

# MESURE DE SPECTRES D'ABSORPTION DE PLUTONIUM (VI) EN ACIDE NITRIQUE PAR UN CAPTEUR OPTOFLUIDIQUE INTEGRE SUR VERRE

Timothée Allenet<sup>1</sup>, Fabien Geoffray<sup>2</sup>, Davide Bucci<sup>1</sup>, L. Guillaume<sup>2</sup>, F. Canto<sup>2</sup>, A. Bouchard<sup>1</sup>, L. Bastard<sup>1</sup>, E. Ghibaudo<sup>1</sup>, J.-E. Broquin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, IMEP-LAHC, F-38000 Grenoble, France

<sup>2</sup> CEA Nuclear Energy Division, Research Department on Mining and Fuel Recycling Processes, Marcoule F-30207 Bagnols-sur-Cèze, France

## RÉSUMÉ

Dans cette contribution, nous présentons un dispositif optofluidique réalisé en combinant un procédé de gravure humide pour la fabrication de micro-canaux sur verre avec des guides d'onde obtenus par échange d'ions. Le principe de mesure choisi est l'absorptiométrie infra-rouge en exploitant le couplage par onde évanescente entre un mode guidé et le fluide. Une attention particulière a été dédiée à la mise en boîtier avec un capot assemblé par collage moléculaire, afin de rendre compatible le dispositif fabriqué avec un support microfluidique commercial. De même, les fibres d'injection et de récupération de la lumière ont été collées à la puce et fixées à un support mécanique. La robustesse du capteur et sa flexibilité ont permis de réaliser les premiers tests en introduisant la puce en boîte à gants nucléarisée, avec des solutions d'acide nitrique radioactives contenant du plutonium (VI).

**MOTS-CLEFS :** *optofluidique, échange d'ions, optique intégrée, capteurs intégrés*

## 1. INTRODUCTION

Une bonne partie de l'énergie produite en France vient actuellement du nucléaire. L'industrie de l'atome, loin d'être uniquement représentée par les centrales, est une filière complète et comprend toutes les installations nécessaires au traitement et recyclage du combustible usé. La nécessité de contrôler les processus chimiques opérés sur le combustible pendant les étapes de retraitement demande donc des capteurs fiables et compacts. La nature extrêmement nocive des fluides à analyser rend intéressante une approche microfluidique, à condition de fabriquer les microsystèmes sur une plateforme technologique suffisamment robuste pour éviter toute dégradation de type chimique et radiologique. En effet, la radiotoxicité des échantillons décroît proportionnellement avec les volumes traités. Nous discutons dans cette contribution de l'hybridation entre l'optique intégrée par échange d'ions sur verre [1] avec la fabrication de microcanaux par gravure humide, technologies qui permettent de répondre très efficacement à ce type de besoin.

Cet article est organisé comme il suit. Nous allons tout d'abord présenter brièvement le capteur et sa fabrication ainsi que le principe de fonctionnement du capteur choisi. Ensuite, nous continuerons en présentant les premiers spectres de plutonium (VI) en solution d'acide nitrique mesurés à l'aide de notre capteur, nucléarisé en boîte à gants.

## 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR

Le dispositif, montré en figure 1 est fabriqué à partir de deux substrats en verre borosilicate Schott BF33. Sur le premier substrat, des guides d'onde de surface sont fabriqués par un procédé d'échange d'ions argent/sodium en le plongeant dans un bain contenant du nitrate de sodium et nitrate d'argent, maintenu à 353°C pendant 7 minutes. La géométrie des guides d'onde est préalablement définie par biais d'une photolithographie classique sur une couche d'alumine (imperméable à l'échange d'ions) pour obtenir des guides canal avec une fenêtre de diffusion de

3  $\mu\text{m}$  de largeur. La couche d'alumine est ensuite retirée. Sur le deuxième substrat, un procédé de gravure humide avec de l'acide fluorhydrique à 49% pendant une durée de 25 minutes à 21°C permet de graver des canaux de 150  $\mu\text{m}$  de profondeur. Pour définir les zones à graver, une couche de chrome est déposée par pulvérisation cathodique, suivie par un dépôt d'or. La photolithographie est ensuite effectuée sur une résine épaisse SPR220 pour définir la géométrie des canaux et, au même temps, la zone d'interaction entre la lumière et le fluide.

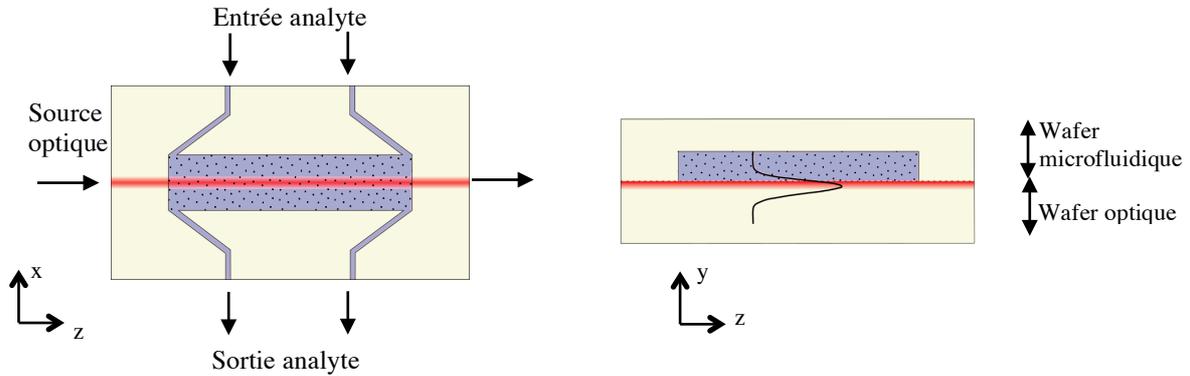


Fig. 1 : schémas fonctionnels du capteur : vue du dessus et vue en coupe de la zone d'interaction entre la lumière guidée et le canal microfluidique. La représentation n'est pas à l'échelle.

Le système a été dimensionné pour être adapté à la mesure du plutonium (VI) car ce dernier possède une raie d'absorption à 831 nm [2]. La géométrie montrée en figure 1 permet d'obtenir une longueur d'interaction de 2 cm entre la lumière guidée et le fluide contenu dans les canaux. Cette interaction se fait par biais de la partie évanescente du mode de propagation supporté par le guide d'onde (monomode à 830 nm).

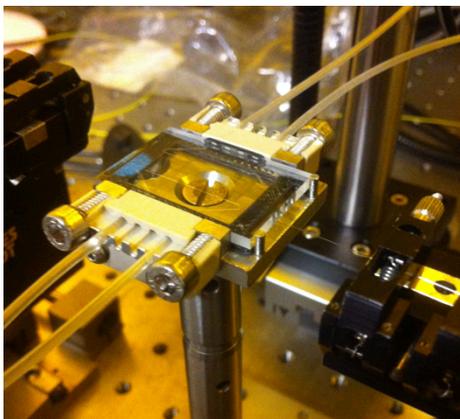


Fig. 2 photographie de la puce sur un banc d'alignement optique avec la connectique microfluidique en place.

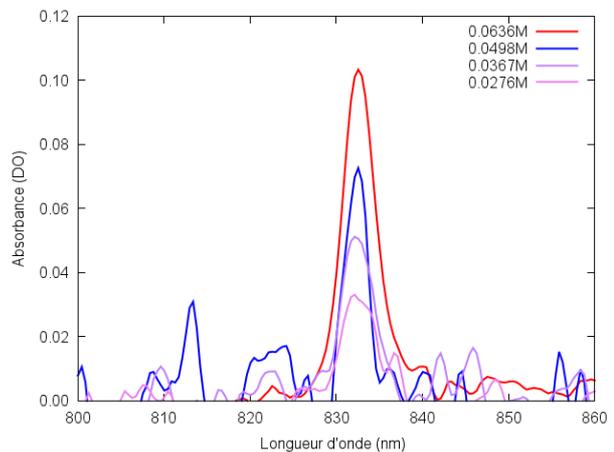


Fig. 3 spectres d'absorption de la raie à 831 nm du plutonium (VI) à différentes concentrations en milieu nitrique 1 mol/l.

