

# COMPRENDRE L'INTERFÉROMÉTRIE À DÉCALAGE MULTILATÉRAL

Jérôme PRIMOT\*, Cindy BELLANGER

DOTA, ONERA, Université Paris Saclay, 91120 Palaiseau, France

\*jerome.primot@onera.fr



**L'interférométrie à décalage multilatéral est une technique d'analyse optique aux multiples applications. Basée sur un procédé simple, extension avantageuse de l'interférométrie à décalage, elle a permis de développer un grand nombre de dispositifs, chacun adapté à un besoin particulier de mesure. Elle correspond à un changement de paradigme qui voit maintenant les utilisateurs chercher à approcher au mieux des objets d'intérêt à analyser sans les perturber, en respectant au mieux les conditions environnementales. Le fait de se spécialiser dans un type de mesure permet en particulier d'introduire des connaissances *a priori* qui aident à la qualité de la mesure.**

<https://doi.org/10.1051/photon/20231250>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

**A**pparue dans les années 90 et développée industriellement depuis les années 2000, l'interférométrie à décalage multilatéral connaît un grand essor ces dernières années dans des domaines aussi distincts que le contrôle des lasers ultra-intenses, l'analyse des plasmas, la biologie, la médecine, la nanophotonique, l'endommagement laser (voir Photoniques 118), le contrôle non destructif en rayons X voire le contrôle optique des métasurfaces ou des surfaces morcelées. Son émergence coïncide avec un changement de paradigme en matière d'interférométrie : ce n'est plus l'échantillon qu'on amène dans la salle d'interférométrie, mais l'interféromètre qu'on fait entrer dans l'environnement de l'objet ou du faisceau à tester.

L'utilisateur s'y retrouve, car le processus de mesure est plus simple et plus réaliste s'il est mené in-situ.

Par principe, l'interférométrie à décalage multilatéral [1-2] est robuste et compacte et donc parfaitement adaptée pour s'adapter aux conditions spécifiques d'un banc d'essai, d'un bras de contrôle ou d'un microscope, avec un minimum d'impact sur la mesure et son environnement. La conséquence de cela est l'apparition d'une plus grande variété de dispositifs, basés sur le même principe fondateur, pour s'approcher au mieux des besoins et des contraintes des domaines applicatifs. Contrairement aux idées reçues, cette démarche vers la mesure opérationnelle, parfois très contrainte, ne se fait pas au détriment de la performance. Bien au contraire, ces interféromètres à décalage multilatéral sont bien à l'état de l'art.

## INTERFÉROMÉTRIE À DÉCALAGE LATÉRAL

## Un principe simple...

Commençons par introduire le concept d'interférométrie à décalage latéral, concept dit auto-référent car il permet d'analyser un faisceau sans nécessité de le comparer à une onde étalon. Un des montages les plus simples est celui proposé par Ronchi dans les années 50, présenté ici dans une version idéale : le faisceau à analyser, pour l'instant considéré comme monochromatique à la longueur d'onde  $\lambda$ , est dirigé sur un réseau d'amplitude sinusoïdale pure, comprise entre -1 et 1, de pas  $p$  grand devant la longueur d'onde. Celui-ci diffracte deux répliques faiblement basculées d'un angle  $\alpha = \frac{\lambda}{p}$  du faisceau suivant les ordres +1 et -1, comme indiqué en figure 1. Après propagation, ces répliques basculées se séparent latéralement et leur interférence est enregistrée sur un détecteur matriciel. Si le faisceau analysé est sans défaut, la figure d'interférence est constituée de franges linéaires régulières. Le passage d'un maximum à son voisin dans le réseau de franges correspond à une différence de marche de  $\lambda/2$  entre les deux répliques basculées et décalées.

