



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; [yves.jaouen@telecom-paristech.fr](mailto: Yves.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. Tandje^{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, 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. Ravano¹, 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 du 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 spontané 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 $\alpha > 1$.

SHG IN PPLN WAVEGUIDES WITH STITCHING ERRORS

Maxim Neradovskiy^{1,2}, Elizaveta Neradovskaia^{1,2}, Pascal Baldi¹, Marc De Micheli¹,
Carlos Montes¹

¹ *InPhyNi, Université Côte d'Azur-CNRS, UMR 7010, Parc Valrose, 06100 Nice, France*

² *School of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University, 620000 Ekaterinburg, Russia,*

RÉSUMÉ

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.

MOTS-CLEFS : *Nonlinear Integrated optics, Quasi Phase Matching, Second Harmonic Generation, Periodically Poled Lithium Niobate*

1. INTRODUCTION

Periodically poled nonlinear ferroelectric crystals are widely used to produce photonic devices such as frequency converters. Lithium Niobate (LN), which offers large electro-optical and nonlinear coefficients [1] and the ability to combine periodical poling and low-loss waveguides fabrication is one of the most popular [2]. Second Harmonic Generation (SHG) in Periodically Poled Lithium Niobate (PPLN) waveguides fabricated by proton exchange has been the object of previous studies [3], [4] for coherent single frequency pumping. We have presented a detailed study of periodic domain formation by e-beam irradiation of congruent LN (CLN) [5] containing waveguides produced by the Soft proton Exchange (SPE) process [6]. Using this technique we have produced PPLN channel SPE waveguides with a PPLN section length, which is an integral multiple of 1.5mm, the maximum length obtainable without moving the sample. SHG experiments were done using a TUNICS T100S-HP tunable laser with a fiber amplifier delivering 100mW within the wavelength range 1535-1570 nm. For 1.5 mm-long periodically poled structures, we obtained up to 48%/W.cm² normalized nonlinear conversion efficiency at the Quasi-Phase Matching (QPM) wavelength. Longer domain patterns, obtained by joining up to four 1.5mm long periodically poled sections present several finite stitching errors [5].

Within the reversible SHG mechanism, it is expected that a stitching error corresponding to a phase shift of the order of π will yield to a severely reduced conversion efficiency especially if this error appears in the middle of the grating, as the conversion taking place in the second segment is opposite in phase with what has been created in the first one [7], [8]. Studying SHG in PPLN structures with a tunable laser allowed us to explore the spectral domain around the QPM wavelength, and the originality of our study is to experimentally and numerically show that the stitching errors not only reduce the SH response at QPM resonance, but split the SH spectrum into two or more lateral peaks while keeping the total conversion (integral of the spectrum) and coherence (width of the individual peaks) [9] unchanged.

The influence of a phase shift appearing in the middle of the PPLN grating has been numerically studied as a function of its amplitude and we show that it splits the SH spectrum into two peaks whose position and width at half maximum depends not only on the poling period, the total length of the grating, and the waveguide parameters, but also on the amplitude of the defect.

Recording the SHG tuning curves in waveguides with several stitching errors, we obtained several multiple humped spectra depending on the value of the different phase shift linking the “perfect” PPLN segments. In the numerical model we have considered the dynamics when the finite stitching

errors prevail over the distributed imperfections of the sample which have already been studied [10]-[13], and show that this calculation taking into account only the stitching errors can predict the main modification of the SHG spectra and therefore could also be used to explain the results obtained on devices produced by other techniques such as e-field poling where the nonlinear grating is also affected by important errors, such as domains merging or missing domains.

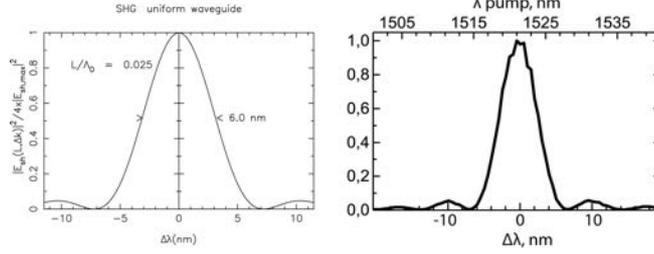


Figure 1. SHG tuning curves: (Left) Numerical SH spectrum for the regular PP waveguide of dimensionless length $L/\Lambda_0 = 0.025$, normalized to its maximum $0.25 \times |E_{sh,max}|^2 = 6.25 \times 10^{-4} |E_{pump}|^2$, as a function of the pump wavelength detuning with respect to QPM $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_{QPM}$ in nm. The sinc² spectrum presents a principal single peak, the first lateral small peaks located out 10.4 nm left and right to the central peak at $\Delta\lambda = 0$. The spectral width measures 6 nm. (Right) Experimental SH spectrum for the regular waveguide of $L = 1.5$ mm length as function of $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_{QPM}$ in nm. The sinc² spectrum presents a principal single peak of 6 nm spectral width. The first lateral small peaks are located out 10 nm left and right to the central peak at $\Delta\lambda = 0$.

