

MODULATEUR SPATIAL À ADRESSAGE OPTIQUE : STRUCTURE BSO-CRISTAL LIQUIDE ET APPLICATIONS

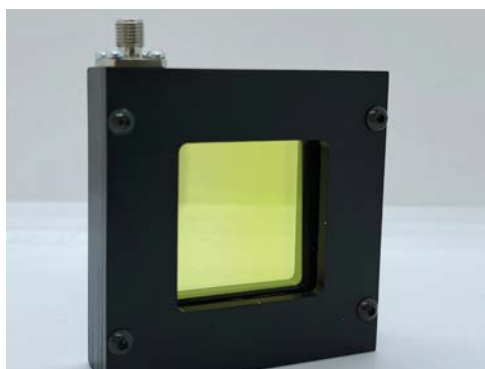
Jean-Pierre HUIGNARD^{1,2,*}, Brigitte LOISEAUX¹

¹ THALES –TRT Palaiseau (Retraités), 1 av Augustin Fresnel 91120 Palaiseau

² Institut Langevin ESPCI-Université PSL, 1 rue Jussieu 75005 Paris

³ HOASYS - Stefania Residori , Umberto Bortolozzo - 120 Route des Macarons 06560 Valbonne

*jphuignard@free.fr



Les modulateurs spatiaux sont des composants importants pour la conception et réalisation de systèmes photoniques de hautes performances. On présente la technologie OASLM initiée par THALES-TRT et la diversité de ses applications au traitement de faisceaux lasers.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613624>

Retour sur l'histoire spatial light modulator...

Dans les années 1965 - 1970 l'optique de Fourier avait déjà fait l'objet en France de recherches et de développements importants et reconnus au niveau international dans plusieurs laboratoires par exemple, l'Institut d'Optique, les Laboratoires d'Optique Université Paris et de Besançon, le LCR Laboratoire Central de Recherches de la compagnie CSF spécialiste reconnu des Radars et traitement du signal RF (maintenant THALES-TRT). L'objectif à cette époque était d'exploiter les propriétés connues et déjà enseignées des ondes optiques cohérentes et de l'holographie pour réaliser des fonctions

de traitement en parallèle de l'information telles que la transformée de Fourier ou plus complexe, la fonction de corrélation entre deux images. Une époque où les capacités potentielles du calcul optique analogique et parallèle pouvaient apparaître comme nettement supérieures au traitement numérique. De très belles expériences et démonstrateurs de principe ont été réalisés, on pense par exemple aux démonstrations à CSF - LCR de corrélateurs optiques pour la reconnaissance de formes et le premier traitement optique du radar à vision latérale. Le point faible restait bien entendu l'entrée des données dans ces dispositifs: cette fonction était réalisée par une diapositive photographique ou

un film reproduisant le signal à traiter. C'est ce besoin d'une "diapositive programmable" qui a constitué notre motivation au LCR - Thomson-CSF et chercher à innover : réaliser un composant optoélectronique capable de convertir au moins à cadence vidéo un signal $S(t)$ en une modulation spatiale contrôlée de l'amplitude et/ou de la phase d'une onde laser cohérente visible ou proche IR - composant aujourd'hui connu sous le nom bien établi de EASLM - electrically addressed ou OASLM - optically addressed spatial light modulator, configuration retenue et réalisée par le LCR. On note que dans les premières publications le composant OASLM était souvent désigné sous le nom : LCLV pour liquid

