

REALISATION DE MICRO-RESONATEURS EN MATERIAUX POLYMERES, DE FORME ARBITRAIRE, PAR LA METHODE DE GRAVURE DIRECTE PAR LASER AVEC ABSORPTION LINEAIRE ULTRA-FAIBLE

Quang Cong Tong, Bernard Journet, Isabelle Ledoux-Rak et Ngoc Diep Lai

*Laboratoire Photonique Quantique et Moléculaire, UMR 8537 CNRS,
Institut D'Alembert, Ecole Normale Supérieure de Cachan,
61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex, France*

email: qtong@ens-cachan.fr

RÉSUMÉ

Les microstructures utilisées en optique intégrée, telles que des micro-résonateurs ou des guides d'ondes, doivent être assemblées sur une puce en 3 dimensions. Nous montrons qu'il est possible de réaliser différents types de composants optiques à 2 ou 3 dimensions, en matériaux polymères par une méthode simple de gravure directe par laser, s'appuyant sur un phénomène de faible absorption à un photon. Cette méthode nous permet de fabriquer en une seule étape, des structures "à la demande" en contrôlant très précisément la forme, les dimensions et l'emplacement des éléments. Les propriétés optiques des structures fabriquées ont été préalablement déterminées par simulation à partir d'un logiciel de calcul par éléments finis.

MOTS-CLEFS : *Micro-résonateurs ; guides d'ondes ; matériaux polymères ; absorption à un photon ; gravure directe par laser.*

1. INTRODUCTION

Les micro-résonateurs en anneau sont des éléments importants pour l'intégration à haute densité de fonctions photoniques. Le couplage entre un guide d'onde et l'anneau est obtenu par onde évanescente soit verticalement [1] soit latéralement [2]. Beaucoup d'applications telles que le filtrage, le (dé)-multiplexage par division de longueur d'onde, les commutateurs, la compensation de dispersion, lasers ou modulateurs peuvent être développées à partir de micro-résonateurs en anneau [3]. Les micro-résonateurs peuvent être fabriqués à partir de matériaux très différents comme le silicium sur silice, l'arséniure de gallium (GaAs), le phosphore d'indium (InP), différents types de verre ou bien des polymères [4]. Le silicium ou les semiconducteurs III-V sont plus souvent utilisés que les matériaux polymères à cause de leur indice de réfraction élevé permettant d'obtenir un très bon facteur de confinement optique. Néanmoins, les matériaux polymères sont intéressants pour créer des microstructures photoniques si l'on considère les avantages que sont leur faible coût, la facilité de mise en œuvre et leurs faibles pertes d'insertion. En général, les micro-résonateurs, qu'ils soient fabriqués à partir de matériaux semiconducteurs ou bien de polymères, sont réalisés sur un substrat (wafer) par plusieurs étapes : dépôt de matériaux, lithographie électronique (e-beam) ou optique (masque) et gravure ou remplissage, etc. [3]. Cependant ces techniques de fabrication restent limitées à des structures de type 2D, sur un plan, ou d'empilements de plans 2D pour obtenir des structures 3D. De plus, la fabrication est relativement compliquée et coûteuse. Il a été montré récemment que des structures arbitraires, 2D ou véritablement 3D, et de dimensions sub-micrométriques, peuvent être fabriquées de façon simple par gravure directe par laser (DLW - direct laser writing) s'appuyant sur l'effet de très faible absorption à un photon (LOPA - low one-photon absorption) [5]. Le travail présenté ici montre qu'il est possible de réaliser des micro-résonateurs, ou des guides d'onde, 2D ou 3D, à la demande, à partir de cette méthode LOPA. Les structures sont au préalable déterminées et optimisées quant au facteur de qualité, par une simulation par la méthode FDTD (finite difference time domain).

2. CONCEPTION DES MICRO-RESONATEURS

Plusieurs méthodes peuvent être employées pour simuler le comportement de la lumière dans un guide ou un micro-résonateur. Les méthodes FDTD ont l'avantage d'être à la fois rapides et précises. Dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel commercial "Lumerical", basé sur cette méthode FDTD, pour simuler des micro-résonateurs de différentes formes. Cette étape nous permet de prévoir les propriétés optiques des structures et ainsi d'optimiser leurs paramètres afin d'obtenir un meilleur facteur de qualité. Sachant que la mise en œuvre de la technique LOPA limite les déplacements de la platine à environ $300\ \mu\text{m}$, nous ne pouvons réaliser que des composants relativement petits. C'est pour cela que nous avons choisi les ordres de grandeurs des dimensions des structures à simuler, dans la gamme de quelques centaines de micromètres. Plusieurs structures en 2D et 3D ont été étudiées. La figure 1(a) représente un exemple de résonateur en anneau couplé à des guides d'onde. Les paramètres de simulation sont : $R = 124\ \mu\text{m}$, $L_c = 30\ \mu\text{m}$. Le gap est $g = 150\ \text{nm}$, la largeur des guides $d = 2\ \mu\text{m}$ et enfin l'indice de réfraction vaut $n = 1,56$. Dans ces conditions, nous obtenons (voir figure 1(b)) un intervalle spectral libre de $1,77\ \text{nm}$, dû à la petite taille du résonateur, et un facteur de qualité de 1800, dû au faible contraste d'indice de réfraction.

