



HAL
open science

Circuits de guides d'ondes imprimés en 3D dans un verre de silice par un laser femtoseconde pour l'imagerie hyperspectrale

Sébastien Bourdel, Olivier Gazzano, Maxime Cavillon, Guillaume Druart,
Matthieu Lancry

► To cite this version:

Sébastien Bourdel, Olivier Gazzano, Maxime Cavillon, Guillaume Druart, Matthieu Lancry. Circuits de guides d'ondes imprimés en 3D dans un verre de silice par un laser femtoseconde pour l'imagerie hyperspectrale. 40èmes Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG 2023), Jul 2023, Lyon, France. hal-04164910

HAL Id: hal-04164910

<https://hal.science/hal-04164910v1>

Submitted on 18 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Circuits de guides d'ondes imprimés en 3D dans un verre de silice par un laser femtoseconde pour l'imagerie hyperspectrale

Sébastien BOURDEL^{1,2}, Olivier GAZZANO¹, Maxime CAVILLON², Guillaume DRUART¹,
Matthieu LANCRY²

¹ONERA, 6 Chemin de la Vauve aux Granges, 91120, Palaiseau, France

²ICMMO – Université Paris Saclay - CNRS, 17 Avenue des Sciences, 91190, Orsay, France

sebastien.bourdel@onera.fr

RESUME

Nous proposons un circuit photonique intégré (PIC) passif 3D réalisé par un laser à impulsions femtosecondes (fs) dans un verre de silice pour réaliser la preuve de concept d'un imageur hyperspectral. Après inscription laser, nous caractérisons les guides d'ondes tant dans leur profil d'indice que leurs modes optiques. En parallèle, nous modélisons numériquement les guides d'ondes pour avoir un point de comparaison avec nos caractérisations en laboratoire et pour comprendre la physique sous-jacente.

MOTS-CLEFS : *Photonique intégrée ; inscription laser ; imagerie hyperspectrale*

1. INTRODUCTION

Un imageur hyperspectral collecte et traite l'information spectrale pour chaque point d'une scène, amenant une information complémentaire par rapport aux caméras traditionnelles. Les applications de l'imagerie hyperspectrale sont diverses et variées : agriculture, surveillance, observation de la terre, biologie, imagerie biomédicale, astronomie et géosciences [i]. Le défi pour la conception et la fabrication des caméras hyperspectrales est de les rendre plus compactes, tout en maintenant une bonne robustesse, une bonne stabilité et en délivrant des images de haute qualité (exigences SWAP – Size, Weight and Power reduction).

Les PICs sont des circuits photoniques réalisés avec des guides d'ondes comportant des entrées et des sorties optiques. Les fonctions optiques qu'ils permettent de réaliser sont contenues dans un volume bien plus faible (quelques cm³) que leur équivalent en espace libre. L'absence de pièces mobiles et vibrantes garantit une bonne stabilité et les performances peuvent être bien maîtrisées car elles sont directement liées à la qualité des guides d'ondes. Ces avantages par rapport aux systèmes optiques en espace libre sont considérables, le défi consiste à présent à fabriquer ces PICs. La fabrication des PICs 2D est bien maîtrisée du point de vue industriel (lithographie 2D par exemple), ces circuits peuvent être rendus actifs, c'est-à-dire modulés électriquement ou thermiquement [ii]. En ce qui concerne les PICs 3D, seuls quelques centres de recherches maîtrisent leur fabrication et en général ces circuits sont passifs, la modulation étant plus délicate à mettre en œuvre.

2. PIC 3D POUR L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE

Pour certaines applications, ici l'imagerie, les PICs 3D sont plus adaptés. Une succession d'étapes de lithographie [iii] est toujours possible mais elle offre moins de flexibilité que l'inscription laser [iv]. Dans le cadre de ce projet, nous avons pour objectif de concevoir, étudier et fabriquer un PIC 3D réalisé par inscription directe au moyen d'un laser femtoseconde pour l'imagerie hyperspectrale dans le SWIR autour de 1.5 μm.

Nous proposons d'utiliser le principe de spectroscopie par transformée de Fourier avec un dispositif statique en inscrivant, par exemple, une série d'interféromètres de Mach-Zehnder (Figure 1, [v]). L'interférogramme obtenu en fonction de la différence de marche (après une étape de recalage [vi])

des interféromètres permettra, par transformée de Fourier inverse, de retrouver le spectre du signal d'entrée.

