



Programme et publications JNOG

Date: Mardi, 03.07.2018	
11:00 - 12:30	O1-B: Session Orale conjointe CFOR / JNOG
Amphi Grignard	
14:00 - 16:00	O2-B: Session Orale JNOG #1 Communications optiques et réseaux
Amphi Grignard	
Date: Mercredi, 04.07.2018	
8:30 - 10:30	O3-B: Session Orale JNOG #2 Fibres optiques spéciales et lasers à fibres
Amphi Grignard	
17:30 - 19:00	PO-01 F: Session posters JNOG/CFOR #1
Salle B24	
Date: Jeudi, 05.07.2018	
8:30 - 10:30	O5-B: Session Orale JNOG #3 Laser et contrôle fréquentiel
Amphi Grignard	
Date: Vendredi, 06.07.2018	
8:30 - 10:30	O7-B: Session Orale JNOG #4 Optique non linéaire en optique guidée
Amphi Grignard	
11:00 - 12:30	O8-B: Session Orale JNOG #5 Instrumentation et capteurs pour et par l'optique guidée
Amphi Grignard	

Présentations

O1-B: Session Orale conjointe CFOR / JNOG

Heure: Mardi, 03.07.2018: 11:00 - 12:30 · Salle: Amphi Grignard

11:30 - 11:50

Extensométrie dynamique par réseaux de Bragg d'échantillons sollicités sous pression magnétique

S. Magne¹, S. Nehr¹, N. Roussel¹, G. Laffont¹, G. Le Blanc², Y. Barbarin², J. Luc², O. Lassalle², F. Sinatti²

¹CEA-LIST, Laboratoire Capteurs Architectures Electroniques F-91191 Gif-sur-Yvette; ²CEA DAM, CEA-Gramat F-46500 Gramat; sylvain.magne@cea.fr

Un dispositif d'extensométrie dynamique à réseaux de Bragg, immune au plan EM, a été validé (installation CYCLOPE) sur échantillons métalliques soumis à des pressions magnétiques sous hautes puissances pulsées. Il fournit des mesures directes de déformations en surface d'échantillon, en vue d'alimenter des codes de calculs Magnéto-Hydro-Dynamiques.

11:50 - 12:10

Mesure Répartie de la Corrosion des Armatures de Renforcement des Structures en Béton par Réflectométrie Fréquentielle

S. Magne, S. Ali Alvarez, S. Rougeault

CEA-LIST, Laboratoire Capteurs Architectures Electroniques, F-91191 Gif-sur-Yvette; sylvain.magne@cea.fr

Une mesure par réflectométrie fréquentielle (OFDR-*Optical Frequency-Domain Reflectometry*) du profil de déformation le long d'une fibre optique déployée sur une armature de renforcement d'une structure en béton armé permet de localiser/identifier le processus de corrosion et analyser périodiquement son évolution. Une preuve de concept est établie.

12:10 - 12:30

CARACTERISATIONS EXPERIMENTALES D'UN DISPOSITIF DE "PUISSANCE SUR FIBRE" POUR LA TRANSMISSION DE DONNEES DANS LE CONTEXTE DES OBSERVATOIRES DE FOND DE MER.

L. Ghisa, A. Pérennou, R. Hamie, V. Quintard, M. Guegan

Lab-STICC, UMR CNRS 6285, ENIB, France; perennou@enib.fr

Nous étudions des solutions optiques de pilotage des capteurs distants pour des observatoires sous-marins. Nous présentons les résultats expérimentaux obtenus sur la dernière version d'une extension d'optoalimentation : caractérisations de l'amplification des données en fonction de la puissance du laser fournissant l'énergie d'alimentation.

O2-B: Session Orale JNOG #1

Heure: Mardi, 03.07.2018: 14:00 - 16:00 · Salle: Amphi Grignard

Communications optiques et réseaux

14:00 - 14:30

Invitée

Quand les réseaux optiques deviennent (enfin) flexibles

P. Layec, A. Dupas, S. Bigo

Nokia Bell Labs, France; patricia.layec@nokia-bell-labs.com

Les réseaux optiques métropolitains, situés à la convergence entre opérateurs télécoms et over-the-top (OTTs), deviennent dynamiques et s'appuient sur les briques optiques élémentaires devenues flexibles telles que les transpondeurs universels. Les points bloquants et nouvelles fonctionnalités nécessaires à la flexibilité sont résumés.

14:30 - 14:45

NOUVEAUX LASERS HYBRIDES III/V SUR SILICIUM LARGEMENT ACCORDABLES POUR LES RESEAUX D'ACCES NG-PON2

A. Gallet³, N. Girard¹, D. Make¹, J.-G. Provost¹, A. Shen¹, G. Duan¹, H. Debrégeas¹, S. Malhouitre², S. Olivier², K. Hassan², F. Grillot³

¹3-5 lab; ²CEA Leti; ³Telecom Paristech; antonin.gallet@3-5lab.fr

Ce travail présente un nouveau type de laser accordable hybride III-V/Si pour l'accès NG-PON2. Le laser combine un résonateur en anneau avec un interféromètre de Mach-Zehnder. Il est largement accordable et présente des performances compatibles avec les spécifications de NG-PON2.

14:45 - 15:00

Méthode de la rotation de phase de la constellation afin de réduire le bruit du transmetteur dans les réseaux optiques.

S. Almonacil^{1,2}, P. Jennevé¹, P. Ramantanis¹, P. Layec¹

¹Nokia Bell Labs France, France; ²Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Charles Fabry, France; sylvain.almonacil@nokia-bell-labs.com

Nous présentons une nouvelle méthode en 2 étapes de rotation de phase de la constellation pour réduire la pénalité de quantification des DACs résultant de la pré-compensation de la dispersion chromatique (CD). Nous démontrons expérimentalement un gain de 1dB en SNR pour un signal 16QAM utilisant un DAC de résolution 4 bits.

15:00 - 15:15

Conception d'un filtre optique à profil arbitraire de signaux micro-ondes par diffusion Brillouin stimulée

W. Wei^{1,2}, Y. Jaouën¹, L. Yi², W. Hu²

¹Telecom ParisTech, France; ²Shanghai Jiao Tong University, China; ves.jaouen@telecom-paristech.fr

Le phénomène de diffusion Brillouin stimulée est proposé pour la conception de filtres optiques à profil arbitraire par simple contrôle du spectre de la pompe. Afin d'ajuster le spectre de gain et la réjection hors-bande, le niveau de chaque composante fréquentielle du signal de commande de la pompe est ajusté par boucle de rétroaction numérique.

15:15 - 15:30

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'ELLIPTICITÉ DU CŒUR SUR LA DIAPHONIE MODALE DANS UNE FIBRE FAIBLEMENT MULTIMODE

L. Provino¹, T. Taunay¹, B. Denolle², S. Le Gall³

¹PERFOS, RTO de Photonics Bretagne, France; ²CAILabs, 38 boulevard Albert 1er, 35200 Rennes, France; ³SAFRAN LABINAL POWER SYSTEMS, 1 rue Louis Blériot, CS80049, 31702 Blagnac Cedex, France; taunay@photonics-bretagne.com

L'objectif du présent papier est de présenter les résultats d'une étude permettant d'optimiser le découplage des modes spatiaux d'une fibre faiblement multimode à cœur elliptique et à gradient d'indice parabolique afin de permettre la propagation d'un nombre maximal de modes excités possédant une diaphonie minimale.

15:30 - 16:00

Invitée

Communications optiques basées sur la transformée de Fourier non-linéaire

M. Yousefi, Y. Jaouën, W. Gemechu, J.-W. Goossens, M. Song

Telecom ParisTech, France; mansoor.isvandyousefi@telecom-paristech.fr

Les performances des systèmes optiques sont limitées par les effets nonlinéaires. La transformée de Fourier nonlinéaire permet d'exploiter les non-linéarités afin de dépasser la limite de Shannon nonlinéaire. La démonstration d'une transmission NFDM multiplexée en polarisation constitue une étape importante dans la mise œuvre de ce type d'approche

O3-B: Session Orale JNOG #2

Heure: Mercredi, 04.07.2018: 8:30 - 10:30 · Salle: Amphi Grignard

Fibres optiques spéciales et lasers à fibres

8:30 - 9:00

Invitée

Fibre micro-structurée à cœur annulaire pour le guidage de modes OAM en régime de couplage faible

A. Tadjé^{1,2}, J. Yammine¹, G. Bouwmans¹, M. Dossou², A. Vianou², E. R. Andresen¹, L. Bigot¹

¹Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France; ²cole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Univ. d'Abomey-Calavi (UAC), Cotonou, Bénin; sha.tandje@ed.univ-lille1.fr

Nous proposons une fibre micro-structurée à cœur annulaire pour la transmission de modes à moment angulaire orbital. La géométrie proposée supporte jusqu'à 4 groupes de modes OAM avec une différence d'indices effectifs minimale de 2.13×10^{-3} à $1.55 \mu\text{m}$. La fibre ainsi réalisée apparaît comme un support intéressant pour la transmission des modes OAM.

9:00 - 9:15

Fibre de Bragg pixélisée à grande aire effective et à maintien de polarisation

O. Vanvincq, R. Habert, A. Cassez, Y. Quiquempois, G. Bouwmans, L. Bigot

Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France; olivier.vanvincq@univ-lille1.fr

Nous présentons la modélisation et la réalisation d'une fibre à bande interdite photonique toute solide dont le design est basé sur celui d'une fibre de Bragg pixélisée. L'ajout de barreaux de contrainte permet un comportement monomode sur l'un des axes propres avec un grand diamètre de mode ($26 \mu\text{m}$ à 1050nm) et un maintien de polarisation.

9:15 - 9:30

Observation de photochromisme sur amplificateur forte puissance à base de fibre optique double-gaine codopée Erbium-Ytterbium

T. Robin¹, T. Gotter¹, A. Barnini¹, P. Guittou¹, R. Montron¹, G. Mélin¹, C. Ranger¹, A. Laurent¹, S. Girard², B. Cadier¹

¹iXblue, France; ²Laboratoire Hubert Curien, France; thierry.robin@ixblue.com

Nous avons récemment mis en évidence un phénomène de photochromisme sur les fibres double-gaine co-dopées Erbium-Ytterbium. Nous présenterons quelques hypothèses sur l'origine de ce phénomène et les solutions que nous avons mises en œuvre pour réduire drastiquement ce photochromisme et ce pour des puissances de sortie jusqu'à 20W.

9:30 - 9:45

High-power ultrafast fiber laser system at 3 μm

A. Hideur¹, K. Guesmi¹, A. Haboucha^{1,2}, A. Ayoub¹, S. Idlahcen¹, T. Godin¹

¹CORIA - Université de Rouen, France; ²Phonics Bretagne, France; godint@coria.fr

We report an ultrafast Erbium doped ZBLAN fluoride fiber laser operating at $2.8 \mu\text{m}$. The system is based on a passively mode-locked seed oscillator producing a stable pulse train with 650 pJ energy per pulse at a repetition rate of 49 MHz. These pulses are then amplified in a double-clad Er-doped fiber to 7 nJ energy.

9:45 - 10:00

SOURCE LASER FIBREE PICOSECONDE DE FORTE PUISSANCE MOYENNE ET DE FORTE PUISSANCE CRETE A 2 MICRONS

J. P. Yehouessi, S. Vidal, Q. Guichot, A. Morisset, J. Boulet

ALPhANOV, France; jeanpaul.yehouessi@alphanov.com

Nous présentons une architecture laser entièrement fibrée et à maintien de polarisation délivrant des impulsions picosecondes avec une puissance moyenne de 16W à $2 \mu\text{m}$. Cette source permet de générer des impulsions avec une puissance crête de 100kW, particulièrement bien adaptées pour la génération de supercontinuum et la spectroscopie Lidar.

10:00 - 10:15

High peak power Doppler Lidar based on a 1.5 μm compressive-strained-singlemode fiber amplifier

L. Lombard, B. Augère, A. Durécu, D. Goular, F. Gustave, M. Valla, A. Dolfi-Bouteyre

onera, France; laurent.lombard@onera.fr

Onera has developed a patented SBS mitigation technique using compressive strain on fibers. This technique has been applied to a singlemode fiber amplifier and a peak power of up to 300W has been generated. We present the details of this technique, the achieved laser performances and tests results of a lidar using this compressive-strained-source.

10:15 - 10:30

Génération de supercontinuum par cascade de mélanges à quatre ondes intermodaux dans une fibre optique multimode à saut d'indice

S. Perret¹, G. Fanjoux¹, L. Bigot², J. Fatome³, G. Millot³, J. Dudley¹, T. Sylvestre¹

¹institut FEMTO-ST, France; ²Laboratoire de Physique des Lasers Atomes et Molécules PhLAM, France; ³Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne ICB, France; gil.fanjoux@univ-fcomte.fr

Nous démontrons la génération d'un supercontinuum allant de λ en injectant un laser picoseconde dans une fibre optique multimode à saut d'indice via des processus en cascade de mélanges à quatre ondes intermodaux et de diffusion Raman stimulée.

PO-01 F: Session posters JNOG/CFOR #1

Heure: Mercredi, 04.07.2018: 17:30 - 19:00 · Salle: Salle B24

Génération d'impulsions énergétiques dans un laser à fibre verrouillé en phase

M. Kemel

Laboratoire de Photonique d'Angers, Université d'Angers, France; meriem.kemel@univ-angers.fr

Dans cette communication, nous présentons la génération d'impulsions géantes et énergétiques dans un oscillateur fibré. Dans une nouvelle configuration de cavité, nous obtenons des impulsions qui ne subissent pas la quantification de l'énergie, avec des durées allant de 3 à 5 μs et des énergies entre 0.5 et 5 μJ .

MICROLENTILLE À FAISCEAU EXPANSÉ EN CONNECTEUR STANDARD POUR CAPTEUR OPTIQUE À FIBRE MONOMODE EN ENVIRONNEMENT SÉVÈRE

X. Insou^{1,3}, L. Quétel², S. Claudot³, M. Thual¹

¹Institut Foton, CNRS UMR6082, Université de Rennes 1, F-22305 Lannion, France; ²IDIL Fibres Optiques, 21 rue Louis De Broglie 22300 Lannion, France; ³Souriau-Sunbank - Esterline ECT, RD323, 72470 Champagné, France; xinsou@souriau.com

Nous proposons une microlentille à faisceau expansé en connecteur standard utile pour des applications capteurs à fibre monomode en environnement sévère. Ce connecteur offre de faibles pertes d'insertion de la bande O à la bande C, de faibles réflexions et des tolérances de positionnement relâchées par rapport à une connectique monomode.

Etude de l'effet Kerr évanescent dans une nanofibre de silice immergée dans un liquide hautement non linéaire

G. Fanjoux, J.-C. Beugnot, T. Sylvestre

institut FEMTO-ST, France; gil.fanjoux@univ-fcomte.fr

Nous étudions théoriquement la contribution à l'effet Kerr optique du champ évanescent d'une nanofibre optique de silice par rapport à la contribution de la silice du coeur en fonction de son diamètre et du milieu liquide hautement non linéaire environnant.

Interaction du nettoyage par effet kerr et raman de faisceaux lasers dans une fibre microstructurée

R. Dupiol

Université de Limoges / Laboratoire XLIM, France; richard.dupiol@unilim.fr

Nous étudions expérimentalement la compétition entre le nettoyage d'un faisceau laser par effet Kerr et effet Raman dans une fibre multimode microstructurée. La génération et le nettoyage du faisceau de la première raie Stokes Raman entraînent à la fois la déplétion et la dégradation de la qualité spatiale du faisceau.

Guides d'onde pour le proche et le moyen infrarouge réalisés par photo-inscription dans un verre chalcogénure

D. Le Coq¹, E. Bychkov², P. Masselin^{1,2}

¹Université de Rennes; ²Université du Littoral-Côte d'Opale, France; masselin@univ-littoral.fr

Une nouvelle procédure pour la réalisation de guides d'ondes par photo-inscription par laser femtoseconde dans un verre chalcogénure est présentée. Les pertes de propagation mesurées ont des valeurs inférieures à 0,2 dB/cm à la fois pour des guides fonctionnant dans le proche ($\lambda = 1,55 \mu\text{m}$) et le moyen infrarouge ($\lambda = 4,5 \mu\text{m}$).

VISIBLE CASCADED RAMAN LASING IN A MICRORESONATOR-FEEDBACK PR-FIBER LASER

Z. Cai

Université de Xiamen, Chine; zpcai@xmu.edu.cn

We realize cascaded Raman lasing at visible range in a microresonator-feedback Pr-fiber laser for the first time. A silica microsphere with an ultrahigh Q-factor is employed as a narrow bandwidth cavity mirror. By optimizing the polarization states, the cascaded Raman lasings at 0.65, 0.67 and 0.69 μm are realized, respectively.

Capteur optique pour la caractérisation du dépôt de pulvérisation agricole

A. Taleb Bendiab¹, C. Vigreux², R. Kribich³, R. Escalier², A. Ducanhez¹, R. Bendoula¹

¹ITAP team, IRSTEA, France; ²ChV, ICGM UM2, France; ³TeHO, IES France; anis.taleb-bendiab@irstea.fr

La qualité de la pulvérisation des pesticides suscite un intérêt majeur au sein de notre société, celle-ci étant directement liée à la dérive de pulvérisation.

L'objectif de notre travail est donc de développer un nouvel outil optique pour la caractérisation du dépôt qui remplacera les méthodes traditionnelles et fournir une solution opérationnelle.

Guides d'onde magnétiques bigyrotropiques couplés

Y. Boucher¹, F. Bentivegna², Y. Dadoenkova³

¹Institut Foton (CNRS UMR 6082), France; ²Lab-STICC, UMR CNRS 6285, ENIB, 29238 Brest Cedex 3, France; ³Ulyanovsk State University, Ulyanovsk 432017, Fédération de Russie; boucher@enib.fr

Nous étudions les supermodes pair et impair d'un système de deux guides d'ondes magnétiques couplés dont les aimantations peuvent être séparément renversées. Nous montrons qu'un renversement d'aimantation dans l'un des guides modifie le couplage entre les guides et les conditions d'obtention d'un transfert total d'énergie d'un guide vers l'autre.

LASER EN CAVITE ETENDUE PAR HYBRIDATION DE COMPOSANTS ACTIFS INP AVEC DES COMPOSANTS PASSIFS EN Si3N4

S. Boust^{1,3}, C. Gomez¹, J.-F. Paret¹, A. Garreau¹, K. Mekhazni¹, C. Forin¹, J.-G. Provost¹, J.-M. Fédéli², P. Primiani^{1,3}, F. Duport¹, F. Van Dijk¹, M. Vallet³

¹III-V Lab; ²CEA LETI; ³Université Rennes, Institut FOTON; sylvain.boust@3-5lab.fr

Nous présentons une source laser hybride à 1,55 µm. Sa cavité de 2,4 mm est formée par la juxtaposition d'un amplificateur optique à semi-conducteurs sur InP et d'un miroir de Bragg contenu dans un guide d'onde en Si₃N₄. Le miroir de Bragg est accordable au moyen d'une chaufferette intégrée au composant, le mode d'émission laser est ainsi choisi

Photoacoustic imaging using multimode fibers

A. M. Caravaca Aguirre, E. Bossy

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LIPhy, F-38000 Grenoble, France; antonio.caravaca@univ-grenoble-alpes.fr

We present a thin endoscopic system for optical resolution photoacoustic microscopy. The system is based on an optical multimode fiber for light delivery attached to a fiber-optic hydrophone for photoacoustic detection. A full-field illumination approach using speckle patterns combined with reconstruction algorithm allows to image sparse samples.

ELABORATION OF HIGHLY NONLINEAR AMORPHOUS CHALCOGENIDE THIN FILMS FOR MID-INFRARED APPLICATIONS

J.-B. Dory¹, J.-B. Jager², A. Coillet³, J.-Y. Raty⁴, F. D'Acapito⁵, A. Verdy¹, M. Tessaire¹, M. Bernard¹, J.-M. Fédéli¹, B. Cluzel³, P. Noé¹

¹CEA-LETI, France; ²CEA-INAC, France; ³ICB, France; ⁴SPIN, Belgium; ⁵ESRF, France; jean-baptiste.dory@cea.fr

In this work, we show how to tailor the nonlinear (NL) optical properties of Ge-Sb-S-Se-Te-based amorphous chalcogenide thin films compatible with CMOS technology with regards to their potential use in active on-chip mid-infrared (MIR) components.

METHODE DE MESURE DE L'EVOLUTION DE L'ATTENUATION INDUITE PAR RADIATION DANS DES VERRES OPTIQUES PENDANT ET APRES IRRADIATION

T. Allanche¹, S. Girard¹, P. Paillet², V. Goiffon³, C. Muller^{1,2}, A. Boukenter¹, Y. Ouerdane¹

¹Laboratoire Hubert Curien, France; ²CEA, DAM, France; ³ISAE-SUPAERO, France; t.allanche@univ-st-etienne.fr

Nous avons développé une méthode de caractérisation, permettant de mesurer l'évolution de Radiation Induced Attenuation (RIA) d'échantillons massifs sous rayonnement X. Ce montage permet de fournir aux concepteurs de systèmes optiques des données de RIA pré-guérison et de suivre la dynamique de création et de disparition des centres colorés

DYNAMIQUE MULTIMODE NON-LINEAIRE D'UN LASER A SEMICONDUCTEUR : TURBULENCES PHASE-AMPLITUDE ET ROUTE VERS UN REGIME MONOFREQUENCE

B. Chomet¹, M. Myara¹, S. Blin¹, S. Denet², V. Lecocq², G. Beaudoin³, I. Sagnes³, A. Garnache¹

¹IES-CNRS UMR5214, Univ. Montpellier, France; ²INNOPTICS SAS, Talence, France; ³C2N – CNRS – Université Paris Sud, Marcoussis, France; baptiste.chomet@ies.univ-montp2.fr

Nous présentons une étude de la dynamique non linéaire d'un laser à semi-conducteur émettant par la surface en cavité externe verticale (VECSEL) en présence de dispersion. Nous montrons l'existence d'une dynamique déterministe du champ laser qui donne naissance à un régime multimode longitudinal non stationnaire ou à un régime monofréquence stable.

QUASI-ACCORD DE PHASE DANS LES GUIDES D'ONDE SUSPENDUS

N. Morais¹, I. Roland¹, M. Ravaro¹, A. Lemaître², G. Leo¹

¹Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Diderot, CNRS, Sorbonne Paris Cité, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75013 Paris, France; ²Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay 91460 Marcoussis, France; natalia.morais@univ-paris-diderot.fr

Quasi-accord de phase (QPM) a été obtenu dans les guides AlGaAs homogènes suspendus en forme de serpent. Une double génération de la deuxième harmonique (SHG) a été observée.

CONTROLE DES FRONTS D'OXYDATION D'ALGAAS POUR L'OPTIQUE GUIDEE

S. Calvez, G. Lafleur, O. Stepanenko, A. Arnoult, P.-F. Calmon, J.-B. Doucet, A. Monmayrant, H. Camon, G. Almuneau
LAAS-CNRS, France; scalvez@laas.fr

Ce papier documente la quantification expérimentale de l'anisotropie d'oxydation d'AlGaAs et un modèle qui permet de reproduire le fait que la forme de l'ouverture d'oxyde diffère de l'homothétie du contour du mesa gravé et qui permet aussi d'élaborer des règles pour dessiner les mesas à graver pour obtenir une forme d'ouverture d'oxyde spécifique.

