AMPLIFICATION DE PUISSANCE A 1585 NM EN POMPAGE RESONANT

G. Granger¹, M. Jossent¹, R. Dauliat¹, D. Lipatov², M. Likhachev², S. Février¹

¹Univ. Limoges, CNRS, Xlim, UMR 7252, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

²Fiber Optics Research Center RAS, 38 Vavilov Street, Moscow 119333, Russie

geoffroy.granger@xlim.fr

Résumé

Nous étudions l'efficacité d'amplification en régime continu dans des fibres fortement dopées Er³⁺ en pompage résonant à 153x nm en fonction de leurs paramètres chimiques et opto-géométriques.

MOTS-CLEFS : amplificateur de puissance, pompage résonant

1. INTRODUCTION

Les sources de haute puissance en bande L (1570 nm - 1620 nm) émettant dans une fenêtre de sécurité oculaire (λ >1400 nm) et de transparence de l'atmosphère trouvent de nombreuses applications dont le LIDAR et les communications atmosphériques. Ces sources basées sur des fibres double-gaine à grand diamètre de cœur sont peu efficaces lorsqu'elles sont pompées par des diodes multimodes de puissance à 980 nm (efficacité opto-optique $\leq 40\%$). De plus, la faible valeur de section efficace à la longueur d'onde de pompe de 980 nm contribue à augmenter la longueur optimale d'amplification. Il est connu que l'augmentation du taux de dopage s'accompagne de la formation d'agrégats qui limitent l'efficacité de conversion opto-optique par effets coopératifs [1]. L'ajout d'aluminium pour solubiliser les agrégats conduit à une augmentation de l'indice du cœur et donc ne permet pas de réaliser des fibres fortement dopées Er à grand diamètre de cœur monomode. L'ajout de co-dopants comme l'ytterbium augmente l'absorption du rayonnement de pompe mais conduit à une émission à 1 μ m [2] incompatible avec la zone de sureté oculaire. L'ajout de lanthane permet de solubiliser les paires d' Er^{3+} et de réaliser des fibres à faible ouverture numérique (ON = 0,037) et très grand diamètre de cœur (60 µm) [3]. Une concentration identique d'Al et de P dans la matrice vitreuse phospho-aluminosilicate permet d'ajuster la différence d'indice cœur-gaine [4] et de réaliser des fibres monomodes à grande aire effective de mode (500 μ m² à 1550 nm) utilisées pour réaliser des lasers de puissance continus [5] et femtosecondes [6].

L'augmentation de la longueur d'onde de pompe est une solution attrayante pour augmenter l'efficacité opto-optique par réduction du défaut quantique. Supradeepa *et. al.* ont extrait une puissance maximale de 100 W d'une fibre monomode dopée Er en pompant à la longueur d'onde de 1480 nm par un laser Raman continu de 280 W [7]. Pompe et signal étaient couplés dans la fibre Er par un multiplexeur monomode. La durée de vie du composant à ces niveaux de puissance n'était pas mentionnée. De plus, le diamètre de 6 µm du mode de la fibre Er n'était pas adapté à l'amplification de puissance en régime d'impulsions et/ou monofréquence. Le pompage résonant par des sources dans la bande 153x nm [8,9] devrait permettre d'accroître considérablement l'efficacité opto-optique. A ce jour, une seule étude fait état d'une efficacité record de l'ordre de 75 % dans une fibre codopée Yb³⁺ [10]. Dans cet article, nous avons étudié de nombreuses configurations (matrice vitreuse, concentration en Er³⁺, rapport des diamètres cœur/gaine, revêtement) de différentes fibres dopées Er³⁺ afin de confirmer ces résultats voire d'augmenter l'efficacité laser.

2. PARAMETRES CHIMIQUES ET OPTO-GEOMETRIQUES DES FIBRES REALISEES

Des préformes aluminosilicate (AS) et phospho-aluminosilicate (PAS) ont été élaborées par MCVD. La concentration en erbium [Er^{3+}] a été variée de 0,7×10²⁵ at/m³ à 5×10²⁵ m⁻³. Le contraste d'indice des préformes AS varie entre 1,3 et 8,4×10⁻³. Le contraste d'indice des préformes PAS est inférieur et de l'ordre de 1,5×10⁻³. Les rayons de cœur et de gaine sont choisis afin d'assurer (1) une

aire effective élevée pour le mode fondamental, (2) un nombre de modes guidés inférieur à 4 à 1560 nm et (3) une absorption de la pompe supérieure à 1 dB/m. Ainsi, le diamètre de cœur varie entre 16 à 35 µm tandis que le diamètre de gaine interne varie entre 110 et 200 µm. La Fig.1a montre deux exemples de profil d'indice de fibres réalisées pour cette étude. L'influence du matériau de gaine externe sur les pertes de fonds α à 153x nm a été étudiée. Nous avons sélectionné un polymère acrylate (Luvantix HTR acrylate, ON = 0,44, $\alpha > 60$ dB/km à 153x nm), un téflon (Du Pont de Nemours, ON = 0,6, $\alpha < 10$ dB/km à 153x nm) et une silice fluorée (Heraeus, ON = 0,22, $\alpha < 1$ dB/km à 153x nm).



Fig. 1 : (a) Exemple des profils d'indice des fibres étudiées, avec en encart une image d'une fibre 30/200 en matrice PAS. (b) Mesure de puissance sur deux fibres AS en fonction de la longueur de fibre avec en encart l'image de la distribution d'intensité lumineuse en sortie à 1585 nm. (b) Courbe d'efficacité sur une fibre PAS pour une puissance de signal de 1W à 1590 nm.

3. CARACTERISATION EN POMPAGE RESONANT

Afin d'accorder la longueur d'onde de pompe au pic d'absorption maximale de chaque matrice hôte, nous avons réalisé deux sources de pompe, délivrant respectivement 60 W à 1532 nm et 120 W à 1535 nm. Le signal est issu d'un amplificateur délivrant une puissance variable jusqu'à 1 W aux trois longueurs d'onde de 1560 nm, 1585 nm et 1590 nm. Les rayonnements de signal et de pompe sont multiplexés par deux combineurs de puissance 6+1:1 (Lightcom) équipés d'une fibre monomode standard en entrée, d'un adaptateur de mode et d'une fibre LMA de 15 ou 25 µm de diamètre de cœur en sortie. Ce composant facilite l'excitation sélective du mode fondamental de certaines fibres dopées Er légèrement multimodes. Les fibres dopées Er sont soudées à la fibre de sortie du combineur à l'aide d'une soudeuse à arc électrique Fujikura 100-P. La face de sortie est préparée en angle afin d'éviter les retours. Nous avons testé 13 fibres. Pour chaque fibre, nous avons relevé les puissances en sortie de signal Ps^s et de pompe résiduelle Pp^s, en fonction de la puissance de pompe en entrée Pp^e, puis calculé l'efficacité de conversion opto-optique pour le matériau $\eta_m = Ps^s/(Pp^e-Pp^s)$ et pour le système laser $\eta_1 = Ps^s/Pp^e$ en fonction de la longueur, en pompage résonant à 1532 nm ou 1535 nm selon la composition de la matrice. Les meilleurs résultats en termes d'efficacité sont résumés dans le tableau 1 :

	Matrice	[Er ³⁺] /	Revê-	Δn / 10 ⁻³	$\Phi_{\rm c}/\mu{ m m}$	$\Phi_{\rm g}/\mu m$	$\Phi_{\rm g}$ / $\Phi_{\rm c}$	λ / nm	$\eta_{\rm m}$	η_1	L/m
		$10^{25} \mathrm{m}^{-3}$	tement						×100	×100	
1	AS	0,7	Acrylate	1	35	110	10	1532	25	-	45
2	AS	1,6	Téflon	5	23	150	2.35	1532	60	50	50
3	AS	1,74	Téflon	8.4	16	125	1.64	1532	70	40	25
4	PAS	2,26	Fluor	1.5	25	205	1.49	1535	43	34	45
5	PAS	2,5	Téflon	1.5	23	150	2.35	1532	55	45	27

Tableau 1 : Résumé des caractéristiques des fibres réalisées et caractérisées lors de cette étude.

La fibre 1 a été caractérisée en pompage à 980 nm [5] et présente une efficacité matériau de 40%. En pompage résonant à 1532 nm, l'efficacité chute à 25%. Cette chute de l'efficacité malgré une baisse drastique du défaut quantique est attribuée aux pertes de propagation des polymères acrylates à 153x nm. Pour pouvoir caractériser correctement le matériau, nous utilisons par la suite des fibres revêtues de téflon ou d'une gaine en silice fluorée qui présentent très peu de pertes à 153x nm. Dans le cas du téflon (fibre 2), l'efficacité matériau de la matrice AS peut atteindre 60%. La réalisation

d'une seconde préforme AS avec une concentration en Er^{3+} légèrement supérieure (fibre 3) montre une efficacité supérieure (70%). Au vu de ces résultats, nous estimons qu'une augmentation de la concentration en erbium au-delà de 2×10^{25} m⁻³ pourrait permettre d'atteindre une efficacité supérieure à 70%. Dans ce cas, il faudrait augmenter la concentration en aluminium pour solubiliser les paires d'ions. Le contraste d'indice plus élevé pourrait être compensé en dopant en aluminium une fraction de la gaine et ainsi assurer un guidage monomode pour des applications de puissance. Pour la matrice PAS (fibre 4), l'efficacité peut atteindre 43% lorsque la concentration en erbium est suffisamment élevée, de l'ordre de 2,26×10²⁵ m⁻³. De la même façon, une augmentation légère de la concentration en erbium (fibre 5) permet d'accroître notablement l'efficacité (de 43% à 55%). Des fibres PAS plus dopées en erbium sont à l'étude. Contrairement à la matrice AS, la matrice PAS permet de réduire notablement le contraste d'indice et atteindre des diamètres de cœurs monomodes de 30 µm fortement dopés en erbium. Ces paramètres sont adéquats pour la montée en puissance.

