

# MICROSYSTÈMES INTÉGRÉS en niobate de lithium

Nadège COURJAL<sup>1\*</sup>, Florent BEHAGUE<sup>1</sup>, Vincent PÊCHEUR<sup>1</sup>, Mathieu CHAUVET<sup>1</sup>,  
Maria-Pilar BERNAL<sup>1</sup>, Jérôme HAUDEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut FEMTO-ST, Université de Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

<sup>2</sup>iXBlue, Besançon, France

\*[nadega.courjal@femto-st.fr](mailto:nadega.courjal@femto-st.fr)

Le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) suscite un vif intérêt en photonique depuis des décennies en raison de ses fortes propriétés électro-optiques et non-linéaires. L'opportunité récente de l'usiner en couches minces a élargi le spectre des applications déjà nombreuses du matériau. Les enjeux actuels concernent la miniaturisation des composants tout en préservant de faibles pertes optiques.

Découvert par Zachariasen dès 1928, puis étudié à partir de 1949 comme matériau ferroélectrique par les laboratoires Bell, le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) est devenu un incontournable de la photonique, particulièrement apprécié pour des applications exigeantes telles que la modulation à haut débit pour télécommunications longues distances, l'astronomie, la gyroskopie de précision, ou la conversion de fréquence [1,2]. Son succès est tout d'abord lié à sa très forte susceptibilité non-linéaire du second ordre  $\chi^{(2)}$ , qui permet la réalisation de composants et systèmes optiques contrôlables par des champs électriques, et mène à des fonctionnalités aussi bien électro-optiques (EO) que tout-optiques. À cela s'ajoute une très grande maturité technologique et

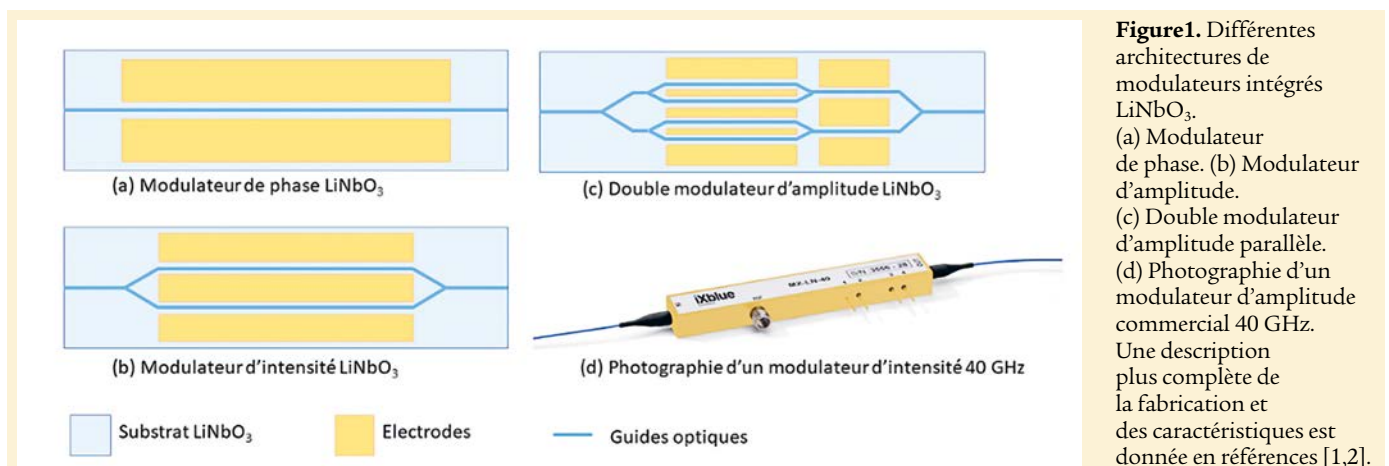
un approvisionnement favorisé par des applications très nombreuses, non exclusivement photoniques (il est exploité par exemple comme piézoélectrique dans les téléphones cellulaires), et concrétisé par une production qui dépasse les 40 tonnes par an. Sa gamme de transparence de 300–5000 nm est une caractéristique clef favorisant aussi bien le développement de composants dans l'infrarouge moyen que les conversions de fréquences sur de larges bandes spectrales. Initialement réalisés dans des substrats épais de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ , les composants  $\text{LiNbO}_3$  connaissent depuis une dizaine d'années un renouveau complet grâce au développement de couches minces de quelques centaines de nm, développement initié en 1998 par M. Levy et al., puis stimulé à partir

de 2010 par la société NanoLN, première à les commercialiser. En favorisant des forts confinements optiques, les couches minces permettent une réduction des longueurs d'interactions et ouvrent des perspectives vastes en photonique et en quantique [2,3]. Les enjeux actuels sont de combiner des faibles pertes d'insertion à de forts confinements [3,4].

