

SOURCES LASER ULTRA-RAPIDES FIBREES EMETTANT DANS LE MOYEN INFRAROUGE

A. Ayoub¹, H. Delahaye², M. Paris², K. Guesmi¹, G. Granger², L. Lavoute³, J-T. Gomes³, S. Idlahcen¹, T. Godin¹, D. Gaponov³, N. Ducros³, S. Février², A. Hideur¹

¹ CORIA, CNRS-INSA-Université de Rouen, Normandie Université, 76801 Rouen, France

² Xlim, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 87 060 Limoges, France

³ Novae, ZI du Moulin Cheyroux, 87700 Aix sur Vienne, France

hideur@coria.fr

RÉSUMÉ

Cette communication aborde les lasers ultrarapides émettant dans le moyen infrarouge notamment les lasers à fibre en silice dopées au thulium opérant autour de 2 μm ainsi que les lasers à fibres ZBLAN émettant autour de 2.8 μm . Nous présentons également quelques résultats obtenus par auto-décalage en fréquence de solitons dans des fibres optiques.

MOTS-CLEFS : *laser ultrarapides, moyen infrarouge, fibres dopées, auto-décalage en fréquence de solitons.*

1. INTRODUCTION

Les sources laser émettant dans le moyen infrarouge entre 2 et 12 μm sont très attractives pour plusieurs applications telles que de la spectroscopie, la médecine et la chirurgie, le traitement des matériaux et la contre mesure optique. Ceci vient du fait que cette gamme spectrale couvre les raies d'absorption vibrationnelles de la majorité des molécules de base [1]. Plusieurs de ces applications requièrent des lasers ultrarapides notamment pour éviter les effets thermiques dans le traitement des matériaux et la chirurgie [2] ou pour optimiser les processus non-linéaires tels que ceux mis en jeu dans la génération de supercontinuum moyen infrarouge [3] ou pour la physique attoseconde [4]. La technique la plus répandue pour générer des impulsions ultracourtes et intenses dans le moyen infrarouge est l'amplification paramétrique optique qui permet d'atteindre des durées de quelques cycles optiques [5]. Plusieurs architectures laser sont en cours de développement pour remplacer ces systèmes relativement complexes et coûteux. Les meilleurs résultats sont atteints avec les cristaux de Cr:ZnSe émettant autour de 2.5 μm mais le court temps de vie de ces cristaux impose l'utilisation de sources de pompage impulsions complexes [6]. Les cristaux dopés Holmium émettant à 2 μm présentent des durées de vie plus longues mais l'étroitesse de leur bande de gain rend difficile la génération d'impulsions sub-10 ps même si la montée en énergie a été déjà démontrée [7]. Les meilleurs performances en terme de durée et d'énergie ont été obtenues avec les matériaux dopés thulium opérants à 1.9 μm . Les lasers à cristaux massifs permettent d'atteindre des niveaux d'énergies au-delà du millijoule avec des impulsions sub-picosecondes mais nécessitent une atmosphère contrôlée pour contrer la forte absorption de la vapeur d'eau [8]. Ce problème est moins contraignant dans les architectures fibrées qui permettent de générer des impulsions sub-picosecondes de plusieurs centaines de microjoules d'énergie en exploitant des fibres microstructurées à larges aires modales [9]. L'autre technologie de lasers ultrarapides fibrés qui a fortement progressé ces dernières années concerne les lasers à fibre ZBLAN opérant autour de 2.8 μm . Ces lasers exploitent la transition à 2.8 μm entre les niveaux $^4\text{I}_{11/2}$ et $^4\text{I}_{13/2}$ de l'ion erbium ou la transition à 2.9 μm ($^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$) des ions thulium. Des énergies de plusieurs dizaines de nanojoules et des puissances moyennes de quelques watts peuvent être atteintes [10-11]. Pour des énergies plus modestes, les sources à auto-décalage spectral par effet Raman constituent des solutions très attractives pour couvrir une large bande spectrale dans le moyen infrarouge [12]. L'objectif de cette

communication est de faire un état des lieux de ces avancées en les illustrant par quelques exemples d'applications.