Un des aspects d'importance majeure lors de la fabrication de la structure concerne le développement d'une mise en boîtier robuste et efficace. Dans notre structure, le substrat avec les guides d'onde fabriqués par échange d'ions est collé par collage moléculaire avec un capot avec les canaux fabriqués par gravure humide. Le collage moléculaire, en évitant l'utilisation de colles polymères en contact avec l'analyte et donc soumises au rayonnement, permet de s'affranchir d'un

potentiel mode de défaillance du capteur. Une étude préliminaire [3] a permis de démontrer que la procédure de collage mise au point permet d'obtenir des composants robustes et capables de supporter des pressions de travail de la structure allant jusqu'à 2 bar. Des capillaires ont été connectés aux entrées microfluidiques à l'aide de connecteurs et de joints commerciaux (Dolomite microfluidics), comme montré en figure 2. Ce système permet d'injecter le fluide analyte à l'intérieur des microcanaux et de rincer la puce sans manipulation directe et sans démonter la puce de son support. Une connectique optique est réalisée en collant des fibres monomodes à 830 nm à l'entrée et à la sortie du composant par biais d'une colle UV. Cette dernière ne rentre jamais en contact avec les fluides car les accès fluidiques et optiques sont sur des facettes perpendiculaires de la puce. La puce fabriquée a été introduite dans une boîte à gants en environnement nucléarisé dans l'installation ATALANTE du CEA-Marcoule. Une source SLED à l'extérieur de la boîte à gant a été utilisée comme source de lumière émettant autour de 830 nm. De même, la lumière à la sortie du guide d'onde est analysée par le biais d'un spectromètre compact (Roper scientific), extérieur à la boîte à gants. Les entrées/sorties des fibres sont donc effectués par des passe-parois complètement étanches. Différentes solutions peuvent être injectées à l'intérieur de la puce à l'aide de seringues, manipulées par l'opérateur. Nous avons utilisé plusieurs solutions d'acide nitrique (1 mol/l) contenant du plutonium (VI) en plusieurs concentrations comprises entre 0,0276 mol/l et 0,0636 mol/l en rinçant la puce à chaque mesure à l'aide d'une solution d'acide nitrique. Un spectre de référence de la lumière à la sortie (le « blanc ») est mesuré avant chaque mesure avec la solution d'acide nitrique et l'absorption obtenue en faisant le rapport entre les deux spectres.

La figure 3 montre les premiers spectres d'absorption obtenus à l'aide du système décrit. On peut remarquer que la raie d'absorption du plutonium (VI) est parfaitement visible et que sa profondeur est approximativement proportionnelle à la concentration de plutonium dans la solution. Des travaux sont actuellement en cours pour analyser la reproductibilité et la fidélité du système de mesure, ainsi que pour déterminer sa limite de détection. Des études avec des structures nano-fluidiques avancées sont de même envisagées pour augmenter l'interaction de la lumière avec le fluide [4].

## CONCLUSION

Dans cet article, nous avons décrit un capteur optofluidique fabriqué par échange d'ions sur verre compatible avec des applications nucléaires. La technologie de fabrication de canaux microfluidiques et de guides d'onde assemblés par collage moléculaire permet d'obtenir un microsystème compatible avec des supports d'injection commerciaux (Dolomite microfluidics). La robustesse du verre a rendu possible l'utilisation du capteur en boîte à gants en environnement radioactif. Dans ces conditions, a ainsi été réalisée la mesure des spectres d'absorption de plutonium (VI) dissout en acide nitrique à des concentrations entre 0,0276 mol/l et 0,0636 mol/l. Nous avons alors démontré la possibilité d'utilisation du microsystème pour l'analyse de fluides radioactifs, aucune dégradation de la puce n'ayant été observée lors des mesures effectuées.

## RÉFÉRENCES

- [1] A. Tervonen, B. West, S. Honkanen, "Ion-exchanged glass waveguide technology: a review" *Optical Engineering*, 50(7), 071107-071107, 2011
- [2] C. Moulin, A. Briand, P. Decambox, B. Fleurot, J.L. Lacour, P. Mauchien, P., B. Remy, "Techniques d'analyses d'actinides et de radioéléments d'intérêt par spectroscopie laser". *Radioprotection*, 29(04), 517-538, 1994
- [3] T. Allenet, D. Bucci, F. Geoffray, F. Canto, L. Couston, E. Jardinier, J.-E. Broquin, "Packaged integrated opto-fluidic solution for harmful fluid analysis". In *SPIE OPTO* (pp. 975011-975011). International Society for Optics and Photonics 2016
- [4] E. Jardinier, L. Couston, J.-E. Broquin, D. Bucci, F. Canto, A. Magnaldo, U.S. Patent No. 9,285,304. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2016

# MESURE DE PROFILS DE VITESSE ET DE PRESSION DE CHOC PAR SPECTROMETRIE BRAGG ULTRARAPIDE (GHZ)

Sylvain Magne<sup>1</sup>, Yohan Barbarin<sup>2</sup>, Alexandre Lefrançois<sup>2</sup>, Mathieu Balbarie<sup>2</sup>, Frédéric Sinatti<sup>2</sup>, Antoine Osmont<sup>2</sup> et Jérôme Luc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA LIST, Laboratoire Capteurs Architectures Electroniques, F-91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

<sup>2</sup> CEA, DAM, CEA-Gramat, F-46500 Gramat, France

[sylvain.magne@cea.fr](mailto:sylvain.magne@cea.fr)

## RÉSUMÉ

Les réseaux de Bragg sont étudiés dans le but de mesurer des vitesses et des profils de pression de chocs inertes. Le modèle opto-mécanique prédit les décalages de Bragg obtenus expérimentalement sur un lanceur à gaz au CEA Gramat en configuration d'impact plan. Les spectres de Bragg sont enregistrés au cours du choc par spectrométrie ultrarapide et comparés à des calculs de propagation de faisceau (BPM) à partir des profils de choc fournis par le code hydrodynamique OURANOS.

**MOTS-CLEFS :** Réseau de Bragg, choc, pression, vitesse, propagation de faisceau, hydrodynamique

## 1. INTRODUCTION

La compréhension des phénomènes réactifs est fondamentale pour l'emploi des matériaux énergétiques en termes de sécurité et de performances. Les instrumentations conventionnelles (jauges manganin, carbone) sont intrusives (désadaptation d'impédance de choc) et se limitent à des mesures ponctuelles. Des mesures réparties sont recherchées afin de mieux appréhender les comportements transitoires réactifs, en particulier la Transition Choc-Détonation (TCD). Un réseau de Bragg à périodes variables (*Chirped Fiber Bragg Grating - CFBG*) constitue une alternative intéressante car il donne accès à des profils de vitesse et de pression sur une étendue de plusieurs cm. La limite élastique d'Hugoniot (*Hugoniot Elastic Limit - HEL*) de la silice vaut environ 9 GPa [1]. Au-delà, la silice subit une densification permanente, sa limite de rupture en compression étant estimée autour de 16 GPa [1]. Pour des matériaux énergétiques (pression ~ 8 à 40 GPa), la mesure du profil de vitesses de détonation repose sur la destruction progressive du CFBG au cours de la progression de l'onde [2-3]. Dans cet article, les auteurs analysent le comportement métrologique d'un CFBG pour la mesure de profils de pressions inférieures à 9 GPa obtenus lors de chocs inertes en conditions maîtrisées sur lanceur avec une cible et un impacteur en alliage aluminium 6061-T6 (HEL ~ 0,6 GPa). Peu d'études existent, les travaux actuels étant menés aux USA [4], en Israël [5] et en France [6].

## 2. COMPORTEMENT OPTO-MECANIQUE D'UN RESEAU DE BRAGG SOUS CHOC

En configuration d'impact plan centro-symétrique apparaît un régime de propagation d'ondes longitudinales de compression (déformation  $\varepsilon_r = 0$ ) [1]. Les contraintes dans la cible en Al<sub>6061-T6</sub> sont établies dans le Tab. 1 en fonction de la contrainte d'impact  $\sigma_z$ . La pression P correspond à la partie sphérique :  $P = (\sigma_z + 2.\sigma_r)/3$  où  $\sigma_z$  et  $\sigma_r$  sont les contraintes axiale et radiale respectivement. Dans le domaine élastique (cisaillement  $\sigma_z - \sigma_r < Y/2$  où  $Y \sim 0,3$  GPa désigne la contrainte d'écoulement), l'ellipsoïde des contraintes est orienté en direction du choc ( $\sigma_z \sim 1,49.P$  ;  $\sigma_r \sim 0,76.P$ ). Pour  $\sigma_z - \sigma_r > Y/2$ , le cisaillement reste constant, égal à  $Y/2$ , qui dépend aussi dans une moindre mesure de la pression et de sa vitesse d'application (*strain hardening*) [7]. L'état de contrainte est alors essentiellement hydrostatique (approximation hydrodynamique). Lors du choc, le CFBG est soumis aux deux contraintes  $\sigma_r' = K.\sigma_r$  et  $\sigma_z' = K.\sigma_z$  qui dépendent du coefficient de couplage K de la cible vers la fibre en silice (impédances de choc).