SHG IN PPLN WAVEGUIDES WITH STITCHING ERRORS

M. Neradovskiy^{1,2}, E. Neradovskaia^{1,2}, P. Baldi¹, M. De Micheli¹, C. Montes¹

¹InPhyNi, Université Côte d'Azur-CNRS, UMR 7010, Parc Valrose, 06100 Nice, France; ²School of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University, 620000 Ekaterinburg, Russia; maxim.neradovskiy@unice.fr

Imperfections of the periodic material impact the performances of Quasi Phase Matched devices. Our numerical study allows predicting the impact of stitching errors on the nonlinear interactions in waveguides using domains induced by e-beam writing in Lithium Niobate and explaining the observed experimental results.

INTERACTIONS NON LINEAIRES EFFICACES DANS DES MICROGUIDES DE NITRURE D'ELEMENT III.

M. Gromovyi^{1,2}, F. Semond¹, J. Brault¹, A. Courville¹, S. Renneson¹, S. Chenot¹, P. Baldi², J.-Y. Duboz¹, M. De Micheli²

¹Université Côte d'Azur - CNRS, CRHEA, rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne, France; ²Université Côte d'Azur - CNRS, INΦNI, Parc Valrose, 06100 Nice, France; marc.de-micheli@inphyni.cnrs.fr

En combinant EJM et EPVOM nous avons réalisés des guides d'onde à base d'AlN et de GaN mono-cristallins qui présentent de très faibles pertes à la propagation et des possibilités d'accord de phase modal intéressantes. A partir de ces structures, nous avons réalisés des guides canaux dont nous présentons les performances linéaires et non linéaires.

Mesure rapide de la composition modale de fibres optiques par imagerie résolue spatialement et spectralement

L. Fouché¹, E. Hugonnot¹, C. Grosset-Grange¹, P. Morin², Q. Maouhoub²

¹CEA CESTA, France; ²Alphanov, Talence, France; lauriane.fouche@cea.fr

Nous présentons un banc de mesure du contenu modal de fibres optiques basé sur l'imagerie résolue spatialement et spectralement, optimisé de façon à effectuer des acquisitions quasi instantanées. Le système réalisé utilise le balayage continu en longueur d'onde d'un laser accordable, une caméra rapide et un traitement numérique en temps réel.

Guides d'onde OP-GaAs pour la conversion de fréquence vers l'infrarouge lointain

M. Bailly¹, A. Grisard¹, E. Lallier¹, C. Theveneau², B. Gérard²

¹Thales Research and Technology, France; ²III-V Lab, France; myriam.bailly@thalesgroup.com

Nous présentons une structure de guide en arséniure de gallium à orientation périodique (OP-GaAs) pour la conversion de fréquence vers le lointain infrarouge (LWIR). Ces guides, plus épais que l'état de l'art, nécessitent de lever certains verrous technologiques en ce qui concerne leur fabrication, que nous évoquons dans un second temps.

EFFICACITE DE LA FFF SUR LA RCWA ET LA METHODE DIFFERENTIELLE APPLIQUEE A LA DIFFRACTION D'UN RESEAU METALLIQUE SINUSOÏDAL

H. Mohamad¹, A. Morand¹, S. Blaize², D. Macias², P. Benech¹

¹IMEP-LAHC, France; ²L2n, Troyes; habib.mohamad@minatec.grenoble-inp.fr

La diffraction de la lumière par des structures périodiques est modélisable par des méthodes numériques comme la RCWA ou la méthode différentielle (MD). La RCWA est efficace pour des profils lamellaires. Pour des profils continus en TM, la MD associée à la FFF est une solution. Nous allons montrer que la RCWA associée à la FFF peut être efficace.

Laser à boîtes quantiques pour les transmissions optiques à haut-débit sans isolateur

H. Huang¹, L.-C. Lin², C.-Y. Chen², D. Arsenijević³, D. Bimberg^{3,4}, F.-Y. Lin², F. Grillot¹

¹Telecom ParisTech, France; ²National Tsing Hua University, Taiwan; ³Technische Universität Berlin, Germany; ⁴King Abdulaziz University, KSA; heming.huang@telecom-paristech.fr

La sensibilité au retour optique d'un laser à boîtes quantiques émettant sur la transition fondamentale est étudiée. Quelque soit le montant de la lumière retournée, les résultats montrent un comportement dynamique ultra-stable avec une absence totale de chaos. Ces travaux ouvrent la voie à la conception de transmetteurs sans isolateur optique.

OPTIMISATION DE FIBRES À CRISTAUX PHOTONIQUES POUR LA CONVERSION A HAUTE-PUISSANCE DANS LA DOMAINE VISIBLE PAR MELANGE A QUATRE ONDES DE SOURCES YTTERBIUM PICOSECONDE POUR LES APPLICATIONS BIOMEDICALES.

J.-C. Delagnes¹, R. Royon², J. Lhermite¹, D. Marion¹, N. Valéro¹, G. Santarelli³, H. Munoz⁴, T. Grosz⁵, D. Darwich⁶, R. Dauliat⁶, R. Jamier⁶, P. Roy⁶, E. Cormier¹

¹CELIA, Centre Lasers Intenses et Applications, Université de Bordeaux-CNRS-CEA, France; ²SATT Aquitaine Science Transfert, Bâtiment A31 – 3ème étage, 351, cours de la Libération, F-33405 Talence Cedex, France; ³LP2N (UMR5298), IOGS-Université de Bordeaux -CNRS, France; ⁴FYLA, Ronda Guglielmo Marconi 12, 46980 Paterna – Valencia, Spain; ⁵University of Szeged, Dom ter 9, H-6720 Szeged, Hungary; ⁶Université de Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, France; jean-christophe.delagnes@u-bordeaux.fr

Nous présentons une étude détaillée des résultats théoriques et expérimentaux sur le design de fibres à cristaux photoniques (PCF) pour la conversion vers le visible de 620 à 910 nm (domaine d'intérêt biomédical) et l'infrarouge moyen d'une source Yb picoseconde très largement accordable par mélange à quatre ondes dégénéré.

Optimisation de réseaux de Bragg pour la conception de lasers à fibre de puissance à 1, 1.5 et 2µm

L. Lablonde, B. Dudoux, O. Rabine, E. Pinsard, C. Ranger, A. Laurent, T. Robin, B. Cadier

iXblue, France; laurent.lablonde@ixblue.com

Les miroirs à réseaux de Bragg de laser à fibre continu monomode pouvant émettre jusqu'à 1 kW nécessitent un procédé spécifique. Des résultats de pentes thermiques au signal améliorées d'un facteur > 10 et pouvant atteindre 0.1°C/W pour une fibre suspendue dans l'air calme seront présentés tout en développant les techniques de mesures employées.

FILTRE ACOUSTO-OPTIQUE RECONFIGURABLE : MODIFICATION DES PERFORMANCES PAR CONTRÔLE DE LA COMMANDE RF

A. Pérennou, V. Quintard, A. Saab

ENIB, UMR CNRS 6285, LabSTICC, France; perennou@enib.fr

Le travail proposé concerne l'étude de l'évolution du gabarit d'un filtre acousto-optique reconfigurable en longueur d'onde en fonction de la nature de la commande électrique de ce dernier. Le contrôle dynamique de la forme du gabarit permet de répondre aux contraintes (diaphonie, égalisation des puissances optiques, ...) de dispositifs spécifiques.

ETUDE NUMERIQUE SUR LA DEPENDANCE SPECTRALE COMPLEXE DU COUPLAGE OPTIQUE DANS LA GENERATION DE PEIGNES KERR PAR DES RESONATEURS DE Si3N4

N. Gutiérrez, A. Fernandez, S. Calvez, O. Llopis

LAAS-CNRS, France; ngutierr@laas.fr

Nous présentons un outil numérique pour la modélisation de résonateurs optiques à couplage d'accès vertical en Si3N4. Cette approche nous permet d'étudier la formation de peignes Kerr dans les résonateur en prenant en compte les variations en fonction de la fréquence du facteur de qualité du résonateur et de son facteur d'accumulation de puissance

Study of the dynamical behaviour of a high-power laser diode subject to stimulated Brillouin scattering optical feedback

A. G. Correa-Mena¹, M. W. Lee², I. E. Zaldivar-Huerta¹, Y. Hong³, A. Boudrioua²

¹Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Mexico; ²Université Paris 13, France; ³Bangor University, Wales, U.K.; min.lee@univ-paris13.fr

We study for the first time the dynamical behaviour of a laser diode subject to optical feedback using stimulated Brillouin scattering. The experimental results with RF spectrum and RF spectrum maps show abundant dynamics and the Brillouin frequency shift at 11.46 GHz. A comparison is also performed with the ones for conventional optical feedback.

UTILISATION DE FIBRES A COUPLAGE INHIBE POUR LE CONTROLE DE L'INTRICATION SPECTRALE DE PAIRES DE PHOTONS

M. Cordier¹, A. Orioux², B. Debord³, F. Gérome³, A. Gorse⁴, M. Chafer³, E. Diamanti², P. Delaye⁵, F. Benabid³, I. Zaquine¹

¹LTCl, Télécom ParisTech, France; ²LIP6, Laboratoire d'Informatique de Paris 6, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Sorbonne Université, 75005 Paris, France; ³GPPMM Group, XLIM Research Institute, CNRS UMR 7252, Univ Limoges, Limoges, France; ⁴GLOphotonics S.A.S., 123 rue Albert Thomas, Limoges, France; ⁵LCF, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Univ Paris-Saclay, 91127 Palaiseau cedex, France; martin.cordier@telecom-paristech.fr

Nous démontrons expérimentalement en régime stimulé comment les propriétés de dispersion des fibres à coeur creux à couplage inhibé permettent de contrôler les corrélations spectrales des paires de photons générées par mélange à quatre ondes spontanée dans une fibre remplie de gaz non linéaire.

O5-B: Session Orale JNOG #3

Heure: Jeudi, 05.07.2018: 8:30 - 10:30 · Salle: Amphi Grignard

Laser et contrôle fréquentiel

8:30 - 9:00

Invitée

Synchronisation de deux lasers DFB par réinjection décalée en fréquence, pour applications en photonique micro-onde

A. Thorette, M. Romanelli, M. Vallet

Univ. Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-35000 Rennes, France; aurelien.thorette@univ-rennes1.fr

Nous étudions la synchronisation sur référence externe de l'écart de fréquence entre deux lasers DFB, via une réinjection décalée en fréquence. Des résultats numériques et expérimentaux pour un composant intégré incluant deux lasers sont comparés, notamment l'influence du désaccord de fréquence, du taux d'injection et des phases de rétro-action.

9:00 - 9:15

Lasers intégrés sur verre pour la génération de fréquences radio

N. Arab, D. Bucci, E. Ghibaudo, J.-E. Broquin, L. Bastard, J. Poëtte

IMEP-LaHC, France; julien.poette@imep.grenoble-inp.fr

Nous présentons ici la réalisation de lasers intégrés sur verre pour la génération de fréquences par hétérodynage. Les caractérisations du battement montrent de très bonnes performances en largeur de raie et dérive temporelle. Une transmission de données est réalisée pour confirmer les capacités de cette technique pour les applications «système».

9:15 - 9:30

CONTRIBUTION DES ETATS NON-RESONANTS AU BRUIT RELATIF D'INTENSITE DANS LES LASERS A ILOTS QUANTIQUES

J. Duan¹, X.-G. Wang², Y.-G. Zhou², C. Wang², F. Grillot^{1,3}

¹LTCl, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, Paris, France; ²School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai, China; ³Center for High Technology Materials, University of New-Mexico, Albuquerque, USA; jianan.duan@telecom-paristech.fr

Ce travail porte sur la modélisation du bruit relatif d'intensité des lasers à îlots quantiques. Nous montrons que la contribution du bruit de porteurs associée aux niveaux non-résonants de l'îlot ne doit pas être négligée et le couplage vertical entre le niveau fondamental et le premier état excité joue un rôle clef dans la dégradation du bruit.

9:30 - 9:45

DÉVELOPPEMENT ET INTÉGRATION DE LASERS À NANOSTRUCTURES III-V DE HAUTE COHÉRENCE ET ACCORDABLE POUR APPLICATIONS DANS LE PROCHE- ET MOYEN-IR

B. Chomet¹, L. Ferrières², V. Lecocq², M. Myara¹, G. Beaudoin³, I. Sagnes³, L. Cerutti¹, S. Denet², A. Garnache¹

¹IES-CNRS UMR5214, Univ. Montpellier, France; ²INNOPTICS SAS, Talence, France; ³C2N – CNRS – Université Paris Sud, Marcoussis, France; baptiste.chomet@ies.univ-montp2.fr

Nous présentons la réalisation de composants lasers à nanostructures III-V hautement cohérents de forte puissance et accordable spectralement intégrés dans un module industriel compact pour des applications dans le proche- et moyen-IR, basés sur la technologie des lasers émettant par la surface en cavité externe verticale.

9:45 - 10:00

Contrôle des fluctuations basses fréquences dans un laser à cascades quantiques soumis à des températures cryogéniques

O. Spitz^{1,2,3}, J. Wu^{3,4}, M. Carras², C. W. Wong³, F. Grillot^{1,3,5}

¹Télécom ParisTech, France; ²mirSense, France; ³University of California at Los Angeles, USA; ⁴Southwest University, Chine; ⁵University of New-Mexico, USA; olivier.spitz@telecom-paristech.fr

L'étude du rapport temps de vie des porteurs sur temps de vie des photons est déterminante pour comprendre la dynamique non-linéaire des lasers à cascades quantiques. Les expériences menées dans le cadre de cette étude montre l'influence de la température sur ce rapport et les conséquences sur le domaine chaotique du laser moyen-infrarouge étudié.

10:00 - 10:15

EFFET DE LA POLARISATION SUR UN MODULATEUR ELECTRO-OPTIQUE DANS UNE EXPERIENCE DE TRANSFERT DE STABILITE

A. Chaouche-Ramdane, T. Aoudjit, K. Manamanni, V. Roncin, F. Du-Burck

Laboratoire de physique des lasers, France; frederic.du-burck@univ-paris13.fr

Nous présentons une analyse des limitations introduites par l'utilisation d'un modulateur électro-optique fibré dans un dispositif de transfert de stabilité en fréquence basé sur une cavité fibrée à 1.55µm.

10:15 - 10:30

Lasers à fibre bifréquences stabilisés par réinjection optique

M. Guionie¹, A. Thorette¹, M. Romanelli¹, A. Carré¹, G. Loas¹, E. Pinsard², L. Lablonde², B. Cadier², M. Alouini¹, M. Vallet¹, M. Brunel¹

¹Institut Foton, France; ²iXblue Photonics, France; marie.guionie@univ-rennes1.fr

Les lasers à fibre bi-polarisation sont des sources de choix en optique microonde. Une boucle de réinjection optique décalée en fréquence permet de stabiliser le battement à 1 GHz d'un laser à fibre bifréquence. Le bruit de phase est de -104 dBc/Hz à 1 kHz. La dissymétrie de la plage d'accrochage pourrait s'expliquer par un facteur de Henry $\alpha > 1$.

VERS DES SYSTEMES OPTIQUES INTEGRES A BASE DE POLYMERES NANOSTRUCTURES POUR LA DETECTION EN MILIEU LIQUIDE

**Pauline Girault^{1*}, Miguel Diez¹, Simon Joly¹, Vincent Raimbault², Laurent Oyhenart¹,
Corinne Dejous¹, Chi Thanh Nguyen³, Isabelle Ledoux-Rak³, Laurent Bechou^{1,4}**

¹ *Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système UMR CNRS 5218, 33405 Talence, France*

² *LAAS-CNRS Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, 31031 Toulouse, France*

³ *Laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire UMR CNRS 8537, 94235 Cachan, France*

⁴ *LN2 Laboratoire Nanotechnologies et Nanosystèmes, CNRS UMI-3463, Sherbrooke, Canada*

*pauline.girault@u-bordeaux.fr

RESUME

Les polymères présentent un grand intérêt en biophotonique pour la réalisation de capteurs intégrés mais dans le domaine du visible, une des principales difficultés réside dans la fabrication de structures submicroniques pour garantir un fonctionnement monomode. Dans cette étude, nous avons développé un microrésonateur en anneau combiné à deux coupleurs de Bragg avec tapers, en matériaux polymères, réalisés en une seule étape de lithographie par nanoimpression. De par les performances de couplage et de transmission globale obtenues (1,55% @ 507 nm), le développement d'un futur dispositif de détection tout intégré, apparaît tout à fait envisageable.

MOTS-CLEFS : *Optique intégrée, guides polymères, capteur*

1. CONTEXTE ET OBJECTIF

La qualité de l'eau potable est un défi sociétal majeur parfaitement identifié dans le programme H2020 (SC2). En effet, plus d'un milliard d'êtres humains n'ont toujours pas accès à une source d'eau potable, les rendant très vulnérables à différentes maladies. En 2025, les prévisions donnent un accroissement des prélèvements en eau de 50% pour les pays en voie de développement et 18% pour les pays développés. Or les ressources sont de plus en plus contaminées par la pression anthropique, principalement due à l'industrialisation et à l'agriculture intensive. Les métaux lourds et les pesticides représentent un grand danger car ils occasionnent une influence délétère à l'état d'ultra-traces en lien avec la bioaccumulation. Cette préoccupation croissante en matière de protection de la santé, requiert une compréhension des cycles de polluants, poussant au développement de nouveaux capteurs hautement sensibles et sélectifs, peu coûteux, transportables et déployables sur site pour la mesure temps réel.

2. METHODOLOGIE

Pour répondre à ces exigences, nous proposons un capteur optique transportable intégrant l'ensemble source, détecteur et transducteur et capable d'atteindre une faible limite de détection ($\mu\text{g/L}$). Le transducteur est un microrésonateur en anneau (OMR) à base de matériaux polymères, déposé sur substrat de Silicium combiné à une cellule microfluidique. Le principe de détection se base sur l'interaction entre la partie évanescente de l'onde guidée et la solution aqueuse étudiée [1]. L'originalité de notre approche repose sur la mesure de l'indice complexe du milieu permettant de suivre à la fois les variations spectrales et d'intensité du pic de résonance, relatives respectivement à la partie réelle (propagation) et imaginaire (coefficient d'absorption) de l'indice de l'analyte. L'intérêt de travailler dans le visible est d'adresser les réactions dites colorimétriques. Par exemple la complexation entre un métal lourd et un ligand spécifique présentant un pic d'absorption dans ce domaine de longueur d'onde tel que le Chrome hexavalent et le 1,5 diphenylcarbazide (Cr(VI)-DPC) à 540nm. Tout en restant très sélective, cette approche permet de s'affranchir d'une

fonctionnalisation de surface du transducteur, rendant le dispositif durable pour une utilisation récurrente en évitant notamment l'effet de saturation des capteurs fonctionnalisés. Cette approche permet également d'envisager une large variété de cibles dans l'eau par l'identification des ligands associés à des polluants spécifiques. De nombreuses plateformes, basées sur la fonctionnalisation, ont déjà été développées et ont démontré d'excellentes performances en sensibilité et en sélectivité, en revanche, il n'existe, jusqu'à présent, que très peu d'exemples de réalisation de plateformes non fonctionnalisées [2,3].

De plus, pour parvenir à une plateforme intégrée, un certain nombre d'inconvénients subsistent comme l'emploi de fibres clivées et collées sur les facettes du dispositif qui offre de faible efficacité de couplage et représente une étape d'assemblage complexe, peu reproductible et rendant impossible l'interchangeabilité du transducteur. Des solutions de détection non-réversibles, multi-cibles, basées sur des équipements coûteux et volumineux, restent encore trop éloignées d'une version transportable. Afin de converger vers un système intégré robuste, nos efforts se poursuivent en considérant deux voies parallèles : (i) la démonstration de notre approche basée sur un OMR opérant dans le domaine du visible en passant par le développement de structures polymères telles que : des réseaux de Bragg pour assurer un couplage vertical de la lumière en entrée et en sortie de l'échantillon, des guides d'onde et des OMR assurant le rôle de transducteur optique [4], (ii) la faisabilité d'intégration d'une source laser, transducteur, photodétecteur et cellule microfluidique au sein d'un même module mais à partir de structures OMR fonctionnant à 1550 nm. L'intégration dans un boîtier unique et portable représente un défi important, faisant l'objet de cette collaboration entre l'IMS, le LAAS et l'ENS/LPQM.

3. RESULTATS

La Fig. 1 représente la structure d'un guide d'onde avec un taper, à base de matériaux polymères, l'UVNIL-394 ($n=1.52 @ 532 \text{ nm}$) pour le cœur et le CYTOP ($n=1.34 @ 532 \text{ nm}$) pour le cladding, et incluant un couplage par réseau ayant une période de 290 nm. Cette structure est obtenue par lithographie par nanoimpression (NIL).

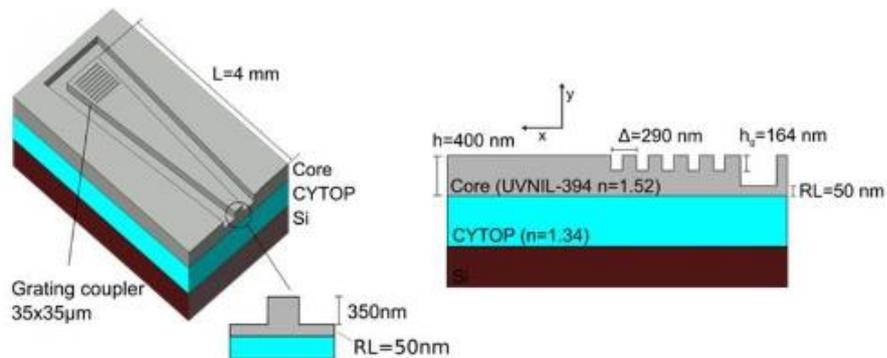


Fig. 1 : Guide d'onde avec son coupleur de Bragg et le taper.

Les performances de couplage et de transmission globale sont étudiées, à une longueur d'onde de 507 nm, en faisant varier l'angle de couplage à l'entrée du guide pour différentes épaisseurs de cladding (Fig.2).

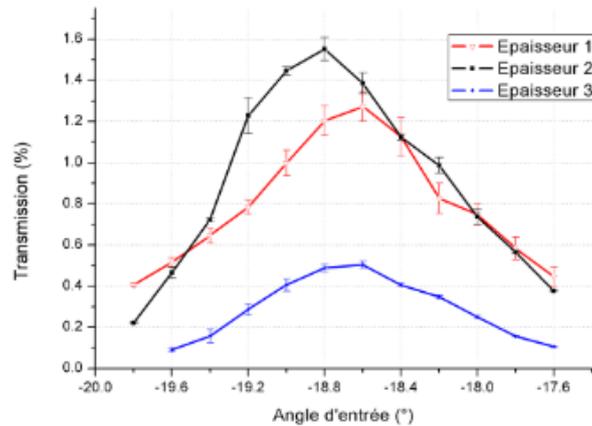


Fig.2 : Efficacité globale du système en fonction de l'angle de couplage pour trois épaisseurs (respectivement 530, 520 et 540 nm) du cladding (CYTOP).

Une transmission globale de 1.55 %, correspondant à l'état de l'art, pour une épaisseur de 520 nm est obtenue.

CONCLUSION

Cette étude présente nos avancées de mise en œuvre d'un concept innovant de capteurs pour la détection optique de polluants en milieu liquide dans le domaine visible. Des structures nanométriques polymères ont été fabriquées par la technique de nanoimpression et caractérisées pour démontrer leur efficacité. En parallèle, l'implémentation, au sein d'un module unique d'une structure OMR éprouvée et des briques de base associées, est en cours et sera présentée comme preuve de faisabilité pour envisager un transfert vers le visible.