CONCLUSION

Nous avons étudié des fibres aluminosilicate et phospho-aluminosilicate fortement dopées à l'erbium pour l'accroissement de l'efficacité laser en pompage résonant. Pour la matrice AS, une efficacité élevée de 70% mesurée en fonction de la pompe absorbée montre la qualité du matériau de cœur. Cependant, du fait de la longueur du milieu, un revêtement à faible perte comme le Téflon est inévitable. Des fibres présentant des concentrations en erbium supérieures à 2×10^{25} m⁻³ sont à l'étude.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de l'aide de l'Agence Nationale de la Recherche au titre du projet UBRIS2 (ANR-13-BS09-0018).

Références

[1] J. Nilsson, B. Jaskorzynska, and P. Blixt, "Implications of pair-induced quenching for erbium-doped fiber amplifiers", in *Optical Amplifiers and Their Applications*, Vol. 14 of 1993 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1993), paper MD19.

[2] Y. Jeong, S. Yoo, C. A. Codemard, J. Nilsson, J. K. Sahu, D. N. Payne, R. Horley, P. W. Turner, L. Hickey, A. Harker, M. Lovelady, A. Piper, "Erbium: ytterbium codoped large-core fiber laser with 297 W continuous-wave output power", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 13, pp. 573-579 (2007).

[3] D. Jain, S. Alam, Y. Jung, P. Barua, M. N. Velazquez, and J. K. Sahu, "Highly efficient Yb-free Er-La-Al doped ultra-low NA large mode area single-trench fiber laser", Opt. Express **23**, 28282-28287 (2015).

[4] N V Kiritchenko, L. V. Kotov, M. A. Melkumov, M. E. Likhachev, M. M. Bobnov, M. V. Yshkov, A. Yu Laptev, and A. N. Guryanov, "Effect of ytterbium co-doping on erbium clustering in silica doped glass", *Laser Phys.* **25** 025102 (2015).

[5] L. V. Kotov, M. E. Likhachev, M. M. Bubnov, O. I. Medvedkov, M. V. Yashkov, A. N. Guryanov, J. Lhermite, S. Février, and E. Cormier, "75 W 40% efficiency single-mode all-fiber erbium-doped laser cladding pumped at 976 nm", Opt. Lett. **38**, 2230-2232 (2013).

[6] P. Cadroas L. Abdeladim L. Kotov, M. Likhachev, D. Lipatov, D. Gaponov, A. Hideur, M. Tang, J. Livet, W. Supatto, E. Beaurepaire, and S. Février, "All-fiber femtosecond laser providing 9 nJ, 50 MHz pulses at 1650 nm for three-photon microscopy," Journal of Optics (2017).

[7] V. R. Supradeepa, J. W. Nicholson, and K. Feder, "Continuous wave Erbium-doped fiber laser with output power of > 100 W at 1550 nm in-band core-pumped by a 1480nm Raman fiber laser", in *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2012), paper CM2N.8.

[8] J. Zhang, V. Fromzel, and M. Dubinskii, "Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency", Opt. Express **19**, 5574-5578 (2011).

[9] M. Dubinskii, V. Ter-Mikirtychev, J. Zhang, I. Kudryashov, "Yb-free, SLM EDFA: comparison of 980-, 1470- and 1530-nm excitation for the core- and clad-pumping", Proc. SPIE 6952, Laser Source Technology for Defense and Security IV, 695205 (April 14, 2008); doi:10.1117/12.782760.

[10] M. A. Jebali, J.-N. Maran, and S. LaRochelle, "264 W output power at 1585 nm in Er–Yb codoped fiber laser using in-band pumping", Opt. Lett. **39**, 3974-3977 (2014).

LASER A FIBRE BI-FREQUENCES IMPULSIONNEL ET ACCORDABLE EN CONFIGURATION THETA

Tobias Tiess², Mostafa Sabra¹, Romain Dauliat¹, Georges Humbert¹,

Matthias Jager² et Philippe Roy¹

¹ Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France ² Leibniz Institute of Photonic Technology, Albert-Einstein-Straβe 9, 07745 Jena, Germany mostafa.sabra@xlim.fr

Résumé

Nous présentons un nouveau concept de laser à fibre bi-fréquences, impulsionnel et accordable, basé sur une cavité en configuration Thêta, composée autour d'une ligne à retard à réseaux de Bragg. Ce laser nous a permis d'obtenir après amplification, 4,3 W de puissance moyenne et 1,95 KW de puissance crête.

MOTS-CLEFS : fibre dopée thulium, laser à fibre, double fréquence, FBG

1. INTRODUCTION

Les lasers accordables couvrent des domaines d'applications variés comme le médical, les télécommunications et les secteurs de la recherche et de l'industrie [1-2]. Offrant un spectre d'émission ajustable et souvent stabilisé, ces lasers sont de plus en plus utilisés dans la bio photonique et la spectroscopie [3]. Les lasers à fibre fournissent par ailleurs une excellente qualité de faisceau et des rendements élevés grâce à la structure de guide d'ondes. La nature vitreuse de la silice permet du surcroit aux fibres actives dopées terre rare de présenter un gain élevé sur des domaines spectraux de quelques dizaines à plus de cent nanomètres garantissant une bonne accordabilité. De nombreux travaux ont de surcroit été menés ces dernières années sur la montée en puissance des sources lasers à fibre dopée thulium, permettant de générer un signal laser de forte puissance moyenne autour de 2 µm [4-5]. Récemment, un nouveau mécanisme d'accordabilité a été démontré dans une cavité en configuration sigma utilisant une fibre dans laquelle des réseaux de Bragg de différentes périodes étaient inscrits (Fiber Bragg Grating en anglais 'FBG') de manière distribuée [6]. Une autre configuration a été développée récemment (configuration Theta), qui a permis d'obtenir un laser accordable autour de 1 µm, en utilisant une fibre active dopée ytterbium [7]. Cette configuration est également basée sur une ligne à retard composée de FBGs (FBG arrays) [6-7].

Dans ce papier, nous présentons dans un premier temps un nouveau design de laser basée sur la configuration Theta, mais qui émet autour de 2 µm des impulsions synchrones à deux longueurs d'onde. Un étage d'amplification utilisant une fibre monomode à grande section de cœur (LMA pour Large Mode Area) dopée thulium à maintien de polarisation a de plus été ajouté. La puissance moyenne obtenue après amplification est de 4,3 W, avec une puissance crête de 1,95 KW. Le contraste mesuré entre la raie laser et le niveau de bruit le plus élevé est de 43 dB pour une seule longueur d'onde, et 18 dB pour l'émission d'une double longueur d'onde. Nous terminons par une comparaison des résultats obtenus pour l'amplification avec deux fibres amplificatrices, une fibre commerciale et une fibre à plus grande section de cœur fabriquée par voie poudre.

2. FONCTIONNEMENT ET CARACTERISTIQUES DE LA CAVITE EN THETA

a) Montage expérimental :

Le concept de ce laser est basé sur une nouvelle configuration de cavité suivant le schéma en Thêta (Fig.1 (a)). Nous utilisons une ligne à retard le long de laquelle sont inscrits des FBGs à des longueurs d'onde différentes dans la branche centrale de la cavité. Dans cet exemple, l'accordabilité revendiquée n'est pas continue la ligne à retard utilisée accueillait 5 FBGs inscrits respectivement à 1960 nm, 1970 nm, 1984 nm, 1992 nm et 2010 nm. La cavité permet l'émission synchrone de deux longueurs d'onde avec une fréquence de répétition quasi constante sur toute la gamme de réglage. Le principe repose sur un double passage dans la ligne (par tour de cavité) qui permet d'annuler les retards caractéristiques pour chaque longueur d'onde. La figure 1 (a) nous montre le spectre à plusieurs points de la cavité pour l'émission mono longueur d'onde (Fig.1 (a)).



Fig.1 : (a) Principe de fonctionnement de la cavité en configuration Thêta pour l'émission mono longueur d'onde, (b) le montage pour l'émission bi fréquence avec amplification à fibre PM Tm.

La fibre active, dans notre cas une fibre dopée Thulium émettant autour de 2 μ m pompée à 790 nm, a la capacité d'amplifier une gamme spectrale étendue. Toutes les longueurs d'onde sont injectées via le circulateur 1 dans la ligne à retard et chaque FBGs réfléchit alors "sa" longueur d'onde en introduisant un délai qui dépend de sa position dans la ligne à retard. Les ondes réfléchies entrent maintenant dans la branche supérieure de la cavité pour être de nouveau injectés dans la branche centrale à travers un deuxième circulateur. Pour l'émission d'un train d'impulsions mono longueur d'onde, l'ouverture du modulateur est commandé par une double "porte" répétée avec une période correspondant au temps de parcours de la cavité. L'écart temporel entre les deux portes permet de sélectionner la longueur d'onde puisqu'il correspond au temps de "vol" aller et retour de l'impulsion entre le modulateur et le FBG correspondant. C'est à dire que le modulateur laisse passer l'impulsion à favoriser à l'aller vers la ligne à retard et au retour vers la fibre active et le coupleur de sortie. Nous avons utilisé un code LabVIEW pour contrôler le générateur de fonctions, la transmission du modulateur est périodiquement modulée avec la fréquence $1/T_{MP}$ (Modulator Period). Dans une période, deux ouvertures de transmission sont appliquées avec une séparation réglable τ_{1-2} et une largeur de τ_{GW} (Gate Width) (voir Fig.1).

