INGÉNIERIE DE LA DYNAMIQUE NON-LINÉAIRE DES NANO-RÉSONATEURS À CRISTAUX PHOTONIQUES

Grégory Moille, 1 , Gælle Lehoucq 1 , Sylvain Combrié 1 , Johann-Peter Reithmaier 2 , Fabrice Raineri 3,4 , Xavier Checoury 3 , Alfredo De Rossi 1

Thales Research and Technology, Campus Polytechnique, 91767 Palaiseau, France
 Institute of Nanostructure Technologies and Analytics, CINSaT, University of Kassel, Germany
 Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N), CNRS, Université Paris Saclay, France
 Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Paris, France

alfredo. deros si@thales group.com

RÉSUMÉ

Le cavités optiques basées sur des membranes nano-structurées offrent une réponse nonlinéaire très forte du fait du confinement de la lumière. On montre ici que leur dynamique peut être contrôlée, ce qui est primordial pour les applications dans le domaine du traitement tout optique du signal.

MOTS-CLEFS : *cristaux photoniques ; commutation tout-optique ; optique non linéaire ; photonique intégrée*

1. Introduction

La miniaturisation des résonateurs optiques est à la base des avancées récentes dans l'étude de l'interaction matière-énergie et des ses applications dans le contexte de la photonique intégrée. Dans le cas des "nanolasers", la consommation d'énergie est très faible car, en première approximation, proportionnelle au volume de la cavité (soit $V \approx \lambda^3$). Ainsi, le développement de nano-diodes laser sur circuit silicium[1] lève le verrou principal à l'intégration de liaison optiques dans les puces électroniques et ouvre la voie à la convergence entre l'électronique et la photonique[2].

Dans le même contexte applicatif s'inscrit un autre type de composant, capable de réguler la transmission d'un signal optique en fonction d'une commande aussi dans le domaine optique. Ce vague équivalent du transistor exploite la non-linéarité optique et peut être configuré pour fonctionner soit comme une "mémoire"[3], soit comme une "porte"[4]. Enfin, les lasers montrent une très riche dynamique non linéaire, parfois reproduisant certaines caractéristiques des neurones[5, 6]. La miniaturisation de ces dispositifs permet donc d'enrichir les puces photoniques de fonctions pour le traitement du signal directement dans le domaine optique.

A la différence de la micro-électronique, la conception de ces composants miniature ne peut pas se faire en suivant une simple loi d'échelle. Afin de composer avec la limite de la diffraction, les résonateurs sont dessinés suivant des principes radicalement différents. C'est le cas des "cristaux photoniques", des structures diélectriques périodiques qui offrent des résonances à fort facteur de qualité et qui correspondent à des modes optiques confinés à l'échelle de la longueur d'onde [7].

Ce fort confinement exalte les effets non-linéaires. Ainsi, à l'instar des oscillateurs mécaniques[8], ces nano-résonateurs optiques se comportent comme des systèmes dynamiques aux propriétés complexes, dès que que l'on y injecte des signaux laser relativement faibles (qqs μW). Dans certains cas, le mode optique du résonateur se couple à ses modes de vibrations mécaniques, ce qui a donné naissance au domaine des "cristaux opto-mécaniques"[9].

2. INGÉNIERIE DU TEMPS DE RÉPONSE DANS LES NANO-STRUCTURES SÉMI-CONDUCTRICES

Lors que ces structures sont réalisées en matériaux semi-conducteur, la contribution dominante à la réponse non-linéaire a origine dans la photo-génération des porteurs libres. Les électrons et les trous

diffusent vers la surface où ils recombinent. Ce processus prend un temps qui est donc très fortement dépendant de la géométrie.

La réponse non linéaire associées aux porteurs libres est donc "dispersive", c'est à dire que n'est pas "instantanée" par rapport à l'excitation et aux autres temps caractéristiques (ex. le temps de vie du photon dans la cavité).

La structure en Fig. 1 représente une cavité dessiné pour que ses deux résonances soient dans le do-

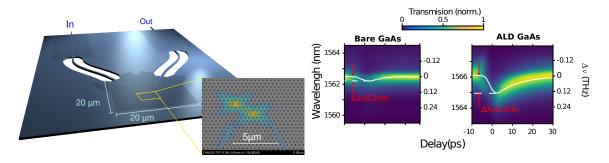


FIGURE 1 : A gauche : structure membranaire en GaAs comprenant une "molécule photonique" avec la distribution du champ du mode fondamental en cartographie (détail). A droite : cartographie montrant les spectres de transmission en fonction du retard pompe-sonde dans les cas d'une structure de référence et de celle traité par ALD.

maine spectral des télécommunications. Bien que le matériau (Arseniure de Gallium) soit transparent dans cette plage spectrale, une impulsion laser picoseconde, accordée sur une des deux résonances et dont le niveau est de l'ordre de 100 mW (énergie qq. 100 fJ) entraîne la génération de porteur libres par absorption multi-photons. Ceci est précisément une des implications du fort confinement de l'énergie. Dans un dispositif non membranaire, par exemple un guide d'onde tel que l'on trouve dans les diodes laser traditionnels, la durée de vie des porteurs libres se mesure en nanosecondes en absence d'émission stimulée, car la recombinaison non-radiative est faible.

