

GENERATION D'IMPULSIONS BREVES DE FORTE PUISSANCE CRETE DANS LE MOYEN INFRAROUGE PAR FIBRES OPTIQUES

Hugo Delahaye¹, Geoffroy Granger¹, Jean-Thomas Gomes², Laure Lavoute²,
Dmitry Gaponov², Nicolas Ducros², Sébastien Février¹

¹ Université de Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, 87 000 Limoges, France

² Novae, ZI du Moulin Cheyroux, 87 700 Aixe sur Vienne, France

hugo.delahaye@unilim.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons un laser à fibres émettant des impulsions sub-100 fs d'énergie nanojoule accordables en longueur d'onde dans le moyen infrarouge de 2500 à 2900 nm. Le principe du laser est basé sur l'auto-décalage fréquentiel de solitons dans une cascade de fibres optiques à base de silice dopée au germanium.

MOTS-CLEFS : *auto-décalage fréquentiel ; fibre dopée au germanium ; moyen-infrarouge*

1. INTRODUCTION

Des sources de pompe femtosecondes de forte puissance crête dans le moyen infrarouge (MIR) sont requises pour des applications variées comme la microscopie multi-photonique [1], la spectroscopie vibrationnelle [2], la défense, la génération de supercontinuum [3] ou la génération d'harmoniques élevés dans les solides [4]. Actuellement les sources MIR impulsioneelles sont majoritairement basées sur la génération et l'amplification optique paramétrique (OPA) [5]. Cependant les OPA sont sensibles à l'alignement et aux perturbations extérieures. Les cavités à verrouillage de modes utilisant des fibres en verre fluoré dopées à l'erbium [6] ou à l'holmium [3] offrent une solution plus facile d'utilisation dans le MIR, mais à une longueur d'onde fixe. Par exemple, Hudson *et al* ont construit une source émettant des impulsions de 230 fs et de 3,3 nJ, soit une puissance crête de 12,8 kW, à la longueur d'onde de 2874 nm, qui a permis la génération d'un continuum de 1800 à 9500 nm dans des fibres effilées en verre de chalcogénure. Ces oscillateurs incorporent toutefois de nombreux éléments mobiles en raison du manque de maturité des composants à base de fibres en verre fluoré comme les combineurs multimodes pompe/signal.

Une autre approche consiste à exploiter les processus solitoniques dans des fibres à dispersion anormale (fission multi-solitonique, auto-décalage fréquentiel de solitons (*soliton self-frequency shift* SSFS)). Lorsqu'ils sont stimulés par une impulsion émise dans la bande télécom où la maturité et la diversité des composants fibrés permettent la création de MOPA picosecondes entièrement fibrés, ces effets permettent de générer des impulsions sub-100 fs à forte puissance crête accordables en longueur d'onde dans un format monolithique [7]. Atteindre les longueurs d'onde MIR dans une cascade de fibres est toutefois complexe et nécessite un choix rigoureux des fibres non linéaires caractérisées par leur transparence, leur coefficient de réfraction non linéaire et leur dispersion chromatique. Les fibres de silice très fortement dopées au dioxyde de germanium (GeO₂) [8] ont la propriété d'être transparentes jusqu'à environ 3000 nm [9], d'avoir un indice non linéaire proche de celui de la silice ($n_2=4,97 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ pour un dopage au dioxyde de germanium de 97% [10]) et un zéro de dispersion proche de 1700 nm. Les fibres de silice dopées jusqu'à 98% en GeO₂ réalisées par dépôt chimique modifié en phase vapeur [8] sont de plus soudables à des fibres de silice. Dans cette communication nous présentons une source laser composée de fibres de silice dopées au germanium soudées entre elles, pompée par un MOPA picoseconde à 1560 nm et qui délivre des impulsions de 78 fs avec 35 kW de puissance crête à 2700 nm.

2. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans un premier temps, nous avons mesuré le spectre d'atténuation de deux fibres de silice à cœur dopé à 98% ou à 67% en germanium. Le rayonnement issu d'une source supercontinuum moyen-infrarouge (Coverage, Novae) a été injecté dans des tronçons de 20 cm de fibre. Le rayonnement en sortie de fibre a été détecté à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier (Nicolet iS50 FT-IR, Thermo Scientific) et comparé au spectre de la source continuum en Fig 1 (a). De la mesure ont été déduites les pertes des fibres, représentées Fig 1 (b). Comme on peut le voir sur les courbes, la présence de silice augmente considérablement les pertes de la fibre dopée à 67% en GeO_2 au-delà de 2400 nm. La fibre dont le cœur est dopé à 98% en GeO_2 et à 2% en silice (courbe rouge) est plus transparente vers les hautes longueurs d'onde et a été utilisée dans la suite. Le montage expérimental représenté Fig 1 (c) se compose d'un oscillateur picoseconde à 1560 nm suivi d'un étage d'amplification dans une fibre de silice à cœur large (35 μm de diamètre) dopé à l'erbium. Les longueurs de fibre et les puissances de pompe ont été adaptées afin d'éviter toute fission solitonique dans les fibres amplificatrices. Une fibre de silice monomode à grande aire modale (20 μm de diamètre de cœur, SM20) permet, par réduction de l'aire modale par rapport à la fibre amplificatrice et donc augmentation du coefficient de non linéarité $\gamma = n_2\omega_0 / cA_{\text{eff}}$, de décaler l'impulsion jusqu'à 1850 nm. Une fibre dopée au thulium a été soudée à cette fibre de silice afin de décaler le soliton jusqu'à 2250 nm tout en profitant de la section efficace d'absorption de la terre rare pour nettoyer les résidus spectraux à 1560 nm et 1850 nm, conséquences de la fission solitonique. Nous avons pu observer que l'énergie absorbée par la fibre dopée au thulium est en partie restituée à l'impulsion au cours de son décalage quand celle-ci parcourt la section efficace d'émission du thulium [1750-1950] nm.

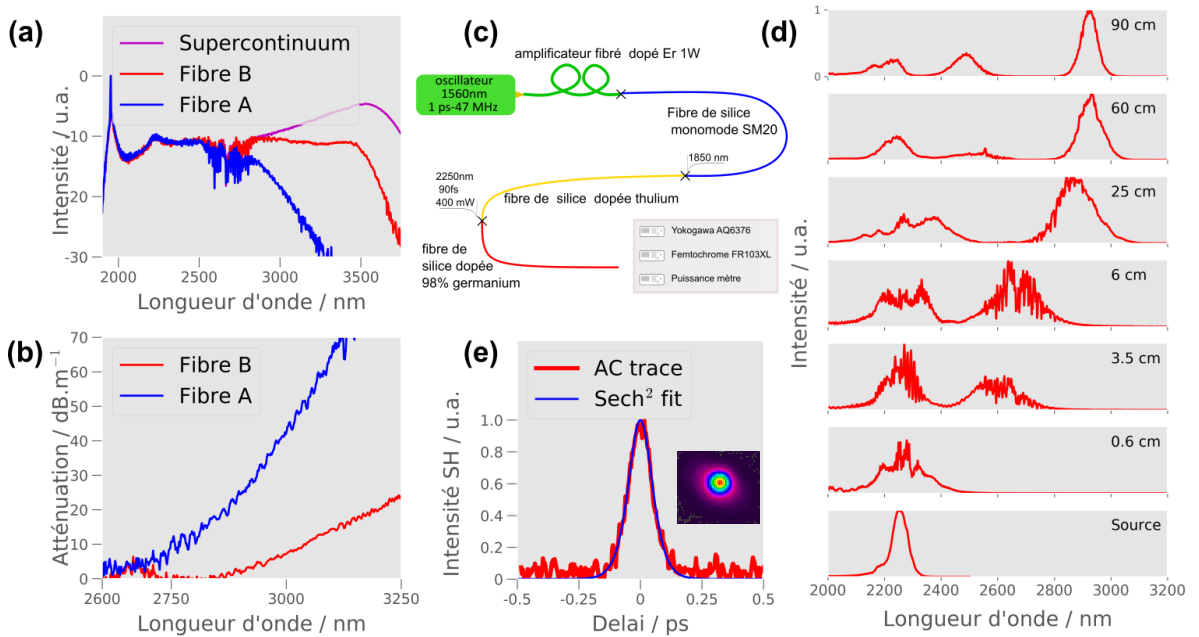


Figure 1 : (a) Spectre transmis par un tronçon de fibre de silice de 20 cm au cœur dopé germanium à 67% (fibre A) et 98% (fibre B). Le spectre de la source d'excitation (Coverage, Novae) est représenté en violet. (b) Atténuation spectrale des fibres fortement dopées germanium. (c) Schéma du montage expérimental. (d) Évolution spectrale mesurée en sortie d'une fibre de silice dopée germanium (8 μm de diamètre de cœur, 98% de GeO_2 dans le cœur) en fonction de la longueur de fibre. (e) Trace d'autocorrélation de l'impulsion à la sortie de 6 cm de fibre et profil spatial en champ proche après un filtre passe bande à 2750 nm.