## Circuits et composants électro-optiques $\text{LiNbO}_3$

### La modulation électro-optique (EO)

L'une des principales applications de  $\text{LiNbO}_3$  en optique intégrée repose sur la modulation EO effectuée par effet Pockels, propriété directement liée à la

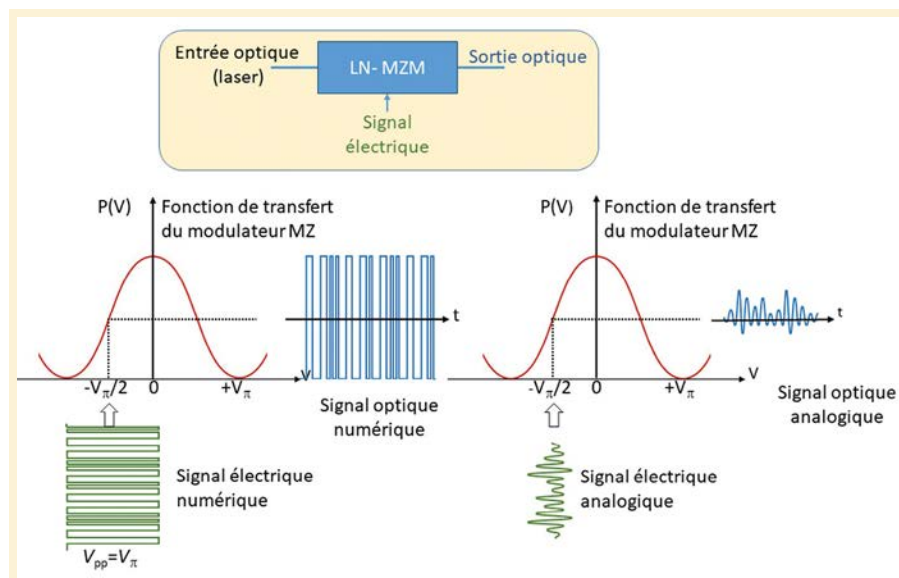


## Optiques laser fabriquées par Edmund Optics

Edmund Optics® (EO) conçoit et fabrique des composants idéaux pour diverses applications laser, y compris l'usinage de matériaux, l'équipement médical, les vidéoprojecteurs et la détection pour les mesures dynamiques. L'utilisation d'équipements de fabrication haut de gamme, notamment des chambres de traitement par dépôt assisté par ions multiples, des chambres de traitement par pulvérisation ionique (IBS) et par finition magnétorhéologique (MRF) permettent à EO de fabriquer des optiques laser de haute qualité, allant des miroirs laser aux asphères laser et aux extenseurs de faisceau laser. Une foule de techniques de métrologie optique, dont la spectroscopie à cavité optique (CRDS), l'interférométrie et la microscopie à contraste interférentiel différentiel (DIC), garantissent que tous les composants sont conformes aux spécifications déclarées. Grâce à une large sélection d'optiques laser prêtes à l'emploi disponibles à être expédiées rapidement, le prototypage est rendu facile et efficace. Lorsque vient le temps de la production en série ou de la conception sur mesure, EO livre des optiques laser à grand volume fabriquées dans nos sites à travers le monde. Des composants optiques de qualité avec les bonnes spécifications sont un élément décisif des systèmes laser et peuvent faire la différence entre succès et échec. Chez EO, nous sommes fiers de fournir des optiques laser qui répondent ou dépassent les attentes, c'est pourquoi nous pensons qu'il est essentiel d'investir dans la fabrication de pointe ainsi que dans la métrologie.

