

FILMS DE LiNbO_3 : UNE PLATEFORME POUR FONCTIONS OPTIQUES PHOTOINDUITES

Mathieu Chauvet,¹ Anton Perin², Alessandro Bile³, Florent Bassignot⁴, Ludovic Gauthier-Manuel¹, Eugenio Fazio³

¹*Institut FEMTO-ST UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté, 15B Avenue des Montboucons, 25030 Besançon, France*

²*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), 40, prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russie*

³*Department of Fundamental and Applied Sciences for Engineering, Sapienza University of Rome, via A. Scarpa 16, Rome, Italie*

⁴*FEMTO-Engineering, 15B Avenue des Montboucons, 25030 Besançon, France*

mathieu.chauvet@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

Nous montrons que les films de LiNbO_3 constituent un milieu photosensible attractif offrant la possibilité d'induire des fonctions optiques reconfigurables. Deux résultats illustrent ce potentiel. La photosensibilité surprenante de films de LiNbO_3 dopés MgO est mise en évidence et des résultats sur la formation de jonctions-X accordables aptes à remplir la fonction de neurones optiques sont détaillés.

MOTS-CLEFS : *faisceaux autofocalisés; film de niobate de lithium; effet photoréfractif; Neurones optiques*

Les films de LiNbO_3 sont au cœur des activités de nombreuses équipes de recherche en raison d'un fort potentiel tant pour les composants RF exploitant les propriétés piézoélectriques que pour le développement de puces optiques utilisant les propriétés électro-optiques et nonlinéaires [1-3]. Ce matériau est également connu comme un milieu holographique efficace en raison de ses propriétés photoréfractives (PR) [4]. La photosensibilité de ce matériau a cependant été principalement étudiée et exploitée dans des cristaux massifs mais la configuration planaire a des intérêts indéniables. L'étude de la photosensibilité des films de LiNbO_3 est donc motivée par plusieurs raisons. Tout d'abord, les performances comme la sensibilité ou encore le temps de réponse peuvent être améliorées en raison de la géométrie et du confinement de la lumière. Par ailleurs, des effets physiques nouveaux apparaissent et l'interaction entre faisceaux est facilité puisque la lumière et les charges sont déjà confinées dans une dimension. De plus, des architectures nouvelles sont possibles telle que le contrôle de faisceaux guidés dans le film à l'aide d'un faisceau externe au milieu. Enfin, le potentiel applicatif est élargi avec la possibilité d'une intégration avec des composants photoniques et électroniques si l'on considère par exemple, les films de LiNbO_3 sur silicium.

Les films de LiNbO_3 considérés dans ce travail sont fabriqués à partir de wafer de LiNbO_3 de qualité photonique de $500\mu\text{m}$ d'épaisseur. Une couche tampon de silice (typiquement $1\mu\text{m}$) est ensuite déposée sur une face du wafer suivi de la pulvérisation de 300nm d'or. Une couche d'or d'épaisseur similaire est ensuite déposée sur un wafer de silicium de $500\mu\text{m}$ d'épaisseur. Les deux wafers sont ensuite collés par liaison or-or sous pression à température ambiante afin d'éviter les contraintes mécaniques dues aux différents coefficients de dilatation thermique du silicium et du LiNbO_3 . La structure ainsi formée est alors rectifiée et polie afin d'atteindre l'épaisseur de LiNbO_3 voulue. Ce wafer hybride est ensuite découpé à l'aide d'une scie de précision pour former des échantillons rectangulaires. Le film de LiNbO_3 (indice proche de 2,1) et son buffer de silice constituent alors un guide plan de contraste d'indice élevé.

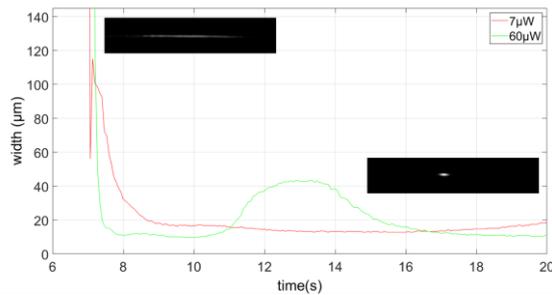


Figure 1: dynamique d'autofocalisation observée pour des puissances injectées de $7\mu W$ et $60\mu W$. Image des faisceaux avant et après focalisation maximale (insert). Paramètres : $\Delta T = +5^\circ C$, longueur échantillon 20mm, faisceau d'entrée FWHM = $15\mu m$.

