

MICROCIRCUITS PHOTONIQUES ELECTRO-OPTIQUES HYBRIDES 3D

Nadège Courjal¹, Florent Behague¹, Alexis Caspar¹, Miguel Suarez¹, Roland Salut¹, Olivier Lehmann¹, Maria-Pilar Bernal¹, Cédric Clévy¹, Philippe Lutz¹

¹ Laboratoire FEMTO-ST UMR CNRS 6174, Université Bourgogne Franche-Comté, 25000 Besançon, France

Nadege.courjal@femto-st.fr

RÉSUMÉ

Nous montrons comment des approches de structuration et assemblage dynamiques peuvent mener à la réalisation de nouvelles plateformes hybrides électro-optiques 3D. Des résonateurs en niobate de lithium et en oxyde de bismuth et de silicium intégrés à des guides à faibles pertes sont démontrés à titre d'exemple.

MOTS-CLEFS : *circuit photoniques, niobate de lithium, électro-optique*

I. INTRODUCTION

Alors que la photonique se substitue à l'électronique pour nombre d'applications allant des transmissions haut-débits au calcul neuromorphique, il existe un besoin d'architectures très spécifiques et difficilement accessibles aux technologies d'intégrations monolithiques. A titre d'exemple, l'intégration robuste à faible perte de micro-résonateurs actifs est un problème critique que nous illustrons ici avec deux matériaux électro-optiques (EO) très attractifs : le niobate de lithium (LiNbO_3), et les cristaux d'Oxyde de silicium et de Bismuth (BSO). Pour ce qui concernent les microrésonateurs LiNbO_3 , ils sont très attractifs pour les propriétés électro-optiques, acousto-optiques et non linéaires du matériau, qui offrent des perspectives d'applications très variées : gyromètres intégrés, spectromètres, filtres dynamiques ou modulateurs. L'engouement pour ces applications a motivé de nombreuses études, et les facteurs de qualité à l'état de l'art sont de 10^7 [1]. Il existe actuellement deux approches pour intégrer ces résonateurs : le couplage avec une fibre étirée permet de faibles pertes [2] mais la fibre est trop fragile pour être envisagée comme une solution commerciale. Quant à l'intégration monolithique, où le guide d'onde et le microrésonateur sont produits simultanément sur un wafer par des procédés en salle blanche, elle est robuste, avec de faibles pertes de propagation (< 1 dB/cm)[3-4]. Mais les pertes d'insertion sont généralement supérieures à 10 dB en raison du grand désaccord de mode entre les fibres et les microguides confinés. Nous proposons ici de réduire significativement les pertes de couplage en assemblant dynamiquement un microguide à faibles pertes [5] et un microdisque. Cette approche hybride ouvre la voie à la réalisation de circuits 3D dans d'autres matériaux : nous illustrons son application au BSO, moins connu que le niobate de lithium, mais très attractif pour ses propriétés gyrotropiques, scintillatrices, électro-optiques et photoréfractives.

2. MICRO-RESONATEUR ASSEMBLE LiNbO_3

Le schéma de principe est représenté en figure 1(a). Un guide d'onde LiNbO_3 classique réalisé par diffusion titane est aminci localement : dans la section suspendue, le guide d'ondes a une épaisseur de $2 \mu\text{m}$. Il est entouré d'électrodes permettant un contrôle électrique de l'indice de réfraction effectif. Une gravure locale est effectuée des deux côtés du guide d'ondes, de manière à former un ridge confinant la lumière latéralement dans la membrane (voir le bas de la figure 1(b)). Un couplage à faibles pertes (0.8 dB/facette) entre le guide et une fibre SMF est garanti par des zones de transitions adiabatiques aux extrémités du guide. Cette approche permet, outre de faibles pertes d'insertion (< 3 dB), un filtrage adiabatique du mode fondamental à l'intérieur de la section

amincie. Un microdisque est ensuite fabriqué séparément et assemblé au sommet du guide d'ondes, tout en mesurant simultanément la réponse optique, avant d'être fixé au guide par soudure. Cette approche permet d'optimiser séparément le microguide, le résonateur, puis le couplage entre les deux.