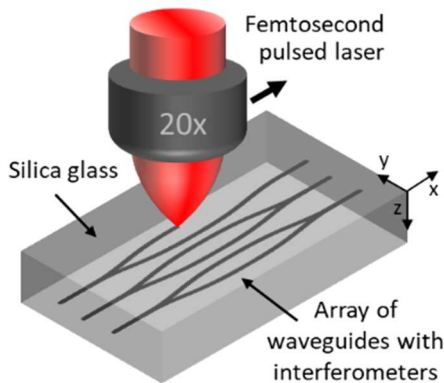


Figure 1 : Schéma de principe d'un circuit photonique intégré, inscrit par un laser, pour la spectroscopie par transformée de Fourier

3. FABRICATION ET CARACTERISATION DES GUIDES D'ONDES

L'inscription par laser femtoseconde vise à modifier localement la densité de la matière, et donc ses propriétés physiques, dont l'indice de réfraction. L'échantillon en verre de silice (Figure 2) joue alors le rôle de gaine optique et la zone irradiée correspond, dans certaines conditions expérimentales, au cœur du guide d'ondes. Nous utilisons un laser à impulsions ultracourtes (~ 250 fs), de longueur d'onde $\lambda = 1030$ nm, pour réaliser les guides d'ondes en 3D. L'échantillon est placé sur un banc permettant de déplacer l'échantillon dans les trois directions de l'espace et de contrôler précisément plusieurs paramètres du faisceau laser.

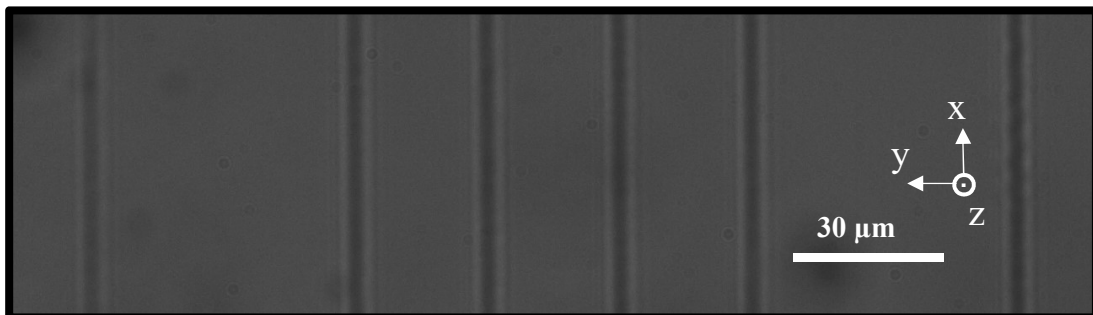


Figure 2 : Guides d'ondes photo-inscrits dans la silice amorphe SiO_2 . Le faisceau laser se propage selon $+z$ et les guides correspondant à un déplacement du spot laser dans la direction $+x$. Les images sont obtenues avec un microscope optique fonctionnant en transmission et en lumière naturelle. Paramètre : $E_{\text{pulse}} = 0.4 \mu\text{J}$, $V = 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $F_{\text{rep}} = 1000 \text{ kHz}$, Grandissement = $\times 20$, Durée impulsion = 250 fs

L'énergie des impulsions du laser, leur cadence (nombre d'impulsions. s^{-1}) et la polarisation du laser influent sur le diamètre, le contraste d'indice et les pertes des guides d'ondes [vii]. Il faut donc optimiser ces paramètres conjointement pour que les guides d'ondes présentent une bonne transmission dans la gamme de longueurs d'ondes visée (le SWIR autour de $1.5 \mu\text{m}$). De plus, pour pouvoir faire interférer les signaux provenant de deux guides d'ondes distincts ceux-ci doivent être monomodes et leur mode relativement circulaire.

Pour caractériser les modes des guides d'ondes, nous avons mis en place un banc d'injection de lumière SWIR dans les guides d'ondes. La lumière est d'abord couplée dans une fibre monomode qui est accolée à l'entrée de l'échantillon (Figure 3). En imageant le bord de sortie de l'échantillon avec une caméra infrarouge, nous pouvons caractériser les modes des guides d'ondes en champ proche.

