

## PRÉSENTATION DE L'EFFET ÉLECTRO-OPTIQUE

J.P. HUIGNARD

THOMSON-CSF, L.C.R., Domaine de Corbeville, F-91404 Orsay Cedex,  
France

Notes rédigées avec l'aide de J.P. Huignard par Ph. Lalanne,  
Institut d'Optique (Unité Associé au CNRS), BP. 147, F-91403  
Orsay Cedex, France

Ce cours est une présentation de l'effet électro-optique et de ses applications à la modulation haute fréquence de la phase et de l'amplitude des ondes lumineuses.

**Susceptibilité diélectrique non linéaire**

Si un milieu diélectrique est soumis à un champ exciteur élevé, champ électrique délivré par un générateur dans le cas des effets électro-optiques par exemple, la réponse du milieu inclut une contribution non linéaire de la polarisation, d'expression générale aux ordres 2 et 3 :

$$P_{NL} = \chi^{(2)} EE + \chi^{(3)} EEE \quad (1)$$

où  $\chi^{(2)}$  et  $\chi^{(3)}$  sont les tenseurs de susceptibilité diélectrique non linéaires d'ordres 2 et 3. Le champ noté E est la superposition de tous les champs présents dans le cristal. Pour ce qui nous concerne plus particulièrement, E est la somme d'un champ électrique  $E_0$  et d'un

champ optique  $\vec{E}$ . Dans le développement de la polarisation non linéaire, il apparaît deux termes importants :

$\chi^{(2)} E_0 E$  qui donne lieu à l'effet électro-optique linéaire ou effet POCKELS

$\chi^{(3)} E_0^2 E$  qui donne lieu à un effet quadratique proportionnel au carré du champ électrique appelé effet KERR. Il est tout particulièrement présent dans les matériaux centrosymétriques pour lesquels il n'y a pas d'effets linéaires.

Physiquement, l'application d'un champ électrique intense se traduit par des variations d'indice. Ces dernières peuvent être reliées aux tenseurs  $\chi^{(2)}$  et  $\chi^{(3)}$  et sont en général faibles, de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  alors que l'indice des matériaux est de l'ordre de 1,5 à 2,5. Cette perturbation de l'indice du matériau est exploitée dans les applications grâce à l'apparition ou la modification d'une biréfringence qui permet de moduler l'amplitude et la phase de l'onde optique.

**Tenseur des coefficients électro-optiques linéaires.**

Avant d'aborder dans la partie suivante les effets électro-optiques linéaires dans le cas particulier du KDP (modulation d'amplitude et de phase), regardons de manière générale comment se traduit mathématiquement l'application d'un champ électrique dans un matériau à effet électro-optique linéaire.

Soient x,y,z les axes diélectriques principaux d'un cristal biréfringent. L'ellipsoïde des indices a la forme suivante :

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (2)$$

où  $n_\alpha$  représente l'indice du cristal selon les directions principales (x,y,z).

En présence d'un champ  $\vec{E}_0$  de direction quelconque, on admet que les perturbations apportées sont faibles et sont fonction linéaire des composantes du champ électrique. De

façon générale, l'équation (2) devient :

$$\left(\frac{1}{n_x^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_y^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_z^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3\right)z^2 + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 zx + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1 \quad (3)$$

L'hypothèse de linéarité se traduit par l'équation (4)

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j \quad (4)$$

qui exprime une relation tensorielle entre les variations d'indices et les composantes du champ électrique. Le tenseur des  $r_{ij}$  qui comporte 6x3 coefficients électro-optiques caractérise complètement les propriétés du matériau envisagé. En pratique, les coefficients non nuls sont faibles, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de  $\text{pmV}^{-1}$  (voir annexe 1), ce qui implique l'application de champs intenses de l'ordre de  $10^7 \text{Vm}^{-1}$ , pour avoir des variations d'indice de  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$ .

### Modulateur électro-optique

#### 1) Présentation : cas du KDP.

Le monocristal de potassium dihydrogéné  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  est un cristal à bonne tenue mécanique et transparent dans le visible qui est disponible en grandes dimensions sous forme monocristalline. C'est un cristal uniaxe dont le tenseur des coefficients électro-optiques prend la forme simple suivante :

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{vmatrix}$$

Lorsqu'on applique un champ électrique parallèlement à l'axe optique, au premier ordre, il apparaît une biréfringence induite qui amène aux valeurs d'indices suivantes :

$$\begin{cases} n_{x'} = n_0 - n_0^3 r_{63} \frac{E}{2} \\ n_{y'} = n_0 + n_0^3 r_{63} \frac{E}{2} \\ n_z = n_e \end{cases}$$

où  $n_e$  et  $n_0$  sont les indices extraordinaire et ordinaire du KDP non polarisé.