2. LASER A FIBRE DOPEES THULIUM EMETTANT A 1.9 μM

Pour des applications industrielles, la compacité et la robustesse des systèmes lasers est un facteur primordial pour faciliter leur exploitation en environnement hostile. Dans cette perspective, l'exploitation de fibres actives à saut d'indice combinée à l'utilisation d'étireurs et compresseurs intégrés permet d'atteindre des performances laser compatibles avec plusieurs applications industrielles tout en offrant des architectures fortement compactes. Le schéma typique d'un système laser ultrarapide fibré de haute énergie émettant à 1.9 μm est présenté sur la figure 1. Il s'agit d'un amplificateur à impulsions étirées basé sur un oscillateur à impulsions étirées (*CPO pour Chirped-Pulse Oscillator*) produisant des impulsions à dérive de fréquence de plusieurs dizaines de picosecondes de durée. La forte puissance disponible à la sortie des oscillateurs CPO permet de simplifier l'architecture du système en limitant le nombre d'amplificateurs de la chaîne. Le système exploite un étireur à réseau de Bragg à pas variable et un compresseur à réseau de Bragg volumique précédé d'une série d'amplificateurs à fibres dopées thulium pompées par des diodes à 793 nm. Ce système peut produire des impulsions picosecondes de plus de 20 μJ d'énergie. En ajustant les paramètres de l'oscillateur pour produire des impulsions à spectre large (>35 nm) et en adaptant les propriétés de dispersion de l'étireur et du compresseur, il est possible d'étendre son fonctionnement au régime femtoseconde. Les figures 1(b) et (c) montrent les résultats obtenus à la sortie du système opérant en régime sub-picoseconde.

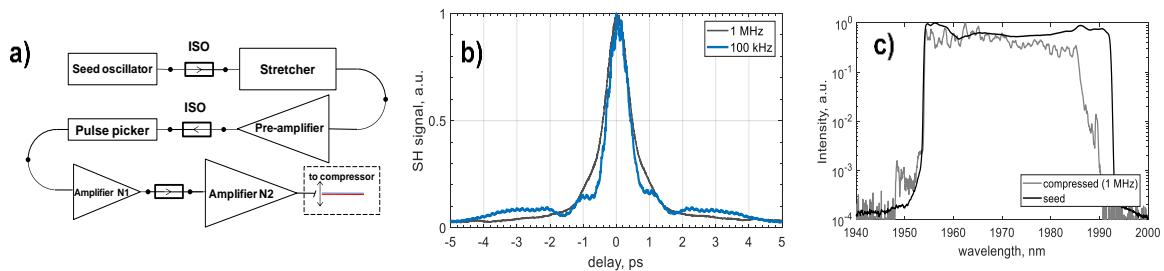


Fig. 1 a) Schéma synoptique du système lasers à 2 μm , b) Impulsions comprimées pour les régimes aux cadences de 1 MHz (gris) et 100 kHz (bleue), c) spectres optiques du laser injecteur (noir) et de l'amplificateur à 1 MHz (gris).

A la cadence de 100KHz, le système laser produit des impulsions de 530 fs avec 10.4 μJ d'énergie mesurée après compression (Fig. 1(b)). La puissance crête concentrée dans la partie centrale de l'impulsion est évaluée à 11 MW, ce qui constitue un record pour un système totalement fibré opérant autour de 2 μm . L'exploitation d'une fibre à large aire modale permet de convertir ces impulsions par effet Raman pour produire des solitons décalés en fréquence de fortes puissances crêtes. Des impulsions de 90 fs de durée centrées à 2220 nm avec 2.8 MW de puissance crête sont ainsi générées.

3. LASERS A FIBRE DOPEE ERBIUM EMETTANT A 2.8 μM

Ce concept d'auto-décalage en fréquence de solitons peut être étendu vers les plus grandes longueurs d'ondes en exploitant des fibres en germanium ou en verre fluoré. Cependant, cette approche ne permet pas toujours de contrôler la durée des impulsions et les énergies produites sont limitées à quelques nanojoules. Une approche complémentaire consiste à utiliser des sources laser à fibres en verres fluorés dopées à l'erbium ou au thulium émettant autour de 3 μm . Des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années sur la réalisation d'oscillateurs et d'amplificateurs performants en exploitant des fibres en ZBLAN. Un exemple typique d'oscillateur à verrouillage de modes fibré émettant à 2.8 μm est montré sur la figure 2. Il s'agit d'une cavité en anneau comprenant une fibre ZBLAN double gaine à cœur dopé erbium et d'éléments de contrôle de la polarisation permettant d'exploiter le mécanisme d'évolution non-linéaire de la polarisation (ENP) pour l'initiation et la stabilisation du régime impulsif. La fibre est pompée dans la gaine par

une diode multimode à 980 nm. Le verrouillage de modes peut être initié par des absorbants saturables à semi-conducteur ou en graphene mais les meilleures performances en termes de durée et de stabilité sont obtenues en exploitant le mécanisme d'ENP. Des impulsions sub-300fs de quelques nanojoules d'énergie sont usuellement produites par ces sources [10-11].

