

PROPOSITION DE POST-DOCTORAT

Intitulé : Photo-structuration 3D d'optiques à gradient d'indice par des faisceaux de Bessel issus d'un laser femtoseconde

Référence : PDOC-DOTA -2025-05
(à rappeler dans toute correspondance)

Début du contrat : 01/10/2026

Date limite de candidature : 01/05/2026

Durée : 12 mois - **Salaire brut annuel :** 39998€

Mots clés :

Conception optique, instrumentation infrarouge, gradient d'indice freeform, texturation par laser femtoseconde, faisceaux de Bessel

Profil et compétences recherchées :

Docteur ou docteur-ingénieur ayant des compétences en conception optique, en expérimentation optique utilisant un laser et ayant un fort intérêt pour des projets inter-disciplinaires

Présentation du projet post-doctoral, contexte et objectif :

Un des axes de recherche du département d'Optique et Techniques Associées (DOTA) consiste à concevoir des instruments optiques dont la masse, l'encombrement et la consommation électrique sont réduits afin de faciliter leur utilisation sur le terrain lors de campagnes de mesures, ou encore de pouvoir les embarquer sur des drones ou des nanosats. Outre leur compacité, ces systèmes sont dotés de fonctions d'imagerie avancées (telle que l'imagerie multispectrale dans l'infrarouge par exemple). Pour cela, nous explorons des concepts optiques non conventionnels, dont nous évaluons l'apport pour les systèmes optiques. Par exemple, nous étudions l'intérêt des surfaces freeform, c'est-à-dire sans axe de symétrie, ou encore des lentilles à gradient d'indice de réfraction, qui permettent de modifier le trajet de la lumière dans le volume du matériau et non pas uniquement en courbant ses surfaces.

Le DOTA en collaboration avec l'ICMMO (Institut de Chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, Université Paris-Saclay) ont réalisé des lentilles à gradient d'indice (appelées lentilles GRIN pour *gradient index*) fonctionnant dans l'infrarouge. L'ICMMO dispose d'un laser femtoseconde capable de structurer une lame dans son épaisseur pour créer des variations de phase ou d'indice contrôlées permettant d'implémenter des gradients. De premières lentilles à gradient d'indice et lentilles de Fresnel à gradient d'indice ont été réalisées dans des lames à faces parallèles. La variation de phase obtenue en une couche de structuration est actuellement faible et plusieurs couches de structuration sont nécessaires pour réaliser une fonction de phase satisfaisante. Les microstructures engendrées par l'approche multicouche de structuration génèrent de la diffusion dans le matériau qui dégrade la qualité d'imagerie de l'optique.

Les objectifs principaux du postdoc seront :

- Evaluer le potentiel de la structuration laser pour réaliser une impression 3D de fonctions optiques dans l'épaisseur d'un matériau.
- Explorer l'intérêt des faisceaux de Bessel ou toute mise en forme spatio-temporelle pour obtenir des empreintes étendues pour la structuration de fonctions optiques.
- Améliorer la structuration de lentilles à gradient d'indice (GRIN) pour réduire la diffusion intravolume et améliorer la qualité d'imagerie.

Dans un premier temps, il s'agira de faire évoluer le banc laser pour obtenir des faisceaux de Bessel, d'établir des abaques reliant la variation de phase et indice induites aux différents paramètres du laser (cadence, énergie, durée de l'impulsion, ouverture numérique, vitesse d'inscription et discrétisation). Le matériau à étudier sera le verre Corning 9754 transparent jusqu'à 5mm. La phase des premières réalisations sera évaluée soit par la méthode par résolution de l'équation de transport d'intensité bien maîtrisée à l'ICMMO et/ou par la méthode de mesure de front d'onde avec un analyseur de front d'onde de type Phasics, disponible à l'ONERA. L'empreinte de la structuration sera également étudiée au microscope optique en champ proche SNOM ainsi qu'en ellipsométrie spectroscopique IR.

Dans un deuxième temps, les abaques obtenues permettront de choisir un mode de fonctionnement privilégié du laser. De premières fonctions de phase pourront alors être réalisées (optiques convergentes, optiques diffractives, phase asphérique ou phase freeform...). En particulier des matrices de lentilles seront réalisées afin de faire évoluer certains concepts multivoies développés à l'ONERA pour des applications d'imagerie multispectrale ou hyperspectrale. La qualité de ces diverses optiques sera évaluée expérimentalement avec une attention particulière sur l'impact de la diffusion intravolume des structures inscrites.

Ainsi les objectifs spécifiques du postdoc seront :

- Développer un banc laser pour générer des faisceaux de Bessel.
- Établir des abaques reliant les paramètres du laser aux variations de phase et d'indice induites.
- Évaluer la phase des premières réalisations.
- Caractériser l'empreinte de la structuration.
- Réaliser des fonctions de phase pour des optiques avancées à l'aide des abaques obtenues.
- Évaluer expérimentalement la qualité des optiques réalisées.

Les travaux du postdoc feront l'objet d'une valorisation à travers des publications dans des revues à comité de lecture et des communications lors de congrès.

Pour mener à bien les travaux, le/la post doc s'appuiera sur les compétences et les moyens expérimentaux disponibles dans les laboratoires du DOTA et de l'ICMMO. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de l'ANR OPTOPHAB. Il/elle aura donc l'opportunité d'échanger avec le laboratoire Femto-ST à Besançon sur la mise en forme des faisceaux laser à impulsions ultracourtes.