REFERENCES

- [1] F. Meziane et al., Study of a polymer optical microring resonator for hexavalent chromium sensing, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, 2015.
- [2] L. Luan et al., Chip scale optical microresonator sensors integrated with embedded thin film photodetectors on electrowetting digital microfluidics platforms, *IEEE Sens. J.* 12 (2012) 1794–1800.
- [3] K.B. Gylfason et al., On-chip temperature compensation in an integrated slot-waveguide ring resonator refractive index sensor array., *Opt. Express.* 18 (2010) 3226–3237.
- [4] M. Diez et al., Submicron polymer optical waveguides on CYTOP for visible range operation, *EUROPT(R)ODE 2018*, Naples, 2018.

Capteur optique pour la caractérisation du dépôt de pulvérisation agricole

Anis Taleb Bendiab^c, C. Vigreux^a, R. Escalier^a, R. K. Kribich^b, A. Ducanhez^c, R. Bendoula^c

^a ChV team, ICGM, UMR 5253, Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France

^b TêHO team, IES, UMR 5214, Université de Montpellier, 860 Rue Saint-Priest, 34090 Montpellier, France

^c ITAP team, IRSTEA, UMR 1201, 500 Rue Jean François Breton, 34000 Montpellier, France

anis.taleb-bendiab@irstea.fr

Keywords: Capteurs optiques; Guides d'onde RIB; Couches Ge-Se-Te; réduction de pesticides;

Résumé

La qualité de la pulvérisation des pesticides suscite un intérêt majeur au sein de notre société. Celle-ci étant directement liée à la dérive de pulvérisation, l'efficacité des applications et la réduction des risques environnementaux nécessite son optimisation. L'objectif de notre travail est de développer un nouvel outil optique pour la caractérisation du dépôt qui a pour but de fournir une solution opérationnelle pour améliorer les méthodes traditionnelles.

1. Introduction

En 2017, les produits phytosanitaires sont toujours un recours privilégié pour l'ensemble des cultures. Dans le contexte d'une préoccupation sociétale croissante envers ces produits, notamment au sujet de leur impact négatif sur l'environnement et la santé, il est primordial de définir et de généraliser des systèmes de cultures à bas niveaux d'intrants. En parallèle des travaux de recherche qui, en agronomie, explorent les voies d'une agriculture plus durable via des approches systémiques mais aussi le développement de l'agro-écologie, des efforts immédiats doivent être entrepris pour obtenir rapidement des résultats. La réduction des doses de produits utilisés reste une source importante de progrès directement mobilisable par les agriculteurs. Un des leviers les plus efficaces pour réduire les doses de produits est l'amélioration de la qualité de la pulvérisation. Pour y parvenir, il est nécessaire de mesurer le « dépôt de pulvérisation » pour pouvoir identifier les moyens de l'optimiser. L'objectif du présent article est de présenter les premiers résultats sur le développement de capteurs optiques basés sur la conception de guides d'ondes RIB permettant de caractériser la quantité et la répartition d'une pulvérisation liquide. La famille de matériaux envisagée pour fabriquer les puces est celle des verres chalcogénures connus pour leur transparence dans l'infrarouge. Des compositions à base de Tellure, Germanium et Sélénium permettent d'obtenir une fenêtre de transparence allant de 1 μ m à 16 μ m en longueur d'onde. Les verres Te-Ge-Se ont été choisis car ces derniers ont été utilisés antérieurement pour la réalisation de fibres de verre à transmission de puissance d'un laser CO₂ [1] ainsi que pour la réalisation de capteurs de CO₂ [2]. La présence de Te dans la composition du verre contribue à l'élargissement de la fenêtre de transmission vers l'Infrarouge [3]. Le choix du design du guide visait à avoir un guidage monomodal pour cette étude.

Dans cet article, les premiers résultats du développement du capteur sont présentés. Dans un premier temps, les caractéristiques des premiers guides réalisés sont exposées. Puis, les premières mesures de dépôt sont présentées et discutées.

2. Matériau & méthodes

Réalisation des guides d'ondes:

Les structures de guidage ont été élaborées en empilant respectivement une couche de $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{65}\text{Te}_{10}$ puis de $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{55}\text{Te}_{20}$ sur un substrat de Silicium par co-évaporation. La géométrie du film supérieur constituant la couche de confinement optique est modifiée par gravure ionique sélective. Le design est le suivant : $H_{\text{clad}} = H_c = 6 \mu\text{m}$ and $4 < h < 4.5 \mu\text{m}$.

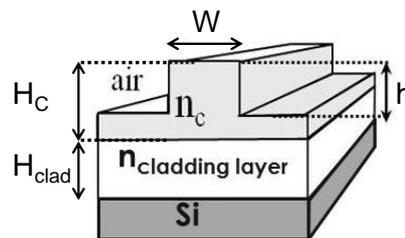


Figure 1. Design d'un guide d'ondes droit RIB.

Caractérisation des dépôts:

Le dépôt de liquide à la surface du guide d'onde entraîne, par couplage évanescent, une modification des propriétés de guidage de la lumière. En effet, l'eau présente dans les pesticides, absorbe une partie de l'onde évanescente ce qui conduit à une diminution de l'intensité transmise à la sortie du guide d'ondes. C'est cette variation d'intensité lumineuse qui est mesurée. En parallèle des simulations ont été effectuées à l'aide du module de BPM (Beam Propagation Method) du logiciel commercial RSoft afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux et les résultats de simulations.

Résultats & discussion:

Les premiers guides d'ondes sont réalisés (fig.2a) et répondent au cahier des charges défini lors de la modélisation (Fig.2b). La présence d'un guide plan diminuant le confinement dans cette structure donne lieu à un guide d'onde monomode dont le mode fondamental est comparable au mode de la fibre d'injection en termes de diamètre et sa forme est intimement liée aux paramètres largeur du guide (w) et la hauteur (h) due au confinement de l'onde injectée qui en résulte dans le guide. Les indices de réfraction mesurés de la couche inférieure (gaine optique) et de la couche supérieure sont respectivement égaux à 2,55 et 2,65 à la Longueur d'onde $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

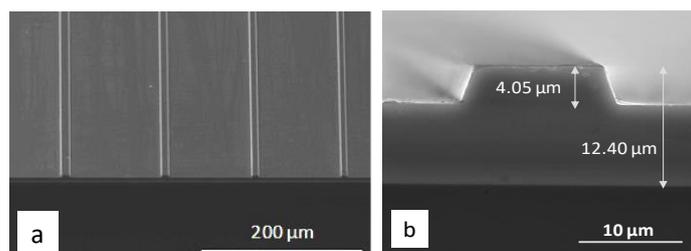


Figure 2. a) image MEB de 4 guides d'ondes vue de haut; b) image MEB d'une section de $14 \mu\text{m}$ de largeur.

A partir de ces guides, les premières mesures vérifient l'influence d'un dépôt de gouttes au centre du guide et ce, en utilisant différents volumes de gouttelettes de 0 à 10 μ l. Les résultats présents sur la (fig.3) représentent la variation relative (avant et après dépôt des gouttelettes) de l'intensité de sortie en fonction du volume des gouttelettes.

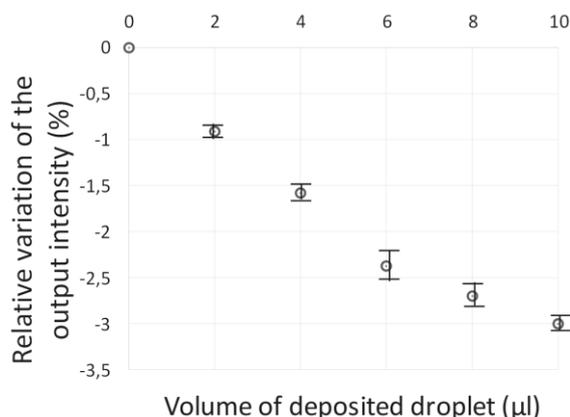


Figure 3. Evolution de la variation relative d'intensité en sortie versus le volume de la goutte.

La seconde expérience consiste à observer l'influence du nombre de gouttes déposées sur l'intensité à la sortie du guide pour un volume de goutte choisi de 2,5 μ l. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.

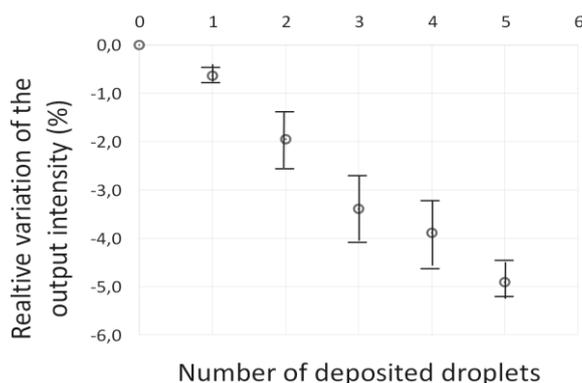


Fig 4. Evolution de la variation relative de l'intensité en sortie VS le nombre de gouttes 2.5 μ l déposées.

3. Conclusion

Les premiers résultats ont montré la faisabilité de détecter la quantité du dépôt à l'aide de guides d'ondes RIB. La suite des travaux va être d'estimer le volume déposé ainsi que de faire évoluer l'architecture de notre guide afin d'estimer le nombre de gouttes déposées.

4. Références

- [1] Wang, Z. Y.; Tu, C. J.; Li, Y. M. and Chen, Q. Q. The Effects Of Sn and Bi Additions On Properties And Structure In Ge-Se-Te Chalcogenide Glass. *J. Non-Cryst. Solids* **1995**, 191, 132-137.
- [2] Maurugeon, S.; Bureau, B.; Boussard-Pledel, C.; Faber, A. J.; Zhang, X. H., Geliesen, W. and Lucas, J. Te-rich Ge-Te-Se glass for the CO₂ infrared detection at 15 μ m. *J. Non-Cryst. Solids* **2009**, 355, 2074-2078.
- [3] Hocde, S.; Boussard-Pledel, C.; Fonteneau, G. and Lucas, J. Chalcogens based glasses for IR fiber chemical sensors. *Solid State Sci.* **2001**, 3, 279-284.

CONTROLE DES FRONTS D'OXYDATION D'ALGAAS POUR L'OPTIQUE GUIDEE

Stéphane Calvez¹, Gaël Lafleur¹, Oleksandr Stepanenko¹, Alexandre Arnoult¹, Pierre-François Calmon¹, Jean-Baptiste Doucet¹, Antoine Monmayrant¹, Henri Camon¹, Guilhem Almuneau¹

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, 7 avenue du colonel Roche, 31400 Toulouse, France

scalvez@laas.fr

RÉSUMÉ

Ce papier documente la quantification expérimentale de l'anisotropie d'oxydation d'AlGaAs et un modèle qui permet de reproduire le fait que la forme de l'ouverture d'oxyde diffère de l'homothétie du contour du mesa gravé et qui permet aussi d'élaborer des règles pour dessiner les mesas à graver pour obtenir une forme d'ouverture d'oxyde spécifique.

MOTS-CLEFS : *oxydation, anisotropie, optique guidée, VCSEL*

1. INTRODUCTION

L'oxydation latérale sélective des semiconducteurs III-V présentant une forte teneur en aluminium est une étape technologique généralement utilisée pour la fabrication des lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) [1][2] et dont l'utilisation été récemment diversifiée pour démontrer des composants d'optique guidée [3][4]. Dans les deux cas, à partir de mésas gravés, cette transformation sélective d'une couche enterrée de semiconducteur de fort indice de réfraction ($n \sim 2.9$) en isolant d'indice de réfraction plus faible ($n \sim 1.6$) permet de définir un confinement optique dont les propriétés sont intrinsèquement liées à la forme latérale de l'interface entre le semiconducteur et l'oxyde (couramment appelée ouverture d'oxyde) et à sa position verticale dans l'empilement considéré. La nature cristalline des semiconducteurs à oxyder rend le procédé anisotrope [5][6], ce qui conduit la forme latérale de l'ouverture d'oxyde à ne plus être homothétiquement liée au contour du mesa gravé [7]. De plus, plus cette anisotropie est grande, plus il devient difficile de créer des ouvertures circulaires. Hors, la forme circulaire (annulaire) est non seulement essentielle à la réalisation de guides courbes qui constituent un des éléments de base des systèmes photoniques mais elle correspond aussi à la forme d'ouverture idéale pour fabriquer des VCSEL monomodes efficaces. Il devient donc intéressant d'étudier en détail la cinétique et les anisotropies du procédé d'oxydation et de développer des méthodes permettant d'établir le lien entre la forme du mesa gravé et celle de l'ouverture d'oxyde, ceci en tenant compte des paramètres du procédé.

Le présent papier documente une quantification expérimentale de l'anisotropie d'oxydation des composés AlGaAs et introduit une modélisation qui prend en compte cette anisotropie et qui permet non seulement de reproduire l'évolution temporelle de la forme de l'ouverture d'oxyde générée à partir d'un mesa circulaire mais aussi d'élaborer une stratégie pour le résoudre problème inverse visant à définir les mesas à graver pour obtenir une forme d'ouverture d'oxyde spécifiée.

2. ANISOTROPIE D'OXYDATION D'ALGAAS

Comme indiqué ci-dessus, l'oxydation latérale d'AlGaAs est un procédé anisotrope. A titre d'exemple, l'oxydation d'une couche fine (50 nm) d'Al(Ga)As épitaxiée sur un substrat de GaAs orienté (100) et enterrée sous une couche de 500 nm de GaAs conduit à une progression de l'oxyde selon les axes cristallographiques $\langle 100 \rangle$ qui est $\sim 13\%$ plus rapide que selon les axes $\langle 110 \rangle$ comme l'atteste les résultats de la Fig. 1.

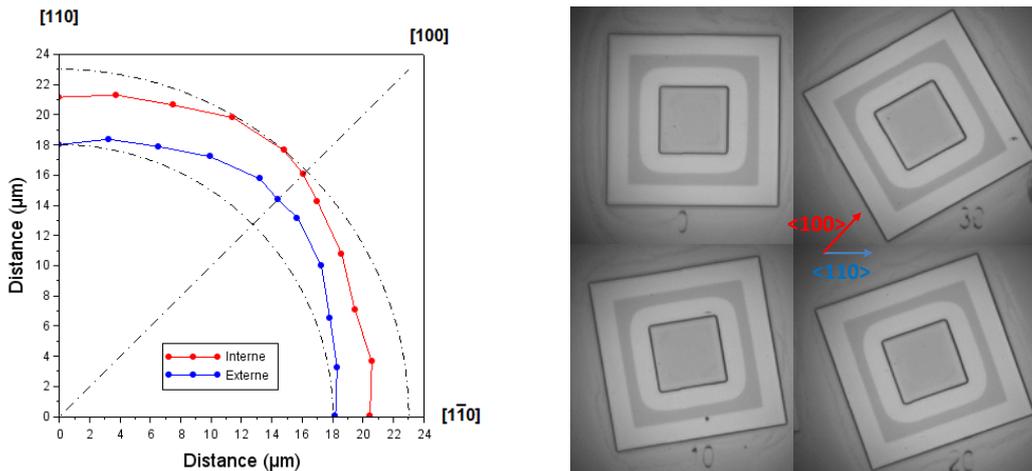


Fig. 1 : gauche: Diagramme polaire des vitesses d'oxydation déduit de l'oxydation de motifs gravés en forme de carrés évidés d'orientation variée dont une image au microscope optique infrarouge est présentée à droite.

3. MODELISATION ANISOTROPE DE L'OXYDATION LATERALE

L'oxydation de mesas circulaires étant la plus répandue, le modèle proposé n'a été développé que dans ce cas. L'évolution anisotrope du front d'oxydation est traitée comme une perturbation de la solution obtenue lorsque le procédé est isotrope, cas détaillé en référence [8]. L'évolution temporelle du front d'oxydation est simulée de manière itérative faisant correspondre à chaque incrément de temps élémentaire, dt , une avancée spatiale du front d'oxydation. En pratique, le (nouveau) front d'oxydation à $(N+1)dt$ (N étant un entier) est calculé par érosion du front d'oxydation précédent (au temps, $N dt$) à l'aide d'un noyau fixe correspondant à la distribution angulaire des vitesses de réaction ($\sigma(\varphi)dt = \sigma_{mean}(1 - b/2 + b\sin^2(2\varphi))dt$). La vitesse moyenne utilisée, σ_{mean} , est en fait la valeur de la vitesse d'oxydation calculée dans le cas isotrope lorsque l'interface est placée au rayon moyen du front d'oxydation au temps Ndt . La Fig. 2 présente les résultats expérimentaux et modélisés de l'évolution temporelle des positions extrêmes du front d'oxydation (soit selon les axes $\langle 100 \rangle$ et $\langle 110 \rangle$) pour une oxydation faite à 400°C depuis un mesa circulaire de $60 \mu\text{m}$ de diamètre. La confrontation entre le front expérimental et celui simulé sur l'ensemble des directions après 39 min 25 s d'oxydation est aussi présentée sur la Fig. 2 droite. La validité du modèle est établie par le bon accord observé et plus quantitativement en déterminant que l'erreur entre les profils simulés et expérimentaux diminue d'un facteur deux lorsque l'on passe d'un modèle isotrope à anisotrope.

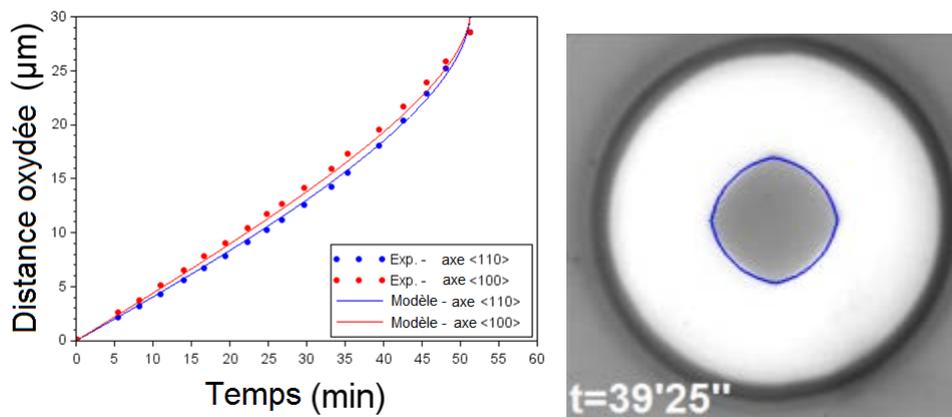


Fig. 2 : Confrontation simulation expérience pour une oxydation anisotrope d'un mesa circulaire de $60 \mu\text{m}$ de diamètre à 400°C .

4. PROBLEME INVERSE D'OXYDATION LATERALE

Ayant établi un modèle qui permet de connaître l'évolution temporelle du front d'oxydation à partir d'une forme de mesa gravée, le défi suivant vise à inverser le problème c'est-à-dire à définir le(s) mesa(s) à graver en vue d'atteindre une forme de front d'oxyde donnée. Cette inversion peut être effectuée assez simplement en reprenant le modèle précédent et en le réduisant à une seule étape élémentaire. Le choix de la distribution angulaire des vitesses de réaction est assez évident : circulaire dans le cas d'une oxydation isotrope et en forme de croix pour une oxydation parfaitement anisotrope (et de symétrie d'ordre 4). L'analyse montre que le motif à graver pour obtenir un front d'oxydation circulaire de rayon, $R_{visé}$, à l'issue d'une oxydation d'extension selon l'axe rapide, L_{ox} , est un cercle de rayon $R_{visé}+L_{ox}$ dans le cas isotrope et un carré arrondi de demi-largeur $R_{visé}+L_{ox}/2^{0.5}$ et dont la courbure au niveau de l'axe rapide correspond à $R_{visé}$ dans le cas parfaitement anisotrope. Pour une oxydation partiellement anisotrope (de degré d'anisotropie, a), le motif à graver est alors donné par simple combinaison linéaire (Motif(a)=(1-a)*Cercle+a*Carré_arrondi). La Fig. 3 illustre que les motifs décrits ci-dessus peuvent effectivement conduire à l'obtention expérimentale d'ouvertures circulaires après une oxydation anisotrope.

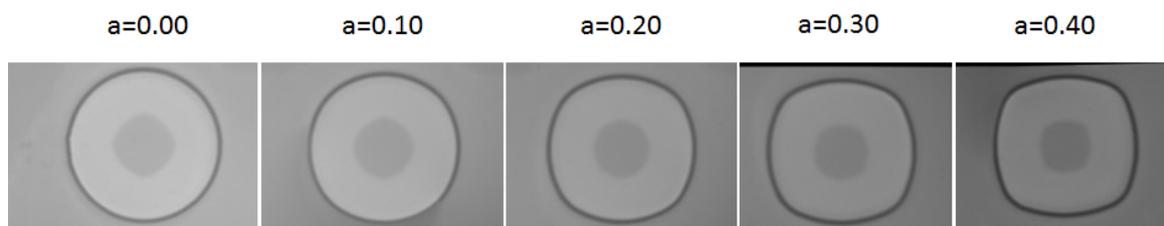


Fig. 3 : Réalisation d'une ouverture circulaire de 28 μm de diamètre après une oxydation de 22 μm d'extension maximale (pour une oxydation de degré d'anisotropie $a=0.20$).

CONCLUSIONS

Pour faciliter le contrôle des ouvertures d'oxyde assurant le confinement optique dans les guides d'onde et les VCSELs, une quantification de l'anisotropie d'oxydation des composés AlGaAs a été réalisée. De plus, un modèle anisotrope a été introduit afin de reproduire la déformation graduelle de l'ouverture d'oxyde depuis un contour de mesa gravé circulaire vers une forme diamantée. Pour finir, une méthode pour définir la forme des mesas à graver pour obtenir une ouverture d'oxyde circulaire a aussi été présentée et confirmée expérimentalement.

RÉFÉRENCES

- [1] D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar, and T. J. Rogers, "Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 1, p. 97, 1994.
- [2] J. M. Dallesasse and D. G. Deppe, "III-V Oxidation: Discoveries and Applications in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 10, pp. 2234–2242, Oct. 2013.
- [3] J. M. Dallesasse, N. El-Zein, N. Holonyak, K. C. Hsieh, R. D. Burnham, and R. D. Dupuis, "Environmental degradation of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs quantum-well heterostructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 68, no. 5, pp. 2235–2238, Sep. 1990.
- [4] S. Calvez *et al.*, "Vertically Coupled Microdisk Resonators Using AlGaAs/AlOx Technology," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 27, no. 9, pp. 982–985, May 2015.
- [5] K. Koizumi, P. O. Vaccaro, K. Fujita, M. Tateuchi, and T. Ohachi, "Lateral wet oxidation of AlAs layer in GaAs/AlAs heterostructures grown by MBE on GaAs (n11) A substrates," *J. Cryst. Growth*, vol. 198, pp. 1136–1140, 1999.
- [6] P. O. Vaccaro, K. Koizumi, K. Fujita, and T. Ohachi, "AlAs oxidation process in GaAs/AlGaAs/AlAs heterostructures grown by molecular beam epitaxy on GaAs (n11) A substrates," *Microelectron. J.*, vol. 30, no. 4, pp. 387–391, 1999.
- [7] K. D. Choquette *et al.*, "Advances in selective wet oxidation of AlGaAs alloys," *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J. Of.*, vol. 3, no. 3, pp. 916–926, 1997.
- [8] P.-C. Ku and C. J. Chang-Hasnain, "Thermal oxidation of AlGaAs: modeling and process control," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 39, no. 4, pp. 577–585, Apr. 2003.

