t_{i,s} &= \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_{i+1} \cos \theta_{i+1}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

On peut maintenant écrire la solution des deux couples d'équation aux frontières sous une forme matricielle compacte :

$$\mathbf{E}^i = \mathbf{I}^i \mathbf{E}^{i+1} \quad (2.4)$$

avec,

$$\mathbf{E}^i = \begin{bmatrix} E_+^i \\ E_-^i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}^i = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_i} & \frac{r_i}{t_i} \\ \frac{r_i}{t_i} & \frac{1}{t_i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_p = \frac{\cos \theta_{i+1}}{\cos \theta_i} \begin{bmatrix} \frac{1}{t_i} & \frac{r_i}{t_i} \\ \frac{r_i}{t_i} & \frac{1}{t_i} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

Il faut aussi propager les faisceaux de l'interface *i* + 1 à l'interface *i* :

$$\mathbf{E}^i = \mathbf{T}^i \mathbf{A}^i \quad (2.6)$$

$$\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} e^{-i\delta_i} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_i} \end{bmatrix}, \quad \delta_i = \frac{4\pi d_i n_i \cos \theta_i}{\lambda_0} \quad (2.7)$$

où *d<sub>i</sub>* est l'épaisseur de la couche *i* et *λ<sub>0</sub>* est la longueur d'onde dans le vide de l'onde incidente. Le processus se généralise au cas de *k* + 1 couches (numérotées de 0 à *k*) :

$$\mathbf{E}^0 = \mathbf{M} \mathbf{E}^k \quad (2.8)$$

avec,

$$\mathbf{M} = \mathbf{I}^0 \mathbf{T}^1 \mathbf{I}^1 \mathbf{T}^2 \dots \mathbf{T}^{k-1} \mathbf{I}^{k-1} \quad (2.9)$$



Le dernier milieu étant d'épaisseur suffisamment grande pour qu'il n'y ait pas d'interférence, on ne perd pas de généralités en posant :

$$\mathbf{E}^k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

En remplaçant les éléments de  $\mathbf{M}$  par leurs valeurs, on peut déterminer les coefficients de réflexion et de transmission de l'empilement de couches :

$$r = \frac{E_-^0}{E_+^0}, \quad t = \frac{E_+^k}{E_+^0} = \frac{1}{E_+^0}, \quad (2.11)$$

de même que sa réflectance  $R$  et sa transmittance  $T$  :

$$R = |t|^2, \quad T = \frac{n_k \cos \theta_k}{n_0 \cos \theta_0} |t|^2 \quad (2.12)$$

Inversement, un spectre d'absorption ou de réflexion d'une multicouche diélectrique peut permettre de trouver les épaisseurs et indices des couches par une procédure d'optimisation par moindres carrés.

## 2.4 Manipulations

L'expérience consiste à établir le trajet optique et à mesurer la transmittance et la réflectance de plusieurs échantillons pour les polarisations parallèle et perpendiculaire. En particulier, vous aurez à étudier un échantillon constitué de deux couches minces, respectivement de  $\text{SiO}_2$  et de  $\text{TiO}_2$  déposées sur une lame de verre ( $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{verre}$ ). En vous inspirant de la théorie explicitée en annexe et en utilisant Matlab, vous pourrez déterminer à partir de vos mesures les épaisseurs respectives des deux couches.

Vous disposez aussi d'un échantillon semi-conducteur (GaSe) dont vous pourrez déterminer le seuil de transmission. Puis, vous examinerez un échantillon de verre contenant des nanoparticules d'or.

## 2.5 Matériel

Le montage de l'expérience d'absorption contient les éléments suivants. À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

1. Lampe au sodium
2. Source de lumière blanche
3. Monochromateur à réseau
4. Roulette de modulation
5. Amplificateur à détection synchrone
6. Photodiode
7. Iris

8. Polariseur
9. Goniomètre
10. 2 Lentilles Biconvexes
11. Ordinateur
12. Échantillon d'or colloïdal
13. Échantillon de GaSe
14. Échantillon de  $\text{SiO}_2$  -  $\text{TiO}_2$
15. Niveau

Table 2.1 : Indice de différents matériaux en fonction de la longueur d'onde.

$\lambda$ (nm)	Indices			
	Verre	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$
400	1.5304	2.5356	1.4337	2.281
450	1.5248	2.4301	1.4301	2.233
500	1.5207	2.3644	1.4276	2.207
550	1.5176	2.3211	1.4257	2.196
600	1.5152	2.2912	1.4243	2.186
650	1.5134	2.2697	1.4232	2.184
700	1.5119	2.2537	1.4223	2.182
750	1.5107	2.2415	1.4226	2.181
800	1.5097	2.2321	1.4210	2.181
850	1.5088	2.2245	1.4205	2.180

## 2.6 Références

G. R. Fowles, «Introduction to Modern Optics» (Dover Publications) ; formalisme un peu différent, incidence normale seulement.

E. Hecht, «Optics» (Pearson) ; même formalisme que Fowles, incidence oblique incluse.

R. D. Guenther, «Modern Optics» (Oxford University Press) ; formalisme présenté dans l'annexe.

## Laboratoire 3

# Fibres optiques

### 3.1 But

Le but de cette expérience est de vous familiariser avec quelques unes des propriétés des fibres optiques, lesquelles jouent aujourd'hui un rôle crucial dans les technologies de l'information et des communications. Vous travaillerez avec des fibres multimode et monomode. Vous apprendrez d'abord à faire des clivages propres des bouts de fibres afin d'obtenir un bon couplage avec la lumière d'une source laser. Ensuite vous observerez quelques propriétés des fibres et étudierez la propagation des modes dans celles-ci.

Comme préparation pour cette expérience, on recommande aux étudiants de regarder le fonctionnement des fibres optiques. Le livre d'expériences avec des fibres optiques, disponible pour consultation au laboratoire, contient une excellente introduction au sujet.

### 3.2 Objectifs

- Déterminer l'ouverture numérique de toutes les fibres ;
- Déterminer tous les modes qui se propagent dans chaque fibre monomode ;
- Déterminer les type de fibres monomodes que vous avez, monomode I, II ou III.

### 3.3 Manipulations

Pour faire l'expérience, chaque équipe dispose d'un bout de fibre multimode et de deux bouts de fibre monomode. Les deux bouts de fibre monomode ont été choisis au hasard parmi les trois types de fibre monomode spécifiés ci-bas ; par vos mesures vous aurez à déterminer quels types vous avez.

Avant de procéder aux mesure pour chaque bout de fibre, vous devez en préparer les deux extrémités selon la procédure expliquée par le responsable de l'expérience.

#### **Fibre multimode**

Couplez la lumière du laser dans la fibre. Pour maximiser l'efficacité du couplage, mesurez l'intensité lumineuse à la sortie de la fibre à l'aide de la photodiode et jouez avec les diverses vis d'ajustement pour en maximiser l'intensité. Une fois un bon couplage atteint, dirigez la sortie

Table 3.1 : Caractéristiques des fibres disponibles, telles que spécifiées par le fabricant

Fibre	Rayon du coeur ( $\mu\text{m}$ )	Ouverture numérique
Multimode	52.5	0.22
Monomode I	1.75	0.13
Monomode II	2.2	0.13
Monomode III	1.8	0.20

de la fibre de façon à projeter la lumière sur l'écran. Observez le patron lumineux produit, et si vous le désirez prenez-le en photo. Comment expliquez-vous ce que vous voyez ?

Mesurez ensuite l'ouverture numérique à la sortie de la fibre en mesurant la taille du patron lumineux sur l'écran et la distance de celui-ci à la sortie de la fibre. Déterminez le nombre  $V$ .

Vous pouvez faire ces mesures à une seule longueur d'onde.

### Fibres monomodes

Couplez la lumière du laser dans la fibre, tel qu'expliqué ci-haut. Une fois un bon couplage atteint, dirigez la sortie de la fibre de façon à projeter la lumière sur le capteur CCD (ou CMOS). Le logiciel FlyCapture (ou UCviewer) installé sur l'ordinateur vous permettra de visualiser et de sauvegarder les images captées par le CCD/CMOS.

Déterminez quels modes sont transmis par la fibre. Vous pouvez sélectionner différents modes en modifiant légèrement la position et/ou l'orientation de l'entrée de la fibre par rapport au laser à l'aide des vis d'ajustement. Tentez de détecter autant de modes que possible. Enregistrez une image de chaque mode détecté. Faites ces mesures à 405 nm et à 632,8 nm.

Mesurez l'ouverture numérique de la fibre. Pour une fibre monomode, la relation entre l'ouverture numérique et l'angle de divergence du faisceau à la sortie de la fibre n'est pas parfaite et est sujette à une certaine ambiguïté car le patron lumineux n'a pas de bord bien défini. Néanmoins, il est commun d'approximer l'ouverture numérique comme étant le sinus de l'angle de divergence du faisceau à la sortie de la fibre, en adoptant comme angle de divergence l'angle par rapport à l'axe optique pour lequel l'intensité lumineuse est réduite à 5% de sa valeur sur l'axe, pour le mode fondamental (i.e.  $\text{LP}_{01}$ ). Vous pouvez mesurer cet angle de divergence en enregistrant des images du mode fondamental en plaçant le détecteur à différentes distances du bout de la fibre à l'aide de la plateforme mobile. En analysant chaque image par ordinateur, vous pouvez déterminer la largeur en pixels pour que l'intensité décroisse à 5% de son maximum, et convertir cette largeur en unité de longueur sachant qu'un pixel fait  $5.2 \mu\text{m}$ . Sachant que les graduations de la plateforme mobile sont en dixième de pouce, vous pouvez ensuite calculer l'angle de divergence du faisceau et ainsi l'ouverture numérique. Vous pouvez faire cette mesure à une seule longueur d'onde.

Déterminez lesquels des 3 types de fibre monomode vous aviez. Commentez les modes que vous avez observés pour les différentes fibres/lasers étant donné le nombre d'onde normalisé  $V$  et la théorie de propagation des modes.

## 3.4 Matériel

À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

Le montage 1 contient le matériel suivant :

1. Lasers à 405 nm, 543.5 nm et 632.8 nm (à partager avec le montage 2)
2. Microscope
3. Cliveur
4. Caméra CCD PointGrey (dimension des pixels :  $3.75\ \mu\text{m}$ , carré) ou CMOS Thorlabs (dimension des pixels :  $5.2\ \mu\text{m}$ , carré)
5. Plateforme mobile, graduation en dixième de pouce
6. Ordinateur muni du logiciel FlyCapture ou UCviewer
7. Coupleur de fibre
8. Support à fibre
9. 4 porte-fibres
10. Photodiode
11. Picoampèremètre Keithley 6485
12. Bouteille d'acétone
13. Lame de rasoir
14. Plaque à couper
15. Tournevis hexagonal 1/6
16. Tournevis hexagonal 3/16
17. Tournevis hexagonal 5/64
18. Règle (70 cm)
19. Écran de projection
20. Objectif de microscope (20 X)
21. Objectif de microscope (60 X)

Le montage 2 contient le matériel suivant :

1. Lasers à 405 nm, 543.5 nm et 632.8 nm (à partager avec le montage 2)
2. Caméra CCD PointGrey (dimension des pixels :  $3.75\ \mu\text{m}$ , carré) ou CMOS Thorlabs (dimension des pixels :  $5.2\ \mu\text{m}$ , carré)
3. Plateforme mobile, graduation en dixième de pouce
4. Ordinateur muni du logiciel FlyCapture ou UCviewer
5. Coupleur de fibre
6. Support à fibre
7. 4 porte fibres
8. Photodiode
9. Picoampèremètre Keithley 6485
10. Objectif de microscope (20 X)

11. Objectif de microscope (40 X)
12. Objectif de microscope (60 X)
13. Clef hexagonale 5/64
14. Tournevis hexagonal 1/8
15. Tournevis hexagonal 3/16
16. Écran de projection

## 3.5 Instructions particulières

### Préparation des fibres

Pour les manipulations de base de ce laboratoire, on suggère d'utiliser des bouts de fibre d'une longueur d'environ 1–1.5 m. Avant de cliver chaque bout, il faut d'abords retirer la gaine protectrice de la fibre sur une longueur d'environ 2–3 cm, ce qu'on peut faire en faisant, très délicatement, une petite incision dans la gaine de la fibre à l'aide d'une lame de rasoir et en laissant ensuite tremper le bout dans l'acétone pendant quelques minutes. Ensuite on utilise le cliveur pour cliver chaque bout et on vérifie la qualité du clivage à l'aide d'un microscope optique. Une fibre bien clivée montrera une surface uniforme et circulaire au microscope.

### Couplage

L'idée est de bien aligner et de bien focaliser le faisceau laser sur le cœur de la fibre, de façon à maximiser l'intensité du signal lumineux à la sortie de la fibre. Pour la fibre multimode, un bon couplage est aisé à obtenir car son cœur est relativement gros. Par contre, comme le cœur guidant de la fibre monomode n'a que quelques micromètres de diamètre, la focalisation du faisceau laser et son alignement sont plus critiques et obtenir un bon couplage peut prendre beaucoup plus de temps.

## Annexe : Manuel du cliveur



FTS-B265-6  
Issue 6 : Aug. 2008

## S325 Precision Cleaver Operating Instructions

- Please read entire manual prior to usage.
- This manual must be kept with the S325 Precision Cleaver.

### Safety Instructions

This manual contains the complete operating and maintenance instructions for the S325 Precision Cleaver. Please review this manual carefully before operating the S325 Precision Cleaver.

The following safety instructions must be observed whenever this product is operated, serviced, or repaired. Failure to comply with any of these instructions or with any precaution or warning contained in this manual is in direct violation of the standards of the design, the manufacturer, and the intended use of the instrument. THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD. assumes no liability for the customer's failure to comply with these requirements.

### Safety Instructions



#### CAUTION

Failure to comply with any of the instructions, which are indicated by this symbol, may cause serious injury or damage to the machine.



#### ATTENTION

Failure to comply with any of the instructions, which are indicated by this symbol, may cause the device to function improperly and degrade the performance.

Please contact THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD. with any questions relating to the description of this manual.

In no case will THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD. be liable to the buyer, for any consequential or indirect damage which is caused by product failure, malfunction, or any other problem.



#### CAUTION

- Avoid soaking the S325 with water. Doing so may cause malfunction.
- Do not drop, throw, and handle it roughly. Doing so may cause machine's malfunction.
- Do not use in a humid, dirty, or unstable site. Doing so may cause fire, electrical shock, or malfunction.
- Please take care when disposing of fibers from the fiber waste bin. Scattered fibers may cause injury.
- The fiber waste bin for loose fiber must be installed into the S325 during operation, otherwise there is danger for loose fiber to scatter.



#### ATTENTION

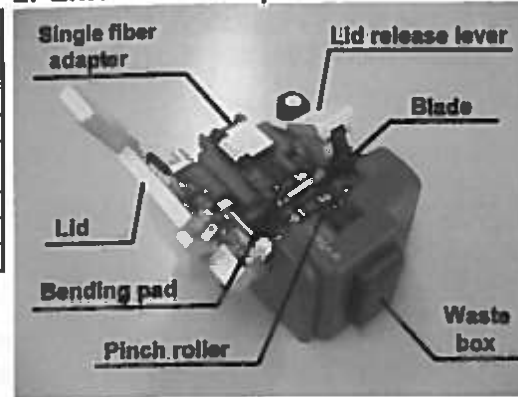
- Use an appropriate tool when loosening or tightening the set screw to fix the single fiber adapter to the unit and gently tighten the screw.
- Strip the fiber so that 14 to 25mm is exposed passed your aimed cleave length. This will allow the automatic fiber waste disposal feature to work properly. For instance :  
In case of 16mm cleave length, remove the coating more than 30mm(=16+14), and less than 41mm(=16+25).
- Please clean the fiber with alcohol after stripping the coating material that was stripped by alcohol before setting it on to S325.
- Do not use Organic solvent (e.g. Acetone) to clean the rubber pads.

# FILEL

## 1. Components

Part	Part No.	Quantity
Main body	S325A-01 or S325S80-01	1
Soft case	S325A-02	1
Waste bin	S325A-03	2 (1 Reserve)
Single fiber adapter	S325A-04	1
Big waste box	S325A-05	1
Operating Instructions	FTS-B265	1

## 2. External Description




## 3. Applicable fiber type for S325A

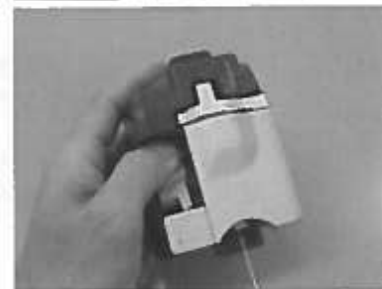
Type	Cleave length	Used holder or adapter
Single fiber Coating diameter 0.25 or 0.9mm	5 to 20mm	Supplied single fiber adapter, S325A-04
Ribbon fiber 0.25mm pitch 2 to 12 fiber	10mm	Optional ribbon fiber holder

S325S80 is a cutting instrument cleaver designed only for single fiber whose optical fiber diameter is 80  $\mu\text{m}$ . Please use S325A for regular 125  $\mu\text{m}$  single fiber except this and cutting of ribbon fiber cleaving task.

## 4. Operating instructions

### 4.1. Cleaving fiber

- 1) Open lid by pressing lid release lever. Place a prepared fiber (stripped and cleaned) across cleaving area with fiber end inserted into the waste bin. Ensure that the stripped fiber is long enough to reach the pinch roller.  
In the case of ribbon fiber cleaving, please use the ribbon fiber holder (Optional parts).  
When using ribbon fiber, check that the fibers are aligned and no fibers overlap with each other.
- 2) Close the lid and push the lid release lever until it stops. By pushing it completely, the blade will slide to cleave the fiber and send the loose fiber to the waste bin automatically.  
Then the lid will automatically release.
- 3)  Slide the sliding blade slowly to prolong the blade life.
- 4) Open the lid and take out the fiber from the main body.





## FILE

### 4.2. Disposing of loose fiber

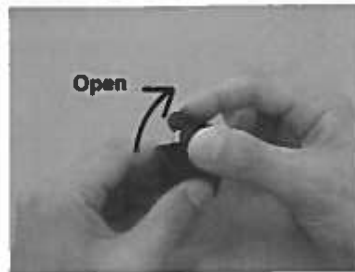
Dispose of loose fiber as follows after completion of work and before transporting.

- 1) Grab the sides of the waste box with fingers and pull it.
- 2) Grasp the upper part of waste bin with fingers and open the lid while squeezing lid lightly.  
Turn waste box upside down and dispose of loose fiber in a trash can.

Do not put finger inside of waste bin because pieces of the optical fiber sometimes will remain in waste box after emptying.

Return waste box to original position after disposing of loose fiber.

**⚠ATTENTION** : When inserting waste box into main body, press waste box until click is heard.



### 5. Maintenance and Rotation of blade

The blade has 16 positions printed on the side of the blade (i.e. "0-2-...-14-"). Each position can cleave up to 2,000 cleaves. However, cleaving amount may be decreased by dust or oil. When cleaving quality degrades, clean the top of blade and upper and lower bending pad using a cotton swab soaked with ethyl alcohol.

**⚠ATTENTION** : Do not use Organic solvent on rubber (e.g. Acetone).

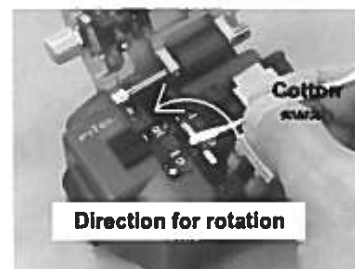
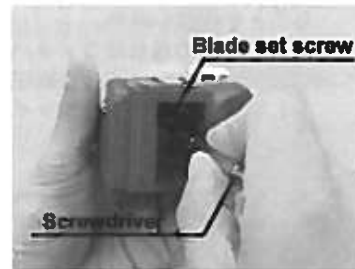
**⚠ATTENTION** : Please note 2,000 cleaves per position is not guaranteed. The number of cleaving changes depending on the situation and environment (e.g. dust and oil.)

If above operation does not improve the cleave quality the blade needs to be rotated. Follow the below procedures to rotate the blade.

- 1) Remove the waste bin from the main body. Loosen the blade set screw using a screwdriver.
- 2) Use a cotton swab, etc. to rotate the blade so that the number shown at the top of the blade increase by one step. (Counter clock wise)  
The blade is positioned at "0" when delivered from factory. Next position is "-" right of "0".

**⚠ATTENTION** : Do not touch the blade directly. It is very sharp.

- 3) Tighten the blade set screw again.



After all 16 positions are exhausted, the blade must be replaced by new one at customer's expense. Contact service center for replacing blade.

## FITEL

This cleaver has an automatic waste fiber disposal function. To keep it operating properly, clean the pinch roller with cotton swab soaked in alcohol after use.

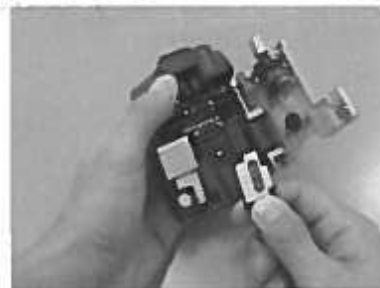
After repeated use, abrasion may form on the rubber of the pinch roller. However, the pinch roller keeps the function of collecting optical fiber, as long as the depth of a groove is smaller than the diameter of the fiber. When the function cannot be recovered, even if after cleaning the pinch roller with alcohol, replace the pinch roller with a new one at customer's expense.

If the ring ring does not move smoothly, spray commercial lubricant near the rotating shaft connecting the blade to the release lever. Take care not to spray the lubricant in other areas. Then push the lid release lever several times to apply the lubricant thoroughly.



### 6. Operating with ribbon fiber holder

Please go after detaching remove single fiber adaptor (S325A-04) from the main body when you use the ribbon fiber holder (Optional parts).



### 7. Contacts

## THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.

#### Head Office :

2-3 Marunouchi 2-chome, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8322 Japan  
Interconnectivity Equipment, FITEL Products Division, Telecommunications Company  
TEL : +81-3-3286-3445 FAX : +81-3-3286-3708

#### Sales & Marketing Global Business Solutions, Telecommunications Company

TEL : +81-3-3286-3227 FAX : +81-3-3286-3978

## Laboratoire 4

# Holographie

### 4.1 But

Le but de cette expérience est de se familiariser avec les propriétés interférentielles de la lumière à travers l'holographie, une technique largement répandue aujourd'hui. L'holographie permet d'enregistrer l'information tridimensionnelle d'une scène visuelle (amplitude et phase de la lumière transmise ou réfléchiée par un objet) sur un support photographique, et ensuite de recréer la scène tridimensionnelle (ou son champ de lumière) à partir de cet enregistrement. En outre, l'hologramme reconstruit montre la même perspective que la scène réelle.