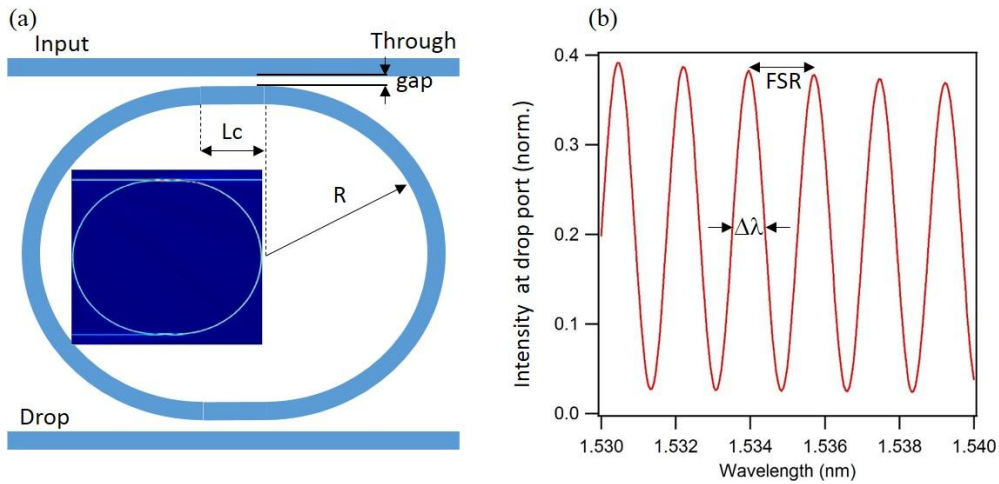


Fig. 1: (a) Modèle d'un micro-résonateur en anneau, couplé à des guides d'onde en entrée et sortie. L_c : longueur de couplage ; R : rayon ; gap : distance entre anneau et guide. L'insert montre la répartition du champ électrique du mode résonant. (b) Spectre obtenu en sortie (port Drop) du micro-anneau.

3. FABRICATION DES STRUCTURES 2D AND 3D

Nous utilisons donc la méthode LOPA, combinant un effet d'absorption linéaire extrêmement faible et l'usage d'un faisceau laser très fortement focalisé, pour fabriquer les microstructures à base de matériau polymère. La figure 2(a) présente le système expérimental de cette technique de fabrication qui est tout à fait semblable à celui d'un microscope confocal. Pour cette technique, nous utilisons un laser continu vert (à $532\ \text{nm}$) pour exciter (très faiblement à cette longueur d'onde) une résine photosensible SU8. Le laser est fortement focalisé dans l'échantillon à l'aide d'un objectif (OL) à grande ouverture numérique (NA). Grâce à cet OL, il est possible d'augmenter l'intensité lumineuse dans le plan focal par un coefficient d'environ 10^8 . Cela compense la faible absorption et permet d'induire un effet local de polymérisation de la photorésine. Une puissance de quelques milliwatts seulement pour le laser vert suffit pour obtenir cet effet. Afin de fabriquer les structures voulues, l'échantillon de photorésine, déposé sur une lame de verre, est déplacé en 3D à l'aide d'une platine piézoélectrique de haute résolution (inférieure à $1\ \text{nm}$) : la structure prédéfinie est programmée sur ordinateur grâce à un logiciel de programmation graphique. Différentes structures 2D et 3D ont été ainsi réalisées. La figure 2(b) permet de voir un micro-résonateur en anneau 2D, couplé latéralement à des guides d'ondes avec à leurs extrémités des tapers 3D, permettant d'améliorer le couplage, en entrée ou en sortie des guides, à des fibres optiques. De plus, nous

montrons que cette méthode (LOPA-DLW) est tout à fait adaptée pour fabriquer des résonateurs en 3D ou bien encore des guides d'ondes 3D de forme arbitraire en une seule étape. Les figures 2(c) et 2(d) représentent respectivement des micro-anneaux 3D et des guides d'ondes courbes (en arc-en-ciel). Ces structures ne peuvent pas du tout être obtenues par les méthodes traditionnelles, comme la lithographie électronique ou la lithographie optique par masque, et sont a priori très prometteuses quant à leurs propriétés optiques (facteur de qualité) et leur mise en œuvre (couplage).