Dans cette étude, ces guides plans sont analysés et exploités à l'aide d'un faisceau à 532nm CW d'environ $15\mu m$ de diamètre (FWHM) injectés par les faces découpées à la scie. Bien que le guide soit multimode à cette longueur d'onde, une injection appropriée permet l'excitation du seul mode fondamental. La température de l'échantillon est ensuite augmentée et réglée à l'aide d'un module Peltier afin d'induire un champ pyroélectrique constant à l'intérieur de l'échantillon [5]. L'effet PR exploité est contrôlé par ce changement de température ΔT et l'origine de l'autofocalisation est une conséquence directe de la modification de ce champ électrique sous l'influence de la lumière. Ainsi, en présence d'un effet PR adéquat le faisceau s'auto-confine latéralement et donne naissance à une propagation sans diffraction, un régime solitonique est alors atteint [6]. La sortie du guide est observée à l'aide d'une caméra CCD associée à un objectif de microscope afin d'analyser ce comportement.

Cette technique est tout d'abord appliquée pour étudier les propriétés d'un guide plan constitué d'un film de $LiNbO_3$ de $7\mu m$ d'épaisseur dopé avec 5%mol d'oxyde de magnésium (MgO). Il est important de noter que ce dopage est utilisé couramment pour limiter l'effet PR afin d'obtenir un fonctionnement stable des composants optoélectroniques fabriqués à partir de ce matériau. L'expérience réalisée ici montre au contraire qu'une variation d'indice photoinduite se met en place rapidement même pour des faisceaux de très faible puissance pour donner naissance à des faisceaux solitons. Ainsi, la figure 1 montre qu'un faisceau injecté de $60\mu W$ s'autofocalise en moins de 300ms lorsque la température de la structure a été préalablement élevée de $\Delta T = 5^\circ C$. Les mesures réalisées avec la caméra indiquent que le temps de réponse décroît inversement proportionnellement à la puissance injectée ce qui nous permet de déduire que des puissances de quelques mW permettrait d'atteindre des temps de réponse proche de la ms. Par ailleurs, il faut noter que cette autofocalisation efficace laisse place à un guide mémorisé dans le matériau. Celui peut ainsi guider un signal à une longueur d'onde pour laquelle la photosensibilité est négligeable comme dans le proche IR.

Cette forte sensibilité combinée à des temps de réponse qui sont au moins deux ordres de grandeurs inférieurs aux réponses du matériau massif ouvre donc la voie à la réalisation de structures reconfigurables basées sur cette variation d'indice.

Dans un second temps, cette configuration planaire est également exploitée pour démontrer la réalisation de fonctions induites plus complexes. Cette seconde étude est réalisée dans un guide plan constitué d'un film de $LiNbO_3$ de $8\mu m$ d'épaisseur non dopé. L'objectif est ici de montrer que l'on peut photoinduire des jonctions X [7] permettant de mélanger deux signaux optiques d'entrée afin de les rediriger avec un ratio choisi vers les deux sorties. L'analogie architecturale de telles jonctions avec celle de neurones biologiques connectés par les synapses est manifeste. A cela s'ajoute, la possibilité de reconfigurer les propriétés de la jonction X par voie optique qui apporte la fonctionnalité d'apprentissage à ce neurone optique. La plasticité de ces jonctions X pour remplir le rôle de neurones dans un réseau optiques est ainsi au cœur d'études récentes [8-9].