<b>état élastique</b>	$\sigma_r = \frac{\nu_{Al}}{1-\nu_{Al}} \cdot \sigma_z$ ; $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{\sigma_z}{(1-\nu_{Al})E_{Si}} \left[ (1-\nu_{Al} - 2\nu_{Si}\nu_{Al}) - \frac{n^2}{2} \cdot [p_{11}(\nu_{Al} - \nu_{Si}) + p_{12}(1-\nu_{Si} - 2\nu_{Si}\nu_{Al})] \right]$
<b>état plastique</b>	$\sigma_z = P + \frac{2}{3}Y$ ; $\sigma_r = P - \frac{1}{3}Y$ ; $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{(1-2\nu_{Si})}{E_{Si}}(1-2\nu_{Si})\sigma_z \left[ 1 - \frac{n^2}{2} \cdot (p_{11} + 2 \cdot p_{12}) \right] + Y \left[ (2\nu_{Si}) + \frac{n^2}{2} \cdot (p_{11} \cdot (1-\nu_{Si}) + p_{12} \cdot (1-3\nu_{Si})) \right]$

Tab 1 : Expressions des contraintes axiale  $\sigma_z$  et radiale  $\sigma_r$  et décalages de Bragg pour chaque état (élastique, plastique) vs  $\sigma_z$ .  $\nu_{Al}$  et  $\nu_{Si}$  sont les coefficients de Poisson de  $Al_{6061-T6}$  (0,34) et de la silice (0,17).  $E_{Si}$  est le module d'Young linéaire de la silice ( $\sim 72$  GPa).

Les géométries (impacteur, cible, fibre) ont ainsi été modélisées par éléments finis à maillage adapté. Les pressions dans la cible et la fibre (placée au centre) sont déterminées par le code de calcul hydrodynamique OURANOS du CEA-Gramat en configuration 2D centro-symétrique pour différentes durées après impact. Les impédances de choc étant proches, le coefficient de couplage K en pression (ratio  $P_{fibre}/P_{cible}$ ) évolue entre 0,9 et 0,95 en situation de choc établi.

Les déformations  $\varepsilon_z$  et  $\varepsilon_r$  appliquées à la fibre sont déduites de la relation de Hooke, établie à partir des contraintes  $\sigma_r'$  et  $\sigma_z'$  couplées de l'aluminium vers la silice :

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z'}{E_{Si}} - 2\nu_{Si} \cdot \frac{\sigma_r'}{E_{Si}} \quad ; \quad \varepsilon_r = \frac{\sigma_r'}{E_{Si}} (1-\nu_{Si}) - \nu_{Si} \frac{\sigma_z'}{E_{Si}} \quad (1)$$

Le décalage de Bragg évolue en fonction de son état de déformation selon [8] (Tab. 1) :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \varepsilon_z - \frac{n^2}{2} \cdot [\varepsilon_r (p_{11} + p_{12}) + p_{12} \cdot \varepsilon_z] \quad (2)$$

où  $\lambda_B$  est la longueur d'onde de Bragg, n est l'indice de réfraction du cœur ( $\sim 1,47$ ) et  $p_{11}$  ( $\sim 0,1$ ) et  $p_{12}$  ( $\sim 0,22$ ) sont les paramètres photo-élastiques (Pockels) de la fibre, estimés à 1550 nm à partir de [9]. La dépendance en pression des paramètres de la silice a été modélisée dans la gamme [0-4 GPa]. Les modèles de Zha [10] sont utilisés pour l'indice de réfraction n et le coefficient de Poisson  $\nu_{Si}$ . Le modèle de Kondo [11] est utilisé pour le module d'Young  $E_{Si}$ .

### 3. CALCUL DU SPECTRE DE BRAGG SOUS CHOC PAR PROPAGATION DE FAISCEAU (BPM)

Un profil de pression est constitué d'un premier palier [précurseur élastique ( $C_e \sim 6440$  m/s)] suivi d'un palier de choc soutenu, onde de déformation plastique ( $C_p \sim 5700$  m/s) d'amplitude fonction de la vitesse de l'impacteur (e.g. 3,6 GPa pour  $V = 520$  m/s) et de durée dépendante de la géométrie de la cible et de l'impacteur (voir Fig. 1 (haut)). Un algorithme de calcul des spectres du CFBG par propagation de faisceau (*Beam Propagation Method - BPM*) a été mis au point sur SciLab à partir des profils de pression obtenus par OURANOS. Pour chaque profil et pour plusieurs longueurs d'onde  $\lambda$ , l'algorithme applique les équations de couplage au premier ordre reliant les champs copropagatif  $A^+$  et contrapropagatif  $A^-$  de façon itérative [12], selon le système d'éq. (3) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial A^+(z)}{\partial z} &= -iC(z) \cdot A^-(z) \cdot e^{-2i\Delta\beta(z) \cdot z} \quad ; \quad \frac{\partial A^-(z)}{\partial z} = iC(z) \cdot A^+(z) \cdot e^{2i\Delta\beta(z) \cdot z} \\ C(z) &= \frac{\pi \cdot \Delta n(z)}{\lambda} \cdot \eta \quad ; \quad \Delta\beta(z) = \frac{\pi}{\Lambda(z)} - \beta(z) = \frac{\pi}{\Lambda(z)} - \frac{2\pi \cdot n(z)}{\lambda} \end{aligned} \quad (3)$$

où C est la constante de couplage,  $\Delta\beta$  est l'asynchronisme entre la constante de propagation de l'onde et le motif photo-inscrit de période  $\Lambda$  et  $\eta$  est le coefficient de recouvrement mode-cœur.

A partir de la condition initiale  $A^+(0) = 1$ , celui-ci détermine  $A^-(z)$ , puis  $A^+(z)$  et ainsi de suite, jusqu'à converger rapidement (3 itérations) sur la valeur de  $A^-(0)$  correspondant au coefficient de réflexion. La convergence est assurée pour des coefficients de réflexion inférieurs à 84 % ( $C < \pi/2$ ) et pour un pas adaptatif inférieur à 5  $\mu\text{m}$ , même en situation de gradient élevé (front de choc).

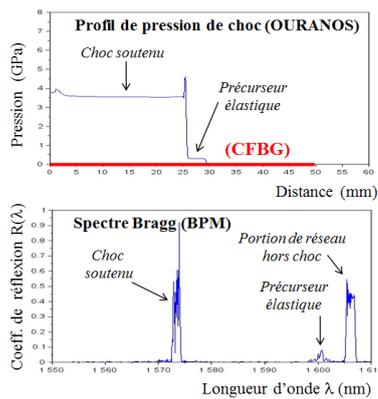


Fig. 1 : Exemple de simulation BPM de spectre Bragg (bas) obtenu à partir d'un profil de pression de choc calculé par OURANOS (haut).

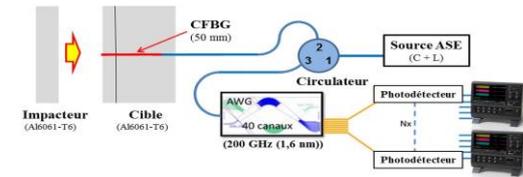


Fig. 2 : Schéma expérimental

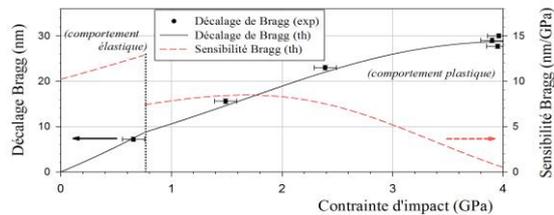


Fig. 3 : Décalages de Bragg expérimentaux et comparaison avec le modèle opto-mécanique.

#### 4. EXPERIMENTATIONS SUR LANCEUR A GAZ

Un CFBG (IXBlue,  $\lambda_B = 1605$  nm, FWHM = 4 nm, L = 50 mm, R ~ 40 %, ZBL ClearCurve™) est inséré au centre de la cible à partir de la surface d'impact et une jauge manganin ou carbone (Dynasen) est placée à 5 mm de la surface, parallèle à celle-ci (Fig. 2). Les spectres de Bragg sont obtenus à l'aide d'un filtre AWG (*Arrayed-Waveguide Grating*) réalisé sur mesure (VLC Photonics). Les signaux provenant de 16 photo-détecteurs Femto sont enregistrés par 2 oscilloscopes 8-voies (LeCroy HDO8000). Une première série de 3 photo-détecteurs (DC - 400 MHz) enregistre l'amplitude du pic du CFBG hors choc pour en déduire le profil de vitesses. Une seconde série de 13 photo-détecteurs (10 kHz - 2 GHz) enregistre le profil de pression. Plusieurs tirs sur lanceur à gaz ont été menés au CEA-Gramat à différentes vitesses d'impact (fig. 3). Les décalages de Bragg observés sur choc établi sont représentés (en valeur absolue) vs la contrainte d'impact calculée à partir de la vitesse d'impact (Hugoniot Al<sub>6061-T6</sub>). Un excellent accord modèle-expérience est obtenu sur les deux modes (élastique et plastique).