2. SHG DYNAMICAL EQUATIONS

The SHG process, assuming the slowly varying envelope approximation, is governed by the coupled mode equations in the periodically poled waveguides possibly presenting stitching errors:

$$(\partial_t + v_F \partial_x + \gamma_F + i\beta_F \partial_{tt}) \mathbf{A}_F = i\kappa_F \mathbf{A}_F^* \mathbf{A}_{SH} \exp(i\Delta K x) \exp[i\delta\Phi_m(x_m)] \quad (1)$$

$$(\partial_t + v_{SH} \partial_x + \gamma_{SH} + i\beta_{SH} \partial_{tt}) \mathbf{A}_{SH} = i\kappa_{SH} \mathbf{A}_F^2 \exp(-i\Delta K x) \exp[i\delta\Phi_m(x_m)] \quad (2)$$

where \mathbf{A}_F and \mathbf{A}_{SH} are the field amplitudes ($\mathbf{A}_j = \sqrt{n_j \ell \omega_j} \mathbf{E}_j$, $j = F, SH$) at λ_F and λ_{SH} ($F =$ fundamental, $SH =$ second harmonic) respectively; $\delta\Phi_m(x_m) = \sum_{m=1}^N \delta\sigma_m(x_m)$ ($m = 1, N$) are the N integral phase-shifts due to the eventual stitchings where the phase-shifts $\delta\sigma_m(x_m)$ ($m = 1, N$) = $\delta\Phi_m(x_m) - \delta\Phi_{m-1}(x_{m-1})$ (with $\delta\Phi_0(x_0) = 0$) link the regular PPLN waveguide pieces; $\kappa_F = [2\pi\omega_F^2 / (k_F c^2)] v_F \chi^{(2)}(\omega; 2\omega, -\omega)$ and $\kappa_{SH} = [4\pi\omega_{SH}^2 / (k_{SH} c^2)] v_{SH} \chi^{(2)}(2\omega; \omega, \omega)$ are the nonlinear coupling constants and the wave vector mismatch between the fundamental and SH is

$$\Delta K = 2\pi[2(n_{SH} - n_F) / \lambda_F - 1 / \Lambda_G] \quad (3)$$

where $2\pi/\Lambda_G$ is the PP grating period, β_F, β_{SH} the dispersion coefficients and γ_F, γ_{SH} the damping coefficients (here we will consider a lossless and dispersionless SHG process).

If the difference between v_F and v_{SH} can be neglected for the nonlinear medium with a given length L and in the parametric approximation (intensity of the pump field $\mathbf{A}_P = \mathbf{A}_F$ remaining much higher than the intensity of the second-harmonic field \mathbf{A}_{SH}) we may set $v_F = v_{SH} = v_p$ and $|A_F|^2 = |A_p|^2 = const$ in (1)(2) to derive in the retarded frame of reference with $x' = x$ and $\tau = t - x/v_p$ the intensity equation of the second-harmonic

$$I_{SH}(L) \propto \kappa_{SH}^2 I_p^2 \left(\frac{\sin(\frac{\Delta K L}{2})}{\frac{\Delta K L}{2}} \right)^2 L^2, \quad (4)$$

where I_p is the intensity of the pump field. Fig. 1(left) shows the spectral behaviour issued from the simulation of Eqs. (1) and (2) for a nonlinear dimensionless length $L/\Lambda_0 = 0.025$ corresponding to a 1.5 mm uniformly PP length. The characteristic length being $\Lambda_0 = 2v_F / (\kappa_F A_F(0))$ and $|A_F(0)| = [I_F(\text{MW/cm}^2) / 0.2838]^{1/2}$. The principal single peak has a FWHM of 6.0 nm. The first adjacent low peaks are at 10.1 nm. The experimental spectrum for the uniform waveguide of 1.5 mm length corresponding to the numerical $L/\Lambda_0 = 0.025$ of Fig. 1(left) is shown in Fig. 1(right). The SH spectrum presents a single peak that coincides with the sinc² theoretical prediction and allows determining λ_{QPM} corresponding to a particular association waveguide width and PPLN period. The measured conversion efficiency reaches up to 36%/(W.cm²). The experimental spectral

efficiency of a single stitched PPLN waveguide is plotted in Fig. 2(left) and fits quite well to the numerical spectrum we obtained for a stitching phase shift of $7\pi/6$ [Fig. 2(right)]. In both cases the spectral separation between the two peaks is 5.5 nm, but this best fit is obtained for a stitching phase shift which almost correspond to the one measured on the domains structure. We remark that this error, not only nearly annihilates the amplitude at QPM as expected, but also dramatically modifies the shape of all the SH spectrum.

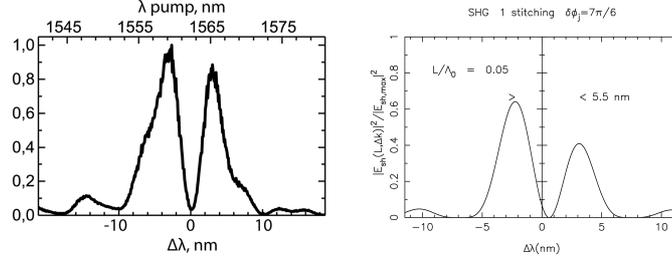


Figure 2. SHG tuning curves: (Left) Spectral efficiency for the experimental 1-stitching sample as function of the pump wavelength detuning with respect to QPM $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_{QPM}$ in nm. The length of the PP section measures $L \simeq 2 \times 1.5$ mm. λ_{QPM} is deduced from the SHG spectra of a waveguide of the same width crossing a single 1.5 mm long PP section of the same period. The spectral separation between the two peaks measures 6.0 nm. (Right) Numerical SH spectrum for the 1-time stitched PP waveguide of phase shift $7\pi/6$ as a function of $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_{QPM}$ in nm for a normalized length $L/\Lambda_0 = 0.05$. The spectral separation between the two peaks measures 5.5 nm.