Cette biréfringence induite sous champ appliqué peut être utilisée pour moduler, par polariseur interposé, l'intensité ou la phase d'un faisceau laser incident. Deux configurations sont généralement retenues : la configuration longitudinale (resp. transverse) pour laquelle le champ est appliqué parallèlement (resp. perpendiculairement) à la direction de propagation du faisceau, le champ électrique étant toujours porté par l'axe optique du cristal.

#### 2) Modulateur électro-optique longitudinal

La figure 1 montre la configuration expérimentale. Une onde plane incidente est décomposée suivant les deux polarisations  $x'$  et  $y'$ . Le retard optique introduit par le champ  $E$  à la traversée d'un cristal de longueur  $L$  est proportionnelle à la différence des indices  $n_{x'}$  et  $n_{y'}$  et vaut :

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} E.L \quad (5)$$

Entre polariseur et analyseur croisés, l'équation (5) se traduit par une modulation d'intensité donnée par  $I_T = I_0 \sin^2 \frac{\Gamma}{2}$ . On note généralement  $V_\pi$  la tension qu'il faut appliquer au

crystal pour obtenir une lame demi-onde ( $\Gamma = \pi$ ). C'est une caractéristique intrinsèque du matériau pour toute longueur d'onde. Notamment, elle est indépendante de la géométrie :

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2 n_0^3 r_{63}} \quad (6)$$

En pratique, cette tension est de l'ordre de 1 à 10 kV. Il faut noter que le temps d'établissement des propriétés électro-optiques du cristal ne dépend que du circuit de commande : en optique intégrée, des bandes passantes de 10 à 20 GHz peuvent être obtenues en laboratoire.

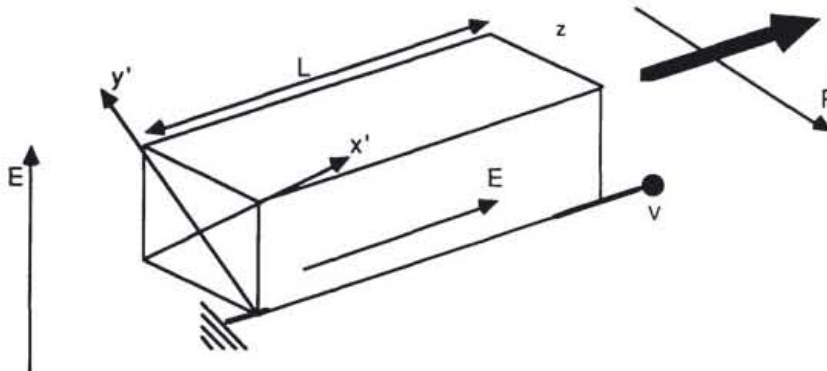


Figure 1. Configuration longitudinale du modulateur à KDP.

### 3) Modulateur électro-optique transverse

C'est la configuration la plus utilisée pour laquelle il existe déjà une biréfringence naturelle. Le retard optique prend alors la forme suivante :

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \left[ n_e - n_o - \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} E \right]$$

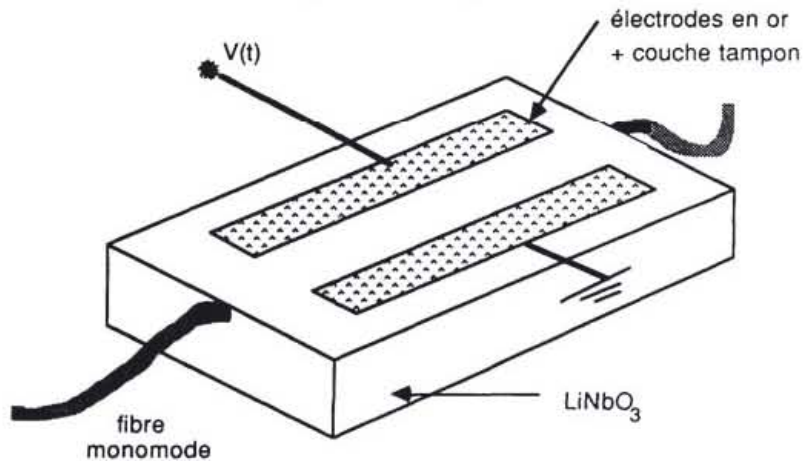


Figure 2. Modulateur intégré sur LiNbO<sub>3</sub>

La biréfringence naturelle peut être compensée en choisissant une longueur L de cristal telle