La mesure de la dynamique des porteurs dans les nano-résonateurs se fait par une expérience dite pompesonde. En mesurant le déplacement spectral de la cavité correspondant à un plasma de porteurs libres, on peut remonter à l'évolution temporelle de leur densité, ce qui est montré en Fig. 1. Le temps de vie des porteurs, déduit pour le nanostructures GaAs, est extrêmement court, inférieur à la picoseconde [10], soit 3 ordres de grandeur plus court que dispositifs "traditionnels". Une modélisation détaillé du processus de diffusion des porteurs permet de remonter sans ambiguïté à la vitesse de recombinaison à la surface[11]. En fait, en absence de traitement de passivation, la vitesse de recombinaison à la surface du GaAs est maximale, proche de la vitesse de saturation des porteurs, soit $v_s = 10^5 m/s$. Lorsque la distance moyenne de la surface est de l'ordre de L = 100 nm, on déduit justement un temps de vie de l'ordre de 1 ps.

Le contrôle de la recombinaison à la surface par des traitements de passivation offre une très grande latitude pour l'optimisation de la réponse dynamique. Pour ce faire, l'utilisation d'une technique relativement nouvelle, le dépôt par couches moléculaires (ALD), permet de recouvrir de manière conforme et hermétique la surface. Par exemple, à partir de la mesure en Fig. 1 on déduit un changement important car maintenant $v_s \approx 3 \times 10^3 m/s$, ce qui se traduit par un temps de vie de l'ordre de 10 ps et une réponse non-linéaire beaucoup plus forte[10]. Dans le cas du Phosphure d'Indium, dont la vitesse de recombinaison à la surface est beaucoup plus faible, on parvient à contrôler le temps de vie des porteurs en ajoutant des couches de ternaire InGaAs dont la surface est très recombinante [12].

La diffusion joue également un rôle très important dans la dynamique des nano-résonateurs, car celle ci dépend de la densité et non de la population totale des porteurs libres. Ceci a été observé dans les structures en Silicium [13] et InP [14]. Ce processus résulte en une relaxation non exponentielle de la réponse non linéaire, qui peut être représentée avec précision en utilisant le formalisme de la fonction de Green [11]. Cette étude montre aussi que le choix de la géométrie du résonateur permet de modifier la

réponse dynamique.

Enfin, on peut tirer parti de l'ingénierie des matériaux semiconducteurs pour modifier le processus de transport. Le dopage P de l'InP force un régime caractérisé par la diffusion des porteurs minoritaires, les électrons dans ce cas, dont la vitesse est beaucoup plus grande que pour les trous. Ceci se traduit en une accélération très marquée de la dynamique[15].

CONCLUSION

Grâce au progrès dans la fabrication des nanostructures semi-conductrices on peut réaliser des résonateurs dont la taille est proche de la limite de la diffraction. Leur forte réponse non-linéaire peut être contrôlée par une ingénierie du transport des porteurs libres. Ceci est absolument crucial pour la réalisation de dispositifs tels que portes optiques, mémoires, oscillateurs, etc... pour le traitement du signal dans le domaine optique.

REMERCIEMENTS

Travaux soutenus par la ANR et la DGA (contrat ETHAN N° ANR-15-ASTR-0014-01)

RÉFÉRENCES

- [1] G. Crosnier, D. Sanchez, S. Bouchoule, P. Monnier, G. Beaudoin, I. Sagnes, R. Raj, and F. Raineri, "hybrid indium phosphide on silicon nanolaser diode," *Nature Photonics*, vol. 11, 2017.
- [2] K. Bergman, Photonic Network on Chip design. Springer, 2014.
- [3] E. Kuramochi, K. Nozaki, A. Shinya, K. Takeda, T. Sato, S. Matsuo, H. Taniyama, H. Sumikura, and M. Notomi, "Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip," *Nature Photonics*, vol. 8, no. 6, pp. 474–481, 2014.
- [4] C. Husko, A. De Rossi, S. Combrié, Q. V. Tran, F. Raineri, and C. W. Wong, "Ultrafast all-optical modulation in GaAs photonic crystal cavities," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 2, p. 021111, 2009.
- [5] F. Selmi, R. Braive, G. Beaudoin, I. Sagnes, R. Kuszelewicz, and S. Barbay, "Relative refractory period in an excitable semiconductor laser," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 2014.
- [6] B. Garbin, J. Javaloyes, G. Tissoni, and S. Barland, "Topological solitons as addressable phase bits in a driven laser," *Nature communications*, vol. 6, 2015.
- [7] Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Song, and S. Noda, "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal," *nature*, vol. 425, no. 6961, pp. 944–947, 2003.
- [8] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Theoretical Physics, Vol. 1: Mechanics, 1988, vol. 9099.
- [9] M. Eichenfield, J. Chan, R. M. Camacho, K. J. Vahala, and O. Painter, "Optomechanical crystals," *Nature*, vol. 462, no. 7269, pp. 78–82, 2009.
- [10] G. Moille, S. Combrié, L. Morgenroth, G. Lehoucq, F. Neuilly, B. Hu, D. Decoster, and A. de Rossi, "Integrated all-optical switch with 10 ps time resolution enabled by ALD," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 10, no. 3, pp. 409–419, 2016.
- [11] G. Moille, S. Combrié, and A. De Rossi, "Modeling of the carrier dynamics in nonlinear semiconductor nanoscale resonators," *Physical Review A*, vol. 94, no. 2, p. 023814, 2016.
- [12] A. Bazin, K. Lenglé, M. Gay, P. Monnier, L. Bramerie, R. Braive, G. Beaudoin, I. Sagnes, R. Raj, and F. Raineri, "Ultrafast all-optical switching and error-free 10 Gbit/s wavelength conversion in hybrid InPsilicon on insulator nanocavities using surface quantum wells," *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 1, p. 011102, 2014.
- [13] T. Tanabe, H. Taniyama, and M. Notomi, "Carrier diffusion and recombination in photonic crystal nanocavity optical switches," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 11, pp. 1396–1403, 2008.
- [14] Y. Yu, E. Palushani, M. Heuck, N. Kuznetsova, P. T. Kristensen, S. Ek, D. Vukovic, C. Peucheret, L. K. Oxenløwe, S. Combrié *et al.*, "Switching characteristics of an InP photonic crystal nanocavity: Experiment and theory," *Optics express*, vol. 21, no. 25, pp. 31 047–31 061, 2013.
- [15] G. Moille, S. Combrié, K. Fuchs, M. Yacob, J. P. Reithmaier, and A. de Rossi, "Acceleration of the nonlinear dynamics in p-doped indium phosphide nanoscale resonators," *Optics Letters*, vol. 42, no. 4, pp. 795–798, 2017.