### CONTACT

**Edmund Optics**  
 Tél: +33 (0)820207555  
[ALiagre@edmundoptics.fr](mailto:ALiagre@edmundoptics.fr)  
[www.edmundoptics.fr](http://www.edmundoptics.fr)



**Figure 2.** Principe de la modulation d'intensité pour les transmissions numériques (à gauche) et la modulation analogique (à droite).

susceptibilité  $\chi^{(2)}$  et qui se concrétise par une variation linéaire de l'indice de réfraction optique du cristal en présence d'un champ électrique externe. Dans la pratique, cet effet est exploité en canalisant la lumière – souvent une onde monochromatique issue d'un laser – dans des guides optiques monomodes entourés d'électrodes. Les électrodes induisent un champ électrique moyen sur le guide, proportionnel à  $V/g$ , où  $V$  est la tension appliquée,  $g$  est la distance entre les deux électrodes. La modulation de l'indice de réfraction ainsi obtenue conduit directement à une modulation de phase, fonction de base des composants EO LiNbO<sub>3</sub> (figure 1a) [4].

Autre composant phare de l'optique intégrée LiNbO<sub>3</sub>, le modulateur d'intensité est obtenu par une modulation de phase convertie en modulation d'amplitude par un interféromètre de Mach-Zehnder intégré (figure 1b). Plus précisément, un signal optique incident se propageant initialement dans un guide droit se sépare par une jonction Y en deux guides entourés d'électrodes. Un déphasage différentiel  $\Delta\phi = \pi V/V_{\pi}$  est ainsi appliqué entre les deux signaux, où  $V_{\pi}$  correspond à la tension à appliquer pour qu'en sortie les deux signaux soient en opposition de phase. Ainsi, la puissance optique  $P$  à la sortie d'un modulateur de type interféromètre de Mach-Zehnder (MZM – *Mach-Zehnder Modulator*)

dépend de la tension  $V$  selon la relation :  $P(V) = I + \cos(\Delta\phi)$ . En appliquant un signal électrique autour d'une tension continue qui définit le point de fonctionnement, on peut transférer une modulation analogique ou numérique électrique en signal lumineux modulé (figure 2). On rencontre couramment aujourd'hui des architectures plus complexes combinant des modulateurs de phase et d'amplitude, plusieurs modulateurs d'amplitude en parallèle, ou des combinaisons avec diversité de polarisation (figure 1c) [2].

Une propriété attractive des modulateurs EO LiNbO<sub>3</sub> est leur très large bande passante (qui peut aller jusqu'à 100 GHz ou plus) [1], obtenue par des électrodes à ondes progressives générant un signal électrique se propageant le long du guide optique. Lorsque signal optique et signal électrique se propagent à la même vitesse (= accord de phase), les conditions sont optimales pour atteindre des très hauts débits de modulation.

### Applications commerciales

Les modulateurs EO LiNbO<sub>3</sub> se positionnent sur des marchés très divers, liés aux performances spécifiques du matériau, marchés connus et exploités depuis plus de 30 ans.

Dès le début des années 1990, les modulateurs de phase LiNbO<sub>3</sub> sont

utilisés dans les **gyroscopes à fibres optiques** (FOG - *Fiber Optic Gyroscope*), pour analyser les déphasages induits par effet Sagnac lors des rotations des axes gyroscopiques. Ces FOG intégrés dans les centrales inertielles de navigation civiles et militaires permettent des mesures de vitesses de rotation d'extrêmement haute précision ( $10^{-3}$ /heure). Depuis 1990 environ 500 000 axes gyroscopiques ont été fabriqués. Plusieurs centaines sont en orbite dans des satellites autour de la terre.

LiNbO<sub>3</sub> est plus généralement très apprécié pour les **applications spatiales**, grâce notamment à son immunité aux rayonnements. Ainsi, la mission Grace Follow embarque plusieurs modulateurs de phase LiNbO<sub>3</sub> pour stabiliser des lasers de métrologie à 1060 nm, et la plupart des futurs satellites embarqueront des **télescopes lasers de communication** (LCT

- *laser communication telescopes*) avec modulateurs LiNbO<sub>3</sub> pour assurer des communications ciel-terre à plusieurs dizaines de Gb/s.