que  $\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L (n_e - n_o)$  soit un multiple de  $2\pi$ . L'intensité transmise s'écrit :

$$I_T = I_0 \sin^2 \frac{\pi}{4} \frac{L}{d} \frac{V}{V_\pi} \quad (7)$$

où  $V = E \cdot d$  dans cette configuration transverse. Cette dernière fait intervenir dans la tension d'ouverture un facteur de forme  $\frac{d}{L}$  supplémentaire par rapport à la configuration précédente.

L'optique guidée permet dans le cas transverse de réaliser des facteurs de forme favorables permettant d'atteindre de faibles tensions et puissance de commande ( $< 10$  volts). C'est la raison pour laquelle la configuration transverse est la plus utilisée, la configuration longitudinale étant bien adaptée à la mesure des coefficients électro-optiques.

Le KDP n'est qu'un cas d'école particulièrement simple. En pratique, le niobate de lithium,  $\text{LiNbO}_3$ , joue un rôle très important, en particulier pour la réalisation de circuits optiques intégrés actifs. Le guide d'onde, obtenu par diffusion métallique (titane) dans le substrat électro-optique, permet des bandes passantes élevées (qq GHz). La figure 2 montre le principe d'un modulateur intégré. Les deux électrodes en or sont isolées du substrat par l'intermédiaire d'une couche tampon en  $\text{SiO}_2$ ; le modulateur est utilisé couplé à des fibres optiques monomodes à maintien de polarisation.

#### 4) Modulation de phase

Pour le fonctionnement en modulateur de phase, la polarisation incidente est rendue parallèle à l'une des directions principales du cristal électro-optique. Dans ces conditions, le champ appliqué module linéairement la phase de l'onde traversant le cristal. On obtient en sortie du cristal un spectre d'ondes comportant les composantes spectrales  $\omega_0 \pm n \Omega$ ,  $\omega_0$  étant la fréquence du laser et  $\Omega$  la fréquence de modulation. L'amplitude de l'onde à fréquence

$\omega_0 \pm n \Omega$  est proportionnelle à la fonction de Bessel d'ordre  $n$   $J_n \left( \frac{2\pi}{\lambda} \times L \Delta n \right)$ . Après

optimisation de la profondeur de modulation, l'intensité de la bande latérale à fréquence  $\omega \pm \Omega$  est 33% de l'intensité incidente du faisceau.

#### 5) Limitation de la bande passante par le temps de transit de l'onde optique

Pour des fonctionnements à haute fréquence, le champ électrique appliqué peut varier de façon significative pendant le temps  $\tau = \frac{nL}{c}$  mis par l'onde optique pour traverser le cristal. Le retard optique de l'équation (5) doit être corrigé et est donné par

$$\Gamma(t) = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} \int_t^{t+\tau} E(t') \frac{c}{n} dt' \quad (8)$$

Le déphasage introduit n'est plus directement proportionnel à  $E(t)$ . En pratique, la bande passante est ainsi limitée à quelques GHz. Cette limitation peut être en principe levée pour les modulateurs à onde progressive. Dans ces derniers, l'onde hyperfréquence et l'onde optique progressent en phase à l'intérieur du cristal. L'onde optique va donc toujours "voir" la même valeur du champ électrique. L'accord de phase est réalisé quand les vitesses de phase des deux ondes sont identiques. Les réalisations se tournent actuellement vers l'arséniure de gallium pour lequel les indices optique et hyperfréquence sont sensiblement les mêmes.

### Applications

#### 1) Les céramiques électro-optiques PLZT

Les céramiques PLZT présentent un effet Kerr important pour un matériau solide ainsi qu'une grande souplesse d'utilisation car la biréfringence induite par application du champ électrique peut être ajustée par la composition du polycristal:  $\text{Pb}_{1-x} \text{La}_x \text{Zr}_{0,65} \text{Ti}_{0,35}$ .