GUIDES OPTIQUES ACCORDABLES ELECTRIQUEMENT

M. CHAUVET¹, P. THOA¹, F. BASSIGNOT²

1 Departement d'optique, Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté, 15B Avenue des Montboucons, F-25000 Besançon—France

2 Femto-Engineering, 15B avenue des Montboucons, F-25000 Besançon—France

mathieu.chauvet@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

Des guides d'onde accordables électriquement ont été fabriqués dans des films minces de LiNbO₃ sur substrat de silicium par inversion de domaines. L'effet électro-optique est exploité pour induire les guides et pour contrôler leurs propriétés de guidage. Ainsi, une tension de quelques volts permet de faire apparaître un guide efficace à 1.55µm ou au contraire de générer un anti-guide. La transmission des dispositifs fabriqués peut ainsi varier sur plus de 25dB. La réponse en fréquence des composants permet d'envisager des modulations rapides.

MOTS-CLEFS: Dispositifs électro-optiques, Niobate de lithium, Fabrication de microstructures, Inversion de domaines

1. Introduction

Les guides d'ondes dont les propriétés peuvent être modifiées par l'application d'un champ électrique sont des éléments clés pour traiter les signaux optiques. Ces guides accordables peuvent être au cœur de divers dispositifs tels que les modulateurs, les atténuateurs variables ou encore les commutateurs. Les phénomènes physiques exploités sont par exemple l'électro-absorption [1], l'effet thermique [2] ou encore l'effet électro-optique [3,4]. Ce dernier étant, de loin, le plus largement utilisé en raison d'une réponse rapide et non résonnante. Ces dispositifs électro-optiques sont généralement constitués de guides d'onde permanents dont les propriétés de guidage sont légèrement modifiées par l'application d'une tension. Cependant, la possibilité de faire apparaître ou disparaître à volonté les propriétés guidantes ouvre de nouvelles perspectives. Par exemple, le contrôle total sur des réseaux de guides couplés apporterait une grande flexibilité pour acheminer et moduler un signal d'entrée. Ces guides optiques induits par une tension ont été étudiés dès l'apparition de matériaux à forts coefficients électro-optiques. Une première démonstration a été faite par Channin [5] au début des années soixante en tirant parti des propriétés électro-optiques de LiTaO3. L'application d'une haute tension était alors nécessaire pour induire un guide efficace au cœur d'un cristal massif. Des dispositifs similaires basés sur des électrodes déposées à la surface d'un substrat ont ensuite été développés [6-7]. Dans la présente étude, une structure hybride qui tire avantage de l'inversion de domaine de films minces de LiNbO3 est fabriquée pour former des guides accordables à l'aide de faibles tensions de commande et présentant une réponse optique rapide.

2. FABRICATION

La première étape du procédé de fabrication de ces guides consiste à inverser localement l'axe ferroélectrique d'un wafer de LiNbO $_3$ congruent de 4 pouces de diamètre à l'aide d'un champ électrique intense opposé à la direction initiale de l'axe Z. Ce champ intense est appliqué à travers un masque dont le motif permet d'inverser une série de lignes parallèles de 50 mm de long dont la largeur varie de 4 μ m à 16 μ m. Dans une deuxième étape, une couche de SiO $_2$ de 350 nm d'épaisseur est déposée par ICPECVD sur une face de ce wafer suivi par la pulvérisation d'une couche d'or de 300 nm d'épaisseur. Une couche d'or identique est également déposée sur un wafer

de silicium de grande planéité. Les faces métallisées du wafer de LiNbO3 et du wafer de silicium sont ensuite mises en contact et pressées dans une machine de collage EVG. Ce procédé de collage par diffusion métallique est réalisé à température ambiante, ce qui limite les contraintes mécaniques pouvant résulter des coefficients de température différents des deux wafers. On obtient ainsi une structure hybride de 1 mm d'épaisseur. L'étape suivante consiste à amincir la couche de LiNbO3 par rodage et polissage pour atteindre une épaisseur de 6 µm. Une couche de SiO2 de 350 nm d'épaisseur est ensuite déposée à la surface du film LiNbO3 suivie de la pulvérisation d'une électrode d'or de 300 nm d'épaisseur. Enfin, cette structure hybride est découpée avec une scie de précision pour donner des échantillons de différentes longueurs de propagation. Comme illustré sur la Fig. 1. , la couche de LiNbO3 est orientée selon l'axe + Z sauf le long des lignes dont la polarisation a été inversée. La caractérisation de la planéité de surface des échantillons avec un profilomètre optique révèle que le film LiNbO3 est légèrement plus épais le long de ces bandes inversées. Cette surépaisseur superficielle observée dans la zone orientée Z- est attribuée aux propriétés mécaniques différentes des surfaces du LiNbO3 orientées Z et + Z.