Le début des années 2000 a vu l'avènement des **télécommunications optiques** sur fibres optiques : les modulateurs large bande LiNbO<sub>3</sub> y ont joué un rôle clé en permettant la propagation de signaux à très hauts-débits (> 10 GB/s) sur des distances supérieures à 100 000 km [1]. Les formats de codage, initialement basés sur la modulation d'amplitude, ont évolué ensuite pour combiner à la fois des codages en amplitude et en phase, et des multiplexages en polarisation pour atteindre 100 Gb/s par longueur d'onde. Ce marché des télécoms longues distances représente de loin le principal marché pour les modulateurs LiNbO<sub>3</sub>. Près de 130 000 modulateurs sont fabriqués chaque année

pour les télécoms soit environ 75 % du volume annuel produit.

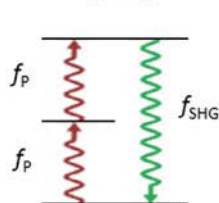
Les modulateurs large bande LiNbO<sub>3</sub> fonctionnant à 1053 nm et 1064 nm sont également couramment utilisés dans les lasers à fibres puissants, pour la mise en forme temporelle des impulsions lumineuses. Des modulateurs à très fort contrastes (> 55 dB) équipent toutes les lignes des lasers Megajoules du monde comme le LMJ du CEA à Bordeaux ou le NIF au Livermore (USA).

### Composants LiNbO<sub>3</sub> non-linéaires (NL), ou « tout-optiques »

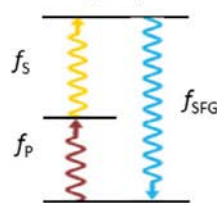
La forte non-linéarité du second ordre du LiNbO<sub>3</sub> le place également en position avantageuse pour le développement de dispositifs de conversion de fréquences optiques, dont quelques

#### Processus de conversion de fréquence:

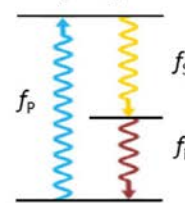
##### Doublage de fréquence (SHG)



