



HAL
open science

AMPLIFICATION DIRECTE DE FORTE ENERGIE PAR FIBRES OPTIQUES CONIQUES DOPEES ERBIUM REALISEES PAR VOIE POUFRE

Geoffroy Granger, Baptiste Leconte, Anka Schwuchow, Katrin Wondraczek,
Romain Dauliat, Benoît Debord, Y. Leventoux, Philippe Roy, Fetah Benabid,
Frédéric Gérôme

► **To cite this version:**

Geoffroy Granger, Baptiste Leconte, Anka Schwuchow, Katrin Wondraczek, Romain Dauliat, et al.. AMPLIFICATION DIRECTE DE FORTE ENERGIE PAR FIBRES OPTIQUES CONIQUES DOPEES ERBIUM REALISEES PAR VOIE POUFRE. Optique Dijon 2021, Jul 2021, Dijon, France. pp.01-B. <hal-03285090>

HAL Id: hal-03285090

<https://hal.science/hal-03285090v1>

Submitted on 13 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

AMPLIFICATION DIRECTE DE FORTE ENERGIE PAR FIBRES OPTIQUES CONIQUES DOPEES ERBIUM REALISEES PAR VOIE POUFRE

Geoffroy Granger¹, Romain Dauliat¹, Benoît Debord¹, Yann Leventoux¹, Baptiste Leconte¹,
Anka Schwuchow², Katrin Wondraczek², Frédéric Gérôme¹, Fetah Benabid¹, Raphaël
Jamier¹, Philippe Roy¹, Sébastien Février¹

¹Univ. Limoges XLIM UMR CNRS 7252, 123 avenue Albert Thomas, France

²Leibniz Institute of Photonic Technology, Albert-Einstein-Strasse 9, 07745 Jena, Germany

sebastien.fevrier@unilim.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons les premiers résultats d'amplification par fibres optiques coniques dopées par des ions Er^{3+} réalisées par la voie poudre. Cette architecture de fibre spéciale permet la conservation du comportement monomode spatial et l'amplification à forte énergie d'impulsions brèves sub-MW.

MOTS-CLEFS : *amplificateur à fibre optique, synthèse par voie poudre, fibres coniques.*

1. INTRODUCTION

Les fibres de silice dopées aux terres rares présentant une grande aire effective sont des candidats idéaux pour la montée en puissance des sources impulsives. Les performances des milieux amplificateurs fondés sur des fibres de silice dopées à l' Yb^{3+} (à 1 μm) ou au Tm^{3+} (à 2 μm) sont excellentes grâce à la bonne solubilité de ces ions en matrice silice. Il est alors possible de réaliser des guides larges, très dopés, courts, rendu monomodes par l'ajout d'une gaine air-silice. Dans la bande télécom, cette stratégie n'est pas encore opérante du fait de la difficile incorporation des ions Er^{3+} dans la matrice silice alors que la génération d'impulsions ultra-brèves (<100 fs) de forte énergie (>100 nJ) dans le domaine spectral proche infrarouge (>1500 nm) est particulièrement intéressante pour de nombreuses applications allant de la microscopie multi-photonique [1] à la génération d'harmoniques d'ordre élevé dans les semi-conducteurs [2]. Une approche originale pour la réalisation d'amplificateurs de puissance consiste à utiliser une fibre étirée, de diamètre croissant, dont la partie fine, où l'injection du signal est effectuée, est (quasi-)monomode. La croissance géométrique lente du diamètre de la fibre permet alors de préserver le faible contenu modal initial tout en profitant d'un gain élevé et de faibles nonlinéarités [3]. Le taux d'étirement (diamètre final/diamètre initial) doit être rigoureusement contrôlé pour assurer que le contenu modal n'évolue pas, même en présence de perturbations. Il a été montré qu'un avantage des fibres coniques consiste à diluer les ions de terres rares dans une structure longue de plusieurs mètres qui peut être enroulée sans modification du contenu modal. Ces amplificateurs peuvent donc être longs mais compacts, ce qui est particulièrement intéressant pour les amplificateurs à fibre dopée Er^{3+} qui ne peuvent pas être très dopés [4]. Le profil d'indice de ces fibres, jusqu'alors réalisées par une méthode CVD, souffre malgré tout d'une inhomogénéité radiale des dopants actifs et indiciels qui perturbent la distribution radiale du champ électrique, conduisant à une relocalisation du champ lumineux dans des défauts de petite dimension. Ces sous-structures guidantes effacent alors l'avantage de l'architecture de fibre étirée pour un amplificateur de puissance.

Dans cette communication nous présentons pour la première fois à notre connaissance un amplificateur à fibre étirée réalisée par la voie poudre. L'excellente homogénéité radiale du profil d'indice permet d'atteindre des dimensions de cœur supérieures à 100 μm tout en conservant un comportement monomode en régime d'amplification. Les fibres coniques ainsi réalisées sont

ensuite caractérisées et utilisées en configuration d'amplification haute énergie en régime femtoseconde.