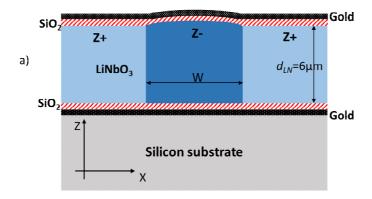


Fig. 1 : Coupe transversale schématique de la structure des guides accordables.

3. CARACTERISATION

Les composants décrits ci-dessus sont ensuite caractérisés optiquement. La lumière provenant d'une diode laser émettant à une longueur d'onde de 1550 nm est collimatée et polarisée linéairement. Ce faisceau lumineux est ensuite focalisé à l'entrée du guide testé. L'image de la face de sortie du guide est formée sur une caméra Vidicon. Des contacts électriques sont ensuite placés sur la couche d'or située en surface et sur l'or constituant la couche de collage. Cette configuration permet donc d'appliquer la tension sur l'empilement SiO₂ / LiNbO₃ pour donner naissance à un champ électrique orienté selon l'axe Z du LiNbO₃.

La figure 2 illustre le comportement du guide en fonction de la tension appliquée pour un guide de largeur W égale à 16 μ m et de longueur 3 cm. Si aucune tension n'est appliquée, la lumière est faiblement guidée en raison de la surépaisseur présente à la surface du guide. La figure 2c montre la répartition lumineuse observée. Lorsque le potentiel électrique de l'électrode de surface est inférieur à celui de l'électrode de liaison (tension négative), le mode guidé devient plus étroit comme le décrit sur la figure 2a-b. Ce comportement est dû au changement d'indice de réfraction produit par le champ électrique E_{LN} présent dans la couche de LiNbO₃. Pour une tension négative, l'indice de réfraction augmente dans le cœur du guide tandis qu'il diminue dans les zones latérales. Comme prévu, la structure devient un anti-guide lorsqu'une tension positive est appliquée. Comme on peut le voir sur les figures 2d-e la lumière est alors repoussée de la zone centrale du guide d'onde puisque l'indice de réfraction y est plus faible que dans les zones latérales.

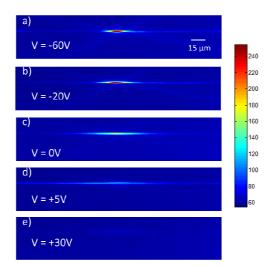


Fig. 2 : Distribution de lumière en sortie d'un guide d'onde de 3 cm de long pour différentes tensions appliquées.

CONCLUSION

Le concept de guides commandés en tension basés sur le poling local d'un film de LiNbO₃ a été validé. Les composants sont fabriqués par des techniques de collage de wafer et de rodage/polissage afin de former des films de LiNbO₃ de quelques micromètres d'épaisseur. Les caractérisations optiques montrent que ces guides commandés par effet électro-optique peuvent être accordés à l'aide d'une faible tension d'amplitude 10V. Un tel signal électrique induit une variation de transmission supérieure à 25dB. La bande passante peut atteindre quelques centaines de Mhz en optimisant la surface des électrodes mais une bande passante réponse encore plus grande pourrait être envisagée avec des électrodes à ondes progressives [8]. Cette première démonstration de guides induits par électro-optique ouvre la voie à la fabrication d'atténuateurs électriquement variables, de modulateurs rapides ou même de réseaux de guides accordables.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Liu, M. Beals, A. Pomerene, S. Bernardis, R. Sun, J. Cheng, L. C. Kimerling and J. Michel, "Waveguide-integrated, ultralow-energy GeSi electro-absorption modulators", Nature photonics, 2, 433-437, 2008.
- [2] Y. O. Noha, C. H. Leea, J. M. Kima, W. Y. Hwangc, Y. H. Won, H. J. Leea, S. G. Hana, M. C. Ohd, "Polymer waveguide variable optical attenuator and its reliability", **242**, 533-540, 2004.
- [3] R. Krähenbühl, M.M. Howerton, J. Dubinger, A.S. Greenblatt, "Performance and Modeling of Advanced Ti:LiNbO₃ Digital Optical Switches," J. Lightwave Tech., **20**, 92–99, 2002.
- [4] D. Janner, D. Tulli, M. García-Granda, M. Belmonte, M. and V. Pruneri, Micro-structured integrated electro-optic LiNbO₃ modulators. Laser & Photon. Rev., **3**, 301–313, 2009.
- [5] D. J. Channin. "Voltage-induced optical waveguide," Appl. Phys. Lett., 19, 128-130, 1971
- [6] N. A. F. Jaeger and L. Young, "Voltage-induced optical waveguide modulator in lithium niobate", IEEE J. of Quantum electronics, 25, 720-728, 1989.
- [7] J.C. Baumert, C. Walther, P. Buchmann, H. Kaufmann, H. Melchior and P. Günter, "KNb03 electro-optic induced optical waveguide/cut-off modulator", Appl. Phys. Lett., 46, 1018-1020, (1985)
- [8] K. Noguchi, O. Mitomi and H. Miyazawa, "Millimeter-Wave Ti:LiNbO₃ Optical Modulators", J. Of Lightwave Technology, **16**, 615-619 (1998).