##### Somme de fréquence (SFG)

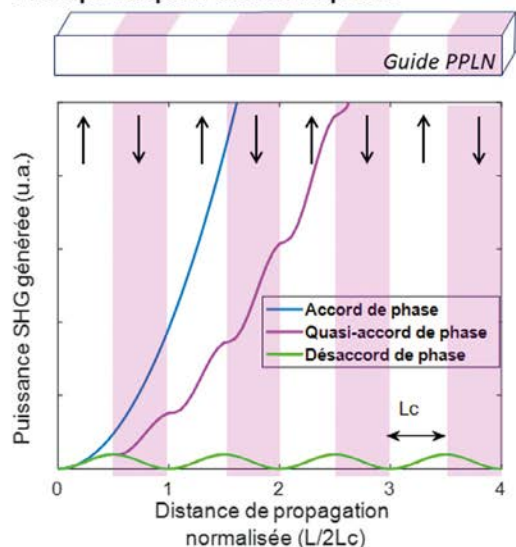


##### Différence de fréquence (DFG)



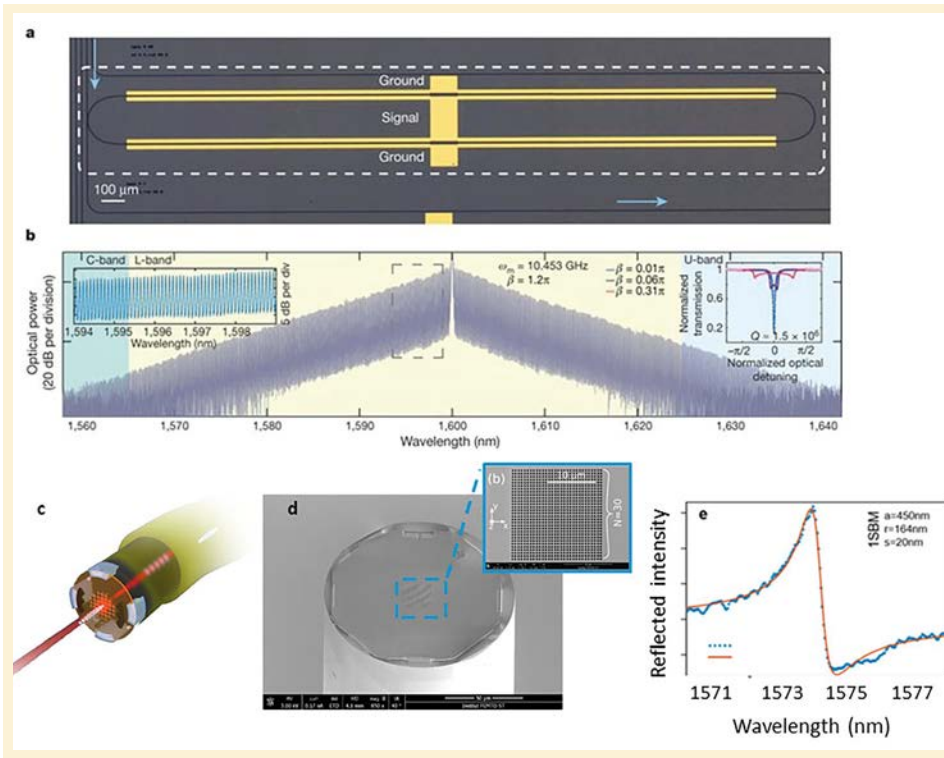
**Cas SHG.** En raison de la dispersion du matériau, le signal fondamental (pompe) et le signal de fréquence double (SHG) ne se propagent en général pas à la même vitesse. En conséquence, le transfert d'énergie pompe-SHG change périodiquement de sens en fonction du déphasage relatif entre les deux signaux (courbe verte), et la distance sur laquelle le signal généré croît est appelée longueur de cohérence ( $L_c \approx 10 \mu\text{m}$  pour LiNbO<sub>3</sub>). Le transfert d'énergie pompe-sonde est en revanche optimal si les deux signaux se propagent à la même vitesse : ils sont alors en accord de phase, et l'amplitude du signal SHG croît de façon monotone en fonction de la distance (courbe bleue). Plus souple à réaliser que l'accord de phase, le quasi-accord de phase est obtenu en changeant périodiquement le signe de  $\chi^{(2)}$  dès que le signal SHG commence à perdre de l'énergie au profit de la pompe. Ceci est réalisé en inversant périodiquement la direction de la polarisation spontanée du cristal par un champ électrique intense. Cette configuration est appelée PPLN : periodically poled lithium niobate.

#### Principe du quasi-accord de phase



**Figure 3.** Illustration des transferts d'énergie non-linéaires à 3 ondes, et focus sur la configuration PPLN pour obtenir un quasiaccord de phase dans le cas de la génération de seconde harmonique (SHG).





**Figure 4.** Composants LiNbO<sub>3</sub> compacts sur couches minces. (a) Deux modulateurs de phase intégrés dans un résonateur à rayon de courbure micrométrique. (b) Réponse spectrale associée à (a) : 900 peignes de fréquences répartis sur 80 nm, un record pour une tension de commande aussi faible que 10 V. (c, d, e) Cristal photonique LiNbO<sub>3</sub> intégré sur fibre optique : (c) schéma de principe, (d) image au microscope à balayage électrique (MEB), (e) spectre en réflexion expérimental (bleu) comparé au spectre théorique (rouge). (a), (b) Reprinted with permission from M. Zhang, Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator, *Nature* 568, 373-377 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1008-7>. (c), (d), (e) Adapted by permission from V. Calero, An ultra wideband-high spatial resolution-compact electric field sensor based on Lab-on-Fiber technology, *Scientific reports*, 9: 8058, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44644-y>

processus courants sont illustrés en *figure 3*. En d'autres termes, LiNbO<sub>3</sub> ne répond pas de façon linéaire lorsqu'il est soumis à un champ optique harmonique intense : des fréquences différentes de l'onde excitatrice peuvent être générées.

L'exemple le plus emblématique des processus de conversion de fréquence est le doublage de fréquence (SHG – *second harmonic generation*) où deux photons de fréquence  $f_p$  donnent naissance à un photon de fréquence double ( $f_{SHG}$ ). Les faisceaux lasers verts émettant à 532 nm, sont ainsi générés à partir de lasers Nd:YAG émettant initialement à 1064 nm.

Le processus « somme de fréquences » (SFG), génère quant à lui une onde dont la fréquence correspond à la somme des fréquences de deux faisceaux incidents (*figure 3b*). Cela permet par exemple de transposer les fréquences de signaux vers des gammes spectrales où les détecteurs sont moins chers ou plus sensibles.