2. PROCEDE DE FABRICATION

Nous avons adapté la méthode REPUSIL pour l' Er^{3+} [5]. Deux matériaux sont fabriqués, un à base de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$, qui constituera le cœur de la fibre, et un second de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. L'aluminium dans le cœur favorise la bonne répartition des ions de terre rare ($\sim 1.5 \times 10^{25}$ ions/ m^3) et évite la formation d'agrégats. La concentration en Al du matériau de gaine est optimisée pour obtenir un guidage quasi-monomode pour la partie fine du taper. Le contraste d'indice entre les deux matériaux est de 0.0065. Une gaine hexagonale permet la bonne interaction entre l'onde de pompe et le cœur. Plusieurs fibres coniques ont été réalisées sur différentes longueurs (5 à 15m) utilisant toute l'amplitude des diamètres disponibles avec notre tour de fibrage : de 125 μm pour le côté le plus fin à 550 μm en sortie, permettant une augmentation homothétique du diamètre de cœur de 20 μm ($V \sim 5.5$) à 100 μm ($V \sim 27.6$), limité par le diamètre d'enroulement et la contrainte mécanique résultante. L'étirement homothétique s'opère grâce à un logiciel qui adapte en temps réel la vitesse de descente de la préforme et la vitesse de tirage. De part et d'autre de la fibre conique nous étirons 10 m à diamètre constant. Nous réalisons par ailleurs des combineurs de pompe / signal sur fibre à grande aire modale par assemblage puis fusion-étirage, permettant une excitation modale adaptée à notre architecture grâce à notre plateforme CO_2 (LZM 100), l'entrée de la fibre conique en 20 μm n'étant pas intrinsèquement monomode.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous caractérisons dans un premier temps le comportement modal de nos fibres coniques par la méthode du S^2 . Nous utilisons une source d'ASE développée au laboratoire autour de 1,9 μm (500 mW, $\Delta\lambda > 200$ nm) pour éviter l'absorption par les ions Er^{3+} . La bonne gestion de la soudure en entrée permet une excitation sélective. Il en résulte que les modes d'ordre élevé, identifiés sur la Fig. 1a par leur différence de temps de groupe avec le mode fondamental et leurs répartitions d'intensité et phase, véhiculent moins de 1% de la puissance lumineuse. Nous retrouvons ce comportement quelle que soit la longueur de la fibre conique dès lors que nous injectons dans la partie fine.

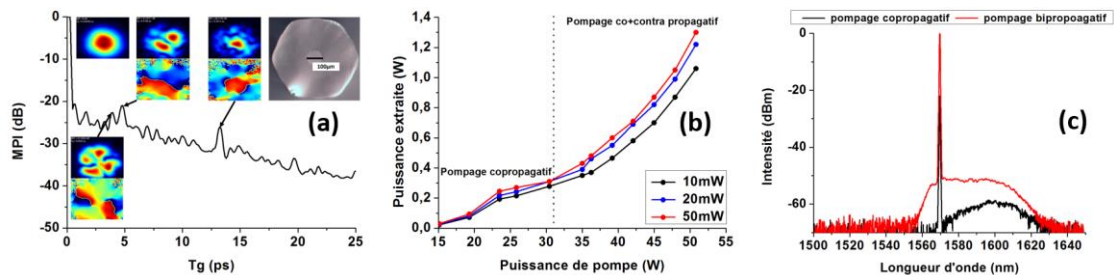


Fig. 1 : (a) Spectre temporel des modes d'ordre élevé et leurs distributions d'intensité et phase. Insert : image optique de la face de sortie de la fibre conique. (b) Courbe d'extraction de puissance en fonction de la puissance de pompe pour trois valeurs de la puissance de signal d'entrée. (c) Spectre mesuré en pompage co- (350 mW) et bi-propagatif (1 W).

Nous testons ensuite les fibres coniques en régime continu. Comme illustré sur la Fig. 1b, le signal subit une saturation, non pas par la limitation du gain mais par la réabsorption du signal à 1570 nm, le milieu à gain n'étant plus suffisamment inversé du fait de l'augmentation de l'aire active. Il s'en suit une production d'ASE aux hautes longueurs d'onde de la bande de gain ~ 1610 nm (Fig. 1c). L'injection de la pompe en contra-propagatif, qui peut s'opérer directement dans le cœur de la fibre (100 μm de diamètre, $\text{ON} \sim 0,14$), permet de reconstituer l'inversion de population et de produire à nouveau du gain. Nous extrayons 1,2 W pour une puissance de signal d'entrée de 20 mW. Nous injectons ensuite un signal issu d'un oscillateur picoseconde à basse