Références bibliographiques :

- [1] R. A. Flynn et al, "Using GRIN to save 50% lens weight for an 8x rifle scope design", Proc. SPIE 10181, 101810A (11 May 2017); doi: 10.1117/12.2264470.
- [2] Boyd, A. M., "Optical design of athermal, multispectral, radial GRIN lenses", Proc. SPIE 10181, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR II, 1018109 (11 May 2017); doi: 10.1117/12.2262072.
- [3] Daniel Gibson et al, "IR-GRIN optics for imaging", Proc. SPIE 9822, (17 May 2016); doi: 10.1117/12.2224094.
- [4] Spencer Novak et al, "Direct Electrospray Printing of Gradient Refractive Index Chalcogenide Glass Films", ACS Appl. Mater. Interfaces 2017, 9, 26990–26995.
- [5] Daniel Gibson et al, "GRIN Optics for Multispectral Infrared Imaging", Proc. of SPIE Vol. 9451 94511P-1.
- [6] Daniel Gibson et al, "Layered Chalcogenide Glass Structures for IR Lenses", Proc. of SPIE Vol. 9070 90702I-1.
- [7] K. Palanjan et al, "Photoinduced GRIN lens formation in chalcogenide Ge-As-S thin films", Proc. SPIE 9288 (25 September 2014); doi: 10.1117/12.2075129.
- [8] Florian Bociort, "Aberration correction with thin radial gradient-index lenses", Proc. of SPIE Vol. 2774, Design and Engineering of Optical Systems, ed. J J Braat (Aug 1996), pp154-162.
- [9] Jay Vizgaitis et al, "Reducing narcissus with a GRIN", Proceedings SPIE Volume 9451, (2015); doi: 10.1117/12.2183589.
- [10] I Stamenov, et al., "Panoramic monocentric imaging using fiber-coupled focal planes," Opt. Express 22, 26 (2014).
- [11] D. Gibson et al, "IR GRIN Optics: Design and Fabrication", Proc. of SPIE Vol. 10181 101810B-1.
- [12] M. Lancry et al., "Ultrafast nanoporous silica formation driven by femtosecond laser irradiation," Laser Photonics Rev. 7, No. 6, 953–962 (2013).
- [13] Desmarchelier, R. et al., "Achromatic polarization rotator imprinted by ultrafast laser nanostructuring in glass", Applied Physics Letters 107, 181111 (2015).
- [14] M. Beresna et al., "Broadband anisotropy of femtosecond laser induced nanogratings in fused silica," Applied Physics Letters 103, 131903 (2013).
- [15] R. Dylla-Spears, T. D. Yee, D. T. Nguyen, N. A. Dudukovic, J. M. Ortega, M. A. Johnson, O. D. Herrera, F. J. Ryerson, and L. L. Wong, "3D printed gradient index glass optics," Science Advances 6, 7 (2020).
- [16] S. D. Campbell, "On the use of surrogate models in the analytical decompositions of refractive index gradients obtained through quasiconformal transformation optics," J. Opt. p. 9 (2016).
- [17] T. Yang, N. Takaki, J. Bentley, G. Schmidt, and D. T. Moore, "Efficient representation of freeform gradient-index profiles for non-rotationally symmetric optical design," Optics Express 28, 14788 (2020).
- [18] N. S. Kochan, G. R. Schmidt, and D. T. Moore, "Freeform gradient index progressive addition lens raytrace performance evaluation," Applied Optics 61, A28 (2022).
- [19] A. J. Yee, W. Song, N. Takaki, T. Yang, Y. Zhao, Y. H. Ni, S. Y. Bodell, J. L. Bentley, D. T. Moore, and J. P. Rolland, "Design of a freeform gradient-index prism for mixed reality head mounted display," in "Digital Optics for Immersive Displays," , vol. 10676, W. Osten, H. Stolle, and B. C. Kress, eds. (SPIE, Strasbourg, France, 2018), vol. 10676, p. 101.
- [20] Sun X, Zhou F, Duan L., "An Annular Fresnel Zone Plate without Central Spots Fabricated by Femtosecond Laser Direct Writing", Micromachines. 2022; 13(8):1285. <https://doi.org/10.3390/mi13081285>.
- [21] Lu, Jiafeng, et al. "3D structured Bessel beam polarization and its application to imprint chiral optical properties in silica." Apl Photonics 8.6 (2023).

- [22] Ouadghiri-Idrissi, Ismail, and François Courvoisier. "Iterative suppression of Kerr-induced instabilities in Bessel beams using on-axis intensity shaping." *Optics Continuum* 3.3 (2024): 379-385.
- [23] Mathis, Amaury, et al. "Arbitrary nonparaxial accelerating periodic beams and spherical shaping of light." *Optics Letters* 38.13 (2013): 2218-2220.
- [24] Mathis, Amaury, et al. "Micromachining along a curve: Femtosecond laser micromachining of curved profiles in diamond and silicon using accelerating beams." *Applied Physics Letters* 101.7 (2012).
- [25] Guodong Zhang, Guanghua Cheng, Manoj K. Bhuyan, Ciro D'Amico, Yishan Wang, and Razvan Stoian, "Ultrashort Bessel beam photoinscription of Bragg grating waveguides and their application as temperature sensors," *Photon. Res.* 7, 806-814 (2019).

Collaborations extérieures :

Co-encadrement avec l'ICMMO pour la fabrication d'échantillons texturés par laser femtoseconde.
Collaborations avec le laboratoire Femto-ST à Besançon sur la mise en forme des faisceaux laser.

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Traitement de l'Information et Système et Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Guillaume DRUART

Tél. : 01 80 38 64 13

Email : guillaume.druart@onera.fr