Si maintenant le faisceau analysé est de la forme  $\exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda}\Delta(x, y, \lambda)\right)$ , uniforme en amplitude pour simplifier les expressions, où  $\Delta(x, y, \lambda)$  est un défaut de différence de marche à mesurer, l'intensité  $I(x, y, \lambda)$  obtenue après interférence des répliques et propagation à une distance  $d$ , s'exprime comme suit :

$$I(x, y, \lambda) = \left| \exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda}\left(ax + \Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)\right)\right) + \exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda}\left(-ax + \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)\right)\right) \right|^2$$

En développant cette expression, on obtient :

$$I(x, y, \lambda) = 2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(2ax + \left[\Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)\right]\right)\right) \right]$$

On reconnaît là la forme classique en  $\cos(ax + b(x, y))$  d'une modulation de phase. Les répliques basculées de l'onde analysée interfèrent donc suivant une porteuse de période  $\frac{\lambda}{2\alpha}$ . La modulation produite permet de coder le taux d'accroissement de la différence de marche pour une longueur d'onde donnée. Celle-ci sera extraite en tout point de la surface par une simple technique de démodulation.

## Des propriétés chromatiques remarquables ...

En tenant compte de la loi des réseaux, donc en remplaçant  $\alpha$  par  $\frac{\lambda}{p}$ , l'expression de l'intensité se simplifie comme suit :

$$I(x, y, \lambda) = 2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{4\pi}{p}x + \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) \right] \right) \right]$$

La porteuse ne dépend donc pas de la longueur d'onde, mais seulement du pas du réseau. Cette propriété est importante à deux titres : tout d'abord, lorsqu'on change de longueur d'onde, on n'affecte en rien le dispositif qui garde la même porteuse donc le même traitement de démodulation. Cela permet également de travailler avec une source blanche sans que les franges ne se brouillent.

Considérons maintenant le taux d'accroissement  $\Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right)$ .

Si la différence de marche est continue, et que le décalage latéral est suffisamment petit, elle peut être développée au premier ordre en suivant l'approximation de ●●●

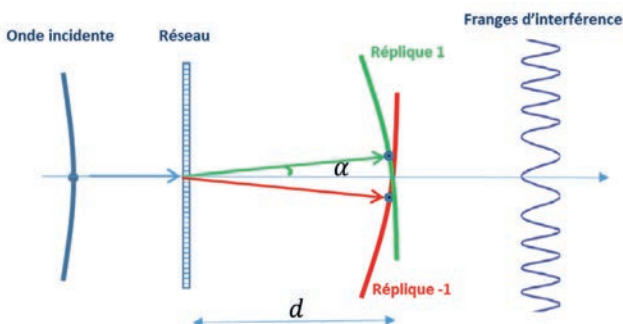


Figure 1.  
Principe de l'interférométrie à décalage latéral.

# nobrainner.



## Lasers for Neuroscience

Perfect solution for 2-photon Microscopy

### FemtoFiber ultra

780 / 920 / 1050 nm

- Fully turn-key with integrated AOM and GDD
- No noise-stress for animals thanks to fully air-cooled design
- Compact laser design saving valuable table space
- Low cost of ownership using robust & reliable fiber-laser technology

learn more...



 **TOPTICA**

Taylor ; le taux d'accroissement s'exprime alors comme suit :

$$\Delta\left(x - \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) - \Delta\left(x + \frac{\lambda d}{p}, y, \lambda\right) \approx \frac{2\lambda d}{p} \frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y, \lambda)$$

Le terme en  $\lambda$  se factorise et disparaît lors de la multiplication par  $\frac{2\pi}{\lambda}$ . L'intensité devient alors :

$$I(x, y, \lambda) \approx 2\left[1 + \cos\left(4\pi\left(\frac{d}{p} \frac{\partial \Delta}{\partial x}(x, y, \lambda) + \frac{x}{p}\right)\right)\right]$$

Pour peu que la différence de marche à mesurer soit elle-même achromatique, comme c'est le cas par exemple pour les défauts d'un miroir, la mesure devient alors parfaitement indépendante de la longueur d'onde. Cela ouvre la perspective d'une mesure quel que soit le spectre de la source et donc de manière très favorable pour les mesures *in situ*, sur banc d'essai ou pour les applications faibles flux.