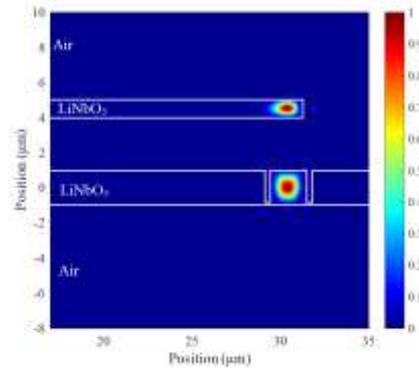
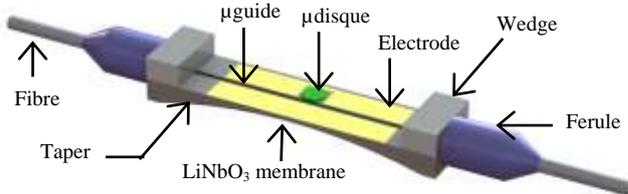


Fig. 1 : (a) Illustration schématique du microdisque LiNbO₃ intégré par assemblage. (b) Coupe transversale des champs électriques dans le disque (en haut) et dans le ridge suspendu (en bas). Les calculs sont effectués par la méthode des éléments finis (F.E.M.), COMSOL®.

Les calculs numériques, basés sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL® ont été effectués pour différentes architectures photoniques. La figure 1(b) donne un aperçu des modes calculés pour un guide d'ondes de 2 µm d'épaisseur et un microdisque de 1 µm d'épaisseur. Les calculs montrent également que le couplage est optimal avec des membranes de disque et de guide ayant une épaisseur inférieure à 2,5 µm et un disque placé au sommet du guide d'ondes. En effet, l'efficacité de couplage s'avère dans ce cas être 2 fois supérieure à celle de l'accouplement bord à bord le mieux calculé. Cette architecture est également préférable pour éviter les pertes dues à la rugosité potentielle des bords.

Tout d'abord, le microguide est fabriqué par des techniques standard (lithographie, Ti-diffusion, dépôt d'électrodes), puis le substrat est aminci localement jusqu'à 2 µm par découpage-polissage comme décrit dans [5]. Les zones adiabatiques sont obtenues en exploitant la forme arrondie de la lame de scie qui est soulevée l'extrémité du guide d'ondes. Le guide d'ondes en suspension libre est collé à deux fibres SMF28, comme le montre la figure 1(a). Les pertes de propagation mesurées sont de 0,2 dB/cm pour les deux polarisations de propagation et les pertes d'insertion sont inférieures à 3 dB.

Deux méthodes ont été testées pour la fabrication des microdisques. La première commence par un découpage à la scie circulaire et la seconde exploite un polissage chimico-mécanique suivi d'une gravure à sec. Ces deux méthodes aboutissent à des membranes LiNbO₃ minces qui sont transformées en microdisques par gravure locale au faisceau d'ions focalisés (FIB).

Enfin, le guide d'onde à faibles pertes et le microdisque sont placés dans un environnement FIB. Une gravure latérale est réalisée des deux côtés du guide d'ondes par fraisage FIB, conduisant à un ridge local dans la section suspendue. Une micro-pince actionnée est utilisée pour saisir le disque et le placer avec précision en haut du guide d'ondes comme on peut le voir sur l'image SEM de la Fig. 2.

L'assemblage précis peut être optimisé en mesurant la réponse transmise par le guide en même temps que le positionnement. Cette méthode a été validée pour des microdisques de 1 µm à 4 µm d'épaisseur, avec des diamètres allant de 50 µm à 300 µm, avec un facteur de qualité actuellement mesuré à $3.8 \cdot 10^3$. Les approches utilisées pour développer les résonateurs étant très génériques, elles peuvent ensuite être envisagées pour d'autres matériaux, moins accessibles aux technologies de salle blanche.