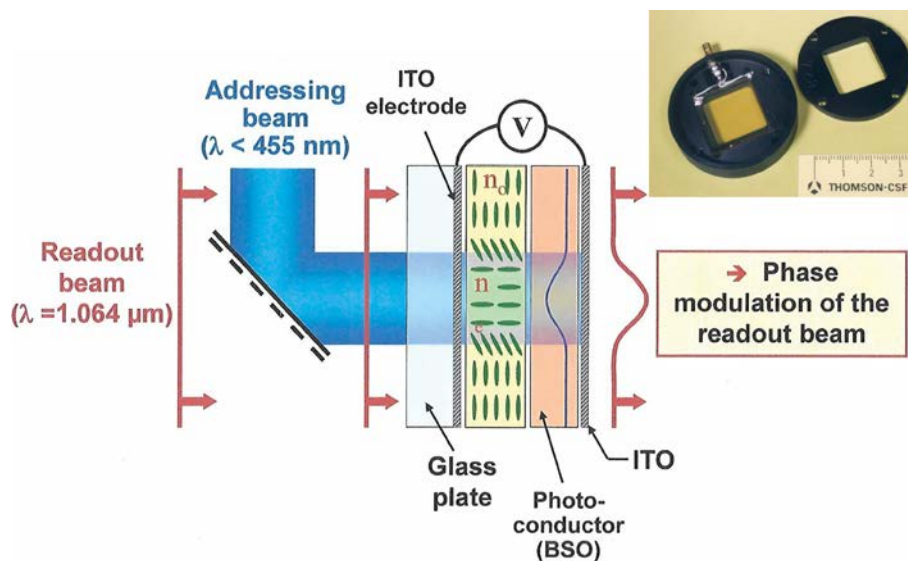


Figure 1. Structure du composant OASLM : Cristal Photoconducteur-Cristal liquide Modulation spatiale de la phase 1.06 μm

crystal light valve. Bien au-delà du traitement optique ces composants à base de matériau cristal liquide ouvraient la voie aux applications grand public très importantes telles que les écrans plats TV et projecteurs TV de haute luminance qui sont des composants à adressage électrique matriciel.

La structure OASLM du LCR et la grande diversité de ses applications en Photonique

Elle est issue des travaux du laboratoire sur l'holographie dynamique dans les cristaux photoréfractifs qui ont conduit à identifier un cristal aux propriétés remarquables le $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ou son équivalent $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$: création dans ces cristaux à la fois Photoconducteurs et Electro-Optiques-EO – d'un champ de charge d'espace qui module l'indice du cristal par effet photoréfractif et dans ces conditions génère un hologramme dynamique de volume issu de l'interférence de deux ondes Référence et Signal. Des performances remarquables, un temps de réponse de quelques ms sous

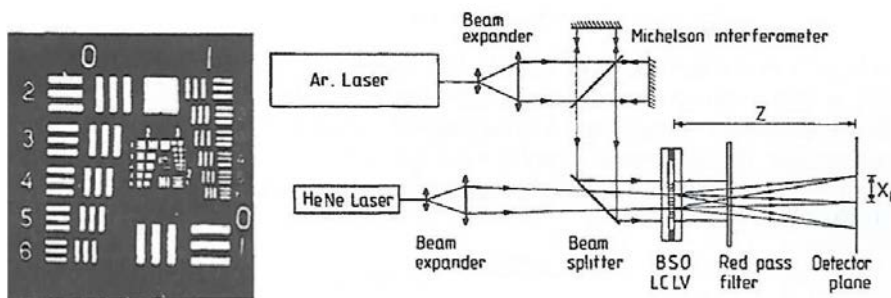
éclairage de quelques $10\text{mW}/\text{cm}^2$ dans le vert. L'idée de l'OASLM-LCR consistera donc à associer un très bon cristal photoconducteur comme le BSO au meilleur milieu EO : une couche mince de cristal liquide nématique dans la mesure où l'on recherche des temps de réponse du composant de l'ordre de 1 - 20 ms. Le schéma retenu du OASLM sur la figure 1 intègre un cristal BSO d'épaisseur 1 mm à un film orienté de cristal liquide nématique CL d'épaisseur de l'ordre de $10\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$. Sous éclairage d'une image projetée sur le BSO dans le domaine spectral bleu-vert, la tension appliquée sur l'électrode transparente ITO du photoconducteur est reportée sur le cristal liquide en phase nématique

qui selon son orientation modifie la phase (mode parallèle CL) ou l'amplitude (mode twisté CL) de l'onde plane cohérente traversant le composant. Ce premier composant réalisé en collaboration avec le laboratoire Cristal Liquide du LCR va déjà présenter d'excellentes caractéristiques. C'est Philippe Aubourg, doctorant au laboratoire, qui dans le cadre de sa thèse effectuera une analyse du composant incluant modélisations, schéma équivalent, et expériences très complètes de caractérisations EO et sera l'auteur de la publication originale sur le sujet OASLM-BSO CL [1]. En relation avec les applications visées au traitement temps réel de l'information, l'adressage optique du photoconducteur avait pu être obtenu par projection de l'image d'un tube cathodique et puis quelques années plus tard par un mini projecteur TV cristal liquide ou MEMS qui permettait un système compact et fiable. Les principales caractéristiques du composant OASLM étaient les suivantes : dimension typique BSO $20\times 20\times 1$ mm – Cristal liquide E7- $10\mu\text{m}$ - Δn : 0.2 - Temps de réponse 10 ms - Résolution spatiale $20\mu\text{m}$ – Faible tension de commande < 50V - 200Hz – Tenue au flux IR de l'ordre de $0.5\text{ J}/\text{cm}^2$ – Excursion de phase typique de $0-2\pi$ ou plus selon épaisseur et choix du CL.