OPTIQUES INTEGREES A BASE DE VERRES DE CHALCOGENURE POUR DES APPLICATIONS DANS LE PROCHE ET LE MOYEN INFRAROUGE

Enguerran Delcourt¹, Aldo Gutiérrrez-Arroyo¹, Walid El Ayed¹, Loïc Bodiou¹, Jonathan Lemaitre¹, Parastesh Pirasteh¹, Yannick Dumeige¹, Isabelle Hardy²,Emeline Baudet³, Florent Starecki³, Radwan Chahal³, Marion Baillieul, Virginie Nazabal³ et <u>Joël</u> Charrier¹

¹ Foton, UMR-CNRS 6082, ENSSAT BP80518, F-22305 Lannion Cedex, France
² Foton, UMR-CNRS 6082, IMT Atlantique, F-29238 Brest, France
³ ISCR, UMR-CNRS 6226, Glass and Ceramics Team, 35042 Rennes, France

joel.charrier@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente l'ensemble des résultats expérimentaux de caractérisations optiques dans le proche et le moyen infrarouge d'une plateforme intégrée en verres de chalcogénure en exploitant leur propriété non linéaire d'ordre 3 et leur large transparence dans l'infrarouge. Ainsi, des mesures notamment de mélange à quatre ondes ont été réalisées sur des guides de type ruban et des microcavités en anneau à 1550 nm. Enfin, des mesures de transduction ont permis de détecter des substances liquides absorbantes dans le moyen infrarouge.

MOTS-CLEFS : Optiques intégrées ; Verres de chalcogénures ; Optique non linéaire ; Moyen Infrarouge ; Transducteur ; Terres rares.

1. Introduction

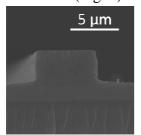
Les verres de chalcogénure, de par leur facile mise en œuvre, leurs propriétés en optique non linéaire et leur transmission dans le moyen infrarouge, possèdent beaucoup d'atouts pour fabriquer des dispositifs en optique intégrée dans les proche et moyen infrarouges [1, 2]. En particulier, le traitement du signal tout optique dans la fenêtre des communications optiques à 1550 nm profite de leurs non linéarités optiques élevées [3]. Par ailleurs, ces verres présentent également de larges bandes de transparence dans le moyen infrarouge (MIR) selon leur composition. Les capteurs spectroscopiques à onde évanescente peuvent ainsi bénéficier du développement de ces matériaux pour détecter des molécules possédant des bandes d'absorption caractéristiques dans le MIR [4]. Pour ces deux applications (communication optique et détection), la tendance actuelle est de développer des composants intégrés afin de minimiser les coûts de production d'une part et de réduire l'encombrant des dispositifs en mettant en œuvre des composants miniaturisés.

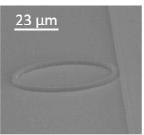
Dans cet article, nous proposons d'illustrer le développement de cette plateforme en optique intégrée à base de verres de chalcogénure dans les proche et moyen infrarouges.

2. FABRICATION DE CIRCUITS OPTIQUES INTEGRES EN VERRES DE CHALCOGENURES

Les couches en verres de chalcogénure (ChG) sont déposées sur un substrat de silicium par pulvérisation de magnétron RF. Les guides de type ruban sont constitués typiquement d'une première couche de confinement de composition nominale Ge_{28.1}Sb_{6.3}Se_{65.6} (Se2) sur laquelle est déposée la couche guidante de composition Ge_{12.5}Sb₂₅Se_{62.5} (Se6). Pour obtenir les couches actives, un verre de Ge₂₀Ga₅Sb₁₀Se₆₅ a été dopé par des ions Praséodyme à 5000 ppm. Les guides ont ensuite été fabriqués par photolithographie et gravure sèche (Reactive Ion Etching) avec un plasma de CHF₃. Différentes structures de guidage d'onde telles que des guides

d'ondes de type ruban, des résonateurs à micro-anneaux ou des guides d'ondes en spirale ont été réalisées (Fig. 1).





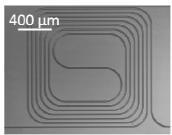
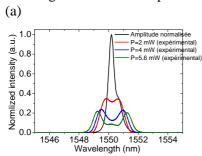
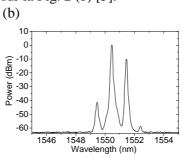


Fig. 1 : Images de microscope électronique à balayage d'un a) guide de type ruban, b) micro-résonateur en anneau, c) guide de type ruban en spirale à base de verres de ChG.

3. APPLICATIONS DANS LE PROCHE INFRA-ROUGE

A partir des guides de type ruban fabriqués, l'automodulation de phase (SPM) a été démontrée comme illustré sur la Fig. 2 (a) représentant l'élargissement caractéristique du spectre en fonction de la puissance. L'objectif est d'utiliser l'effet non linéaire de troisième ordre par le mélange à quatre ondes pour le traitement du signal optique et la génération des peignes de fréquence. Ainsi, un exemple d'observation du mélange à quatre ondes dans ces mêmes guides avec une longueur du cm est représentée sur la Fig. 2 (b) [5].