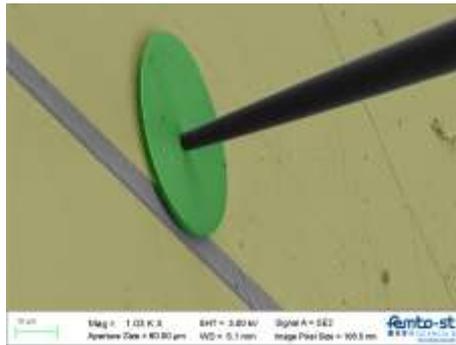


Fig. 2 : Image MEB du microdisque assemblé.

3. PREMIERS RESULTATS SUR BSO

Malgré leurs propriétés très attractives, la littérature ne présente pas de réalisations de guides de résonateurs dans les oxydes de bismuth et de silicium (BSO), alors que ceux-ci ont un intérêt notamment pour la réalisation de sondes électro-optiques [6]. Les raisons de cette désaffection sont liées aux formats dans lesquels sont fournis les wafers (carrés de $3 \times 3 \text{ cm}^2$), peu compatibles avec les standard salle blanche. Nous présentons ici pour la première fois la fabrication de guides ridges BSO à faible perte et à contraste d'indice élevé, grâce aux technologies génériques développées pour le niobate de lithium. Les guides d'ondes ridges sont fabriqués dans une fine couche de BSO polie chimiquement et mécaniquement, d'une épaisseur de $15\text{-}\mu\text{m}$, puis découpée en sillons à la scie circulaire de précision : ils résultent de la matière restant entre deux sillons. Les pertes de propagation sont mesurées par tomographie optique de cohérence et montrent des pertes en propagation inférieures à 2.0 dB/cm . Nous avons également décliné, à partir de cette technologie, des guides électro-optiques et des résonateurs, les derniers présentant un facteur de qualité de $4.0 \cdot 10^4$. Cette approche promet d'être puissante pour façonner des films minces monocristallins jusque-là inaccessibles aux technologies classiques. Les guide d'ondes optique à faibles pertes de BSO ouvrent par ailleurs la voie à des capteurs de champ électrique, des scintillateurs, des LED et des applications laser compacts et hautement sensibles.

4. CONCLUSION

Des résonateurs LiNbO_3 et BSO intégrés à des guides à faibles pertes ont été réalisés, avec des facteurs de qualité respectifs de $3.8 \cdot 10^3$ et $4.0 \cdot 10^4$. Outre l'avantage de permettre une intégration robuste à faibles pertes, les technologies proposées sont simples à mettre en œuvre : elles s'appuient sur le polissage chimico-mécanique, découpe-polissage à la scie circulaire de précision, FIB. L'assemblage dynamique se fait grâce à la mesure des spectres de transmission/réflexion en temps réel en environnement FIB. Les applications sont larges et vont des gyroscopes on-chip aux capteurs de champ électromagnétiques.

RÉFÉRENCES

- [1] B. Desiatov, A. Shams-Ansari, M. Zhang, C. Wang, and M. Lončar, *Optica* **6**, 380-384 (2019)
- [2] M. Wang, F. Bo, S. Wan, W. Li, F. Gao, J. Li, et al, " On-chip electro-optic tuning of a lithium niobate microresonator with integrated inplane microelectrodes », *Opt. Express* **23**, 23072-23078 (2015).
- [3] A. Rao and S. Fathpour, "Compact electro-optic modulators", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **4**, 1-14 (2018).
- [4] M. Zhang, C. Wang, R. Cheng, A. Shams-Ansari, and M. Lončar, "Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator," *Optica* **4**, 1536-1537 (2017).
- [5] N. Courjal, A. Caspar, V. Calero, G. Ulliac, M. Suarez, C. Guyot, and M.-P. Bernal, "Simple production of membrane-based LiNbO_3 micro-modulators with integrated tapers," *Opt. Lett.* **41**, 5110-5113 (2016).
- [6] G. Gaborit, J. Dahdah, F. Lecoche, P. Jarrige, Y. Gaeremynck, et al, A Nonperturbative Electrooptic Sensor for in Situ Electric Discharge Characterization, " in *IEEE Trans. on Plasma Science*, **41**, 2851, (2013)