#### CONCLUSION

Les spectres des CFBG observés par spectrométrie ultrarapide (GHz) sont des transformées  $\lambda$ -P des profils de pression. Les simulations BPM établies à partir des profils de choc obtenus par le code hydrodynamique OURANOS sont proches des expériences sur lanceur et le modèle opto-mécanique prédit les décalages de Bragg observés. Les études portent actuellement sur la poursuite des essais avec des matériaux à haute limite élastique (alumine, silice), une amélioration de la résolution spectrale, un calcul inverse des profils de vitesse et de pression à partir des données spectrales et enfin l'adaptation de ce procédé aux matériaux énergétiques.

#### REFERENCES

- [1] H. Sugiura, K. Kondo, A. Sawaoka, J. Appl. Phys., **52** (5), 1981, pp. 3375-3382
- [2] S. Magne, A. Lefrançois, J. Luc, G. Laffont, P. Ferdinand, EWOF5, Proc. SPIE **8794**, 2013, 87942K
- [3] S. Magne, Y. Barbarin, A. Lefrançois *et al.*, JNOG 2016, Bordeaux
- [4] G. Rodriguez *et al.*, Opt. Express **23** (11), 2015, pp. 14219-14233
- [5] E. Shafir *et al.*, 23<sup>ème</sup> Conférence OFS, Santander (2-6 Juin 2014), in Proc. SPIE **9157**, 915713-1
- [6] Y. Barbarin *et al.*, Proc. SPIE **9960** OEAC (Interferometry XVIII), 2016, pp.35-40
- [7] Y.V. Bat'kov, B.L. Glushak, S.A. Novikov, Comb. Expl. & Shock Waves, 1989, pp. 635-640
- [8] P. Ferdinand, Tech. Ing., **R 6735**, déc. 1999, pp. 1-24.
- [9] C. Ryan *et al.*, Int. J. Appl. Glass Sci. **6** (4), pp. 387-396, 2015
- [10] C-S. Zha, R.J. Hemley, H-K. Mao, T. S. Duffy, C. Meade, Phys. Rev. B, **50** (18), 1994, pp. 13105-13112
- [11] K. Kondo, S. Iio, A. Sawaoka, J. Appl. Phys. **52** (4), 1981, pp 2826-2831
- [12] H. Shu, J. Opt. Soc. Am. A, **27** (6), 2010, pp. 1424-1431

Ce travail a été mené dans le cadre du projet ANR-ASTRID ANDROMEDE sous financement DGA.

# STRUCTURE DE COUPLAGE OPTIQUE VERTICALE PASSIVE ET COLLECTIVE A BASE DE POLYMERE POUR PHOTODETECTEUR RAPIDE

Carlos Viana<sup>1,2</sup>, Jean-Luc Polleux<sup>1,2</sup>, Frédéric Marty<sup>1</sup>, Nicolas Pavy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, ESYCOM, ESIEE-Paris, UPEM, Le Cnam, 93162 Noisy-le-Grand, France

<sup>2</sup>ICON Photonics, 77420, Champs-sur-Marne, France

[carlos.viana@esiee.fr](mailto:carlos.viana@esiee.fr)

## RÉSUMÉ

Cet article présente une nouvelle structure de couplage optique à structuration 3D de couche de polymère qui permet de compenser les erreurs d'alignement de la fibre pour présenter une solution passive. La structure est réalisée de manière collective sur une matrice de photodétecteurs de petites dimensions, inférieures à 10µm, pour le couplage vertical à une fibre monomode. Les cibles principales sont les photodétecteurs pour les applications de communication optique rapide. La structure présente un taux de couplage de 91,1 % et une largeur totale à mi-hauteur (FWHM) de  $\pm 8$  µm à 1550 nm.

**MOTS-CLEFS :** *Radio-sur-Fibre, Interconnexion optique, alignement passif, polymère, adaptation de mode.*

## 1. INTRODUCTION

Aujourd'hui les systèmes des communications optiques jouent un rôle croissant au plus proche de l'utilisateur, comme dans les télécoms avec la fibre jusqu'à l'abonné (FTTH) et dans les datacoms avec un nombre croissant de datacenters. Les composants optoélectroniques avec émission ou détection par la surface (photodiode PiN ou source diode laser VCSEL) ont ainsi un marché important en croissance pour lequel des efforts continus d'augmentation des performances et de réduction des coûts sont menés simultanément. Les dimensions de ces composants définissent régulièrement la rapidité des photodiodes ainsi que des VCSEL. L'une des principales limitations tient alors dans le temps d'alignement optique à la fibre et l'efficacité de couplage. La dimension des photodétecteurs 20 Gbps est typiquement voisine de 10 µm de diamètre. Le couplage à la fibre monomode (SMF) par méthode *butt-coupling* permet généralement des taux de couplage de 50 % maximum [2]. Cet alignement est réalisé de manière active avec un besoin de résolution d'alignement de 1-2 µm précision avec des temps d'alignement et couplage ainsi allongés de l'ordre de la minute. L'usage de microlentilles ou autres systèmes complexes de guidage ou confinement de la lumière sont aussi considérés pour améliorer le taux de couplage [3]-[5], qui ajoute au coût et à la complexité du produit. Cet article propose une structure de couplage intermédiaire réalisée de manière collective à la fabrication des photodiodes permettant un alignement passif à la fibre. La première partie de cet article décrit la structure et les résultats de simulation. La deuxième partie décrit le processus de fabrication et la troisième présente les résultats expérimentaux.

## 2. STRUCTURE DE COUPLAGE OPTIQUE PASSIVE ET COLLECTIF : DESIGN ET SIMULATION

La solution de couplage optique proposée, couverte par un brevet [1] est présentée en Fig.1 a). Elle consiste en une structure intermédiaire réalisée en polymère SU-8 placée entre la fibre optique et le composant optoélectronique. La structure se répartit en deux sections : la première constitue le cœur qui consiste en une structure conique d'adaptation de mode, appelé *taper*, qui couple et guide la lumière de façon contrôlée. L'angle de ce *taper* est optimisé en fonction de la taille du composant et du diamètre de la fibre optique. Des structures d'ancrage sont réalisées de manière régulière au sommet du cône de façon à maintenir la structure verticale. Ces bras sont essentiels au centrage du cône et à sa verticalité, notamment lorsque les angles et sa base côté photodiode est plus petite que

la dimension en contact de la fibre; La deuxième partie de la structure consiste en un trou d'ouverture pour le placement et le maintien mécanique de la fibre. La Fig.1 b) présente les résultats de simulation du taux de couplage d'une fibre monomode à 1.55  $\mu\text{m}$  et de 9  $\mu\text{m}$  de diamètre de cœur à une photodiode de 10  $\mu\text{m}$  de côté, en fonction de la hauteur de la structure conique (TH) et du diamètre de contact avec la fibre (TWF). Le diamètre de contact du cône est de 10  $\mu\text{m}$ , égal à celui du côté du photodétecteur. Ces résultats permettent de prédire un taux de couplage supérieur à 90% pour des épaisseurs de résines voisines de 20  $\mu\text{m}$  et des diamètres de cône de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$ .