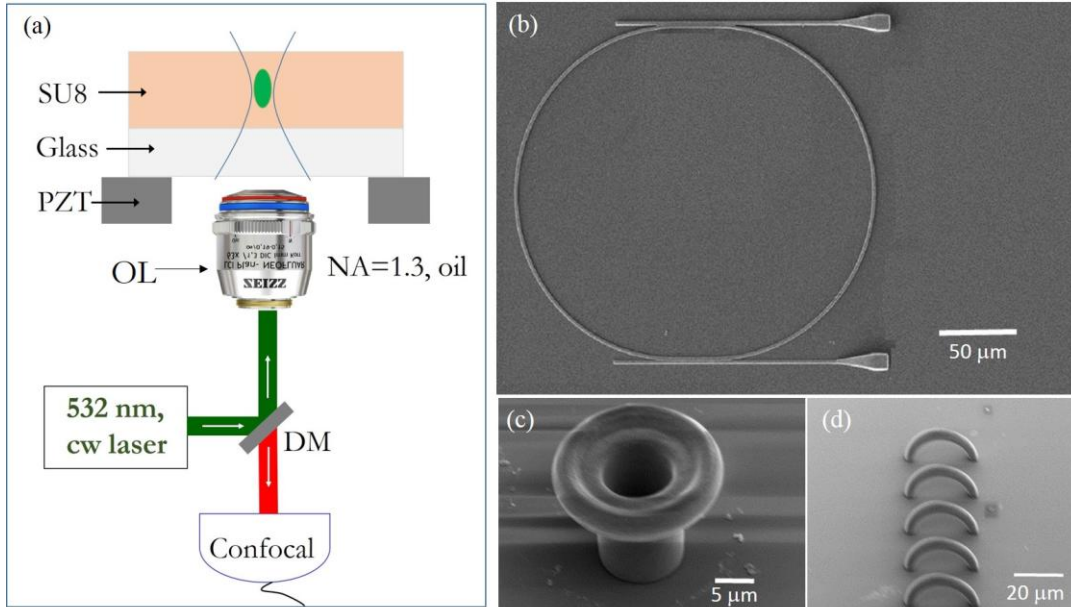


Fig. 2 : (a) Système expérimental utilisé pour la méthode LOPA-DLW, permettant de fabriquer des micro-résonateurs et guides d'ondes en 2D et 3D. PZT: platine piézoélectrique, DM: miroir dichroïque, NA: ouverture numérique de l'objectif de microscope (OL). Images au MEB d'un micro-résonateur en anneau 2D couplé à des guides (b), d'un micro-anneau 3D (c) et de guides d'ondes 3D (d).

CONCLUSION

Nous avons montré qu'il est possible de fabriquer des micro-résonateurs à deux ou trois dimensions, de forme arbitraire, en matériaux polymères, par une méthode d'écriture directe s'appuyant sur un phénomène de faible absorption à un photon. Il est possible de contrôler très précisément la forme et la taille de ces structures, permettant ainsi d'obtenir un bon couplage guide d'onde - résonateur. Le couplage au guide d'onde par taper à trois dimensions a été obtenu ici pour la première fois, ouvrant ainsi la voie à de futures applications.

RÉFÉRENCES

- [1] C. Delezoide, M. Salsac, J. Lautru, H. Leh, C. Nogues, J. Zyss, M. Buckle, I. Ledoux-Rak, and C. T. Nguyen, "Vertically Coupled Polymer Microracetrack Resonators for Label-Free Biochemical Sensors," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 24, No. 4, pp. 270–272, Feb. 2012.
- [2] P. Girault, J. Lemaitre, M. Guendouz, N. Lorrain, L. Poffo, M. Gadonna, and D. Bosc, "Micro-resonators based on integrated polymer technology for optical sensing," *Proc SPIE*, Vol. 9141, pp. 914121–914121–8, 2014.
- [3] J. Heebner, R. Grover, T. Ibrahim, and T. A. Ibrahim, *Optical Microresonators: Theory, Fabrication, and Applications*. Springer Ed., 2008.
- [4] T. M. Benson, S. V. Boriskina, P. Sewell, A. Vukovic, S. C. Greedy, and A. I. Nosich, "Micro-optical resonators for microlasers and integrated optoelectronics," in *Frontiers in Planar Lightwave Circuit Technology*, S. Janz, J. Ctyroky, and S. Tanev, Eds. Springer Netherlands, , pp. 39–70, 2006.
- [5] M. T. Do, T. T. N. Nguyen, Q. Li, H. Benisty, I. Ledoux-Rak, and N. D. Lai, "Submicrometer 3D structures fabrication enabled by one-photon absorption direct laser writing," *Opt. Express*, Vol. 21, No. 18, pp. 20964–20973, Sep. 2013.