Un point important est que cette propriété d'achromatisme complet, porteuse et mesure, n'est valable que pour les surfaces continues et pour un décalage latéral petit. Si l'objet de phase à analyser présente des ruptures, c'est-à-dire que la différence de marche  $\Delta(x, y, \lambda)$  n'est plus dérivable et présente des discontinuités ou des sauts qui ne permettent plus l'approximation de Taylor, la porteuse restera achromatique mais la mesure deviendra chromatique. Cela se traduira par une discontinuité dans la modulation de phase codée dans les franges d'interférence, dont l'amplitude donnera directement accès à la hauteur de la discontinuité de la différence de marche à mesurer. Cette mesure sera cette fois dépendante de la longueur d'onde utilisée.

On se retrouve donc face à un dispositif qui a une aptitude naturelle à distinguer les sauts au comportement chromatique des défauts lents de type surface au comportement achromatique, et ceci par la simple comparaison d'acquisitions faites à deux longueurs d'onde distinctes. Cette propriété a permis de mettre au point un analyseur adapté au cophasage des télescopes segmentés en présence de turbulence atmosphérique [3]. Comme cette dernière peut être considérée au premier ordre comme achromatique, la comparaison d'acquisitions à deux longueurs d'onde distinctes permet d'extraire les seuls sauts dus aux discontinuités entre les segments, sans être pollué par la contribution de l'atmosphère.

**...vers l'interférométrie à décalage multi-latéral**

Le procédé décrit précédemment permet l'estimation du gradient de la différence de marche dans une seule direction. Même s'il est théoriquement possible de reconstruire la différence de marche par simple intégration d'une dérivée, cette étape se révèle en pratique instable et peu résistante face à une mesure forcément bruitée. Afin de contrôler la propagation de l'erreur lors de la reconstruction, il convient de mesurer au moins deux dérivées suivant des directions orthogonales. Plusieurs laboratoires ont donc réalisé des dispositifs couplant par une séparatrice deux interféromètres à décalage latéral orthogonal.

La solution optimale pour répondre à cette problématique est de changer le procédé exposé ci-dessus en remplaçant le

réseau sinusoidal linéaire par un réseau bi-dimensionnel, qui va donc diffracter des ordres dont les vecteurs d'onde ne seront plus coplanaires. La base de l'interférométrie à décalage multi-latéral est alors posée. La figure 2 présente le dispositif le plus répandu, à savoir l'interféromètre à décalage quadrilatéral (IDQL, souvent appelé QWLSI ou QLSI en anglais, pour QuadriWave Lateral Shearing Interferometer) qui va nous servir pour illustrer les nouvelles propriétés associées à ce nouveau mode de fonctionnement. En partant d'un réseau cartésien bi-sinusoidal en amplitude, on diffracte quatre ordres dont les extrémités des vecteurs d'onde appartiennent à un même cercle. Le principe de fonctionnement reste cependant le même que le montage de Ronchi présenté précédemment, à ceci près qu'il est extrapolé sur les deux dimensions x et y du plan.

Les quatre ordres diffractés, également inclinés par rapport à l'axe d'un angle  $\alpha$ , vont donc prendre le même retard lors de leur propagation, ce qui assure l'invariance de la modulation qu'ils produisent, à savoir un réseau de spots répartis sur un maillage carré. La conséquence est qu'il va maintenant être possible de mesurer les dérivées de différence de marche, non seulement dans les deux directions x et y du plan, mais également dans les directions diagonales à partir d'un même dispositif. Plutôt que de multiplier les interféromètres, on multiplexe ici l'information sur un même interférogramme et on conserve les propriétés de chromatisme et d'achromatisme de l'interférométrie à décalage latéral simple.

L'élément clé est le réseau bi-dimensionnel qui doit non seulement diffracter les quatre ordres de même inclinaison et de même amplitude, mais surtout ne pas diffracter d'ordres supplémentaires qui viendraient perturber à la fois l'invariance par propagation et ajouter des franges parasites. Classiquement, on utilise une très bonne approximation du réseau idéal, en associant un damier de phase qui vient coder le signe de la transmittance bi-sinusoidale et un masque de trous d'ouverture égale à deux tiers de son pas [4]. Si on regarde une coupe du profil de cette transmittance dans une des directions principales, on voit qu'on obtient une bonne approximation d'un sinus. C'est ce dispositif, constitué d'un simple réseau placé devant une caméra, qui fait la totalité des développements industriels.