3. CONCLUSIONS

In this paper we studied numerically and experimentally the influence of one or a few well localized important errors in the periodic organization of the domains of a Quasi Phase Matched waveguide on its SHG spectrum. We have shown, that these errors modify the efficiency and the shape of the SHG spectrum. The maximum of the SHG signal does no longer correspond to the QPM wavelength, which is a very important point to keep in mind when observing an experimental spectrum.

Acknowledgements : The work was partially supported by ANR-14-CE26-0036- 01.

RÉFÉRENCES

- [1] I. V. Ya. Shur, "Kinetics of ferroelectric domains: Application of general approach of LiNbO_3 and LiTaO_3 " J. Mater. Sci. 41, 199, 2006
- [2] M. Bazzan and C. Sada, "Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications" Appl. Phys. Rev. 2, 040603, 2015
- [3] K.R. Parameswaran, *et al.*, "Highly efficient second-harmonic generation in buried waveguides formed by annealed and reverse proton exchange in periodically poled lithium niobate", Opt.Lett. 27 179-181, 2002.
- [4] S. Tanzilli, *et al.*, "Highly Efficient Photon-Pair Source Using a PPLN Waveguide", Electron. Lett. 37, 26-28, 2001
- [5] D.S. Chezganov, *et al.*, "Periodic domain patterning by electron beam of proton exchanged waveguides in lithium niobate" Appl. Phys. Lett. 108, 192903, 2016
- [6] L. Chanvillard, *et al.*, "Soft Proton Exchange on PPLN: a simple waveguide fabrication process for highly efficient nonlinear interactions" Appl. Phys. Lett. 76, 1089, 2000
- [7] K. Gallo and G. Assanto, "All-optical diode based on second-harmonic generation in an asymmetric waveguide", J. Opt. Soc. Am. B, 16, 267-269, 1999
- [8] S. H. H. Subramani, *et al.*, "Analysis of a phase reversal quasi-phase matching device for the dual peak second harmonic response", J. Opt. 15, 055205-1-6, 2013
- [9] M. Neradovskiy, *et al.*, "Second Harmonic Generation in periodically poled lithium niobate waveguides with stitching errors", J. Opt. Soc. Am. B, 35(2) pp.331-336 (Feb. 2018) .
- [10] F.R. Nash, G.D. Boyd, M. Sargent III, and P.M. Bridenbaugh, "Effect of Optical Inhomogeneities on Phase Matching in Nonlinear Crystals", J. Appl. Phys. 41, 2564-2576, 1970
- [11] J. Lim, S. Matsumoto, and M.M. Fejer, Appl. Phys. "Noncritical phase matching for guidedwave frequency conversion", Appl. Phys. Lett. 57, 2294-2296, 1990
- [12] S. Helmfrid, G. Arvidson, and J. Webjörn, "Influence of various imperfections on the conversion efficiency of SHG in quasi-phase-matching lithium niobate waveguides", J. Opt. Soc. Am. B 10, 222-229, 1992
- [13] M.M. Fejer, G.A. Magel, D.H. Jundt, and R.L. Byer, "Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation: Tuning and Tolerances", IEEE J. Quantum. Electron. 28, 2631-2653, 1992

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. Zaldívar-Huerta¹, Y. Hong³ and A. Boudrioua²

¹ *Departamento de Electrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 72840 Puebla, México*

² *Laboratoire de Physique des Lasers CNRS UMR 7538, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, 93430 Villetaneuse, France*

³ *School of Electronic Engineering, Bangor University, Bangor, Gwynedd LL57 1UT, Wales, U.K.*
min.lee@univ-paris13.fr

ABSTRACT

In this work, we propose for the first time a new scheme of optical feedback using stimulated Brillouin scattering. A high-power laser diode emitting at 1450 nm stimulates Brillouin backscattering in a 4km-long optical fibre and the backscattered light is injected back into the laser diode for optical feedback. The experimental results with RF spectrum show abundant dynamics and the Brillouin frequency shift at 11.46 GHz as well. RF spectrum maps are also established with respect to the laser drive current. The results are compared with the ones for conventional optical feedback and it is clearly shown that the dynamical behaviours for both the configurations are very different.

KEYWORDS : *optical feedback; stimulated Brillouin scattering.*

1. INTRODUCTION

Optical feedback influence on spectral properties of semiconductor lasers has been studied extensively since the early laser development in the 1970's. The main laser diode properties to be modified when subject to optical feedback are the threshold gain, the resonant frequency and the spectral linewidth [1]. The dynamical behaviour of laser diodes shows different dynamical regimes, including chaotic regime [2]. Optical feedback can be achieved with a simple external mirror [3]. There exist other configurations such as filtered optical feedback [4] and phase-conjugated optical feedback [5]. However, no study has been reported using optical feedback via stimulated Brillouin scattering.

Stimulated Brillouin scattering (SBS) is an inelastic nonlinear scattering that occurs due to the interaction between the pump and Stokes fields through an acoustic wave. The scattered light is down-shifted in frequency because of the Brillouin grating. In a standard single-mode telecom optical fibre, Brillouin frequency shift (BFS) is typically around 10.7 GHz at 1550 nm [6]. SBS is exploited in distributed fibre sensing and tunable optical delays. Recently, chaotic signal is used for creating a localised Brillouin dynamic grating in a polarisation-maintaining fibre [7].