Les avantages importants de cette structure étaient:

- Fonctionnement en transmission dans IR et proche IR
- Grande surface BSO par exemple : 4×4 cm

Figure 2. Mesure de la MTF du composant BSO-CL issu de la référence 1 - Image incohérente projetée par OASLM.



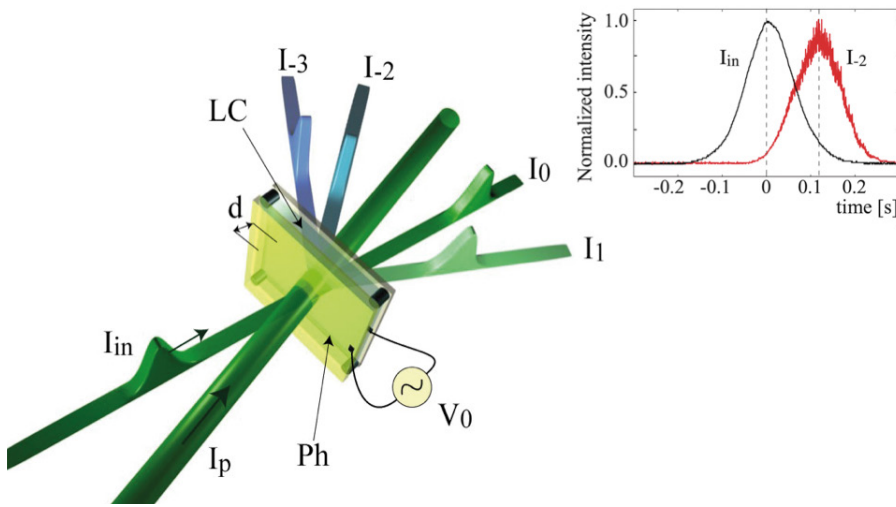


Figure 3. Interaction pompe-signal - Diffraction et couplage nonlinéaire entre les ondes. Effets de lumière lente issue de la référence 4.

- Pas de pixellisation, électrodes transparentes ITO homogènes donc sans diffraction parasite de l'onde cohérente transmise. À partir de ces très bonnes caractéristiques, l'OASLM avait été intégré à un système temps réel de corrélation optique pour le tri d'objets dans le cadre d'un projet européen.

L'holographie dynamique et interférométrie

Outre les bonnes propriétés mentionnées ci-dessus, le composant BSO-CL peut aussi être considéré comme un milieu Kerr dans une interaction de mélange holographique deux ondes référence et signal spatial multimode générant une modulation d'indice en fonction de l'intensité du champ

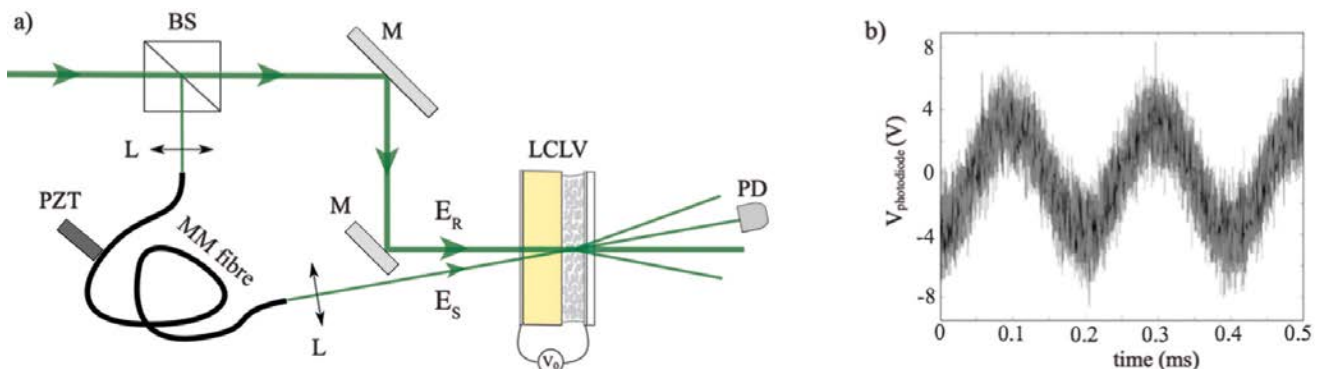
d'interférences induit dans le domaine de sensibilité spectrale du BSO, typiquement bleu-vert. Il en résulte un réseau d'indice type Raman Nath, de période spatiale de l'ordre de 20 μm et efficace compte tenu du Δn élevé du cristal liquide (Δn max CL nématique E7 : 0.2). Il a été montré par Arnaud Brignon l'obtention d'une amplification de type paramétrique d'une image $\times 10$ par mélange holographique à deux ondes référence-signal [2]. En relation avec THALES-TRT, l'équipe cristal liquide de Stefania Residori et Umberto Bortolozzo de l'Institut Non Linéaire de Nice - INLN (aujourd'hui Institut de Physique de Nice du CNRS et de l'Université Côte d'Azur), développera aussi vers 2005 la technologie de ce composant en le considérant

