LP 33 : Phénomènes de polarisation optique
EI : Identification de cristaux en lumière polarisée

Bibliographie

1. Physique, tout-en-un, PC-PC*, *Sanz*
2. Optique, *Houard*

Introduction pédagogique

Cette leçon est placée en PC dans le chapitre sur la propagation des ondes électromagnétiques. Elle se situe à la fin de la séquence, après des cours sur la structure des ondes électromagnétiques, les relations de passages et sur les aspects énergétiques de leur propagation.

On se focalise sur les ondes planes progressives harmoniques(OPPH)

Niveau : PC

Prérequis :

1. Polarisation rectiligne (polariseur, loi de Malus) [PCSI]
2. Ondes électromagnétiques (structure, relation de passage) [PC]

Objectifs :

1. Faire en sorte qu'un élève puisse analyser une lumière afin de deviner sa polarisation
2. Comprendre l'influence des milieux biréfringeants sur la polarisation

Difficultés :

1. Bien comprendre le caractère vectoriel de la lumière
2. Ne pas s'arrêter aux calculs, pas évident au premier abord, afin de comprendre l'intérêt des lames biréfringeante

Exemples de TP Vérification de la loi de Malus, loi de Biot, détermination d'une polarisation

Exemples de TD

Table des matières

1 Les différents types de polarisation **2**

2 Milieux biréfringents **3**

Introduction

On rencontre de manière quotidienne des objets polarisés. Vos écrans d'ordinateur, votre écran de téléphone... Même vos lunettes avec des verres anti-reflets, permettent de s'affranchir d'une partie de la lumière polarisée :

Pour bien comprendre ce phénomène il faut d'abord bien comprendre la caractère vectoriel de la lumière. Vous avez déjà vu que la lumière est une onde électromagnétique et que celle ci possède une structure vectorielle. De plus vous savez aussi qu'une onde électromagnétique correspond à la propagation d'un champ électrique et magnétique couplés et orthogonaux l'un à l'autre. Cette propagation se fait orthogonalement à ces deux champs : on parle d'une onde transverse.

Quelle va être la structure vectorielle de l'onde au cours du temps ? Vous avez vu l'an dernier le cas de la polarisation rectiligne avec la loi de Malus et de Biot, mais c'est un cas particulier de polarisation.

1 Les différents types de polarisation

1.1 Structure du champ E

La polarisation de la lumière va s'expliquer seulement grâce à l'étude du champ électrique $\mathbf{E}$. L'onde étant transverse on peut toujours écrire l'OPPH, si la direction de propagation est selon $\mathbf{e_z}$:

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - kz) \\ E_{0y}\cos(\omega t - kz + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{1}$$

En fonction de la valeur de l'angle φ on va avoir plusieurs cas possibles.

1.2 Polarisation rectiligne

Si $\varphi = 0, \pm\pi$, on peut trouver un système d'axe $\mathbf{u_x}$, $\mathbf{u_y}$ dans lequel on peut écrire :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t - kz) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{2}$$

On voit alors que la lumière garde une direction constante au cours du temps : la polarisation est dite rectiligne !

1.3 Polarisation circulaire

Dans le cas particulier si $E_{0x} = E_{0y}$, donc si les amplitudes sur l'axe x et y sont égales et qu'on à l'angle $\varphi = \pm\pi/2$ alors on a une polarisation dite circulaire droite ou gauche :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - kz) \\ E_{0y}\cos(\omega t - kz \pm \pi/2) \\ 0 \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\omega t - kz) \\ \pm\sin(\omega t - kz) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3}$$

1.4 Polarisation elliptique

Cas le plus général. On a $E_{0x} \neq E_{0y}$ et cela correspond à $\varphi \in]0, \pi[$ et $\varphi \in]\pi, 2\pi[$.

On a donc trois polarisations différentes pour l'onde électrique composant la lumière. Nous allons maintenant nous intéresser à comment faire, à partir de rien, pour trouver la polarisation d'une lumière dont nous ne connaissons rien

2 Milieux biréfringents

Milieu biréfringent : milieu transparent anisotrope dont l'indice optique est différent suivant deux directions orthogonales.

Il existe des milieux biréfringents naturels comme le quartz, mais on peut également les créer à l'aide de contraintes mécaniques comme le ruban adhésif. Une OPPH traversant un milieu biréfringent voit son état de polarisation changer car les composantes du champ électrique suivant l'axe lent (axe de plus grand indice optique) et l'axe rapide (axe de plus faible indice optique) ont des vitesses de phases différentes : $v_\phi = c/n$. Les axes lent et rapide sont également nommés lignes neutres du matériau.

2.1 Action de la lame : analyse du déphasage

On va étudier le déphasage induit par la lame biréfringente.

Avant la lame, on a le champ électrique suivant

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - k_0 z) \\ E_{0y}\cos(\omega t - k_0 z + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

avec $k_0 = 2\pi\ \lambda 0$: on a donc pris une onde harmonique.