### 4.2 Objectifs

- Faire un hologramme en réflexion ;
- Faire un hologramme en transmission simple faisceau ;
- Faire un hologramme en transmission double faisceau ;
- Mesurer le coefficient de rigidité d'une poutre en polymère par interférométrie holographique ;
- Réaliser un réseau de diffraction holographique avec un miroir de Lloyd et mesurer l'espacement de ses franges.

### 4.3 Théorie

Un hologramme est créé en enregistrant le patron de franges d'interférence produites par l'interaction d'un faisceau de lumière cohérente réfléchi (ou transmis) par un objet avec un faisceau de référence. La figure ci-dessous montre une configuration possible ; il en existe plusieurs autres.

L'hologramme produit selon le montage de la figure 1 peut être reconstruit, en l'absence de l'objet réel, simplement en illuminant l'enregistrement avec le faisceau de référence. Un exemple est montré à la figure ci-dessous.

Dans cette expérience, les étudiants vont créer différents types d'hologrammes simples à l'aide d'une lumière cohérente (en l'occurrence un laser hélium-néon) sur des plaques photosensibles. Deux montages sont disponibles, l'un utilisant des plaques photographiques, et l'autre utilisant des plaques de photopolymères.

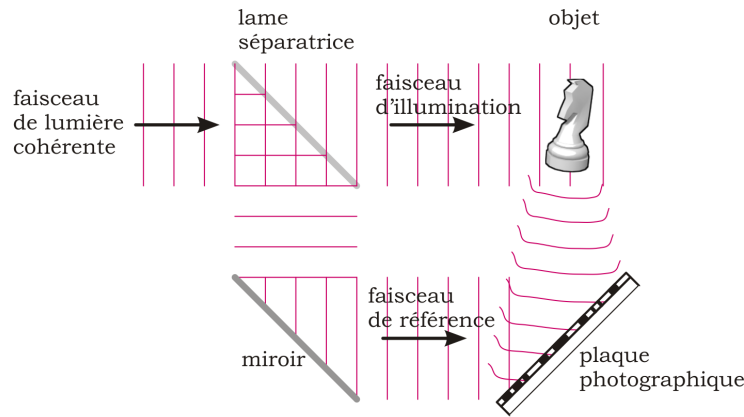


Figure 4.1 : Enregistrement d'un hologramme par transmission double faisceau.

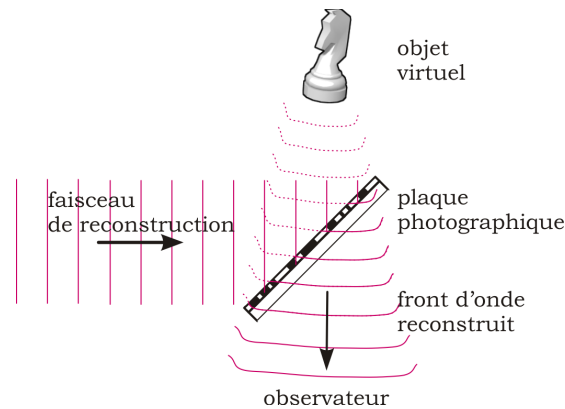


Figure 4.2 : Reconstruction d'un hologramme.

La création d'un hologramme nécessite deux étapes : l'exposition et le développement. L'exposition se fait sur une table optique. Outre le laser, les étudiants disposent d'un jeu de lentilles, de miroirs et peuvent penser à apporter un objet réfléchissant bien la lumière, ou transparent à celle-ci. Les temps d'exposition varient selon l'intensité de lumière reçue et par conséquent selon le type d'hologramme. La deuxième étape, le développement, a lieu dans la chambre noire pour les plaques photographiques, ou en lumière ambiante pour les plaques de photopolymères. Les directives pour le développement des plaques sont données plus bas.

Pour se préparer à cette expérience il est préférable d'être familier avec les propriétés interférentielles de la lumière et avec les principes de l'holographie. Une bonne description se trouve dans *Optical Holography*, par P. Hariharan, en réserve à la bibliothèque. Un autre ouvrage bien illustré est *Holographie*, par M. Françon. Un cahier de laboratoire décrit les différents montages, mais les étudiants peuvent prendre des libertés quant aux hologrammes à réaliser (en discuter avec les moniteurs). La compréhension du phénomène prime sur la réussite des hologrammes.

Remarque : merci de bien prendre soin de tout le matériel optique.

## 4.4 Matériel

À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

Le montage 1 contient le matériel suivant :

1. Laser HeNe 8 mW
2. Iris électronique
3. Séparateur de faisceaux (5%)
4. 2 miroirs
5. 2 objectifs de microscope
6. Porte plaque
7. Plateau
8. Lampe verte
9. Photomètre
10. Rapporteur d'angle
11. Tournevis hexagonal 3/16
12. Tournevis hexagonal 1/4
13. Tige graduée
14. Poids

Le montage 2 contient le matériel suivant :

1. Laser HeNe 21 mW
2. Iris électronique
3. Photomètre
4. 2 miroirs
5. Objectif de microscope
6. Lentille  $f = 225$  mm
7. Lentille  $f = 150$  mm
8. Lentille  $f = 4.5$  mm
9. Séparateur de faisceau ( 5 :5 )
10. Séparateur de faisceau ( 7 :3 )
11. Séparateur de faisceau continu
12. Miroir de Lloyd
13. Plateau et porte-plaque
14. 5 bouteilles ( 1 L )
15. 5 bassins
16. Bécher ( 1 L )
17. Cylindre gradué ( 500 mL )
18. Cylindre gradué ( 100 mL )
19. Pincettes en bois

20. Sèche cheveux
21. Sac de vis M6
22. Tige graduée

On trouve également dans la chambre noire le matériel suivant :

1. Solution A du développeur Integraf JD-4 (réfrigéré)
2. Solution B du développeur Integraf JD-4
3. Solution de blanchiment du développeur Integraf JD-4
4. Plaques photographiques modèle PFG-03M Slavich (réfrigérées)
5. Plaques en photopolymère Lambda Scientific (réfrigérées)
6. Cylindre gradué (50 mL)
7. Bécher (1000 mL)
8. 2 petits bassins
9. 3 grands bassins
10. Gants en nitrile
11. Couteau à vitre
12. Lampe verte

## 4.5 Instructions particulières

### Plaques photographiques

#### Coupe

La coupe se fait à l'aide d'un couteau à verre. Posez d'abord la plaque à plat sur un papier propre. Tenez le couteau en position verticale, et en appliquant une forte pression vers le bas, déplacez-le pour marquer la coupe désirée. Cassez ensuite la plaque selon la marque effectuée.

#### Exposition

Le temps d'exposition nécessaire avec le laser fourni et dans une configuration par réflexion est typiquement de l'ordre de 15 s.

#### Développement

Le développement des plaques photographiques nécessite trois solutions nommées A, B et «Bleach». Ces trois solutions sont disponibles dans la chambre noire et au besoin, seront préparées par le préposé de l'expérience. Vous aurez également besoin d'environ deux litres d'eau distillée.

Pour développer votre plaque photographique, suivez les étapes suivantes :

1. Lisez le document «JD-4 Holography Processing Kit» inclus en annexe.
2. Mélangez environ 25 mL de solution A et 25 mL de solution B dans un petit bassin.
3. Versez environ 50 mL de «Bleach» dans un petit bassin.
4. Préparez deux bassins contenant environ 1 L d'eau distillée.

5. Enfilez une paire de gants en nitrile.
6. Fermez la lumière de la pièce.
7. Trempez votre plaque Photographique dans la solution A&B pendant 10 à 20 secondes. Jusqu'à ce qu'elle devienne complètement noircie.
8. Rincez votre plaque dans le premier bassin d'eau distillée pendant 20 à 30 secondes.
9. Trempez votre plaque photographique dans la solution «Bleach» pendant 10 à 20 secondes. Jusqu'à ce qu'elle soit complètement claire.
10. Rincez votre plaque dans le deuxième bassin d'eau distillée pendant 20 à 30 secondes.
11. Placez votre plaque à un endroit propre et assurez vous que les deux faces sont en plein contact avec l'air ambiant.
12. Laissez sécher votre plaque pendant environ 1 heure.

Il est fortement recommandé que vous lisiez le document JD-4 Holography Processing Kit inclu en annexe de sorte que vous soyez conscient des risques associés aux produits chimiques que vous utilisez et des démarches à suivre en cas d'exposition. Vous pouvez toutefois manipuler votre plaque dans toutes les solutions du moment que vous portez des gants en nitrile.

Notez aussi que le développement doit de se faire dans l'obscurité complète, mais que l'exposition des plaques à une faible lumière verte lors du processus de développement n'affecte pas la qualité de l'hologramme obtenu.

La solution A doit être réfrigérée entre ses périodes d'utilisation. Elle se dénature également lorsqu'elle s'oxyde alors il est important de limiter son contact à l'air ambiant. Les solutions B et «Bleach» peuvent être conservées à température de la pièce. La solution A&B se conserve pendant plusieurs heures à l'air ambiant.

Lorsque vous avez terminé de vous en servir, vous pouvez vider le contenu de vos bassins dans l'évier avec beaucoup d'eau. Vous êtes priés de bien rincer tout votre matériel.

## Plaques photopolymères

### Coupe

Le côté photosensible d'une plaque de photopolymère sensible au rouge est un peu collant. Dans leur emballage original, deux bâtons en plastique sont utilisés pour séparer les côtés photosensibles de deux plaques de photopolymères adjacentes, pour éviter qu'elles ne collent ensemble. Prenez une plaque de photopolymère et deux baguettes en plastique à partir du contenant et placez le côté du film de la plaque sur les deux baguettes en plastique. Disposez une des deux baguettes en plastique de façon à ce qu'elle suive la ligne de coupe désirée. Utilisez un couteau à verre pour couper la plaque photopolymère selon les dimensions souhaitées. Tenez le couteau en position verticale, appliquez une bonne pression et déplacez-le pour marquer la coupe désirée. Cassez la plaque selon la marque effectuée. Après la coupe, si une partie du film est toujours connecté, coupez-le délicatement avec un couteau.

Remarque : assurez-vous de couper d'abord du côté du substrat de verre. Ne jamais couper une plaque de photopolymère du côté du film avec un couteau de découpe de verre.

### Exposition

Pour un flux d'environ 10000 lux à la position de la plaque, le temps d'exposition nécessaire est d'environ 25 s.

## Développement

Cinq solutions sont nécessaires pour le développement des plaques. La température normale pour le développement de la plaque est de 20°C. Utilisez cinq contenants différents pour préparer les solutions suivantes et les étiqueter correctement.

### Préparation des solutions

1. 300 ml d'eau distillée (0% d'alcool isopropylique)
2. 120 ml d'alcool isopropylique et 180 ml d'eau distillée (40 % d'alcool isopropylique)
3. 180 ml d'alcool isopropylique et 120 ml d'eau distillée (60% d'alcool isopropylique)
4. 240 ml d'alcool isopropylique et 60 ml d'eau distillée (80% alcool isopropylique)
5. 300 ml d'alcool isopropylique (100% d'alcool isopropylique)

### Marche à suivre

1. Plongez la plaque dans la solution 1 pendant 15-30 secondes.
2. Plongez la plaque dans la solution 2 pendant 60 secondes.
3. Plongez la plaque dans la solution 3 pendant 60 secondes.
4. Plongez la plaque dans la solution 4 pendant 15 secondes.
5. Plongez la plaque dans la solution 5 pendant environ 3 minutes jusqu'à ce qu'une image rouge pâle ou jaune-verte apparaisse.
6. Retirez la plaque de la solution et séchez-la avec un sèche-cheveux jusqu'à ce qu'une image jaune soit visible sur la plaque.

Note : Remuez doucement les solutions à toutes les étapes ci-dessus. Portez des gants en caoutchouc pour empêcher la peau d'entrer en contact avec des produits chimiques.

Note : Si l'image a disparu après un certain laps de temps, il est possible de ramener l'image. Il suffit de re-développer la plaque de photopolymère selon les étapes ci-dessus et l'image devrait réapparaître.



## Annexe : Notes pour développement des plaques du montage 1

CATALOG NUMBER 04-3040

CATALOG NUMBER 04-3045



## PHOTOGRAPHERS' FORMULARY

PO Box 950 • Condon MT 59826 • 406-754-2891 • FAX 406-754-2896

E-MAIL [formulary@montana.com](mailto:formulary@montana.com)

### JD-4 (JARB) HOLOGRAPHY PROCESSING KIT

**All the chemicals needed for making holograms using Slavich PFG-03M plates.**

Holographic film plates, supplies, and instructions for holography are available from:

**Integraf LLC**

Holography Supplies & Resources

(425) 821-0772

[Http://www.integraf.com](http://www.integraf.com)

The JD-4 holography developer and processing kit provides all the chemicals needed for making holograms using Slavich PFG-03M or ColourHolographics BB-640 holographic emulsions. Simply mix the dry chemicals in the JD-4 kit with water to prepare the developer components and bleach solution. This formula has been proven to be most useful for all kinds of holograms. It is relatively safe, even for the home hobbyist.

The optimization of using JD-4 for quick processing of holograms recorded on Slavich PFG-03M plates and film was made by Tung H. Jeong, Riley Aumiller, Raymond Ro, and Jeff Blyth; thus it is called the **JARB** processing regime.

JD-4 is a convenient alternative for the GP-2, a developer that has been used for years for making reflection holograms on PFG-03M emulsion. GP-2 has certain limitations, including its long processing time of 12-15 minutes and its natural drying time of over an hour. GP-2 also does not address the fact that the PFG-03M emulsion requires long exposure times (ten times more than PFG-01, for example), and is extremely soft, like gelatin, and often floats off the glass during development and washing.

The introduction of JD-4 increases the sensitivity of the PFG-03M 1.5 mJ/cm<sup>2</sup> (milli-joules per square centimeter) to 0.15 mJ/cm<sup>2</sup>. This therefore shortens the exposure time for holograms to one-tenth as long as when processed in GP-2. JD-4 also hardens the emulsion so that the holographic plates is easier to develop and can be dried using warm air, such as that from a hair dryer. As a result, the total processing time using JD-4 can be as short as three minutes, from developing to drying!

Given the above, JD-4 is ideal for making holograms during a lecture demonstration or for laboratory exercises or workshops where many students must make holograms in a limited time.

### FOR YOUR CHEMICAL SAFETY

Like many household cleaners, chemicals in general should be considered dangerous and must be treated with respect. Please read all the warning labels on each package. It is good practice to use eye goggles, dust mask, apron and rubber gloves when mixing chemicals. While the chemicals have low volatility, working in a ventilated area is recommended. Although most chemicals in JD-4 are considered non-hazardous by the EPA, the kit does contain small amounts of chemicals that the EPA does consider hazardous.

**SODIUM HYDROXIDE:** Although your kit contains only a small amount of solid Sodium Hydroxide, it must be treated with special care. Sodium Hydroxide, as a solid or in solution, is a dangerous chemical. It is a corrosive and when spilled on the skin, will cause a chemical burn. Its action is insidious because the burn occurs without pain. When working with Sodium Hydroxide wash your hands frequently and without soap. If you detect a soapy feeling while washing, Sodium Hydroxide is present. In such a case, wash thoroughly with soap and water. Beads or pellets of solid Sodium Hydroxide are easily spilled during solution preparation. If spillage occurs outside of a sink, all of the spilled solid must be cleaned up, use a damp disposable towel. If the solid is not cleaned up, it will absorb the moisture from the air and form a puddle of very caustic hydroxide, which will not evaporate. We strongly urge you to wear both safety glasses and rubber gloves when working with solid Sodium Hydroxide or its solutions. We strongly urge you to wear both safety glasses and rubber gloves when working with solid sodium hydroxide and its solutions.

**METOL:** Some individuals become sensitized (develop allergic symptoms or rashes) when using metol. If this should occur, discontinue use and consult a physician.

All other chemicals contained in this kit are considered non-hazardous, but we ask you to still use care by using a dust mask and rubber gloves.

The user assumes all risks upon accepting these chemicals. IF FOR ANY REASON YOU DO NOT WANT TO ASSUME ALL RISKS PLEASE RETURN THE KIT WITHIN THIRTY (30) DAYS FOR A FULL REFUND.

Consult with local sewer and water authorities regarding proper disposal of darkroom chemicals in your area.

## MIXING THE STOCK SOLUTIONS

The chemicals in this JD-4 kit are already pre-measured to make approximately 1000ml of each of three solutions. You will need to add de-ionized or distilled water, which can be purchased at your local grocery store. It is best to use distilled water that contains no other chemicals although distilled drinking water, which sometimes contains small but negligible amounts of other chemicals, can also be used. Water from your tap generally contains fluoride and other impurities that may reduce the quality of your hologram. For efficiency and safety, teachers or an adult should pre-mix the solutions for students.

### PART A SOLUTION

CHEMICAL	AMOUNT	AMOUNT
	(Cat. no. 04-3040)	(Cat. no. 04-3045)
Metol or Elon (p-Methylaminophenol sulfate)	4 grams	40 grams
Ascorbic Acid (powder)	25 grams	250 grams
<b>ADD</b> Distilled water	1000 ml	10000 ml

### PART B SOLUTION

CHEMICAL	AMOUNT	AMOUNT
Sodium Carbonate, Anhydrous	70 grams	700 grams
Sodium Hydroxide	15 grams	150 grams
<b>ADD</b> Distilled water	1000 ml	10000 ml

### BLEACH SOLUTION

CHEMICAL	AMOUNT	AMOUNT
Copper Sulfate, Pentahydrate	35 grams	350 grams
Potassium Bromide	100 grams	1000 grams
Sodium Bisulfate, Monohydrate	5 grams	50 grams
<b>ADD</b> Distilled water	1000 ml	10000 ml

Use three 1 liter (or larger) size clean glass or plastic bottles with leak-proof caps. Label them **Part A**, **Part B**, and **Bleach** respectively. To help dissolve the chemicals, you can heat the water until it's lukewarm. But don't use the solution until it returns to room temperature. Optionally, you can also prepare each solution in a clean beaker and then pour the solution into the bottle.

**PART A.** Fill the bottle marked Part A with roughly 1000 ml of distilled water. Dissolve the metol first. Then add the ascorbic acid. Tightly cap the bottle. Part A will oxidize if it is exposed to oxygen. In time (over a few weeks to a few months), the solution may turn yellow due to the oxidation of the ascorbic acid – the solution is still usable. Once the solution turns dark brown, the potency is lost and it must be discarded.

#### Helpful Tip

To extend the shelf-life of Part A, protect it from oxidation. To do so, subdivide the solution into smaller bottles so that the unused portions are in full-capped bottles, with little or no air space. For example, try using two 500ml bottles for Part A instead of one 1000ml bottle. Refrigeration also slows down oxidation. Do not refrigerate Part A with food to prevent possible mistaken identity as food. When stored appropriately, the solution can last for months.

**PART B.** Follow a similar procedure as above for Part A, dissolving each chemical one-by-one, in any order. This solution will keep for many months at room temperature.

**BLEACH.** Follow a similar procedure as above for the Bleach, dissolving each chemical one-by-one, in any order. This solution will keep for many months at room temperature.

Store all chemicals in a safe place away from food and children.

## HOLOGRAM EXPOSURE

For detailed instructions on making holograms, study the article "Simple Holography" found on Integrat's website ([www.integrat.com](http://www.integrat.com)). Before making your exposures, you should mix and prepare your chemicals as follows.

## PREPARATION

Have the following items on hand:

- Your pre-mixed JD-4 Part A, Part B and Bleach Solution.
- 1 additional gallon (4 liters) of distilled or de-ionized water for best results. Tap water will also work here but not as well. Avoid hard water. This will be used to rinse the holograms between each processing step.
- 2 small glass or plastic trays, just large enough so that the hologram you are making can be submerged in a horizontal position.
- 2 large glass or plastic trays to hold 1 liter of distilled water for rinsing. Tap water may also work but not as well.
- 1 (optional, but recommended) large tray to hold 1 liter of distilled water mixed with about 1 ml of photographic wetting agent such as PhotoFlo or Formaflo. You can also use a small tray with less wetting agent, but you should replace the solution after a few holograms.
- 1 rubber glove

Now label one small tray as Developer A&B. Then, mix equal portions of Part A and Part B, enough so that the hologram to be developed can be totally submerged. Once mixed, the combined A&B solution can be used to develop several holograms, and can last several hours.

Next to the developer tray place a large tray with one liter of distilled water. This will be used as a rinse.

Next, label another small tray as Bleach. Put enough bleach into it so that the hologram can be totally submerged.

Next to the bleach place another large tray with one liter of distilled water. This will be used as a rinse.

Optionally, place a large tray with the wetting solution in 1 liter of distilled water. Using a wetting solution is optional but recommended. It allows the hologram to dry evenly, thus helping you prevent smudges or streaks.

Check the order of the trays: developer A&B, rinse, bleach, rinse, wetting solution.



## PROCESSING PROCEDURES

After the holographic plate is exposed, hold it by the edges with your glove hand (or tongs). Keep the emulsion (sticky) side facing upwards to protect the emulsion from accidentally scraping the bottom of your developing tray. Complete the following steps in a dark room. You can use a green safelight. Alternatively you can use a standard night light without allowing any direct light to the holographic plate. (After the bleaching process, it is safe to turn on the lights, if preferred.)

### 1. Develop:

Quickly submerge the plate into the developer so that all parts get wet evenly. Slush it around for about 20 seconds until the holographic plate turns uniformly black.

### 2. Rinse:

Rinse the developed hologram with slight agitation for at least 20-30 seconds. For best results and longer lasting holograms, rinse up to 3 minutes to make help ensure that all of Part A has been rinsed off.

### 3. Bleach:

Place the rinsed hologram into the bleaching solution; agitate it until the plate is completely clear (this may take up to 1 minute); bleach for another 10-20 seconds.

### 4. Rinse again:

Rinse the bleached hologram with agitation for at least 20-30 seconds (up to 3 minutes).

### 5. Finish in wetting solution:

Optionally, place the finished hologram in this solution for about 20 to 60 seconds. Then, remove the hologram to dry. For best results, avoid streaks or runs as you remove the hologram from the solution. You can actually do this step under light so you observe if the wetting solution is evenly coated. (After the bleaching process, the hologram is safe to process under regular indoor lighting).

A good way to dry the hologram is to stand it against a vertical surface with the bottom edge resting on a hand-towel or tissue paper. Best results are obtained when it dries naturally in clean, dust-free air. However, if time is limited, the hologram can be quick-dried by holding it vertically and blowing warm air across it with a hair dryer.

For a reflection hologram, the image can be viewed after thorough drying, which may take minutes to hours, depending on ambient conditions and technique. Transmission holograms, on the other hand, can be viewed with a laser even when wet.

