

# CAPTEUR OPTIQUE INTEGRE A EFFET VERNIER EN POLYMERES

Paul Azuelos<sup>1</sup>, Fabien Cassio<sup>1</sup>, Nathalie Lorrain<sup>1</sup>, Parastesh Pirasteh<sup>1</sup>, Jonathan Lemaître<sup>1</sup>, Luiz Poffo<sup>1</sup>, Isabelle Hardy<sup>1-2</sup>, Monique Thual<sup>1</sup>, Mohammed Guendouz<sup>1</sup> et Joël Charrier<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> UMR FOTON, CNRS, Université de Rennes 1, Enssat, F22305, Lannion, France

<sup>2</sup> UMR FOTON, CNRS, IMT Atlantique, F29238, Brest, France

[mohammed.guendouz@univ-rennes1.fr](mailto:mohammed.guendouz@univ-rennes1.fr)

## RÉSUMÉ

Un biocapteur optique intégré à effet Vernier à base de matériaux polymères SU8/PMATRIFE ultrasensible est réalisé en utilisant un procédé photolithographique standard. Le capteur est basé sur un micro-résonateur intégré sur chaque bras d'un interféromètre Mach-Zehnder. Les performances du transducteur sont ensuite caractérisées et la limite de détection est estimée par la méthode de Monte-Carlo et les incertitudes liées au système de mesure. Une sensibilité du capteur de 17558 nm/RIU a été mesurée et la limite de détection a été estimée à  $4,6 \cdot 10^{-7}$  RIU.

**MOTS-CLEFS :** *polymères, capteur optique, effet Vernier, sensibilité, limite de détection*

## 1. INTRODUCTION

La demande croissante de capteurs ultra-sensibles et compacts pour la détection rapide et spécifique de divers analytes biochimiques a induit le développement d'un grand nombre de capteurs optiques intégrés sans marquage. Contrairement aux capteurs à fibre optique, les capteurs optiques intégrés peuvent être facilement miniaturisés et peuvent donc être intégrés en grand nombre sur une petite surface afin d'implanter des laboratoires sur puce [1]. Plusieurs configurations de capteurs optiques intégrés utilisant des matériaux massifs ont été démontrées dans le but d'augmenter la sensibilité et de réduire la limite de détection comme, par exemple, les interféromètres Mach-Zehnder (MZ), les micro-résonateurs (MR), ...[2,3] Une solution pour augmenter la sensibilité d'un capteur optique intégré basé sur un interféromètre tel que le Mach-Zehnder est d'augmenter la longueur d'interaction entre les molécules cibles et la lumière, mais cela réduit cependant la capacité de miniaturisation. Pour augmenter encore la sensibilité d'un tel capteur optique intégré, les configurations à effet Vernier basées sur des MRs mis en cascade ou utilisant à la fois des MZs et des MRs, sont maintenant largement reconnues dans les applications optiques intégrées non seulement pour le filtrage [4] mais aussi de plus en plus pour la détection de diverses substances [5]. Les sensibilités sont augmentées d'un facteur allant jusqu'à plusieurs centaines de fois celui d'un seul MR, ce qui peut alors réduire la limite de détection du capteur et faciliter la détection d'analytes à faible concentration. Diverses configurations à effet Vernier en silicium sur isolant (SOI) ou en nitrure de silicium (SiN) ont été proposées expérimentalement. Une structure avec un MR intégré sur chaque bras d'un MZ a également été étudiée théoriquement [6]. Dans ce travail, l'avantage de la dernière configuration est étudié théoriquement et expérimentalement en utilisant des matériaux polymères qui offrent à la fois une production de masse à faible coût avec des procédés standards de photolithographie en salle blanche et de faibles pertes de propagation [7]. Le polymère PMATRIFE (poly(2,2,2,2 méthacrylate de TRIFluoro-éthyle)) est utilisé comme couche de confinement optique pour la gaine et le superstrat, alors que le polymère SU8 est utilisé pour le cœur du guide d'onde. La nouveauté de ce travail consiste à tirer parti de ces matériaux polymères à faible coût pour mettre en œuvre un biocapteur à effet Vernier, basé sur un MR intégré sur chaque bras d'un MZ, ultrasensible et présentant une très faible limite de détection.

## 2. DESIGN

Le transducteur est fabriqué par un procédé classique de photolithographie. La figure 1a présente la vue de dessus du capteur optique intégré à base de polymères. Le polymère SU8 est utilisé pour le cœur de la structure optique et le polymère PMATRIFE comme couche de confinement inférieure et aussi comme superstrat pour la partie de référence du capteur. Pour réaliser la partie sensible du capteur, une gravure de la couche de confinement supérieur en PMATRIFE est gravée afin d'obtenir un réservoir (partie plus claire de la figure 1a). La zone de couplage est représentée sur la figure 1b, avec un gap de  $0,6 \mu\text{m}$  entre le guide d'accès et la cavité sur une longueur de  $34 \mu\text{m}$ . La figure 1c présente une vue en coupe du guide d'onde dans la partie de référence : le cœur du guide, en SU8, de dimension  $1,5 \mu\text{m} \times 1,5 \mu\text{m}$ , entre deux couches de confinement inférieure et supérieure en PAMTRIFE.