Pour le fonctionnement en impulsions synchrones bi-fréquences, le modulateur est ouvert deux fois pour laisser passer les deux longueurs d'onde à sélectionner vers la ligne à retard. Les positions des réseaux FBG étant inversées puisque la ligne à retard est désormais parcourue par l'autre extrémité de la fibre, le décalage temporel des impulsions est compensé et les impulsions sont synchrones après réflexion. Le modulateur est à nouveau ouvert pour permettre l'émission des impulsions Fig.1 (b)). L'ajustement de τ_{1-3} et τ_{2-3} sélectionne les 2 longueurs d'onde souhaitées alors que la puissance des impulsions peut être égalisée en réglant l'amplitude des impulsions générées par le générateur de fonction. Ce montage nous a permis d'obtenir 0,65 W puissance moyenne et 54 W puissance crête, avec une durée d'impulsion de 7 ns et une fréquence de répétition de 1,7 MHz.

b) Amplification et résultats :

Nous avons ajouté en sortie de ce montage d'oscillateur (Fig.1 (a)) un second AOM (Fig.1 (b)), utilisé pour réduire la fréquence de répétition et un amplificateur de puissance intermédiaire pour amener la puissance moyenne émise à quelques watts. Un coupleur 10 dB est inséré pour visualiser le signal avant le passage par le combineur et la fibre PM Tm qui est pompée avec une diode de 27 W. Deux fibres dopées thulium ont été comparées. La première est une fibre commerciale (Nufern PM-GDF10 μ m/130 μ m) dont le diamètre de cœur est parfaitement adapté au combineur. La seconde a été développée spécialement avec un cœur plus gros pour repousser

l'apparition d'effets non linéaires (PM Tm 18 μm/200 μm). Cette dernière est une fibre triple gaine, le cœur dopé avec des ions thulium présente un diamètre de 18 μm, la première gaine qui accueille les deux plots de contrainte dopés au Bore, a un diamètre de 100 μm. La différence indicielle Δn entre l'indice du cœur et celui de cette gaine (dopée aluminium) est de 2.10⁻³ afin d'assurer que notre fibre soit monomode. La seconde gaine est constituée de silice pure et présente un méplat pour améliorer l'absorption de la pompe. Enduite de polymère bas indice, elle permet de guider le rayonnement de pompe multimode focalisé sur un diamètre de 200 μm. La pente d'efficacité obtenue avec cet amplificateur est de 45%. Après amplification, nous avons obtenu une puissance moyenne de 4,3 W, et 2,25 kW de puissance crête pour une durée d'impulsion de 7 ns, et un temps de répétition de 3498,24 ns, à 1960 nm (voir Fig.2 (a)).



Fig.2 : (a) La puissance moyenne et crête obtenus à 47 A de pompe, pour 3 différents FBG pour TMP=3498,24 ns, (b) Les résultats spectraux à 26,5 W de pompe, pour une seule longueur d'onde avec un contraste de 44 dB @1984 nm, (c) et pour double longueur d'onde avec un contraste de 18 dB.

Les spectres obtenus pour une émission mono longueur d'onde (1984 nm), et respectivement à deux longueurs d'onde (1970 nm et 1984 nm) sont présentés Fig. 2 (b) resp. (c) pour une puissance de pompage de 26,5 W. On peut remarquer que nous avons une seule raie avec un fort contraste de 44 dB pour une seule longueur d'onde (Fig. 2 (b)). Pour l'émission double longueur d'onde, le contraste chute à 18 dB car des raies latérales dues au mélange à quatre ondes sont apparues. Une puissance crête de 1,95 KW a été obtenue pour un temps de répétition de 3498,24 ns (Fig.2 (c)). A titre de comparaison les mêmes mesures ont été réalisées avec la fibre commerciale dont le diamètre de cœur est plus petit (10µm). Avec 23 W de pompe, et avec un temps de répétition de 583,04 ns, le contraste obtenu pour une seule longueur d'onde est de 22 dB avec une puissance crête de 350 W. Pour double longueur d'onde, le contraste obtenu avec la fibre commerciale est de 8 dB, avec une puissance crête de 350 W. Nous relevons donc logiquement l'apport d'une fibre à plus grande aire modale pour réduire l'impact du mélange à 4 ondes.

CONCLUSION

Dans ce papier, nous démontrons une nouvelle configuration de lasers à fibre impulsionnel et accordable. Avec ce laser, nous obtenons une puissance moyenne de 4,3 W, et une puissance crête de 1,95 kW, pour une émission bi-longueurs d'onde, avec une durée d'impulsion de 7 ns. De telles impulsions seront utilisées pour réaliser une source terahertz puissante et accordable.

Les auteurs remercient le COST MP1401 pour son soutien à ces travaux, et l'ANR pour le financement du projet TERATUNE (ANR 15-CE24-0031-01).

Références

- [1] F. J. Duarte, Tunable Laser Applications, 3rd ed. CRC Press, 2016
- [2] B. Liu et al., Laser Phys. Lett. vol. 44, n°6, 2009
- [3] T. Gottschall et al., Opt. Express, vol.23, n°18, 2015
- [4] G. D. Goodno et al., Optics Letters, vol. 34, n°8, 2009
- [5] P. F. Moulton et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol.15, n°1, 2009
- [6]T. Tiess et al., Proc. SPIE 9728, Fiber Lasers XIII, 97280N, 2016
- [7]T. Tiess et al., Optics Letters, vol. 42, n°6, 2017

EMISSION LASER DE HAUTE PUISSANCE MOYENNE ET CRETE AVEC DES FIBRES APERIODIQUES A LARGE AIRE MODALE

Marie-Alicia Malleville^{1,2}, Aurélien Benoit¹, Rémi Du Jeu^{1,3}, Romain Dauliat^{1,4}, Dia Darwich¹, Kay Schuster⁴, Raphael Jamier¹ et Philippe Roy¹

¹ Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France
 ² Eolite Systems, 11 Avenue de Canteranne, 33600 Pessac, France
 ³ Thales Optronique SA, Laser Solutions Unit, 2 avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt, France
 ⁴ Leibniz Institute of Photonic Technology, Albert-Einstein-Straße 9, 07745 Jena, Allemagne

marie-alicia.malleville@xlim.fr

Résumé

Nous présentons ici la première démonstration d'émission laser de haute puissance crête de 1,37 MW avec des fibres apériodiques à large aire modale.

MOTS-CLEFS : *Fibre micro-structurée à symétrie rompue ; fibre à large aire modale ; émission laser de haute puissance*

1. INTRODUCTION

Depuis le développement des fibres à double gaine, les lasers basés sur la technologie fibre ont connu une impressionnante montée en puissance émise (moyenne et crête) [1]. Cette évolution a été permise par le développement de structures de fibres à grande aire modale visant à propager une puissance moyenne élevée et des radiations à haute énergie afin de répondre aux besoins de multiples applications industrielles. Par ailleurs, l'élargissement des dimensions du cœur des fibres peut perturber la qualité spatiale du faisceau émis. Ainsi, de nouveaux concepts de fibres ont été développés à l'image des fibres à cristaux photoniques offrant un plus grand cœur optique. Cependant, en raison de l'échauffement du cœur lors de la montée de la puissance optique, un nouveau phénomène limitant, appelées instabilités modales transverses (IMT), a été mis en évidence en 2011 [2]. La modification du profil d'indice de réfraction induite par la charge thermique engendre un reconfinement des modes d'ordre supérieur (HOM), ce qui conduit à l'apparition d'un réseau longitudinal à longue période dans le cœur actif qui permet un couplage effectif entre le mode fondamental et un mode d'ordre supérieur (généralement le LP₁₁) [3]. Ce processus implique une forte dégradation de la qualité spatiale du faisceau émis. De nouvelles approches visant à lutter contre ce processus néfaste doivent donc être proposées.

2. FIBRES APERIODIQUES A LARGE AIRE MODALE

Afin d'améliorer le contenu modal dans le cœur de la fibre et de repousser le seuil d'apparition de ce phénomène, des structures de gaine micro-structurée apériodique ont été proposées pour exacerber la délocalisation des HOMs hors de la zone de gain et assurer ainsi l'amplification du seul mode fondamental [4]. La figure 1 montre une coupe transversale et le profil d'indice de ces fibres optiques apériodiques. La délocalisation efficace des HOMs a été démontrée récemment tout en préservant un fort confinement du mode fondamental dans le cœur des fibres passives [5]. Cette démonstration a été rendue possible en raison d'un indice de réfraction identique entre le cœur et la gaine de la fibre (*respectivement zone rouge et zone bleue claire sur la figure 1*), qui sont tous deux composés de silice pure dans le cas d'une fibre passive.

En outre, nous avons proposé de produire et fabriquer un matériau entièrement dopé avec un indice de réfraction élevé, homogène, par méthode "poudre" [7]. Ainsi, on peut obtenir une concentration d'ions de terres rares homogène et élevée sur toute la région du cœur alors que les fabrications conventionnelles par filamentation du cœur diluent les dopants avec des matériaux passifs d'indice faible pour obtenir un indice de réfraction parfaitement ajusté à celui de la silice pure

(constituant alors le matériau de fond de la gaine micro-structurée). De cette façon, le photonoircissement et la charge thermique peuvent être réduits dans le cœur de la fibre, permettant ainsi de repousser le seuil des IMT [6].



Fig. 1 : (a) Coupe transversale et (b) profil d'indice de la fibre apériodique à large aire modale. Le cœur est représenté en rouge, la gaine haut indice est en bleu clair, la silice pure en bleu foncé et la structure apériodique obtenue par l'ajout d'inclusions bas indice en jaune. L'anneau gris représente la gaine d'air.

3. MONTAGE EXPERIMENTAL ET RESULTATS

Dans cette communication, nous avons utilisé une fibre à grande aire modale apériodique identique à celle décrite dans la figure 1 et ayant un cœur entièrement dopé aux ions Yb³⁺. Les matériaux utilisés pour sa conception sont fabriqués par le procédé REPUSIL [7]. À l'aide d'un mesureur de profil d'indice de réfraction commercial (IFA), nous avons déterminé que l'indice de réfraction de la région du cœur dopé est en excès de l'ordre de $0,7.10^{-4}$ par rapport à celui du matériau de gaine passif (correspondant à la région bleue claire sur la figure 1). La fibre fabriquée a un diamètre de cœur de 60 µm (moyenne des mesures des distances entre les inclusions à faible indice entourant le cœur actif), ce qui correspond à une aire effective pour le mode fondamental à $\lambda = 1030$ nm de l'ordre de 2300 µm². Le diamètre de la gaine d'air est de 230 µm et le diamètre extérieur est de 1,2 mm (fibre rigide appelée fibre rod-type). Une fibre de 90 cm de long a été utilisée dans un montage expérimental d'amplification. Les deux faces de la fibre ont été préparées et polies avec un angle de 5°. Une représentation schématique de la configuration expérimentale est représentée dans la figure 2. Le laser d'injection (seeder) émet une puissance moyenne de 4 W avec des impulsions de 50 ps à une cadence de répétition de 2 MHz.