La présente démonstration fait apparaître que la configuration planaire offre un très bon contrôle de la propagation des faisceaux et de leur couplage. De plus, la possibilité d'utiliser un

faisceau externe pour effacer la structure apporte une souplesse supplémentaire. Le point saillant de la démonstration révèle que le choix du rapport de puissance entre deux faisceaux incohérents d'écriture, qui se croisent pour inscrire la jonction, conditionne le pouvoir séparateur de la jonction X formée. Ainsi sur la figure 2a, une jonction a été photoinduite à partir de deux faisceaux de puissances similaires. Dans ce cas, un signal injecté sur l'une ou l'autre des entrées de cette jonctions mémorisée se scinde en deux parties égales comme le montre l'observation des sorties (fig. 2a). Si maintenant l'un des deux faisceaux d'écriture est plus intense, le transfert de puissance sera déséquilibré. Ainsi sur la figure 2b, la phase d'écriture a été faite avec un faisceau d'écriture A trois fois plus puissant que le faisceau B. Lors de l'injection d'un signal dans une des entrées, un peu plus de 80 % de la puissance apparaît dans le canal de sortie dominant. L'observation présentée fig. 2b correspond à un signal injecté dans l'entrée B mais un résultat similaire est obtenu si le signal est injecté dans l'entrée A. Par analogie aux neurones biologiques, les neurones solitons dans les films de LiNbO₃ peuvent donc augmenter et diminuer leur force synaptique en fonction des entrées.

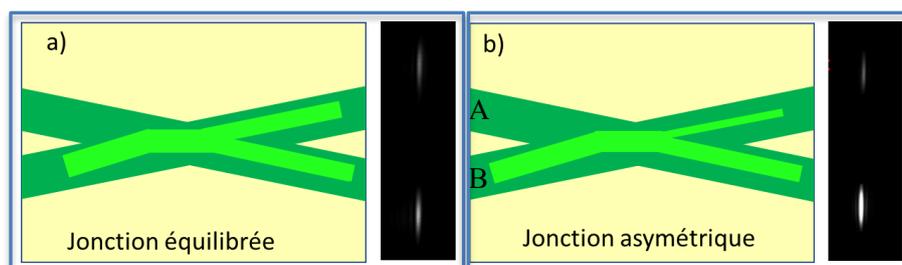


Figure 2: représentation schématique de jonctions X induites par faisceaux autofocalisés et observation expérimentale des sorties avec signal d'entrée injecté en B. Cas de 2 faisceaux d'écriture de même puissance (a) et pour puissance A/puissance B = 3 (b).

En conclusion, deux démonstrations exhibent le potentiel des films de LiNbO₃ pour photoinduire des fonctions optiques. Tout d'abord, la surprenante photosensibilité associée à des temps de réponse courts de films de LiNbO₃:MgO est mise en évidence. L'induction dans des couches de LiNbO₃ de jonctions X accordables optiquement est ensuite présentée. Ces jonctions présentent des propriétés architecturales et d'accordabilité qui permettent d'envisager de les utiliser pour remplir le rôle de neurones photoniques.

REFERENCES

1. J. Lu et al., "ultralow-threshold thin-film lithium niobate optical parametric oscillator", *Optica* **8**, 539-544 (2021).
2. V. Pêcheur et al., "Watt-level SHG in undoped high step-index PPLN ridge waveguides", *OSA continuum*, **4**, 1404-1414, (2021).
3. M. Zhang et al., "Integrated lithium niobate electro-optic modulators : when performances mees scalability", *optica* **8**, 652-667 (2021)
4. A.M. Glass et al., "Highvoltage bulk photovoltaic effect and the photorefractive process in LiNbO₃", *Applied Physics Letters*, **25**, 233-235, (1974)
5. J. Safioui et al. , " Pyroliton: pyroelectric spatial soliton ", *Opt. Express* **17**, 22209, (2009)
6. M. Chauvet et al., "Fast-beam self-trapping in LiNbO₃ films by pyroelectric effect", *Optics Letters*, **40**, 1258-1261 (2015).
7. Henning Fouckhardt et al., "All-optical switching in waveguide X junctions," *J. Opt. Soc. Am. B* **7**, 803-809 (1990)
8. M. Alonzo, et al., "All-Optical Reinforcement Learning In Solitonic X-Junctions", *Scientific Reports* **8**, 5716 1-7 (2018)
9. A. Bile et al., "supervised and unsupervised learning using a fully-plastic all-optical unit of artificial intelligence based on solitonic waveguides", *Neural computing and applications*, **33**, 17071–17079 (2021).