comme un milieu nonlinéaire équivalent Kerr avec une valeur du coefficient n_2 exceptionnellement élevée puisque de l'ordre de 0.2 cm^2/W [3]. Cette approche va apporter un grand nombre d'expériences et de modélisations originales sur des interactions de type holographie dynamique pompe-signal avec couplage entre les ondes multiples issues de la diffraction Raman-Nath [4]. Par exemple, de nouvelles expériences pour l'holographie interférométrique temps réel, pour l'interférométrie Sagnac d'un milieu en rotation... Également, pour des applications capteurs à fibres multimodes à haute sensibilité, les expériences de l'INLN montrent que la détection cohérente avec le composant BSO-CL à 0.53 μm ou GaAs-CL à 1.06 μm permet d'excellentes performances en termes de limites de l'amplitude de vibration du petit signal détectable : typiquement de l'ordre du pm voire fm dans une bande passante de quelques kHz. Ces travaux vont aussi jusqu'à démontrer et exploiter en interférométrie pompe - signal les concepts de lumière lente liés à la dispersion de la vitesse de groupe d'une impulsion signal de quelques dizaines de ms [4].

La correction - mise en forme - traitement de faisceau laser

L'évolution remarquable des performances des sources laser pompées par diodes en termes de

Figure 4. Interférométrie-vibrométrie avec fibre multimode



Pôle d'Expertise Photonique :
Précision, Performance,
Innovation

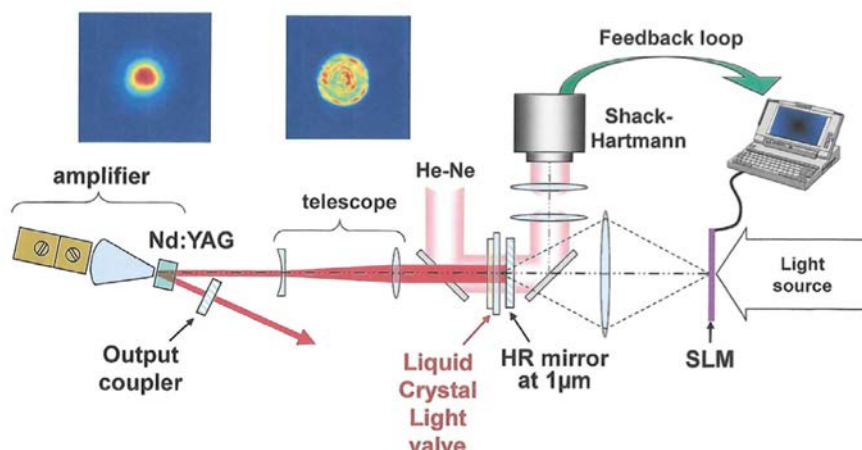
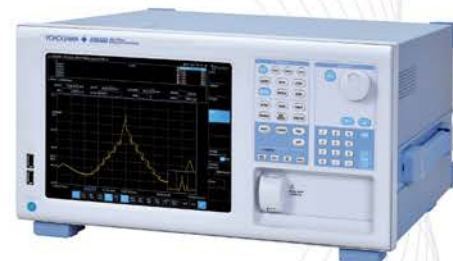


Figure 5. Contrôle de faisceau intracavité Nd:YAG. Génération d'une super-gaussienne.