Fig. 2 : Représentation schématique du montage expérimental d'amplification utilisée ici avec en insert la fibre apériodique LMA de 60 μm fabriquée. Plusieurs systèmes d'analyse du faisceau émis sont également mis en place (mesure de la puissance et du paramètre M²).

Dans cette configuration d'amplificateur, une puissance moyenne signal de 137 W pour une puissance de pompe disponible de 300 W a été mesurée, ce qui correspond à une efficacité globale du système de 46 %. La puissance crête du signal émis atteinte pour ce montage expérimental est d'environ 1,37 MW pour une durée d'impulsion de 50 ps à un taux de répétition de 2 MHz. L'évolution de la puissance signal extraite ainsi que les distributions d'intensité mesurées en champ proche sont représentées dans la figure 3 (a). On ne peut observer aucune dégradation du faisceau émis lors de la montée en puissance. Les mesures de M², représentées en figure 3(b) et réalisées à la puissance moyenne maximale extraite de 137 W selon deux directions orthogonales entre elles, montrent une qualité de faisceau comprise entre 1,2 et 1,3.



Fig. 3 : (a) Evolution de la puissance moyenne extraite en fonction de la puissance de pompe (cette dernière étant limitée à 300W). En insert les distributions d'intensité mesurées en champ proche du faisceau laser émis.
 (b) Mesures du paramètre M² à la puissance signal maximale extraite de 137 W. Les mesures ont été effectuées selon deux directions orthogonales.

CONCLUSION

Nous rapportons ici la démonstration d'une émission de puissance crête élevée obtenue à l'aide d'une fibre à grande aire modale de 60 μ m de cœur dopé aux ions Yb³⁺ et fabriquée par la méthode REPUSIL. En utilisant une configuration expérimentale d'amplificateur, une puissance de sortie moyenne de 137 W a été extraite et correspond à une puissance crête de 1,37 MW avec une durée d'impulsion de 50 ps à un taux de répétition de 2 MHz. Les mesures du paramètre M² décrivant la qualité du faisceau sont inférieures à 1,3 selon deux directions orthogonales à l'intérieur du faisceau émis. Ce résultat représente la première démonstration en régime pulsé pour ce type de fibre.

Les auteurs remercient Eolite Systems, Amplitude Systèmes, Thales Optronics SA, Leukos et la région Nouvelle-Aquitaine pour leurs investissements dans le projet EATLase, ainsi que l'ANRT pour son soutien via l'attribution de la bourse CIFRE de Marie-Alicia Malleville.

Références

- [1] M.N. Zervas et al., IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 20, 5, (2014).
- [2] T. Eidam *et al.*, Opt. Exp. vol. 19, n°14, pp 13218-13224, (2011).
- [3] C. Jauregui *et al.*, Opt. Exp. vol. 20, n°12, pp 12912-12925, (2012).
- [4] R. Dauliat *et al.*, Opt. Exp. vol. 21, n°16, pp 18927-18936, (2013).
- [5] A. Benoit *et al.*, Opt. Lett. vol. 39, n°15, pp 4561-4564, (2014).
- [6] C. Jauregui et al., Opt. Exp. vol. 24, n°8, pp 7879-7892, (2016).
- [7] K. Schuster et al., Adv. Opt. Techn. vol. 3, n°4, (2014).

$Caracterisation \ \text{de la transition } 3F4-3H6 \ \text{dans les fibres silice} \\ \text{dopees thulium et simulation d'un amplificateur } 2 \mu \text{m}$

Clément Romano^{1,2}, Robert E. Tench³, Jean-Marc Delavaux³

¹ Cybel LLC, 4715B Eisenhower Avenue, Alexandria, VA 22304, USA
 ² Institut Télécom/Télécom ParisTech, 46 Rue Barrault, 75013 Paris, France
 ³ Cybel LLC, 1195 Pennsylvania Avenue, Bethlehem, PA 18018, USA.

clement.romano@cybel-llc.com

Résumé

Nous présentons les mesures d'absorption, de gain et de temps de vie réalisées sur deux fibres commerciales dopées thulium. La comparaison entre des résultats de simulation et d'expérimentation d'un amplificateur à 1952 nm montre un bon accord.

MOTS-CLEFS : *thulium ; caractérisation ; amplificateur ; pompage cœur*

1. INTRODUCTION

Des mesures précises et rigoureuses de l'absorption, du gain et du temps de vie de la transition ${}^{3}F_{4}$ - ${}^{3}H_{6}$ des fibres silices dopées thulium sont nécessaires pour simuler et comparer ces différentes fibres actives. La précision des mesures affecte directement la précision d'un modèle de simulation. Nous avons étudié deux fibres commerciales : OFS TmDF200 et iXBlue IXF-TDF-4-125-v2 dont les caractéristiques sont regroupées dans la Table 1. Grâce à ces mesures et un outil de simulation, nous comparons des données expérimentales et simulées pour un amplificateur à 1952 nm, et une bonne concordance est établie. Un tel modèle peut être utilisé pour concevoir des amplificateurs en mode continu ou pulsé pour des applications de télécommunication ou LIDAR.

Fibre	OFS	iXBlue
Cœur Ø (µm)	4	5,3
ON (u.a.)	0,26	0,17
Abs @ 793 nm (dB.m ⁻¹)	175	370
Co-dopant	Al, La	Al, Ge
Tm Densité (m ⁻³)	8.84x10 ²⁵	/

Table 1 : Spécifications pour la fibre d'iXBlue et d'OFS d'après les données fabricant et la littérature[1].

2. CARACTERISATION DES FIBRES THULIUM SIMPLE GAINE

Le temps de vie est mesuré grâce à un pompage pulsé. La fluorescence se propageant contra autour de 1,8 μ m est mesuré longitudinalement. La courbe observée est une somme de deux exponentielles[2], la longue décroissance est le temps de vie intrinsèque du niveau. Pour la fibre d'OFS il a été mesuré à 650 μ s (voir Fig. 1), 475 μ s pour la fibre d'iXBlue. L'absorption petit signal a été mesuré avec un laser accordable et une source ASE combiné avec une technique de coupes arrière successives (voir Fig. 2). Le coefficient de gain petit signal des fibres a été mesuré/calculé par trois méthodes différentes, voir Fig. 2. La première est basée sur la technique de la fluorescence saturée[3]. Pour la second méthode, on injecte un petit signal à 2050 nm à travers le système précédent et on mesure son amplification[4]. La troisième et dernière méthode applique la formule de McCumber sur l'absorption précédemment mesuré[3].

Les différences observées entre la fibre d'iXBlue et d'OFS sont listé dans la Table 2, et peuvent être expliquées par la composition du cœur : co-dopants, et proportion en co-dopants.



Fig. 1 : Temps de vie mesuré avec son approximation par deux exponentielles pour la fibre d'OFS et d'iXBlue.



Fig. 2 : Absorption, gain, gain McCumber et amplification petit signal à 2050 nm pour les fibres commerciales d'OFS et d'iXBlue.

Fibre		iXBlue	OFS
Aha	λ_{pic} (nm)	1643	1645
ADS	LMH (nm)	195	180
Cain	λ_{pic} (nm)	1801	1818
Gain	LMH (nm)	301	298

Table 2 : Caractéristiques spectrales de la fibre d'OFS et d'iXBlue.



3. SIMULATION D'UN AMPLIFICATEUR SIMPLE ETAGE

Fig. 3: Puissance de sortie en fonction de la puissance de pompe contra-propagative pour un amplificateur composé de 7 m de fibre OFS.

En combinant notre logiciel de simulation[5], les paramètres que l'on a mesurés sur la fibre

d'OFS et d'autres valeurs pertinentes[1], [6], nous simulons et évaluons un amplificateur pompé dans le cœur. Toutes les données affichées sont relative à la fibre active.

La puissance de sortie en fonction de la puissance de pompe contra-propagative est simulée et la différence aux résultats expérimentaux se situe en dessous de 2 dB pour une densité de $8,4x10^{25}$ m⁻³, et en dessous de 1 dB pour une densité de $9,5x10^{25}$ m⁻³, voir Fig. 3. L'amplificateur est ensuite opéré à pleine puissance de pompe et la puissance de signal en entrée est variée, voir la Fig. 4. La figure de bruit est aussi mesurée, simulée et se trouve entre 3 et 3,5 dB en moyenne en dessous de -10 dBm de puissance de signal d'entrée.



Fig. 4: Gain signal en fonction de la puissance de signal d'entrée à puissance de pompe maximale.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons établi une méthode de caractérisation pour mesurer trois paramètres importants de fibres commerciales dopées thulium d'OFS et d'iXBlue. Ces paramètres sont l'absorption, le gain et le temps de vie de la transition ${}^{3}F_{4} - {}^{3}H_{6}$. Nos mesures produisent des données précises et rigoureuses qui pourraient être utilisées dans un logiciel de simulation pour modéliser des fibres simple gaine dopées au thulium. En particulier, on valide l'utilisation de ces paramètres grâce à la simulation d'un amplificateur. La simulation montre un accord de 1 dB par rapport à la puissance de sortie mesurée. De plus, la simulation du gain petit signal et les données expérimentales montrent un gain de 40 dB à 1952 nm.

Les auteurs souhaitent remercier iXBlue Photonics et OFS pour avoir fourni les fibres actives, et Eblana pour avoir fourni le laser mono-fréquence à 2050 nm.