DYNAMIQUE MULTIMODE NON-LINEAIRE D'UN LASER A SEMICONDUCTEUR : TURBULENCES PHASE-AMPLITUDE ET ROUTE VERS UN REGIME MONOFREQUENCE

Baptiste Chomet^{1,2}, Mikhaël Myara¹, Stéphane Blin¹, Stéphane Denet², Vincent Lecocq²,
Grégoire Beaudoin³, Isabelle Sagnes³ and Arnaud Garnache¹

¹IES-CNRS UMR5214, Univ. Montpellier, France

²INNOPTICS SAS, Talence, France

³C2N-CNRS, Université Paris Sud, Marcoussis, France

baptiste.chomet@ies.univ-montp2.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons une étude de la dynamique non linéaire d'un laser à semi-conducteur émettant par la surface en cavité externe verticale (VECSEL) en régime continu et en présence de dispersion normale ou anormale. Nous montrons l'existence d'une dynamique déterministe du champ laser qui donne naissance à un régime multimode longitudinal non stationnaire régulier ou à un régime mono-fréquence stable.

MOTS-CLEFS : *VECSEL, monofréquence, multimode, dispersion*

1. INTRODUCTION

De nos jours, les technologies lasers trouvent des applications dans des domaines très variés tels que l'environnement, le médical, les télécoms, la spectroscopie, où des sources lumineuses accordables de forte puissance et de haute cohérence sont requises. Offrant de tels performances dans le proche- et moyen-IR, la technologie Vertical-External-cavity-surface-Emitting semiconductor Laser (VECSEL) pompée optiquement par diode semble être un excellent candidat [1]. En effet le design "haute finesse" de la cavité permet l'émission en régime continu d'un puissant faisceau TEM₀₀ à la limite de diffraction, une haute pureté spectrale avec une polarisation linéaire et une largeur de raie étroite. Ces performances sont obtenues sans l'aide d'élément intracavité (filtre) : en tirant partie de la nature homogène du gain et du fait que la cavité soit relativement courte, un unique mode longitudinal peut ainsi être sélectionné via une compétition régulière et une dynamique de classe A [2]. Cette propriété confère au composant une large accordabilité en longueur d'onde.

Nous cherchons ici à étudier la stabilité de l'émission mono-fréquence de ces sources lasers. En particuliers nous montrons l'existence d'une dynamique non linéaire déterministe qui donne naissance à un comportement multi-mode longitudinal régulier mais non stationnaire. L'observation de cette dynamique multi-mode a déjà été reportée dans la littérature mais les conclusions qui en découlent ne permettent pas d'en justifier l'existence avec les paramètres physiques du laser [3,4]. Ici nous déterminons que c'est le régime de dispersion de vitesse de groupe qui est à l'origine des turbulences phase-amplitude menant à ce comportement multi-mode, et nous discutons de son implication pour un concept robuste mono-fréquence. Ce comportement dynamique peut s'étendre à tout système laser présentant une durée de vie du niveau électronique excité courte devant la durée de vie du photon (classe A).

2. STABILITE DU REGIME MONOFREQUENCE

Le composant VeCSEL (Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers) étudié ici (fig.1 a) est développé à partir d'une puce à semi-conducteur (celle-ci est appelée "1/2-VCSEL" ou "Miroir à gain"), un gap d'air de dimension millimétrique et par un miroir diélectrique (R >99%) qui referme

la cavité. Le miroir à gain est épitaxié en MOCVD (GaAs) pour une émission autour de $1\mu\text{m}$ et celui-ci comprend un miroir de Bragg de haute réflectivité ($R > 99.9\%$) et une zone de faible gain composée de 6 à 12 puits quantiques. Le pompage est réalisé grâce à une diode de pompe monomode émettant à 808nm . Le laser montre une distribution de faisceau transverse circulaire TEM₀₀ proche de la limite de diffraction ($M^2 < 1.2$) avec une faible divergence grâce à sa cavité optique stable et une puissance optique maximum de 200mW . L'état de polarisation du VCSEL est linéaire avec une pureté mesurée supérieure à 70 dB grâce à l'anisotropie optique dans la structure. La séparation entre deux modes longitudinaux consécutifs est ici d'environ 110 GHz . Dans un VCSEL avec une longueur de cavité aussi courte, les couplages non-linéaires entre modes induit par le mélange à quatre ondes (provenant des oscillations de l'inversion de population aux fréquences de battement intermodales) ne devrait pas impacter de façon significative la dynamique du laser en ce qui concerne la stabilité mono-fréquence et le temps d'affinement spectral [2].

Afin d'étudier l'influence de la dispersion de phase des modes longitudinaux dans la structure $\frac{1}{2}$ -VCSEL, nous avons ajusté la longueur d'onde du laser. Nous avons observé un fonctionnement fortement multi-mode pour une dispersion anormale avec une dynamique régulière non-stationnaire et des turbulences phase-amplitude, et un fonctionnement en mode longitudinal unique stable avec une haute pureté spectrale ($\text{SMSR} > 50\text{dB}$) pour une dispersion normale (fig.1 b). Une étude des battements optiques dans le domaine RF a permis de mesurer la cohérence de l'état.

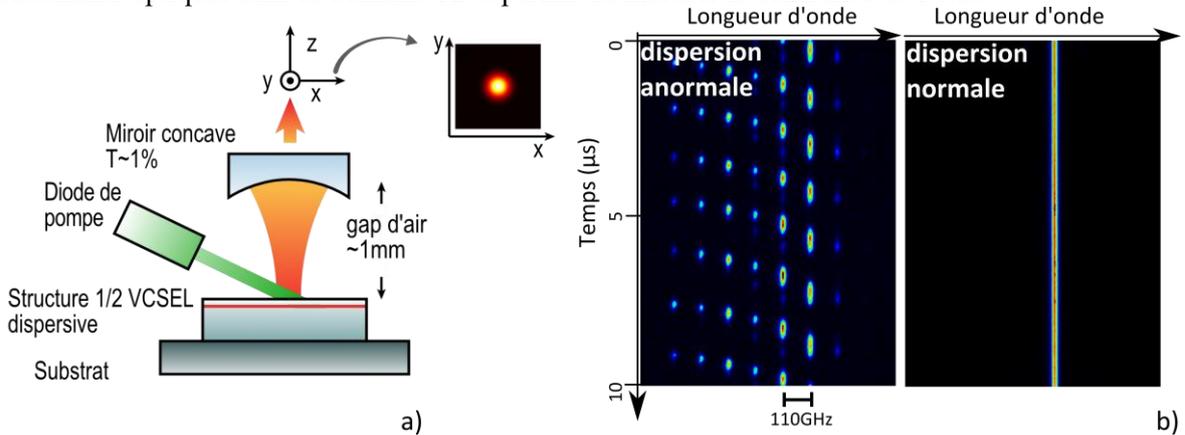


Fig. 1: a) Design du VCSEL considéré dans cette étude. b) Evolution temporelle du spectre optique observée avec un streak caméra (résolution temporelle de 5ns ; résolution spectrale 25GHz) pour deux valeurs de la dispersion apportée par la structure $\frac{1}{2}$ -VCSEL.

Ces résultats expérimentaux, et notamment cette brisure de symétrie de la dynamique multimode avec le signe de la dispersion, ne peuvent être expliqués dans le cadre d'un modèle de Maxwell-Bloch basé sur l'approximation de l'onde rotative [5]. Pour justifier théoriquement nos résultats nous utilisons un modèle basé sur un système d'équations différentielles couplées à délais [6]. Les résultats théoriques reproduisent fidèlement ceux de l'expérience.

CONCLUSION

La stabilité du régime mono-fréquence d'un composant laser à semi-conducteur émettant par la surface en cavité externe verticale est étudiée expérimentalement et théoriquement. Cette étude, révèle que la dispersion de vitesse de groupe de l'onde laser apportée par la structure $\frac{1}{2}$ -VCSEL doit être prise en compte pour obtenir un fonctionnement sur un unique mode longitudinal. Un travail théorique en cours a permis de reproduire par simulations ces résultats et une analyse de stabilité permettra d'étendre nos résultats à d'autres configurations de cavité laser, comme dans le cas d'une diode laser à émission par la tranche.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Laurain, M. Myara, G. Beaudoin, I. Sagnes, and A. Garnache, "Multiwatt-power highly-coherent compact single-frequency tunable Vertical-External-Cavity-Surface-Emitting-Semiconductor-Laser," *Opt. Express* 18, pp.14631 (2010).
- [2] A. Garnache, A. Ouvrard, and D. Romanini "Single-frequency operation of External Cavity VCSELs : non-linear multimode temporal dynamics and quantum limit " in *Optics Express* 15 (15), 9403-9417 (2007)
- [3] A. M. Yacomotti, L. Furfaro, X. Hachair, F. Pedaci, M. Giudici, J. Tredicce, J. Javaloyes, and S. Balle, "Dynamics of multimode semiconductor laser", in *PhysRevA* 69, pp.05381 (2004)
- [4] V.M. Baev, J. Eschner, J. Sierks, A. Weiler and P.E. Toschek, "Regular dynamics of a multimode dye laser", in *Opt.Commun* 94, 436-444 (1992).
- [5] S.E. Hodges, M. Munroe, J. Cooper and M. G. Raymer, "Multimode laser model with coupled cavities and quantum noise", in *J. Opt. Soc. Am. B* 14, 180 (1997).
- [6] R. M. Arkhipov · A. Amann · A. G. Vladimiro, "Pulse repetition-frequency multiplication in a coupled cavity passively mode-locked semiconductor lasers", in *Appl. Phys. B*, 539-548 (2015).

EFFICACITE DE LA FFF SUR LA RCWA ET LA METHODE DIFFERENTIELLE APPLIQUEE A LA DIFFRACTION D'UN RESEAU METALLIQUE SINUSOÏDAL

Habib Mohamad¹, Alain Morand¹, Sylvain Blaize², Demetrio Macias² et Pierre Benech¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes, IMEP-LAHC, 38000 Grenoble, France

² Lumière, nanomatériaux, nanotechnologies (L2n), 12 rue Marie Curie CS 42060 10004 Troyes Cedex, France

habib.mohamad@minatec.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ

La diffraction de la lumière par des structures périodiques est modélisable par des méthodes numériques comme la RCWA ou la méthode différentielle (MD). La RCWA est efficace pour des profils lamellaires. Pour des profils continus en TM, la MD associée à la FFF est une solution. Nous allons montrer que la RCWA associée à la FFF peut être efficace.

MOTS-CLEFS : *Méthode différentielle, RCWA, réseau, FFF*

1. INTRODUCTION

La méthode différentielle est devenue un outil efficace pour analyser les réseaux 1D d'un multicouche de forme quelconque. Et depuis l'application des règles de Li, la convergence en polarisation TM a été fortement améliorée [1]. Néanmoins ces règles s'appliquent facilement sur des réseaux lamellaires où la méthode différentielle peut-être simplifiée en RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis). Ce n'est plus le cas pour des formes continues. En effet, même en utilisant une discrétisation de la structure en un grand nombre de couches, la convergence peut devenir très lente. La méthode FFF (Fast Fourier Factorization) appliquée avec la méthode différentielle permet de résoudre ce problème [2]. Nous allons montrer qu'il est possible d'appliquer cette même méthode sur la RCWA. Dans un premier temps, les différences entre les deux méthodes vont être brièvement décrites. Puis dans un second temps, nous allons comparer les deux méthodes (précision du résultat et temps de calcul).

2. METHODE DIFFERENTIELLE ET RCWA

La RCWA et la méthode différentielle sont basées sur le développement des champs électromagnétiques E et H en séries de Floquet-Fourier. La structure est discrétisée suivant l'axe de propagation en plusieurs couches considérées « homogènes ». En effet, l'évolution de la permittivité dans le sens transverse est connue dans chaque couche et est décrite par une série de Fourier. La RCWA permet de résoudre les équations de Maxwell dans chaque couche par l'intermédiaire d'une matrice dont les valeurs propres et les vecteurs propres sont respectivement les indices effectifs et les modes propres pouvant se propager dans la couche. Grâce aux conditions de continuité entre chaque couche et à la propagation des modes dans chaque couche, le problème peut se résumer à mettre en cascade les matrices S_i reliant les ondes entrantes des ondes sortantes de chaque couche. Si on considère z comme l'axe de propagation, E_i et H_i les champs électrique et magnétique de la couche L_i , on obtient l'équation (1) suivante qui fait intervenir la matrice M_{L_i} à valeurs constantes dans cette couche :

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} E_i \\ H_i \end{pmatrix} = M_{L_i} \begin{pmatrix} E_i \\ H_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

En revanche, la méthode différentielle utilise la résolution numérique Runge-Kutta pour résoudre l'équation différentielle de la couche, en discrétisant la couche S_i précédente en n_s sous-

couches. Les équations de propagation précédentes sont alors issues d'une matrice dont les coefficients varient suivant la direction de propagation z

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} E_i \\ H_i \end{pmatrix} = M_{L_i}(z) \begin{pmatrix} E_i \\ H_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

Ces deux méthodes sont efficaces pour des structures lamellaires, mais dans le cas d'un profil continu comme un réseau sinusoïdal, une discrétisation en grand nombre de couches doit être prise en compte, et cela implique une très lente convergence induisant un long temps de calcul. La méthode FFF permet de résoudre cette problématique. Elle consiste à remplacer la matrice M_{L_i} par une autre matrice M'_{L_i} qui prend en compte la continuité des champs tangentiels sur une surface quelconque, ce qui n'est pas le cas en lamellaire (surface perpendiculaire à l'axe de propagation). Les différents cas sont présentés sur les figures suivantes où une structure métallique sinusoïdale ayant une période $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$, et une amplitude crête à crête $H = 0.2 \mu\text{m}$ a été considérée. Le métal utilisé est l'Aluminium avec $n_{\text{sup}}=1$ et $n_{\text{sub}}=n_{\text{metal}} = 1.3 + j7.6$ (Fig. 1).

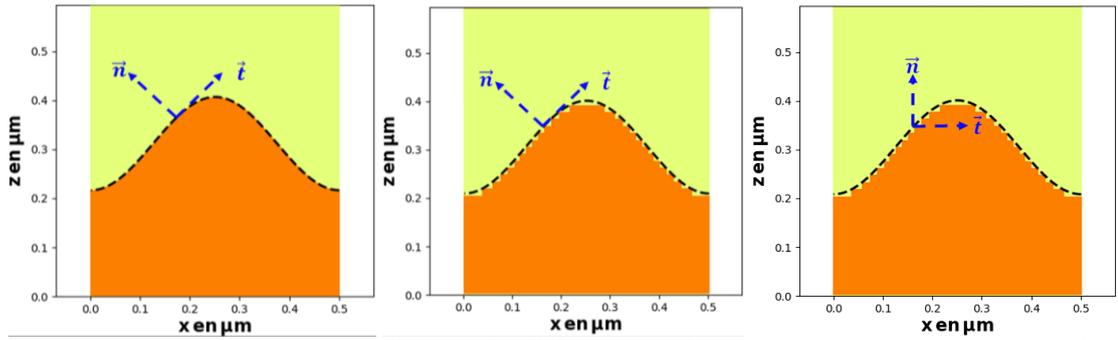


Fig. 1: Evolution des conditions tangentielles pour les différentes méthodes. A gauche, la MD-FFF, au milieu la RCWA-FFF et à droite la RCWA.

3. PROBLEMES RENCONTRES SUR LES PROFILS CONTINUS

Pour révéler les problèmes induits par les profils continus, une comparaison des cartes du champ en polarisation TM a été faite (Excitation avec une onde plane inclinée de 30° à une longueur d'onde $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$). Les cartes montrent $|E_x|^2$. Sur les pentes du profil sinusoïdal, le champ tangentiel est une combinaison d' E_x et E_z . Ainsi, on remarque des réflexions parasites avec la RCWA sur la Fig.2, qui sont issues d'une structure métallique en marche d'escalier avec des effets de pointes dans les coins. En revanche, avec la RCWA-FFF et la MD-FFF où la pente est prise en compte avec la FFF le problème est peu ou pas visible.

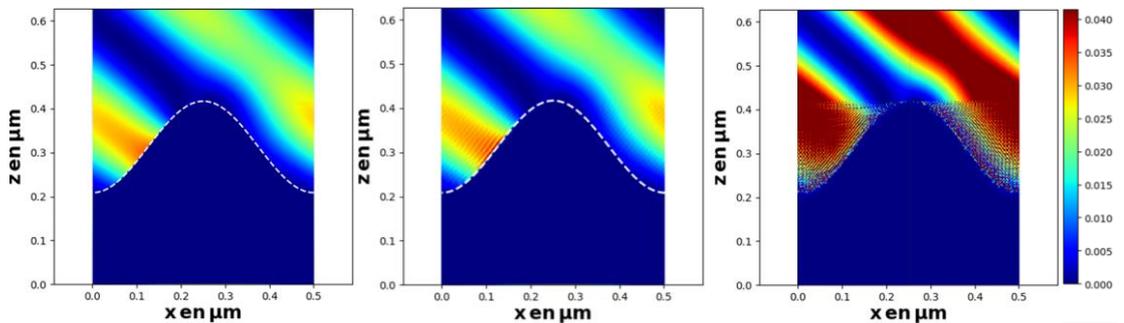


Fig. 2: Evolution de $|E_x|^2$ avec la MD-FFF, RCWA-FFF et RCWA respectivement.

4. RESULTATS

L'évolution de la réflexion à l'ordre -1 a été ensuite étudiée en fonction des méthodes utilisées et du nombre d'harmoniques $2N+1$. Sur la Fig. 3, on montre l'évolution de l'erreur relative

en prenant comme référence le résultat obtenu avec la méthode intégrale [3]. On remarque la très lente convergence obtenue avec la RCWA. En revanche, pour $N > 15$, l'erreur est inférieure pour les deux autres méthodes. La MD-FFF permet encore de réduire cette erreur en augmentant N .

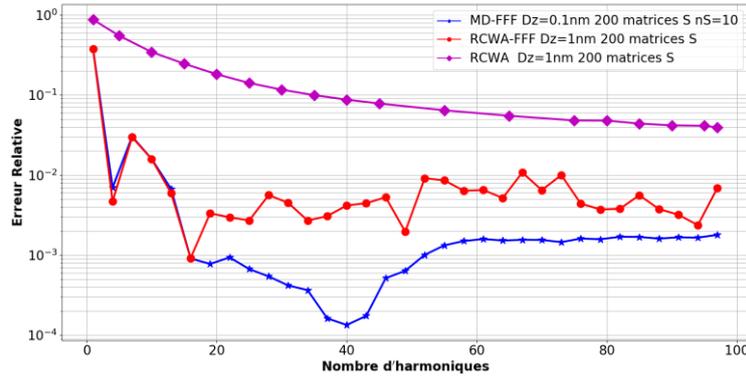


Fig.3 : Erreur relative $[R(-1)-Ref]$ en fonction de N pour les 3 méthodes avec $Ref = 0.8785309971543$. D_z est le pas de discrétisation qui induit le nombre de couches ou matrice S_i . Et n_S est le pas de discrétisation pour appliquer le Runge-Kutta.

L'évolution du temps de calcul a aussi été comparée en fonction de nombre d'harmoniques $2N+1$. Pour cela, les trois méthodes sont exécutées sur le même système et les résultats sont montrés sur la Fig.4. La RCWA-FFF grâce à l'utilisation d'une matrice aux valeurs propres est plus rapide que la MD-FFF.

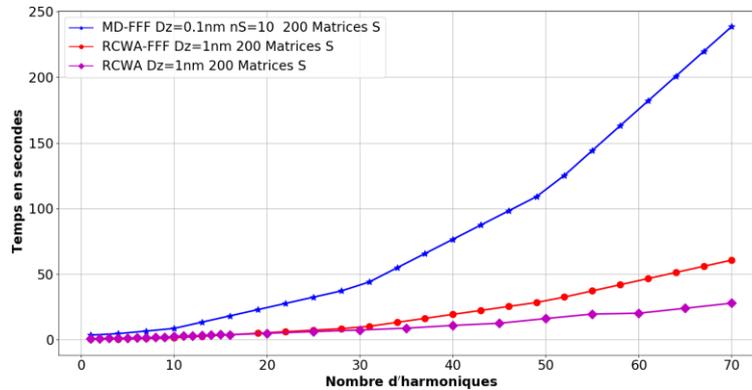


Fig. 4 : Temps de calcul en s pour différents cas avec la MD-FFF et la RCWA-FFF en fonction de N .

CONCLUSION

Les méthodes MD-FFF et RCWA-FFF convergent très rapidement vers la bonne valeur. Suivant l'erreur souhaitée, il peut être plus intéressant d'utiliser la RCWA-FFF qui permet de réduire le temps de calcul. En effet, une erreur inférieure à 10^{-2} peut être largement suffisante pour étudier des structures, les erreurs induites par la fabrication pouvant être beaucoup plus impactantes.

RÉFÉRENCES

[1] M. Moharam et al, "Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings," J. Opt. Soc. Am. A 12, 1068-1076 (1995).
 [2] E. Popov and M. Nevière, "Maxwell equations in Fourier space: fast-converging formulation for diffraction by arbitrary shaped, periodic, anisotropic media," J. Opt. Soc. Am. A 18, 2886-2894 (2001).
 [3] D. Maystre, Integral methods, in Electromagnetic Theory of Gratings, R. Petit, ed. Springer-Verlag, Berlin (1980).

ELABORATION OF HIGHLY NONLINEAR AMORPHOUS CHALCOGENIDE THIN FILMS FOR MID-INFRARED APPLICATIONS

J.-B. Dory¹, J.-B. Jager², A. Coillet³, J.-Y. Raty⁴, F. D'Acapito⁵, A. Verdy¹, M. Tessaire¹, M. Bernard¹, J.-M. Fedeli¹, B. Cluzel³ and P. Noé¹

¹Université Grenoble Alpes, CEA-LETI, MINATEC Campus, Grenoble, France

²Université Grenoble Alpes, CEA-INAC, MINATEC Campus, Grenoble, France

³ICB, UMR CNRS 5209, Université de Bourgogne Franche Comté, Dijon, France

⁴Physics of Solids Interfaces and Nanostructures, Université de Liège, Belgium.

⁵CNR-IOM-OGG c/o ESRF, Grenoble, France.

jean-baptiste.dory@cea.fr

SUMMARY

In this work we show how to tailor the nonlinear (NL) optical properties of As-free amorphous chalcogenide thin films compatible with CMOS technology with regards to their potential use in active on-chip mid-infrared (MIR) components. The use of industrial multi-cathode deposition tool allows to obtain a wide variety of Ge-Sb-S-Se-Te-based compositions with very different NL Kerr refractive indices.

MOTS-CLEFS : *chalcogenide glasses ; integrated photonics; Nonlinear optics; Mid-Infrared*

1. INTRODUCTION

Thanks to a unique portfolio of properties chalcogenide materials have been widely used since a long time in non-volatile memory applications such as optical data storage or Phase-Change Random Access Memory [1], and more recently the achievement of 3D memory arrays [2]. The wide transparency window in the infrared range and the large optical nonlinearities of some chalcogenide glasses (CGs) also offer opportunities for the elaboration of innovative mid-infrared (MIR) components such as MIR supercontinuum (SC) laser sources, optical sensors, IR micro-lens arrays and all-optical integrated circuits [3]. Up to now, the state-of-the-art MIR SC sources integrating CGs mostly involve compositions with Arsenic element such as As₂S₃ [4], As₂Se₃ fibres [5] or GeAsSe rib waveguides [6, 7]. However, the emergence of the green photonics trend is calling for the progressive substitution of the most dangerous chemicals. Indeed, the REACH European recommendation and a recent publication from the World Health Organization have both identified Arsenic as one of the ten most harmful chemicals for human health. In that context, we present here a way to master the linear and nonlinear optical properties of As-free amorphous chalcogenide thin films in order to be compatible with CMOS technologies towards the realization of on-chip MIR nonlinear components.