cadence réalisé au laboratoire (1560,5 nm, 11,8 MHz, 6 nm, 430 fs en limite de Fourier théorique). Le signal issu de l'oscillateur et la pompe monomode sont multiplexés puis injectés dans la fibre étirée. Le gain en énergie induit une fission de l'impulsion puis un auto-décalage fréquentiel dans la partie de petite section de la fibre. Durant le passage dans la section croissante, cette dernière se déphase du résidu du signal d'entrée et profite du gain aux hautes longueurs d'onde là où le résidu à 1565nm subit l'absorption, davantage encore avec l'ajout du pompage contra-propagatif qui non seulement lui permet d'entretenir l'équilibre dispersion / non linéarité mais permet de la recomprimer passer un certain seuil. De l'impulsion signal initial, seule persiste faiblement la raie de Kelly à 1567.5nm. Ce phénomène participe à la purification modale puisque seul le mode fondamental subit la non-linéarité. Par la suite, aucun couplage n'est possible entre les modes comme observé Fig. 2b. La pompe multimode permet de reconstituer l'inversion de population en milieu-fin de fibre et d'amplifier l'impulsion auto-décalée. La puissance collectée à la suite d'un filtre passe-haut ($\lambda_c = 1580$ nm) atteint 950 mW pour une impulsion unique de durée égale à 90 fs mesurée à l'autocorrélateur soit 81 nJ pour 902 kW de puissance crête sans re-compression externe. Ces performances, alors qu'elles sont obtenues en amplification directe, sont proches de celles que nous avons obtenues en régime d'amplification à dérive de fréquence [6], ce qui démontre la pertinence de l'architecture de fibre étirée pour l'amplification de haute énergie.

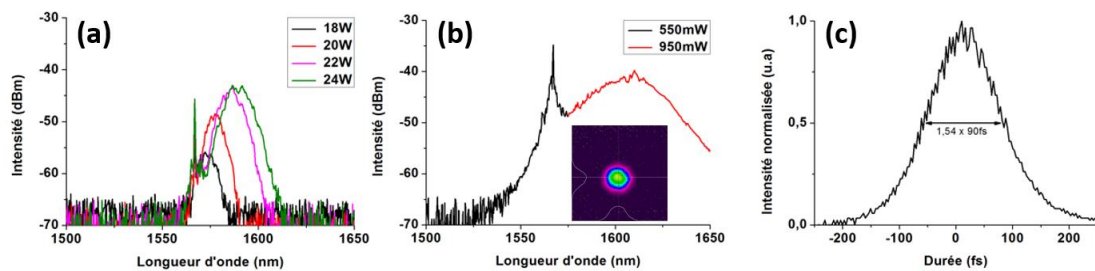


Fig. 2 : (a) Spectres collectés en sortie de la fibre conique en fonction de la puissance de pompe contra-propagative. (b) Spectre mesuré pour l'impulsion isolée (courbe rouge) de 950 mW pour un total de 1,5W. Insert : figure d'intensité prise à l'aide d'une caméra thermique. (c) Trace d'autocorrélation de l'impulsion isolée mesurée pour une puissance moyenne de 950 mW.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons, pour la première fois à notre connaissance, fabriqué des fibres coniques en matrice aluminosilicate dopée erbium par la voie poudre REPUSIL. Nous avons aussi démontré que ces fibres permettent l'amplification d'impulsions sub-MW sans recours à la technique d'amplification à dérive de fréquence

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés par les contrats H2020 FET Open PETACom, ANR FLEX-UV, Conseil régional de Nouvelle Aquitaine Femto-VO2 et SCIR.

RÉFÉRENCES

- [1] P. Cadroas *et al.*, "Three-photon microscopy with a monolithic all-fiber format laser emitting at 1650 nm", *Journal of Optics* **19**, 65506 (2017).
- [2] D. Franz *et al.*, "All semiconductor enhanced high-harmonic generation from a single nanostructured cone", *Nature Scientific Reports* **9**, 5663 (2019).
- [3] K. Bobkov *et al.*, "Scaling of average power in sub-MW peak power Yb-doped tapered fiber picosecond pulse amplifiers", *Opt. Express* **29**, 1722 (2021).
- [4] M. M. Khudiyakov *et al.*, "107 kW peak power 2 ns pulse tapered Er-doped fiber amplifier", *2018 International Conference Laser Optics (ICLO)*, St. Petersburg, Russia, p.13 (2018).
- [5] G. Granger *et al.*, "Amplification de puissance par fibres optiques dopées Er³⁺ réalisées par la méthode poudre REPUSIL", JNOG 2019.
- [6] H. Delahaye *et al.*, "Generation of megawatt-class soliton at 1680 nm in a flexible Bragg fiber", *Photonics West LASE* (2020).