Références

- [1] S. D. Agger and J. H. Povlsen, "Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers.," *Opt. Express*, vol. 14, pp. 50–57, 2006.
- [2] P. F. Moulton, G. A. Rines, E. V Slobodtchikov, K. F. Wall, G. Frith, B. Samson, and A. L. G. Carter, "Tm-Doped Fiber Lasers: Fundamentals and Power Scaling," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, no. 1, pp. 85–92, 2009.
- [3] R. E. Tench and M. Shimizu, "Fluorescence-based measurement of $g^*(\lambda)$ for erbium-doped fluoride fiber amplifiers," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1559–1564, 1997.
- [4] C. R. Giles, C. A. Burrus, D. J. DiGiovanni, N. K. Dutta, and G. Raybon, "Characterization of Erbium-Doped Fibers and Application to Modeling 980-nm and 1480-nm Pumped Amplifiers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 363–365, 1991.
- [5] C. Romano, R. E. Tench, Y. Jaouën, and G. M. Williams, "Simulation and design of a multistage 10W thulium-doped double clad silica fiber amplifier at 2050nm," 2017, p. 100830H.
- [6] M. A. Khamis and K. Ennser, "Theoretical Model of a Thulium-doped Fiber Amplifier Pumped at 1570 nm and 793 nm in the Presence of Cross Relaxation," vol. 34, no. 24, pp. 5675–5681, 2016.

Systeme laser thulium tout fibre delivrant des impulsions sub-2 ps avec des energies approchant les 20 μJ

D. Gaponov*1, L. Lavoute¹, S. Février^{1,2}, A. Hideur^{1,3}, N. Ducros¹

 ¹ Novae, Zone artisanale de Bel Air, 87700 Saint Martin le Vieux, Limoges, France, ²Xlim CNRS UMR 7252, 123 Av. Albert Thomas 87060 Limoges, France
 ³CORIA CNRS UMR 6614, Av. de l'Université, 76801 St Etienne du Rouvray, France

d.gaponov@novae-laser.com

Résumé

Nous présentons un système amplificateur à dérive de fréquence à base de fibres optiques dopées aux ions thulium opérant à 1940 nm. Le système totalement fibré délivre des impulsions de 550 ps de durée avec plus de 24 μ J d'énergie à un taux de répétition de 100 kHz. Après compression, des impulsions de 1,8 ps de durée et 19 μ J d'énergie sont obtenues.

MOTS-CLEFS : *impulsions ultracourtes, amplificateur thulium, oscillateur à fibre à verrouillage de modes*

1. INTRODUCTION

Les sources lasers ultrarapides de puissance opérant dans la gamme spectrale autour de 2 microns font l'objet d'intenses recherches actuellement en raison des nombreuses applications scientifiques et industrielles qu'elles peuvent adresser telles que le pompage des amplificateurs paramétriques optiques (OPA) opérant dans l'infrarouge [1] ou l'usinage de matériaux mous [2]. L'accroissement des performances de ces systèmes est étroitement lié au développement des composants optiques de base qui, dans cette bande spectrale, n'est pas encore aussi avancé que pour le proche infrarouge (λ <1,55 microns). Néanmoins, des progrès significatifs ont été accomplis notamment grâce à l'exploitation des fibres microstructurées de type barreau qui permettent d'atteindre des puissances crêtes de l'ordre 4 GW avec des impulsions sub-50 fs dans des configurations de laboratoire [3]. Ces sources sont principalement destinées à faire partie de machines industrielles pour assurer le traitement des polymères, des plastiques ou même des matières organiques [4]. Le développement d'une source laser puissante et compacte (entièrement fibrée) présente donc un intérêt majeur pour des applications industrielles telles que le traitement des matières plastiques même avec des impulsions de quelques picosecondes de durée [5]. Des systèmes laser fibrés thulium délivrant des impulsions sub-picosecondes de quelques microjoules d'énergie ont été déjà rapportés dans la littérature [6,7].

Dans cette communication, nous montrons que l'utilisation d'éléments fortement dispersifs (fibrés ou solides) permet d'augmenter significativement les performances d'un système laser totalement fibré émettant des impulsions picosecondes à 1940 nm. Ce système laser délivre des impulsions de 1,8 ps de durée avec une énergie de 19 μ J. La modélisation numérique permet de prédire avec une grande fidélité les performances de la source et ainsi donner une bonne estimation de la puissance crête des impulsions produites qui est proche de 6,7 MW.

2. MONTAGE EXPERIMENTAL

Le synoptique du montage expérimental du système laser est présenté sur la Fig. 1. Les impulsions générées par un oscillateur [8] opérant en régime de dispersion normale sont étirées à une durée de 550 ps dans un étireur à réseau de Bragg fibré à pas variable. Un préamplificateur à fibre dopée thulium pompé dans le cœur est inséré juste avant le modulateur acousto-optique (AOM) pour compenser les pertes d'insertion. Le taux de répétition des impulsions peut ainsi être

abaissé de 10 MHz à 50 kHz. Le dernier étage d'amplification est destiné à un fonctionnement à haute énergie et basse cadence. Il s'appuie sur une fibre à grande aire modale dopée au thulium $(d_{coeur} \sim 25 \ \mu m)$. Le signal provenant de l'étage amplificateur N1 est ajusté à une puissance moyenne de 100 mW environ. Deux diodes laser multimodes émettant à 793 nm permettent d'atteindre une puissance de 23 W qui est injectée dans la gaine de la fibre thulium de l'amplificateur de puissance N2 via un combineur de pompe et signal. L'étage de compression est composé d'un réseau de Bragg volumique utilisé en double passage. Une efficacité de compression de 85% est ainsi atteinte.



Fig. 1 : a) Montage expérimental b) schéma du compresseur à double passage.

3. PERFORMANCES DE LA CHAINE LASER

Pour atteindre des durées d'impulsions à la limite de Fourier, l'ajout d'une fibre à compensation de dispersion (DCF) dans la chaine est nécessaire pour compenser les écarts entre le compresseur et l'étireur. Les résultats obtenus en utilisant une fibre à dispersion normale (L_{DCF} = 33 m) sont présentés sur la Fig. 2. Nous constatons que des impulsions proches de la limite théorique avec 1,8 ps de durée pour un spectre de 7,8 nm de largeur sont obtenues après l'étage de compression (Fig. 2a).



Fig.2: a) Durée des impulsions comprimées en fonction de la largeur spectrale pour L_{DFC}=33m, b) puissance moyenne extraite de l'amplificateur en fonction de la puissance de pompe à 100 kHz de taux de répétition (courbe en rouge) et trace d'autocorrélation mesurée en sortie du système pour une puissance moyenne après compression de 1,9W et c) spectres optiques mesurés avant et après compression.

Dans le cas de la fibre DCF de 33 m, la largeur spectrale des impulsions émises par l'oscillateur a été ajustée à 7,8 nm, comme indiqué sur la figure 2a. Les impulsions mesurées après l'étireur présentent alors une durée de 550 ps. Le régime d'amplification linéaire est ainsi préservé jusqu'au maximum de puissance de pompe disponible et la puissance moyenne extraite atteint alors 2,4W à 100 kHz de taux de répétition (Fig. 2.b). Après un double passage dans le compresseur, nous mesurons 1,9W de puissance moyenne ce qui correspond à 19 μ J d'énergie par impulsion. La trace d'autocorrélation mesurée au maximum de puissance est présentée sur la Fig. 2b. L'analyse des mesures d'autocorrélation montrent que le pic central concentre 63 % de l'énergie totale mesurée, ce qui correspond à une puissance crête de 6,7 MW pour des impulsions de 1,78 ps de

durée. Les spectres optiques mesurés avant et après le compresseur sont présentés sur la figure 2c. Ce système laser présente des fluctuations en puissance de l'ordre de +/-2,5% à pleine puissance.



Fig.3: Variation dans le temps de la puissance moyenne en sortie du système laser à plein régime.

CONCLUSION

L'implémentation de composants fortement dispersifs dans une chaine laser fibrée nous a permis d'atteindre des performances inédites pour un système totalement fibré et ainsi approcher la barrière des 20 μ J à 1940 nm. Le système délivre des impulsions de 1,78 ps de durée à un taux de répétition de 100 kHz dont la puissance crête est évaluée à 6,7 MW. Ce système laser présente un fonctionnement stable avec +/- 2,5 % de fluctuations en puissance.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de l'aide de la région Limousin, de BPI France Limousin et de l'Agence Nationale de la Recherche au titre du projet UBRIS2 (ANR-13-BS09-0018).

Références

[1] P. Malevich, T. Kanai, H. Hoogland, R. Holzwarth, A. Baltuška, A. Pugžlys, "Broadband mid-infrared pulses from potassium titanyl arsenate/zinc germanium phosphate optical parametric amplifier pumped by Tm, Ho-fiber-seeded Ho:YAG chirped-pulse amplifier," Opt. Lett. **41**, 930-933, 2016.

[2] T. Hoult, "Understanding processing with thulium fiber lasers," Industrial Laser Solutions, 27 (2013).

[3] M. Gebhardt, C. Gaida, F. Stutzki, S. Hädrich, C. Jauregui, J. Limpert, A. Tünnermann, "High average power nonlinear compression to 4 GW, sub-50 fs pulses at 2 μm wavelength," Opt. Lett. 42, 747-750, 2017.
[4] <u>http://www.jenasurgical.com/en/multipulse-tm1470/</u>

[5] R. Mayerhofer, J. Serbin, F. W. Deeg, "Picosecond and femtosecond lasers for industrial material processing", *Proc. SPIE 9740*, 974015, 2016.

[6] P. Wan, L.-M. Yang, J. Liu, "High pulse energy 2 μm femtosecond fiber laser," Opt. Express **21**, 1798-1803, 2013.

[7] F. Tan, H. Shi, R. Sun, P. Wang, P. Wang, "1 µJ, sub-300 fs pulse generation from a compact thuliumdoped chirped pulse amplifier seeded by Raman shifted erbium-doped fiber laser," Opt. Express **24**, 22461-22468, 2016.

[8] D. Gaponov, L. Lavoute, S. Février, A. Hideur and N. Ducros, "2µm all-fiber dissipative soliton master oscillator power amplifier", Proc. SPIE **9728**, 972834, 2016.