2. THIN FILMS DEPOSITION AND CHARACTERIZATION

Magnetron co-sputtering of several chalcogenide compounds targets in a 200 mm multi-cathode industrial deposition tool is a powerful method to tailor the NL optical properties of GeSb_wS_xSe_yTe_z chalcogenide amorphous thin films. The aim of the present study is to find the best compromise between good glass stability of S-based chalcogenide and the huge non-linear refractive index of Te-based compositions. The amorphous structure of the as-deposited thin films is systematically characterized by means of Far Infrared Fourier-Transform (FIR-FTIR) and Raman spectroscopy (Fig.1). Spectroscopic ellipsometry measurements allowed to determine the linear optical constants (n and k) and to approximate the optical band gap energy of the different chalcogenide films. M-line technique was used to evaluate the optical transmission losses and refractive index at 1548 nm.

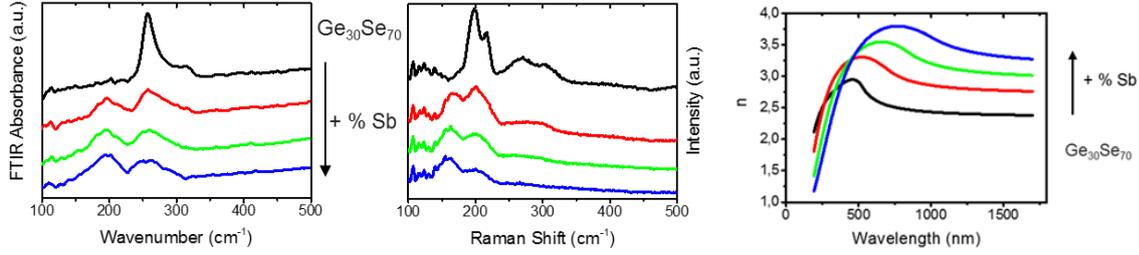


Fig. 1: FTIR and Raman spectra, as well as refractive index deduced from spectrometric ellipsometry, of $(\text{Ge}_{30}\text{Se}_{70})_x\text{Sb}_y$ thin films showing the change of the local order upon Sb introduction and its impact on optical properties.

3. NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES

The nonlinear optical properties of the films were evaluated by calculating the Kerr refractive index (n_2) using the Sheik-Bahae model based on refractive index and band gap values obtained from spectroscopic ellipsometry (Fig.2). The predicted Kerr indices are compared to those extracted from literature. At last, integrated waveguides made from selected chalcogenide compositions are fabricated using standard CMOS processes and tested in linear and nonlinear regime. Our most recent results will be presented in this communication.

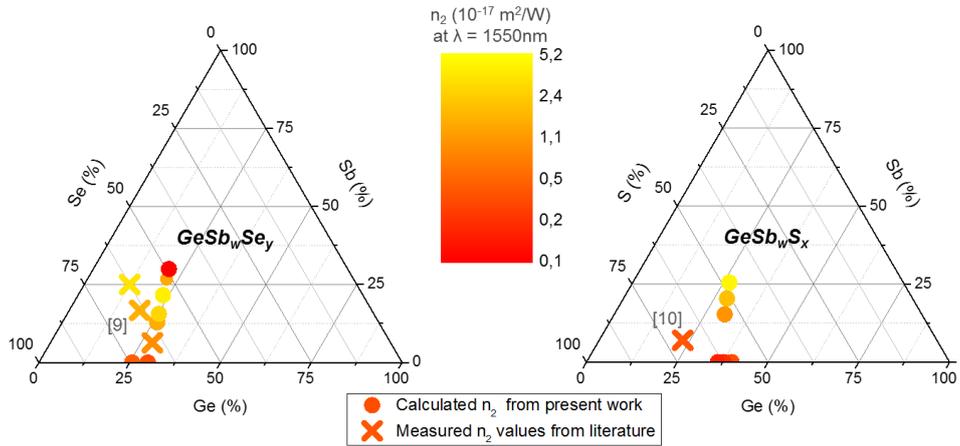


Fig.2: Calculated nonlinear Kerr refractive indices of Ge-Sb-S and Ge-Sb-Se thin films (dots) as well as measured n_2 values from literature (crosses).

4. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

We have explored the relationship between chalcogenide compositions and their optical properties (transparency window, refractive index, absorption). Amorphous stability as well as Kerr index of the films are evaluated to find the best composition for integration in photonics devices. Ultimately, the origin of the enhanced optical nonlinearities of the most promising $\text{GeSb}_w\text{S}_x\text{Se}_y\text{Te}_z$ compositions will be explored by means of *ab initio* simulations of film amorphous structures validated using X-ray Absorption Spectroscopy at LISA beam line of the ESRF.

REFERENCES

- [1] P. Noé et al., Sem. Sc. And Tech. 33, 013002 (2018)
- [2] A. Verdy et al., IEEE 9th Int. Mem. Work. , IMW (2017)
- [3] D. Tsiulyanu et al., Sensor. Actuat. B-Chem. 223, 95-100 (2016)
- [4] O. Mouawad et al., Opt. Lett. 39, 2684 (2014)
- [5] C. R. Petersen et al., Nature Phot. 8, 830-834 (2014)
- [6] Y. Yu et al., Opt. Mat. Express 3, 1075 (2013)
- [7] Y. Tu et al., Laser & Phot. Rev. 8, 792 (2014)
- [8] M. Sheik-Bahae et al., J. Quantum Electron. 27, 1296 (1991)
- [9] T. Kuriakose et al., Opt. Commun. 403, 352-357 (2017)
- [10] J.W. Choi et al., Sci. Rep. 6, 39234 (2016).

Etude de l'effet Kerr évanescent dans une nanofibre de silice immergée dans un liquide hautement non linéaire

Gil Fanjoux, Jean-Charles Beugnot, et Thibaut Sylvestre

Institut FEMTO-ST, UMR 6174 CNRS – Université Bourgogne Franche-Comté, 25030 Besançon

gil.fanjoux@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

Nous étudions théoriquement la contribution à l'effet Kerr optique du champ évanescent d'une nanofibre optique de silice par rapport à la contribution de la silice du cœur en fonction de son diamètre et du milieu liquide hautement non linéaire environnant.

MOTS-CLEFS : *micro et nanofibres ; effet Kerr évanescent ; liquides non linéaires*

1. INTRODUCTION

Les nanofibres optiques sont des fibres optiques chauffées et effilées atteignant des diamètres submicroniques. Ces fils très fins de silice ont récemment prouvé leur grand intérêt pour l'optique non linéaire du fait d'un très fort confinement du champ optique permettant d'exacerber les effets non linéaires, ainsi qu'un champ évanescent important permettant d'interagir avec le milieu environnant [1,2]. Ces propriétés inédites permettent notamment de générer des supercontinua sur des longueurs très courtes [3], piéger des atomes dans le champ évanescent [4], générer des composantes spectrales par effet Raman évanescent [5], ou être utilisé comme capteur chimique ou biologique [6].

Ce travail présente l'étude théorique de l'effet Kerr optique induit par le champ évanescent d'une nanofibre de silice plongée dans un liquide présentant un fort coefficient Kerr. Nous démontrons ainsi que la contribution à l'effet Kerr de la gaine liquide correspondant à de l'acétone est supérieure à celle du cœur pour des diamètres de la fibre optique inférieurs à 550 nm.

2. RESULTATS THEORIQUES

L'effet Kerr dans un guide d'onde non linéaire est caractérisé par le paramètre $\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$, avec n_2 le coefficient Kerr caractéristique du milieu non linéaire correspondant à la partie guidante, A_{eff} l'aire effective du mode se propageant dans le guide, et λ la longueur d'onde du champ se propageant dans le guide. Dans le cas d'une nanofibre, le champ évanescent du mode, qui interagit avec le milieu extérieur, devient non négligeable par rapport au champ se propageant dans le cœur. Afin de prendre en compte cette contribution, le paramètre non linéaire effectif γ_{eff} pour un mode devient [7] :

$$\gamma_{eff} = \frac{2\pi \iint_{-\infty}^{+\infty} n_2(x, y) |E(x, y)|^4 dx dy}{\lambda \left(\iint_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2} \quad (1)$$

avec $E(x, y)$ l'amplitude du champ électrique du mode se propageant dans le guide. Les milieux correspondant au cœur et à la gaine de la nanofibre présentant des coefficients Kerr $n_{2,co}$ et $n_{2,ga}$ différents, les contributions spatiales du cœur γ_{co} et de la gaine γ_{ga} de la nanofibre peuvent alors être séparées. L'équation précédente devient ainsi :

$$\gamma_{eff} = \frac{2\pi n_{2,co}}{\lambda} \frac{\iint_{co} |E(x, y)|^4 dx dy}{\left(\iint_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2} + \frac{2\pi n_{2,ga}}{\lambda} \frac{\iint_{ga} |E(x, y)|^4 dx dy}{\left(\iint_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2} = \gamma_{co} + \gamma_{ga} \quad (2)$$

Cette relation simple permet de calculer les contributions du cœur et de la gaine au paramètre γ_{eff} . Le système optique étudié est représenté schématiquement sur la figure 1(a). Nous considérons une fibre optique de silice à géométrie cylindrique et de diamètre sub-micronique et dont la gaine est un

liquide non linéaire. Des simulations numériques par la méthode des éléments finis (COMSOL) ont tout d'abord permis de calculer le champ électrique $E(x, y)$ du mode fondamental de la nanofibre pour différents diamètres d de la nanofibre ($d: 0,3 \rightarrow 0,8 \mu\text{m}$) et différents milieux extérieurs (air, eau, éthanol, acétone). A partir de ce champ électrique, nous avons modélisé le coefficient Kerr effectif γ_{eff} (Fig.1(b)), l'aire effective du mode fondamental A_{eff} (Fig.1(c)), la fraction f du champ évanescent (Fig.1(d)), les contributions au paramètre Kerr du cœur silice γ_{co} (fig.1(e)) et de la gaine γ_{ga} (Fig.1(f)). Afin de quantifier la proportion de contribution de la gaine au paramètre Kerr effectif, la figure 1(g) représente le rapport γ_{ga}/γ_{eff} . Le tableau 1 rassemble les indices de réfraction n_0 ainsi que les coefficients Kerr n_2 des différents milieux utilisés dans nos calculs, et pour $\lambda = 532 \text{ nm}$.

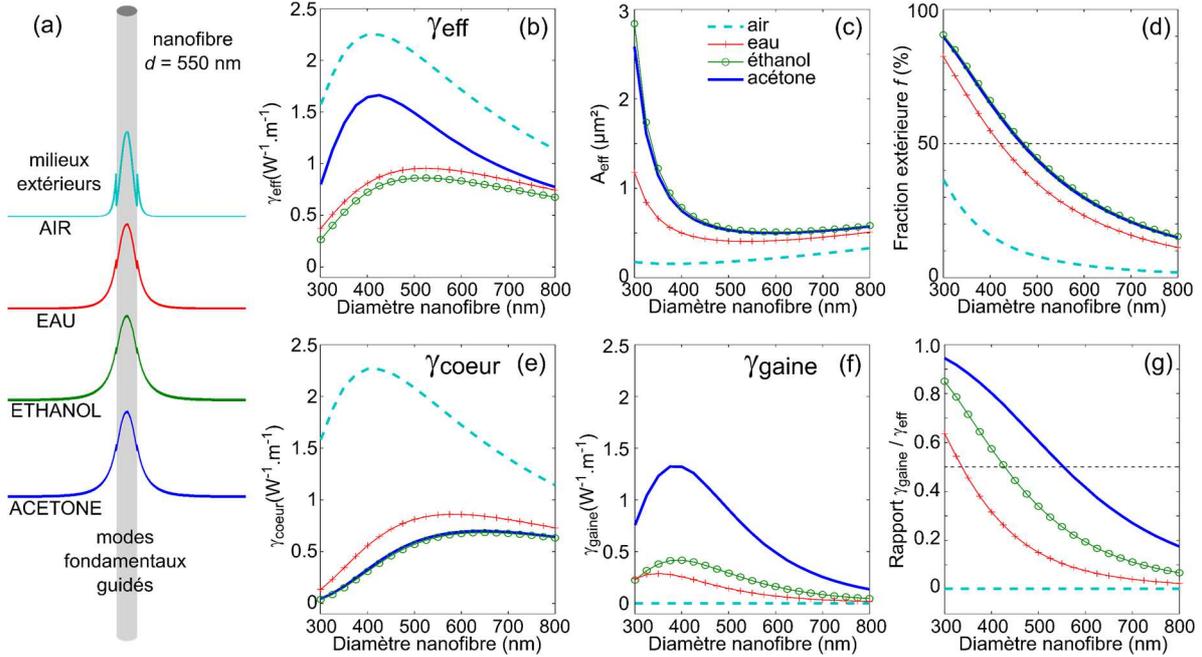


Figure 1 : (a) exemple de nanofibre avec coupes normalisées des modes fondamentaux pour une nanofibre de 550 nm de diamètre et pour différents milieux extérieurs. Evolution en fonction du diamètre de la nanofibre et du milieu extérieur (b) de l'aire effective du mode fondamental, (c) de la fraction du champ extérieur à la nanofibre, (d) du paramètre γ_{eff} , (e) du paramètre γ_{co} , (f) du paramètre γ_{ga} , et (g) du rapport γ_{ga}/γ_{eff} .

Tableau 1 : indices de réfraction n_0 et coefficients non linéaires Kerr n_2 pour différents milieux à 532 nm [8].

	silice	air	eau	éthanol	acétone
n_0	1.4607	1	1.3337	1.3637	1.3614
$n_2 \text{ (m}^2 \cdot \text{W}^{-1}\text{)}$	$3,2 \cdot 10^{-20}$	0	$4,1 \cdot 10^{-20}$	$7,7 \cdot 10^{-20}$	$24 \cdot 10^{-20}$

L'éthanol et l'acétone permettent de comparer deux liquides d'indice de réfraction (donc d'aire effective modale) très proche, mais avec des coefficients Kerr différents. L'eau et l'éthanol permettent de comparer deux liquides d'indices de réfraction et de coefficients non linéaires Kerr différents.

Tout d'abord, il est clair sur la figure 1(b) que le paramètre Kerr γ_{eff} reste maximal pour une nanofibre dans l'air, même comparé à une nanofibre plongée dans l'acétone à fort coefficient Kerr. Ceci provient du fait que l'aire effective du mode fondamental pour une nanofibre dans l'air reste la plus faible pour tout diamètre de nanofibre (fig. 1(c)) en raison du saut d'indice cœur/gaine le plus élevé, permettant ainsi un confinement du champ plus important, comme l'atteste la fraction extérieure du champ (fig. 1(d)). Ainsi, le champ étant plus fort, l'effet Kerr est plus important, même si la contribution du champ évanescent à l'effet Kerr est nulle (fig. 1(f)). Le paramètre γ_{eff} passe par une valeur maximale de $2,1 \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ pour $d = 0,41 \mu\text{m}$, avec approximativement une aire

effective minimale. A noter que pour une nanofibre plongée dans un liquide, cette relation entre γ_{eff} et l'aire effective n'est plus valide. Néanmoins, elle reste vraie pour la contribution du cœur γ_{co} à l'effet Kerr (Fig.1(c) et 1(e)).

Même si le γ_{eff} est plus faible pour une nanofibre plongée dans un liquide, la contribution du champ évanescent à l'effet Kerr peut être comparable voire supérieure à celle provenant du cœur silice de la nanofibre, comme l'attestent les figures 1(e-g). On remarque clairement que pour l'acétone, le paramètre γ_{ga} passe par un maximum égal à $\gamma_{ga} = 1,3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ pour un diamètre de $0,39 \mu\text{m}$, avec une contribution du cœur de $\gamma_{co} = 0,3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Le paramètre Kerr résultant $\gamma_{eff} = 1,6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ est donc à plus de 80% d'origine évanescente. A noter que cette valeur maximale n'est pas corrélée à l'aire effective du mode dont le minimum est obtenu pour un diamètre de nanofibre de $d = 0,6 \mu\text{m}$. La relation $\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}}$ n'est donc plus valide pour une nanofibre immergée dans un liquide lorsque la partie évanescente du champ devient importante.

La comparaison de l'éthanol et l'acétone est assez simple. L'aire effective de leur mode fondamental étant identique (fig. 1(c)), la contribution γ_{co} est donc identique pour les deux liquides (fig. 1(e)). De plus, comme le coefficient Kerr n_2 de l'acétone est supérieur à celui de l'éthanol, la contribution γ_{ga} est clairement supérieure pour l'acétone, induisant ainsi un paramètre γ_{eff} plus fort. Concernant la comparaison de l'eau avec l'éthanol, l'eau présente un paramètre Kerr γ_{eff} supérieur à celui de l'éthanol, alors que son coefficient Kerr est plus faible. Ceci provient du fait que l'eau possède un indice de réfraction plus faible, induisant un confinement plus fort du mode dans le cœur, là où son intensité est la plus forte. Ainsi, la contribution γ_{ga} pour l'eau est plus faible et γ_{co} plus élevée par rapport à l'éthanol, induisant un paramètre γ_{eff} plus fort.

Il est intéressant de noter que l'évolution de la contribution du champ évanescent à l'effet Kerr (Fig.1(f)) n'est pas identique à celle de la fraction extérieure du champ (Fig.1(c)). Ceci provient du fait que l'effet Kerr est proportionnel à l'intensité du champ et non à son étendue spatiale. Ainsi, le rapport γ_{ga}/γ_{eff} atteint 50% pour un diamètre de nanofibre égal à $d = 0,55 \mu\text{m}$, alors que la fraction extérieure du champ n'est que de 39%.

CONCLUSION

Nous avons démontré théoriquement que la contribution à l'effet Kerr optique du champ évanescent d'une nanofibre en silice peut devenir prépondérante lorsque celle-ci est immergée dans un liquide hautement non linéaire comme l'acétone. En résumé, le coefficient Kerr effectif contient deux contributions : la contribution du cœur silice qui dépend du diamètre de la nanofibre et suit approximativement l'inverse de l'aire effective, et la contribution de la gaine via la partie évanescente du champ qui dépend du diamètre de la nanofibre et des propriétés non linéaires du milieu extérieur. Les effets Raman et Kerr évanescents permettent d'imaginer des expériences pour lesquelles le champ se propageant dans une nanofibre optique interagit essentiellement avec le milieu extérieur sans contribution majeure de la nanofibre.

Les auteurs remercient le projet ANR FunFilm ANR-16-CE24-0010.

REFERENCES

- [1] M. A. Foster, A. C. Turner, M. Lipson, and A. L. Gaeta, *Opt. Express*, vol 16, pp 1300–1320, 2008.
- [2] G. Brambilla, "Optical fiber nanowires and microwires: a review", *J. Opt.*, vol 12, 043001, 2010.
- [3] T. A. Birks, W. J. Wadsworth, and P. St. J. Russell, *Opt. Lett.*, vol 25, pp 1415-1417, 2000.
- [4] M. J. Morrissey, K. Deasy, M. Frawley, R. Kumar, E. Prel, L. Russell, V. G. Truong, & S. N. Chormaic. *Sensors*, vol 13, pp10449-10481, 2013.
- [5] L. Shan, G. Pauliat, G. Vienne, L. Tong, & S. Lebrun, *Appl. Phys. Letters*, vol 102, 201110, 2013.
- [6] W. Talataisong, R. Ismaeel, & G. Brambilla, *Sensors*, vol 18, p 461, 2018.
- [7] M. Chemnitz *et al.*, *Nat. Commun.*, vol 8, 42, 2017.
- [8] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Academic Press 3rd Ed., 2008.

ETUDE NUMERIQUE SUR LA DEPENDANCE SPECTRALE COMPLEXE DU COUPLAGE OPTIQUE DANS LA GENERATION DE PEIGNES KERR PAR DES RESONATEURS DE Si_3N_4

Napoléon Gutierrez, Arnaud Fernandez, Stéphane Calvez, Olivier Llopis

LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

ngutierr@laas.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons une approche numérique nouvelle permettant de modéliser un résonateur optique en Si_3N_4 à couplage d'accès vertical. Cette approche itérative innovante consiste à séparer la propagation intra-cavité décrite par l'équation non-linéaire de Schrödinger (NLS) de la propagation dans le coupleur d'accès décrite par une matrice de transfert complexe. Ceci nous permet de quantifier le seuil de déclenchement et la dynamique de la génération de peignes Kerr fortement dépendants des propriétés spectrales du coupleur et de la cavité résonante.

MOTS-CLEFS : *Peignes Kerr, simulation numérique, Si_3N_4 , couplage vertical, Téraherz*

1. INTRODUCTION : SYSTEME ET APPROCHE DE MODELISATION

L'outil numérique peut être utile pour la conception de micro-résonateurs optiques ayant pour but la génération de peignes Kerr. Le système modélisé est un résonateur optique dans lequel on considère une propagation unidirectionnelle dans un milieu non-biréfringent. Pour modéliser l'évolution temporelle du système on utilise un système d'équations dans lequel la propagation dans le coupleur d'accès de la cavité est décrite par sa matrice de transfert qui met en relation le champ de pompe, champ intra-cavité et le champ de sortie du résonateur. La propagation dans la cavité est décrite par la NLS qu'on résout en utilisant une méthode Runge-Kutta d'ordre 4 à pas variable [1]. C'est ainsi qu'on simule un tour de cavité.

L'effet Kerr se traduit par une augmentation de l'indice de réfraction du milieu avec la puissance optique. L'accumulation de puissance optique dans le résonateur modifie le chemin optique nL de la lumière à la longueur d'onde de pompe, rajoutant un déphasage supplémentaire et donc décalant la résonance de la cavité optique vers les basses fréquences. Pour maximiser la puissance optique qui circule dans la cavité, l'accord du laser de pompe avec la fréquence de résonance de la cavité doit s'effectuer dans le sens de déplacement de la résonance. Notre protocole de simulation correspond à l'accord en fréquence d'un laser à puissance continue en suivant la procédure que nous venons de décrire.

La figure 1 illustre schéma du dispositif modélisé à gauche et à droite, l'évolution de la puissance intra-cavité moyenne circulant dans le résonateur lors d'une simulation de balayage du laser de pompe à travers la résonance de la cavité. Nous pouvons identifier les différents régimes intra-cavité : (I) Régime linéaire. (II) Excitation de motifs temporels dans la cavité. (III) Régime d'instabilité de modulation. (IV) Régime impulsif stable ou plusieurs impulsions circulent dans la cavité

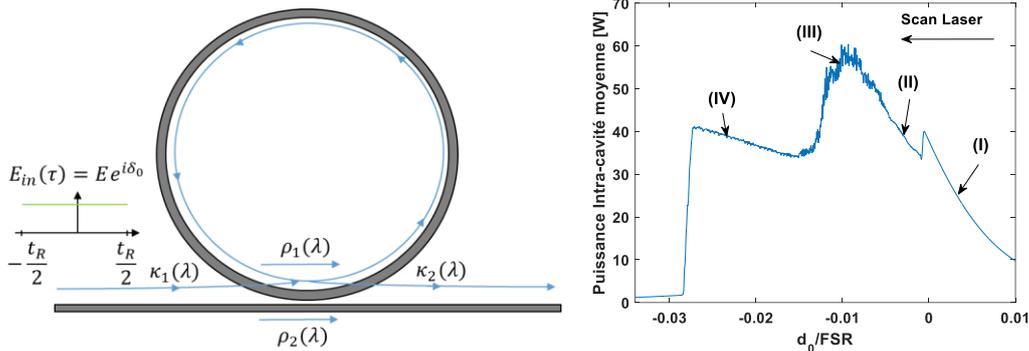


Fig. 1 : Gauche : Schéma du dispositif modélisé. Droite : Puissance intra-cavité moyenne lors du balayage du laser pompe en allant des hautes vers les basses fréquences.