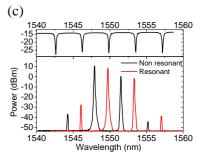


Fig. 2 : Spectres d'automodulation de phase dans des guides en verres de ChG en fonction de la puissance ; (b) Spectre de mélange à quatre ondes dans des guides en verres de ChG de longueur égale à 1 cm; (c) Spectres de mélange à quatre ondes hors résonance et en résonance dans des microcavités en verres de ChG.

Enfin, l'utilisation de microrésonateurs en anneau à base de chalcogénures peut exacerber les propriétés non linéaires de ces verres de chalcogénure dans la cavité et donc conduire à une augmentation de l'efficacité de conversion comme le montre la Fig. 2 (c). Ce facteur d'amélioration du champ optique à l'aide de structures résonantes dépend de la conception du résonateur (dimensions du guide d'onde, coefficient de couplage κ entre le guide d'ondes de bus et le résonateur à anneau, des pertes).

4. APPLICATIONS DANS LE MOYEN INFRA-ROUGE

Pour exploiter les propriétés de transparence des verres de chalcogénures dans le Moyen Infrarouge (MIR), des études ont été menées en parallèle pour développer un capteur spectroscopique à onde évanescente fonctionnant à 7,7 µm d'une part et une source de lumière réalisée à partir de ces verres dopés par des ions terres rares d'autre part afin d'intégrer ces deux dispositifs à terme sur la même plateforme de façon monolithique. Des mesures de pertes ont été réalisées et révèlent des pertes de l'ordre de 2,5 dB/cm (Fig3 (a)) [6].

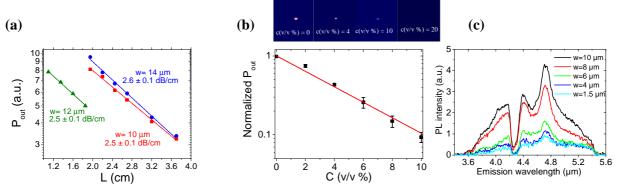


Fig. 3 : Mesure de la puissance optique à la sortie des guides en verres de ChG en fonction de la longueur du guide pour différentes largeurs w=10, 12 et 14 μ m à 7,7 μ m; (b) Mesure de la Puissance optique à la sortie du guide en verres de ChG en fonction de la concentration volumique de l'isopropanol comme exemple de transduction à 7,7 μ m; (c) Spectres de PL guidée dans le MIR d'un guide de type ruban réalisé à partir d'une couche en verre de ChG dopé par des ions Pr³

Des tests de transduction ont été réalisés en phase liquide comme illustré sur la fig. 3 (b). La puissance optique transmise à la sortie des guides d'ondes est enregistrée en fonction de la concentration de l'analyte. Des limites de détection de 2% v / v et 0.2 v / v % ont été démontrées, respectivement, pour l'isopropanol et l'acide acétique dans le cyclohexane [7, 8]. Enfin, avec un pompage en co-propagation à 1550 nm, la photoluminescence guidée dans le MIR guidé à large bande a été mesurée pour la première fois au-dessus de 4 μ m à partir des guides en verres de chalcogénure dopés dans la perspective de fabriquer une source dans le MIR [9, 10].

CONCLUSION

L'ensemble de ces résultats sera présenté et représente des étapes prometteuses vers le développement d'une plateforme optique en verres de chalcogénures pour des applications non linéaires d'ordre 3 dans le proche infrarouge d'une part et pour des applications de transduction par onde évanescente en intégrant sur la plateforme de possibles sources lumineuses fonctionnant dans le moyen infrarouge d'autre part.

RÉFÉRENCES

- [1] Chalcogenide Glasses, 1st Edition, Preparation, Properties and Applications, Editors: J.L. Adam & X.-H. Zhang, Woodhead Publishing, ISBN: 9780857093455 (2013).
- [2] B. J. Eggleton, et al., Chalcogenides photonics, Nat. Photonics, 5, 141 (2011).
- [3] M. Olivier, *et al.*, Structure, nonlinear properties, and photosensitivity of (GeSe2)100-x(Sb2Se3)x glasses, Opt. Mater. Express, 4, 525 (2014).
- [4] M. Sieger, B. Mizaikoff, Toward on-chip mid-infrared sensors, Anal. Chem., 88, 5562 (2016).
- [5] E. Delcourt *et al.*, Nonlinear properties of ridge waveguide based on chalcogenide films at 1550 nm, soumis à Journal of Applied Physics
- [6] A. Gutierrez-Arroyo, *et al.*, Optical characterization at 7.7 µm of an integrated platform based on chalcogenide waveguides for sensing applications in the mid-InfraRed, Opt. Express, 24, 23109 (2016).
- [7] Aldo Gutierrez-Arroyo, *et al.*, Theoretical study of an evanescent optical integrated sensor for multipurpose detection of gases and liquids in the Mid-Infrared, Sensors and Actuators B: Chemical, 242, 842–848 (2017).
- [8] A. Gutierrez-Arroyo *et al.*, Mid-Infrared Optical Integrated Sensor Based On Chalcogenide Waveguides For Chemical Detection In Liquid Media, soumis à Sensors and Actuators B: Chemical
- [9] Giuseppe Palma, *et al.*, Mid-infrared guided photoluminescence from integrated Pr3+-doped selenide ridge waveguides", Optics Express, 25, 7014-7030 (2017).
- [10] L. Bodiou *et al.*, Mid-infrared guided photoluminescence from integrated Pr³⁺-doped selenide ridge waveguides, soumis à Optics Express