PROPAGATION A POLARISATION UNIQUE DANS DES FIBRES APERIODIQUES A LARGE PITCH A TRES GRANDE AIRE MODALE A $2\mu m$

Dia Darwich¹, Rémi du Jeu^{1,2}, Marie-Alicia Malleville^{1,3}, Mostafa Sabra¹, Romain Dauliat¹, Aurélien Benoît¹, Raphaël Jamier¹, Kay Schuster⁴, Georges Humbert¹ et Philippe Roy¹

¹ Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France
 ² Thales Optronique SA, Laser Solutions Unit, 2 avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt, France
 ³ Eolite Systems, 11 avenue de la Canteranne, 33600 Pessac, France
 ⁴ Leibniz Institute of Photonic Technology, Albert-Einstein-Straße 9, 07745 Jena, Germany dia.darwich@xlim.fr

Résumé

Un taux d'extinction de polarisation supérieur à 13dB, mesuré autour de $2\mu m$, est obtenu dans des fibres de 45cm de long avec des dimensions de cœur allant de 60 à 140 μm .

MOTS-CLEFS : fibres optiques polarisantes, fibres à grande aire modale

1. INTRODUCTION

Le développement de sources lasers émettant autour de 2µm répond à des besoins exprimés dans différents secteurs tant civils que militaires tels que la médecine, l'environnement et la défense. Pour la plupart de ces applications, le faisceau laser émis doit être puissant, monomode transverse et polarisé. Il est cependant difficile de pouvoir répondre avec une architecture de fibre unique à ce triptyque. Des fibres dopées avec des ions thulium, combinant de très grands diamètres de cœur (80µm, correspondant à des MFD autour de 60µm) et une bonne qualité du faisceau émis ont déjà été fabriquées sous la forme de fibres rigides (fibres rod-type) [1,2], mais sans intégrer le contrôle de l'état de polarisation. Récemment, un travail théorique a conduit à la proposition d'un design de fibre alliant un très gros cœur (80µm de diamètre) et l'émission d'un mode fondamental polarisé rectilignement [3]. Le second état de polarisation du mode fondamental est en effet supprimé au travers d'un couplage avec un mode de gaine lorsque la fibre est courbée (33cm < R_c < 40cm). Cependant l'application d'une telle courbure sur une structure présentant un très grand diamètre de cœur (D_c > 50µm) induit nécessairement une déformation du faisceau émis réduisant nécessairement la valeur de l'aire effective du mode guidé (A_{eff} = 2600µm² dans [3]).

Nous montrons dans cette communication que les structures de fibres appelées PZ FA-LPF (fibres polarisantes à large pitch à symétrie rompue), déjà validées à 1 μ m [4], permettent de combiner un très grand diamètre de cœur et l'émission quasi-monomode d'un faisceau à polarisation unique à 2 μ m sans l'application d'une courbure. La démonstration expérimentale effectuée ici est basée sur des fibres passives (cœur non dopé activement) de manière à éviter toute désadaptation indicielle entre le cœur actif et la gaine optique.

2. FIBRE PZ FA-LPF SELECTIONNEE POUR L'ETUDE A $2\mu m$

En prenant comme point de départ les structures de fibres rigides (rod-type) à large pitch à symétrie rompue que nous avons développé à 1 μ m, nous avons récemment proposé plusieurs architectures dérivées permettant de rendre ces mêmes fibres polarisantes (fibres appelées PZ FA-LPF) [4]. Le profil d'indice 2D d'une de ces structures est montré sur la figure 1.a. La gaine optique est formée par 12 inclusions bas indice (faites de silice dopée fluor, représentées en bleu clair dans la fig. 1.a) positionnées d'une manière apériodique autour du cœur afin d'assurer une forte délocalisation des modes d'ordre supérieur (HOMs) hors de la zone de cœur. Six autres inclusions, faites de silice dopée bore (en jaune dans la fig.1.a), sont ajoutées dans la gaine afin d'induire un champ de stress dans la zone de cœur visant à discriminer les deux polarisations du mode fondamental. Nous avons alors montré à 1 μ m qu'il est possible d'éliminer une des deux

polarisations du mode fondamental en utilisant un couplage entre cette dernière et un mode de gaine. Ainsi, seule l'un des deux états de polarisation du mode fondamental existe et est guidé, assurant l'émission d'un mode unique polarisé. Le matériau constituant le fond de la structure (représenté en bleu foncé dans la fig. 1.a) est fait de silice pure. Le cœur est donc passif, *i.e.* non dopé avec des ions de terres rares, de manière à ce que le couplage sur lequel est basée la démonstration ne soit pas altéré par une possible désadaptation d'indice entre la zone de cœur et la zone de gaine. Une image de la section transverse d'une telle fibre PZ FA-LPF fabriquée est représentée sur la figure 1.b. Le diamètre externe de ces fibres varie entre 1 et 3mm.





Fig. 1 : (a) profil d'indice 2D de la structure PZ FA-LPF proposée et utilisée ici. (b) image d'un zoom sur la partie centrale de la section transverse de la fibre fabriquée (la fibre a été fabriquée avec 3 dimensions de cœur différents : 60, 100 et 140μm).

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX A $2\mu m$

Afin de caractériser la fibre PZ FA-LPF passive autour de 2μ m, une source laser non polarisée à spectre étroit a été réalisée dans un premier temps à l'aide i) d'une fibre dopée thulium à triple gaine présentant un diamètre de cœur de 18μ m [5] dont l'une des extrémités intègre la présence d'un réseau de Bragg à 1942nm (largeur spectrale < 2nm) et ii) d'une diode de pompe à 790nm. Le faisceau laser non-polarisé ainsi généré est ensuite injecté dans la fibre rigide PZ FA-LPF sous test (L = 45cm) à l'aide d'un jeu de miroirs (M1, M2 et M3) et d'une lentille d'injection (L_i) comme le montre le schéma de la figure 2. Le faisceau en sortie de la fibre FA-LPF sous test est alors collimaté au travers d'un polariseur de manière à analyser l'état de polarisation du rayonnement émis puis envoyé sur une caméra pyro-électrique. Il est à noter que la même structure de fibre PZ FA-LPF a été fabriquée avec trois tailles de cœur différents (60, 100 et 140µm) et nous rapportons par la suite les résultats obtenus avec ces 3 fibres.



Fig. 2 : Schéma du montage expérimental réalisé. M1 est un miroir dichroïque (HT @ 790nm et HR @ 2μ m). M2 et M3 sont deux miroirs or.

Pour chacune d'elles, le contenu modal a été analysé. Pour ce faire, l'évolution de la distribution de l'intensité du champ électrique correspondant au mode émis en sortie de la fibre sous test est observée sur la caméra lors de la translation de la lentille d'injection dans le plan transverse (L_i sur la fig.2). Le but est ici d'exciter volontairement d'éventuels HOMs pouvant exister dans le cœur de la fibre sous test. Les résultats obtenus pour la fibre PZ FA-LPF ayant un diamètre de cœur de 140µm sont illustrés dans la figure 3. On constate qu'en décalant le faisceau injecter à l'entrée de la fibre sous test, le mode fondamental fuit hors du cœur mais qu'aucun HOM n'apparait. Cette observation montre que la structure PZ FA-LPF favorise la délocalisation des HOMs même pour une taille de cœur de 140µm.



Fig. 3 : Evolution de la distribution de l'intensité du mode émis mesuré ($\lambda_0 = 1942$ nm) en sortie de la fibre PZ FA-LPF ($D_{ccur} = 140 \mu$ m, L = 45cm) en décalant les conditions à l'entrée de la fibre.

Ensuite, l'état de polarisation du faisceau émis à la sortie de la fibre PZ FA-LPF a été analysé en tournant le polariseur. Les images de mode mesurées sur la caméra, pour les trois dimensions de cœur, sont rassemblées dans la figure 4 pour une rotation du polariseur allant de 0° à 90°. On remarque qu'au cours de la rotation du polariseur l'intensité détectée par la caméra diminue progressivement dans la zone de cœur jusqu'à l'obtention d'une forte extinction. Ces résultats confirment que la puissance extraite en sortie de la fibre PZ FA-LPF à $\lambda = 1942$ nm est majoritairement portée par un seul état de polarisation du mode fondamental.



Angle de polariseur

Fig. 4 : Evolution de la distribution d'intensité en tournant le polariseur à la sortie de la fibre PZ FA-LPF pour trois dimensions de fibre différentes à 1942nm.

Enfin le taux d'extinction de polarisation (PER) a été mesuré. Pour ce faire, la puissance extraite à la sortie de la fibre PZ FA-LPF a été mesurée avec un analyseur de spectre optique (OSA) en utilisant une fibre de collection multimode dont le diamètre de cœur dépend de celui de la fibre sous test (cf. schéma fig. 2). Les valeurs mesurées sont représentées dans le tableau 1. Une valeur de PER supérieure à 13dB a été obtenue pour les 3 fibres PZ FA-LPF testées. La prochaine étape dans ce travail sera de fabriquer une fibre PZ FA-LPF dopée thulium.

Tab. 1 : Synthèse des résultats obtenus pour les 3 fibres PZ FA-LPF sous test (mesures faites à $\lambda = 1942$ nm)

Taille du cœur (µm)	60	100	140
Aire effective calculée (µm ²)	3637	8231	14590
Diamètre du cœur de la fibre de collection (µm)	50	100	100
PER mesuré (dB)	19,5	13,5	16,5

CONCLUSION

Un taux d'extinction de polarisation supérieur à 13dB, mesuré autour de $2\mu m$, est obtenu dans des fibres de 45cm de long avec des dimensions de cœur allant de 60 à 140 μm . Ces fibres polarisantes n'étant pas basées sur la courbure du guide d'onde permettent de conserver des aires effectives très élevées pour le mode guidé.

Les auteurs remercient la COST MP 1401 pour son soutien financier sur une mission à courte durée à Jena.