2. RESULTATS ET INTERPRETATION

Les résonateurs avec des structures de couplage d'accès verticales présentent des coefficients de couplage et de transmission de leur coupleur d'accès qui varient selon la longueur d'onde de la lumière traversant le résonateur [2]. Cette variation s'exprime en amplitude et en phase. La variation de l'amplitude des coefficients du coupleur d'accès modifie directement les valeurs du facteur d'accumulation de puissance (Power Enhancement Factor : PEF) défini comme le ratio entre puissance accumulée intra-cavité à la résonance et puissance de pompe et le facteur Q du résonateur en fonction de la longueur d'onde. Les variations en déphasage induit par les coefficients du coupleur modifient la structure modale du résonateur, c'est-à-dire l'espacement entre deux pics de résonance de la cavité en fonction de la longueur d'onde équivalent à une dispersion subie dans le coupleur d'accès du résonateur.

Les résonateurs simulés ont les propriétés dispersives et non linéaires du Si_3N_4 et une ISL de 220 GHz. La différence entre les trois cas est leur coupleur d'accès et toutes les propriétés qui découlent de cette différence telles que le facteur de qualité et la PEF. En utilisant le formalisme montré en [3], on calcule à partir des coefficients du coupleur, la PEF et le facteur Q sur notre plage fréquentielle de simulation et on obtient les courbes présentées en figure 2.

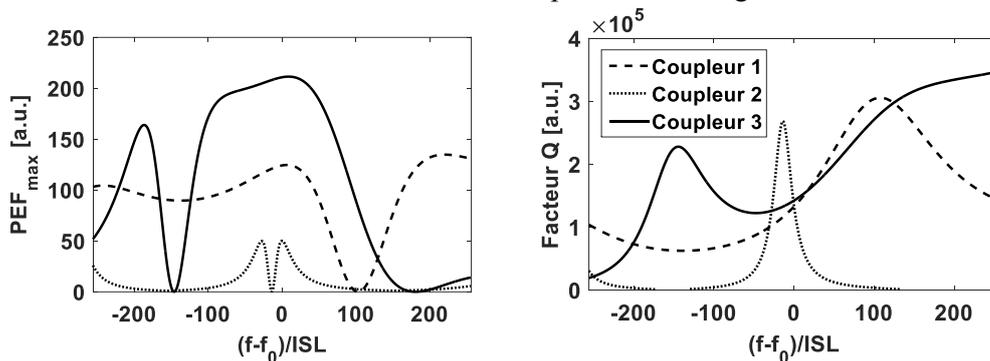


Fig. 2 : Profil de PEF et facteur de qualité pour les 3 structures étudiées

Le fait d'utiliser un modèle qui sépare la propagation intra-cavité de la propagation dans le coupleur d'accès du résonateur nous permet d'implémenter de manière très simple les effets de dépendance de la longueur d'onde des coefficients de transmission et de couplage de la structure d'accès dans le résonateur. En utilisant les transformées de Fourier rapides, nous pouvons simuler le passage par le coupleur d'accès dans le domaine fréquentiel.

Afin de pouvoir comparer l'effet du profil du facteur de qualité de différentes cavités, nous comparons ici les trois résonateurs tout en maintenant le produit $PEF \cdot P_{pompe}$ constant pour normaliser la puissance de pompe accumulée dans la cavité. Ceci nous permet de comparer trois cavités qui ont des PEF différentes et faire des observations sur l'impact du profil spectral de

facteur Q sur la formation forme du peigne généré. L'enveloppe des peignes générés avec les trois exemples de cavité est donnée en figure 3.

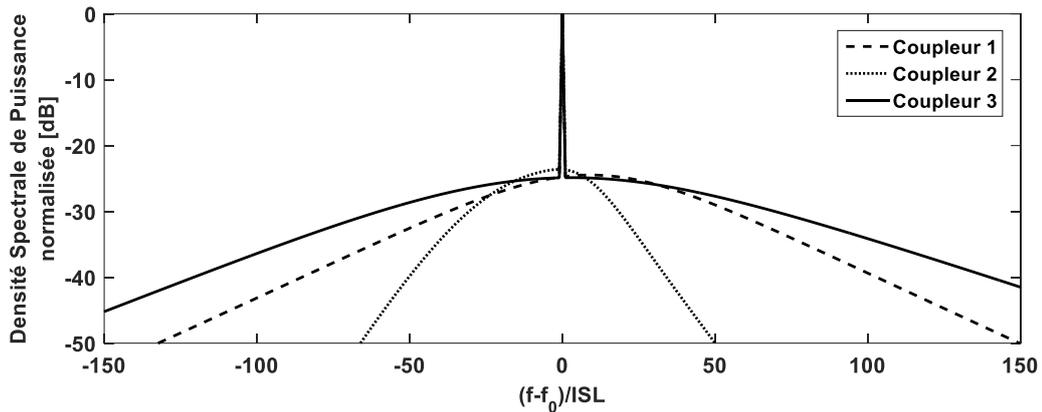


Fig. 3 : Enveloppe des peignes générés intra-cavité pour les trois cas présentés.

Nous pouvons remarquer que le facteur de qualité des trois cas étudiés est similaire à la fréquence de pompe (10^5 - $2 \cdot 10^5$). Cependant, ce qui sépare les trois cas de figure est la valeur du facteur Q dans toute la plage spectrale d'étude. Comme c'était attendu, le fait de maintenir un facteur Q élevé sur une large bande permet à la lumière générée intra-cavité par effet Kerr de faire plus d'oscillations avant d'être atténuée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet outil numérique s'avère bien adapté pour l'étude de la génération de peignes Kerr à partir de toute structure résonante passive qui présente un couplage d'accès dépendant de la longueur d'onde.

Nous avons pu observer qu'un couplage critique doit être favorisé à la longueur d'onde du laser de pompe pour optimiser la PEF, facteur qui détermine l'efficacité du confinement de la puissance du laser pompe dans la cavité. De la même manière nous pouvons conclure que dans tout le reste de la bande spectrale de travail il est plus important de favoriser un bon facteur Q sur un couplage critique. En effet, la lumière générée par effets non-linéaires lors de la formation de peignes Kerr se génère directement à l'intérieur de la cavité et c'est le facteur Q qui détermine le nombre d'oscillations que cette lumière pourra faire avant d'être atténuée.

En perspective, nous devons encore étudier l'impact de la dispersion induite par le coupleur d'accès sur la génération de peignes de fréquences optiques. Le fait que toute composante spectrale traversant le coupleur voit un chemin optique différent a pour conséquence une modification de la structure modale du résonateur qui peut affecter la génération d'un peigne Kerr de la même manière que la dispersion d'ordre 2.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Balac, A. Fernandez, F. Mahé, F. Méhats, et R. Texier-Picard, « The Interaction Picture method for solving the generalized nonlinear Schrödinger equation in optics », *ESAIM Math. Model. Numer. Anal.*, vol. 50, n° 4, p. 945-964, juill. 2016.
- [2] C. Arlotti, O. Gauthier-Lafaye, A. Monmayrant, et S. Calvez, « Achromatic critically coupled racetrack resonators », *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 34, n° 11, p. 2343, nov. 2017.
- [3] A. Yariv, « Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides », *Electron. Lett.*, vol. 36, n° 4, p. 321-322, 2000.

FILTRE ACOUSTO-OPTIQUE RECONFIGURABLE : MODIFICATION DES PERFORMANCES PAR CONTRÔLE DE LA COMMANDE RF

André Pérennou, Véronique Quintard, Ali Saab

*École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) UMR CNRS 6285, Lab-STICC, C.S. 73862,
29238 Brest, Cedex 3, France*

perennou@enib.fr

RÉSUMÉ

Le travail proposé concerne l'étude de l'évolution du gabarit d'un filtre acousto-optique reconfigurable en longueur d'onde en fonction de la nature de la commande électrique de ce dernier. Le contrôle dynamique de la forme du gabarit permet de répondre aux contraintes (diaphonie, égalisation des puissances optiques, ...) de dispositifs spécifiques.

MOTS-CLEFS : *filtrage optique; interaction acousto-optique quasi-colinéaire; commande RF.*

1. INTRODUCTION

Le filtrage en longueurs d'ondes est une fonction incontournable pour le développement des réseaux optiques de communications supportant des débits de plus en plus élevés. Les filtres doivent être sélectifs mais aussi rapidement reconfigurables de sorte à assurer la flexibilité des réseaux optiques. Ces réseaux peuvent être de différentes natures comme par exemple les réseaux WDM ou encore les réseaux d'interconnexion entre serveurs dans les "Data Center". Les contraintes, liées au type de réseau, peuvent être mises sur la rapidité, sur la bande passante ou sur la diaphonie. Le besoin en filtres optiques reconfigurables se fait aussi ressentir dans d'autres d'applications comme la métrologie ou les capteurs optiques. Ainsi la fonction de filtrage est très importante et est un point clé à la fois pour les dispositifs et les systèmes optiques. C'est dans ce contexte de développement et d'optimisation des performances de filtres reconfigurables en longueur d'onde que se situe ce travail.

Le travail présenté ici se focalise sur les filtres basés sur l'interaction acousto-optique qui consiste à faire interagir un faisceau optique avec un réseau acoustique généré dans un cristal par un signal RF. Le pas du réseau acoustique dépend de la fréquence de ce signal RF. Il est donc possible électriquement de contrôler les caractéristiques du faisceau optique. De plus, l'interaction acousto-optique offre une rapidité de commutation, une absence de mouvement mécanique, un contrôle de la puissance optique au travers de la puissance du signal électrique de commande, ainsi que des faibles pertes optiques. Notre étude est menée sur une configuration d'interaction quasi-colinéaire entre l'onde optique et l'onde acoustique.

Pour un filtre acousto-optique la forme du gabarit en longueur d'onde est fixée de par la nature, la géométrie et la coupe cristalline du cristal utilisé. Une fois le filtre technologiquement réalisé, sa sélectivité en particulier est figée. Cependant il peut être très intéressant d'imaginer pouvoir agir de manière dynamique sur la forme de ce gabarit, au travers d'une commande spécifique. Par conséquent le travail proposé consiste à montrer comment contrôler la forme de la réponse en longueur d'onde d'un filtre acousto-optique reconfigurable de sorte à s'adapter à

différentes demandes et contraintes. Il s'agit de créer et de tester des signaux RF de formes «complexes» permettant de générer le réseau acoustique adéquat.

2. FILTRAGE ACOUSTO-OPTIQUE

Notre étude expérimentale est basée sur l'utilisation d'un filtre acousto-optique reconfigurable (AOTF) utilisant une interaction quasi-colinéaire dans un cristal en TeO_2 . Il s'agit d'une interaction où le faisceau optique et le faisceau acoustique sont superposés dans la zone d'interaction. A une fréquence du signal RF correspond une longueur d'onde optique pour une polarisation de l'onde particulière (ordinaire ou extraordinaire). Ce filtre permet d'obtenir une efficacité de diffraction supérieure à 75% (pour une puissance du signal RF de 125mW), une sélectivité de l'ordre de 1,5nm et un niveau des lobes secondaires inférieur à -10dB par rapport au lobe principal [1, 2].

Nous avons développé un modèle de simulation de la structure basé sur l'analyse spectrale du signal acoustique. Notre approche pour développer ce modèle est basée sur le fait que l'intensité du faisceau diffracté est fonction de la répartition de l'amplitude du champ acoustique dans la zone d'interaction et donc de la distribution fréquentielle de ce dernier. La distribution fréquentielle de l'onde acoustique dépend fortement de la longueur d'interaction L , à laquelle correspond un temps de parcours T dans la zone d'interaction (ce temps est égal à environ $25\mu\text{s}$ pour notre filtre). Ainsi dans le modèle, nous prenons en compte l'élargissement fréquentiel lié à cette dimension finie L de la zone d'interaction acousto-optique. L'intensité du faisceau diffracté pour une longueur d'onde λ est alors directement liée à la densité spectrale de puissance pour la fréquence f . Ce modèle a été validé par des mesures expérimentales, comme présenté sur la figure 1.

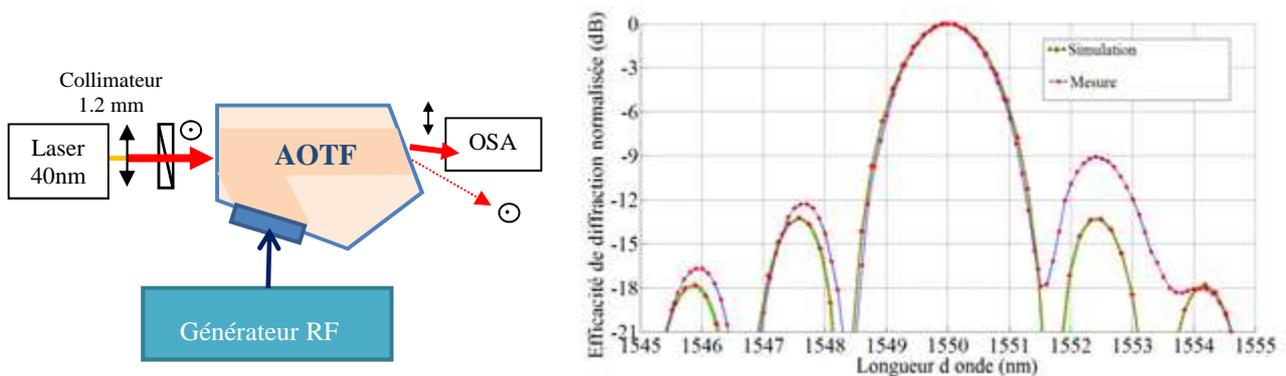


Fig. 1 : Schéma du filtre AOTF en interaction quasi-colinéaire et efficacités de diffraction normalisée en fonction de la longueur d'onde, mesurée (utilisation d'une source laser large bande et d'un analyseur de spectre optique) et simulée, obtenue pour une excitation RF sinusoïdale de fréquence 37,108MHz.

Le modèle numérique proposé nous permet de tester des signaux acoustiques, de formes plus ou moins complexes afin d'étudier leur influence sur la forme du gabarit du filtre (sélectivité, raideur des fronts, planéité, ...). Une analyse temporelle de l'évolution du gabarit est réalisée en fonction de l'évolution du signal acoustique dans la zone d'interaction. À chaque instant, un spectre optique est calculé, en supposant les propriétés de l'onde acoustique quasi stationnaire dans le cristal pendant la phase d'interaction acousto-optique.

Afin de montrer le principe, nous présentons sur la figure 2 l'efficacité de diffraction du filtre AOTF obtenue pour deux signaux RF simples de fréquence $f=37,108\text{MHz}$ modulé par un signal

carré de période $100\mu\text{s}$ et de rapport cyclique $1/5$ pour le premier et de rapport cyclique $1/10$ pour le second. Sur ces graphiques 3D, on observe le gabarit du filtre en fonction de la longueur d'onde ainsi que son évolution temporelle.

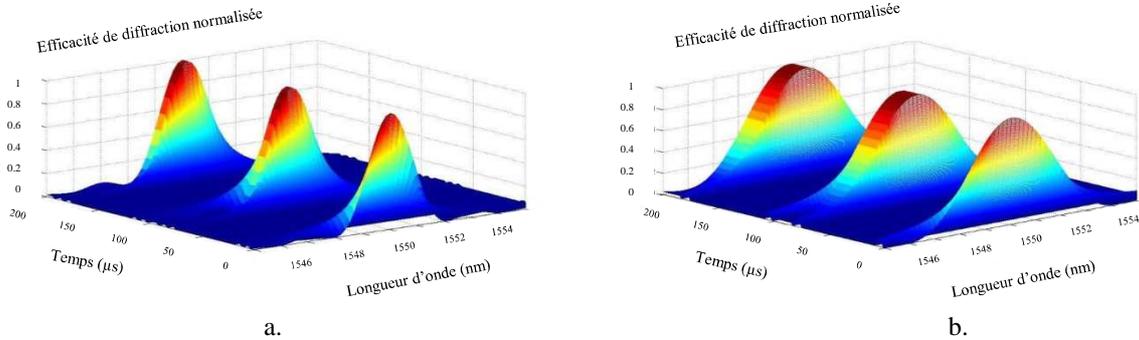


Fig. 2 : Simulation 3D de l'efficacité de diffraction normalisée en fonction de la longueur d'onde et du temps pour un signal RF de période $100\mu\text{s}$ et de rapport cyclique $1/5$ (cas a) et $1/10$ (cas b).

Si on diminue le rapport cyclique du signal carré, on note naturellement que la valeur de la sélectivité du filtre est augmentée (cas b). On constate également que le gabarit du filtre évolue dans le temps compte tenu de la nature du signal RF. L'intérêt de cette étude est de complexifier la forme du signal RF dans le but d'optimiser la forme de la fonction de transfert du filtre (modification de la sélectivité, création d'un peigne optique, apodisation, ...). Ce type de filtre aurait par conséquent un intérêt pour des applications utilisant des sources lasers impulsionnelles, en synchronisant parfaitement impulsions optiques et signaux RF.

CONCLUSION

Cette étude est à son début, mais les premiers résultats sont encourageants. Nous travaillons actuellement à la mise en œuvre expérimentale de cette étude. Jusqu'à présent, la détermination expérimentale du gabarit du filtre est une étape un peu fastidieuse. En effet lorsqu'on applique sur le transducteur piézoélectrique de l'AOTF un signal autre qu'un signal continu sinusoïdal, l'efficacité de diffraction évolue au cours du temps et par conséquent une mesure avec un analyseur de spectre optique n'est plus possible du fait d'un temps d'intégration important. Il est donc nécessaire de reconstituer la réponse du filtre point à point pour chaque longueur d'onde en utilisant une source laser accordable et une photodiode. Nous travaillons actuellement à la mise en place d'un nouveau banc expérimental permettant d'obtenir le gabarit du filtre beaucoup plus rapidement en utilisant conjointement un analyseur de spectre optique et une source laser large bande impulsionnelle (impulsion de l'ordre de la microseconde).

RÉFÉRENCES

- [1] H. Issa, V. Quintard, A. Pérennou, A. Sakkour, Optical Engineering 53(7), 075103, July 2014
- [2] V. Molchanov, V. Voloshinov, O. Makarov, Quantum Electronics 39(4) Vol.24, pp.353-360, 2009.

GÉNÉRATION D'IMPULSIONS ÉNERGÉTIQUES DANS UN LASER À FIBRE VERROUILLÉ EN PHASE

Meriem Kemel¹, Fatma Ben Braham¹, Andrey Komarov², Georges Semaan¹, Mohamed Salhi¹,
And François Sanchez¹

¹ *Laboratoire de Photonique d'Angers, E.A 4464, Université d'Angers, 2Bd Lavoisier, 49045, Angers cedex 01, France*

² *Institute of Automation and Electrometry, Russian Academy of Sciences, Acad. Koptuyug, Pr. 1, 630090 Novosibirsk, Russia*

meriem.kemel@univ-angers.fr

RÉSUMÉ

Dans cette communication, nous présentons la génération d'impulsions géantes et énergétiques dans un oscillateur fibré. Dans une nouvelle configuration de cavité, nous obtenons des impulsions qui ne subissent pas la quantification de l'énergie, avec des durées allant de 3 à 5 μ s et des énergies entre 0.5 et 5 μ J.

MOTS-CLEFS : *laser à fibre; impulsions géantes; impulsions énergétiques; verrouillage de mode*

1. INTRODUCTION

Les lasers à fibre verrouillés en phase sont des sources prometteuses dans plusieurs domaines comme la spectroscopie, le biomédical, la métrologie, etc. Le verrouillage de mode dans les lasers à fibre permet d'obtenir plusieurs types d'impulsions comme les similaritons [1] et les solitons dissipatifs [2] qui s'organisent dans différentes distributions (harmonique, états liés, etc.).

A cause de la quantification de l'énergie dans les configurations lasers à dispersion anormale, la montée en énergie est difficile. Lorsque la puissance de pompe augmente, les impulsions subissent un wave-breaking ce qui conduit à la génération de multiples impulsions. Pour contourner ce problème, de nouvelles techniques qui portent sur l'optimisation de la longueur de la cavité ont été mises en place [3], conduisant à la génération d'impulsions type Dissipative Soliton Resonance [4, 5] ou noise-like [6].

Dans une récente publication [7], Komarov et al. proposent une nouvelle configuration de cavité pour la génération d'impulsions énergétiques et géantes en induisant un retard optique dans la cavité fibrée.

Dans ce papier nous mettons en oeuvre expérimentalement les résultats théoriques [7], et nous présentons la possibilité de générer des impulsions géantes et énergétiques qui ne souffrent pas du wave-breaking.

2. SCHÉMA & RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le dispositif expérimental comprend une cavité unidirectionnelle où la rotation non-linéaire de la polarisation permet de réaliser le verrouillage de modes. La cavité contient un amplificateur délivrant jusqu'à 1.2 W de puissance de sortie, deux contrôleurs de polarisation, un polariseur pour contrôler les pertes non-linéaires de la cavité et donc le régime de fonctionnement du laser et finalement, un isolateur pour assurer l'unidirectionnalité du laser. Un coupleur de sortie 30 % permet l'extraction d'une partie de la puissance de la cavité pour les mesures. Une boucle additionnelle longue (que nous ne présentons pas dans ce papier) est ajoutée pour se placer dans les conditions proposées dans [7].

Après avoir stabilisé la cavité, et optimisé le signal en réglant les contrôleurs de polarisation, on obtient des impulsions qui s'élargissent à mesure d'augmenter la puissance de pompe.

La Fig. 1a montre la trace temporelle des impulsions. Pour une position fixe et optimisée des contrôleurs de polarisation il y a génération d'impulsions géantes stables dont la durée est de $5 \mu s$. Le spectre radio-fréquence de ces impulsions est représentée sur la Fig. 1b, avec un taux de répétition d'environ $81 kHz$ et un rapport signal sur bruit de $40 dBm$. Le taux de répétition est égal à l'intervalle spectral libre (ISL) de la cavité. Il y a donc une impulsion par tour de cavité.

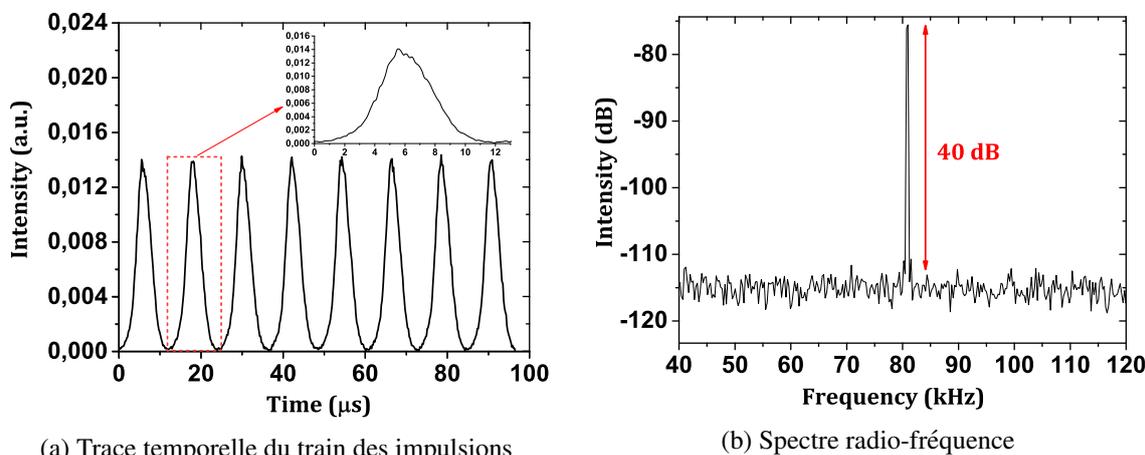


FIGURE 1: Représentation graphique des impulsions géantes

Afin d'étudier l'influence de la puissance de pompe sur les différentes caractéristiques des impulsions, d'autres mesures ont été effectuées. Les résultats sont représentés sur la Fig. 2.