**Keep from children. Always label packages clearly as poisonous materials not to be consumed.**



## PHOTOGRAPHERS' FORMULARY INC.

PO Box 950 • Condon MT 59826 • 406-754-2891 • FAX 406-754-2896  
E-MAIL [formulary@montana.com](mailto:formulary@montana.com)

### PHOTOGRAPHERS' FORMULARY SAFETY BULLETIN: HYDROXIDES

Hydroxides that are commonly used in photographic practice include Ammonium Hydroxide solution ( $\text{NH}_4\text{OH}_2\text{O}$ ), Lithium hydroxide ( $\text{LiOH}$ ), Potassium Hydroxide ( $\text{KOH}$ ), and Sodium Hydroxide ( $\text{NaOH}$ ). Like many common household cleaners, your JD-4 kit contains sodium hydroxide, but in a very small amount (only 15g).

Each of these chemicals, in solid or liquid form, is extremely caustic. Since caustic materials by definition are capable of dissolving protein, including animal tissue, one should understand the behavior of these materials and the proper techniques for handling them.

Solutions of the hydroxides, if spilled on the skin, will slowly dissolve it, and if splashed in the eye, can cause blindness in a short time. The dry material is hygroscopic, and will absorb water from the air or body to form a caustic liquid very readily.

**IF HYDROXIDES CONTACT THE SKIN:** Wash the area thoroughly with running water until the slipperiness is no longer present. Slipperiness is due to the hydroxide dissolving the skin. If desired, rinse with vinegar or working strength acid stop bath. Wash thoroughly. Treat damaged tissue as a burn.

**IF HYDROXIDES CONTACT THE EYE (dry or wet):** Place your head at once under running water (the sink is fine) and wash the eye for 5 to 10 min. Don't bother with eyewashes, etc. Time is all-important. **WASH THE EYE FIRST**, then call a doctor at once.

To dissolve the hydroxide, simply stir the pellets into the solvent. It will dissolve very readily. It will not be necessary to pulverize the pellets or flakes. Large amounts of heat are liberated when hydroxides are dissolved, and if care is not taken, glassware may be broken or spattering may occur. It is prudent to dissolve a portion of the hydroxide, allowing the solution to cool before proceeding. Use cold or ice water when dissolving hydroxides in general. (For JD-4, the amount of hydroxide in the kit is not sufficient to create noticeable heat and thus may not require cold water.)

Be sure to pick up all the pellets that accidentally spill. The solid material will pick up moisture from the air and in time, a very concentrated, and very caustic solution forms. Dispose of hydroxide solutions by flushing down the sink or toilet with large amounts of water.

Since damage to flesh or eye can be serious, we strongly suggest the use of safety glasses and gloves when handling caustics. The use of beakers with handles is advantageous, as they are less likely to be dropped. The most important safety precaution is to take the time to move deliberately and carefully. Caustics should not be handled in the presence of children or pets.

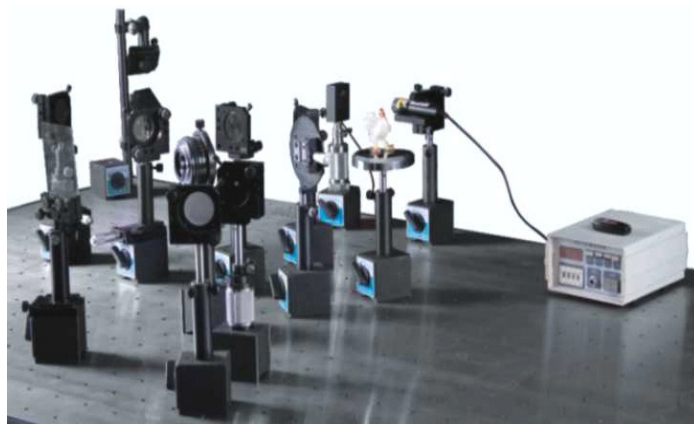
All substances can be dangerous. Any material can be handled with safety if the correct precautions are followed. In many years of handling caustic solutions and other potentially hazardous chemicals, we have had no serious difficulty, and with a reasonable amount of care, you need have no problems. We counsel respect, but not fear.

Annexe : Manuel du montage d'holographie en lumière visible  
(montage 2)



# LEOK-64 Holography under Room Light

## Instruction Manual



### Lambda Scientific Systems, Inc

14055 SW 142nd Avenue, Suite 22, Miami, FL 33186, USA

Phone: (305) 252-3838; Fax: (305) 517-3739

E-mail: [sales@lambdasys.com](mailto:sales@lambdasys.com); Web: [www.lambdasys.com](http://www.lambdasys.com)

## COMPANY PROFILE

Lambda Scientific Systems, Inc. specializes in developing and marketing scientific instruments and systems designed and manufactured specifically for experimental education in physics at colleges and universities. Our mission is to become a premier supplier of high-quality, robust, easy-to-use, and affordable scientific instruments and systems to college educators and students for their teaching and learning of both fundamental and modern experiments in physics. Our products focus on comprehensive physics education kits, as well as light sources and opto-mechanic components.

Our physics education kits cover a wide range of experiments in general physics, especially in geometrical optics, physical optics, and fiber optics. Experiments include lens imaging, interferometry, diffraction, holography, polarization, laser physics, quantum optics, and Fourier optics through a series of the most representative apparatus such as Newton's ring apparatus, Young's modulus apparatus, Michelson interferometer, Fabry-Perot interferometer, Twyman-Green interferometer, Fourier spectrometer, and laser.

Our fiber optics education kits keep a pace with the advent of fiber optical communication technology by designing experimental systems to teach fundamental optical fiber concepts such as fiber-to-fiber coupling, fiber-to-source coupling, fiber numerical aperture, fiber mode, fiber transmission loss, and fiber sensing. These kits also give students an opportunity to be familiar with modern fiber optic components or apparatus such as Mach-Zehnder interferometer, variable optical attenuator, fiber isolator, fiber splitter, fiber switch, wavelength-division multiplexer, fiber amplifier, and transmitter.

Our light sources include Xenon lamp, Mercury lamp, Sodium lamp, Bromine Tungsten lamp and various lasers.

We also provide a variety of opto-mechanical components such as optical mounts, optical breadboards and translation stages. Our products have been sold worldwide. Lambda Scientific Systems, Inc is committed to providing high quality, cost effective products and on-time delivery.



## Contents

1. Room Light Holography with White-Light Reconstruction.....	1
2. Fresnel (Transmissive) Hologram.....	1
3. Reflective Hologram.....	2
4. Image Plane Hologram .....	3
5. Two-Step Rainbow Hologram .....	5
6. One-Step Rainbow Hologram.....	6
7. Laser Safety .....	7
8. Part List.....	7
Appendix I User Instructions of Exposure Timer.....	9
Appendix II User Instructions of Photopolymer Plate .....	10

## 1. Room Light Holography with White-Light Reconstruction

The so-called “room light operation” refers to as holographic photography and development of photopolymer holographic plates under room light. In addition, the obtained hologram can be reconstructed with while light. As compared to silver salt plates that must be operated in a dark room for photo taking and developing, room light operation of photopolymer plates is more convenient with higher diffraction efficiency. Typically, the diffraction efficiency of silver salt plates does not exceed 30% or 40%; while the diffraction efficiency of photopolymer plates can be as high as 80% or 90%.

The holographic photography of a photopolymer plate is a photochemical process during which micro molecules or monomers polymerize into macro molecules or polymers. Thus, the obtained hologram is a phase hologram; while a silver salt plate is exposed to light, its silver halide particles undertake photochemical reaction and accumulate potential energy by absorbing optical energy to form metal silver particles. After developing, the light-exposed silver particles deposit and stay while other silver halide particles are washed away after fixing process. The obtained hologram is an amplitude hologram.

Although the sensitivity of photopolymer plates is lower than that of silver salt plates, other attractions of photopolymer plates such as room light operation, high diffraction efficiency, and easy handling make them preferred in many applications. There are many methods for enhancing the sensitivity of a photopolymer plate, such as to raise the laser power, improve the reflectivity of the object, select stable workbench, or increase the exposure quantity.

## 2. Fresnel (Transmissive) Hologram

### Schematic of Experimental Setup

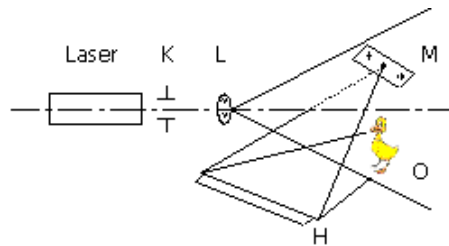


Figure 1 Schematic of experimental setup 1

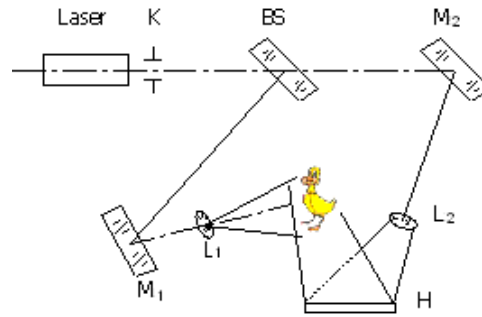


Figure 2 Schematic of experimental setup 2

Laser: Semiconductor laser with 2-D adjustable holder (LEPO-20) on magnetic base (LEPO-4)

K: Exposure timer (LEPO-30) on magnetic base (LEPO-4)

BS: Beam splitter with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

M: Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

M<sub>1</sub>: Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

M<sub>2</sub>: Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

L: Beam expander ( $f=4.5$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)



$L_1$ : Beam expander ( $f=6.2$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

$L_2$ : Beam expander ( $f=4.5$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

H: Photopolymer holographic plate with plate holder (LEPO-13A) on magnetic base (LEPO-4)

O: Small object on object loading platform (SZ-20) with magnetic base (LEPO-4)

### **Experimental Procedure**

1. Align laser, exposure shutter, beam splitter, beam expanders, mirrors, sample loading platform, plate holder, and small object to be axial (at identical height).
2. Turn the laser on, configure the experimental setup based on Figure 1, and make sure that the half portion of the light transmitted through the beam expander is illuminated on the object (slightly over-illuminated on the object). Light reflected by the object to holographic plate is called the object light. Another portion of the light from the beam expander is reflected by mirror M onto the holographic plate, called the reference light. The intersection angle between the object light and the reference light should be made between  $30^\circ$  and  $50^\circ$  with an intensity ratio adjusted within a range from 1:2 to 1:5.
3. To adjust the intensity ratio of object light to reference light, an adjustable attenuator can be inserted in the object or the reference light path. In Fig. 2, beam expander  $L_1$  or  $L_2$  can be moved back or forth to change the beam size, thus the intensity of the expanded beam.
4. To change the intersection angle between object and reference light at holographic plate, arrange the location of the object or the holographic plate. Mirror M in Figure 1 or mirror  $M_2$  in Figure 2 can also be moved to change the intersection angle between object and reference light.
5. Optimal exposure time depends on the intensity of the object light reflected from the object and the laser power. Due to the low sensitivity of photopolymer, larger exposure quantity should be used. One can cut a small strip off a holographic plate and expose it with different time duration. With a semiconductor laser of 40 mW, optimal exposure time should be around 90s to 120s.
6. Upon the completion of optical configuration, make sure all the magnetic based are secured on the optical table. Put a photopolymer plate on the plate holder with the film side towards the laser. Fasten the holographic plate on the plate holder and wait 2 minutes until the stress added the locking screw of the holder is released. Expose the holographic plate with desired exposure time duration.
7. For post-exposure processing procedure of holographic plates, read the user instructions of light sensitive photopolymer (RSP) plates.

### **3. Reflective Hologram**

The difference between reflective and transmissive hologram is judged by the holographic plate set as the boundary. If both object light “O” and reference light “R” lie on the same side of the holographic plate as shown in Figure 3 (a), then the formed hologram is transmissive; if the object and reference light are incident from opposite side of the holographic plate as seen in Figure 3 (b), then formed hologram is reflective.

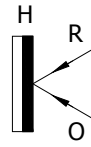


Figure 3 (a) Transmissive hologram

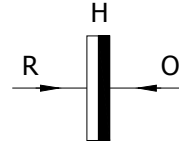


Figure 3 (b) Reflective hologram

### **Schematic of Experimental Setup**

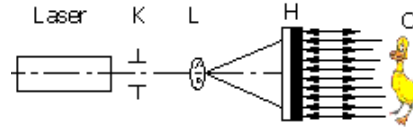


Figure 4 Schematic of reflective hologram recording

Laser: Semiconductor laser with 2-D adjustable holder (LEPO-20) on magnetic base (LEPO-4)

K: Exposure timer (LEPO-30) on magnetic base (LEPO-4)

L: Beam expander ( $f=4.5$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

H: Holographic plate with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

O: Small object on object loading platform (SZ-20) with magnetic base (LEPO-4)

### **Experimental Procedure**

1. Align laser beam and other optical components such as exposure shutter, beam expander, plate holder, and small object to be axial (at identical height).
2. Move beam expander back or forth, so the expanded laser beam is slightly over illuminated the small object (do not over-illuminate the object-losing optical energy; or under-illuminate the object-losing object image).
3. Place the object as closely as possible to the holographic plate to enhance the reflection from the object to the holographic plate.
4. Upon the completion of optical configuration, make sure all the magnetic based are secured on the optical table. Put a photopolymer plate on the plate holder with the film side towards the laser. Fasten the holographic plate on the plate holder and wait 2 minutes until the stress added the locking screw of the holder is released. Expose the holographic plate with desired exposure time duration (20s to 30s if a glass or ceramic object is used and the laser power is around 40 mW).
5. For post-exposure processing procedure of holographic plates, read the user instructions of light sensitive photopolymer (RSP) plates.

### **4. Image Plane Hologram**

The difference between Fresnel and image plane hologram is that the former is recorded with object light diffused directly from an object to a holographic plate; while the latter employs an imaging lens to form an image of an object near a holographic plate to interfere with a ray of reference light as shown in Figure 5.

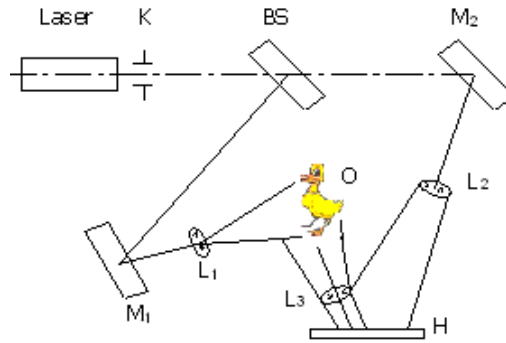


Figure 5 Schematic of image plane hologram recording

Laser: Semiconductor laser with 2-D adjustable holder (LEPO-20) on magnetic base (LEPO-4)

K: Exposure timer (LEPO-30) on magnetic base (LEPO-4)

BS: Beam splitter with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

$M_1$ : Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

$M_2$ : Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

$L_1$ : Beam expander ( $f=4.5$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

$L_2$ : Beam expander ( $f=4.5$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

$L_3$ : Imaging lens ( $f=225$  mm) with lens holder (LEPO-9) on magnetic base (LEPO-4)

H: Holographic plate with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

O: Small object on object loading platform (SZ-20) with magnetic base (LEPO-4)

### **Experimental Procedure**

1. Align laser beam and other optical components such as exposure shutter, beam expander, mirrors, lenses, plate holder, and small object to be axial (at identical height).
2. Based on Figure 5, align object light path and let  $BSM_1 + M_1O + OH = A$ . Move  $L_1$  back and forth until object  $O$  is fully illuminated. Insert lens  $L_3$  between object  $O$  and holographic plate  $H$  and move  $L_3$  back or forth to image the object near the holographic plate (either at the front or at the back of the plate).
3. Align reference light path and let  $BSM_2 + M_2H = A$ . Insert  $L_2$  in the reference light path and move  $L_2$  or  $L_1$  back and forth until the intensity ratio of object light to reference light falls within the range of 1:2 and 1:5. The intersection angle between object beam and reference beam should be between  $30^\circ$  and  $50^\circ$ . If not, adjust the locations of mirror  $M_1$ , or  $M_2$  or object  $O$ .
6. Upon the completion of optical configuration, make sure all the magnetic based are secured on the optical table. Put a photopolymer plate on the plate holder with the film side towards the laser. Fasten the holographic plate on the plate holder and wait 2 minutes until the stress added the locking screw of the holder is released. Expose the holographic plate with desired exposure time duration (90s to 120s if a glass or ceramic object is used and the laser power is around 40 mW).

7. For post-exposure processing procedure of holographic plates, read the user instructions of light sensitive photopolymer (RSP) plates.

## 5. Two-Step Rainbow Hologram

Typically, an off-axis Fresnel hologram (or transmissive hologram) can only be reconstructed with laser light. The so-called two-step rainbow holography is to view a laser reconstructed hologram with white light. First, a hologram is recorded with laser light. Then, reconstruct the hologram with laser light so that the reconstructed real image of the original object is formed near a second holographic plate to be interfered with a ray of reference light. The second hologram can be reconstructed with white light, as shown in Figure 6.

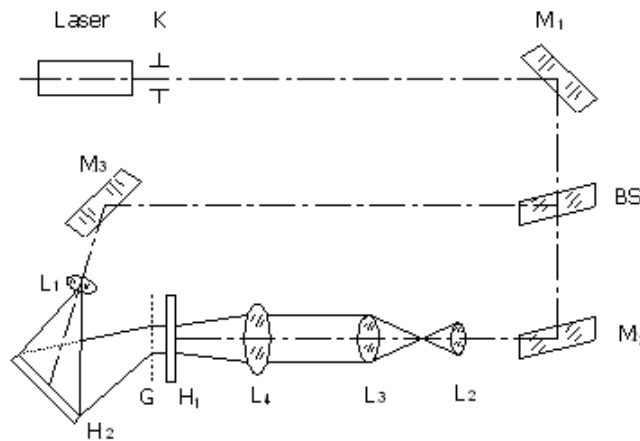


Figure 6 Schematic of two-step rainbow hologram recording

Laser: Semiconductor laser with 2-D adjustable holder (LEPO-20) on magnetic base (LEPO-4)

K:Exposure timer (LEPO-30) on magnetic base (LEPO-4)

BS: Beam splitter with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

M<sub>1</sub>:Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

M<sub>2</sub>:Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

M<sub>3</sub>:Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

L<sub>1</sub>: Beam expander ( $f=4.5$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

L<sub>2</sub>: Beam expander ( $f=6.2$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

L<sub>3</sub>: Collimating lens ( $f=225$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

L<sub>4</sub>: Imaging lens ( $f=150$  mm) with lens holder (LEPO-9) on magnetic base (LEPO-4)

G: Slit screen with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

H<sub>1</sub>: Fresnel hologram with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

H<sub>2</sub>: Holographic plate with plate holder (LEPO-13B) on magnetic base (LEPO-1)

## Experimental Procedure

1. Based on Figure 6, align object light path with beam expander  $L_2$ , collimating lens  $L_3$ , and imaging lens  $L_4$  so that object light is incident on Fresnel hologram  $H_1$ . The reconstructed real image is formed on holographic plate  $H_2$  through slit  $G$ .
2. As object light is imaged through a narrow slit, the spectral bandwidth of the reconstructing light is suppressed by the slit when reconstructing the hologram thus avoiding a blurry image. The width of the slit should be around 5 to 8 mm. If the width of the slit is too wide, then the reconstructed image becomes blurry; if the width is too narrow, the intensity of the object light becomes inadequate.
3. For white light reconstruction, the direction of the slit should be orientated vertically to maintain the horizontal parallax of the object. When the hologram or the observation eye is moved horizontally, the horizontal parallax of the object will be observed; when hologram or eye is moved vertically, only the color of the reconstructed image varies.
4. Repeat steps 6 and 7 in sec. 2.

### 6. One-Step Rainbow Hologram

One-step rainbow holography removes the tedious two steps in two-step rainbow holography by introducing a slit in before or behind the imaging lens the optical path as shown in Figure 7.

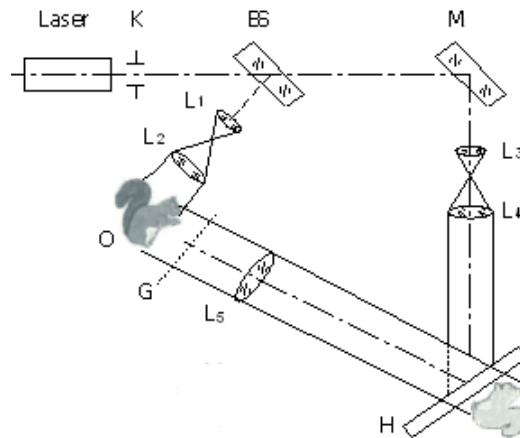


Figure 7 Schematic of one-step rainbow hologram recording

Laser: Semiconductor laser with 2-D adjustable holder (LEPO-20) on magnetic base (LEPO-4)

K: Exposure timer (LEPO-30) on magnetic base (LEPO-4)

BS: Beam splitter with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

M: Plane mirror ( $\Phi 40$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

$L_1$ : Beam expander ( $f=4.5$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

$L_2$ : Collimating lens ( $f=150$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

$L_3$ : Beam expander ( $f=6.2$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-3)

$L_4$ : Collimating lens ( $f=225$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

$L_5$ : Imaging lens ( $f=150$  mm) with 2-D adjustable holder (LEPO-8) on magnetic base (LEPO-4)

G: Slit screen with plate holder (LEPO-13) on magnetic base (LEPO-4)

O: Small object on object loading platform (SZ-20) with magnetic base (LEPO-4)

H: Holographic plate with plate holder (LEPO-13B) on magnetic base (LEPO-4)

### **Experimental Procedure**

1. Align laser beam and other optical components such as exposure shutter, beam expander, mirror, lenses, slit, plate holder, and small object to be axial (at identical height).
2. Based on Figure 7, align object light path with beam expander  $L_1$  and collimating lens  $L_2$ , so that object light is slightly over-illuminate small object  $O$ . Place adjustable slit  $G$  near object  $O$  as shown in Figure 7 and adjust the width of the slit around 5 to 8 mm. Now the object light forms a real image of the object by imaging lens  $L_5$  through slit  $G$  near holographic plate  $H$ . Measure the length of the object light path as  $BSO+OH=A$ .
3. Align reference light path by positioning the location of mirror  $M$  to let light is reflected by mirror  $M$  to holographic plate  $H$ . Make  $BSM+MH=A$ . Put beam expander  $L_3$  and collimating lens  $L_4$  in the optical path so that collimated reference light is illuminated on plate  $H$ .
4. Move  $L_1$  or  $L_3$  back or forth to change the beam size of the object or reference light so that the intensity ratio of object to reference light is in the range of 1:3 and 1:5. Alternatively, this can be done by inserting an optical attenuator in the object or reference light path.
5. Adjust the location of object, or mirror, or holographic plate so that the intersection angle between object and reference light is within  $30^\circ$  to  $40^\circ$  at holographic plate.
6. Repeat steps 6 and 7 in sec. 4.

**Note:** 1. Limited by the narrow slit, the information of object light is recorded around the region of the slit so that the reconstructed image of a rainbow hologram is no longer stereoscopic along the direction perpendicular to the slit direction. In addition, a full-size image of the object cannot be reconstructed from a partial hologram.

