Realisation et caracterisation d'un interferometre adaptatif a $1.55 \ \mu M$

Arnaud Peigné^{1, 3}, Umberto Bortolozzo², Stefania Residori², Stéphanie Molin³, Daniel Dolfi³, et Jean-Pierre Huignard⁴

 ¹ Thales Underwater Systems, 525 route des Dolines, Sophia-Antipolis, France
² Institut Non Linéaire de Nice, Université de Nice-Sophia Antipolis, CNRS, 1361 route des Lucioles, 06560 Valbonne, France
³ Thales Research and Technology France, 1 avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France
⁴ Jphopto, 20 rue de Campo Formio, 75013 Paris, France

arnaud.peigne@thalesgroup.com

Résumé

Nous proposons le principe et l'étude d'un interféromètre adaptatif (insensible aux perturbations basses fréquences) permettant une mesure de petits déphasages dans un environnement bruité. Ce type de dispositif est particulièrement adapté à la réalisation de capteurs à fibres optiques ultrasensibles. La démodulation de phase s'appuie sur le principe du mélange à deux ondes dans une valve optique à cristaux liquides. La présentation portera sur la description et la caractérisation de l'interféromètre opérant dans le proche infrarouge. En particulier, nous nous intéresserons ici à ses performances en termes de résolution spatiale et de bande passante.

MOTS-CLEFS : interférométrie adaptative, holographie, capteurs à fibres optiques

1. INTRODUCTION

De nombreuses applications requièrent la mesure de très faibles modulations de phase dans un environnement bruité (par exemple par la température ou par la pression statique). L'interférométrie adaptive permet cette mesure en filtrant intrinsèquement les perturbations lentes de l'environnement. L'interféromètre est réalisé en faisant interférer une onde de référence et une onde « signal », portant une perturbation de phase, dans un milieu non-linéaire. Le processus mis en jeu (mélange à deux ondes) induit un hologramme de phase sur lequel le champ incident est diffracté. Parmi les milieux les plus étudiés, on peut noter les cristaux photo-réfractifs [1] ainsi que les structures à puits quantiques [2].

Dans la présente étude, le milieu non-linéaire utilisé est une valve optique à cristaux liquides. Il s'agit d'un modulateur spatial de lumière adressé optiquement [3]. Il permet de transcrire le réseau d'intensité issu de la recombinaison des ondes de l'interféromètre en réseau de phase dans le cristal liquide, profitant ainsi de la très grande variation d'indice permise par ce dernier. Les fronts d'ondes des ordres diffractés sont donc adaptés aux fluctuations de phase lentes qui sont filtrées lors de la démodulation. De plus, l'interféromètre présente une fonction de transfert intrinsèquement linéaire. Dans la suite, on s'intéresse dans un premier temps au principe de fonctionnement de la valve optique à cristaux liquides puis on présente la caractérisation d'un interféromètre adaptatif à 1.55 µm en termes de bande-passante et de résolution spatiale.

2. DESCRIPTION DE LA CELLULE HOLOGRAPHIQUE

La valve optique utilisée (Fig. 1.a) est constituée d'une fine couche de cristal liquide encapsulée entre un photoconducteur et une fenêtre en verre. Deux électrodes transparentes en ITO permettent l'application d'une tension de polarisation V_{biais} entre la surface d'entrée du photoconducteur et la surface interne de la fenêtre en verre. Le photoconducteur qui a été retenu pour opérer à 1,55 µm est l'arséniure de gallium semi-isolant (AsGa-SI). Lorsqu'un champ optique E_{in} d'intensité $I_{in} \propto |E_{in}|^2$ est incident sur la valve optique, la variation de conductivité électrique du photoconducteur crée une chute de tension sur le cristal liquide. La réorientation des molécules de cristal liquide, fortement biréfringente, induit alors une modification de l'indice de réfraction. Ce dernier prend la forme $n = n_{obs} + n_2 I_{in}$ où n_{obs} est l'indice de réfraction sous champ optique nul, et n_2 est l'indice de réfraction non-linéaire dépendant des propriétés de la valve optique. La caractéristique de la valve optique utilisée (Fig. 1.b) est obtenue en la plaçant entre polariseur et analyseur croisés et en mesurant le déphasage d'une onde de lecture à 543 nm en fonction de l'intensité du champ optique incident. Le déphasage mesuré a été converti en biréfringence équivalente du cristal liquide. A partir de la courbe de dispersion du cristal liquide, on pourrait obtenir l'indice de réfraction non-linéaire n_2 à 1,55 µm.



Fig. 1: (a) Valve optique à cristaux liquides constituée d'une couche de cristaux liquides E48 (Merck) encapsulée entre un substrat photoconducteur d'AsGa-SI et une fenêtre en verre. (b) Caractéristique $\Delta n = f(I_{in})$ de la valve optique.