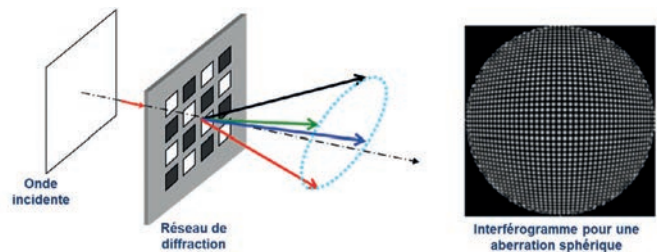
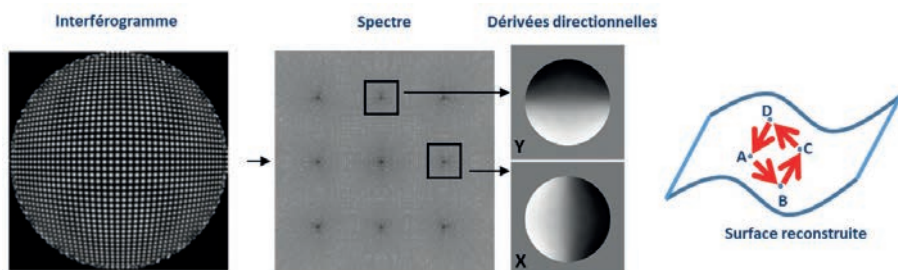


Figure 2. Schéma de principe de l'interféromètre à décalage quadrilatéral et interférogramme.





**Figure 3.** À gauche, figure d'intensité issue d'un interféromètre à décalage quadrilatéral pour un faisceau comportant une aberration sphérique, au centre, sa transformée de Fourier ainsi que les dérivées extraites à partir de deux harmoniques. À droite, illustration des relations de clôture des dérivées.

### UN TRAITEMENT DE FOURIER NATUREL

La transformée de Fourier de l'interférogramme produit, présentée en figure 3, est donc constituée de huit harmoniques placées autour d'une harmonique zéro. On voit ici le caractère multiplex : chaque couple d'harmoniques correspondant à une sinusoïde sur une direction peut être démodulé pour donner le gradient dans cette direction. On obtient ainsi l'équivalent de quatre interféromètres à décalage latéral, qui fonctionneraient suivant les directions  $x$ ,  $y$ ,  $x+y$ , et  $x-y$ .

On reconstruit la cartographie de phase en tenant compte au mieux de ces différentes dérivées, essentiellement redondantes. La plupart des acteurs du domaine utilise une méthode aux moindres carrés pondérés pour minimiser l'impact du bruit de mesure.

Une des conséquences de l'évaluation de multiples dérivées est que la mesure est auto-référente en termes d'évaluation de l'erreur. Pour cela, on utilise ce qu'on appelle les relations de clôture. Prenons par exemple le cas de deux dérivées en  $x$  et  $y$ , obtenues suivant un maillage cartésien. Si on regarde un point de la surface d'onde à reconstruire (figure 3, droite), on voit qu'on peut faire une circulation : on prend la valeur de la dérivée en  $x$  pour se propager du point A au point B, puis la valeur de la dérivée en  $y$  pour monter du point B au point C, moins la dérivée en  $x$  entre

les points C et D, et enfin, moins la dérivée en  $y$  pour revenir au point d'origine A. Comme la mesure est entachée d'un certain bruit, la position de retour ne sera pas strictement superposée avec l'origine. En estimant de façon systématique ces circulations en tous points de la surface reconstruite, il est donc possible de déduire une cartographie des écarts-type de l'erreur de mesure des dérivées à partir de la mesure elle-même [5].

### LES APPLICATIONS

L'année 2023 a été l'occasion de la première rencontre française d'interférométrie à décalage multilatéral française (proceeding colloque idml 2023 : <https://urlz.fr/oRIH>), car, même s'il y a des développements importants maintenant en Chine, en Allemagne ou en Australie, il se trouve que l'essentiel de l'innovation sur ce thème est concentré en France.