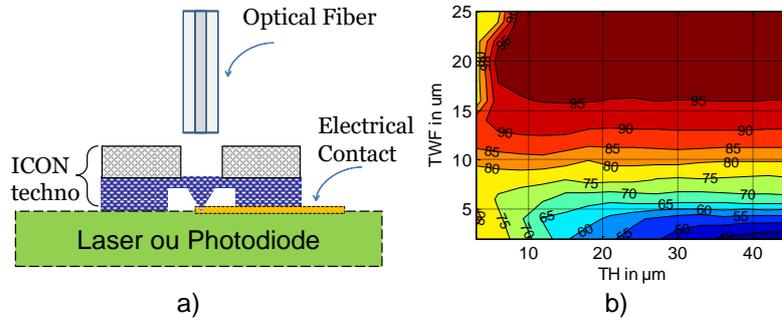


Fig. 1. a) Schématisation du système de couplage proposé en mode profilé; b) simulation du taux de couplage optique entre une fibre optique monomode à 1550 nm et un détecteur de 10  $\mu\text{m}$  avec la présence de la structure SU-8 en forme de taper. Les résultats des taux de couplage sont en fonction du diamètre de la partie supérieure du cône (TWF) et la hauteur du cône (TH)

### 3. FABRICATION TECHNOLOGIQUE : APPROCHE DIAPHRAGME

La validation expérimentale du concept exploite une matrice de photodétecteur qui est réalisée sur un substrat de verre métallisé de 4pouces dans lequel des diaphragmes sont gravés, étapes du procédé G-1 et G-2 en Fig.2a). Un photodétecteur à grande surface de détection est alors placé régulièrement sous chaque diaphragme testé. Ceci permet d'obtenir aisément des photodétecteurs de surface et géométries variables en grand nombre, ayant tous les mêmes propriétés intrinsèque de conversion optique malgré des sections différentes. Une couche de polymère SU-8 est ensuite étalée par méthode de *spin-coating* avec une épaisseur contrôlée. L'étape finale G-3 est représentée en Fig.2-a) G-3 avec la fabrication de la structure de *taper*. Le contrôle de l'angle du taper se fait par une maîtrise du procédé de photolithographie. Les figure b) et c) montre les photographies MEB de réalisation des structures. La Fig.2 b) montre la réalisation du taper sans structure d'ancrage et la Fig.2c) avec structure d'ancrage avec deux bras de maintien.

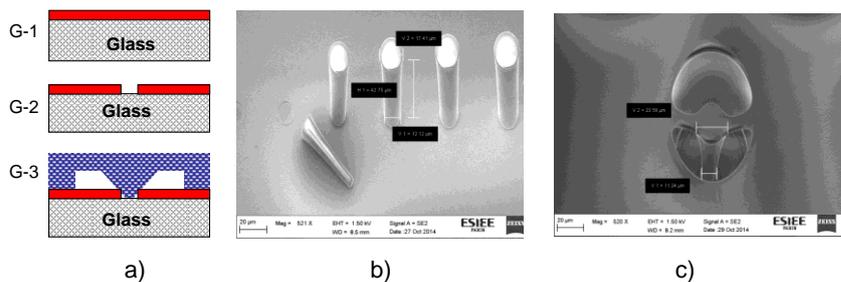


Fig. 2. a) procédé de fabrication technologique; b) photographie MEB du cône en SU-8 sans bras de suspension avec différents diamètres de base ; c) photographie MEB du cône avec deux bras de suspension

### 4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La structure testée présente un côté de photodétecteur de 10  $\mu\text{m}$ . Le diamètre du taper est de 11  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$ , respectivement pour la partie basse et haute du taper, et sa hauteur est de 42  $\mu\text{m}$ . Elle est testée expérimentalement avec une fibre optique monomode excitée par un laser à 1550 nm. L'extrémité de la fibre est clivée et placée à la verticale de la structure. Sa position est contrôlée par un nano-positionneur qui permet de balayer la surface du cône de polymère avec une précision de 20 nm. Le schéma de la structure sous test est représenté sur la Fig.3 a). La fibre pour des

commodités de test est dans un premier temps décollée de la structure avec un espace d'air entre les deux d'environ 10  $\mu\text{m}$ . Une cartographie est alors réalisée lors du balayage de la fibre. La même cartographie est réalisée pour un diaphragme non recouvert de la structure de couplage, qui constitue alors la référence. Les taux de couplages ainsi comparés sont présentés sur la Fig.3.

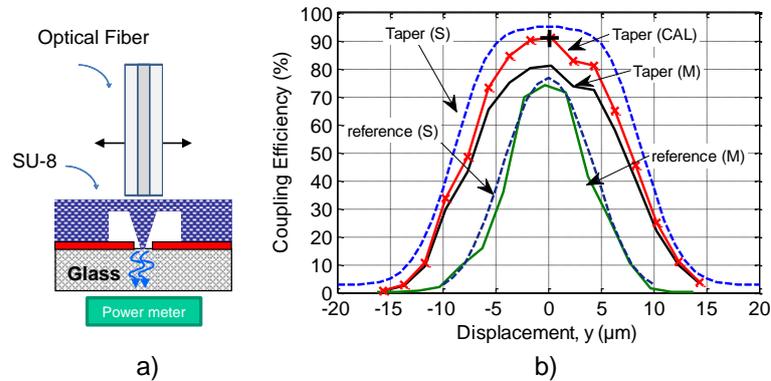


Fig. 3. a) schéma en coupe de la caractérisation de la structure; b) résultats expérimentaux (M) et simulés (S) du taux de couplage en fonction de la position de la fibre optique pour la structure avec un espace d'air de 10 $\mu\text{m}$  entre la fibre et le taper ou la structure de référence ; La courbe CAL extrapole la courbe de mesure pour le cas du contact entre la fibre et le taper.

Les résultats expérimentaux sur la structure optique de couplage montrent une valeur maximale du taux de couplage de 81 % lorsqu'un gap d'air est placé entre la fibre et le cône. Ce taux de couplage est mesuré à 91 % lorsque la fibre rentre en contact avec la structure. De la cartographie mesurée avec ce gap d'air, une cartographie si la fibre était en contact est alors estimée par le calcul pour fournir la courbe dénommée CAL. La comparaison entre mesure et simulation est ainsi présentée qui montre un assez bon accord avec un coefficient maximal de couplage de 94 % en simulation contre une mesure à 91 %. Une largeur à mi-hauteur est mesurée pour un FWHM de  $\pm 8 \mu\text{m}$ . Un taux de couplage maximum de 75 % avec une largeur à mi-hauteur (FWHM) de  $\pm 5 \mu\text{m}$  est obtenu pour le diaphragme seul, référence. Les résultats des mesures (M) sont également confrontés aux résultats de simulation (S). Ceci valide l'amélioration apportée par la structure.

## CONCLUSION

Une structure de couplage optique vertical originale a ainsi été proposée permettant d'améliorer le taux de couplage de photodétecteurs rapides de petites dimensions à la fibre optique. Une démonstration expérimentale a permis d'obtenir à 1550 nm un taux de couplage supérieur à 90 % pour une tolérance au désalignement de la fibre de  $\pm 8 \mu\text{m}$ . Ces résultats démontrent une tolérance au désalignement de la fibre permettant un alignement passif en exploitant des machines d'alignement standard. Cette structure propose ainsi des perspectives de réduction de coût et d'augmentation des performances importantes. À taux de couplage égal, elle permet également la réduction des dimensions des photodétecteurs à éclairage vertical permettant ainsi l'augmentation de leur bande passante.

## RÉFÉRENCES

- [1] J.L. Polleux and C. Viana, "Structure de couplage optique collective passive de composants optiques et opto-électroniques", Patent WO2015118131 A1, 13 August 2015
- [2] S. Bernabé et al., "Highly integrated VCSEL-based 10 Gb/s miniature optical sub-assembly", Proc. Electron. Compon. Technol. Conf., pp.1333 -1338, 2005.
- [3] I.-S. Chung et al., "Transverse-mode-selectable microlens vertical-cavity surface-emitting laser", Optical Society America: Optics Express, Volume 18, No. 5, 2010.
- [4] A. K. Nallani et al., "A method for improved VCSEL packaging using MEMS and ink-jet technologies", Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 3, pp. 1504–1512, 2006.
- [5] B. Ciftcioglu et al., "A 3-D integrated intra-chip free-space optical interconnect for many-core chips", IEEE Photonics Technology Letters, 23(3):164-166, 2011.