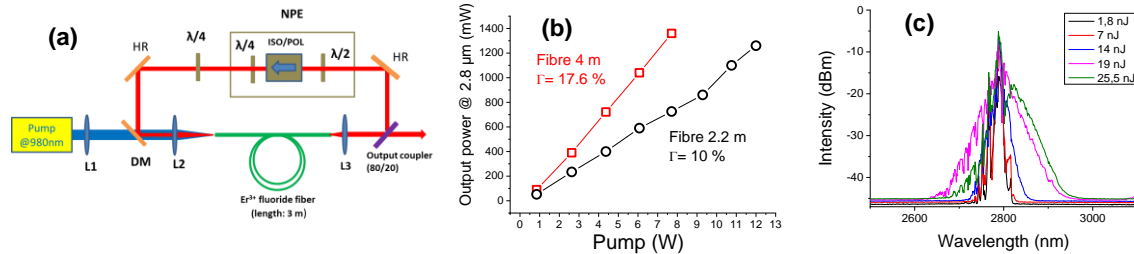


Figure. 2 : Laser à fibre ZBLAN dopée Erbium à blocage de modes par ENP (a), Performances d'un amplificateur à 2.8 μm pour différentes longueurs de la fibre amplificatrice (b) et spectres optiques correspondants (c).

L'amplification directe de ces impulsions permet d'atteindre quelques watts de puissance moyenne avec des durées de quelques centaines de femtosecondes. La figure 2(b) montre les performances en puissance d'un amplificateur à fibre dopée erbium pour différentes longueurs de la fibre à gain. Les spectres optiques correspondant sont présentés sur la figure 2(c). Pour les énergies au-delà de 20 nJ, les effets non-linéaires deviennent prépondérants et nous observons la formation d'un soliton par auto-décalage spectral induit par effet Raman.

CONCLUSION

Les performances des sources laser ultrarapides fibrées émettant dans le moyen infrarouge ne cessent de s'améliorer grâce aux avancées technologiques sur les fibres optiques dopées aux terres rares et des composants fibrés ainsi que par la maîtrise des effets non-linéaires dans des fibres optiques spéciales.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont bénéficiés des aides du fond Européen de développement régional (FEDER) ; Agence Nationale pour la Recherche à travers les projets BISCOT (ANR-16-CE08-0031), UBRIS2 (ANR-13-BS09-0018) et LABEX EMC3; Conseil régional de Nouvelle Aquitaine (FLOWA); Délégation Générale à l'Armement (RAPID SWIM laser) ; et du conseil régional de Normandie.

RÉFÉRENCES

- [1] M. J Baker *et al.* "Using Fourier transform IR spectroscopy to analyze biological materials," Nat. Prot. **9**, pp. 1771–1791, 2014.
- [2] H. Petersen *et al.*, "Picosecond Infrared Laser (PIRL) Application in Stapes Surgery - First Experience in Human Temporal Bones," Otology & Neurotology **39** (4) – pp. e224–e230, 2018.
- [3] J. Zhang *et al.*, "Multi-mW, few-cycle mid-infrared continuum spanning from 500 to 2250 cm^{-1} ," Light: Science & Applications, **7**, 17180, 2018.
- [4] B. Shan and Z. Chang, "Dramatic extension of the high-order harmonic cutoff by using a long-wavelength driving field," Phys. Rev. A **65**, 011804, 2001
- [5] K-H. Hong *et al.*, "Multi-mJ, kHz, 2.1 μm optical parametric chirped-pulse amplifier and high-flux soft x-ray high-harmonic generation," Opt. Lett. **39**, 3145-3148, 2014.
- [6] X. Ren *et al.*, "Generation of 1kHz, 2.3mJ, 88fs, 2.5 μm pulses from a Cr^{2+} :ZnSe CPA," Opt. Lett. **43**, 3381 (2018)
- [7] L. von Grafenstein *et al.*, "Ho:YLF chirped pulse amplification at kilohertz repetition rates – 4.3 ps pulses at 2 μm with GW peak power," Opt. Lett. **41**, 4668-4671, 2016
- [8] S. A. Rezvani *et al.*, "Millijoule femtosecond pulses at 1937 nm from a diode-pumped ring cavity Tm:YAP regenerative amplifier," Opt. Express **26**, 29460-29470 (2018)
- [9] C. Gaida *et al.*, "Tm-doped fiber CPA system with 2 GW of peak power," Opt. Lett. **41**, 4130–4133 (2016)
- [10] T. Hu *et al.*, "Ultrafast pulses from a mid-infrared fiber laser," Opt. Lett. **40**, 4226-4228 (2015)
- [11] S. Duval *et al.*, "Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared," Optica **2**, 623 (2015)
- [12] Y. Tang *et al.*, "Generation of intense 100fs solitons tunable from 2 to 4.3 μm in fluoride fiber," Optica **3**, 948, 2016.