Les propriétés d'achromatisme évoquées ci-dessus ont été à l'origine de la diffusion de la technique et ceci dans le domaine des lasers impulsionsnels, avec les travaux pionniers du LULL, soutenus par Gérard Mourou au CUOS, Michigan, et de l'Institut d'Optique. Puis une grande activité s'est développée autour de l'Institut Fresnel avec comme thématique majeure la biologie [6]. Les microscopistes de cet institut se sont intéressés aux propriétés de cohérence spatiale de la source d'éclairage. Ils ont ●●●

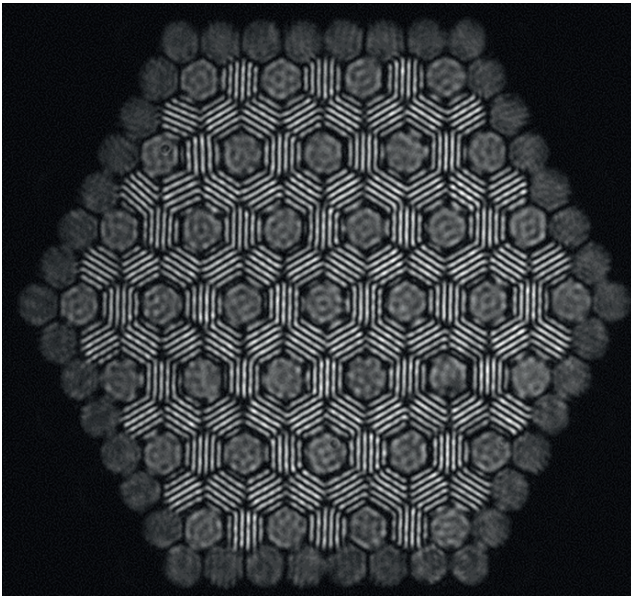
## AR / VR : Un nouveau débouché pour l'interférométrie à décalage multilatéral

Dans l'ère contemporaine où la technologie s'entrelace de plus en plus avec le tissu social, la réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR) émergent comme des forces motrices qui élargissent les horizons de notre réalité quotidienne. Ces technologies révolutionnaires ne sont pas seulement des concepts futuristes, l'AR/VR se présente aujourd'hui comme un atout inestimable pour les enjeux industriels tels que la santé, la formation, la simulation mais aussi pour le grand public avec l'éducation, le tourisme et le divertissement. Les systèmes AR/VR sont de véritables condensés de haute technologie photonique, incluant des métasurfaces complexes, des écrans miniatures, des optiques microscopiques et des free-forms. Répondre à ce défi de fabrication et conception exige des solutions de mesure qui transcendent les normes. PHASICS,

pionnier de l'excellence métrologique, offre des solutions complètes de métrologie optique, englobant la caractérisation du système final et de chacun de ses sous-ensembles. Les systèmes de la gamme KALEO sont achromatiques, assurant une précision uniforme sur tout le spectre visible, tandis que leur conception versatile garantit la mesure dans toutes les configurations imaginables. Que le faisceau soit collimaté ou divergent, avec ou sans polarisation, PHASICS offre la clé pour contrôler les performances et la qualité des systèmes AR/VR à la pointe de l'innovation. ●

**PHASICS** | Tel: +33 (0)1 80 75 06 33  
contact@phasics.com – www.phasics.com





**Figure 4.** Interférogramme PISTIL obtenu expérimentalement sur un miroir segmenté. Pour tenir compte de la géométrie hexagonale des segments, le réseau de l'interféromètre diffracte ici 6 ondes et le décalage latéral a été maximisé à la taille d'un segment, possibilité offerte par l'hypothèse de segments élémentaires parfaits.

ainsi découvert de nouveaux dispositifs qui permettent d'ajouter la troisième dimension dans l'imagerie de phase et de faire des coupes longitudinales à partir d'un seul enregistrement. Les applications biologiques marquent aussi une rupture : plutôt que d'afficher des cartes de phase, les images de cellules sont directement quantifiées en taux de masse sèche, donnée directement interprétable par le biologiste. Ainsi, l'Institut Gustave Roussy a pu réaliser des avancées importantes en biologie cellulaire en s'appuyant sur les travaux de l'Institut Fresnel et des Universités de Limoges et Bordeaux. Pour ce même thème, l'imagerie très haute résolution permet d'identifier directement les virus présents dans des éprouvettes et de donner une évaluation de leur concentration. Une innovation en développement chez Phasics permettra bientôt de fournir des cartographies instantanées de phase sur plusieurs millions de pixels, pour des cadences adaptées à une observation du vivant.