La caractérisation du profil d'indice est également nécessaire pour valider la qualité du guide d'onde obtenue. Nous pouvons tout d'abord estimer le contraste d'indice induit par le laser en mesurant l'ouverture numérique en sortie de guide d'ondes en se ramenant au cas connu d'une fibre à saut

d'indice, via la mesure de l'ouverture numérique : $NA = \sqrt{n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$. Ainsi à l'aide de techniques de mesures de phases [viii], nous pouvons reconstituer partiellement le profil d'indice réel. En effet, dans le cas d'un guide d'ondes inscrit par un laser fs, plusieurs mesures sont nécessaires pour reconstituer le profil d'indice complet (dans différents plans). Cependant, pour le cas particulier d'un guide d'ondes à section circulaire, la phase sera reliée à l'indice par la transformée d'Abel [ix]. Sous cette hypothèse, une seule mesure de phase par le dessus du guide d'ondes sera suffisante pour déterminer le profil d'indice de nos guides d'ondes. Les premières inscriptions ayant entraîné des profils d'inscriptions laser ne présentant pas cette invariance par rotation, nous avons modifié la densité d'énergie du faisceau gaussien du laser en interposant une fente sur le trajet du faisceau laser [x]. La largeur de la fente permettra de contrôler la forme de la section transverse des guides d'ondes.

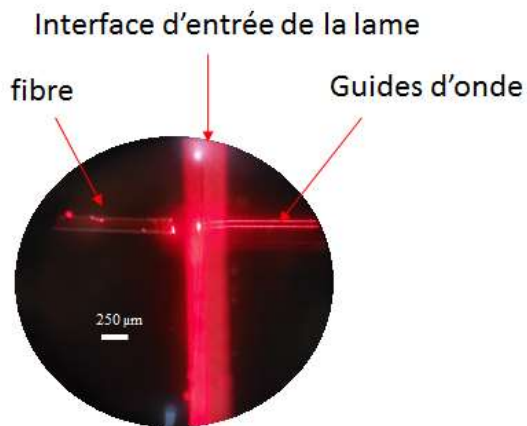


Figure 3 : Vue par un oculaire de la fibre (à gauche) injectant de la lumière visible dans 2 guides d'ondes adjacents (à droite), ici un laser HeNe

4. MODELISATION NUMERIQUE DES GUIDES D'ONDES

Pour dimensionner les interféromètres et étudier la physique sous-jacente aux guides d'ondes, nous mettons en place un modèle numérique des PICs. Nous utilisons deux méthodes. Un premier code utilise la méthode BPM (*Beam Propagation Method*) qui donne des résultats quantitatifs sous certaines hypothèses et dont la durée des calculs est très courte, de l'ordre de quelques minutes [xi]. La seconde méthode consiste à utiliser des simulations FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) en utilisant le logiciel libre MEEP [xii]. Cette méthode lève un grand nombre d'hypothèses de calculs par rapport à la méthode BPM mais les simulations sont plus longues (plusieurs heures pour de grandes cellules de calcul).

L'inscription des guides d'ondes par un laser femtoseconde induit des modifications d'indice d'environ $5 \cdot 10^{-3}$ dans la silice. Ce contraste d'indice est de l'ordre de grandeur de celui des fibres optiques monomodes et sa faible valeur impose des contraintes sur les portions courbes des circuits afin de limiter les pertes. Nous cherchons donc à déterminer via la modélisation numérique les pertes causées par la courbure sur la bande spectrale 1.4 – 1.6 μm . La Figure 4 illustre les pertes des guides d'onde en fonction de la courbure. Nous remarquons qu'il y a une dépendance chromatique caractérisée par une augmentation des pertes avec la longueur d'onde. Cela se justifie par un moins bon confinement du mode fondamental (indice effectif du mode plus faible) lorsque la longueur d'onde est plus élevée, entraînant d'avantage de pertes lors de la propagation dans la courbure via un couplage dans les modes d'ordre supérieur. Cette étude nous a permis de choisir un profil de courbure optimisé pour limiter ces pertes [xiii]. Nous pouvons ainsi étudier les phénomènes physiques ayant lieu et sélectionner une géométrie pour l'interféromètre de Mach-Zehnder. Cette méthodologie sera reprise dans les prochaines étapes. En parallèle, nous cherchons à dimensionner séparément les différentes portions des interféromètres de Mach-Zehnder, à savoir la séparatrice 50/50 et le coupleur.