PRODUCTION MECANIQUE DE MEMBRANES ELECTRO-OPTIQUES SUB-MICRONIQUES A TRES FAIBLE RUGOSITE

Ludovic Gauthier-Manuel¹, Alexis Caspar¹, Florent Behague¹, Anthony Perignon¹, Venancio Calero¹, Gwenn Ulliac¹, Miguel Suarez¹, Maria-Pilar Bernal¹, Nadège Courjal¹

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

Nadege.courjal@femto-st.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons deux techniques de production mécaniques de membranes fines d'épaisseur micronique ou sub-micronique de cristaux monocristallins. En comparaison des technologies d'ion slicing, les technologies proposées sont simples à mettre en œuvre, et permettent la réalisation de guides électro-optiques confinés à faibles pertes d'insertion (< 3 dB). Ces travaux ouvrent la voie à une nouvelle génération de composants ou circuits photoniques intégrés sur membranes actives, électro-optiques, piézo-électriques ou non-linéaires.

MOTS-CLEFS: membranes électro-optiques, niobate de lithium, micro-usinage

1. Introduction

La production de couches minces électro-optiques est un graal de l'optique intégrée, car elle ouvre la porte vers les circuits photoniques denses à faible consommation énergétique [1]. Ainsi, l'avènement de couches minces commerciales électro-optiques LiNbO₃ développées par la technologie dite d'« ion-slicing » [2], a stimulé de nombreuses équipes à développer une gamme variée d'applications, allant des résonateurs électro-optiques aux circuits acoustiques [3] en passant par les circuits photoniques non-linéaires [4].

Deux inconvénients majeurs sont néanmoins encore associés aux composants issus des technologies « ion-slicing ». D'une part, l'ion-slicing implique un grand nombre d'étapes technologiques dont certaines nécessitent des conditions contraignantes de sécurité : implantation ionique, attaque à l'acide fluorhydrique par exemple. D'autre part, la production en couches minces homogènes présente l'inconvénient d'un très faible couplage avec des fibres optiques classique : cela génère des pertes souvent supérieures à 10 dB qui sont rédhibitoires pour des applications industrielles. Si des solutions sont désormais proposées concernant les pertes de couplage (tapers usinés à postériori, photonic wire bonding [5], fibrage par lentille [6]), elles sont en général synonymes de technologies alourdies ou perte de compacité. Nous proposons ici deux approches mécaniques qui offrent l'intérêt d'être simples à mettre en œuvre, génériques, et l'une des deux est compatible avec l'insertion de tapers sans ajouter aucune étape technologique. Ces deux technologies sont respectivement l'amincissement mécano-chimique et la découpe-polissage à la scie circulaire de précision. Nous montrons comment ces deux technologies bien connues peuvent être mises à profit pour l'usinage de précision et la production de composants électro-optiques originaux.

2. MEMBRANES ELECTRO-OPTIQUES PAR AMINCISSEMENT MECANO-CHIMIQUE

Le procédé par amincissement mécano-chimique est très attractif lorsque l'objectif est d'obtenir un film fin monocristallin d'épaisseur un micromètre ou plus. Nous visons à développer des lames fines biréfringentes qui pourront se fixer en bout de fibre optique pour assurer un contrôle de polarisation sans générer les pertes classiquement obtenues avec des lames plus épaisses. Pour la réalisation de lames biréfringentes, nous partons d'un wafer LiNbO₃ en coupe X collé par

thermocompression à température ambiante sur un wafer support en silicium. Le substrat de niobate de lithium est ensuite aminci par CMP (Chemical-Mecanical Polishing). L'épaisseur est régulièrement contrôlée par une technique de spectrométrie large bande en réflexion, avec une précision de 40 nm. A titre d'exemple, une lame quart-d'onde d'ordre 0 (épaisseur = 5.4 μ m pour λ =1500 nm) présente une homogénéité de 1 μ m sur la surface d'un wafer 3 pouce et 63 % de la surface du wafer est compatible avec son utilisation en quart d'onde sur la bande C télécom. La figure 1 montre la cartographie du wafer mince obtenue par spectrométrie en réflexion. Nous avons ensuite développé un procédé pour coller la lame mince en bout de fibre puis détacher le wafer support. La figure 1(b) montre le résultat final, obtenu après immersion dans un bain de gravure. Ces développements sont très attractifs pour injecter des états de polarisation contrôlés (circulaires par exemple) dans les circuits optiques.

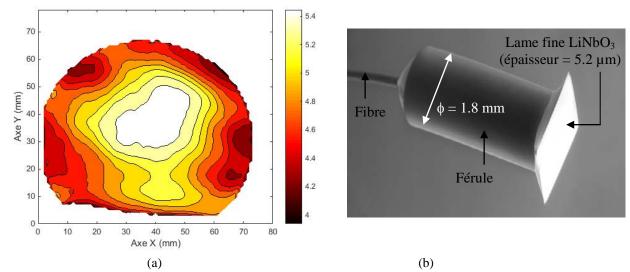
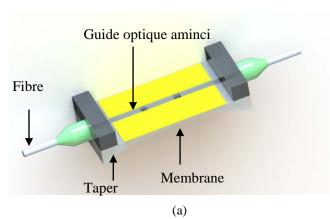


Fig. 1: Images de lames fines LiNbO₃. (a): Cartographie d'épaisseur obtenue sur une lame LiNbO₃ amincie par CMP. La cartographie est prise sur un wafer 3 pouces, par spectrométrie en réflexion. (b) Image au microscope d'une lame biréfringente quart d'onde collée sur fibre.