Enfin, le processus « différence de fréquence » (DFG) sert, par exemple, à produire une source émettant dans le moyen infra-rouge (MIR) à partir de deux sources visibles. L'ensemble de ces processus, dits paramétriques,

sont notamment caractérisés par une conservation de l'énergie des photons mis en jeu.

Cependant, les conversions vers les fréquences désirées ne sont efficaces qu'à certaines conditions dont la plus contraignante est la condition d'accord de phase (voir *figure 3*). Dans le LiNbO<sub>3</sub>, la solution de choix est de la satisfaire par inversion périodique de la polarisation spontanée. Le choix de la période d'inversion donne une grande souplesse qui permet d'optimiser les différents processus NL et d'exploiter à la fois la large gamme spectrale de transparence du LiNbO<sub>3</sub> et le coefficient non-linéaire  $d_{eff}$  le plus fort du matériau.

L'optique guidée permet des processus de conversion NL améliorés. En effet, si on reprend l'exemple du doublage de fréquence, l'efficacité de conversion normalisée  $\eta$ , valide hors déplétion du faisceau pompe de puissance  $P_p$ , pour des faisceaux de section  $S$  qui se propagent en accord de phase sur une longueur  $l$  est donnée par :

$$\eta = \frac{P_{shg}}{P_p^2} \propto \frac{d_{eff}^2 l^2}{S}$$

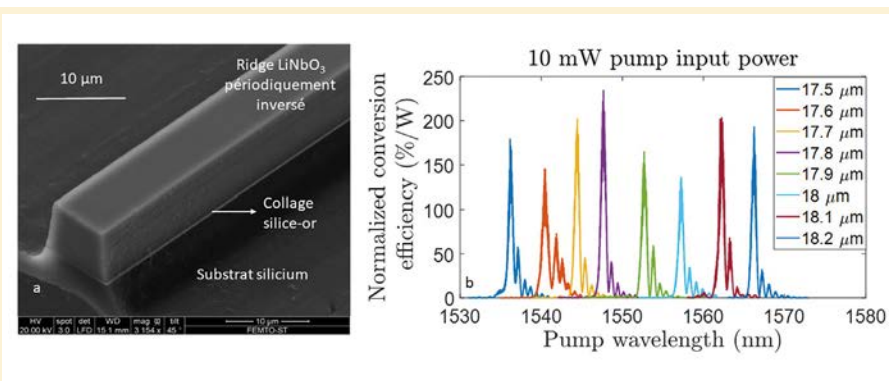
Ce rendement, limité à quelques 1%/W en propagation libre en raison de la diffraction, devient beaucoup

plus fort si les faisceaux sont confinés en guides (faible  $S$ ) et s'ils interagissent sur une grande longueur  $l$ . La littérature est riche de travaux avec des guides LiNbO<sub>3</sub> périodiquement inversés (PPLN – *periodically poled lithium niobate*).

## Enjeux actuels liés aux composants LiNbO<sub>3</sub>

Les composants optiques LiNbO<sub>3</sub> dits « classiques » sont à base de guides réalisés par diffusion titane ou échange protonique [2,4]. Ces guides faiblement confinés se caractérisent par de faibles pertes d'insertions (< 3 dB), grâce à un fort recouvrement avec les modes optiques des fibres. En revanche, ce faible confinement limite les interactions EO ou NL et nécessite de grandes longueurs d'interaction (> 1 cm) en compensation.

L'enjeu des très forts confinements est relevé par les couches minces LiNbO<sub>3</sub> – appelées LNOI (*LN on insulator*) [2,3], obtenues par une technique dérivée de la technologie *smart-cut* (initialement développée en 1995 par le LETI-CEA pour des couches SOI). La technique, basée sur l'implantation ionique, permet l'obtention (ou la



**Figure 5.** Guides LiNbO<sub>3</sub> PPLN réalisés à la scie circulaire de précision. (a) Image MEB d'un guide. (b) Rendement de conversion SHG pour différentes périodes d'inversion, pour des guides réalisés sur la même puce, de 2 cm de longueur.