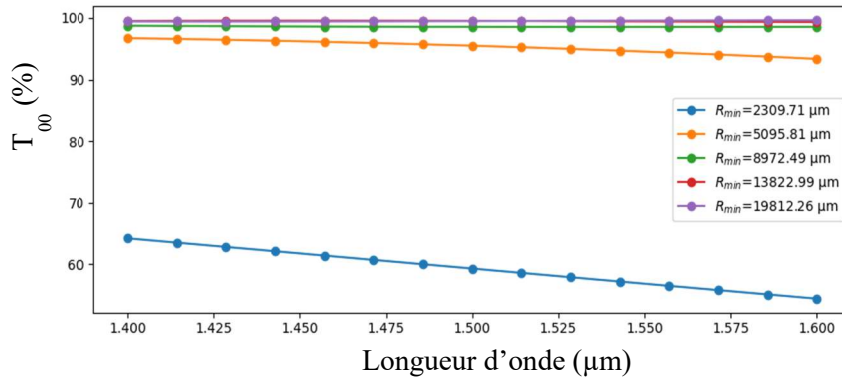


Figure 4 : Taux de transmission du mode fondamental (T_{00}) du guide d'ondes (monomode à partir de $\lambda = 1.4 \mu m$), entre l'entrée de la courbure et sa sortie, en fonction de la longueur d'onde (obtenu via les modélisations effectuées avec le logiciel FDTD MEEP)

5. CONCLUSION

Nous étudions l'intérêt des circuits de guides d'ondes en 3D pour des applications dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale. De façon originale, nous avons modélisé en FDTD un réseau de guides d'ondes permettant d'effectuer de la spectroscopie statique par transformée de Fourier.

Les perspectives de ce travail consisteront dans un premier temps à modéliser des guides d'ondes avec un profil d'indice le plus réaliste possible en utilisant les données issues de nos caractérisations optiques. Nous comparerons ensuite ces mesures avec les résultats de nos modélisations FDTD. L'objectif final est de dégager une méthode exhaustive de conception, de fabrication et d'études des PICs 3D afin de développer une puce 3D dédiée à l'imagerie hyperspectrale.

REFERENCES

- ⁱ Y. Ferrec « Spectro-Imageurs », *Techniques de l'ingénieur*. E411 V1 (2010).
- ⁱⁱ N. C. Harris *et al.* « Quantum transport simulations in a programmable nanophotonic processor ». *Nature photonics*, 10.1038 (2017).
- ⁱⁱⁱ V. Schmidt *et al.* « Application of two-photon 3D lithography for the fabrication of embedded ORMOCER waveguides », *SPIE* (2007)
- ^{iv} M. Chamboneau *et al.* « In-Volume Laser Direct Writing of Silicon - Challenges and Opportunities ». *Laser & photonics reviews*, 2 100 140 (2021).
- ^v X. Ma *et al.* « Fourier-transform spectrometer chip covering visible band on silica planar waveguide ». *Optics Communications*, 456, 124599 (2020).
- ^{vi} O. Gazzano, Y. Ferrec, C. Coudrain et L. Rousset-Rouvière. « Imagerie hyperspectrale dans l'infrarouge thermique avec le système aéroporté SIELETTERS ». *RFPT* (2023)
- ^{vii} P. Delullier *et al.* « Photosensitivity of Infrared Glasses under Femtosecond Laser Direct Writing for mid-IR » *Applications. Appl. Sci.* 12, 8813 (2022).
- ^{viii} A. Khalil *et al.* « Refractive index change measurement by quantitative microscopy phase imaging for femtosecond laser written structures ». *Optics Communications* (2021).
- ^{ix} M. Kalal et K. A. Nugent. « Abel inversion using fast Fourier transforms ». *Applied Optics* (1988)
- ^x M. Ams *et al.* « Slit beam shaping method for femtosecond laser direct-write fabrication of symmetric waveguides in bulk glasses ». *Optics Express* (2005).
- ^{xi} J. Van Roey, J. Van der Donk et P. E. Lagasse. « Beam propagation method: analysis and assessment ». *Optical Society of America* (1980).
- ^{xii} A. Oskooi *et al.*, « MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method », *Computer Physics Communications*, Vol. 181, pp. 687-702 (2010)
- ^{xiii} R. Baets et P. E. Lagasse., « Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides », *Optical Society of America*, Vol. 73, (1983)