puissance délivrée du régime continu à l'impulsionnel femtoseconde a conduit à reconsidérer les problèmes de qualité spatiale du faisceau émis et du contrôle du mode en cavité. Dans ce cadre il est apparu que le composant OASLM possédait les bonnes caractéristiques requises pour ces applications, à savoir, la correction de défauts de phase importants ainsi que la génération d'une forme d'onde particulière requise aujourd'hui pour les applications industrielles. La structure BSO-CL a ainsi été utilisée intracavité par Jérôme Bourderionnet pour démontrer la mise en forme adaptative du mode émis de la source Nd-YAG pompée diodes, par exemple un faisceau Supergaussien et la correction des distorsions résiduelles de phase dues aux effets thermiques. L'OASLM est adressé par un SLM-CL à adressage électrique projeté et légèrement défocalisé sur le cristal photoconducteur BSO, les signaux d'adressage SLM étant issus d'un capteur de front d'onde [5]. Dans ces expériences la résolution spatiale étant de l'ordre de 20 µm, le OASLM traite en parallèle le front d'onde sur l'équivalent de 500x500 pixels ce qui est remarquable par comparaison avec les techniques d'optique adaptative conventionnelles. Avec l'objectif de valider ces fonctions sur des chaînes laser de très haute énergie le LCR avait collaboré avec le laboratoire LULI de l'école Polytechnique dirigé

alors par Arnold Migus. Il s'agissait pour l'expérience d'une source Nd-Glass délivrant 100 TW et des impulsions de 300 fs. Dans les expériences l'OASLM était placé à l'entrée des chaînes d'amplification pour rester dans les limites de tenue du flux du composant. Il permet la correction des aberrations sur chaque tir ainsi que les dérives thermiques de la chaîne et le contrôle de phase de chaque composante spectrale de l'impulsion [6]. Ces premières expériences avec succès sur les chaînes laser du LULI ont conduit THALES-TRT à des contacts avec le laboratoire du CEA qui préparait le projet chaîne laser Mégajoule à Bordeaux. Dans le cadre de cette potentielle application, la maîtrise technologique et des caractérisations précises et reproductibles de tenue au flux et de résolution spatiale du composant BSO-CL ont été effectuées à THALES-TRT par Brigitte Loiseaux et Anne Delboulbé. Ces travaux aboutissent en 2004 à un démonstrateur adressé par LED bleue et adapté au traitement de faisceau laser haute énergie. C'est finalement ce composant qui a été retenu pour une fonction particulière de mise en forme du faisceau Mégajoule avant modules préamplificateurs aux Etats-Unis au Lawrence Livermore National Lab, puis sur les projets équivalents en Chine National Laboratory on High Power Laser et à CEA-Bordeaux. Comme le dit le Dr Heebner dans sa présentation SPIE de 2010 [7] : « OASLMs are ideal for ●●●



PHOTOMÈTRE
OFDR LASER EDFA
SWITCH DAS OSA DTS
BOSA OSA FBGI
COMPOSANTS
TLS VOA



www.wavetel.fr
about.wavetel.fr



coherent laser beams » ; Une issue remarquable et non prévue pour ce composant électro-optique BSO-CL dont les premiers résultats ont été publiés par le LCR en 1982 et qui a contribué le 5 Décembre 2022 au « LLNL break Fusion record » sur une source délivrant 2 MJ !

Nouveaux développements par HOASYS

Quarante ans après leurs débuts, les OASLM tels que BSO-CL continuent d'améliorer leurs performances et de stimuler des nouvelles applications. Actuellement, ils sont produits en France par l'entreprise HOASYS, une start-up à la pointe sur le développement de systèmes optiques pour contrôler et détecter la lumière, née au sein de l'Incubateur Provence Côte d'Azur, grâce à loi sur l'innovation, et sous l'égide des programme RISE du CNRS Innovation et DeepTech de BPI France. Les

OASLM actuels sont devenus avant tout des composants faciles d'accès et d'utilisation, avec un contrôle électronique et optique intégrés. Ils présentent aussi des nouvelles fonctionnalités, ainsi que la possibilité de les adapter en fonction de l'application et de les personnaliser selon les exigences des clients. Bien que le principal marché des OASLM soit encore celui des laboratoires de recherche, les applications liées à l'imagerie médicale prennent une importance croissante. Par ailleurs,

ces dispositifs présentent également un fort potentiel commercial dans des domaines tels que celui des lasers à forte puissance destinés aux milieux industriels. D'autres domaines très intéressés par les OASLM sont les communications en espace libre, la cryptographie quantique et la détection de phase. On peut dire que les OASLM suscitent aujourd'hui un intérêt grandissant, avec un potentiel en forte croissance et on peut s'attendre à les voir intégrer des marchés en expansion. ●