In this letter, we propose a new optical feedback configuration using SBS. A high power laser diode is used for stimulating Brillouin scattering in a 4km-long fibre. Although chaotic behaviour of a laser diode prevents SBS [8], the laser diode shows different dynamical behaviours by injecting back the stimulated Brillouin scattered light into the laser diode. The results will be compared with the ones in a conventional optical feedback (COF) in terms of RF spectra. A comparison will also be discussed using RF spectrum maps with respect to the laser drive current.

2. EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

The schematic diagrams of conventional- and stimulated Brillouin backscattering- optical feedback are shown in Fig. 1. It consists of a high-power laser diode (LD) of 3.1mm-long Fabry-Perot cavity, emitting at 1450 nm (3SP technologies). The maximum laser power at a current of 1000 mA is 270 mW, and the threshold current at a free-running state is 150 mA at 25°C. The LD light is injected into a

4km-long single-mode fibre through two optical circulators (OC) and a coupler 90/10. The 90% port of the coupler goes to the fibre and the power injected into the fibre is reduced to 135 mW at 1000 mA because of the components attenuation. The other 10% port is used for monitoring the laser output with a 12GHz photodetector (PD). In order to protect the PD, the monitoring power is attenuated to 1 mW at the maximum laser power through a variable optical attenuator (VOA). The PD output signal is visualised by a radio frequency (RF) spectrum analyser (26.5 GHz). The isolator placed after the long fibre ensures unidirection, avoiding reflection from the fibre tip.

For SBS optical feedback (SBSOF), the backscattered light of SBS occurred in the fibre is collected by Port 3 of OC2 and injected into the LD, setting up a SBS closed-loop configuration as shown in Fig. 1(a). For COF, the isolator output is injected into the LD via VOA2 to adjust the optical feedback ratio to implement a closed-loop. In this work, the feedback ratio is fixed to 5 % and the external cavity frequency is 52 kHz as the fibre length is 4 km. It is also noted that the COF is incoherent optical feedback. When Port 1 of the OC1 is not connected, an open-loop configuration is formed.

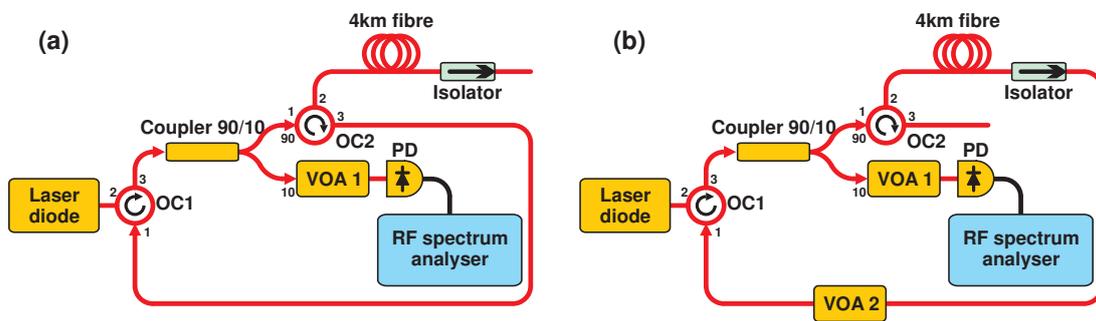


FIGURE 1 : Schematics of the experimental setup for (a) a stimulated Brillouin scattering optical feedback and (b) conventional optical feedback. OC : optical circulator, VOA : variable optical attenuators PD, photo-detector.

In order to study the dynamical behaviour of the laser diode, first we have measured RF spectra for both the configurations. Figure 2 shows spectra measured at 1000 mA with averaging in SBS, COF closed-loop and open-loop configurations. Compared to the open-loop spectrum, the spectrum with SBS exhibits plentiful dynamics at low-GHz (0–6 GHz) and high-GHz (12–16 GHz) bands as shown in Fig. 2(a). It is also seen from the figure that the BFS is present at 11.46 GHz. This BFS corresponds to the one calculated with the theory and the Brillouin gain spectrum linewidth is measured as 30 MHz. On the other hand, the RF spectrum shown in Fig. 2(b) appears very different to the one in the SBS closed-loop configuration. It appears that the peak at 14.41 GHz is the internal cavity frequency from the 3.1mm-long cavity. However, this peak is shifted to 15 GHz for SBSOF. Note that the bandwidth of the PD at -3 dB is limited to 12 GHz. Hence, this cavity mode would appear stronger in fact.

In order to study further, RF spectrum maps are established by scanning the laser drive current from 0 to 1000 mA at every 5 mA. Figure 3 shows the RF spectrum maps for SBSOF and COF. In Fig. 3(a), the BFS is clearly seen after 300 mA at 11.46 GHz and different peaks are present. It is hence evident that SBSOF leads to the LD to show abundant dynamics. However, the COF configuration manifests a very different spectrum which does not show dynamics as abundant as the SBSOF one.

CONCLUSION

In conclusion, we have studied for the first time the dynamical behaviour of the laser diode subject to stimulated Brillouin scattering optical feedback. The backscattered light of the SBS from a 4km-long fibre is injected into the laser diode for optical feedback. The RF spectrum results show the BFS at 11.46 GHz and abundant dynamics. The results are compared to the ones for conventional optical feedback. It is clearly shown that the results are different. Further study is needed to determine whether the dynamical behaviour is chaotic or not.