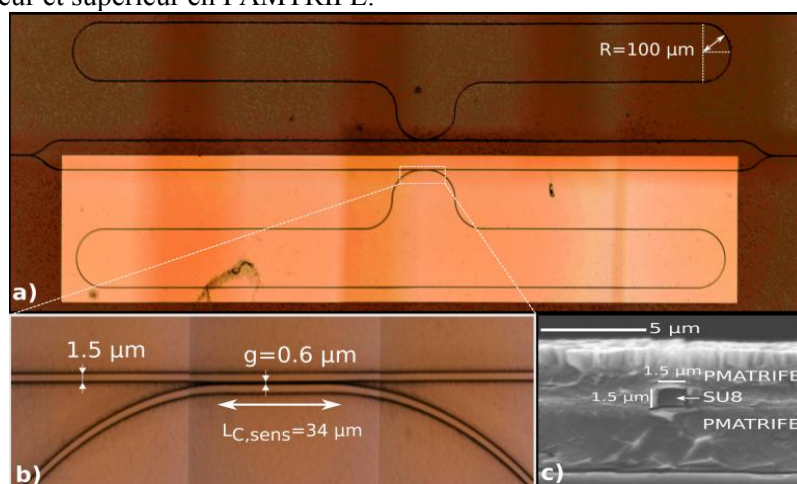


Figure 1 – a) Vue de dessus au microscope optique d'un transducteur à effet Vernier en polymères. b) Zoom sur la zone de couplage dans le réservoir du MR sensible. c) Vue transversale au MEB d'un guide SU8/PMATRIFE avec superstrat de PMATRIFE.

## 3. CARACTERISATIONS OPTIQUES

Des solutions contenant différentes concentrations de glucose (de 0 à 7,5 g/L) sont déposées successivement dans le réservoir du transducteur et la puissance en sortie du transducteur est acquise (figure 2a); une mesure de référence à l'eau désionisée est réalisée entre chaque solution.

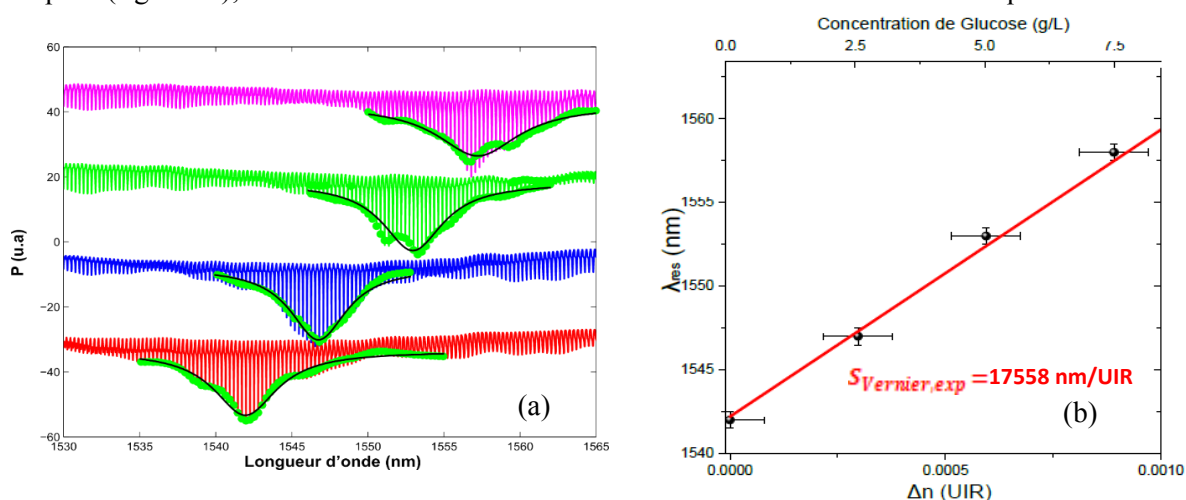


Figure 2 – (a) Fonction de transfert expérimentale du transducteur à effet Vernier pour différentes concentrations d'eau glucosée. Les fonctions de transfert sont décalées en ordonnée de 25 dB pour faciliter la lecture. (b) Position du maxima de l'enveloppe du transducteur à effet Vernier en fonction de la concentration de la solution de glucose, la sensibilité du transducteur correspond à la pente de cette courbe.