La Fig. 2a montre l'évolution de la durée de l'impulsion et du taux de répétition en fonction de la puissance de pompe. On constate ainsi que le taux de répétition reste constant et stable pendant que la durée de l'impulsion diminue lorsque la puissance de pompage augmente de $1.6 W$ à $5.2 W$.

Pour aller plus loin dans la caractérisation de ces impulsions, des calculs de l'énergie et de la puissance crête des impulsions ont été faits.

La Fig. 2b montre qu'en faisant varier la puissance de pompe de $1.6 W$ à $5 W$, l'énergie des impulsions augmente proportionnellement de 1.4 à $4.45 \mu J$. Cela induit une évolution analogue de la puissance crête de 0.27 à $1.4 W$ puisque la durée de l'impulsion diminue en fonction de la puissance de pompe.

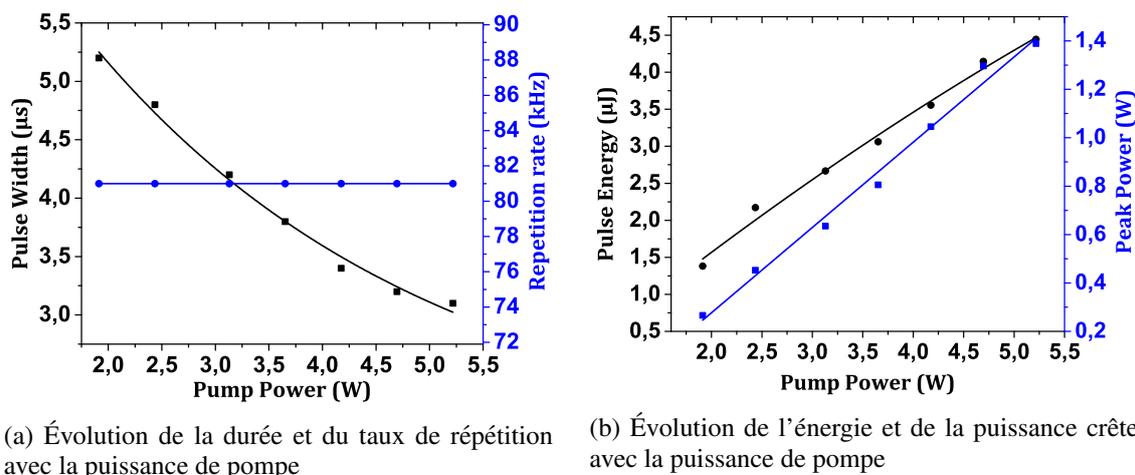


FIGURE 2: Influence de la puissance de pompe sur les caractéristiques des impulsions

Les résultats expérimentaux obtenus sont en bon accord avec les résultats théoriques [7].

CONCLUSION

En conclusion, nous avons démontré expérimentalement la possibilité d'obtenir des impulsions géantes et énergétiques dans un laser à fibre. Dans notre expérience, on a optimisé la cavité en modifiant la longueur de la fibre et les pertes intra-cavités. Ces résultats présentent une avancée dans le domaine des lasers à forte énergie basés sur un simple oscillateur fibré.

RÉFÉRENCES

- [1] F. O. Ilday, J. R. Buckley, F. W. Wise, and W. G. Clark, "Self similar Evolution of Parabolic Pulses in a laser," *Phys.Rev.Lett.* 92, 213902, (2004).
- [2] P. Grelu, and N. Akhmediev, "Dissipative solitons for mode-locked lasers," *Nat.Photonics* 6, 84-92, (2012).
- [3] X. Li et al., "Long cavity passively mode-locked fiber ring laser with high-energy rectangular-shape pulses in anomalous dispersion regime," *Opt. Lett.* 35, 3249, (2010).
- [4] G. Semaan, F. B. Braham, M. Salhi, Y. Meng, F. Bahloul, and F. Sanchez, "Generation of high energy square-wave pulses in all anomalous dispersion Er :Yb passive mode-locked fiber ring laser," *Opt.Express.* 24, 8399, (2016).
- [5] G. Semaan, F. B. Braham, J. Fourmont, M. Salhi, F. Bahloul, and F. Sanchez, "10 μ J dissipative soliton resonance square pulse in a dual amplifier figure-of-eight double-clad Er :Yb mode-locked fiber ring laser," *Opt.Lett.* 41, 4767 (2016).
- [6] Y.-Q. Huang, Y.-L. Qi, Z.-C. Luo, A.-P. Luo, and W.-C. Xu, "Versatile patterns of multiple rectangular noise-like pulses in a fiber laser," *Opt.Express.* 24, 7356, (2016).
- [7] A. K. Komarov, A. K. Dmitriev, K. P. Komarov, and F. Sanchez, "Passive mode-locking of a fiber laser operating in the regime of undumped regular spiking," *Opt.Spectrosc.* 121, 925, (2016).

GUIDES D'ONDES MAGNETIQUES BIGYROTROPIQUES COUPLES

Yann G. Boucher¹, Florian F. L. Bentivegna², Yuliya S. Dadoenkova³

¹*Institut FOTON, UMR CNRS 6082, 22305 Lannion Cedex, France*

²*Lab-STICC, UMR CNRS 6285, ENIB, 29238 Brest Cedex 3, France*

³*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk 432017, Russia*

boucher@enib.fr

RÉSUMÉ

Nous étudions les supermodes pair et impair d'un système de deux guides d'ondes magnétiques couplés dont les aimantations peuvent être séparément renversées. Nous montrons qu'un renversement d'aimantation dans l'un des guides modifie le couplage entre les guides et les conditions d'obtention d'un transfert total d'énergie d'un guide vers l'autre.

MOTS-CLEFS : *Guides d'ondes, modes couplés, coupleur directionnel, matrices de transfert*

1. INTRODUCTION

Nombreuses sont les applications pratiques des guides d'ondes magnéto-optiques (MO), notamment pour la réalisation de dispositifs optiques intégrés (isolateurs, interrupteurs, coupleurs, etc.) [1]. Nous étudions ici les supermodes d'un coupleur directionnel intégré constitué de deux guides planaires MO identiques, monomodes, anisotropes, séparés et entourés par un milieu isotrope diélectrique. Dans un coupleur de même géométrie, mais dont les guides d'ondes sont isotropes, les supermodes de la structure sont des combinaisons linéaires paire et impaire des modes de chacun des guides monomodes qui le constituent [2–4]. Le coupleur MO étudié ici bénéficie d'un degré de liberté supplémentaire *via* le contrôle séparé de la direction de l'aimantation de chacun des guides. L'étude est menée pour des guides dont l'aimantation à saturation est perpendiculaire au plan d'incidence des ondes guidées (configuration MO transverse), auquel cas les états de polarisation TE et TM sont des états propres [5]. Les propriétés modales du coupleur sont décrites pour les configurations « parallèle » (même direction d'aimantation pour les deux guides) et « anti-parallèle » (directions d'aimantations opposées). Nous montrons qu'un retournement d'aimantation dans l'un des guides permet de modifier et de contrôler les supermodes et, *in fine*, l'efficacité du couplage d'ondes d'un guide vers l'autre.

2. STRUCTURE ETUDIEE ET TECHNIQUE DE MODELISATION

Deux guides planaires MO parallèles d'épaisseur égale h sont séparés par une épaisseur d d'un milieu diélectrique et isotrope (Fig. 1). Le milieu magnétique (noté (2) sur la figure) est bigyrotropique, c'est-à-dire anisotrope dont les tenseurs de permittivité et de perméabilité dépendent de l'amplitude et, pour leurs termes non-diagonaux, de l'orientation de l'aimantation qui y règne. Les guides sont aimantés à saturation dans la direction de l'axe (Oy) d'un référentiel cartésien. La propagation des ondes dans les guides est parallèle au plan (xOz) du référentiel. L'épaisseur d de milieu diélectrique (noté (1) sur la figure) qui les sépare est supposée excéder la distance typique (de l'ordre de 10 nm [6]) en deçà de laquelle le couplage d'échange magnétique rendrait impossible le renversement de l'aimantation d'un des guides sans affecter celle de l'autre (sur la figure, le coupleur est ainsi en configuration anti-parallèle). En revanche, d est supposée assez faible pour assurer le couplage des ondes entre les guides.

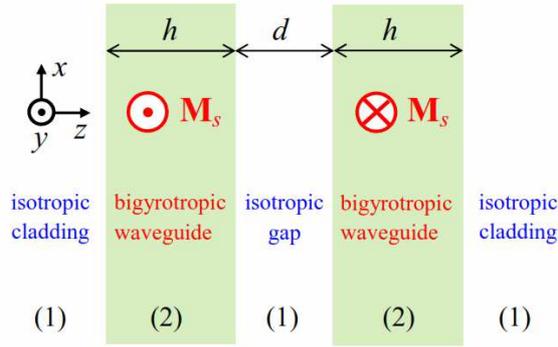


Fig. 1 : Système de deux guides plans bigyrotropiques couplés, ici en configuration magnétique “anti-parallèle”. L’épaisseur commune aux couches guidantes (2) est h , celle de la couche diélectrique isotrope (1) qui les sépare est d .

Après avoir déterminé l’expression spécifique des coefficients de réflexion aux interfaces du système, nous obtenons la condition modale de guidage d’un guide monomode isolé, et la dispersion modale associée, dans les deux cas TE et TM de polarisation. Sur la base du formalisme des matrices de transfert [2], nous calculons ensuite les indices effectifs des supermodes pair et impair du système de deux guides couplés dans chacune des configurations parallèle et anti-parallèle d’aimantation. Le profil transversal des champs des supermodes est obtenu, ainsi que leurs facteurs de confinement. Nous déterminons enfin la constante de couplage du système et sa dépendance spectrale, et discutons de l’efficacité du couplage en fonction de l’intervalle entre les guides, et la manière dont un renversement d’aimantation dans l’un des guides la modifie.

3. RESULTATS

Les calculs sont menés pour le Bi :YIG (grenat d’yttrium et de fer dopé par des ions bismuth) comme milieu magnétique bigyrotropique (2) et le GGG (grenat de gadolinium et de gallium) comme milieu non-magnétique isotrope (1).

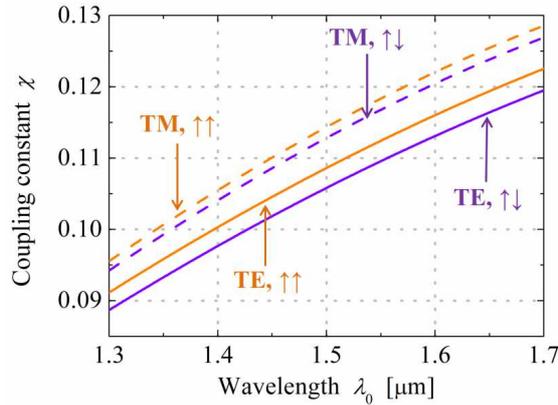


Fig. 2 : Dispersion chromatique de la constante de couplage du système de deux guides autour de $\lambda_{ref} = 1,5 \mu\text{m}$ pour les configurations parallèle (en orange) et anti-parallèle (en violet) et dans les états de polarisation TE (traits pleins) et TM (pointillés).

La réponse modale du coupleur et sa constante de couplage sont étudiées autour de la longueur d’onde de référence $\lambda_{ref} = 1,5 \mu\text{m}$ (dans le vide), pour laquelle ces deux milieux présentent une bonne transparence.

La figure 2 montre que la transition, par renversement d'aimantation dans l'un des guides, de la configuration parallèle ($\uparrow\uparrow$) vers la configuration anti-parallèle ($\uparrow\downarrow$), induit, dans les deux états de polarisation, une variation non-négligeable de la constante de couplage qui traduit la levée de dégénérescence entre les supermodes lent (pair) et rapide (impair) du coupleur.

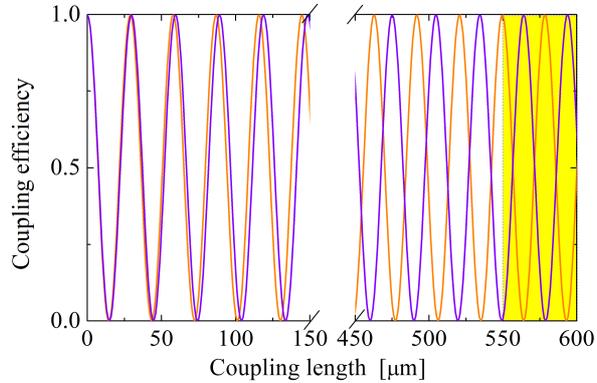


Fig. 3 : Efficacité du couplage en fonction de la longueur d'interaction entre les deux guides, en polarisation TE et dans les configurations parallèle (en orange) et anti-parallèle (en violet), pour $\lambda_0 = 1,5 \mu\text{m}$ et $d = h/4$. La région en jaune correspond aux valeurs de longueur d'interaction pour lesquelles un renversement d'aimantation dans l'un des guides permet de passer d'un couplage nul à un couplage intégral.

Dans un coupleur directionnel symétrique, l'échange d'énergie d'un guide vers l'autre est spatialement périodique. Dans le cas du coupleur magnétique étudié ici, la différence de constante de couplage entre les configurations parallèle et anti-parallèle permet d'envisager, sur une longueur d'interaction réaliste (de l'ordre de $500 \mu\text{m}$), un échange total dans l'une des configurations, mais nul dans l'autre (Fig. 3). Ainsi, *via* un contrôle externe de l'aimantation des guides, on peut projeter de concevoir des dispositifs optiques intégrés commutables. On notera par ailleurs qu'une telle versatilité pourrait être renforcée en insérant ce coupleur dans une cavité résonnante (comme dans [7]), pour laquelle la longueur d'interaction « effective » serait démultipliée par les allers-retours successifs des ondes guidées.

Cette recherche est en partie financée par des bourses de la Ministère de l'éducation et des sciences de la Fédération de Russie (projets n° 3.7614.2017/9.10, n° 14.Z50.31.0015) et de l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (projet n° HF-CCCP).

RÉFÉRENCES

- [1] H. Dötsch, N. Bahlmann, O. Zhuromskyy, M. Hammer, L. Wilkens, R. Gerhardt, P. Hertel, and A.F. Popkov, "Applications of magneto-optical waveguides in integrated optics: review," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 22, pp. 240–253, 2005.
- [2] A. Yariv and P. Yeh. *Optical Waves in Crystals*. Wiley, 1984.
- [3] T. Tamir, Ed. *Guided-Wave Optoelectronics*. Springer, 1990.
- [4] C.-L. Chen. *Foundations for Guided-Wave Optics*. Wiley, 2007.
- [5] Š. Višňovský. *Optics in Magnetic Multilayers and Nanostructures*. CRC Press, 2006.
- [6] G.S. Abo, Y.-K. Hong, J. Park, J. Lee, W. Lee, and B.-C. Choi, "Definition of magnetic exchange length," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, pp. 4937-4939, 2003.
- [7] Y.G. Boucher and P. Féron, "Mode coupling and scattering parameters in a parity-time symmetric resonant integrated coupler," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. 54, 6300206, 2018.

GUIDES D'ONDE OP-GAAS POUR LA CONVERSION DE FRÉQUENCE VERS L'INFRAROUGE LOINTAIN

Myriam Bailly¹, Arnaud Grisard¹, Eric Lallier¹, Claire Theveneau², Bruno Gérard²

¹ Thales Research & Technology, 1 av. Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex, France

² III-V Lab, 1 av. Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex, France

myriam.bailly@thalesgroup.com

RÉSUMÉ

Nous présentons une structure de guide en arséniure de gallium à orientation périodique (OP-GaAs) pour la conversion de fréquence vers le lointain infrarouge (LWIR). Ces guides, plus épais que l'état de l'art, nécessitent de lever certains verrous technologiques en ce qui concerne leur fabrication, que nous évoquons dans un second temps.

MOTS-CLEFS : OP-GaAs ; guides d'onde ; conversion de fréquence ; LWIR

1. INTRODUCTION

Les guides d'ondes en OP-GaAs sont de bons candidats pour la génération paramétrique, notamment en termes d'efficacité de conversion et de gamme spectrale. Si des guides d'ondes enterrés à faibles pertes ont déjà été démontrés [1], ils ne permettent pas de guider efficacement les longueurs d'onde supérieures à 8 μm . Nous avons adapté ces structures à la conversion de fréquence vers le lointain infrarouge en faisant le choix d'étudier des structures ruban non enterrées dans un premier temps.

2. MODÉLISATIONS

La courbe figure 1(b) a été tracée d'après les travaux de Pogossian [2] et estime pour une composition fixée de la gaine inférieure ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 1,5 μm sur la figure 1(a)) la hauteur minimale du cœur en GaAs pour guider en fonction de la longueur d'onde.

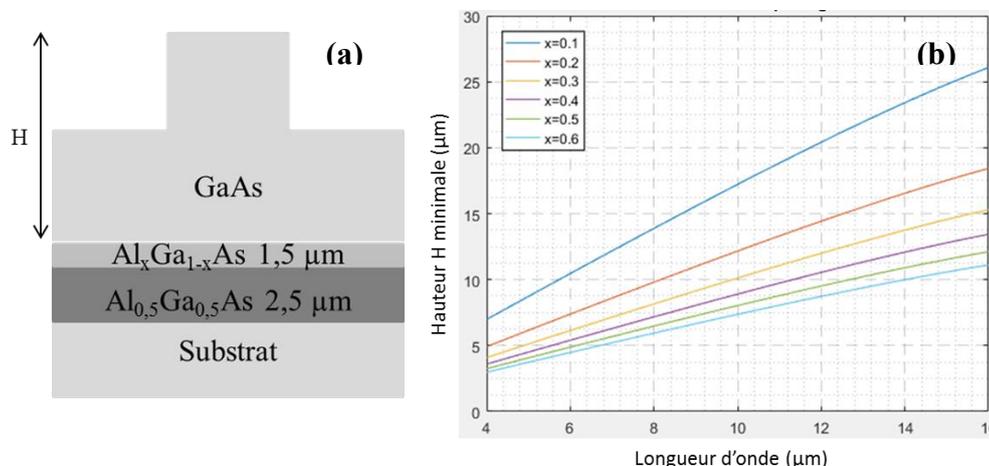


Fig. 1 : Schéma du guide (a) et hauteur minimale du guide d'onde avant gravure pour différentes fractions d'aluminium dans la gaine inférieure pour des longueurs d'onde de 4 à 16 μm (b).

D'un point de vue technique, il est contraignant de faire croître des épaisseurs importantes de GaAs. Nous nous limitons ainsi à une hauteur totale de 18 μm ($H=14$ μm). Par ailleurs, si une fraction

d'aluminium élevée permet un meilleur confinement du mode (en augmentant le Δn entre le cœur et la gaine inférieure), elle influence aussi le caractère monomode du guidage. Après optimisation, nous choisissons $x=0.3$ et une profondeur de gravure de ruban égale à $7\ \mu\text{m}$, ce qui permet théoriquement de guider jusqu'à $14\ \mu\text{m}$ pour des largeurs de ruban autour de $10\ \mu\text{m}$.

Afin de prévoir le potentiel de génération dans l'infrarouge de ces guides, nous avons simulé des courbes de quasi-accord de phase (QAP). Celles de la figure 2 sont tracées pour des longueurs d'onde de pompe autour de $3\ \mu\text{m}$ ($2.8, 3$ et $3.2\ \mu\text{m}$ de gauche à droite) et une largeur de ruban de $9\ \mu\text{m}$. Elles montrent le potentiel de nos guides pour la génération de spectres larges dans l'infrarouge.

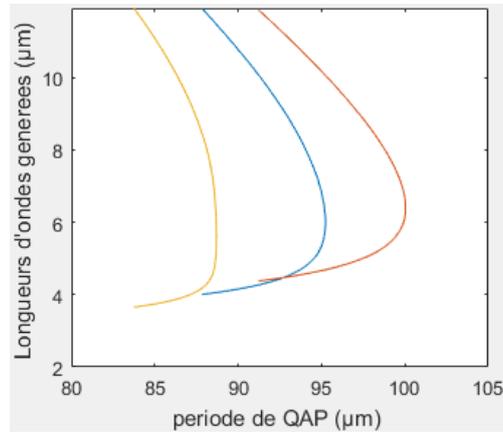


Fig. 2 : Courbes de QAP pour nos guides ruban à différentes longueurs d'onde de pompe.

3. PROCÉDÉS DE FABRICATION

La figure 3 illustre les principales étapes de fabrication de nos guides : la réalisation du substrat-germe par adhésion moléculaire, la reprise d'épitaxie sur ce même substrat pour l'obtention des couches en GaAs à orientation alternée puis la gravure pour la formation des rubans.

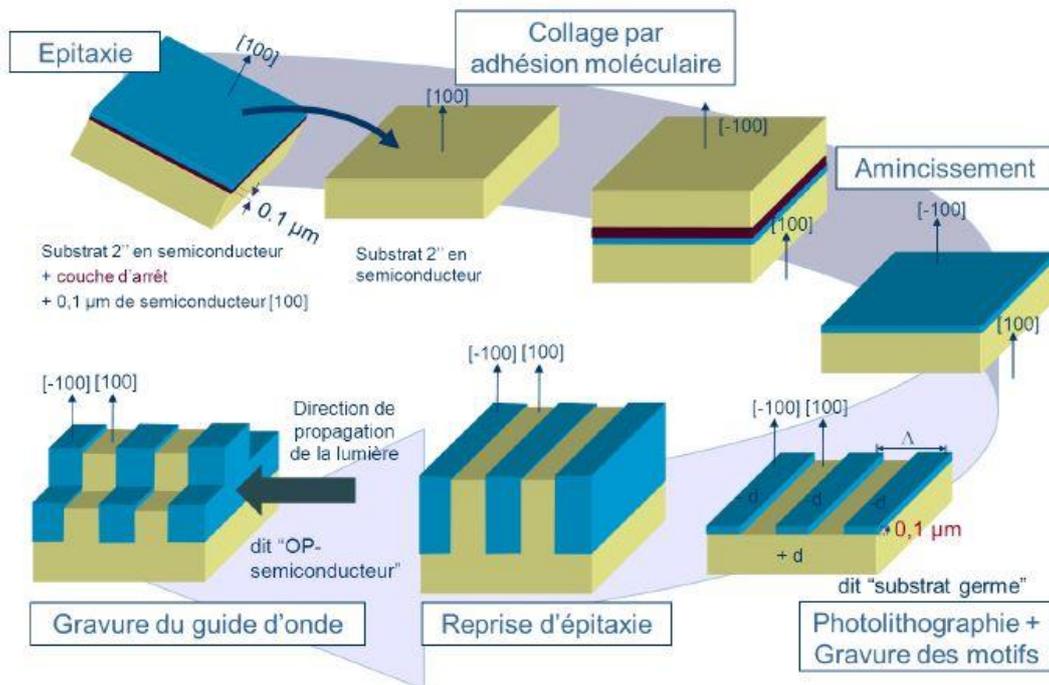


Fig. 3 : Processus de fabrication des guides d'onde OP-GaAs

Les couches guidantes de nos échantillons sont réalisées en épitaxie par jet moléculaire (EJM) et la technologie utilisée pour graver les rubans de 7 μm d'épaisseur est la gravure sèche de type ICP – RIE.