2. When recording a rainbow hologram, the direction of the slit is orientated vertically to maintain the horizontal parallax of the object. When the hologram or the observation eye is moved horizontally, the horizontal parallax of the object will be observed; when hologram or eye is moved vertically, only the color of the reconstructed image varies.

3. Use a ground glass screen to locate the position of the real image of the object. Adjust the object distance to the imaging lens so that a real image of the object with desired image size is obtained. If a partial image of the object is seen, then the width of the slit can be increased (do not exceed 1 cm!). Otherwise, a smaller object or an imaging lens with longer focal length should be used.

## **7. Laser Safety**

**Warning:** the semi-conductor laser in this kit is a class IIIb laser. Avoid direct eye exposure to the laser beam!

Follow the corresponding laser safety guidelines based on AS/NZS 2211.1:1997 and other lab instructions about optical components etc.



## 8. Part List

Product Code	Product Name and Description	QTY
LLL-1	Semiconductor Laser	1
LEPO-20	Semiconductor Laser Holder	1
LEPO-30	Exposure Shutter and Timer	1
	Fixed Ratio Beam Splitter (5:5 & 7:3)	1 each
	Photopolymer Holographic Plate	1 box
LEPO-13	Plate Holder	2
LEPO-13B	Plate Holder (with loading stage)	1
	Tri-Color Safety Lamp	1
	Lens (f=4.5 mm and 6.2 mm)	1 each
	Lens (f=150 mm)	2
	Lens (f=225 mm)	1
	Plane Mirror	3
LEPO-4	Universal Magnetic Base	10
	Continuously Variable Beam Splitter	1
LEPO-9	Lens Holder	2
LEPO-8	Two-Axis Adjustable Holder	6
SZ-20	Sample Stage	1
	Small Object	1
	Electric Dryer	1
SZ-43	Ground Glass	1
	Small White Screen	1
LEPO-3	Height Adjustable Holder	2
LEPO-2	Two-Axis Translation Base	1
	Illuminometer	1
	Slit Screen (rectangular hole)	1

## Appendix I User Instructions of Exposure Timer

### 1. Parts



Control box



Shutter



Joystick

### 2. Specifications

4-bit digital display

Shutter release time: 0.1-999.9 s

Time error: < 1 ms

Four modes selectable: B-gate, T-gate, Time-setting and Open

### 3. Operation

The exposure timer is composed of a photo-gate, a timer, and a joystick. Connect the power cable and photo-gate to the back panel of the control box and plug the joystick in the front panel. Switch on the power supply and the LED digital tube will light up, it shows that the exposure timer is working.

#### Working modes

“Shutter”—When it is pushed down, the photo-gate will always be open, “Time Setting” button and joystick will not function. When the button is released, the photo-gate will always be closed and the “T” or “B” mode can be selected.

“T”—When the button is pushed down, the timer will work on the “T” mode. When you push the button of the joystick on time, the photo-gate will open. Push it again the photo-gate will close. The interval time of the two actions will be shown on the LED digital tube.

“B”— When the button is pushed down, the timer will work on the “B” mode. Push it down and hold on, the photo-gate will open and the timer will begin counting time until the button is released. The display time shows the duration of the pushing of the button.

Except above three modes, the timer can work on a special mode, a so-called count-down mode. This mode is available when all the buttons are released. User can use the time setting function to set the exposure time, then push down the button of joystick and the photo-gate will be open. The timer begins counting down until the value goes back to zero.

**Note:** The photo-gate must be orientated vertically.



## Appendix II User Instructions of Photopolymer Plate

Red sensitive photopolymer plate is a phase-type holographic recording medium with high diffraction efficiency and high resolution. Its photo sensitivity is between dichromated gelatin and silver salt, and exceeds dichromated gelatin by one or two order of magnitude. When illuminated with light, red sensitive photopolymer undertakes photo-chemical reaction. During the polymerization process, micro molecules or monomers polymerize into macro molecules or polymers. Because the polymer is caused by light illumination, it is called photopolymer.

### 1. Specifications:

**Wavelength:** 632.8 nm or 647.1 nm (red sensitive)

**Diffraction Efficiency:** >80%

**Resolution:** >4000 line pairs/mm

**Thickness:** 10 ~ 20  $\mu\text{m}$

**Cross Sectional Size:** 90x240 mm

**Storage:** > 1 year under ambient condition (recommended for storage under low temperature environment such as in a refrigerator)

**Safety Lamp:** under room-light operation

### 2. Handling and Processing Procedures

#### 2.1 Cutting of an unexposed photopolymer plate

The photo sensitive side of a red sensitive photopolymer plate is little sticky and there are two plastic sticks used for separating two adjacent photopolymer plates from adhesion in the container. Take a photopolymer plate with two plastic sticks from the container and place the film side of the photopolymer plate on the two plastic sticks. Use a glass cutting knife to cut the photopolymer plate into desired sizes. After cutting, if the film side is still connected, then cut the film gently with a knife.

**Note:** make sure to cut the glass substrate side first. Never cut the film side of a photopolymer plate with a glass cutting knife.

#### 2.2 Post-exposure processing of photopolymer plates

##### **Preparation of Development Solutions:**

The normal temperature for developing the plate is at 20 °C.

Please use five beakers to prepare the following solutions and label them properly.

Beaker 1: 300 ml distilled water (0% isopropyl alcohol)

Beaker 2: 120 ml isopropyl alcohol and 180 ml distilled water (40% isopropyl alcohol)

Beaker 3: 180 ml isopropyl alcohol and 120 ml distilled water (60% isopropyl alcohol)

Beaker 4: 240 ml isopropyl alcohol and 60ml distilled water (80% isopropyl alcohol)

Beaker 5: 300 ml isopropyl alcohol (100% isopropyl alcohol)

##### **Development:**

- 1) Immerse the plate in Beaker 1 for 15-30 seconds
- 2) Immerse the plate in Beaker 2 for 60 seconds
- 3) Immerse the plate in Beaker 3 for 60 seconds

- 4) Immerse the plate in Beaker 4 for 15 seconds
- 5) Immerse the plate in Beaker 5 for approximately 3 minutes until a bright faint red or yellow green image appears.

**Note:** Gently shake the solutions during all above steps. Wear rubber gloves for preventing skin from contacting with chemicals.

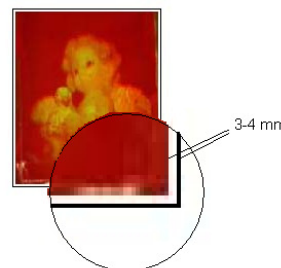
- 6) Remove the plate from the beaker and dry it with hairdryer until a bright yellow image is seen on the plate.

**Note:** If the image has disappeared after a certain amount of time, it is possible to bring the image back. Just re-develop the photopolymer plate as per above steps and the image should reappear.

### **Sealing the Plate**

The recorded image on photopolymer is short shelf-life and may disappear a day later if it is unsealed or not sealed properly. To seal the film between two glass plates, follow these steps.

- 1) Peel a strip of photopolymer material along the edge of the plate, as shown in the figure at the right corner.
- 2) Put some glue on the peeled area.
- 3) Cover a prepared glass plate (1 to 3 mm thick and same size as the photopolymer plate) on the emulsion side of the photopolymer plate
- 4) Clamp the two plates tightly and wait until the glue dries.



### **2.3 Troubleshooting**

<b>If You Notice</b>	<b>Possible Cause</b>	<b>You Should</b>
Dark final image	1. Under/over exposure 2. Vibration influence 3. Over blow by hairdryer	1. Increase/decrease exposure time 2. Get rid of vibration sources 3. Stop drying immediately when you see a bright yellow image
No or partial final image	Object unlighted or not illuminated completely	Check if the laser completely illuminates the object
Photopolymer comes off the substrate	Immerged in distilled water too long	Immerge for a shorter time
The image turns from red to yellow, then blue, or disappear	Over dried	Stop drying immediately when you see a bright yellow image
Ununiformed color of final image	Uneven dried	Dry the plate evenly
Image has a narrow depth of field	Low intensity of object beam or low light coherence	Place object closer to the plate or increase the coherence length of laser

## Laboratoire 5

# Optique non-linéaire

### 5.1 But

Les buts de l'expérience « optique non-linéaire » sont de se familiariser avec le principe des lasers, le doublage de la fréquence et le principe de fluorescence.

### 5.2 Théorie

#### Émission stimulée

Aux températures typiques, la majorité des atomes d'un matériel se trouve dans l'état de base. La distribution entre deux états séparés d'une énergie  $\Delta E$  est une distribution Maxwell-Boltzmann,

$$\frac{N_i}{N_j} = \exp(-\Delta E/k_B T) \quad (5.1)$$

avec  $N_i$  ( $N_j$ ) la population dans l'état  $i$  ( $j$ ),  $k_B$  la constante de Boltzmann et  $T$  la température. L'atome peut traverser de l'état  $i$  à l'état  $j$  par absorption d'un photon de fréquence  $\nu = \Delta E/h$  (Fig. 5.1a). Le retour à l'état  $i$  peut être accompagné par l'émission d'un photon de même énergie  $\nu = \Delta E/h$  (émission spontanée). Si l'atome se trouve dans l'état excité, l'émission du photon peut aussi être « stimulée » par un photon de même énergie. Ce photon peut interagir avec l'atome excité tel qu'un deuxième photon de même fréquence, phase, polarisation et direction soit émis (émission stimulée). Dans les conditions typiques, l'émission stimulée survient très rarement parce que le temps de vie de l'état excité est très court ( $10^{-10}$ – $10^{-9}$  s).

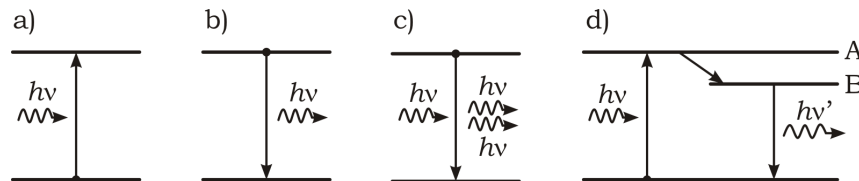


Figure 5.1 : Schéma d'absorption et d'émission dans un atome : a) absorption ; b) émission spontanée ; c) émission stimulée ; d) inversion de population.

Le nombre de transitions dépend des taux de transition, mais il est aussi proportionnel à l'occupation de l'état d'origine. Le taux de transition pour l'état excité est l'inverse du temps de vie et est ainsi une propriété intrinsèque du matériau. Afin de parvenir à une probabilité plus élevée d'émission stimulée, il faut que la majorité des atomes se trouve dans l'état excité («inversion de population»). On peut optimiser les conditions en utilisant un matériel où le temps de vie d'un état transitoire est plus long (état B en figure 5-1.b). On accumule les atomes dans l'état B par excitation vers l'état A, avec une longueur d'onde plus courte, suivie d'une relaxation vers l'état B. À cause de ce détour, les photons d'excitation (vers A) ne déclencheront pas l'émission stimulée (à partir de B) car leur énergie est trop haute. Enfin, l'accumulation ne se produit que si le taux d'excitation est plus grand que le taux d'émission spontanée.

## Principe du laser

Un laser («Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation») se sert du principe d'inversion de population pour émettre un faisceau cohérent de photons. Le laser restera en fonction tant que l'inversion de population sera maintenue. L'émission d'un laser n'est pas uniquement tributaire de l'amplification laser, il faut aussi une rétroaction. Pour ce faire, la cavité est composée de deux miroirs séparés d'une distance  $L$ . Le miroir de sortie est semi-transparent pour la fréquence finale du laser. La cavité est plus efficace si la lumière émise forme des ondes stationnaires (résonateur optique) ; ce sera le cas si la longueur de la cavité correspond à un multiple d'une demi-longueur d'onde,

$$L = m \frac{\lambda}{2} = m \frac{c}{2\nu} \quad (5.2)$$

avec  $m$  l'ordre du mode longitudinal et  $c$  la vitesse de la lumière dans la cavité. Il y a plusieurs concepts pour la cavité (Fig. 5.2). Le plus simple se compose de deux miroirs plans, mais des miroirs convexes sont généralement plus stables.

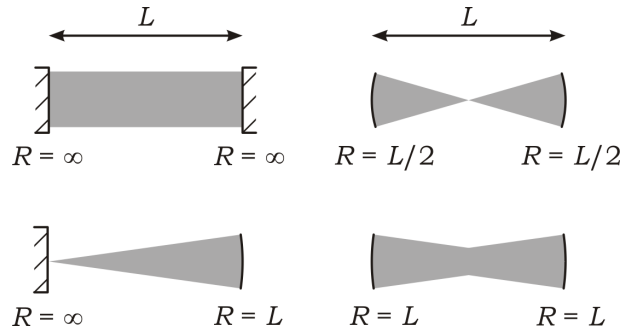


Figure 5.2 : Schéma représentant quatre concepts de cavité laser.

Dans l'expérience, vous utiliserez un cristal de Yttrium-Vanadate dopé avec du Neobdinium ( $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ ). Ce matériel peut être excité à une longueur d'onde de 808 nm. L'émission principale a lieu à 1064 nm avec les raies additionnelles à 914 nm et 1342 nm. Le temps de vie de l'état excité est de 90  $\mu\text{s}$ . Le montage contient une diode laser de GaAs/AlGaAs de 808 nm qui est focalisée avec une lentille à gradient d'indice sur le cristal  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ . La cavité est complétée avec un deuxième miroir convexe. Vous analyserez la lumière avec un spectromètre compact (Fig.5.3a).

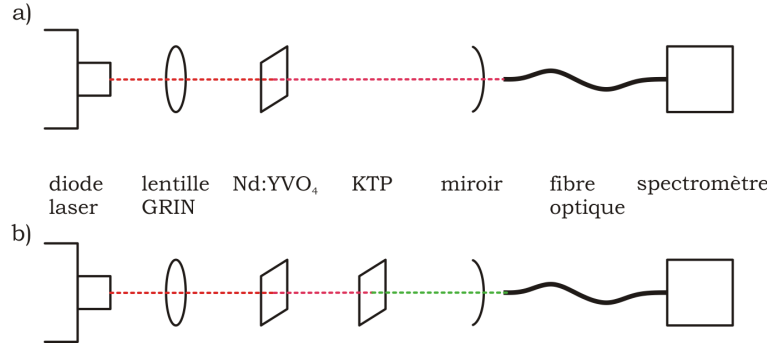


Figure 5.3 : Montage a) pour l'analyse de l'émission laser avec un cristal de Nd :YVO<sub>4</sub> ; b) pour pour l'analyse de l'émission avec le doubleur de fréquence (cristal KTP).

### Génération de seconde harmonique (doubleur de la fréquence)

La quasi-totalité des phénomènes optiques observables dans notre quotidien peuvent être expliquées dans le cadre de l'optique linéaire, c'est-à-dire qu'un champ électrique induit une polarisation qui lui est proportionnelle. Pour de très grands champs électriques, cette supposition est invalide et les phénomènes observés doivent être traités dans le cadre de l'optique non-linéaire. Soit un champ électrique d'amplitude  $E$ ,

$$E = E_0 \sin(\omega t) \quad (5.3)$$

avec  $\omega$  la fréquence angulaire, la polarisation  $P$ , composée de termes linéaire et non-linéaire en  $E$  est donnée par,

$$P = \epsilon_0 \chi \sin(\omega t) + \epsilon_0 \chi_2 E_0^2 \sin^2(\omega t) + \epsilon_0 \chi_3 E_0^3 \sin^3(\omega t) + \dots \quad (5.4)$$

avec  $\epsilon_0$  la constante diélectrique dans le vide et  $\chi$  la susceptibilité électrique. Typiquement, les perturbations sont assez petites pour qu'on puisse négliger les ordres plus élevés. En conséquence, la polarisation  $P$  est proportionnelle à la force du champ électrique  $E$ ,

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (5.5)$$

Si  $E$  augmente au-delà de  $10^8$  V/m, par exemple quand on utilise la lumière d'un laser, les termes d'ordre plus haut en  $P$  ne sont plus négligeables. On peut alors écrire,

$$P = \epsilon_0 \chi E_0 \sin(\omega t) + \frac{\epsilon_0 \chi_2}{2} E_0^2 (1 - \cos(2\omega t)) + \frac{\epsilon_0 \chi_3}{4} E_0^3 (3 \sin(\omega t) + \sin(3\omega t)) \quad (5.6)$$

Si  $P(E)$  est une fonction impaire, c'est-à-dire si une inversion de la direction de  $E$  inverse simplement la direction de  $P$ , alors les termes pairs disparaissent nécessairement et la fréquence double n'existe pas. Cette situation arrive dans tous les matériaux isotropes. Afin de générer la seconde harmonique, il faut que les cristaux n'aient aucune symétrie d'inversion. C'est typiquement le cas dans les cristaux piézoélectriques.

Il reste le problème que les ondes d'origine (de la fréquence  $\omega$ ) vont continuer de produire les secondes harmoniques ( $2\omega$ ). Généralement la vitesse, ou l'indice de réfraction  $n$ , est une fonction de la fréquence (dispersion). La longueur de cohérence sera très courte et on ne pourra plus produire d'ondes stationnaires. On peut résoudre ce problème en utilisant un cristal biréfringent. On peut trouver une orientation du cristal où les phases de  $\omega$  et  $2\omega$  sont égales («phase matching»).

Dans l'expérience, on va utiliser un cristal de potassium-titanyl-phosphate (KTiOPO<sub>4</sub> ; KTP), qui est introduit à l'intérieur de la cavité (Fig.5.3b).

## Fluorescence

Lorsque les matériaux fluorescents sont excités avec une certaine longueur d'onde  $\lambda_1$ , ils émettent de la lumière d'une longueur d'onde plus longue  $\lambda_2$ . La différence entre les deux, appelée déplacement de Stokes, est générée par les niveaux de vibration. Le fluorophore est excité de l'état de base de  $S_0$  à un état vibrationnel de  $S_0$  (Fig. 5.4). L'énergie vibrationnelle est rapidement dissipée à l'environnement, de sorte que le fluorophore se retrouve au niveau de base de  $S_1$ , et il retourne ensuite (après 1–5 ns) à un état de vibration de  $S_0$  par l'émission d'un photon. Le fluorophore pourrait donc agir comme matériel du laser dans les lasers à colorants organiques («dye lasers»). Si la densité de photons est assez grande, on peut aussi exciter les fluorophores avec deux photons ayant le double de la longueur d'onde («2-photon excitation»).

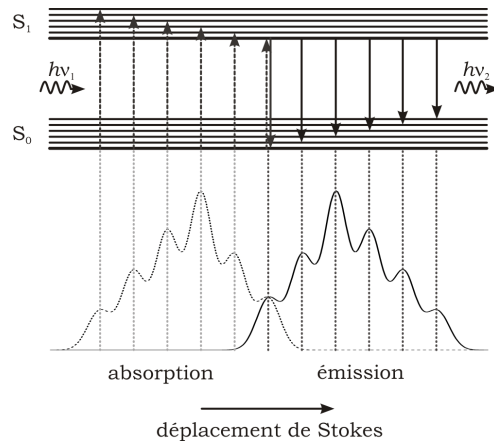


Figure 5.4 : Schéma décrivant le déplacement de Stokes.

## 5.3 Manipulations

1. Alignez le laser rouge en utilisant l'ouverture. Le rayon du laser doit passer à travers l'ouverture à toutes les positions sur le banc optique. Le laser définit l'axe optique pour tout l'alignement.
2. Alignez la diode laser (808 nm) avec la lentille GRIN. La réflexion du laser rouge sur la lentille doit passer à travers l'ouverture.
3. Ajoutez le cristal NdYVO<sub>4</sub> sur le banc optique. La lentille GRIN a une distance focale de 2–3 mm. La lumière de la diode devrait être focalisée dans le cristal afin de maximiser l'efficacité. Le cristal devrait être aligné tel que la réflexion passe par l'ouverture.
4. Finalement, la cavité du laser est complétée avec un miroir. Placez le miroir sur le banc optique. Alignez le miroir en utilisant l'ouverture.
5. Fermez le laser rouge et allumez la diode (808 nm). **Ne Jamais faire passer un courant de plus de 470 mA à travers la diode.**
6. Déterminez le ratio entre 808 nm et 1064 nm en fonction du courant de la diode.
7. Ajoutez le cristal KTP (enlever le miroir et faire l'alignement pour le KTP et le miroir).
8. Déterminez l'intensité à 808 nm, 1064 nm et 532 nm en fonction de l'orientation du cristal KTP.
9. Déterminez l'intensité à 808 nm, 1064 nm et 532 nm en fonction de la puissance de la diode.

10. Préparez une solution de concentration 1 mM de Rhodamine B dans l'eau et dans l'octanol.
11. Pour les deux solutions, déterminez le spectre d'émission avec excitation à 532 nm (filtre vert).

## 5.4 Matériel

À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

- |     |  |                              |
|-----|--|------------------------------|
| 1.  | banc optique                           |                              |
| 2.  | diode laser de 808 nm                  | (500 mW)                     |
| 3.  | lentille à gradient d'indice (GRIN)    | (lié au laser diode)         |
| 4.  | laser rouge                            | (632.8 nm, 1.5 mW)           |
| 5.  | contrôleur pour la diode laser         | (0-500 mA)                   |
| 6.  | cristal Nd :YVO <sub>4</sub>           | (3 × 3 × 1 mm <sup>3</sup> ) |
| 7.  | cristal KTP                            | (2 × 2 × 5 mm <sup>3</sup> ) |
| 8.  | miroir                                 | (R = 50 mm, diamètre 6 mm)   |
| 9.  | spectromètre couplé avec fibre optique |                              |
| 10. | cuvette                                | (1 cm longueur de chemin)    |
| 11. | fluorophore Rhodamine B                | (MW 479.8 g/mole)            |

### ATTENTION

**Les lasers de 808 nm et 1064 nm (Nd :YVO<sub>4</sub>, ≤ 500 mW)  
sont assez puissants mais ne sont pas visibles.**

**Portez toujours les lunettes de protection lors des manipulations  
lorsque les lasers sont allumés.**

**Enlevez tous les bijoux (bagues, montres...) ⇒ réflexions !**





## Laboratoire 6

# Diffusion Raman

### 6.1 But

Tout en se familiarisant avec l'utilisation d'un spectromètre à réseau et avec un système de détection par comptage de photons, caractériser des échantillons possédant différents types de réseau cristallin, soit le SiC, le Si ou l'InP (à déterminer) et le SnS<sub>2</sub>.

### 6.2 Objectifs

- Vérifier expérimentalement la fonction de dispersion du spectrographe (équation (6.8)) ;
- Prendre un spectre de Raman de l'échantillon 1 et déterminer le polytype du SiC ;
- Prendre un spectre de Raman de l'échantillon 2 et déterminer s'il agit du Si ou du InP ;
- Prendre un spectre de Raman de l'échantillon 3 et déterminer s'il agit du SnS<sub>2</sub> ou de TiS<sub>2</sub> ;
- Déterminer la température de la pièce à partir d'une comparaison de l'intensité entre les raies anti-Stokes et Stokes.