(a) Adapted by permission from M. Chauvet, Single photon PIR upconversion detector at room temperature with aPPLN ridge waveguide, *Optics Express*, 27, 19233-19241 (2019), <https://doi.org/10.1364/OE.27.019233>

réalisation) de couches de quelques centaines de nm d'épaisseur, dans lesquelles des guides de  $1 \mu\text{m}^2$  de section peuvent être inscrits par plasma ionique. On peut illustrer l'intérêt de cette approche par les travaux de l'équipe de M. Lončar à Harvard (*figures 4a* et *4b*) : les rayons de courbure micrométriques et les électrodes rapprochées autour des guides confinés permettent de gagner un ordre de grandeur en compacité par rapport aux composants classiques, et de démontrer une nouvelle fonctionnalité pour la génération EO large bande de peignes de fréquence à faible tension de commande.

L'intégration de cristaux photoniques (CPs) permet d'améliorer encore de deux ordres de grandeur la compacité. La *figure 4c* montre par exemple un CP bi-périodique de  $12 \times 12 \mu\text{m}^2$  intégré dans une couche LiNbO<sub>3</sub> de 700 nm d'épaisseur. Ce composant ultra-compact présente une résonance Fano dont la position spectrale dépend de l'indice et varie donc en présence de champs électriques appliqués : il s'agit du plus petit capteur de champ électrique au monde, avec une résolution spatiale record, une bande passante qui dépasse le THz et qui ouvre par ailleurs la voie à une nouvelle génération de μcomposants EO ou NL intégrés en bouts de fibres.

Si les couches minces permettent des compacités ultimes, elles ne permettent en revanche pas des faibles

pertes d'insertion – les plus faibles reportées à ce jour étant de 8 dB, obtenues par la société Partow Technologies. Une approche alternative à faible coût consiste à réaliser des structures de type *ridge* à la scie circulaire de précision. Ainsi, le guide PPLN de la *figure 5* permet un fort confinement apporté par le saut d'indice, tout en assurant des pertes d'insertions inférieures à 3 dB, et il génère des faisceaux SHG de plusieurs centaines de mW sans problème d'instabilité. La fabrication commence par l'inversion périodique des domaines, suivie d'un report sur un autre substrat (silicium par exemple). Un amincissement mécanico-chimique s'ensuit, et finalement une découpe-polissage, pour former des guides carrés de 3 à 10 μm de côté. Les rendements de conversion normalisés dépassent 200 %/W (*figure 5b*).

En combinant des techniques standard de guidage et un usinage à la scie circulaire de précision, il est également possible de réaliser des configurations EO compactes à faibles pertes [4].

## Conclusion

Le *niobate de lithium*, par ses propriétés optiques attractives et par sa très grande maturité technologique, s'est imposé dans plusieurs secteurs commerciaux, des télécommunications à l'aérospatial. Les composants classiques sont réalisés dans des substrats massifs et se caractérisent par de faibles pertes d'insertion mais aussi par des encombrements centimétriques. Une nouvelle génération de composants compacts voit le jour, à base de couches minces, à cristaux photoniques ou à guides confinés, et ouvre la voie à de nouvelles fonctionnalités, qu'elles soient EO ou NL. En parallèle, des configurations intermédiaires à faibles coûts permettent de combiner de forts confinements à de faibles pertes d'insertion, en exploitant une technique de découpe-polissage à la scie circulaire de précision. Malgré sa très grande ancienneté dans le domaine de la photonique, LiNbO<sub>3</sub> connaît ainsi un très fort regain d'intérêt, caractérisé par une explosion du nombre d'articles et de projets sur ce sujet. Les évolutions vers les assemblages photoniques hybrides pourraient encore accélérer cet engouement dans les prochaines années.

## Remerciements

Il est impossible d'écrire un article sur LiNbO<sub>3</sub> sans penser à Marc de Micheli : les auteurs tiennent à saluer sa mémoire et à exprimer leur reconnaissance pour ses contributions en optique intégrée LiNbO<sub>3</sub>. Ils remercient par ailleurs l'ANR dans le cadre du financement ANR-16-CE24-0024, et l'EUR-EIPHI.

### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] E. Wooten et al., A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems, *IEEE JQE*, 6 (2000)
- [2] J.E. Toney, *Lithium niobate photonics*, Artech House (2015)
- [3] A. Boes et al., Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits, *Laser & Photonics Reviews* (2018)
- [4] N. Courjal et al., *Lithium Niobate Optical Waveguides and Microwaveguides*, Intechopen BoD-Books on Demand (2018)