Comme mentionné un peu plus haut, la réalisation est délicate du fait de l'épaisseur de nos guides. La figure 4(a) donne un exemple peu satisfaisant de gravure : les flancs du ruban et le fond de gravure montrent des rugosités, ce qui peut être source de pertes supplémentaires à la propagation. En 4(b) on a une gravure de bonne qualité sur un échantillon test (flancs lisses, fond de gravure propre).

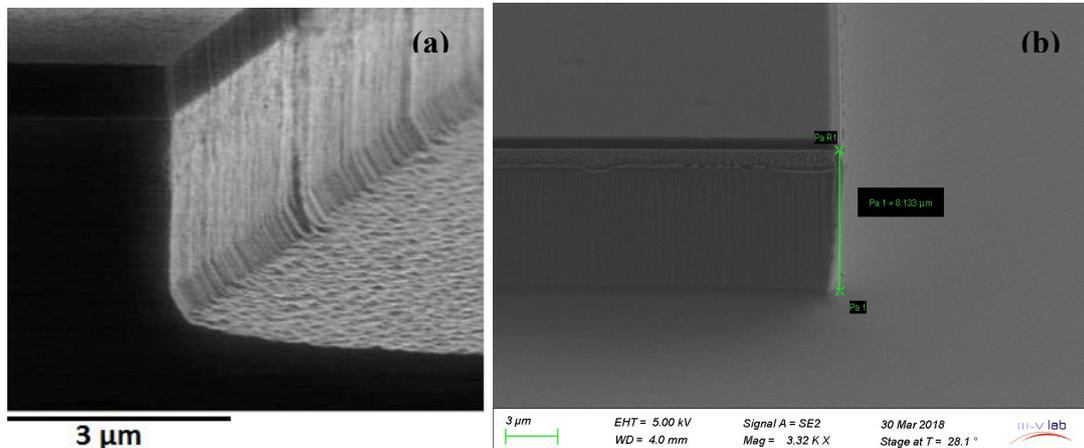


Fig. 4 : Image MEB de gravures de ruban en GaAs (a) avec défauts, (b) optimisée

CONCLUSION

Les modélisations effectuées nous ont permis de choisir une structure de guide qui permettrait d'accéder aux LWIR. Les structures de type ruban enterré seront également étudiées. La fabrication des guides rubans est en cours et les caractérisations sont prévues prochainement.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Roux *et al.*, "Low-loss orientation-patterned GaAs buried waveguides for frequency conversion in the mid-infrared", EUROPHOTON, Paper FWG-4.7, 2016, Vienne, Autriche.
- [2] S. P. Pogossian, L. Vescan, A. Vonsovici, "The Single-Mode Condition for Semiconductor Rib Waveguides with Large Cross Section", J. Lightwave Technol., vol. 16, pp.1851-1853, 1998.

GUIDES D'ONDE POUR LE PROCHE ET LE MOYEN INFRAROUGE RÉALISÉS PAR PHOTO-INSCRIPTION DANS UN VERRE CHALCOGÉNURE

David Le Coq¹, Eugène Bychkov², Pascal Masselin^{1,2}

¹ Université de Rennes, CNRS, ISCR (Institut des Sciences Chimiques de Rennes) - UMR6226, F-35000 Rennes, France

² Université du Littoral-Côte d'Opale, Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère, 189A Avenue Maurice Schumann, F-59140 Dunkerque, France

masselin@univ-littoral.fr

RÉSUMÉ

Une nouvelle procédure pour la réalisation de guides d'ondes par photo-inscription par laser femtoseconde dans un verre chalcogénure est présentée. Les pertes de propagation mesurées ont des valeurs inférieures à 0,2 dB/cm à la fois pour des guides fonctionnant dans le proche ($\lambda = 1,55 \mu\text{m}$) et le moyen infrarouge ($\lambda = 4,5 \mu\text{m}$).

MOTS-CLEFS : Guides d'onde ; moyen infrarouge ; photo-inscription par laser ; verre chalcogénure

1. INTRODUCTION

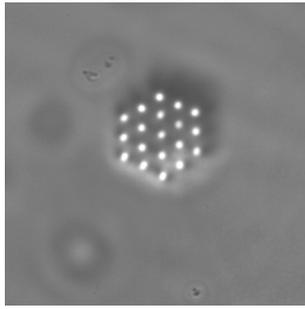
Au cours des vingt dernières années, de nombreux travaux ont été consacrés au développement de la technique de photo-inscription par laser pour la fabrication de dispositifs optiques passifs et actifs dans divers matériaux [1]. Si on s'intéresse au transport de la lumière dans la gamme spectrale infrarouge, les verres de chalcogénure sont l'un des matériaux les plus évidents à utiliser pour la production de composants intégrés en raison de leur large gamme de transparence allant du visible à plus de 20 μm . Nous présentons ici une nouvelle méthode de production de guide d'ondes dans un verre à base de germanium, de gallium et de soufre (90 [0.80 GeS₂ – 0.20 Ga₂S₃] – 10 CsCl) par inscription laser et montrons que les pertes de propagation sont inférieures à 0,2 dB/cm à la fois dans le proche ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) [2] et le moyen infrarouge ($\lambda = 4.5 \mu\text{m}$). De plus nous démontrons également la stabilité sur plusieurs années de ces performances.

2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE D'INSCRIPTION

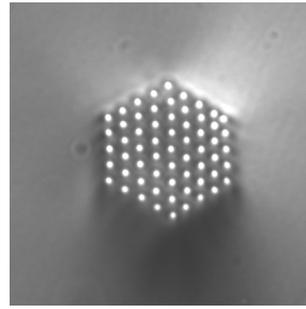
Les guides réalisés sont de type multi-cœurs : ils consistent en des alignement de canaux de variation d'indice de réfraction Δn positive placés parallèlement les uns aux autres sur un maillage hexagonal. Si ces canaux sont suffisamment proches, il va exister un couplage évanescent entre les ondes se propageant dans les canaux et le mode formé recouvre l'ensemble de la structure.

La procédure d'inscription est la suivante. Tout d'abord le canal ① est placé devant le point de focalisation du laser et une rafale d'impulsions de durée contrôlée est envoyée sur l'échantillon avec un taux de répétition de 200 kHz. Cette exposition statique résulte en la création d'un voxel cylindrique de Δn qui allonge de canal ①. Ensuite, l'échantillon est déplacé de telle manière à placer le canal ② devant le point de focalisation et irradié à nouveau. Cette opération est répétée pour tous les canaux puis l'échantillon est déplacé parallèlement à la direction de propagation du faisceau avant de procéder à la construction d'une nouvelle tranche de la section transverse du guide.

La durée τ de la rafale d'impulsions est un paramètre important de la procédure car il permet de contrôler l'amplitude de Δn [3]. Ainsi notre méthode permet un contrôle de l'ensemble des paramètres du guide puisque le contraste d'indice entre les canaux et la matrice vitreuse est déterminé par τ et les dimensions de la section transverse peuvent être variées soit grossièrement en ajoutant des canaux soit finement en ajustant la distance inter-canaux. En conséquence, il est possible de réaliser par cette méthode des guides pour le proche infrarouge ou d'augmenter le diamètre pour travailler avec des longueurs d'onde plus élevées (cf figure 1).



(a) Guide d'onde pour le proche infrarouge



(b) Guide d'onde pour le moyen infrarouge

FIGURE 1: Sections transverses des guides photo-inscrits.

3. RÉSULTATS

Afin d'évaluer les performances de la méthode, plusieurs guides ont été inscrits avec différents diamètres et différentes amplitudes de Δn et les pertes de propagation ont été évaluées par la méthode du faisceau réfléchi [4].

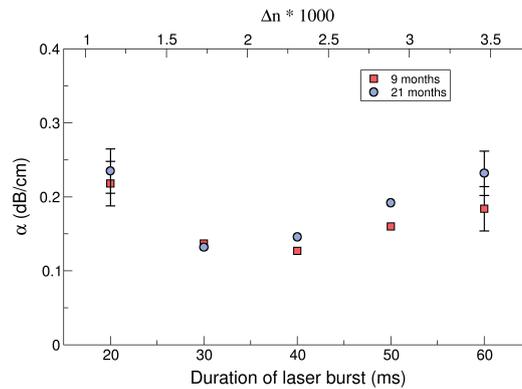


FIGURE 2: Pertes de propagation des guides inscrits pour le proche infrarouge en fonction de la durée de la rafale d'impulsions τ , ou de manière équivalente en fonction de l'amplitude de Δn . Les mesures ont été effectuées 9 mois après l'inscription puis répétées 12 mois plus tard sans montrer d'altération des performances.

La figure 2 montre le résultat des mesures effectuées dans le proche infrarouge ($\lambda = 1,55 \mu\text{m}$) en fonction de l'amplitude de Δn . Comme on peut le voir sur cette figure, les valeurs de perte de propagation sont en dessous de 0,2 dB/cm avec une valeur minimale de 0,11 dB/cm. Des valeurs inférieures à 0,2 dB/cm ont également été obtenues dans le moyen infrarouge ($\lambda = 4,5 \mu\text{m}$). Les mesures présentées sur cette figure ont été effectuées 9 mois après les inscriptions puis répétées 12 mois plus tard, soit 21 mois après les inscriptions. On peut noter qu'aux incertitudes de mesures près, il n'y a pas d'altération des pertes de propagation au cours du temps.

CONCLUSION

En conclusion, une méthode originale de réalisation de guides d'onde de hautes performances par photo-inscription dans un verre chalcogénure est présentée. La procédure mise au point permet l'optimisation des pertes de propagation qui ont ainsi été mesurées en deçà de 0,2 dB/cm à la fois pour le proche et le moyen infrarouge.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé partiellement par l'Agence Nationale de la Recherche (projet COMI, ANR-17-CE24-0002), ainsi que le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, la Région Hauts de France et le Fond Européen de Développement des Régions (FEDER) à travers le Contrat de Projet Etat Région (CPER Photonics for Society P4S).

RÉFÉRENCES

- [1] R. Osellame, G. Cerullo, and R. Ramponi, *Femtosecond Laser Micromachining : Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials*, ser. Topics in Applied Physics. Springer, 2012.
- [2] P. Masselin, E. Bychkov, and D. Le Coq, "Direct laser writing of a low-loss waveguide with independent control over the transverse dimension and the refractive index contrast between the core and the cladding," *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 15, pp. 3507–3510, Aug 2016.
- [3] O. Caulier, D. Le Coq, L. Calvez, E. Bychkov, and P. Masselin, "Free carrier accumulation during direct laser writing in chalcogenide glass by light filamentation," *Opt. Express*, vol. 19, no. 21, pp. 20 088–20 096, Oct 2011.
- [4] R. Ramponi, R. Osellame, and M. Marangoni, "Two straightforward methods for the measurement of optical losses in planar waveguides," *Review of Scientific Instruments*, vol. 73, no. 3, pp. 1117–1120, 2002.

INTERACTION DU NETTOYAGE PAR EFFET KERR ET RAMAN DE FAISCEAUX LASERS DANS UNE FIBRE MICROSTRUCTUREE

Richard Dupiol^{1,2}, Katarzyna Krupa³, Alessandro Tonello¹, Marc Fabert¹, Daniele Modotto³, Stefan Wabnitz^{2,3,4}, Guy Millot², Vincent Couderc¹

¹ Université de Limoges, XLIM UMR CNRS 7252, 87060 Limoges, France

² Université Bourgogne Franche-Comté, ICB UMR CNRS 6303, 21078 Dijon, France

³ Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Brescia, via Branze 38, 25123 Brescia, Italy

⁴ Istituto Nazionale di Ottica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (INO-CNR), via Branze 45, 25123 Brescia, Italy

richard.dupiol@unilim.fr

RÉSUMÉ

Nous étudions expérimentalement la compétition entre le nettoyage d'un faisceau laser par effet Kerr et par effet Raman dans une fibre multimode microstructurée air-silice. Le nettoyage par effet Kerr de la pompe est observé pour une certaine plage de puissances. La génération et le nettoyage du faisceau de la première raie Stokes Raman entraînent à la fois la déplétion et la dégradation de la qualité spatiale du faisceau pompe. L'interaction du mélange modal à quatre ondes et de la diffusion Raman conduit à la génération d'un supercontinuum s'étendant de 500 nm à 1800 nm.

MOTS-CLEFS : *auto-nettoyage de faisceaux laser par effets Kerr et Raman ; conversion de fréquence ; mélange à quatre ondes intermodal ; fibres microstructurées*

1. INTRODUCTION

Le phénomène de nettoyage d'un faisceau par effet Raman (« Raman beam cleanup ») a été observé dans les fibres multimodes à gradient d'indice pour les ondes Stokes Raman décalées en longueur d'onde par rapport à la pompe [1]. Plus spectaculairement, l'effet Kerr s'est avéré responsable d'un effet de nettoyage des faisceaux lasers (« spatial beam self-cleaning ») dans les fibres multimodes à gradient d'indice, sans décalage de longueur d'onde, puisque le faisceau pompe lui-même émerge de la fibre avec un profil spatial quasi-gaussien, proche de celui obtenu à la sortie des fibres monomodes [2]. Dans ce contexte, aucun des deux nettoyages mentionnés ci-dessus n'a été observé dans une fibre microstructurée multimode. De même la génération de supercontinuum dans des fibres microstructurées n'a été observée que dans le cas monomode ou faiblement multimodal [3,4].

Dans ce travail, nous présentons l'observation expérimentale du nettoyage d'un faisceau laser, ainsi que la génération de supercontinuum, dans une fibre microstructurée multimode, spécialement conçue de façon à ce que la structure transverse s'apparente à un gradient d'indice effectif. Nous démontrons, contrairement au cas des fibres à gradient d'indice classiques, que le diamètre du faisceau en sortie de fibre diminue de façon monotone avec l'augmentation de la puissance injectée dans la fibre. Au-delà d'un certain seuil de puissance, le nettoyage du faisceau de la raie Stokes Raman [1] entrave l'auto-nettoyage de la pompe par effet Kerr [2], tout en augmentant l'intensité de la partie infrarouge du spectre.

L'EXPÉRIENCE

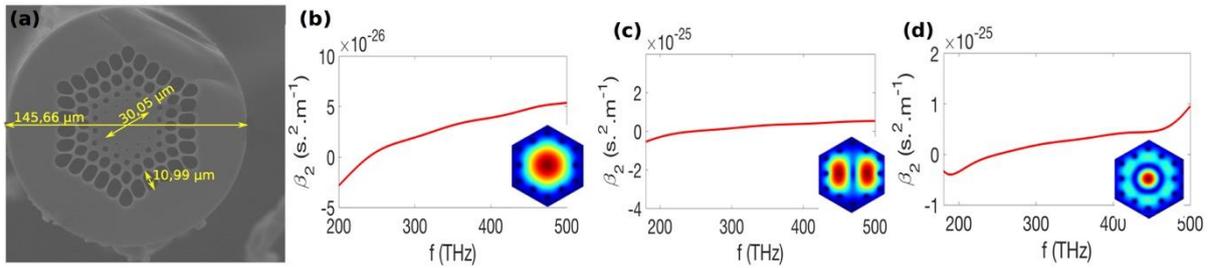


Fig. 1 (a) Image en coupe transversale de la microstructure à partir d'un microscope électronique à balayage ; intensité calculée numériquement des trois premiers modes guidés et leurs courbes de dispersion (mode 1(b), mode 2(c), et mode 3(d)) calculées à 1064 nm.

Dans notre étude nous considérons une fibre microstructurée multimode constituée d'un cœur de silice pure entouré d'une gaine optique constituée de trois couches hexagonales de trous d'air, dont les diamètres augmentent progressivement avec l'ordre des couches (voir Fig. 1(a)). Les modes guidés et leurs indices de réfraction ont été calculés à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Les figures 1(b), 1(c), et 1(d) illustrent les profils transversaux et les courbes de dispersion calculés numériquement pour les trois premiers ordres guidés. Les simulations faites à 1064 nm montrent qu'il existe 55 solutions de l'équation de propagation dans ce milieu diélectrique. Le mode fondamental (voir Fig. 1(b)) a une ouverture numérique de 0.24 et une largeur à mi-hauteur de 20 μm.

L'expérience a consisté à injecter un faisceau laser pulsé de 60 ps à 1064 nm avec une fréquence de répétition de 20 kHz. Les structures transversales des faisceaux ont été analysées par une caméra CMOS et les spectres ont été mesurés par un analyseur de spectre optique, couvrant le domaine entre 350 nm et 1750 nm. Nous avons tout d'abord examiné, sur la pompe, puis sur la première raie Stokes-Raman, l'évolution de la taille du faisceau en sortie de fibre en faisant varier la puissance du faisceau injecté dans la fibre (voir Fig. 2). Puis, nous avons fait une investigation sur la longueur de la fibre en procédant par cut-back. C'est-à-dire qu'à chaque tronçon de fibre découpé, nous avons examiné la forme du faisceau laser et le spectre généré (voir Fig. 3).

2. COMPÉTITION ENTRE LE NETTOYAGE PAR EFFET KERR ET LE NETTOYAGE PAR EFFET RAMAN

La figure 2 montre l'évolution du diamètre du faisceau en sortie de fibre en fonction de la puissance injectée. Nous voyons qu'à plus basse puissance la pompe subit un effet d'auto-nettoyage Kerr qui conduit à un rétrécissement du diamètre du faisceau. Au-delà d'un seuil de puissance, le diamètre du faisceau de la pompe commence à augmenter. Nous remarquons que ce seuil de puissance coïncide avec l'apparition de la première raie Stokes-Raman. La diffusion Raman stimulée provoque une déplétion en énergie de la partie centrale du faisceau, tout en laissant inchangée la partie externe du faisceau. Le faisceau de la raie Stokes-Raman se nettoie lorsque la puissance injectée augmente.

La figure 3 montre l'évolution du spectre avec la distance de propagation dans la fibre. Une conversion de fréquence est observée à partir d'une longueur de 0.57 m, grâce à un processus de mélange à quatre ondes intermodal [5], avec des ondes Stokes et anti-Stokes, respectivement à 1277 nm et 912 nm. Ces longueurs d'onde concordent avec les calculs d'accord de phase que nous avons pu effectuer grâce aux courbes de dispersion montrées dans la figure 1. Ceux-ci prédisent effectivement un désaccord de fréquence de 40.42 THz de la pompe, autrement dit une raie anti-Stokes à 924.7 nm et une raie Stokes à 1252.7 nm. Pour les longueurs de fibre supérieures à 1 m, la figure 3 montre une forte conversion de fréquence induite par diffusion Raman stimulée sur la première onde Stokes. Quand la longueur de la fibre augmente, le spectre s'élargit en conséquence, jusqu'à l'obtention d'un supercontinuum allant de 500 nm jusqu'à 1800 nm.

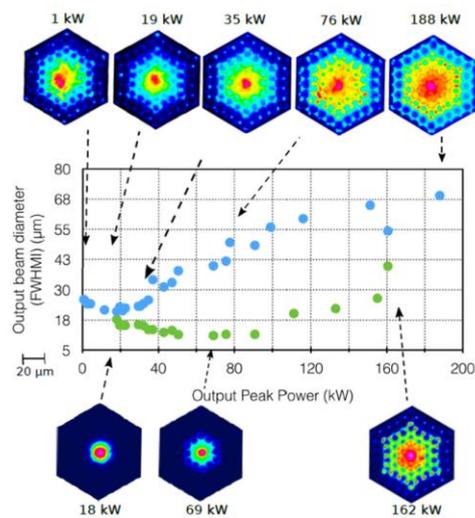


Fig. 1 Évolution du diamètre du faisceau de la pompe (points bleus) et de la première raie Stokes-Raman (points verts) en fonction de la puissance mesurée en sortie de fibre ; encarts : profils de faisceau de sortie correspondants pour différentes puissances mesurées pour une fibre de 11m de longueur.

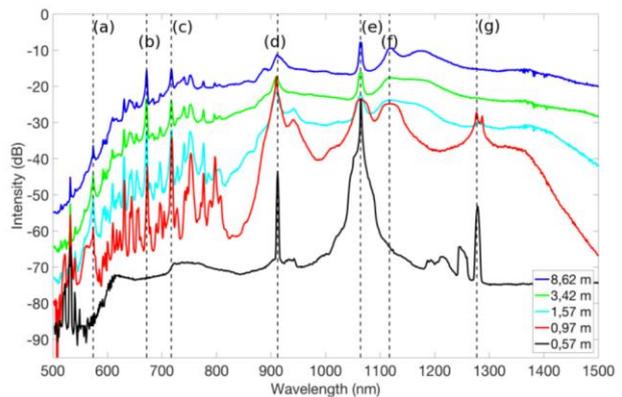


Fig. 2 Spectres de sortie de fibre pour différentes longueurs de fibre (puissance crête de sortie : 120 kW). Les lignes pointillées correspondent aux longueurs d'onde suivantes (en décalage avec la pompe : (a) 574 nm (240.5 THz), (b) 672 nm (164.4 THz), (c) 717 nm (136.4 THz), (d) 912 nm (46.96 THz), (e) 1064 nm, (f) 1117 nm (13.4 THz), (g) 1277nm (47.0THz)

CONCLUSION

Nous avons observé l'auto-nettoyage du faisceau par effet Kerr, et sa compétition avec le faisceau nettoyé par effet Raman dans une fibre multimode microstructurée spéciale. La conversion Raman est particulièrement efficace dans la fibre, ce qui entraîne un transfert progressif de l'intensité du faisceau vers le côté infrarouge du spectre. Cet effet s'accompagne d'une diminution de la brillance du faisceau de la pompe résiduelle et de la première Stokes Raman dès lors qu'apparaissent des faisceaux Stokes-Raman d'ordre supérieur. Nous avons également observé la génération de supercontinuum de 500 nm à 1800 nm [6].

REFERENCES

- [1] N. B. Terry, T. G. Alley, and T. H. Russel, "An explanation of SRS beam cleanup in graded-index fibers and the absence of SRS beam cleanup in sept-index fibers," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 17509, 2007.
- [2] K. Krupa, A. Tonello, B. M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, and V. Couderc, "Spatial beam self-cleaning in multimode fibres," *Nat. Photon.*, vol. 11, pp. 237-241, 2017.
- [3] A. Kudlinski, A. K. George, and J. C. Knight, "Zero-dispersion wavelength decreasing photonic crystal fibers for ultraviolet-extended supercontinuum generation," *Opt. Express*, vol. 14, pp. 5715, 2006.
- [4] C. Lesvigne, V. Couderc, A. Tonello, P. Leproux, A. Barthélémy, S. Lacroix, F. Druon, P. Blandin, M. Hanna, and P. Georges, "Visible supercontinuum generation controlled by intermodal four-wave mixing in microstructured fiber," *Opt. Lett.*, vol. 32, pp. 2173, 2007.
- [5] K. Krupa, A. Tonello, A. Barthélémy, V. Couderc, B. M. Shalaby, A. Bendahmane, G. Millot, S. Wabnitz "Observation of geometric parametric instability induced by the periodic spatial self-imaging on multimode waves," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, pp. 183901, 2016.
- [6] R. Dupiol, K. Krupa, A. Tonello, M. Fabert, D. Modotto, S. Wabnitz, G. Millot, and V. Couderc, "Interplay of Kerr and Raman beam cleaning with a multimode microstructure fiber," *Opt. Lett.*, vol. 43, pp. 587-590, 2018.