L'instrument PISTIL (piston and tilt interferometer) illustre parfaitement l'évolution extrême de l'interférométrie à décalage multilatéral pour une réponse optimisée à un besoin très spécifique : les surfaces morcelées. L'exemple emblématique de ce type de surface est le télescope James Webb, constitué par l'association de miroirs hexagonaux. Pour assurer que les éléments d'un miroir segmenté sont bien disposés, avec une qualité compatible d'une imagerie en visible, il est nécessaire de retrouver et de compenser les différences de hauteur entre les segments. Ceci serait bien entendu possible avec un interféromètre quadrilatéral classique. Toutefois une stratégie proposée par l'Onera, dans la suite de travaux effectués avec Thales R&T, a été de développer un nouveau dispositif dédié qui profite d'informations connues

*a priori* : la géométrie hexagonale régulière des défauts à mesurer et la qualité optique des segments élémentaires. Il est alors possible d'améliorer le signal-à-bruit des seules informations recherchées : les hauteurs relatives et les basculements présents entre les segments. La figure 4 montre à quel point les franges d'interférence ont évolué. Pour s'assurer de la bonne qualité de ce nouveau type d'interféromètre, une comparaison en aveugle a été réalisée avec le « phase shifting interferometer » du LAM à Marseille, instrument de référence pour l'analyse de ces surfaces segmentées. Les résultats de mesure des hauteurs relatives obtenues sont comparables à quelques nanomètres près en absolu, soit  $\lambda/200$ , démontrant encore une fois que l'adéquation au besoin peut être faite en préservant la performance [7].

Pour finir sur les applications, revenons sur l'image mystérieuse présentée en début de cet article : il s'agit de la radiographie de phase d'un coléoptère réalisée par interférométrie à décalage multilatéral en rayons X. Cette image a été réalisée au synchrotron Soleil, lors d'une collaboration entre l'Onera et la Ligne Métrologie et Test. Ce domaine des rayons X est extrêmement prometteur ; en effet, l'imagerie de phase permet une analyse améliorée des matériaux à faible absorption comme les tissus vivants, avec des doses plus faibles que pour l'imagerie classique. À ces deux acteurs s'ajoutent le CEA/LIST et le CNRS/LP3 qui investissent eux aussi beaucoup dans ces méthodes en rayons X pour mettre au point le contrôle non destructif dynamique des matériaux du futur du domaine aérospace.

### CONCLUSION

Comprendre l'interférométrie à décalage multilatéral, c'est comprendre l'évolution naturelle des méthodes d'analyse optique pour aller au plus près des objets d'intérêt, en minimisant l'impact sur leur environnement. Le procédé fondamental est très simple, à savoir l'interférence de  $N$  répliques de l'onde à analyser produites par un réseau bi-dimensionnel. A partir de cette base, les utilisateurs vont chercher à produire de nouveaux dispositifs optimisés pour un besoin de mesure spécifique, en tenant compte des contraintes d'emploi et pour une performance donnée. La diversité des applications et les résultats obtenus dans des domaines extrêmement variés montrent tous les jours la pertinence de cette démarche. ●

### RÉFÉRENCES

- [1] J. Primot, *Appl. Opt.* **32**, 6242 (1993)
- [2] J. Primot, L. Sogno, *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 2679 (1995)
- [3] B. Toulon *et al.*, *Opt. Commun.* **279**(2), 240 (2007)
- [4] J. Primot, N. Guerineau, *Appl. Opt.* **39.31**, 5715 (2000)
- [5] A. Stolidi *et al.*, *Opt. Express* **30**, 4302 (2022)
- [6] P. Bon *et al.*, *Opt. Express*, **17**(15), 13080 (2009)
- [7] B. Rouze *et al.*, *Opt. Express* **28**, 32415 (2020)