# INGENIERIE DE MICRO-RESONATEURS A MODES DE GALERIE EN ALGaaS/ALOx COUPLES VERTICALEMENT.

Clément Arlotti<sup>1</sup>, O. Gauthier-Lafaye<sup>1</sup>, Guilhem Almuneau<sup>1</sup>, Stéphane Calvez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, Université de Toulouse, CNRS, UPS, 31400 Toulouse, France

[carlotti@laas.fr](mailto:carlotti@laas.fr)

## RÉSUMÉ

**Nous proposons et étudions numériquement une nouvelle structure permettant de réaliser des résonateurs à micro-disques AlGaAs/AIOx couplés verticalement présentant des facteurs de qualité améliorés ( $Q \sim 10^6$ ).**

**MOTS-CLEFS :** *micro-résonateur ; couplage vertical ; AlGaAs*

## 1. INTRODUCTION

Les résonateurs à modes de galerie, qu'ils soient déclinés sous forme de micro-disques, anneaux ou toroïdes, sont devenus les éléments constitutifs clés de nombreux composants photoniques de haute performance notamment de filtres de grande pureté spectrale, de lasers ou de convertisseurs non linéaires à faible seuil, ou encore de capteurs de haute sensibilité [1]. Les réalisations à l'aide de semiconducteurs III-V sont particulièrement attrayantes vu qu'elles ouvrent la possibilité d'intégrer conjointement des sections actives et passives et donc de diversifier les fonctionnalités sur une même puce photonique. Au niveau technologique, le choix d'intégrer le résonateur verticalement au-dessus de ses guides d'accès présente l'intérêt de pouvoir distribuer les fonctions actives et passives sur des plans distincts et de faciliter la réalisation de composants de hautes performances grâce à des procédés de fabrication mieux maîtrisés. En pratique, cette approche s'avère néanmoins plus complexe que l'intégration latérale car, généralement, elle requière des étapes sophistiquées telles que le report sur substrat hôte [2] ou la planarisation [3]. Récemment, nous avons introduit une technique exploitant la filière AlGaAs/AIOx pour réaliser, à l'aide d'étapes simples, des micro-disques couplés verticalement [4]. Après un rappel de cette approche et des performances obtenues, nous identifierons l'origine des limitations rencontrées et proposons une solution pour créer des résonateurs présentant de meilleurs facteurs de qualité.

## 2. RESONATEURS ALGaaS/ALOx A COUPLAGE VERTICAL

Comme le montre la fig. 1., l'approche considérée s'appuie sur l'utilisation de l'oxydation latérale sélective des alliages AlGaAs à forte teneur en aluminium pour créer en profondeur des guides d'onde (d'accès) sans introduire de corrugation de surface.

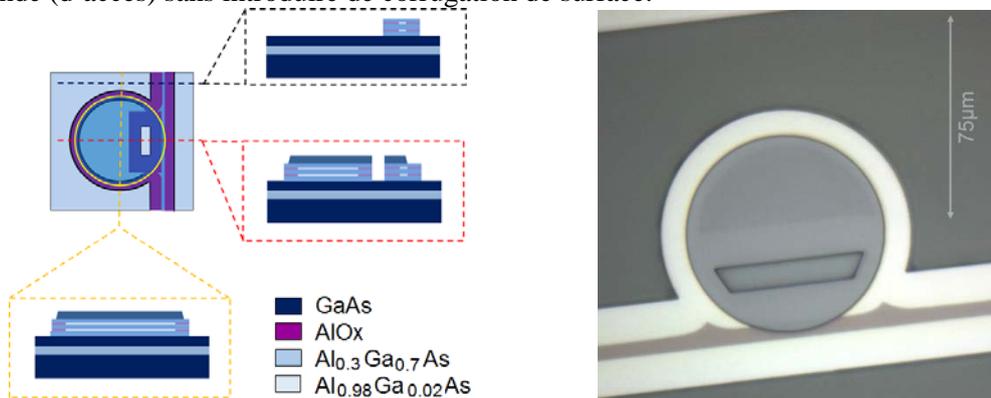


Fig. 1 : Schéma et photo au microscope optique d'un résonateur AlGaAs couplé verticalement à son guide d'accès à confinement d'oxyde (AlOx)

En termes de caractéristiques optiques, des mesures de transmission réalisées en utilisant un laser accordable avec une longueur d'onde centrale de 1.6  $\mu\text{m}$  et une précision de 10pm montrent, comme attendu et indiqué sur la fig. 2, que les spectres sont composés d'ensembles de lorentziennes inversées lorsque les disques sont de diamètre supérieur à 75  $\mu\text{m}$ . L'analyse de ces résonances révèle que les facteurs de qualité, Q, associés varient entre 4400 (D=75 $\mu\text{m}$ ) et ~8000 (D=300 $\mu\text{m}$ ).

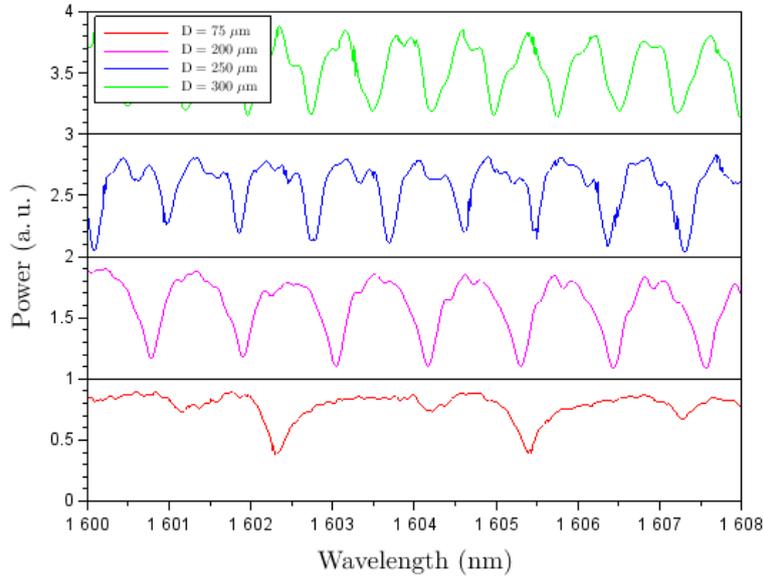


Fig. 2 : Mesure de la transmission de résonateurs en forme de micro-disques de différent diamètre.

### 3. LIMITATIONS ET PROPOSITION D'AMELIORATION

Afin de fabriquer des résonateurs aux performances améliorées, nous avons mené une étude approfondie du couplage évanescent entre le résonateur et la zone d'accès.

En particulier, des simulations numériques par éléments finis 3D nous ont permis d'identifier les pertes vers le guide plan sous-jacent au micro-disque comme la principale limitation au facteur de qualité [5], comme l'attestent les courbes bleue et verte de la fig. 3.

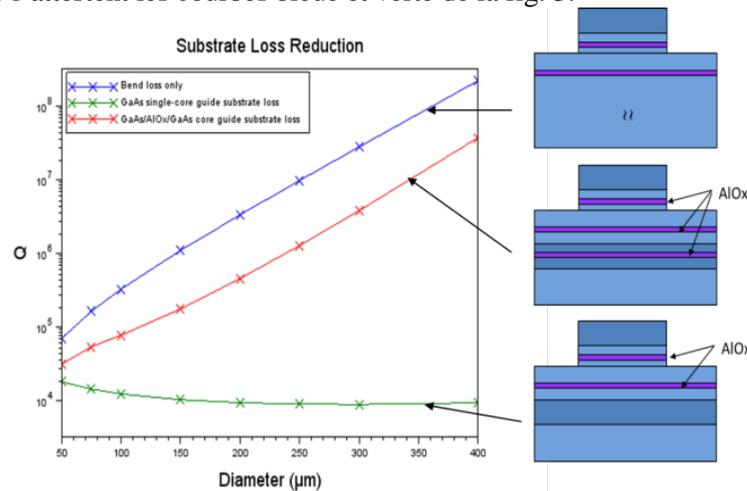


Fig. 3 : Evolution du facteur de qualité avec le diamètre du résonateur pour des structures présentant différents niveaux de pertes vers le substrat (guide-plan)

Le même type de calculs a aussi permis de concevoir un nouvel empilement vertical présentant un guide plan d'indice effectif de réfraction réduit qui devrait permettre de palier à cette limitation (courbe rouge de la fig. 3).

L'optimisation du couplage a ensuite été réalisée grâce à une extension de la théorie des modes couplés (CMT) aux structures multi-couches que nous avons développée [6] et à la prise en compte des différentes sources de pertes (par courbure, rugosité (5nm rms), et fuite résiduelle vers le guide plan). Ceci nous a permis de prédire les performances escomptées des résonateurs exploitant le nouvel empilement vertical et de démontrer qu'il devrait être possible de fabriquer des résonateurs à micro-disque de 300 $\mu\text{m}$  de diamètre et de facteur de qualité atteignant  $10^6$  (cf. fig. 4).