### 6.3 Théorie

#### Susceptibilité électrique

Lorsqu'une onde électromagnétique arrive à une interface «vide-matière», elle y induit une onde de polarisation  $\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$ , où  $\chi$  est appelée «susceptibilité électrique». À l'ordre un de l'interaction lumière-matière,  $\chi$  détermine l'indice de réfraction :

$$n = \sqrt{\chi + 1} \quad (6.1)$$

et l'onde incidente est séparée en ondes réfléchies spéculairement et transmise. Cependant, la nature granulaire de la matière provoque également une diffusion non-spéculaire de la lumière. On parle alors de diffusion Rayleigh, responsable par exemple de la couleur bleue du ciel. Typiquement, l'intensité de la diffusion Rayleigh est de  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$  fois l'intensité incidente, selon le type de matériau et la rugosité de l'interface.

## Phonons

Dans un cristal parfait, les atomes sont disposés selon une certaine périodicité. Si un atome est déplacé de sa position d'équilibre, il activera un ou plusieurs modes normaux de vibration du cristal. Ces modes normaux de vibration sont appelés «phonons». On distingue deux types de phonons : les phonons acoustiques et les phonons optiques. Les phonons acoustiques sont caractérisés par une relation de dispersion du type

$$\omega_a = \nu_s k \quad (6.2)$$

où  $\omega_a$  est la fréquence de vibration,  $k$  le vecteur d'onde et  $\nu_s$  la vitesse du son dans le matériau. Par contre, les phonons optiques ont une relation du type

$$\omega_0 \approx \text{constante} \quad (6.3)$$

La figure 6.1 présente les courbes de dispersion pour un matériau simple : le silicium. On y distingue trois branches acoustiques, dont la fréquence est nulle pour  $k = 0$  (point  $\Gamma$  de la figure), et deux branches optiques dont l'énergie est d'environ 15 THz au point  $\Gamma$ .

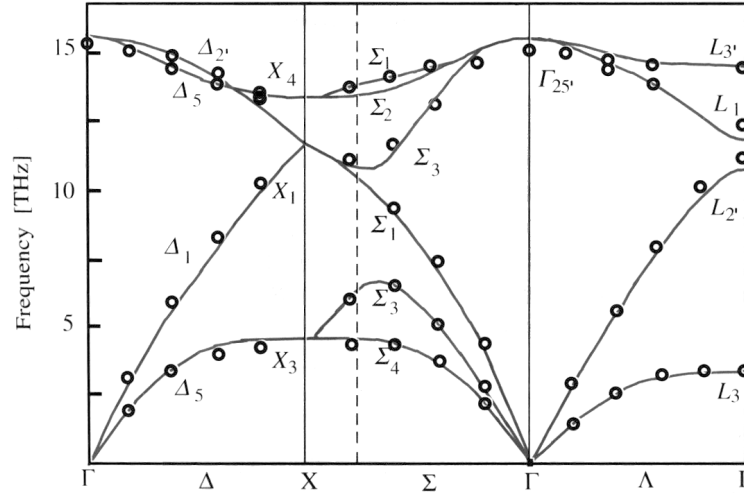


Figure 6.1 : Courbes de dispersion des phonons dans le silicium le long des axes de haute symétrie (tiré de Fundamentals of Semiconductors, par P. Y. Yu et M. Cardona (Springer 1996), p. 103).

## Diffusion Raman

Lorsqu'un phonon d'un cristal est activé, il en modifie de façon dynamique la susceptibilité électrique :

$$\chi \rightarrow \chi(\omega_p) \quad (6.4)$$

où  $\omega_p$  est la fréquence du phonon activé. Classiquement, si une onde de fréquence  $\omega_I$  arrive sur l'échantillon, on aura :

$$\vec{P} = \chi(\omega_p) \vec{E}(\omega_I) \quad (6.5)$$

En plus des ondes réfléchies, réfractées et diffusées élastiquement (diffusion Rayleigh) de fréquence  $\omega_I$ , il y aura aussi apparition d'une onde diffusée inélastiquement, de fréquence  $\omega_d = \omega_I \pm \omega_p$ . La description quantique de la diffusion inélastique fait quant-à-elle appel aux processus suivants :

1. Le photon  $\omega_l$  incident de fréquence crée une paire électron-trou virtuelle.
2. L'électron ou le trou de la paire émet ou absorbe un phonon de fréquence  $\omega_p$ .
3. La paire virtuelle se recombine et génère un photon de fréquence  $\omega_l - \omega_p$  s'il y a eu émission d'un phonon (processus Stokes) ou de fréquence  $\omega_l + \omega_p$  s'il y a eu absorption (processus anti-Stokes).

Si le phonon impliqué est de type acoustique, on parle de «diffusion Brillouin», tandis que s'il est de type optique, on parle de «diffusion Raman».

Les caractéristiques principales du processus de diffusion Raman sont :

1. La diffusion Raman est un processus inélastique (changement de fréquence de la lumière), cohérent et linéaire.
2. La diffusion Raman est un processus de deuxième ordre. La section efficace de diffusion Raman est donc très faible : l'intensité du signal Raman est de  $10^{-4}$  à  $10^{-9}$  fois plus petite que celle de la diffusion Rayleigh ! Néanmoins, la diffusion Raman permet d'aller mesurer les petites énergies des phonons optiques avec des techniques optimisées pour des longueurs d'onde dans le visible.
3. Tous les phonons optiques ne sont pas nécessairement actifs en diffusion Raman : il leur faut satisfaire certaines règles de sélection.
4. Pour la grande majorité des matériaux cristallins, la fréquence d'un phonon optique varie entre 3 et 10 THz ( $100 \text{ cm}^{-1}$  à  $700 \text{ cm}^{-1}$  - voir la section suivante pour les unités).
5. Pour qu'il y ait un processus Raman anti-Stokes, il faut qu'il y ait des phonons optiques excités dans le cristal. Le nombre de phonons excités dépend de la température de l'échantillon. La théorie quantique prévoit que le rapport d'intensité entre une raie anti-Stokes et une raie Stokes vaut

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \left( \frac{\omega_l + \omega_p}{\omega_l - \omega_p} \right)^4 \exp \left\{ -\frac{\hbar\omega_p}{k_B T} \right\} \quad (6.6)$$

## Unités en spectroscopie

On retrouve en spectroscopie différents types d'unités : longueur d'onde ( $\lambda$  en nm), fréquence ( $\omega$  en  $\text{s}^{-1}$ ,  $\nu$  en THz), nombre d'onde ( $\nu$  en  $\text{cm}^{-1}$ ), énergie ( $E$  en eV). Le tableau 6.1 donne la correspondance entre ces diverses unités.

Table 6.1 : Tableau donnant la correspondance entre les diverses unités utilisées en spectroscopie

Nom	Symbole	Unités	Relation avec $\lambda$	Correspondance avec $\lambda$
Fréquence	$\nu$	Hz	$\nu = c/\lambda$	1000nm = 299.710 THz
Nombre d'onde	$\nu$	$\text{cm}^{-1}$	$\nu = 1/\lambda$	1000 nm = 10 000 $\text{cm}^{-1}$
Énergie	E	eV	$E = hc/\lambda$	1000 nm = 1.2399 eV <sup>a)</sup> 1000 nm = 1.2395 eV <sup>b)</sup>

a) Longueur d'onde dans le vide.

b) Longueur d'onde dans l'air sec à 15°C et pression de 101.3 kPa (1 atmosphère).

Comme les spectres Raman visent à donner l'énergie des phonons optiques, il faut effectuer la transformation suivante à partir des spectres obtenus en nm absolus :

$$\nu_{\text{spectre}} = \left( \frac{1}{\lambda_{\text{laser}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{spectre}}} \right) \times 10^7 \quad (6.7)$$

où  $\nu$  est en  $\text{cm}^{-1}$  et  $\lambda$  en nm. Par convention, des valeurs de  $\nu$  positives représentent un spectre Stokes tandis que des valeurs négatives correspondent à un spectre anti-Stokes.

## 6.4 Système de mesure

### Spectromètre double

Vous trouverez dans l'annexe B sur spectromètres plus de détails sur la façon dont ils fonctionnent. le mode de fonctionnement d'un spectromètre à réseau. Rappelons toutefois l'équation de dispersion du spectromètre :

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{10^6 \cos \beta}{nF} \quad (\text{nm/mm}) \quad (6.8)$$

où  $\beta$  est l'angle de rotation du réseau,  $n$  le nombre de traits par mm gravés sur le réseau et  $F$  la longueur focale du spectromètre. Les réseaux du spectromètre actuel comportent 1200 traits/mm.

Il est cependant important de noter qu'aucun spectromètre n'est parfait. Une raie spectrale monochromatique se traduira par un pic d'une certaine largeur à mi-hauteur associée à la largeur des fentes tel que donné par l'équation (6.8), accompagné d'un «pied» qui peut s'étendre assez loin en longueur d'onde (voir la figure 6.2). Typiquement, l'intensité du signal parasite à  $200 \text{ cm}^{-1}$  du maximum de la raie vaut  $10^{-5}$  fois l'intensité du maximum de la raie. C'est donc dire que le signal du pied de la raie Rayleigh du laser qui sonde l'échantillon est du même ordre de grandeur que le signal Raman attendu ! Afin de pallier à ce problème, on couple deux spectromètres en série. Les facteurs de rejets de chacun des spectromètres se multiplient alors et atteignent ainsi  $10^{-10}$ , tandis que la longueur focale effective du spectromètre est doublée (ajout d'un facteur 2 au dénominateur du terme de droite de l'équation (6.8)).

### Comptage de photons

Comme expliqué précédemment, le signal Raman est très faible. Il faut donc associer au spectromètre une détection ayant une excellente sensibilité associée avec un grand rapport signal/bruit. Vous utiliserez un tube photomultiplicateur GaAs refroidi à  $-20^\circ\text{C}$  opérant en mode de comptage de photons. Dans ce mode, un photon incident a une certaine probabilité (de l'ordre de 10%) d'éjecter un électron de la surface photosensible en GaAs par effet photoélectrique. L'électron éjecté est accéléré par un fort champ électrique vers une autre surface. Le choc de l'électron avec cette surface se traduira par l'éjection de 4 ou 5 nouveaux électrons. Le processus est répété une dizaine de fois de telle sorte qu'au bout de la chaîne d'amplification, on obtient une impulsion électrique comportant quelques  $10^5$  électrons. L'impulsion est mise en forme et expédiée dans un compteur. Le taux de comptage est donc directement proportionnel au nombre de photons incidents sur le détecteur. Le niveau de bruit de ce système, essentiellement de nature thermique, est inférieur à 10 comptes par seconde (cps).

Il est à noter qu'outre le bruit de nature thermique, il existe dans un tel système un bruit de nature purement statistique : l'incertitude sur un nombre de comptes  $N$  vaut  $\sqrt{N}$ . Ainsi, pour mesurer un signal de 100 cps avec une précision de 5%, il faut compter durant 4 secondes.

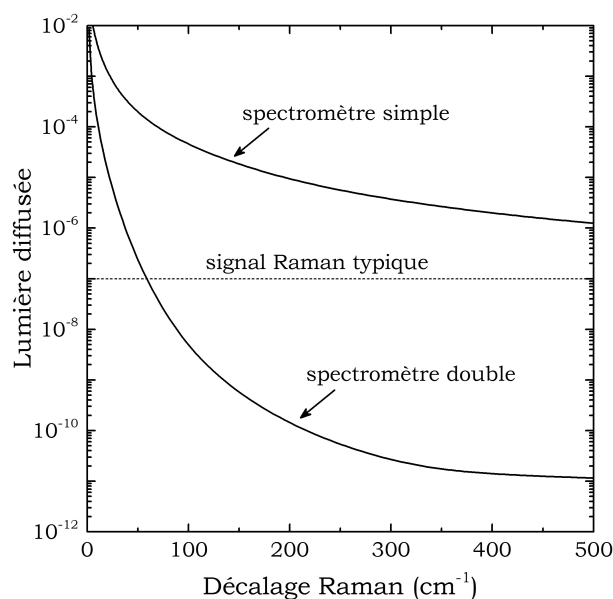


Figure 6.2 : Rapport entre l'intensité de la lumière diffuse et celle de la raie Rayleigh du laser excitateur pour des spectromètres simple et double

## Laser He-Ne

Vous utiliserez un laser He-Ne pour sonder les échantillons. La longueur d'onde d'émission de ce laser est à 632.8165 nm ( $15\,802.37\text{ cm}^{-1}$ ). Cependant, il existe plusieurs raies secondaires, appelées «raies plasmas», présentées à la figure 6.3.

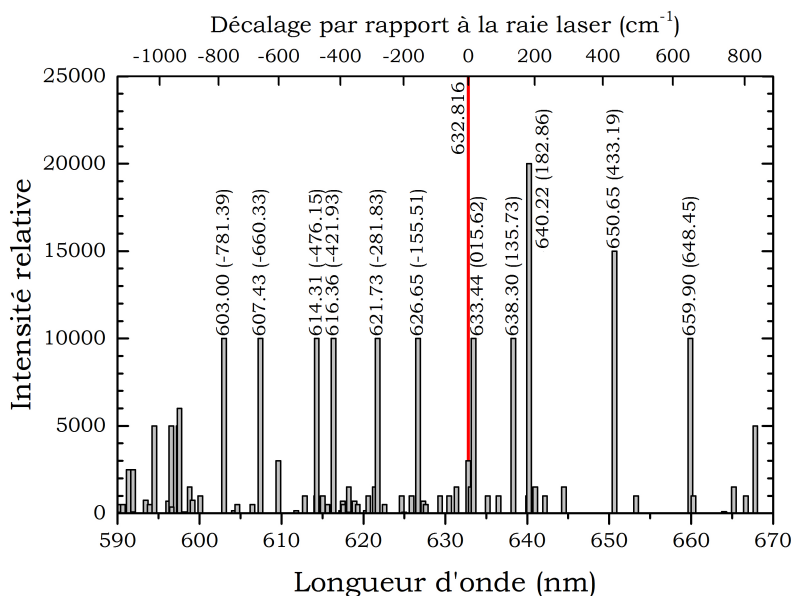


Figure 6.3 : Spectre des raies d'émission du néon présentes dans un plasma He-Ne près de la longueur d'onde de la raie laser. La longueur d'onde (en nm) et le décalage (en  $\text{cm}^{-1}$ ) des émissions les plus intenses y sont indiqués. L'hélium possède aussi une faible raie d'émission à 667.815 nm. (Données provenant du «NIST Atomic Spectra Database»)

Table 6.2 : Conversion entre  $\text{cm}^{-1}$  et nm par rapport au rayonnement laser He-Ne.

Nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ )	Longueur d'onde (nm)	Nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ )	Longueur d'onde (nm)
-1000	595.1	100	636.8
-900	598.7	200	640.9
-800	602.3	300	645.1
-700	606.0	400	649.3
-600	609.7	500	653.5
-500	613.4	600	657.8
-400	617.2	700	662.2
-300	621.0	800	666.6
-200	624.9	900	671.0
-100	628.8	1000	675.6
0	632.8		

Un certain nombre de ces raies risque d'apparaître dans vos spectres. Leur largeur à mi-hauteur sera toutefois celle due à la résolution du spectromètre, ce qui permet généralement de les distinguer de raies Raman véritables. L'intensité des raies plasma sera diminuée si on choisit un endroit de l'échantillon faiblement diffusant pour focaliser le faisceau laser. D'autre part, la présence des raies plasma permet de vérifier le calibrage de la position spectrale du spectromètre.

## 6.5 Manipulations

Vous disposez de trois échantillons ainsi que d'une plaque métallique.

1. Pour les échantillons 1 et 2, obtenez un spectre Raman du côté Stokes seulement. Balayez le spectromètre dans la gamme 100–1 000  $\text{cm}^{-1}$ . Dans le cas de l'échantillon 3, mesurez aussi le spectre anti-Stokes. Dans chacun des cas, il est recommandé de prendre, dans les mêmes conditions, un spectre de référence de la cible métallique.
2. L'échantillon 1 est du SiC. Pouvez-vous identifier le polytype? Voir Journal of Applied Physics **84**, no. 11, page 6268 (1998), <https://doi.org/10.1063/1.368947>.
3. Déterminer si l'échantillon 2 est soit du Si ou du InP. Voir Solid State Communications **4**, no. 9, page 431 (1966), [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(66\)90321-8](https://doi.org/10.1016/0038-1098(66)90321-8).
4. Déterminer si l'échantillon 3 est du  $\text{SnS}_2$  ou du  $\text{TiS}_2$ . Voir Solid State Communications **20**, no. 9, page 885 (1976), [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(76\)91297-7](https://doi.org/10.1016/0038-1098(76)91297-7) et Physical Review Letters **45**, no. 15, page 1291 (1980), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.1291>.

## 6.6 Matériel

Le montage de l'expérience de diffusion Raman contient les éléments suivants. À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

1. Laser He-Ne de 17 mW
2. Spectromètre double de 220 mm de focale muni de réseaux de 1200 traits/mm
3. Photomultiplicateur GaAs refroidi à  $-20^{\circ}\text{C}$
4. Système de comptage de photons
5. Ordinateur muni du logiciel d'acquisition LabVIEW
6. Lentille  $\phi = 50 \text{ mm}$  -  $f = 88.50 \text{ mm}$
7. Lentille  $\phi = 50 \text{ mm}$  -  $f = 250 \text{ mm}$
8. Lentille  $\phi = 50 \text{ mm}$  -  $f = 400 \text{ mm}$
9. Cible d'alignement
10. Lentille  $\phi = 3"$ ,  $f = 130 \text{ mm}$
11. Lentille  $\phi = 3"$ ,  $f = 220 \text{ mm}$
12. Plaque d'échantillons
13. Porte échantillons
14. Fentes micrométriques
15. Fusibles 10 A - 250 V
16. Tournevis hexagonal 3/16

## 6.7 Instructions particulières

Utilisez la pièce métallique diffusante comme cible. Balayez avec le spectromètre dans la gamme  $200\text{--}500 \text{ cm}^{-1}$  (voir le tableau 6.2). Les raies observées sont des raies plasmas provenant du laser. Utilisez différentes combinaisons de largeur de fentes afin d'évaluer la dispersion du spectromètre.

### **DANGER ! DANGER ! DANGER !**

**Le détecteur peut être détruit s'il est trop illuminé. Ne dépassez pas  $10^6$  cps.**

**N'ouvrez l'obturateur que lorsque vous êtes prêts à prendre un spectre.**

**Ne vous approchez pas trop de la longueur d'onde du laser :**

**évitez la plage  $630\text{--}635 \text{ nm}$ .**

**Dans votre rapport, les spectres Raman doivent être présentés avec l'abscisse en  $\text{cm}^{-1}$  !**

## 6.8 Références

Pour plus d'information sur la diffusion Raman, l'étudiant peut se référer à la section 7.2 du livre *Fundamentals of semiconductors* (Springer, 2005) par P.Y. Yu et M. Cardona disponible en ligne via le site internet des bibliothèques de l'université (<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-00710-1>).



## Laboratoire 7

# Cohérence de la lumière

### 7.1 But

Se familiariser avec les propriétés d'interférence de la lumière et avec l'utilisation d'un interféromètre de Michelson pour la mesure de plusieurs propriétés de faisceaux lumineux et de matériaux.

### 7.2 Objectifs

- Mesurer la longueur d'onde de la raie verte de la lampe de mercure ;
- Mesurer la longueur d'onde moyenne du doublet de la lampe de sodium ainsi que la séparation de ses deux composantes ;
- Mesurer la longueur de cohérence et la largeur spectrale des faisceaux de lumière blanche après passage à travers les différents filtres interférentiels ;
- Mesurer l'indice de réfraction de l'hélium, de l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) et de l'air à température et pression ambiante.

### 7.3 Théorie

Les bases de l'interférométrie et le principe de fonctionnement de l'interféromètre de type Michelson sont couverts dans tout bon bouquin de physique générale, trouvez celui qui vous convient.

### 7.4 Matériel

À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

Le montage 1, situé sur la table optique, contient le matériel suivant.

1. Interféromètre de type Michelson
2. Laser HeNe ( $\lambda_{\text{He-Ne}} = 632.8 \text{ nm}$ )

3. Lampe au sodium
4. Lampe au mercure
5. Source de lumière «blanche» incohérente
6. Cache lampe en métal gris gris
7. Transformateur
8. Miroir
9. Roulette de filtres passe-bande (longueur d'onde de 400 à 700 nm par pas de 50 nm, largeur spectrale de 10 nm)
10. Diffuseur
11. Clef à molette 9/16
12. Tournevis hexagonal 3/16
13. Cellule de gaz et dispositif de remplissage

Le montage 2, situé près de la fenêtre, contient le matériel suivant.

1. Interféromètre de type Michelson
2. Laser HeNe ( $\lambda_{\text{He-Ne}} = 632.8 \text{ nm}$ )
3. Lampe Sodium-Tungsten
4. Lampe au Mercure
5. Source de lumière «blanche» incohérente
6. Cache lampe en métal gris gris
7. Tournevis étoile
8. Roulette de filtres passe-bande (longueur d'onde de 400 à 700 nm par pas de 50 nm, largeur spectrale de 10 nm)
9. Cellule de gaz et dispositif de remplissage

Les deux montages se partagent également une bonbonne d'hélium, une bonbonne d'hexafluorure de soufre et une pompe à vide.

## Laboratoire 8

# Rotation de Faraday

### 8.1 Introduction

L'une des premières observations d'une relation entre la lumière et le magnétisme fut l'observation, par Faraday en 1845, que l'orientation du plan de polarisation d'une onde lumineuse peut être modifiée par l'application d'un champ magnétique. Cet effet est appelé « effet Faraday » ou encore « rotation de Faraday ». L'angle de rotation du plan de polarisation de la lumière est directement proportionnel à l'amplitude du champ magnétique dans la direction de propagation, la constante de proportionnalité étant appelée constante de Verdet.

Dans cette expérience, nous allons mesurer la rotation de Faraday dans une tige de verre SF-59, qui a une constante de Verdet élevée. On peut mesurer l'angle de rotation du plan de polarisation directement, en mode courant continu (CC), ou en mode courant alternatif (CA) avec un amplificateur à verrouillage. Vous déterminerez quelle méthode est plus sensible. On peut aussi mesurer et comparer la constante de Verdet du verre à plusieurs longueurs d'onde.

### 8.2 Objectifs

- Mesurer la constante de verdet de l'échantillon de SF-59 soumis à un champ magnétique constant en utilisant trois méthodes différentes (voir ci-bas) et identifier la plus précise ;
- Mesurer la constante de verdet de l'échantillon de SF-59 soumis à un champ magnétique alternatif et comparer aux mesures avec champ constant.

### 8.3 Manipulations

Vous devez commencer par calibrer le champ magnétique au centre du solénoïde en fonction du courant électrique qui y circule. Pour ce faire, vous disposez d'une sonde à effet Hall. Mesurez l'amplitude du champ pour différentes valeurs du courant électrique, et calculez ensuite la relation entre ces deux quantités.