Ces composés sont tout à fait adaptés aux longueurs d'onde laser classiques puisqu'ils sont transparents de 0,4 à 5  $\mu\text{m}$ . En outre, leur tension d'ouverture est relativement faible, de l'ordre de 100 à 200 volts pour une bande passante de quelques MHz. Ils trouvent des

applications intéressantes comme le modulateur ligne qui comprend entre 10 et 100 modulateurs adressables individuellement ou les obturateurs de grandes dimensions (10 à 15 cm de diamètre).

## 2) Principe et structure d'un déviateur électro-optique

La figure 3 illustre le principe d'un déviateur électro-optique. En cascadeant  $n$  fois ce montage à 2 états, il est possible d'obtenir  $2^n$  points de focalisation. En pratique, il est délicat de cascade plus de trois étages. Les avantages sont la précision et la rapidité d'adressage, la bonne efficacité optique et la bonne uniformité des points définis.

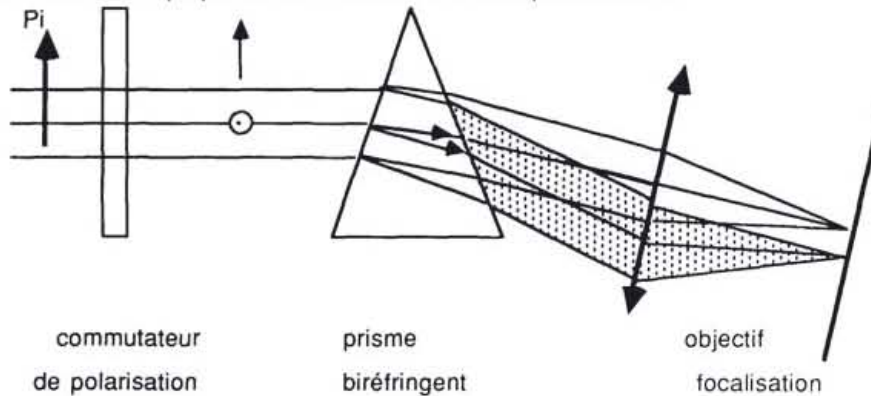


Figure 3. Principe d'un déviateur électro-optique.

Cependant la puissance de commande reste élevée et le réglage des nombreux cristaux biréfringents est délicat. En comparaison des acousto-optiques, les temps d'accès sont inférieurs mais le nombre de points résolus est plus faible (inférieur à 100).

## Conclusion

Les matériaux électro-optiques offrent en plus des étapes technologiques déjà franchies de réelles perspectives de recherche. Le KTP est un matériau d'avenir qui possède des qualités électro-optiques supérieures à celles du niobate de lithium tout en ne subissant pas de dommage par effet photoréfractif. En outre, la technologie des semi-conducteurs permet d'envisager des applications en optique intégrée, que ce soit de la modulation large bande (Mach Zender) ou de la commutation spatiale ou temporelle de faisceaux optiques.

**Annexe 1****Matériaux électro-optiques**

| matériau                           | $r_{ij}$ en pmV <sup>-1</sup> | $\epsilon$ |
|------------------------------------|-------------------------------|------------|
| KDP                                | $r_{63} = 10$                 |            |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>    | $r_{63} = 10$                 | 45         |
| LiNbO <sub>3</sub>                 | $r_{33} = 30,8$               | 50         |
| LiTaO <sub>3</sub>                 | $r_{33} = 30,3$               | 50         |
| BaTiO <sub>3</sub>                 | $r_{42} = 10^3$               | 2000       |
| KNbO <sub>3</sub>                  | $r_{42} = 380$                | 300        |
| Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub> | $r_{41} = 5$                  | 40         |
| Bi <sub>12</sub> TiO <sub>20</sub> | $r_{41} = 7$                  | 50         |
| KTP                                | $r_{63} = 50$                 | 40         |

**Semi-conducteurs électro-optiques**

|                     |                 |    |
|---------------------|-----------------|----|
| CdS                 | $r_{51} = 3,7$  | 10 |
| GaP                 | $r_{41} = 1$    | 12 |
| GaAs                | $r_{41} = 1,35$ | 12 |
| InP                 | $r_{41} = 1,34$ | 10 |
| CdTe (10,6 $\mu$ m) | $r_{41} = 7$    | 7  |
| ZnS                 | $r_{41} = 1,2$  | 12 |

**Organiques**

|           |                     |   |
|-----------|---------------------|---|
| PMMA dopé | $r_{33} = 40 - 100$ | 3 |
|-----------|---------------------|---|