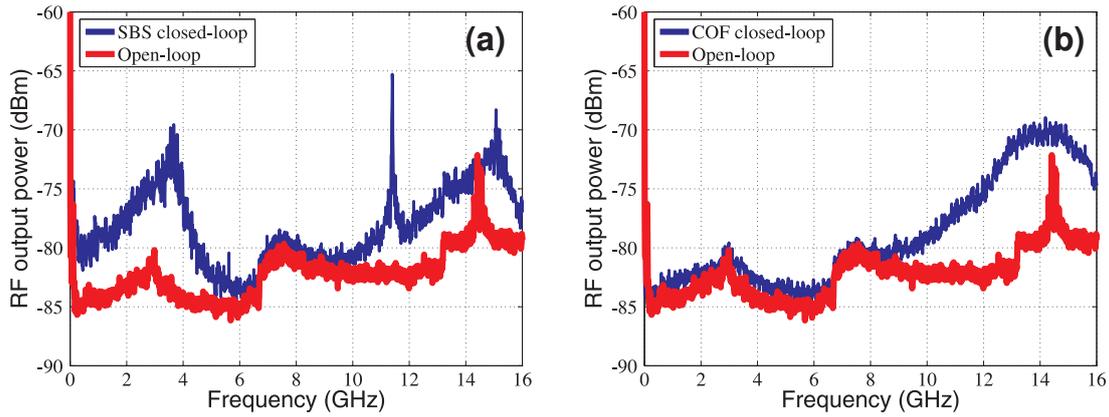


FIGURE 2 : RF spectra obtained at 1000 mA with averaging for (a) SBSOF and (b) COF. An RF spectrum in the open-loop configuration is also plotted.

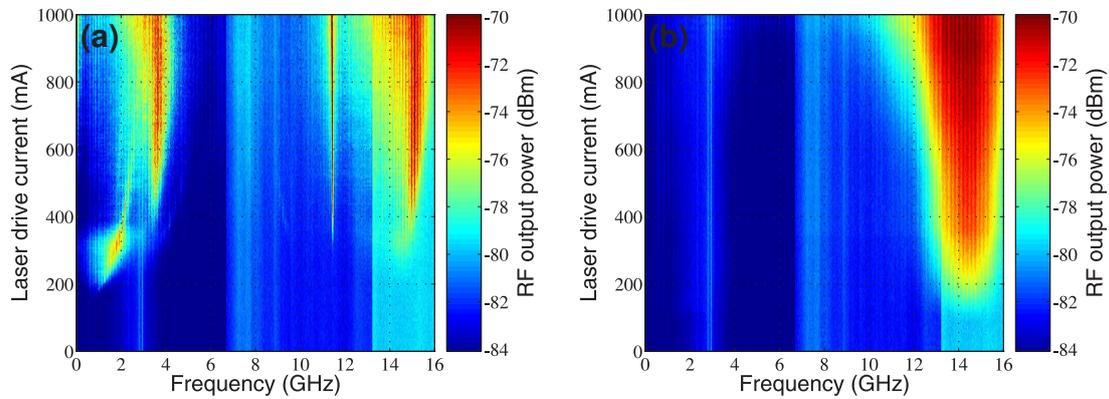


FIGURE 3 : RF spectrum maps for (a) stimulated Brillouin scattering optical feedback and (b) conventional optical feedback.

REFERENCES

- [1] K. Klaus, “ External optical feedback phenomena in semiconductor lasers,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* , vol. 1, pp. 480–489, 1995.
- [2] R. Tkach, W. Chraplyvy, “Regimes of feedback effects in 1.5 μ m distributed feedback lasers,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 4, pp. 1655–1661, 1986.
- [3] M. Sciamanna, and K. A. Shore, “ Physics and applications of laser diode chaos,” *Nature Photonics*, vol. 9, pp. 151, 2015.
- [4] F. Baladi, M. W. Lee, J. R. Burie, M. A. Bettiati, A. Boudrioua, and A. P. Fischer, “High-resolution low-frequency fluctuation map of a multimode laser diode subject to filtered optical feedback via a fiber Bragg grating,” *Optics letters*, vol. 41, pp. 2950—2953, 2016.
- [5] E. Mercier, D. Wolfersberger and M. Sciamanna, “High-frequency chaotic dynamics enabled by optical phase-conjugation,” *Scientific reports*, vol. 6, pp. 18988, 2016.
- [6] G. Agrawal, “ Applications of nonlinear fiber optics,” *Scientific reports*, Academic press, 2001.
- [7] J. Zhang, Z. Li, Y. W., M. Zhang, Y. Liu and M. Li, “Optimized chaotic Brillouin dynamic grating with filtered optical feedback,” *Scientific reports*, vol. 8, pp. 827, 2018.
- [8] X. Fu, S.-C. Chan, Q. Liu and K. K.-Y. Wong, “Broadband optical chaos for stimulated Brillouin scattering suppression in power over fiber,” *Appl. Opt.*, vol. 50, pp. 92–96, 2011.