REFERENCES

- [1] C. Gaida et al., Optics Letters, vol. 37, n°21. 2012
- [2] F. Jansen et al., Optics Letters, vol. 37, n°21. 2012
- [3] C. Molardi et al, IEEE Phot. Tech. Lett., vol. 28, n°22. 2016
- [4] R. Du Jeu et al, Optics Letters, vol. 42, n°8. 2017
- [5] D. Darwich et al, Optics Letters, vol. 41, n°2, 2016

LASER POLARISE BASE SUR UNE FIBRE LMA APERIODIQUE A LARGE PITCH DOPEE YTTERBIUM

Rémi du Jeu^{1,2}, Romain Dauliat¹, Aurélien Benoît¹, Dia Darwich¹, Marie-Alicia Malleville^{1,3}, Raphaël Jamier¹, Kay Schuster⁴ et Philippe Roy¹

¹ Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France
 ² Thales Optronique SA, Laser Solutions Unit, 2 avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt, France
 ³ Eolite Systems, 11 avenue de la Canteranne, 33600 Pessac, France
 ⁴ Leibniz Institute of Photonic Technology, Albert-Einstein-Straβe 9, 07745 Jena, Germany

remi.dujeu@xlim.fr

Résumé

Nous rapportons la fabrication d'une fibre biréfringente apériodique à large pitch ayant un cœur dopé ytterbium avec une dimension proche de 47µm. Placée dans une cavité laser sans éléments polarisants supplémentaires, un écart de puissance de 12dB est observé entre les deux axes neutres en sortie d'une fibre de 88cm de long.

MOTS-CLEFS : *fibres à large pitch, fibres LMA, fibres biréfringentes*

1. INTRODUCTION

Les fibres optiques dopées avec des ions de terres rares se sont imposées dans les systèmes laser grâce à leur bonne qualité et stabilité temporelle de faisceau émis ainsi que leur capacité de dissipation thermique. L'apparition des effets non-linéaires dans ces fibres, dont le seuil est proportionnel à l'aire effective du mode fondamental guidé et inversement proportionnel à la longueur de la fibre, limite cependant la montée en puissance. Dans le but de repousser ce seuil et de conserver une bonne qualité de faisceau émis (i.e. de conserver une propagation monomode transverse), des architectures de fibres à large aire modale (*fibres LMA*) ont été développées telles que les fibres à bandes photoniques interdites [1,2], les fibres à filtrage de modes distribués (fibres DMF) [3] ou encore les fibres dites à "large pitch" qui constituent aujourd'hui l'état de l'art pour l'obtention de hautes puissances moyennes en régime impulsionnel [4,5]. En outre, pour plusieurs applications comme la conversion de fréquence [6] nécessitant de contrôler la polarisation du faisceau laser, il est intéressant de développer des fibres LMA à maintien de polarisation (fibres dites PM). Récemment, nous avons étudié et fabriqué des fibres passives à large pitch basées sur une gaine optique microstructurée à symétrie rompue incluant des éléments de contraintes mécaniques (cf. figure 1) [7]. Ces derniers, qui sont des barreaux de silice dopée bore, ont pour but de rendre la structure biréfringente de manière à permettre la discrimination des deux états de polarisation du mode fondamental. Nous avons alors montré qu'il est possible de placer judicieusement ces barreaux de manière à ce que le mode fondamental porté par l'axe rapide subisse un couplage modal avec un mode de gaine, l'évacuant ainsi de la zone de cœur, et rendant ces fibres polarisantes. Un taux d'extinction de polarisation (PER) de 19 dB a été mesuré à $\lambda = 1030$ nm pour une fibre ayant une dimension de cœur de 60µm et une longueur de 1m.



Fig. 1 : (a) profil d'indice 2D de la structure de fibre "FA-LPF 6SAP" proposée dans [7] et utilisée dans cette communication. Le bleu foncé correspond à de la silice pure, le bleu à de la silice dopée aluminium et le bleu clair à de la silice dopée fluor. Le rouge correspond à de la silice dopée ytterbium et le jaune correspond aux éléments de contraintes mécaniques (silice dopée bore). (b) section transverse de la fibre fabriquée correspondante.

Dans cette communication, nous présentons les premiers résultats obtenus avec la même architecture de fibre dont la zone de cœur est cette fois-ci dopée ytterbium et utilisée dans un oscillateur laser.

2. FABRICATION DE LA FIBRE "FA-LPF 6SAP" ACTIVE

La section transverse de la structure de fibre "FA-LPF 6SAP" proposée théoriquement dans [7] est présentée sur la Fig. 1(a). Le cœur constitué de 19 barreaux de silice dopée ytterbium est schématisé en rouge, la gaine microstructurée à symétrie rompue étant représentée en bleu. Cette dernière est constituée d'un matériau fait de silice dopée aluminium (bleu) de manière à avoir un indice de réfraction identique à celui de la zone de cœur, dans lequel sont distribués sur une maille apériodique des plots ayant un indice de réfraction abaissé (faits de silice dopée fluor, en bleu clair sur la Fig.1(a)). Une seconde gaine faite de silice pure entoure la première (bleu foncé sur la Fig.1(a)). Enfin les six barreaux de contraintes mécaniques (faits de silice dopée bore) ajoutés dans la gaine microstructurée sont schématisés en jaune. Leur nombre et le choix de leur emplacement dans la gaine sont expliqués dans la référence [7]. Cette fibre active a été fabriquée et une image de sa section transverse est montrée sur la Fig. 1(b). Bien que lors du fibrage, la structure interne de la fibre se soit légèrement déformée (cf. le cadran en bas à droite sur la Fig. 1(b)), le mécanisme de guidage demeure conservé puisque la maille apériodique est peu affectée par cette déformation. Cependant des mesures d'indice de réfraction effectuées d'une part sur le matériau actif du cœur et d'autre part sur le matériau passif constituant le fond de la gaine apériodique (les valeurs de ces deux indices doivent théoriquement être identiques) ont montré une désadaptation d'indice de l'ordre de 8.10⁻⁵, le cœur ayant un indice supérieur à celui de la gaine microstructurée. Cette légère désadaptation indicielle a deux conséquences directes : i) la dimension du cœur doit rester limitée afin de garantir une propagation quasi-monomode et ii) le couplage théoriquement attendu pour éliminer un des deux états de polarisation du mode fondamental ne peut avoir lieu (la biréfringence théorique étant estimée à $3,23.10^{-5}$ soit inférieure au décalage indiciel entre le cœur et la gaine). Toutefois la discrimination entre les deux états de polarisation du mode fondamental existe toujours rendant la fibre PM. La fibre étudiée ici présente donc une dimension moyenne du cœur actif de $47\mu m$ équivalent à une surface active de $1730\mu m^2$. La gaine haut-indice (zone la plus claire sur la Fig.1(b)) mesure 110µm x 130µm. Une gaine d'air de 160µm de diamètre externe a été ajoutée lors de la fabrication. Le diamètre externe de la fibre est de 900µm.

3. MONTAGE DU LASER POLARISE

Un échantillon de 88cm de long de la fibre "FA-LPF 6SAP" a été placé dans le montage laser décrit sur la Fig. 2(a). Dans cette configuration, la cavité laser est réalisée entre la réflexion à 4% au niveau de l'interface air-silice de la face de sortie de la fibre polie à 0° et un miroir à haute réflectivité à 1030nm (noté HR1030 sur la Fig. 2(a)). Deux miroirs dichroïques, M1 et M2, servent respectivement à rediriger la radiation laser vers le miroir de fond de cavité et à séparer le faisceau laser et la pompe résiduelle. Une lame demi-onde et un cube séparateur, tous deux fonctionnant à 1030nm, ont été ajoutés sur le bras de sortie pour analyser les états de polarisation du mode fondamental. Il est important de noter qu'aucun élément polarisant n'est présent dans la cavité laser mis à part la fibre PM active. La figure 2(b) représente l'évolution de la puissance signal mesurée sur les deux axes de sortie du cube lorsque l'angle de la lame demi-onde varie, et ce pour une puissance de pompe fixe de 50W. Alors que la puissance signal totale mesurée (somme des puissances transmise et réfléchie) demeure constante avec une variation inférieure à 5%, la puissance portée sur chaque axe de sortie du cube varie de manière sinusoïdale avec une alternance entre un maximum et un minimum correspondant à une rotation de 45° de la lame demi-onde, soit une rotation de 90° de l'état de polarisation quasi-linéaire présent en sortie de la fibre laser. Au regard des oscillations, on peut considérer que le faisceau laser émis est polarisé linéairement avec un PER maximum mesuré égal à 12,5dB. La fibre sous test est donc capable de favoriser la propagation d'un état de polarisation du mode fondamental par rapport à l'autre. Le PER a également été mesuré pour des valeurs plus élevées de la puissance de pompe du laser comme le montre la figure 2(c) et fluctue entre 12,1dB et 14,2dB avec la montée en puissance. La Fig. 2(c) montre aussi l'évolution de la puissance signal mesurée sur la voie de transmission du cube pour une position optimisée de la lame demi-onde (correspondant à 0° sur la Fig. 2(c)). On constate que la puissance signal augmente de façon quasi-linéaire avec la puissance de pompe. Cependant la puissance signal émise demeure faible par rapport à la puissance de pompe avec une efficacité d'environ 22% alors que l'efficacité des lasers à fibres dopées ytterbium se situe généralement autour de 60%. Cette faible valeur peut être imputée à la mauvaise qualité de la gaine d'air.



Fig. 2 : (a) montage expérimental du laser construit avec la fibre "FA-LPF 6SAP". Le faisceau laser (trait vert) émis en sortie de l'oscillateur est envoyé au travers d'une lame demi-onde et d'un cube séparateur afin d'analyser son état de polarisation. (b) Variation de la puissance signal mesurée sur les deux voies de sorties du cube (transmise : carrés noirs, réfléchie : cercles rouges) en fonction de l'angle de rotation de la lame demi-onde pour P_{pompe} = 50W. La puissance totale est aussi indiquée (P_{tot} = P_{trans} + P_{réfl}, triangles verts) (c) Evolution de la puissance maximum transmise par le cube (carré bleu) et du PER (cercle rouge) en fonction de la puissance de pompe.