3. MEMBRANES CALIBREES A FAIBLES PERTES PAR DECOUPE/POLISSAGE A LA SCIE CIRCULAIRE DE PRECISION

Lorsque les applications requièrent des épaisseurs plus fines que le micromètre (par exemple lorsque la membrane héberge un guide optique destiné à être monomode), nous proposons une autre technologie basée sur l'exploitation de la scie circulaire de précision [7]. La technologie que nous proposons permet également de favoriser un fort recouvrement avec une fibre optique classique [8]. L'approche consiste à réaliser un guide optique dans des conditions standards (par exemple par diffusion titane s'il s'agit d'un substrat en niobate de lithium). Le guide est ensuite aminci localement sur la face arrière du substrat en usinant le matériau grâce à une lame de scie dont la profondeur de travail p a été préalablement calibrée. L'épaisseur e de membrane restante correspond à : e=t-p où t est l'épaisseur du wafer. Nous pouvons ainsi obtenir des membranes de 400 nm d'épaisseur. Des convertisseurs de mode optimisant le couplage avec les fibres optiques sont obtenus simplement en remontant la lame de scie avant la fin du guide (cf Fig. 2(a)). Nous avons ainsi montré des membranes électro-optiques de 4 μ m d'épaisseur avec des pertes d'insertion inférieures à 3 dB pour les polarisations TE et TM. Nous montrerons également comment cette approche ouvre la voie à une nouvelle génération d'éléments photoniques sur membranes (résonateurs, MOEMs...). La figure 2 illustre deux exemples de telles réalisations.



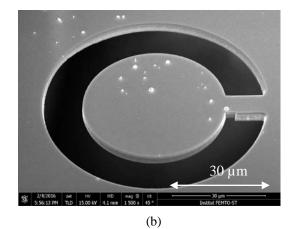


Fig. 2 : Membranes électro-optiques LiNbO₃ réalisées à la scie circulaire de précision par découpe/polissage. (a) Vue schématique d'un guide LiNbO₃ inscrit dans une membrane avec des tapers à ses extrémités. (b) Image MEB d'un disque inscrit par F.I.B. dans une membrane elle-même obtenue par amincissement à la scie circulaire.

CONCLUSION

Nous proposons deux approches simples pour produire et caractériser des couches fines et membranes fines électro-optiques. Nos développements concernent actuellement le niobate de lithium, mais ils peuvent aisément être extrapolés à d'autres types de matériaux. A titre d'exemple, nous montrons la réalisation d'une lame quart d'onde à l'ordre 0 collée à une fibre et la réalisation de guides fins électro-optiques à faibles pertes. L'objectif est maintenant de développer des circuits photoniques hybrides exploitant et intégrant les éléments photoniques issus de ces technologies.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Florent Bassignot et Hervé Maillote pour leur contribution dans le développement des technologies d'amincissement par CMP. Remerciements également aux financeurs : SATT grand Est (projet µguide d'onde optique), ANR (ANR-16-CE24-0024-01), projet FRI A1401001I, Labex Action. Les développements technologiques ont été effectués à la centrale MIMENTO, réseau RENATECH.

REFERENCES

- [1] L. Chen, Q. Xu, M. G. Wood, and R. M. Reano, "Hybrid silicon and lithium niobate electro-optical ring modulator," Optica 1, 112-118 (2014)
- [2] www.nanoln.com/en.
- [3] D Gachon, E Courjon, G Martin, L Gauthier-Manuel, J-C Jeannot, W Daniau, S Ballandras, *Fabrication of high frequency bulk acoustic wave resonator using thinned single-crystal lithium niobate layers*, Ferroelectrics **362**, 30-40 (2008)
- [4] A. Rao, M. Malinowski, A. Honardoost, J. R. Talukder, P. Rabiei, P. Delfyett, and S. Fathpour, "Second-harmonic generation in periodically-poled thin film lithium niobate wafer-bonded on silicon," Opt. Express 24, 29941-29947 (2016)
- [5] N. Lindenmann, G. Balthasar, D. Hillerkuss, R. Schmogrow, M. Jordan, J. Leuthold, W. Freude, and C. Koos, "*Photonic wire bonding: a novel concept for chip-scale interconnects*," Opt. Express **20**, 17667-17677 (2012)
- [6]_J. Fernandez Herrera and H. E. Hernandez-Figueroa, "Coupling experience between conical micro-lenses fiber and SOI photonic chip," in *Latin America Optics and Photonics Conference*, (Optical Society of America, 2016), paper LTu4A.31.
- [7] N. Courjal, B. Guichardaz, G. Ulliac, J.-Y. Rauch, H.-H. Lu, M.-P. Bernal, *High aspect ratio lithium niobate ridge waveguides fabricated by optical grade dicing*, J. Phys. D: Appl. Phys, **44**, 305101, (2011) [8] 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)