UTILISATION DE FIBRES À COUPLAGE INHIBÉ 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

¹ *Laboratoire de Traitement et Communication de l'Information, Télécom ParisTech, 75013 Paris, France*

² *Laboratoire d'Informatique de Paris 6, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Sorbonne Universités, 75005 Paris, France*

³ *GPPMM Group, XLIM Research Institute, CNRS UMR 7252, Univ Limoges, Limoges, France*

⁴ *GLOphotonics S.A.S., 123 rue Albert Thomas, Limoges, France*

⁵ *Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Univ Paris-Saclay, 91127 Palaiseau cedex, France*

isabelle.zaquine@telecom-paristech.fr

RÉSUMÉ

Nous démontrons expérimentalement 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 dans une fibre remplie de gaz non linéaire.

MOTS-CLEFS : *optique quantique ; mélange à quatre ondes ; fibre à coeur creux*

Les modes temporels (TM) de la lumière sont une ressource prometteuse pour l'information quantique puisqu'ils fournissent une base d'encodage discrète de dimension théoriquement infinie [1]. De plus, les différents modes partageant la même fréquence porteuse, le même mode spatial transversal ainsi que les mêmes propriétés de polarisation, cet encodage est compatible avec les communications fibrées. Généralement, lorsque l'on génère des paires de photons par fluorescence paramétrique ou mélange à quatre ondes spontané, chaque photon de la paire est dans une superposition non-contrôlée de modes temporels. On décrit les caractéristiques spectrales de l'état de la paire générée à l'aide de l'amplitude spectrale jointe (JSA) $F(\omega_s, \omega_i)$ résultant du produit des fonctions exprimant la conservation de l'énergie α et l'accord de phase ϕ : $F(\omega_s, \omega_i) = \alpha(\omega_s, \omega_i) \times \phi(\omega_s, \omega_i)$. En cherchant la décomposition de Schmidt de cette fonction, on fait apparaître le contenu TMs des photons de la paire : $F = \sum_n \sqrt{\lambda_n} S_n(\omega_s) I_n(\omega_i)$ où $(\{S_n\})$ et $(\{I_n\})$ sont les bases TM du photon signal et du photon idler. Le nombre de termes de cette décomposition caractérise le degré d'intrication spectrale des photons de la paire et en particulier si elle ne comporte qu'un seul terme, l'état est factorisable, ce qui sera recherché si l'on veut produire des photons uniques annoncés à partir des paires générées. Pour contrôler ce degré d'intrication, il est nécessaire d'adapter les paramètres qui interviennent dans la conservation de l'énergie (fréquence de pompe, largeur spectrale) et dans l'accord de phase (longueur du milieu, dispersion). En particulier, il a été montré que [2], pour obtenir un unique terme non nul dans la décomposition, il faut que l'un des photons ait la même vitesse de groupe que la pompe ou que $2/v_{gp} = 2/v_{gs} + 2/v_{gi}$ avec v_{gx} la vitesse de groupe à λ_x . Ici, nous montrons expérimentalement dans un régime stimulé comment différentes formes de JSA peuvent être obtenues dans une fibre à couplage inhibé (IC) remplie de gaz.

Du fait du mode de guidage, les fibres à couplage inhibé présentent une transmission composée de plusieurs bandes séparées par des zones de non-guidage où le mode fondamental se couple avec des modes dans la structure en silice. La position de ces zones de couplage dépend de l'épaisseur des ponts de silice constituant la fibre microstructurée [3]. Cette structure multibande fournit la possibilité d'un mélange à quatre ondes dans lequel le photon signal et/ou idler sont générés dans des bandes de transmission différentes de celle de la pompe. Dans une telle configuration, de très nombreuses relations entre les vitesses de groupe de la pompe et des photons deviennent accessibles, ouvrant la voie au contrôle de la JSA (Fig.1). Pour reconstruire la JSI ($JSI = |JSA|^2$), nous avons utilisé une technique de tomographie

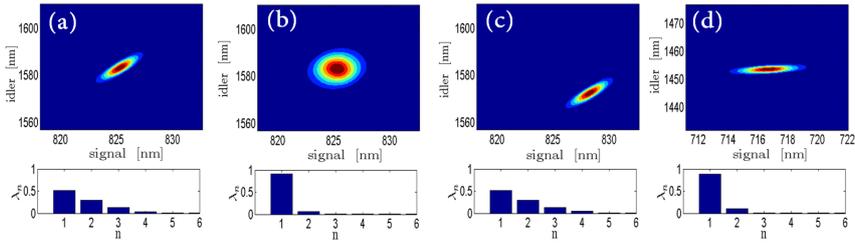


FIGURE 1 : JSI simulés pour différentes configurations de longueur, de pression de gaz et de longueur d’onde de pompe. Partant des conditions de (a) $P = 3\text{bar}$ $\lambda_p = 1085\text{ nm}$ $L = 1\text{m}$, (b-d) correspondent au changement d’un paramètre (b) $L = 30\text{ cm}$ (c) $P = 2,6\text{ bar}$ (d) $\lambda_p = 985\text{ nm}$. Les 6 premiers coefficients de la décomposition de Schmidt correspondante sont donnés pour chaque configuration.