CONCLUSION

Nous avons présenté ici la fabrication d'une fibre FA-LPF à large cœur dopé ytterbium intégrant des barreaux de contraintes et son intégration dans un laser émettant à $\lambda = 1030$ nm. Malgré un léger décalage indiciel entre le cœur et la gaine microstructurée et un défaut de fabrication de la gaine d'air, cette fibre est PM et permet la réalisation d'un laser à fibre polarisé avec un PER supérieur 12dB sans ajout d'élément polarisant autre que la fibre.

Les auteurs remercient Eolite Systems, Amplitude Systèmes, Thales Optronique SAS, Leukos et la région Nouvelle-Aquitaine pour leurs investissements dans le projet EATLase, ainsi que l'ANRT pour son soutien via l'attribution de la bourse CIFRE de R. du Jeu.

Références

- [1] L. Dong et al., IEEE J. Selected Topics in Qu. Elec., vol.22, n°2 (2016)
- [2] A. Baz et al., Journal of Lightwave Technology, vol. 31, n°5 (2013)
- [3] T. T. Alkeskjold et al., Opt. Exp., vol. 19, n°8 (2011)
- [4] J. Limpert et al., Light Science & Applications, vol. 1, e8 (2012)
- [5] C. Jauregui et al., Nat. Phot., vol. 7, p.861-867 (2013)
- [6] L. Zhang et al., J. Ligthwave Tech., vol. 34, n°21 (2016)
- [7] R. du Jeu et al., Opt. Lett., vol.42, No. 8 (2017)

LASER BI-FREQUENCES à FIBRE DOPEE THULIUM Mostafa Sabra, Romain Dauliat, Dia Darwich, Georges Humbert, Raphael Jamier, Raphaël Jamier, Jean-Louis Auguste et Philippe Roy

Institut de recherche XLIM, UMR 7252 CNRS, Univ. Limoges, 123 av. A. Thomas, 87060, Limoges,

France

mostafa.sabra@xlim.fr

Résumé

Nous présentons le développement d'un laser à fibre bi-fréquences, fondé sur l'emploi d'une fibre optique à large cœur dopée thulium et de réseaux de Bragg en volume (VBG). En attendant une déclinaison en régime impulsionnel, nous avons étudié le régime continu. Le laser réalisé génère une puissance continue de 3,6 W répartie sur deux longueurs d'ondes (1970 nm et 1984 nm) étroites (< 1 nm) avec un contraste de 65 dB.

MOTS-CLEFS : *Laser à fibre, double fréquence, VBG, maintien de polarisation*

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, de nombreux travaux ont été menés sur le développement de sources lasers à fibres dopées thulium permettant de générer un signal laser de forte puissance dans le domaine spectral autour de 2 μ m [1,2]. Ce domaine présente des avantages pour de nombreuses applications : médecine, aéronautique, environnement et défense [3,4]. Les lasers bi-fréquences (autour de 2 μ m) suscitent également un intérêt croissant pour diverses applications industrielles et scientifiques, tels que le traitement des matériaux, les systèmes d'imageries, la spectroscopie et la génération des ondes terahertz [5,6].

Dans ce contexte, le développement d'un laser bi-fréquences à fibre optique délivrant dans ce domaine spectral des impulsions nanosecondes, synchrones, avec une puissance moyenne de quelques watts présenterait de nombreux avantages. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi de réaliser un laser fondé sur une fibre monomode à cœur étendu associée à un modulateur acousto-optique (en espace libre) pour générer directement, sans pré-amplification une puissance moyenne élevée. Cette configuration permet de s'affranchir du bruit parasite engendré par les étages de pré-amplifications. Plusieurs techniques sont utilisées pour réaliser un laser multi longueurs d'ondes comme par exemple l'emploi d'un prisme [7,8] ou d'un réseau de diffraction [5,6] associé à des miroirs pour former une cavité pour chaque longueur d'onde.

Nous avons choisi d'utiliser des VBG, car ils présentent des propriétés avantageuses pour des applications de haute puissance. Ils présentent un seuil de dommage élevé, une grande réflectivité, une largeur spectrale réduite, et de faibles pertes d'insertion. De plus, ils offrent la possibilité d'accorder la longueur d'onde réfléchie par une simple rotation du VBG dans une cavité adaptée. Les VBGs ont déjà été utilisés dans des lasers solides [9,10] et des lasers à fibre optique [11,12] pour générer un rayonnement mono-fréquence.

Dans cette communication, nous présentons les premiers résultats du développement de ce laser bi-fréquences en régime continu, préalable au fonctionnement en région impulsionnel polarisé.

2. MONTAGE ET CARACTERISTIQUES

Le laser proposé est basé sur l'utilisation d'une fibre dopée thulium à maintien de polarisation PM (L = 4 m), associée à deux VBG réfléchissant à 1970 nm et 1984 nm. La fibre présente une structure à piédestal et une gaine polymère externe bas indice, c'est donc une fibre à triple gaine optique. Le diamètre du cœur dopée thulium est de 18 μ m. La première gaine optique dopée passivement avec de l'oxyde d'aluminium a un diamètre de 100 μ m. La différence indicielle (Δ n) entre l'indice de réfraction du cœur et celui de cette gaine est de 2.10⁻³ afin d'assurer une propagation monomode. Deux plots de Bore ont été insérés dans ce piédestal pour maintenir la polarisation. La deuxième gaine est composée de silice pure, elle présente une forme en D et sa plus faible dimension est de 200 μ m. Elle est revêtue par un polymère bas indice ce qui permet de guider

le rayonnement de la pompe optique. Le taux d'extinction de polarisation de cette fibre est de 16 dB, son efficacité quantique a été mesurée à 45% à l'aide d'une expérimentation dédiée.



Fig.1 : Schéma du montage expérimental réalisé.

La cavité laser est formée par l'extrémité clivée de la fibre (0°), et de deux VBGs totalement réfléchissants à 1970 nm et 1984 nm (Cf. Fig.1) utilisés pour refermer la cavité et pour contrôler le spectre. Cette partie de la cavité est volontairement construite en espace libre pour accueillir, dans le futur, un modulateur. L'autre extrémité de la fibre est clivée avec un angle de 7°, pour éviter des effets laser parasites tout en permettant l'injection de la puissance de pompage. La diode de pompe utilisée délivre un rayonnement multimode à 790 nm avec une puissance maximale de 27 W. Un couple de lentilles de 8 mm de focale a été utilisé pour injecter la pompe dans la fibre. Nous avons utilisé également deux miroirs dichroïques totalement réfléchissants à 2 μ m (HT @ 973 nm et HR @ 2000 nm à 22,5°), pour séparer la pompe du signal. Les mesures de la puissance et du spectre du rayonnement émis ont été réalisées simultanément via un wedge qui permet de réfléchir 4% du signal vers l'analyseur du spectre (Cf. Fig. 1). Une deuxième mesure de puissance est réalisée derrière le miroir dichroïque de sortie, pour mesurer la puissance résiduelle de la pompe (Cf. Fig.1).

3. MESURES ET RESULTATS

La puissance du signal émise en sortie de la cavité laser a été mesurée en fonction de la puissance de pompe (Cf. Fig.2 (a)). La puissance de pompe seuil est proche de 6,5 W. La pente d'efficacité est égale à 15%, avec une puissance de sortie maximale de 3,6 W. Le spectre obtenu pour une puissance de pompe de 26,4 W est illustré sur la figure 2(b). Les deux longueurs d'ondes laser correspondent à celles des VBGs (1970 nm et 1984 nm). Le spectre présente un contraste élevé de 65 dB entre le niveau des raies laser et le bruit, une largeur spectrale inférieure à 1 nm et des niveaux de puissances très proches.



Fig.2 : (a) Puissance de signal mesurée en fonction de la puissance de pompe, (b) spectre obtenu à 26,4 W.

Des mesures de stabilité ont été réalisées pendant une durée d'une demi-heure. Les évolutions des deux longueurs d'ondes et de leurs niveaux de puissances sont présentées, respectivement, sur la figure 3(a) et 3(b). Nous pouvons remarquer une stabilité des deux longueurs d'ondes inférieure à la résolution de l'OSA. Les niveaux de puissances ont une fluctuation maximale de 1 dB.



Fig.3 : Evolution en fonction du temps, (a) des deux longueurs d'ondes émises et (b) de leurs niveaux de puissance.

CONCLUSION

Dans le but de réaliser à terme une source THz impulsionnelle accordable à faible coût, nous avons étudié un laser bi-fréquence à fibre optique à la fois puissant, efficace et stable temporellement et spectralement. Ce laser basé sur l'utilisation de deux VBGs nous a permis d'obtenir 3,6 W de puissance signal, et un très bon contraste de 65 dB entre le niveau des raies laser et le bruit. La prochaine étape sera de travailler sur l'accordabilité de ce laser, en exploitant l'orientation des VBGs, puis de générer des impulsions synchrones courtes (quelques ns) et polarisées en insérant un modulateur acousto-optique dans la cavité.

Les auteurs remercient le COST MP1401 pour son soutien à ces travaux, et l'ANR pour le financement du projet TERATUNE (ANR 15-CE24-0031-01).

REFERENCES

- [1] G. D. Goodno et al., Optics Letters, (2009)
- [2] P. F. Moulton et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., (2009)
- [3] R.M. Kuntz et al., World Journal of Urology, (2007)
- [4] G.J. Koch et al., Applied Optics, (2004)
- [5] T. Kleine-Ostmann, et al., Electron. Lett. (2001).
- [6] A. Saha, et al., Opt. Express (2006).
- [7] C. W. Luo, et al., Opt. Express (2008).
- [8] M. H. Ober, Opt. Lett. (1995).
- [7] X. Liu, et al., Opt. Express (2005).
- [8] S. Feng, et al., Opt. Express (2008).
- [9] B. Jacobsson, et al., Appl. Phys. (2008).
- [10] B. Jacobsson, et al., Opt. Express (2007).
- [11] P. Jelger and F. Laurell, Opt. Lett. (2007).
- [12] J. W. Kim, et al., Opt. Lett. (2008).