La détermination de la constante de Verdet se fait en mesurant l'angle de rotation du plan de polarisation de la lumière pour différentes valeurs du champ magnétique ; l'ajustement d'une droite sur ces mesures permet de calculer la constante de Verdet.

Dans la première partie de l'expérience, vous travaillerez en mode CC (courant continu), menant à un champ magnétique constant. Vous devez mesurer l'angle de rotation du plan de polarisation de la lumière de 3 façons :

1. Par extinction. Avec un champ magnétique nul, placez les axes des deux polariseurs à un angle relatif de  $90^\circ$ , de façon à minimiser l'intensité captée par la photodiode. Puis allumez le champ magnétique et ajustez le second polariseur de façon à retrouver un minimum d'intensité à la photodiode. Notez la rotation effectuée.
2. À  $45^\circ$ . Avec un champ magnétique nul, placez les axes des deux polariseurs à un angle relatif de  $45^\circ$ , puis notez l'intensité captée par la photodiode. Puis allumez le champ magnétique et ajustez le second polariseur de façon à retrouver la même intensité que sans champ magnétique. Notez la rotation effectuée.
3. Par la loi de Malus. Avec un champ magnétique nul, placez les axes des deux polariseurs à un angle relatif de  $45^\circ$ , puis notez l'intensité captée par la photodiode. Puis allumez le champ magnétique et notez la nouvelle intensité. Avec ces deux mesures d'intensité et de la loi de Malus, calculez l'angle de rotation du plan de polarisation de la lumière. Il pourrait être souhaitable pour cette mesure de soustraire un estimé de l'intensité du rayonnement ambiant à vos valeurs d'intensité.

Quelle approche est la plus précise ?

Dans la deuxième partie de l'expérience, vous travaillerez en mode CA (courant alternatif), menant à un champ magnétique oscillant autour d'une valeur de zéro. Le principe de cette technique de mesure est décrit dans un article de A. Jain et al (*A simple experiment for determining Verdet constants using alternating current magnetic fields*, American Journal of Physics **67**, 714 (1999)), <https://doi.org/10.1119/1.19358>.

Le circuit électrique que vous avez à faire est un circuit LC, que vous opérerez près de la fréquence de résonance,  $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ , de façon à obtenir un courant appréciable. Un générateur d'onde vous permet d'envoyer une onde sinusoïdale de la fréquence de votre choix dans votre circuit, laquelle doit être amplifiée par un amplificateur alimenté par une source 12 V. Le principe de la mesure et les équations nécessaires sont donnés à l'annexe B. Vous devez mesurer le niveau moyen de l'intensité  $I_0$  à l'aide de l'ampèremètre et l'amplitude de variation de l'intensité,  $\Delta I$ , à l'aide de l'amplificateur à détection synchrone (ADS). Notez que  $I_0$  doit être inférieur à  $10 \mu\text{A}$  pour que l'ADS fonctionne correctement. Comment l'approche CA se compare-t-elle à l'approche CC ?

## 8.4 Matériel

Le montage de l'expérience de rotation de Faraday contient les éléments suivants. À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

1. Solénoïde monté sur support en bois (alimentation : ne pas dépasser 3 A de façon continue, ou 10 A pour une période de moins de 30 secondes). Son inductance est de 6.25 mH.
2. Laser HeNe 10 mW
3. Diodes laser de 50 mW à  $\lambda = 405 \text{ nm}$ ,  $445 \text{ nm}$  et  $515 \text{ nm}$
4. 2 filtres polariseurs
5. Source de puissance DC Hewlet Packard E3615A
6. Générateur de signal Agilent 33220A

7. 2 Multimètres Keithley 2100
8. Picoampèremètre Keithley 6485
9. Photodiode
10. Amplificateur à détection synchrone SR380
11. Amplificateur audio Optimus (50 W)
12. Capacitance variable
13. Tournevis hexagonal 1/4
14. Règle (30 cm)
15. Échantillons de verre SF-59
16. Sonde à effet Hall

**ATTENTION**

**Les diodes laser sont assez puissantes.**

**Portez toujours les lunettes de protection lorsque vous utilisez ces lasers.**

**Enlevez tous les bijoux (bagues, montres...)  $\Rightarrow$  réflexions !**

## Annexe : Manuel du manufacturier du montage original

# FARADAY ROTATION

## Instructor's Guide to TeachSpin's FR1-A Apparatus

by

Jonathan F. Reichert, Ph.D.

### I. INTRODUCTION

"Impelled by a belief in the unity of the forces in nature, Michael Faraday sought, and in 1845 provided, the first phenomenological evidence for the connection between light and magnetism when he discovered the effect that still bears his name. He found that plane-polarized light, propagating through matter parallel to a static magnetic field, underwent a systematic rotation of its plane of polarization."

Thus begins an interesting paper by David A. Van Baak on the topic of Faraday rotation in atomic gas.<sup>1</sup> Although carefully studied from the time it was discovered, this remarkable effect was not theoretically understood until the development of quantum mechanics. References in Van Baak's paper provide some insight into current efforts both experimentally and theoretically, even for nonlinear optics. Many textbooks also discuss this topic.<sup>2</sup>

Although the effect is typically small, Faraday rotation has found important practical applications. In modern fiber optic communications networks, it is used as the canonical optical isolator.<sup>3</sup> This is an extremely important component of such networks since it prevents the multiple propagation of reflected signals. Faraday rotation has important applications in optical modulators as well as uses in analytic apparatus for mixtures of hydrocarbons.

We strongly urge the instructor to make use of these references. Copies of two American Journal of Physics articles have been included in this manual to facilitate student exploration of the literature on the Faraday effect. Although it is an important effect, it is frequently omitted in the standard courses in E&M and Optics in both the undergraduate and graduate physics and engineering curriculum.

TeachSpin originally thought of this apparatus in connection with our teaching Signal Processor/Lock-In Amplifier. It seemed to us that the Faraday effect was an ideal experiment to show both interesting physics and the power of lock-in detection for extracting weak signals from background noise. It was with this in mind that we designed FR1-A. However, in the direct DC mode, the unit can certainly be used without lock-in detection. It must be noted that this unit comes with only one monochromatic light source, a laser pointer with a wavelength of about 650 nm. Instructors who want the student to explore the interesting frequency dependence of the effect will have to supply their own polarized light sources at other wave lengths. The Polaroid film analyzer has a useful polarizing capability from 400 to 800 nm. Since the Faraday effect is a slowly varying function of wavelength, the intensity stability of the light source is more important than its frequency stability. The diode laser is an ideal source for these measurements.

## II. APPARATUS

FR1-A consists of four basic components: the Light Source, the Solenoid (magnetic field source), the Analyzer Polaroid and the Optical Detector. Each one will be described separately.

### A. The Light Source

A red laser pointer is used as the light source. It operates at a nominal wavelength of approximately 650 nm with a power output of about 3 mw. Although the output is approximately 60% polarized, the laser light is directed through a polarizing filter which increases its polarization to about 95%. Since this filter is not permanently bonded to the laser, it is important to adjust its rotation position to achieve maximum power output of the light source. This will occur when the polarization axis of the laser corresponds to that of the filter. This can easily be adjusted visually by inserting a white card at the entrance to the solenoid.

The laser requires a voltage regulated supply of 4 volts and 40 mA. ***The red banana plug should be connected to the positive terminal post of the supply. Reversing the power supply voltage will destroy the laser.*** Note: it is important to protect both leads to the laser from an electrostatic shock. Keep the connectors shorted to each other until they are connected to their supply. TeachSpin's audio amplifier unit AALS1-A has a voltage regulated (4V) supply output specifically designed for this laser diode light source.

The laser beam must be adjusted by the operator to traverse the solenoid along its central axis. This can be accomplished by manipulation of the four nylon thumb screws on the laser mount using a white card both at the entrance and exit of the solenoid. The sample glass rod, or other samples, should be removed from the solenoid during the alignment procedure. After alignment, the sample can be reinserted into the solenoid.

### B. Solenoid

The solenoid has the following physical specifications:

Length: 150 mm	Wire Size: #18 double insulated
Turns/layer: 140	DC Resistance: 2.6 $\Omega$
Number of Layers: 10	

The approximate calibration constant for the unit, measured at the center of the solenoid is:

$$B = (11.1 \text{ mT/A}) I$$

where I is in amperes and B is in millitesla.

The magnetic field does vary along the axis of the solenoid. Such variation may be significant for certain samples, particularly those which extend outside the coils. We recommend that the students measure the axial magnetic field profile using TeachSpin's Hall Effect Probe HE1-A, or other equivalent field measuring apparatus.

The maximum continuous current through the unit is 3 amperes. For times of the order of 30 seconds, however, 10 amperes can be used without damaging the solenoid or its supports. **Extreme care** should be taken to assure that the unit does not overheat when exceeding the 3 A specification.

---

Since Faraday rotation measurements can easily be performed in 10-15 seconds by a student familiar with the equipment, it is possible to use these larger solenoid currents and thus obtain larger rotations.

#### C. Analyzer Polaroid

The unit is equipped with a rotatable Polaroid film in a calibrated mount. The decal is marked in  $5^\circ$  increments. This limits the accuracy of an angular measurement to about  $2^\circ$ . This is a conservative estimate. Some students may claim  $1^\circ$  set-ability. You be the judge.

#### D. Detector

The detector is simply a photodiode connected in series to one of three resistors; 10K, 3K, 1K. The photodiode is a *current source* and is a linear photonic detector, as long as the voltage across it is less than about 0.3 volt. Saturation begins to occur when this bias voltage appears across the diode. This makes the detector nonlinear.

*It is wise to work at bias voltages well below the 0.3 volt value.* This can be accomplished by using the proper load resistor and monitoring the bias voltage. Since the laser diode light source is high intensity, it will be necessary to use the lower values of load resistors for some Faraday rotation experiments.

#### E. Sample

FR1-A comes with one glass rod sample. Its specifications are:

Diameter: 5 mm	Length: 10 cm
Material: SF - 59	

The sample can be removed from the solenoid by first removing the detector, analyzer and light source. This gives the experimenter unrestricted access to the solenoid's bore. Care should be taken not to damage the end of the glass sample. They are highly polished. Any push-rod should have a soft end covered by optical tissue or its equivalent.



### III: EXPERIMENTS

#### A. Malus's Law

With the sample removed from the solenoid, students can measure the intensity of the transmitted light through two polarizers (one on the laser, the other the analyzer) as a function of the relative angle between them. They should also derive a simple theoretical calculation of this "law."

Be Careful!! This is a simple experiment, but one must not saturate the diode detector. Use the correct load resistor.

#### B. Measure the Verdet Constant, $v$ , DC.<sup>4</sup>

The Verdet constant is defined by the relationship:

$$\theta = vB\ell$$

where  $B$  is the strength of the magnetic field in millitesla,  $\ell$  is the length in centimeters and  $\theta$ , in radians, is the angle of rotation of the axis of the polarization after passing through the medium in the magnetic field. The units of  $v$  are then: radians/millitesla centimeter. These are by no means universal units. The units given in the literature vary and include degrees/gauss centimeter.

First, you may wish to independently measure the magnetic field inside the solenoid rather than using the  $B = 11.11$  calibration we have supplied. The field inside is not constant along the entire length. It drops off to about half the maximum value at the ends. TeachSpin's HE1-A Hall Effect Probe is an ideal instrument to measure this axial field, but other Hall sensor probes will also do the job. Such a calibration will allow the student to make corrections to their determination of the Verdet constant.

Place the 10 cm glass rod inside the solenoid, supporting it on the foam rubber sleeves. Make sure it is located in the center. Using any white surface (a business card will do) align the laser beam so that the light enters and exits along the center axis of the solenoid. It is important that this be done carefully so that the entire laser beam passes through the glass rod.

Now there are several ways the Faraday rotation can be measured. Both of the methods given below should be tried by the students so that they can explain which one is more accurate and why.

##### 1. Method 1 – Extinction

- Set the analyzer polarizer at  $90^\circ$  with respect to the entrance polarizer. This gives maximum extinction of the light to the detector.
- Connect a current regulated supply to the solenoid.
- Measure the angle of rotation of the analyzer necessary to return to maximum extinction when the solenoid's magnetic field is turned on.
- Find the rotation angle for a variety of magnetic fields.

Describe what happens when you reverse the direction of the magnetic field?  
Does the magnetic field affect the photodiode detector itself?

## 2. Method 2 – Returning to Fixed Intensity Value

- a. Set the analyzer at  $45^\circ$  with respect to the entrance polarizer.
- b. Repeat the procedure described in Method 1. This time, however, adjust the analyzer angle so that the detector output returns to the value found before the magnetic field is turned on.
- c. How does the value of the initial angle affect the results?

It should be straightforward to determine the Verdet constant from either of these measurements. Which method is best? Why?

## C. Measure the Verdet Constant $AC^5$

A more accurate and more sensitive method of determining Verdet constants uses lock-in detection and ac magnetic fields. TeachSpin originally developed FR1-A to accompany its teaching Signal Processor/Lock-In Amplifiers (SPLIA1-A) since Faraday rotation was a good example of a “small” physical effect that can easily be measured with lock-in detection techniques. This was also independently realized by Jain etc. all who have written an excellent article on how this measurement is carried out. We have enclosed a copy of their American Journal of Physics article for your convenience.

Lock-In detection affords some additional possibilities for the student.

1. The relative angle at which to set the polarizer to obtain the maximum signal is easily determined.
2. The relative phase angle of the ac signal as a function of Polaroid angle can be examined.
3. The student develops an understanding of the process of obtaining an absolute measurement of  $v$  from these ac measurements.

## D. Measurements of Verdet Constants in Liquids

The ac lock-in detection method allows one to detect extremely small Faraday rotations and thus small Verdet constants without using extremely large magnetic fields. Various liquids exhibit the Faraday effect and their constants can be measured with this apparatus. A glass cell with flat optical ends and a filling tube at one end will hold an appropriate liquid sample. With such a sample holder, however, the liquid will not all be in the same magnetic field. Part of the sample will even be outside the solenoid.

This presents an interesting challenge for the student's determination of the Verdet constant. It requires that the axial field profile be measured first, and a simple computer program or hand held calculator algorithm be developed to extract  $v$  from the measurements. This can easily be done since the Faraday effect is a linear function of the magnetic field.

#### IV. REFERENCES

1. D.A. Van Baak, "Resonant Faraday rotation as a probe of atomic dispersion." *Am. J. Phys.* 64 (6), June, 1996.

---

This paper has an excellent set of references for both the historical story of this discovery and modern practical applications of the effect. The paper also contains references to student experiments and theoretical papers analyzing this phenomenon.

2. Alan Portis, "Electromagnetic Fields," Wiley, pp 467 – 474.  
Eugene Hecht, "Optics," Addison-Wesley (Third Edition), p 862.
3. Electro-Optics Technologies, Inc. [www.eotech.com](http://www.eotech.com)
4. Frank J. Loeffler, "A Faraday rotation experiment for undergraduate physics laboratory." *Am. J. Phys.* 51 (7) July, 1983.
5. Aloke Jain et. al., "A simple experiment for determining Verdet constants using alternating current magnetic fields." *Am. J. Phys.* 67 (8) August, 1999.



## Laboratoire 9

# Effet Zeeman

### 9.1 But

Observer l'effet d'un champ magnétique sur l'énergie de niveaux atomiques. Obtenir une valeur pour le magnéton de Bohr. Se familiariser avec l'utilisation d'un interféromètre de Fabry-Pérot.

### 9.2 Objectifs

- Déterminer la valeur du magnéton de Bohr de la série rouge d'une lampe de cadmium ;
- Déterminer la valeur du magnéton de Bohr de la série verte d'une lampe de cadmium ;
- Déterminer la finesse du Fabry-Pérot.

### 9.3 Introduction

Michael Faraday fut le premier à s'intéresser, dès 1862, à l'effet d'un champ magnétique sur une source lumineuse. La trop faible résolution de son appareillage (il travaillait avec un spectromètre à prisme) l'empêcha toutefois de détecter un quelconque effet. Plus tard, Pieter Zeeman, un jeune physicien néerlandais, s'inspirant des travaux de Faraday, constata que :

*« Si un Faraday a pensé à la possibilité de la relation mentionnée plus haut, cela peut valoir la peine de tenter à nouveau cette expérience avec les excellents dispositifs spectroscopiques actuels ce qui, autant que je sache, n'a jamais été tenté par personne. »*

[Phil. Mag. **5**, 226 (1897)]

En 1896, à l'âge de 31 ans, il tenta l'expérience et constata que les raies jaunes du sodium se séparaient en plusieurs composantes polarisées sous l'action d'un fort champ magnétique. Il communiqua sa découverte à Hendrik Antoon Lorentz qui donna rapidement une explication à ses observations.

L'idée fondamentale était que la lumière était émise par des particules chargées se déplaçant dans l'atome. Leur mouvement était influencé par les lois de l'électromagnétisme émises une vingtaine d'années plus tôt par Maxwell. À partir du changement de fréquence de la lumière

émise et de sa polarisation, Zeeman et Lorentz purent déterminer le rapport  $e/m$  aussi bien que le signe de la charge. Le signe était négatif et la valeur de  $e/m$  environ mille fois supérieure à ce qu'on s'attendait pour l'atome entier, sur la base des notions sommaires que l'on possédait alors des masses atomiques. Zeeman venait, sans s'en rendre compte, de découvrir l'électron un an avant Thomson ! Par la suite, l'effet Zeeman se révéla un outil puissant pour élucider la structure atomique et joua un rôle décisif dans la découverte du principe d'exclusion de Pauli et du spin de l'électron.

## 9.4 Théorie

### Analyse classique

L'analyse initialement effectuée par Lorentz est évidemment une analyse classique : la mécanique quantique n'existait pas à l'époque. Lorentz considéra une charge  $e$  en rotation autour d'un point auquel elle est liée par une force harmonique :  $\mathbf{F} = -k\mathbf{r}$ . La fréquence d'oscillation est alors,

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9.1)$$

Les lois de l'électromagnétisme classique impliquent que la charge émet de la lumière de fréquence  $\nu_0$  polarisée linéairement si l'observation est selon le plan de rotation et polarisée circulairement si l'observation se fait perpendiculairement au plan de rotation.

Sous l'action d'un champ magnétique  $B$  parallèle à l'axe de rotation de la charge, la constante de rappel devient  $k \pm e\nu B/r$ . Si  $e\nu B/r \ll k$  on a que :

$$\nu = \nu_0 \pm \frac{e}{4\pi m} B \quad (9.2)$$

Le changement d'énergie optique s'écrit

$$\Delta E = \pm \mu_B B \quad (9.3)$$

où,

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9.274 \times 10^{-24} \text{ J T}^{-1} = 0.4669 \text{ cm}^{-1} \text{ T}^{-1} \quad (9.4)$$

est appelé « magnéton de Bohr ».

Par contre, si le champ magnétique est parallèle au plan de rotation, le mouvement de la charge n'est pas affecté.

### Analyse quantique

Il devint rapidement apparent que le nombre, la forme spectrale et la polarisation de nombreuses raies d'émission ne pouvaient être expliquées par la théorie de Lorentz. Une explication globale de l'effet ne peut être obtenu que dans le cadre de la mécanique quantique.

Soient  $\mathbf{L}$  le moment cinétique,  $\mathbf{S}$  le spin et  $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$  le moment cinétique total associés à une orbitale électronique. Les états propres de cette orbitale peuvent alors s'écrire sous la forme  $|n, L, S, J, M\rangle$ , où  $n$  est le nombre quantique principal,  $\hbar^2 L(L+1)$ ,  $\hbar^2 S(S+1)$  et  $\hbar^2 J(J+1)$  sont les valeurs propres des opérateurs  $L^2$ ,  $S^2$  et  $J^2$ ,  $\hbar M$  est la valeur propre de  $J_z$ . L'interaction entre un atome et un champ magnétique s'effectue par l'intermédiaire du moment cinétique de cet atome. Dans ce qui suit, on supposera que :

1. L'interaction est suffisamment faible par rapport à l'interaction coulombienne pour pouvoir être traitée dans le cadre de la théorie des perturbations. Ceci implique que les décalages énergétiques demeurent faibles par rapport à l'énergie de la transition.
2. Le couplage avec le champ magnétique est beaucoup plus faible que le couplage spin-orbite, responsable de la structure fine, et beaucoup plus fort que le couplage avec le spin nucléaire, responsable de la structure hyperfine.
3. Le champ magnétique est selon l'axe  $z$ .
4. Les transitions entre les états initial et final d'où provient la lumière émise par les atomes sont induites par une interaction dipolaire électrique.

L'hamiltonien s'écrit alors

$$H_I = -\frac{\mu_B}{\hbar}(L_z + 2S_z)B \quad (9.5)$$

Le théorème de Wigner-Eckart permet d'écrire cet hamiltonien en termes de  $J_z$  :

$$H_I = -g_j \frac{\mu_B}{\hbar} J_z B \quad (9.6)$$

où  $g_j$ , appelé « facteur de Landé », vaut

$$g_j = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (9.7)$$

La dégénérescence des  $2J+1$  niveaux d'énergie en champ magnétique nul sera levée selon la relation

$$\Delta E = E(B) - E(0) = g_j M \mu_B B \quad (9.8)$$

avec  $-J \leq M \leq J$  et où l'on a tenu compte de la charge négative de l'électron.

D'autre part, dans le cas d'une interaction médiée par l'opérateur dipolaire électrique, les transitions entre états initial ( $i$ ) et final ( $f$ ) doivent satisfaire les règles de sélection

$$L_f - L_i = \pm 1, \quad (9.9)$$

$$M_f - M_i = 0 \text{ ou } \pm 1, \quad (9.10)$$

$$J_f - J_i = \begin{cases} 0 \text{ ou } \pm 1 & \text{si } J_i \neq 0 \\ \pm 1 & \text{si } J_i = 0 \end{cases}, \quad (9.11)$$

et auront les polarisation précises :

$$\begin{aligned} M_f - M_i = 1 & : \text{polarisation circulaire droite dans le plan } xy \\ M_f - M_i = 0 & : \text{polarisation linéaire selon } z \\ M_f - M_i = -1 & : \text{polarisation circulaire gauche dans le plan } xy \end{aligned} \quad (9.12)$$

Pour connaître le décalage spectral en champ magnétique d'une transition donnée, il faut établir le diagramme des niveaux d'énergie des états initial et final à partir des équations (9.7) et (9.8), et en déduire les diverses transitions en tenant compte des règles de sélection.

Il est à noter que dans le cas où  $S = 0$  pour les états initial et final, la raie d'émission doit être un triplet en champ magnétique tel que prédit par Lorentz. On parle alors d'effet Zeeman « normal ». Dans la majorité des cas toutefois, les raies sont séparées en plus de composantes à cause du moment magnétique intrinsèque de l'électron associé à son spin.