La fibre dopée à 98% en germanium décrite précédemment a été soudée à la fibre thulium. L'impulsion injectée dans la fibre germanium est au-delà du zéro de dispersion des fibres

germanium permettant ainsi de conserver le régime solitonique et de décaler une impulsion dans la gamme spectrale MIR recherchée. Le spectre mesuré à l'aide d'un spectromètre Yokogawa AQ6376 en sortie du laser en fonction de la longueur de fibre de silice dopée germanium est représenté sur la Fig 1 (d). La longueur d'onde centrale du soliton fondamental décalé est fonction de la longueur de fibre dopée germanium. Pour des longueurs de fibres inférieures à 90 cm on observe qu'un seul soliton. Pour 90 cm de fibre le décalage du soliton à la plus haute longueur d'onde semble saturer tandis qu'un deuxième soliton est éjecté à 2500 nm. À partir du moment où le soliton a atteint son décalage maximal (entre 25 cm et 60 cm de fibre), il ne fait que subir la dispersion de la fibre et les pertes du matériau.

Afin de caractériser l'impulsion la plus brève nous avons utilisé une longueur de fibre de 6 cm, qui décale le soliton vers 2700 nm, suivie d'un filtre passe bande centré à 2750 nm (FB2750-500, Thorlabs). La trace d'autocorrélation obtenue avec un autocorrélateur (FR-103XL, Femtochrome) est représentée Fig 1 (e). Elle permet de déduire la largeur temporelle à mi-hauteur de l'impulsion de 78 fs. La puissance mesurée permet de remonter à une énergie de 2,8 nJ dans le soliton décalé. Le bruit sur la mesure spectrale et le bruit sur la trace d'autocorrélation sont attribués à l'impact des ions OH⁻ dans l'air ambiant. La distribution d'intensité en champ proche (Pyrocam III-C-A, Spiricon) qui semble attester d'une propagation monomode du soliton est représentée sur la Fig 1 (e).

3. CONCLUSION

Pour conclure, nous avons réalisé et caractérisé une source laser émettant des impulsions solitoniques de 78 fs et de 35 kW de puissance crête à 2700 nm, extensible jusqu'à 2900 nm. Ce laser peut être utilisé comme laser maître pour l'amplification d'impulsions femtosecondes dans des fibres en verres fluorés dopées aux terres rares ou pour la génération de continuum dans des fibres micro-structurées en verre de chalcogénure. Lors de la rédaction de cette communication, nous avons appris l'existence de travaux proches portant sur la réalisation d'une source laser composée d'un MOPA à base d'une fibre dopée au thulium soudée à une fibre de silice dopée à 64% en germanium émettant une impulsion unique à 2320 nm avec une largeur temporelle de 220 fs et une puissance crête de 3,6 kW [11], soit un ordre de grandeur inférieure à celle que nous reportons ici à 2700 nm.

REMERCIEMENTS

Agence Nationale de la Recherche (ANR) (Broadband Infrared Supercontinuum BISCOT ANR-16-CE08-0031) ; Future and Emerging Technologies 829153 Petahertz Quantum Optoelectronic Communication ; Région Nouvelle Aquitaine (Femtosecond laser at Long Wavelengths FLOWA) ; Direction Générale de l'Armement (DGA). Les fibres de silice fortement dopée en germanium ont été fabriquées au laboratoire Fiber Optics Research Center de l'Académie des Sciences de Russie.

REFERENCES

- [1] N. G. Horton *et al*, *Nature Photonics* **7**, 205 (2013)
- [2] F. Borondics *et al*, *Optica* **5**, 377 (2018)
- [3] D. D. Hudson *et al*, *Optica* **4**, 1163 (2017)
- [4] D. Franz *et al*, *Scientific Reports* **9**, 5663 (2019)
- [5] O. Chalus, P. K. Bates, M. Smolarski, and J. Biegert, *Opt. Express* **17**, 3587 (2009)
- [6] A. Hideur *et al*, *Optique Toulouse - JNOG*, Toulouse (2018)
- [7] P. Cadroas *et al*, *Journal of Optics* **19**(6), 65506 (2017)
- [8] E. M. Dianov and V. M. Mashinsky, *J. of Light. Technol.* **23**, 3500 (2005)
- [9] H. Delahaye *et al*, *Optics letters* **44**(10) (2019)
- [10] Y. Yatsenko and A. Mavritsky, *Opt. Lett.* **32**, 3257 (2007)
- [11] T. Du *et al*, *IEEE J. of Sel. Top. in Quant. Electron.*, **25**, 1400207 (2019)