Afin de mesurer précisément le décalage de l'enveloppe, celle-ci est extraite par l'ajustement d'une fonction Lorentzienne avec les maxima de la réponse du transducteur en longueur d'onde à l'aide de la méthode des moindres carrés. La sensibilité peut alors être estimée par la pente du décalage de l'extremum de l'ajustement Lorentzien avec la concentration de glucose à  $S_{\text{Vernier,exp}} = 17558$  nm/UIR (unité d'indice de réfraction) avec une incertitude relative de 5% sur la mesure résultant d'une incertitude thermique de  $\Delta th = 1^\circ\text{C}$  ( $\Delta\lambda = 1$  nm) et de l'incertitude sur la concentration de glucose dans les solutions  $\Delta C_{\text{glucose}} = 0,25$  g/L (figure 2b). Le gain Vernier correspondant au rapport de la sensibilité obtenue grâce à l'effet Vernier par rapport à un MR seul [7] est de 152, au meilleur de l'état de l'art. La limite de détection (LD) du transducteur à effet Vernier en polymères peut être calculée à l'aide de la sensibilité expérimentale  $S_{\text{Vernier,exp}}$  mesurée et de l'intervalle spectral libre (ISL) du MR de référence  $\text{ISL}_{\text{ref}} = 0,19$  nm ;  $\text{LD}_{\text{Vernier}}$  est alors de  $1,1 \cdot 10^{-5}$  UIR.

Afin d'optimiser la LD, un filtre passe-bas a été appliqué afin d'extraire l'extrema de l'enveloppe et de détecter ainsi le décalage de l'enveloppe de manière continue entraînant une amélioration de la précision de la mesure. En utilisant cette méthode, un décalage minimum détectable de 8 pm est obtenu permettant d'atteindre une limite de détection du transducteur estimée à  $4,6 \cdot 10^{-7}$  UIR, ce qui correspond à une concentration en glucose de  $3,7 \cdot 10^{-3}$  g/L.

## CONCLUSION

Un nouveau transducteur optique basé sur l'effet Vernier a été développé pour la détection du glucose. Le transducteur est fabriqué en matériaux polymères en utilisant un procédé photolithographique standard. Ce transducteur est constitué d'un MR intégré sur chaque bras d'un interféromètre MZ. La sensibilité du transducteur développé dans ce travail est de plus de 152 fois plus élevée que celle d'un capteur à MR simple en polymères SU8/PMATRIFE avec un procédé de fabrication similaire, ce qui démontre l'avantage du capteur à effet Vernier par rapport à un capteur à un MR seul pour l'amélioration de la sensibilité [7], et une limite de détection faible de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-7}$  UIR. La sensibilité expérimentale du transducteur obtenue de 17558 nm/UIR est fortement augmentée par rapport à d'autres transducteurs à effet Vernier basés sur des MR en cascade développés par Y.Liu.et.al [8] utilisant des matériaux SOI ou par V.Zamora.et.al [9] utilisant du SiN. La limite de détection obtenue a été améliorée grâce à l'application d'un filtre sur le traitement des maxima de l'enveloppe.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. C. Estevez, M. Alvarez, and L. M. Lechuga, "Integrated optical devices for lab-on-chip biosensing applications", *Lasers & Photonics Review* 6(4), 463-487 (2012).
- [2] Q. Liu, X. Tu, K. W. Kim, J. S. Kee, Y. Shin, K. Han, Y. J. Yoon, G. Q. Lo, and M. K. Park, "Highly sensitive Mach-Zehnder interferometer biosensor based on silicon nitride slot waveguide", *Sensors and Actuators B* 188, 681-688 (2013).
- [3] C. Ciminelli, F. Dell'Olio, D. Conteduca, C. M. Campanella, and M. N.Armenise, "High performance SOI microring resonator for biochemical sensing", *Optics and Laser Technology* 59, 60-67 (2014).
- [4] R. Boeck, N. Jaeger, N. Rouger, and L. Chrostowski, "Series-coupled silicon racetrack resonators and the Vernier effect: theory and measurement", *Opt. Express* 18(24), 25151-25157 (2010).
- [5] M. La Notte, B. Troia, T. Muciaccia, C. E. Campanelle, F. De Leonardis, and V. M.N. Passaro, "Recent advances in gas and chemical detection by Vernier effect-based photonic sensors", *Sensors* 14(3), 4831-4855 (2014).
- [6] H. Yi, D.S. Citrin, Y. Chen, and Z. Zhou, "Dual-microring-resonator interference sensor", *Applied Physics Letters* 95(), 191112 (2012).
- [7] 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* 9141, 914121 (2014).
- [8] Y. Liu, Y. Li, M. Li, and J.J. He, "High sensitivity and wide-range optical sensor based on three cascaded ring resonators", *Optics Express* 25(2), 972-978 (2017).
- [9] V. Zamora, P. Lutzow, M. Weiland, and D. Pergande, "A highly sensitive refractometric sensor based on cascaded SiN microring resonators", *Sensors* 13(11), 14601-14610 (2013).