## Niveaux d'énergie du cadmium



Un interféromètre de Fabry-Pérot produit une série de cercles concentriques qui satisfont à la condition d'interférence constructive :

$$m = \frac{\delta}{2\pi} \cos \theta_m = m_0 \cos \theta_m, \quad (9.13)$$

où  $m$  est un entier,  $\delta$  le déphasage subi par la lumière,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $n$  l'indice de réfraction du milieu entre les deux miroirs séparés d'une distance et  $m_0 = 2nd/\lambda$ . La fonction de réponse de l'interféromètre s'écrit

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad F = \frac{4R}{(1 - R)^2}, \quad (9.14)$$

où  $I_i$  et  $I_t$  sont les intensités incidente et transmise et  $R$  est la réflectivité des miroirs (on néglige ici l'absorption). La caractéristique la plus facilement mesurable d'un interféromètre est sa finesse,  $F$ , qui correspond au rapport entre la séparation entre deux franges adjacentes et leur largeur à mi-hauteur. Il n'est pas difficile de montrer que

$$F = \frac{\pi}{2} \sqrt{F} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}. \quad (9.15)$$

On définit également l'intervalle de fréquence  $\Delta\nu_u$  comme la différence de fréquence entre deux raies qui résulte en un changement d'ordre de 1 :

$$\Delta\nu_u = \frac{1}{2nd}. \quad (9.16)$$

Finalement, la résolution spectrale  $\Delta\nu$  de l'interféromètre correspond à la bande spectrale balayée par la largeur des franges. Compte-tenu de la définition de la finesse,

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_u}{F} = \frac{1}{2ndF} \quad (9.17)$$

Pour pouvoir résoudre deux raies d'émission de nombres d'onde voisins  $\nu_1$  et  $\nu_2$ , il faut que

$$|\nu_1 - \nu_2| > \Delta\nu \quad (9.18)$$

L'analyse ci-dessus suppose que la largeur intrinsèque des raies d'émission est nulle. Bien entendu, cela n'est jamais le cas. En effet, à la largeur naturelle due au temps de vie des transitions optiques ( $\tau > 10^{-9}$  s) s'ajoute les élargissements dus à l'effet Doppler, à la structure hyperfine ( $\Delta\nu' \sim 2$  GHz), à l'effet Stark et aux collisions entre atomes. On doit alors écrire

$$\Delta\nu_{\text{observé}}^2 = \Delta\nu_{\text{instrumental}}^2 + \Delta\nu_{\text{intrinsèque}}^2 \quad (9.19)$$

## Analyse des patrons d'interférence

Soit  $m_1$  l'ordre d'interférence du cercle de plus petit rayon. À partir de l'équation (9.13) on a que

$$m_1 = m_0 - \epsilon, \quad 0 < \epsilon \leq 1, \quad (9.20)$$

c'est-à-dire que  $m_1$  est la partie entière de  $m_0$ . Plus généralement, pour le  $p$ -ième cercle, on a :

$$m_p = (m_0 - \epsilon) - (p - 1), \quad (9.21)$$

D'autre part, le rayon du  $p$ -ième cercle vaut

$$r_p = f\theta_p, \quad (9.22)$$

où  $f$  est une constante qui ne dépend que de la géométrie du système. En combinant les équations (9.13) et (9.20) à (9.22), on trouve facilement que

$$r_p^2 = \frac{2f^2}{m_0}(p - 1 + \epsilon) \quad (9.23)$$

Le carré du rayon des cercles varie donc linéairement avec  $p$ . Si deux composantes spectrales de nombres d'onde  $\nu_1$  et  $\nu_2$  très voisins sont présents, on aura :

$$\epsilon_1 = \frac{2d}{\lambda_1} - m_1 = 2d\nu_1 - m_1 \quad (9.24)$$

$$\epsilon_2 = \frac{2d}{\lambda_2} - m_1 = 2d\nu_2 - m_1 \quad (9.25)$$

d'où

$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2d} \quad (9.26)$$

**Le décalage spectral est donc obtenu à partir des valeurs des ordres fractionnaires  $\epsilon$  associés à chacune des deux raies spectrales.**

#### NOTE

**On utilise fréquemment en spectroscopie optique le nombre d'onde**

$$\nu = 1/\lambda$$

**plutôt que la longueur d'onde  $\lambda$ .**

## 9.6 Manipulations

1. Sélectionnez la raie rouge avec le filtre rouge. Vérifiez que la raie centrale n'est pas affectée par le champ magnétique en prenant une série de photos avec des champs allant de 0 à 1 T pour une distance maximisant la résolution.
2. Vérifiez que les deux éléments du doublet Zeeman se décalent de la même énergie par rapport à la raie centrale pour une valeur convenable du champ magnétique.
3. Prenez une série de photos des doublets en fonction du champ magnétique. Choisissez une séparation des deux miroirs entre 2 et 10 mm selon le champ magnétique appliqué : à faible champ, une distance trop petite entre les deux miroirs ne vous permettra pas de bien résoudre les raies Zeeman ; à fort champ, si la distance est trop grande, les raies des différents ordres se mélangeront et l'analyse sera difficile, voire impossible (truc : utilisez les équations (9.17), (9.18) et (9.26) pour estimer la séparation requise).
4. Sélectionnez maintenant la raie verte avec le filtre vert. En champ magnétique nul, obtenez la « finesse » pour plusieurs distances entre 2 et environ 10 mm. À partir de l'équation (9.19), vous pourrez en déduire la finesse de l'interféromètre et la largeur intrinsèque de la raie.
5. Finalement, reprenez l'étape 3 pour la raie verte. Attention, cela demandera du *doigté* !

## 9.7 Matériel

Le montage de l'expérience d'effet Zeeman contient les éléments suivants. À votre arrivée à l'expérience, vérifiez que tout le matériel est présent. Si le matériel n'est pas complet avisez le responsable du cours. Lorsque vous avez terminé de travailler avec le montage, vérifiez à nouveau que tous les éléments s'y trouvent avant de quitter le laboratoire.

1. Lampe au cadmium.
2. Électroaimant (0-1 T).
3. Sonde de Hall
4. Interféromètre de Fabry-Pérot
5. Appareil photo numérique
6. Ordinateur.
7. Filtre vert
8. Filtre rouge
9. Polariseur
10. Iris
11. Lentille biconvexe
12. Tournevis hexagonal 3/16

### ATTENTION

**La lampe émet du rayonnement ultraviolet.  
Ne la regardez pas directement à l'oeil nu.**

## 9.8 Instructions particulières

L'expérience consiste à obtenir un bon patron d'interférence qui inclue plusieurs cercles de chaque raie, à mesurer le rayon de ces raies et à obtenir le décalage spectral entre les raies à partir des équations (9.21) et (9.26).

### Champ magnétique

Une sonde de Hall est un dispositif magnétorésistif. La sonde de Hall utilisée a été calibrée et donne :

$$B = (0.310 \pm 0.005) \frac{T}{\Omega} \cdot R - (0.041 \pm 0.005) T \quad (9.27)$$

On varie le champ magnétique en changeant le courant qui circule dans les bobines.

### ATTENTION

**OUVREZ L'ALIMENTATION EN EAU DE REFROIDISSEMENT  
NE DÉPASSEZ PAS UN COURANT DE 10 A**

## Interféromètre de Fabry-Pérot

Il est impératif que les deux miroirs de l'interféromètre soient parallèles. Si vous ne voyez aucun patron d'interférence, ramenez la distance entre les deux miroirs à environ 2 mm. Si vous voyez un patron, efforcez vous de le centrer. Puis, déplacez votre œil de gauche à droite et de bas en haut. Ajustez les miroirs pour que le patron ne se déplace pas lors des mouvements de tête.

## Contrôle de l'appareil photo

L'appareil photo Canon doit être réglé manuellement. Commencez par repérer, sur le côté gauche, les roulettes de commande principale, et à l'arrière à droite, le bouton de contrôle à quatre flèches.

1. Mettre l'appareil en marche en tournant la roulette de commande extérieure sur l'icône rouge.
2. Tourner la roulette de commande intérieure jusqu'à ce que la lettre **M** soit en haut vis-à-vis le trait noir.
3. Ouvrir la fenêtre à cristaux liquides.
4. Mettre le foyer à l'infini en pressant sur le bouton **MF**, puis sur la flèche du haut du bouton de contrôle.
5. Mettre le zoom au maximum en tournant la bague à l'avant de l'appareil dans le sens antihoraire.
6. Désactiver le flash en appuyant sur le bouton qui surmonte un éclair jusqu'à ce que l'éclair barré apparaisse dans l'écran.

Vous devriez maintenant voir le patron dans l'écran. Vous pouvez modifier le temps d'exposition en appuyant sur les flèches gauche ou droite, et l'ouverture en appuyant sur les flèches haut et bas. Pour prendre la photo, appuyez sur le bouton à l'avant et à droite de l'appareil.

Pour transférer les photos sur l'ordinateur, tournez la roulette de commande extérieure jusqu'à l'icône « double flèche noire ». Sur l'ordinateur, choisissez le logiciel **Photoshop**.

## 9.9 Références

Pour l'effet Zeeman, C. Cohen-Tanoudji et coll., *Mécanique quantique* (Hermann, Paris, 1995), ou S. Gasinowicz, *Quantum Physics* (Wiley, New-York, 1996).

L'interféromètre de Fabry-Pérot est traité en détail dans tous les livres d'optique. Voir aussi A. C. Melissinos, *Experiments in Modern Physics* (Academic Press, New-York, 1966), en réserve à la bibliothèque.

## Laboratoire 10

# Photons intriqués

### 10.1 But

Le but de cette expérience est d'étudier l'intrication quantique et le phénomène de non-localité. L'intrication quantique implique que deux éléments ne peuvent être décrits indépendamment l'un de l'autre par un simple produit d'états quantiques mais plutôt par une superposition de produit de d'états quantiques dont l'état d'un élément ne peut être décrit sans tenir compte de l'état du second élément.

Nous allons dans cette expérience, mesurer la polarisation des photons émis lors de la conversion descendente de photons provenant d'un laser à 405 nm traversant une paire de cristaux non linéaires de BiBO. L'analyse du taux de coïncidences de signaux provenant de deux détecteurs (compteurs de photons) situés à des endroits différents démontrera, ou non, le principe d'intrication quantique et de non-localité.

### 10.2 Objectifs

- Étudier l'intrications quantiques de photons ;
- Déterminer s'il y a violation de l'inégalité de Bell.

### 10.3 Théorie

Considérons un système d'une paire de photons que l'on appelle photon «signal» et (de l'anglais) photon «idler». Comme chacun de ces photons se propagent dans des directions différentes, ils peuvent être considérés comme distinguables. Nous supposons que les photons sont dans l'état

$$|\psi_{\text{int}}\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|V\rangle_s |V\rangle_i + |H\rangle_s |H\rangle_i) ,$$

où  $|V\rangle$  et  $|H\rangle$  représente la polarisation verticale et horizontale respectivement, les indices indiquant s'il s'agit du photon signal,  $s$ , ou du photon «idler»,  $i$ .

Cet état ne peut être représenté sous la forme d'un simple produit des états de chacun des photons, autrement dit  $|\psi_{\text{int}}\rangle \neq |A\rangle_s |B\rangle_i$  pour tous états  $|A\rangle_s$  et  $|B\rangle_i$  ce qui signifie que l'état d'un photon ne peut être décrit sans connaître l'état de l'autre photon. De tels photons sont dits intriqués et l'état  $|\psi_{\text{int}}\rangle$  est un état intriqué.

Si nous mesurons la polarisation des photons dans une base  $H, V$ , il n'y a que deux possibilités, de probabilité égale : les photons ont tous deux des polarisations verticales ou tous deux des polarisations horizontales. Si nous considérons maintenant la condition où l'angle de polarisation de la base est tourné de  $\alpha$ , la base devient donc

$$\begin{aligned} |V_\alpha\rangle &= \cos \alpha |V\rangle - \sin \alpha |H\rangle \\ |H_\alpha\rangle &= \sin \alpha |V\rangle + \cos \alpha |H\rangle , \end{aligned} \quad (10.1)$$

où  $|V_\alpha\rangle$  représente un état dont la polarisation fait un angle  $\alpha$  avec la verticale et  $|H_\alpha\rangle$ , un état dont la polarisation fait un angle  $\alpha$  avec l'horizontale.

Dans cette nouvelle base, l'état intriqué s'écrit

$$|\psi_{\text{int}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|V_\alpha\rangle_s |V_\alpha\rangle_i + |H_\alpha\rangle_s |H_\alpha\rangle_i) .$$

Dans cette expérience, nous utilisons une paire de cristaux de BiBO. L'axe optique du second cristal de BiBO étant orienté à  $90^\circ$  par rapport à celui du premier fait en sorte que toutes les polarisations du faisceau pompe peuvent être converties. La conversion suivra les règles suivantes :

$$\begin{aligned} |V\rangle_p &\rightarrow |H\rangle_s |H\rangle_i \\ |H\rangle_p &\rightarrow \exp(i\Delta) |V\rangle_s |V\rangle_i \end{aligned}$$

où  $\Delta$  est une phase engendrée par la dispersion et la biréfringence des cristaux.

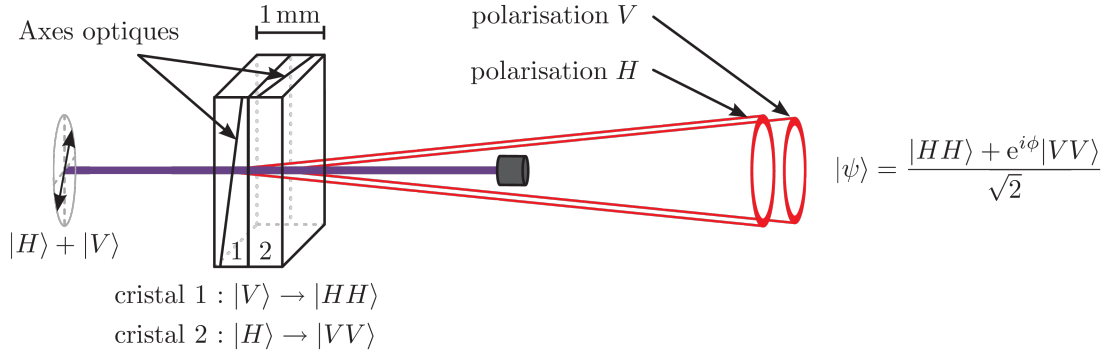


Figure 10.1 : Illustration de la conversion de photons de longueur d'onde de 405 nm en paire de photons intriqués à 810 nm par une paire de cristaux de BiBO.

Pour créer un état intriqué, nous débutons par polariser linéairement le faisceau laser à un angle  $\theta_l$  de la vertical puis nous déphasons l'une de polarisation de  $\phi_l$  à l'aide d'une lame biréfringente en quartz. Les photons pompe sont alors dans l'état :

$$|\psi_p\rangle = \cos \theta_l |V\rangle_p + \exp(i\phi_l) \sin \theta_l |H\rangle_p .$$

Les photons convertis sortent des cristaux dans l'état :

$$|\psi_c\rangle = \cos \theta_l |H\rangle_s |H\rangle_i + \exp(i\phi) \sin \theta_l |V\rangle_s |V\rangle_i$$

où  $\phi = \phi_l + \Delta$  est la différence de phase totale entre les composantes de chaque polarisation. Dans le cas particulier où  $\phi = 0$  et  $\Delta = \frac{\pi}{4}$ , les photons sont dans l'état

$$|\phi_B\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|V\rangle_s |V\rangle_i + |H\rangle_s |H\rangle_i) , \quad (10.2)$$

l'intrication quantique est alors maximale : on parle alors d'état de Bell.

En plaçant, dans le trajet optique de chacun des deux photons de conversion, des polarisateurs d'angle  $\alpha$  pour le photon  $s$  et  $\beta$  pour le photon  $i$ , nous pouvons déterminer la polarisation des photons convertis. Pour une paire dans l'état  $|\psi_c\rangle$ , la probabilité de coïncidence est :

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = |\langle V_\alpha|_s \langle V_\beta|_i |\psi_c\rangle|^2 .$$

L'indice  $VV$  représente le résultat pour  $V_\alpha V_\beta$ , chacun des photons étant «vertical» dans la base de leur polarisateur respectif. De manière générale, pour des angles quelconques  $\alpha, \beta$ , nous avons quatre résultats possible soit  $V_\alpha V_\beta, V_\alpha H_\beta, H_\alpha V_\beta$  et  $H_\alpha H_\beta$  c'est-à-dire  $VV, VH, HV$  et  $HH$ . De l'équation (10.1), on écrit

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = |\sin \alpha \sin \beta \cos \theta_l + \exp(i\phi) \cos \alpha \cos \beta \sin \theta_l|^2$$

ou

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \cos^2 \theta_l + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \theta_l + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin 2\theta_l \cos \phi .$$

Dans le cas de photons dans l'état de Bell (10.2)

$$P_{VV}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \cos^2(\beta - \alpha)$$

qui ne dépend que de l'angle relatif  $\beta - \alpha$ .

Expérimentalement, le nombre de coïncidences mesurées sera

$$N(\alpha, \beta) = N_{\text{tot}} \left( \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \cos^2 \theta_l + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \theta_l + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin 2\theta_l \cos \phi \right) + C$$

où  $N_{\text{tot}}$  est le nombre total de photons intriqués.  $C$  résulte des imperfections de l'optique du système : il peut-être vu comme le bruit provenant des «photons corrélés mais non-intriqués» et est généralement négligeable devant les autres termes. Le nombre total de photons intriqués peut être déterminé en sommant les coïncidences dans les quatre orientations  $HH, HV, VH$  et  $HH$  soit

$$\begin{aligned} N_{\text{tot}} &= N(\alpha, \beta) + N\left(\alpha + \frac{\pi}{2}, \beta + \frac{\pi}{2}\right) + N\left(\alpha + \frac{\pi}{2}, \beta\right) + N\left(\alpha, \beta + \frac{\pi}{2}\right) - 4C \\ &= N(0, 0) + N\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) - 2C \end{aligned}$$

où

$$C = \frac{1}{2} \left( N\left(0, \frac{\pi}{2}\right) + N\left(\frac{\pi}{2}, 0\right) \right) .$$

Le degré de corrélation des polarisations des paires de photons s'obtient de l'expression

$$E(\alpha, \beta) = P_{VV}(\alpha, \beta) + P_{HH}(\alpha, \beta) - P_{VH}(\alpha, \beta) - P_{HV}(\alpha, \beta) .$$

On définit le paramètre  $S$  de corrélation comme étant

$$S = E(\alpha, \beta) - E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta) + E(\alpha', \beta') .$$

L'inégalité de Bell impose que dans le cas d'une théorie locale  $|S| \leq 2$  alors que la mécanique quantique prédit que pour l'état de Bell et pour  $\alpha = -45^\circ, \alpha' = 0^\circ, \beta = -22.5^\circ, \beta' = 22.5^\circ$ , la valeur maximale de  $S$  vaut  $2\sqrt{2}$ .

## 10.4 Manipulations

### ATTENTION

**Le laser de 405 nm est assez puissant.**

**Portez toujours les lunettes de protection lors des manipulations  
lorsque le laser est allumé.**

**Enlevez tous les bijoux (bagues, montres...)  $\Rightarrow$  réflexions !**

1. En premier lieu, assurez-vous que l'angle du polariseur et celui de la lame de quartz se situant devant le cristal de BiBO soit en position optimale. Ajustez l'angle du polariseur de manière à ce que  $N(0,0) \simeq N(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$  puis ajustez la lame de quartz pour maximiser  $N(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4})$  ;
2. Déterminer  $C$  ;
3. Pour un angle  $\beta$  (ou  $\alpha$ ) fixe, mesurez le taux de coïncidences en fonction de  $\alpha$  (ou de  $\beta$ ) ;
4. Mesurez le taux de coïncidences pour différents angles de polarisation des photons convertis et déterminez le paramètre  $S$ .

## 10.5 Matériel

Le montage contient le matériel suivant :

1. Laser à 405 nm, 150 mW
2. Deux lames demie-onde à 405 nm
3. Cristal polariseur  $\alpha$ -BBO à 405 nm
4. Doubleur de fréquence composé d'une paire de deux cristaux de BiBO
5. Deux filtres passe-bande à 810 nm
6. Deux polariseurs à 810 nm
7. Deux lentilles convergentes
8. Deux fibres optiques
9. Deux compteurs de photons
10. Module de coïncidence
11. Compteurs d'impulsion



## Annexes



## Annexe A

# Ajustement par moindre carrés

### A.1 Théorie

Soit une série de  $N$  points expérimentaux  $(x_i, y_i)$  avec des incertitudes  $\sigma_i$ . À ces données, on associe un modèle  $F(p_k, x)$  qui contient  $n$  paramètres  $p_k$ . Une procédure d'optimisation consiste à trouver le jeu de paramètres  $\{p_k\}_{\text{opt}}$  qui minimise le  $\chi^2$ , avec

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[y_i - F(p_k, x_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (\text{A.1})$$

La procédure d'optimisation consiste à partir d'un jeu de paramètres  $\{p_k\}_o$  initiaux et de les varier jusqu'à ce qu'un minimum du  $\chi^2$  ait été obtenu. Il est à noter que toutes les méthodes utilisées ne peuvent trouver qu'un minimum local du  $\chi^2$ . Il revient à l'utilisateur de s'assurer que ce minimum est effectivement global.

Une fois le jeu de paramètres optimal  $\{p_k\}_{\text{opt}}$  trouvé, les incertitudes  $\Delta p_k$  peuvent être obtenues de la matrice d'erreur  $\epsilon$  :

$$\Delta p_k = \sqrt{\epsilon_{kk}} \quad (\text{A.2})$$

avec

$$\epsilon = \alpha^{-1} \quad (\text{A.3})$$

et

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial p_i \partial p_j} \bigg|_{\{p_k\}_{\text{opt}}} \approx \sum_l \frac{1}{\sigma_l^2} \frac{\partial F(p_k, x_l)}{\partial p_i} \frac{\partial F(p_k, x_l)}{\partial p_j} \bigg|_{\{p_k\}_{\text{opt}}} \quad (\text{A.4})$$

où  $\alpha$  est la matrice de courbure. Celle-ci peut être calculée analytiquement si la fonction à ajuster est suffisamment simple, ou numériquement selon :

$$\frac{\partial F}{\partial p_i} \approx \frac{F(\dots, p_i + \Delta p_i, \dots) - F(\dots, p_i, \dots)}{\Delta p_i}. \quad (\text{A.5})$$

Si le modèle  $F(p_k, x)$  est approprié, le chi carré normalisé  $\chi_N^2 = \chi^2/(N - n)$  doit être voisin de 1. Cela signifie tout simplement que si le modèle est approprié, l'écart entre celui-ci et les points expérimentaux devrait être de l'ordre de  $\sigma_i$ , en autant bien sûr que les incertitudes soient réalistes.