par émission stimulée [4], qui consiste à stimuler le processus non-linéaire avec un laser continu accordable, ici aux longueurs d’onde télécom, avec une pompe pulsée femtoseconde à 1030 nm (impulsions de 230 fs, à 200 MHz). Nous avons choisi deux fibres optimisées notées A et B avec des épaisseurs de ponts de silice $t = 600\text{ nm}$ et de diamètre interne $d = 40\text{ }\mu\text{m}$ et $t=1250\text{ nm}$; $d=49\text{ }\mu\text{m}$ (Fig 2). La non-linéarité requise pour le FWM est obtenue en remplissant la fibre avec du Xénon, dont on peut contrôler la pression. Étant un gaz rare, il ne donne lieu à aucune diffusion Raman qui est généralement la principale source de bruit lors de la génération de paires de photons. D’autre part c’est un gaz hautement non-linéaire (de l’ordre de $10^{-21}\text{ m}^2/\text{W}$ à 10 bar). Dans ces deux fibres nous avons validé la possibilité d’obtenir un mélange à quatre ondes impliquant des longueurs d’ondes dans des bandes différentes (2 bandes différentes pour la fibre A, et 3 pour la fibre B). De plus, cela confirme notre modèle analytique permettant de relier l’ensemble des paramètres (dispersion de la fibre, propriétés spectrales de la pompe, nature et pression du gaz, etc) à une forme de JSA donnée.

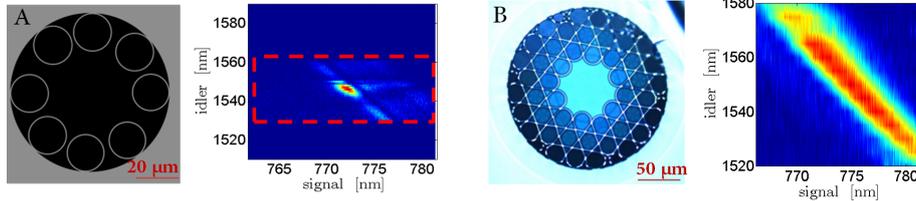


FIGURE 2 : Coupe transversale des fibres, JSI expérimentale correspondante pour une fibre IC à 8 tubes et une fibre IC kagome notée A et B. Dans JSI de A, les lignes pointillées rouges définissent la plage de mesure. La structure pixelisée du JSI de B est due à un nombre insuffisant de mesures et sera améliorée.

Nous avons fait une nouvelle proposition de contrôle des corrélations spectrales de paires de photons générées par mélange à quatre ondes en utilisant différentes bandes de dispersion. Des états intriqués en fréquence, mais également des états factorisables peuvent être obtenus dans la même fibre. Pour la première fois à notre connaissance, nous mettons en œuvre cette technique en utilisant une fibre à couplage inhibé remplie de gaz. D’autres configurations sont actuellement étudiées afin de démontrer la possibilité de modification en temps réel du milieu.

RÉFÉRENCES

- [1] B. Brecht et al, Physical Review X 5, 041017 (2015).
- [2] W. P. Grice et al, Physical Review A 64, 063815 (2001).
- [3] B. Debord et al, Optica, 4, 209 (2017).
- [4] M. Liscidini, and J. E. Sipe, PRL 111(19), 193602 (2013)

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

SS Jiang¹, CS Xiao¹, ZQ Luo¹, HY Xu¹, ZP Cai^{1*}, and R Moncorgé²

¹Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, 361005, China

²Centre de recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP), UMR 6252 CNRS-CEA-ENSICAen, Université de Caen, 6 Blvd Maréchal Juin, 14050 Caen, France

zpcai@xmu.edu.cn

ABSTRACT

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.

KEYWORDS : *microsphere ; stimulated Raman scattering ; visible fiber laser*

1. INTRODUCTION

Visible fiber lasers are highly demanded for biomedical diagnosis, underwater detection, and indoor optical communication. Benefiting from the high Q-factor and low mode volume of Whispering gallery mode (WGM) microresonator (WGMR), the threshold of nonlinear optical effects in microresonators can be significantly reduced. For the past decades, stimulated Raman scattering (SRS) in WGMRs have been intensely investigated [1-2]. Raman lasing in WGMR can be helpful to extend the wavelength range which can not be obtained in conventional rare-earth-doped lasers. The ultrahigh Q-factor in WGMR can reduce the threshold of the Raman lasing greatly, which has been reported in microspheres [2], microdisks [3], microtoroids [4]. Recently, Raman lasing of WGMR is widely applied in optical sensing [5, 6].

2. EXPERIMENT

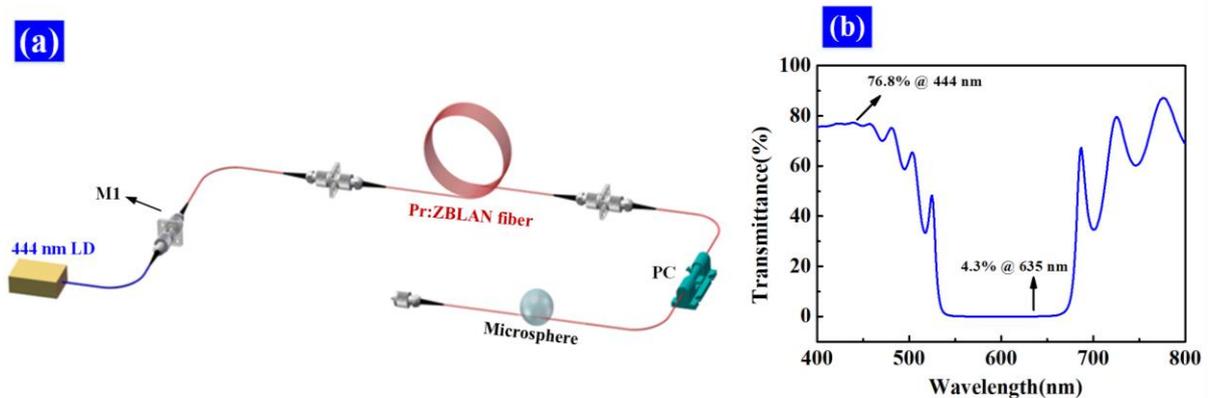


Fig. 1 (a) The experimental setup for the generation of SRS (b) Transmission spectrum of the input mirror M1