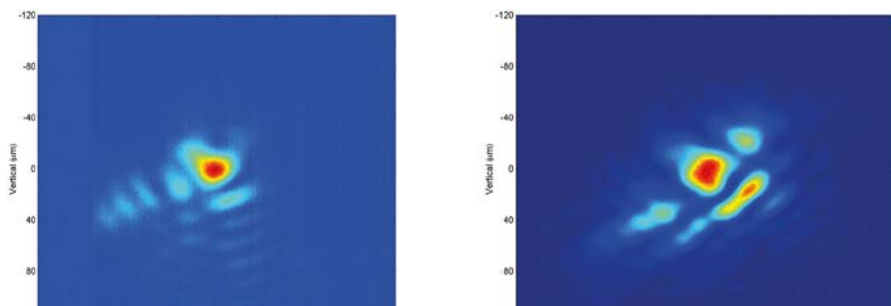
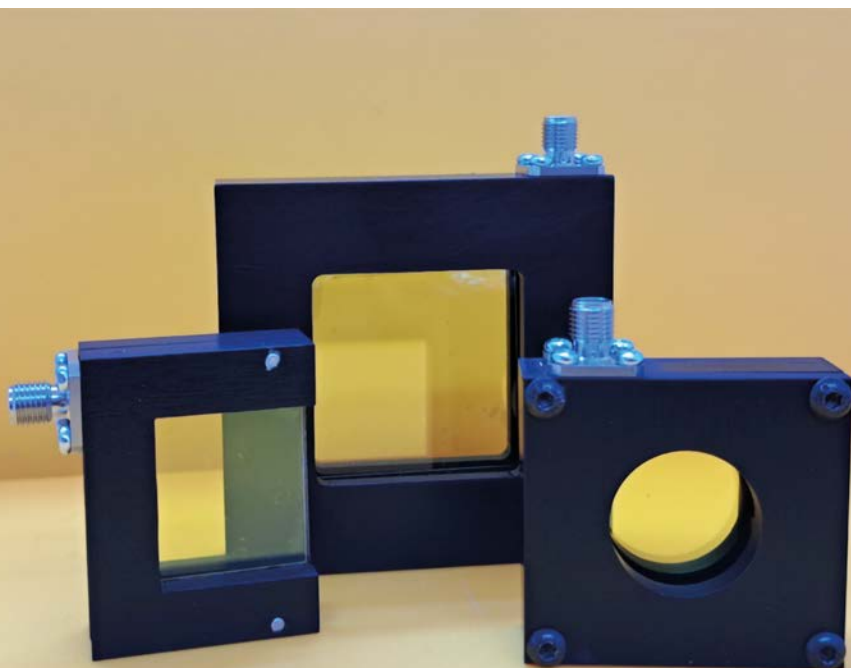


Figure 6. Faisceau laser très haute énergie LULI (100TW - 300fs) - Qualité de faisceau proche de limite de diffraction après correction (à droite).

Figure 7. Composants OASLM BSO-CL réalisés par la société HOASYS.



RÉFÉRENCES

- [1] P.Aubourg, J-P. Huignard, M.Hareng, R.A.Mullen, *Appl.Opt.* **21**, 3706 (1982)
- [2] A. Brignon, I. Bongrand, B. Loiseaux, J-P. Huignard, *Opt.Lett.* **22**, 1855 (1997)
- [3] S. Residori, U. Bortolozzo, J-P. Huignard, *Appl.Phys.B.* **95**, 551 (2009)
- [4] U. Bortolozzo, S.Residori, J-P. Huignard, *Laser Photonics Review.* **1**, 1 (2009); A.Peigné *et al.* *Opt.Lett.* **40**,5482 (2015)
- [5] J. Bourderionnet, A. Brignon, J-P. Huignard, A. Delboulbé, B. Loiseaux, *Opt.Lett* **26**, 1958 (2001)
- [6] J-C. Chanteloup *et al.*, *Opt.Lett* **23**, 475 (1998) – C. Dorrer *et al.*, *Opt.Lett* **23**,709 (1998)
- [7] J.Heebner *et al.*, *SPIE Boulder Symposium*, 28.September (2010)