Si les incertitudes  $\sigma_i$  ne sont pas a priori connues, on peut quand même effectuer l'optimisation avec

$$\chi^2 = \sum_i [y_i - F(p_k, x_i)]^2 \quad (\text{A.6})$$

$$\sigma^2 = \chi_N^2 = \chi^2 / (N - n - 1) \quad (\text{A.7})$$

On ne pourra par contre tester la validité du modèle puisque  $\chi_N^2 / \sigma^2$  vaut d'office 1.

## A.2 Exemple de minimisation avec Matlab

Matlab contient différentes fonctions pour effectuer des minimisations. Une routine à la fois flexible et simple à utiliser est *fminunc* (de "unconstrained minimisation"). Pour l'utiliser, on doit toutefois commencer par construire une fonction qui calcule  $\chi^2$ .

L'exemple qui suit considère le cas d'un circuit *RLC* série dont on a mesuré la courbe de résonance. Les données sont sous la forme  $(x_i, y_i, \sigma_i)$ , où  $x_i$  est la fréquence angulaire ( $\omega = 2\pi f$ ),  $y_i$  est le rapport  $V_{\text{obs}}/V_{\text{source}}$  du voltage mesuré sur le voltage source et  $\sigma_i$  est l'incertitude sur  $y_i$ . On cherche à trouver les valeurs de  $C$ ,  $L$  et  $R_L$  du circuit. Outre ces trois paramètres ajustables, on doit ajouter au modèle un quatrième paramètre fixe  $R$ , qui correspond à la valeur (connue) de la résistance sur laquelle  $V_{\text{obs}}$  a été mesuré. Pour une telle mesure, on a que  $V_{\text{obs}}/V_{\text{source}} = R/Z$  où  $Z$  est la norme de l'impédance du circuit et est donnée par,

$$Z = \sqrt{(R + R_L)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (\text{A.8})$$

La fonction suivante calcule le chi carré selon ce modèle.

```

1 function chi2=chicarre_RLC(p,x,y,sig,R)
2 %Calcule le chi2 pour un circuit RLC
3 %p contient tous les paramètres ajustables
4 %x et y sont des vecteurs contenant les données expérimentales
5 %sig est le vecteur pour l'incertitude expérimentale
6 %R est un paramètre fixe
7
8 %Paramètres ajustables
9 C=p(1)*1e-9; %C est en nanofarad pour que les valeurs à optimiser
   soient à quelques décades les unes des autres.
10 L=p(2);
11 R_l=p(3);
12
13 %Modèle
14 z=sqrt( (R+R_l)^2+(x*L-1./(x*C)).^2 );
15 y_theorique=R./z;
16
17 %Chi2
18 chi2=sum(((y-y_theorique)./sig).^2);
19
20 %Graphique
21 plot(x,y,x,y_theorique);drawnow %Optionnel, permet de voir l'
   optimisation en temps réel

```

Les paramètres ajustables doivent être regroupés à l'intérieur d'une seule variable, ici le vecteur  $p$ , qui doit être le premier argument de la fonction. On définit un vecteur  $p0$  qui contient les valeurs initiales des paramètres ajustable (ici 3 composantes), puis on appelle *fminunc* :

```
1 [p,chi2,a,a,a,h]=fminunc('chicarre_RLC',p0,[ ],x,y,sig,R)
```

Notez que le premier argument est le nom de la fonction calculant le  $\chi^2$  en format "string". *fminunc* utilise certaines valeurs défauts contenues dans la structure options (troisième argument). Généralement, ces valeurs défauts sont convenables et on peut simplement utiliser la matrice vide `[ ]` comme troisième argument. On doit ensuite fournir les autres paramètres nécessaires à la fonction *chicarre\_RLC* (ici  $x$ ,  $y$ ,  $\text{sig}$  et  $R$ ). La liste des paramètres doit être dans le même ordre que lors de la définition de la fonction *chicarre\_RLC*. Finalement, *fminunc* retourne les paramètres optimisés, le  $\chi^2$  ainsi que plusieurs diagnostics dont on peut la plupart du temps se passer. C'est pourquoi ces différentes valeurs sont stockées dans une variable  $a$  qui ne nous intéressera pas. Par contre, la matrice  $h$ , appelée «hessien» dans Matlab, vaut  $2\alpha$ . Les incertitudes sur les paramètres  $p$  optimisés seront donc trouvés de la façon suivante :

```
1 if sig==1 %si des incertitudes sigma ont été utilisées, seule la
   matrice h est nécessaire; sinon, il faut normaliser h.
2
3     h=h/chi2*(length(x)-length(p));
4 end
5 dp=sqrt(diag(inv(h/2)));
```

### A.3 Exemple de minimisation avec Python

SciPy fournit plusieurs fonctions d'optimisation à travers son sous-module `scipy.optimize`.<sup>1</sup> En particulier, la fonction `minimize` est générale, efficace et simple à utiliser. Cette fonction peut être appelée à l'aide de l'instruction suivante (il faut au préalable avoir fait `from scipy.optimize import minimize`) :

```
res=minimize(chi2fct,p0,args=())
```

où le premier paramètre (`chi2fct`) est l'identificateur de la fonction qui calcule le  $\chi^2$  (i.e. la fonction à minimiser, cette fonction doit accepter comme premier argument le tableau des paramètres à ajuster  $p$ ), le deuxième (`p0`) est un tableau contenant un estimé de départ des éléments de  $p$ , le troisième (`args=`), qui est optionnel, est un tuple des objets à transmettre à la fonction à minimiser (en plus de  $p$  et dans le bon ordre; généralement les objets à transmettre sont les tableaux des mesures et des incertitudes). La fonction `minimize` admet plusieurs autres arguments optionnels que vous pouvez consulter ici<sup>2</sup>. La fonction `minimize` retourne en sortie un objet (`res`) de type `OptimizeResult` qui possède plusieurs attributs que l'on peut accéder par la notation "pointée", par exemple `res.x` est le tableau des paramètres optimisés et `res.success` indique si la minimisation a complété avec succès ou non. Plus d'information sur les objets de type `OptimizeResult` est disponible ici<sup>3</sup>. En particulier, `res.hess_inv` peut contenir un *estimé* de l'inverse de la matrice hessienne, qui selon la notation de la section précédente correspond à  $\varepsilon/2$ .

1. <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.html>

2. <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize.html#scipy.optimize.minimize>

3. <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.OptimizeResult.html#scipy.optimize.OptimizeResult>

Le code suivant montre un exemple d'ajustement des paramètres  $C$ ,  $L$  et  $R_L$  du problème de la section précédente.

```

1 def chi2RLC(p,xObs,yObs,ySig,R): # calcul du chi carré pour
    circuit RLC
2     #p est le tableau des paramètres C, L et R_L
3     C,L,Rl=p
4
5     #impédance
6     Z=np.sqrt( (R+Rl)**2+(xObs*L-1./(xObs*C))**2 )
7     #valeur modèle aux points de mesures
8     yMod=np.abs(R/Z)
9
10    #chi carré
11    chi2=((yObs-yMod)/ySig)**2).sum()
12    return chi2
13
14 #les données de mesures doivent être lues et définies ici
15 x=... #tableau des fréquences angulaires du signal (2*pi*f)
16 y=... #V/E
17 ySig=... #incertitude sur y
18
19 R=10. #résistance du montage de mesure de V, en ohms
20
21 #paramètres estimés de départ
22 #p0[0]=C, en nanoFarad (pour être du même ordre de grandeur que
    les autres par.)
23 #p0[1]=L, en Henry
24 #p0[2]=R_l, en Ohm
25 p0=np.array([0.1,0.2,5.])
26
27 #minimisation
28 res=minimize(chi2RLC,p0,args=(x,y,ySig,R))

```

## Annexe B

# Réseaux de diffraction

### B.1 Équation du réseau de diffraction

Considérons le cas d'un réseau de diffraction lequel on éclaire avec un faisceau parallèle monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$ . Soit  $\alpha$  l'angle que fait ce faisceau avec la normale du réseau,  $\beta$  l'angle que fait la direction d'observation avec la normale au réseau (avec des angles positifs de le sens antihoraire) et  $a$  le pas du réseau, la différence de parcours entre les trajets lumineux sur des deux surfaces réfléchissantes successives est

$$\Delta = \overline{I_2H} + \overline{I_2K} = a(\sin \alpha + \sin \beta) . \quad (\text{B.1})$$

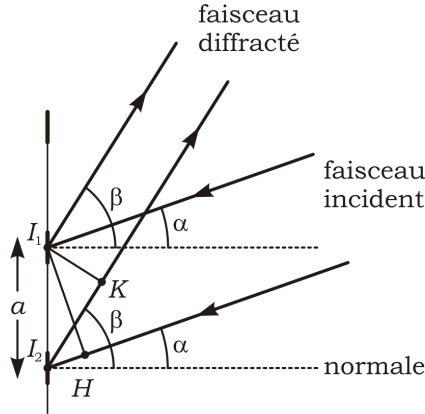


Figure B.1 : Géométrie des faisceaux incidents et diffractés par un réseau.

Il y a interférence constructive si  $\Delta = k\lambda$  où  $k$  est un entier appelé *ordre de diffraction*. L'équation de diffraction par le réseau s'écrit donc

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{k\lambda}{a} = kn\lambda \quad (\text{B.2})$$

où  $n = 1/a$  est le nombre de traits du réseau par unité de longueur. Ainsi pour chaque valeur de  $\alpha$ , il y a un seul maximum d'intensité à un angle  $\beta$  pour chaque valeur de  $k$ .

L'équation (B.2) montre aussi que  $\beta$  dépend de  $\lambda$  et que par conséquent la lumière est dispersée par le réseau. Pour chaque valeur de  $k$ , nous obtenons un spectre de diffraction. Si  $k = 0$ , ordre zéro de diffraction, toutes les longueurs d'onde sont dans la même direction : il n'y a pas de dispersion.

## B.2 Intervalle spectral libre

Pour un même angle  $\alpha$  et un même angle  $\beta$ , plusieurs longueurs d'onde peuvent se superposer. Ces longueurs d'onde correspondent à  $kn\lambda = \text{constante}$ . La relation (B.2) peut s'écrire

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \frac{kn}{\sin \alpha + \sin \beta} \quad (\text{B.3})$$

où  $\sigma$  est appelé le nombre d'onde.  $\sigma = |k|\sigma_1$  avec

$$\sigma_1 = \frac{n}{\sin \alpha + \sin \beta} . \quad (\text{B.4})$$

Les émissions se superposant à  $\beta$  correspondent à une progression arithmétique  $\sigma_1, 2\sigma_1, 3\sigma_1 \dots$

Afin de prévenir la superposition de spectres, il faut que la radiation incidente soit composée de nombres d'onde s'étalant sur une largeur d'au plus  $\Delta\sigma_0$  appelée *intervalle spectral libre*.

Nous remarquons que l'intervalle spectral libre n'est pas a priori une caractéristique du réseau puisqu'il dépend des angles de fonctionnement mais on peut noter que plus le pas de réseau est petit plus large est l'intervalle spectral libre.

## B.3 Résolution

La résolution d'un système optique est définie par sa capacité à séparer deux raies adjacentes d'un spectre et est généralement définie par

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (\text{B.5})$$

où  $\Delta\lambda$  est la différence en longueur d'onde de deux raies séparées d'égale intensité.

Deux raies sont dites résolues si la distance entre ces deux raies fait en sorte que la maximum d'une raie coïncide avec le minimum de l'autre raie : c'est le *critère de Rayleigh*.

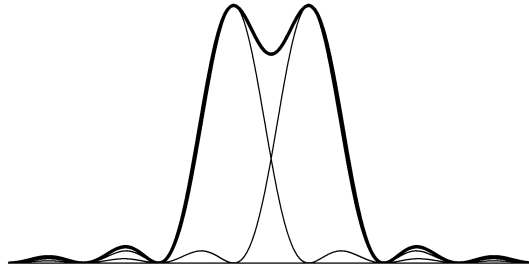


Figure B.2 : Graphique de deux raies résolues par un réseau : le maximum de la seconde raie coïncide avec le minimum de la première.

La séparation angulaire de deux raies  $d\theta$  est

$$d\theta = \frac{\lambda}{W \cos \beta} \quad (\text{B.6})$$

où  $W$  est la largeur du réseau.

De la dérivé de l'équation (B.2), nous obtenons

$$\cos \beta d\beta = \frac{k}{a} d\lambda \quad (\text{B.7})$$



les deux raies sont séparées si  $d\beta = d\theta$ , donc

$$\frac{\lambda}{W \cos \beta} = \frac{k d\lambda}{a \cos \beta} \quad (\text{B.8})$$

ce qui donne

$$\frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{kW}{a} = kN \quad (\text{B.9})$$

avec  $N$ , le nombre total de traits du réseau, et finalement

$$R = kN \quad (\text{B.10})$$

En pratique, la taille du réseau d'un appareil particulier est fixe. Afin d'augmenter la résolution, il faut utiliser un réseau ayant un nombre de traits par unité de longueur supérieur. Il faut cependant garder en mémoire que ce faisant, le nombre possible de valeurs de  $k$  diminue et que par conséquent, certains ordres supérieurs de diffraction disparaîtront.

## B.4 Dispersion angulaire

La dispersion angulaire est la séparation  $d\beta$  obtenue pour deux rayonnements séparés de  $d\lambda$ . De la dérivée de (B.2),  $\alpha$  étant constant, on obtient

$$\cos \beta d\beta = \frac{k}{a} d\lambda \quad (\text{B.11})$$

et

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{k}{a \cos \beta} = \frac{kn}{\cos \beta} \quad (\text{B.12})$$

ou encore

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\cos \beta}. \quad (\text{B.13})$$

Une forte dispersion est obtenue pour des angles de diffractions élevés et donc pour des réseaux ayant un angle de blaze élevé.

## B.5 Dispersion linéaire

La dispersion linéaire d'un réseau est la réciproque du produit de la dispersion angulaire par la longueur focale effective. Elle mesure le nombre de nanomètres se trouvant dans chaque unité de longueur du spectre.

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{a \cos \beta}{kf} \quad (\text{B.14})$$

où  $f$  est la focale du système.

En pratique, on exprime la dispersion linéaire en nm/mm et donc

$$\frac{d\lambda}{dx} \text{ (nm/mm)} = \frac{10^6 \cos \beta}{knf} \quad (\text{B.15})$$

## B.6 Distribution en énergie

Si on veut connaître l'intensité du rayonnement diffracté dans toutes les directions, on débute par additionner les amplitudes de tous les rayons élémentaires diffractés par chacun des réflecteurs (traits) du réseau.

La différence de phase entre deux traits consécutifs est donnée par (voir section B.1)

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi a}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta) . \quad (\text{B.16})$$

Si l'on suppose que tous les rayons élémentaires ont la même amplitude, l'amplitude totale est alors

$$A = \sum_{p=1}^N N A_0 \exp(-ip\phi) = A_0 \frac{\sin \frac{N\phi}{2}}{\sin \frac{\phi}{2}} \quad (\text{B.17})$$

L'intensité du rayonnement diffracté est alors

$$I(\alpha, \beta) = I_0 \frac{\sin^2 \left[ \frac{W\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta) \right]}{\sin^2 \left[ \frac{a\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta) \right]} \quad (\text{B.18})$$

où  $W = Na$  la largeur du réseau.

On remarque que pour un  $\alpha$  fixe, on obtient un certain nombre de directions  $\beta$  pour lesquelles l'intensité est maximum. Ces directions sont données par l'équation

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{k\lambda}{a} \quad (\text{B.19})$$

La figure B.3 présente le spectre de diffraction d'un rayonnement monochromatique, chaque pic correspondant à un ordre de diffraction.

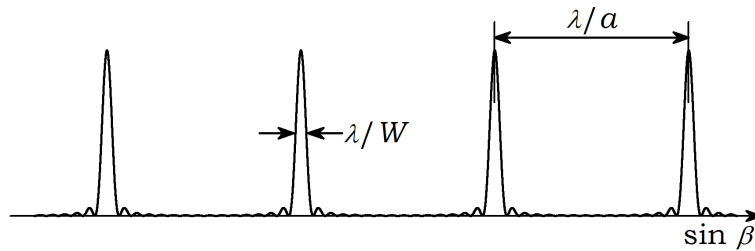


Figure B.3 : Graphique de l'énergie diffractée d'un faisceau monochromatique par un réseau de largeur  $W$ .

Tenons compte maintenant du fait que chaque réflecteur (trait) a une largeur  $b$ , on obtient dans ce cas

$$I(\alpha, \beta) = I_0 \frac{\sin^2 \left[ \frac{b\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta) \right]}{\left[ \frac{b\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta) \right]^2} \frac{\sin^2 \left[ \frac{W\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta) \right]}{\sin^2 \left[ \frac{a\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta) \right]} \quad (\text{B.20})$$

Cette équation n'est valide que pour  $\lambda/a$  et  $\lambda/b < 0.2$ . Dans ces conditions, les pics de chaque ordre de diffraction seront à l'intérieur d'une enveloppe de largeur  $\lambda/b$  (voir figure B.4). L'énergie est épartie sur tous les ordres, mais c'est à l'ordre zéro (lumière non dispersée) que l'on retrouve la majorité de cette énergie.

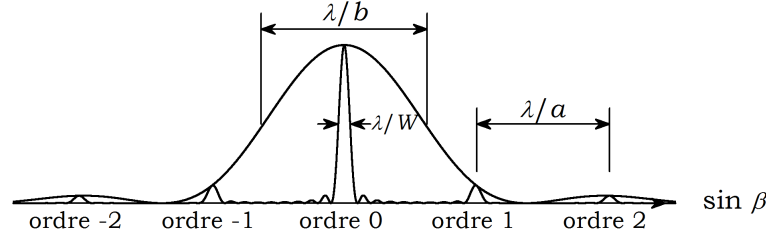


Figure B.4 : Graphique de l'énergie diffractée d'un faisceau monochromatique par un réseau de largeur  $W$  de pas  $a$  et de largeur de trait  $b$ .

## B.7 Blaze

Afin d'obtenir un meilleur usage du réseau, il serait préférable de concentrer l'énergie sur un ordre particulier sauf, évidemment, l'ordre zéro. On façonne alors les traits du réseau de manière à les incliner par rapport à la normale du réseau (figure B.5 ce qui a pour conséquence de décaler l'enveloppe du spectre.

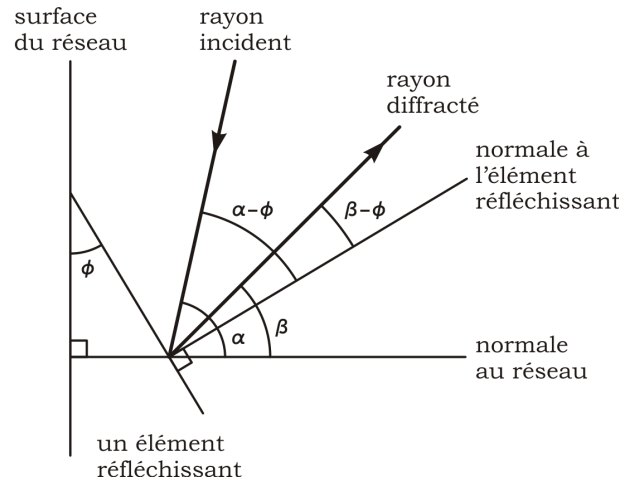


Figure B.5 : Schéma d'un élément réfléchissant d'un réseau blazé.

Soit  $\phi$ , l'angle que font les éléments réfléchissants avec la surface du réseau, dans ces conditions

$$I(\alpha, \beta) = I_0 \frac{\sin^2 \left[ \frac{b\pi}{\lambda} (\sin(\alpha - \phi) + \sin(\beta - \phi)) \right]}{\left[ \frac{b\pi}{\lambda} (\sin(\alpha - \phi) + \sin(\beta - \phi)) \right]^2} \frac{\sin^2 \left[ \frac{W\pi}{\lambda} (\sin \alpha + \sin \beta) \right]}{\sin^2 \left[ \frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha + \sin \beta) \right]} \quad (\text{B.21})$$

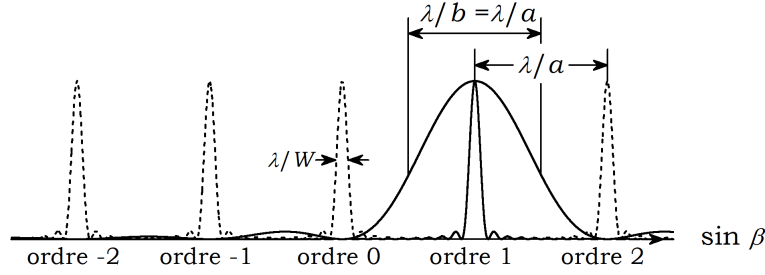


Figure B.6 : Graphique de l'énergie diffractée d'un faisceau monochromatique par un réseau de largeur blazé sur le premier ordre.

Dans le cas où  $b = a \cos \phi$ , c'est-à-dire que le profil des traits du réseau est rectangulaire, et pour une configuration Littrow, si  $\phi$  est choisi de manière appropriée, en assumant que  $\beta - \phi$  et  $\alpha - \phi$  sont petits, l'intensité du spectre pourra être concentrée sur le premier ordre, comme le montre la figure B.6. La figure B.7 présente le schéma d'un tel réseau où  $b = a \cos \phi$ ,  $\alpha = \beta = \phi$ . Les résultats précédents sont vrais pour une seule longueur d'onde appelée la *longueur d'onde de blaze*, l'angle  $\phi$  correspondant à cette longueur d'onde est appelé *angle de blaze*. Cet angle est l'angle que font les éléments réfléchissants avec la surface du réseau mais c'est aussi l'angle d'incident avec lequel on doit travailler pour avoir l'effet de blaze.

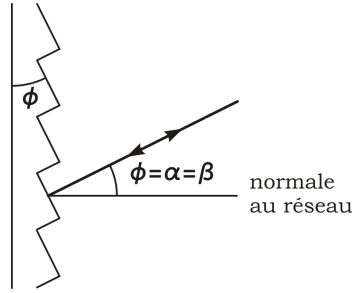


Figure B.7 : Schéma pour l'utilisation d'un réseau en configuration Littrow à la longueur d'onde de blaze.

La relation entre  $\phi$  et  $\lambda$  est obtenue en appliquant l'équation du réseau soit

$$\sin \phi + \sin \phi = \frac{k \lambda_B}{a} \quad (\text{B.22})$$

où

$$2a \sin \phi = k \lambda_B \quad (\text{B.23})$$

avec  $\lambda_B$  la longueur d'onde de blaze à l'ordre  $k$ . Il ressort de cette relation qu'un réseau blazé pour  $\lambda_B$  au premier ordre, le sera aussi pour  $\lambda_B/2$ ,  $\lambda_B/3$ , ... à l'ordre 2, 3, ...

Par convention, dire qu'un réseau est blazé à une longueur d'onde  $\lambda_B$  sous-entend qu'il l'ait pour cette longueur d'onde à l'ordre et que l'on est dans une configuration Littrow.