The experimental setup of the proposed microresonator-feedback Pr:ZBLAN fiber laser which can effectively generate SRS is schematically shown in Fig. 1(a). A 91.5 cm Pr:ZBLAN fiber (core/cladding: 6/125 μm , NA of 0.15, Pr³⁺ concentration of 1000 ppm) is employed as gain medium pumped by 444 nm laser diode (LD). Fiber pigtail mirrors (M1) are obtained by directly coating multi-layer dielectric films onto the single-mode-fiber (SMF, 1060-XP) ends using a plasma

sputter deposition system. As shown in Figure. 1(b), M1 has a high transmittance of $\sim 76.8\%$ at the pump wavelength of ~ 444 nm and high reflectivity of $\sim 95.7\%$ at the lasing wavelength of 635 nm. The microresonator is employed as feedback mirror, it is a silica microsphere (~ 160 μm in diameter) fabricated by melting a silica fiber tip using a CO_2 laser. A fiber taper (~ 2 μm in diameter) is used to couple the light into/out the microsphere. The Q-factor of the microsphere around 1550 nm is measured to be $\sim 1 \times 10^8$ by using a tunable single-frequency laser. The microsphere in combination with the fiber-taper coupling can provide 20%-30% reflectivity in our experiment. Moreover, a fiber polarization controller (FPC-100, OZ optics) is used for optimizing the polarization states.

SRS is a nonlinear optical process which transfers energy from a pump wave to Stokes and anti-Stokes waves through optical phonons in the optical transmission medium. When the incident pump power greater than ~ 345 mW, the first-order Raman lasing at ~ 654 nm could be observed, in correspondence with the Raman gain peak which occurs downshifted in frequency by approximately 14 THz related to the pump frequency of silica material. The threshold of the Raman lasing can be estimated to be ~ 345 mW. In addition to obtain the first-order SRS, we have also observed cascaded Raman scattering by continuously increasing the incident pump power and optimizing the polarization states. When the incident pump power is increased to be ~ 352 mW, the first-order Raman lasing is strong enough to excited the second-order Raman lasing at ~ 676 nm. By such cascaded process, Figure. 2 presents the third-order Raman lasing at ~ 695 nm is achieved when the incident pump power is exceeded ~ 228 mW.

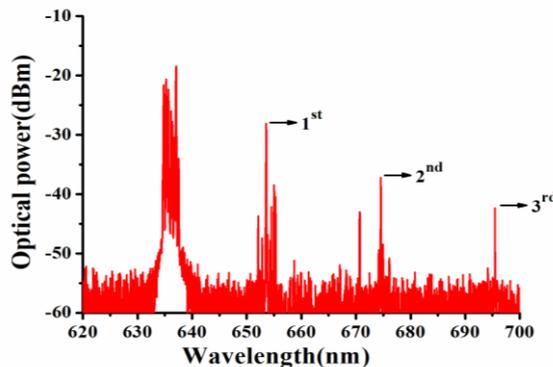


Fig. 2 Optical spectrum of the third-order Raman lasing

CONCLUSION

In conclusion, we have proposed and experimentally demonstrated visible cascaded Raman lasing in a microresonator-feedback Pr-fiber. By controlling the coupling position between the fiber taper and microresonator, optimizing the fiber polarization states, as well as the incident pump power, the cascaded Raman lasings at 0.65, 0.67 and 0.69 μm are achieved in the experiment. Our experiments present a novel scheme of generating SRS at visible wavelength with simple structure and operation.

REFERENCES

- [1] S. Spillane, T. J. Kippenberg, and K. J. Vahala, "Ultralow-threshold Raman laser using aspherical dielectric microcavity," *Nature*, vol. 415, pp. 621-623, 2002.
- [2] B. Min, T. J. Kippenberg, and K. J. Vahala, "Compact, fiber-compatible, cascaded Raman laser," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 17, pp. 1507-1509, 2003.
- [3] G. Lin, S. Diallo, J. M. Dudley, and Y. K. Chembo, "Universal nonlinear scattering in ultra-high Q whispering gallery-mode resonators," *Opt. Exp.*, vol. 24, no. 13, pp. 14880-14894, 2016.
- [4] T. J. Kippenberg, S. Spillane, D. K. Armani, and K. J. Vahala, "Ultralow-threshold microcavity Raman laser on a microelectronic chip," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 11, pp. 1224-1226, 2004.
- [5] B. Li, W. Clements, X. Yu, K. Shi, Q. Gong, and Y. Xiao, "Single nanoparticle detection using split-mode microcavity Raman lasers," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 111, no. 41, pp. 14657-14662, 2014.
- [6] B. Peng, Ş. Özdemir, S. Rotter, H. Yilmaz, M. Liertzer, F. Monifi, C. Bender, F. Nori, and L. Yang, "Loss-induced suppression and revival of lasing," *Science*, vol. 346, no. 6207, pp. 328-332, 2014.