3. INTERFEROMETRE ADAPTATIF PROCHE INFRA-ROUGE

Description du montage

L'interféromètre adaptatif (Fig. 2) a été réalisé en configuration Mach-Zehnder. Il est composé d'un coupleur à fibre optique deux voies 50/50 formant les bras « référence » et « signal » et injecté par un laser à 1.55 μ m. L'onde de référence et l'onde « signal », portant une modulation de phase, sont alors recombinées en espace libre sur la valve optique. En sélectionnant un ordre de diffraction, et pour un point de fonctionnement fixé de la valve optique (V_{biais} et I_{in}), il est possible de mesurer la résolution spatiale et la bande-passante.



Fig. 2 : Interféromètre adaptatif en configuration Mach-Zehnder CP : contrôleur de polarisation ; LS : lame séparatrice ; LCLV : valve optique à cristaux liquides ; TIA : amplificateur de courant

Résolution spatiale

La théorie de la diffraction prévoit que l'efficacité de diffraction d'un réseau de phase est inversement proportionnelle au pas du réseau inscrit dans le cristal liquide. Le plus petit pas du réseau qu'il est possible d'obtenir est donné par la résolution spatiale des cristaux liquides, et conditionne la compacité de l'interféromètre. La limite théorique (pas minimal) est donnée par la longueur de cohérence électrique du cristal liquide définie par la relation :

$$l_{coh} = \left(\frac{K}{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon}\right)^{1/2} \frac{d}{V_{eff}} \tag{1}$$

Où $\Delta \varepsilon \approx 10$ est l'anisotropie diélectrique du cristal liquide, $K = 11 \, pN$ sa constante élastique, $d = 25 \, \mu m$ son épaisseur et V_{eff} la tension effective qui lui est appliquée. Pour les cristaux liquides utilisés, nous avons estimé l_{coh} à environ 6 μm . On présente (Fig. 3.a) l'efficacité de diffraction η sur l'ordre -1 (rapport entre l'intensité dans l'ordre -1 et l'intensité optique incidente sur l'onde de référence) en fonction du pas du réseau, estimé à partir de la répartition gaussienne de l'intensité (encart Fig. 3.a). On constate que l'efficacité maximale $\eta_m = 0.12$ est atteinte pour un pas de l'ordre de 700 µm. Cet écart par rapport à la limite imposée par la longueur de cohérence du cristal liquide est dû à la diffusion des charges dans l'épaisseur du photoconducteur (encore trop importante dans ce premier essai), ce qui réduit le contraste du réseau d'indice. En effet, quand l'épaisseur du photoconducteur est importante par rapport à la longueur de diffusion des porteurs, les mécanismes de transports de charges sont influencés par la présence d'une composante transverse du champ électrique ce qui augmente la longueur de diffusion effective [4]. Dans ces conditions, la résolution spatiale de la valve optique est imposée par le photoconducteur.



Fig. 3 : (a) Efficacité de diffraction en fonction du pas du réseau d'intensité sur le photoconducteur ; (b) bande passante de l'interféromètre

Bande-passante

Le réseau de phase inscrit dans le cristal liquide s'adapte aux perturbations plus lentes que son temps de réponse. Cette condition détermine la bande-passante de l'interféromètre. La fréquence de coupure à -3 dB est définie par :

$$f_c = \frac{\pi}{2} \frac{K}{\gamma d^2} \left[\left(\frac{V_{eff}}{V_s} \right)^2 - 1 \right]$$
(2)

Où $V_s \approx 1.1 V$ est la tension de seuil du cristal liquide, et $\gamma = 0.02 Pa.s$ sa viscosité rotationnelle. On a alors $f_c < 10 Hz$ dans la plage de tension effective du cristal liquide ($V_{eff} < 2 V$). On mesure (Fig. 3.b) l'amplitude de modulation du signal diffracté en fonction de la fréquence de la perturbation de phase sur le bras « signal » de l'interféromètre. On obtient une fréquence de coupure de 8.5 Hz ce qui est compatible avec les valeurs théoriques.

CONCLUSION

Nous avons démontré qu'il est possible de réaliser un interféromètre opérant à 1.55 µm insensible aux variations de phase lentes. Ce type de dispositif est particulièrement adapté à la mesure de déphasages induits dans une fibre optique. La résolution spatiale du dispositif ainsi que sa bande-passante ont été étudiées. La mesure de la sensibilité de l'interféromètre (modulation d'intensité du signal diffracté en fonction du déphasage) constituera la suite des travaux présentés.

Références

[1] Kamshilin, A. A., Romashko, R. V. and Kulchin, Y. N., "Adaptive interferometry with photorefractive crystal," J. Appl. Phys. 105, 031101 (2009)

[2] Sun, H., Nolte, D. D., Hyland, J. and Harmon, E., "Dynamic holography in quantum well cavities," Proc. SPIE 8619, 86190E (2013)

[3] Bortolozzo, U., Residori, S. and Huignard, J. P., "Adaptive Holography in Liquid Crystal Light-Valves," Materials 5, 1546-1559 (2012)

[4] Wang, L. and Moddel, G., "Resolution limits from charge transport in optically addressed spatial light modulators", J. Appl. Phys. 78, 6923 (1995)