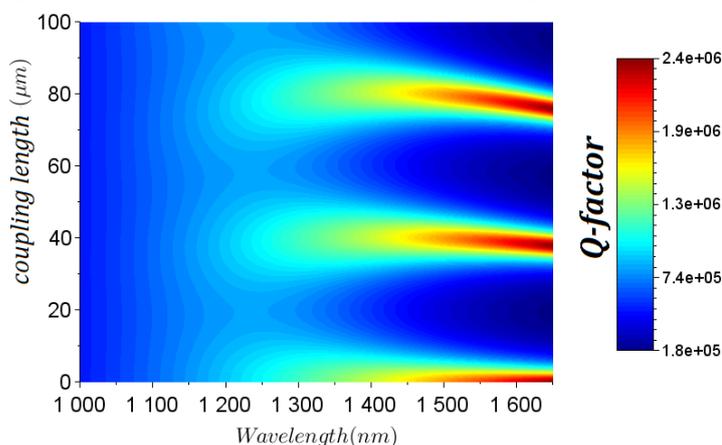


Fig. 4 : Evolution du facteur de qualité en fonction de la longueur de couplage et de la longueur d'onde pour des résonateurs de 300  $\mu\text{m}$  de diamètre

## CONCLUSION

Des résonateurs à base d'AlGaAs/AlO<sub>x</sub>, en forme de micro-disques couplés verticalement à leur guide d'accès à confinement d'oxyde ont été fabriqués et caractérisés. La limitation des performances a été identifiée comme provenant essentiellement des fuites vers le guide plan intrinsèquement associé au guide d'accès. Le dessin d'une nouvelle structure multicouche permettant de réduire ces pertes a été introduit. Nous avons également étendu la théorie des modes couplés à la simulation de ces structures multicouches, réalisant ainsi une étude paramétrique du système monomode à couplage vertical et mettant en avant la faisabilité d'obtenir des résonateurs dont le facteur de qualité peut dépasser le million. La validation expérimentale de la variante proposée est en cours et les résultats afférents seront présentés à la conférence.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Délégation Générale de l'Armement et le Centre National d'Etudes Spatiales pour leur soutien (doctorat de C. Arlotti et R et T « peignes de fréquences sur puce »).

## RÉFÉRENCES

- [1] V. S. Ilchenko and A. B. Matsko, "Optical resonators with whispering-gallery modes-part II: applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 1, pp. 15–32, Jan. 2006.
- [2] P. P. Absil *et al.*, "Wavelength conversion in GaAs micro-ring resonators," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 8, pp. 554–556, 2000.
- [3] Y. Kokubun, Y. Hatakeyama, M. Ogata, S. Suzuki, and N. Zaizen, "Fabrication technologies for vertically coupled microring resonator with multilevel crossing busline and ultracompact-ring radius," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 4–10, Jan. 2005.
- [4] S. Calvez *et al.*, "Vertically Coupled Microdisk Resonators Using AlGaAs/AlO<sub>x</sub> Technology," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 27, no. 9, pp. 982–985, May 2015.
- [5] S. Calvez *et al.*, "III-V-semiconductor vertically-coupled whispering-gallery mode resonators made by selective lateral oxidation," in *Proc. of SPIE*, San Francisco, California, USA, 2016, vol. 9727, p. 97270A.
- [6] C. Arlotti, G. Almuneau, O. Gauthier-Lafaye, and S. Calvez, "Coupled mode analysis of micro-disk resonators with an asymmetric-index-profile coupling region," in *proc. of SPIE*, San Francisco, California, USA, 2017, vol. 10090, p. 100901D.

# RESONATEURS PLASMONIQUES INTEGRES POUR LE PIEGEAGE OPTIQUE

**Giovanni Magno, Aurore Ecarnot, Vy Yam, Béatrice Dagens**

*Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, C2N-Orsay, 91405 Orsay Cedex, France*

[giovanni.magno@u-psud.fr](mailto:giovanni.magno@u-psud.fr), [beatrice.dagens@u-psud.fr](mailto:beatrice.dagens@u-psud.fr)

## RÉSUMÉ

Dans le présent article nous proposons une nouvelle plateforme, intégrée et versatile, pour exciter le champ proche de manière efficace et piéger optiquement des nanoparticules. Grâce au couplage fort existant entre un guide d'onde de type silicium sur verre et un guide à plasmons localisés, il est possible de concevoir des dispositifs compacts qui peuvent trouver leurs applications dans les circuits micro-fluidiques.

**MOTS-CLEFS :** *piégeage optique, plasmonique, couplage fort, champ proche*

## 1. INTRODUCTION

Les travaux pionniers d'Arthur Ashkin [1] ont montré que les forces mises en jeu dans l'interaction lumière-matière peuvent être exploitées afin de manipuler et ainsi piéger des petites particules dispersées dans un milieu liquide, notamment grâce à l'action de faisceaux lasers focalisés. Afin d'obtenir un piégeage stable, il est impératif d'avoir une localisation du champ électromagnétique dans des régions ayant un volume comparable ou inférieur à ceux de l'objet que l'on veut piéger. Cependant, dans les systèmes diélectriques, la largeur des faisceaux est limitée par la diffraction. En conséquence, la taille des particules à piéger reste supérieure à des dimensions de l'ordre de la longueur d'onde. Par ailleurs les systèmes plasmoniques, notamment les structures à base de métal noble, permettent d'exalter et localiser le champ proche dans des volumes fortement sublongueur d'onde. Une interface métallique continue supporte un mode de type plasmon polariton de surface, tandis qu'un résonateur métallique limité dans l'espace supportera un mode de type plasmon de surface localisé. Dans le cas d'un réseau de particules métalliques, il est possible d'observer une propagation des plasmons de surface localisés par couplage dipolaire entre les différents résonateurs [2]. Ce type de structure présente à la fois des caractéristiques propres aux guides d'onde mais aussi une forte localisation du champ proche typique des résonateurs localisés [3-5]. En exploitant cette topologie de guide plasmonique, nous montrons dans cet article qu'il est possible de réaliser des structures compactes et intégrées dédiées au piégeage optique de nanoparticules[6].

## 2. STRUCTURE, METHODE ET DISCUSSION

Nous proposons ici un dispositif composé d'un guide d'onde en silicium sur verre (SOI) sur lequel sont déposées  $N$  nanoparticules d'or de forme cylindrique à section ellipsoïdale. Chaque nanoparticule a pour dimensions de la section ellipsoïdale  $r_x = 40$  nm et  $r_y = 100$  nm et pour hauteur du cylindre  $h = 30$  nm. Les particules sont disposées selon la direction de propagation du guide avec un pas constant  $d$  comme représenté sur la Fig. 1(a). Le nombre de particules  $N$  comme le pas  $d$  sont des paramètres d'étude. Le guide d'onde SOI a pour hauteur  $h_{wg} = 220$  nm et pour largeur  $l_{wg} = 500$  nm. La structure est immergée dans l'eau dans laquelle sont dispersées des particules sphériques de faible indice de réfraction (polystyrène  $n=1,58$  ou particules biologiques  $n=1,38$ ). Les dimensions des particules métalliques ont été choisies pour obtenir une résonance plasmonique dans l'intervalle spectral de l'infrarouge. Le guide SOI a été dimensionné afin d'être monomode autour de  $1,55$   $\mu\text{m}$ .

La Fig. 1(b) représente la structure de bande (lignes rouges) du système couplé lorsque le nombre de particules est infini. Elle est obtenue par simulation 3D FDTD (on considère ici une cellule unitaire avec des conditions périodiques au bord). Pour mieux comprendre le phénomène de couplage de ce système, nous avons reporté sur cette figure la courbe de dispersion du mode fondamental TE du guide SOI sans particule (ligne pointillée verte) et celle du mode plasmonique supporté par la chaîne lorsque les particules sont posées sur un substrat en silicium (ligne pointillée bleue)

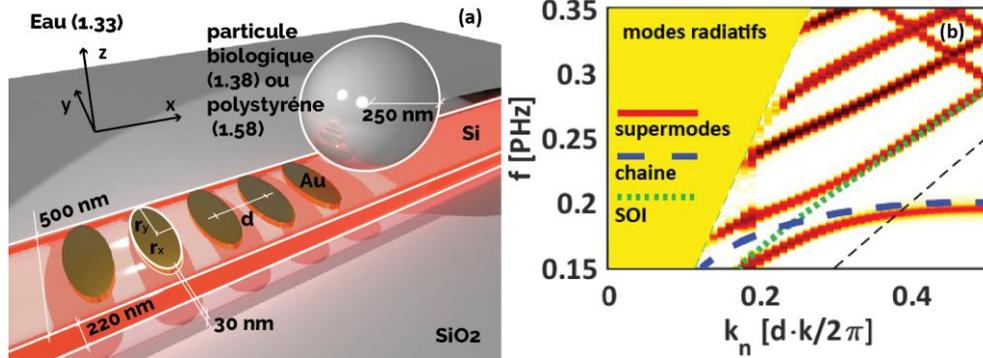


Fig. 1 : (a) Schéma du système proposé. (b) Structure de bande du système couplé.