Dans la lame :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - n_x k_0 z) \\ E_{0y}\cos(\omega t - n_y k_0 z + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

A la sorite de la lame (d'épaisseur e) :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - n_x k_0 e) \\ E_{0y}\cos(\omega t - n_y k_0 e + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

Après la lame :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - k_0(z-e) - n_x k_0 e) \\ E_{0y}\cos(\omega t - k_0(z-e) - n_y k_0 e + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{7}$$

On a donc introduit entre la composante selon Oy et selon Ox un déphasage :

$$\Delta\varphi = n_x k_0 e - n_y k_0 e = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_x - n_y)e \tag{8}$$

ce qui donne une différence de marche :

$$\delta = (n_x - n_y)e \tag{9}$$

En changeant l'origine des temps on peut se ramener a un champ électrique ou tout le déphasage est dans le terme selon Oy :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - k_0 z) \\ E_{0y}\cos(\omega t - n_y k_0 z + \Delta\varphi + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{10}$$

2.2 Lame demi-onde

Matériau anisotrope fait de telle façon que $\Delta\varphi = \pi$. On obtient donc une différence de marche entre les deux vibrations de $\lambda_0/2$: c'est donc une lame demi-onde. L'épaisseur doit vérifier :

$$(n_x - n_y)e = \frac{\lambda_0}{2} \tag{11}$$

On remarque qu'une lame est demi-onde seulement pour une longueur d'onde ! !

Ordre de grandeur : dans le visible les longueurs d'ondes sont de l'ordre de 500 nm et les différences d'indices de l'ordre de 10^{-2}. On a donc une épaisseur de lame de l'odre du centième de millimètre !

Action d'une lame demi onde sur une onde polarisée elliptiquement :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - k_0 z) \\ E_{0y}\cos(\omega t - k_0 z + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - k_0 z) \\ E_{0y}\cos(\omega t - k_0 z + \pi + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}\cos(\omega t - k_0 z) \\ -E_{0y}\cos(\omega t - k_0 z + \varphi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Onde toujours polarisée elliptiquement mais sens de rotation différent !

2.3 Lame quart d'onde

Lame taillée dans un matériau anisotrope de telle sorte que l'on ait à sa sortie un déphasage de $\Delta\varphi = \pi/2$. On obtient donc une différence de marche entre le signal lent et le signal rapide de :

$$\delta = \frac{\lambda_0}{4}, \tag{12}$$

d'où l'appellation lame quart d'onde !

Encore une fois on remarque qu'une lame est quart d'onde que pour une longueur d'onde donnée ! !

On trouve que le même ordre de grandeur pour l'épaisseur des lames quart d'onde que pour les lames demi-onde.

Action d'une lame quart d'onde sur une onde polarisée circulairement :

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t - k_0 z) \\ E_0\sin(\omega t - k_0 z) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t - k_0 z) \\ E_0\sin(\omega t - k_0 z + \pi/2) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t - k_0 z) \\ E_0\cos(\omega t - k_0 z) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Apres une lame quart d'onde une onde polarisée circulairement devient polarisée rectilignement !

2.4 Analyse d'une lumière quelconque

2.5 Application : reconnaissance de cristaux

Conclusion

La polarisation de la lumière étant un phénomène très présent dans notre vie au quotidien, il est très intéressant de regarder de plus près ce phénomène ainsi que les informations que l'on peut en tirer. L'analyse d'une lumière polarisée peut avoir de grands intérêts (cinéma en 3D par exemple) et peut permettre d'étudier des cristaux afin de bien comprendre leur compositions.

Questions/Remarques

- Bien sur l'intro peda, d'eviter les calculs (demi onde, quart d'onde)
- Plan correct
- Trop de temps sur la première partie, maladroit (j'ai oublie la partie 1/A)
- Rectiligne : 0, π, 2π
- Définir gauche droite par EN REGARDANT LA LUMIERE VENIR VERS NOUS
- Pour elliptique ecrire plus simple
- Code python avant pour montrer qu'on a les trois cas, juste montrer le calcul pour circulaire et tous les autres cas avec le python.
- Image ordinaire : petit cafouillis de dire que ca serait l'image sans le cristaux
- On peut choisir nx > ny et ainsi définir axe rapide et axe lent plutôt que de parler d'image ordinaire et extraordinaire. Poser nx > ny donc on sait qui est en retard par rapport à qui et mieux comprendre. Anisotropie : lumiere qui ne se deplace pas pareil selon les axes
- Donne une vraie définition de ligne neutre
- Axe optique : axe rapide, contenu dans le plan des faces des lames
- C'est bien de dire $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$, réussir a se soustraire du φ proprement
- Mettre des indices sur les 3 champs dans le calcul de la biréfringence
- Symétrie par rapport à l'axe optique
- Expérience : rien de qualitatif, avoir un schéma propre (slide ou tableau), noter l'angle obtenu, on détermine
- Avec l'élément imposé : revenir à la mesure du Δn d'un cristal connu, expérience plus intéressante, quantitative et directement en lien avec l'élément imposé
- AUTRE POSSIBILITÉ : angle de brewster, et mesure de l'axe du polariseur
- Définir axe lent, rapide, ordinaire, extraordinaire
- Utiliser un photorécepteur (attention faut s'y connaître un peu)