Lorsque la chaîne plasmonique est placée à proximité du guide SOI, l'interaction entre leurs modes génère deux supermodes montrant un anti-croisement qui résulte d'un phénomène de couplage fort entre les deux guides. Ainsi les courbes de dispersion des supermodes sont très éloignées entre elles (i.e. système couplé loin de la condition d'accord de phase). C'est ce dernier résultat qui permet au système couplé de bénéficier de longueurs de couplage très courtes. Cette condition est impérative dans la conception de dispositifs compacts. La Fig. 2 montre la distribution de la composante y du champ électrique  $|E_y|$  calculée au-dessus des éléments plasmoniques quand  $y=0$  (centre du guide, voir Fig.1(a)) en fonction de l'axe de propagation  $x$  du guide et de la longueur d'onde pour une chaîne périodique constituée de  $N$  éléments et de période  $d$ . La période  $d$  varie entre 110 et 160 nm et  $N$  varie entre 1 et 8 éléments.

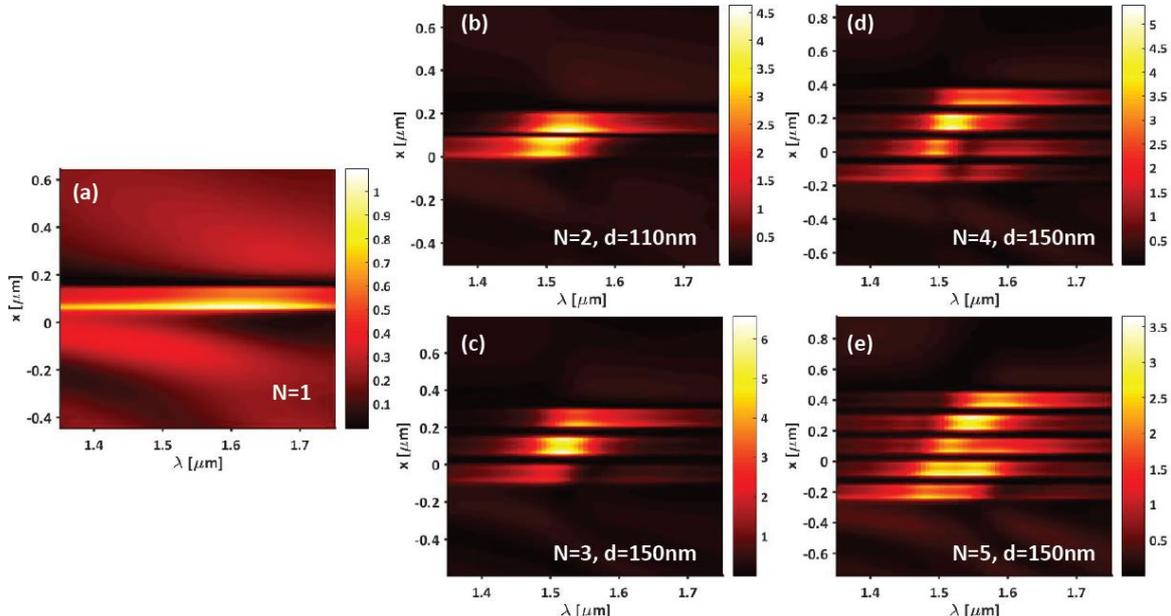


Fig. 2 : Distribution de la composante y du champ électrique  $|E_y(x,y=0,h,\lambda)|$  pour différentes valeurs de  $N$  et de  $d$ .

La Fig. 2 montre les combinaisons  $(N, d)$  pour lesquelles la valeur de  $|E_y|$  est maximisée. La Fig. 2(c) ( $N=3$ ) présente une valeur de  $|E_y|$  la plus élevée montrant que, pour des chaînes très courtes, le régime de couplage fort est déjà installé. Cette constatation est confirmée dans l'analyse de la dispersion des

mêmes configurations (non reporté ici) montrant la formation d'un anti-croisement qui se manifeste déjà pour  $N=2$ . La Fig. 2 montre aussi que la position du maximum de  $|E_y|$  (point chaud) le long de la chaîne dépend de la longueur d'onde. Il a été démontré dans [6] que des structures ayant  $N=4$  et 5 éléments peuvent être optimisées afin d'obtenir un déplacement continu du point chaud le long du dispositif en fonction de la longueur d'onde. Ceci offre la possibilité de réaliser des positionneurs opto-mécaniques. Ce dispositif permet de piéger de façon très stable des nanoparticules et contrôler leur position simplement en changeant la longueur d'onde injectée dans le guide d'onde. Pour  $N=2$  et des gaps très petits, un régime de type « dimère » peut être exploité pour augmenter l'exaltation et la localisation du champ proche. Cela permet d'obtenir des pièges optiques montrant des constantes de raideur très élevées (voir Fig. 3) qui peuvent être exploitées pour piéger des particules diélectriques avec un rayon aussi petit que 50 nm.

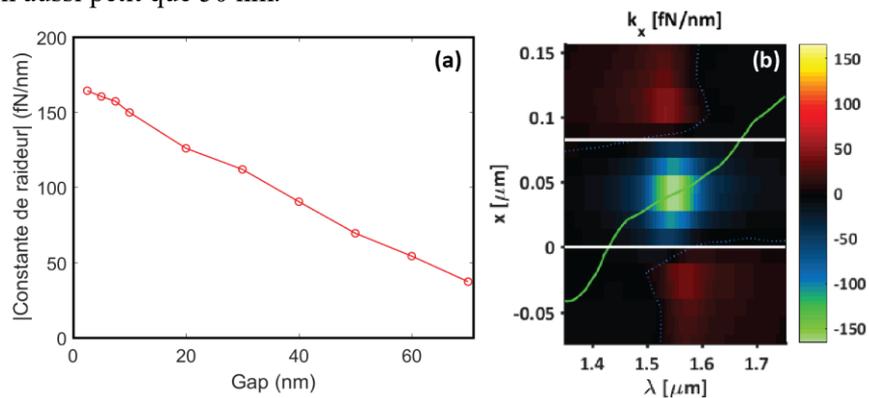


Fig. 3 : (a) Valeur absolue de la constante de raideur du piège optique en fonction du gap. (b) Cartographie de la constante de raideur en fonction de la position de la nanoparticule piégée et de la longueur d'onde quand  $g=2,5\text{nm}$ . La ligne verte décrit toutes les configurations stables où la force totale dans la direction  $x$  est nulle. La ligne bleue en pointillé décrit toutes les configurations montrant une constante de raideur nulle.

## CONCLUSION

Nous avons montré qu'un guide d'onde SOI fortement couplé à une chaîne plasmonique de nanoparticules d'or permet de réaliser des pinces optiques intégrées et versatiles. En particulier, les chaînes ayant 4 et 5 éléments ont la capacité de contrôler ponctuellement la position où la particule est piégée pour la réalisation de nano-positionneurs intégrés. Par ailleurs, les dimères intégrés permettent la localisation du champ proche dans des régions très compactes, favorisant ainsi la conception de pinces optiques intégrées dédiées aux nanoparticules ayant des rayons très petits (50 nm).

## RÉFÉRENCES

- [1] Ashkin, A., J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, and S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Optics Letters* 11(5), pp. 288-290 1986.
- [2] Février, M., P. Gogol, A. Aassime, R. Mégy, C. Delacour, A. Chelnokov, A. Apuzzo, S. Blaize, J.-M. Lourtioz, and B. Dagens, "Giant Coupling Effect between Metal Nanoparticle Chain and Optical Waveguide," *Nano Letters* 12(2), pp. 1032-1037 2012.
- [3] Dagens, B., M. Février, P. Gogol, S. Blaize, A. Apuzzo, G. Magno, R. Megy, and G. Lerondel, "Direct Observation of Optical Field Phase Carving in the Vicinity of Plasmonic Metasurfaces," *Nano Lett* 16(7), pp. 4014-4018 2016.
- [4] Février, M., P. Gogol, G. Barbillon, A. Aassime, R. Mégy, B. Bartenlian, J.-M. Lourtioz, and B. Dagens, "Integration of short gold nanoparticles chain on SOI waveguide toward compact integrated bio-sensors," *Optics Express* 20(16), pp. 17402-17409 2012.
- [5] Apuzzo, A., M. Février, R. Salas-Montiel, A. Bruyant, A. Chelnokov, G. Léronnel, B. Dagens, and S. Blaize, "Observation of near-field dipolar interactions involved in a metal nanoparticle chain waveguide," *Nano letters* 13(3), pp. 1000-1006 2013.
- [6] Magno, G., A. Ecarnot, C. Pin, V. Yam, P. Gogol, R. Mégy, B. Cluzel, and B. Dagens, "Integrated plasmonic nanotweezers for nanoparticle manipulation," *Optics Letters* 41(16), pp. 3679-3682 2016.