

LASER RAMAN A FIBRE ACCORDABLE ENTRE 1615 NM ET 1690 NM

Romain Thouroude¹, Hervé Gilles¹, Sylvain Girard¹, Ammar Hideur² and Mathieu Laroche¹

¹ Centre de recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP), UMR 6252 CEA-CNRS-ENSICAEN, Normandie Université, 6 Blvd Maréchal Juin, 14050 Caen, France

² CORIA, UMR 6614, CNRS-INSA-Université de Rouen, Normandie Université, Avenue de l'université, BP. 12, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France

RÉSUMÉ

Nous proposons un laser Raman à fibre accordable entre 1615 nm et 1690 nm et émettant jusqu'à 6,3 W de puissance polarisée rectilignement avec un faisceau limité par diffraction. La source de pompage est un système MOPA basé sur une fibre PM codopée Er-Yb et délivrant jusqu'à 12 W de puissance autour de 1540 nm.

MOTS-CLEFS : *laser Raman à fibre ; laser accordable*

1. INTRODUCTION

Les lasers Raman à fibre (RFL) de forte puissance sont des systèmes laser très performants en raison de leur faible défaut quantique, leur rendement de conversion élevé et de la possibilité d'accorder en longueur d'onde. Le large spectre de gain Raman associé à une source de pompage agile en longueur d'onde permet ainsi d'étendre la couverture spectrale des lasers à fibre dopées terre-rare. Ces systèmes laser sont actuellement utilisés dans le proche IR, essentiellement pour atteindre des longueurs d'onde entre 1,1 μm à 1,5 μm à partir d'une source laser de pompage à fibre dopée ytterbium [1]. Le domaine spectral entre 1,6 et 1,7 μm n'est cependant pas encore couvert par les sources laser à fibre de puissance. Des sources laser dans cette gamme de longueur d'onde pourraient cependant trouver de nombreuses applications, par exemple en tomographie optique cohérente [2] ou pour le pompage intra-bande de laser à solide dopés Thulium ou Dysprosium [3,4]. Actuellement, la source laser à fibre la plus puissante autour de 1,7 μm utilise une fibre dopée Bismuth. La puissance de sortie est cependant limitée à 2 W, avec une efficacité de conversion de 30 % [5]. Un laser Raman à fibre en silice dopée germanium pompé autour de 1,55 μm permet également d'atteindre des longueurs d'onde entre 1,62 et 1,72 μm . L'accordabilité à forte puissance d'un RFL a été démontrée sur une plage spectrale entre 1638,5 nm à 1671,1 nm avec une puissance maximale de 10,5 W à 1658,3 nm [6]. Cependant ces travaux ont été réalisés avec une fibre multimode, ce qui implique un faisceau non-polarisé et une qualité spatiale de faisceau dégradée ($M^2 \sim 1,35$). À notre connaissance la seule source laser Raman à fibre polarisée rectilignement dans ce domaine spectral et limitée par diffraction a été rapportée par Svane *et al* [7]. Elle met en œuvre une fibre monomode à maintien de polarisation, la puissance émise est cependant limitée à 500 mW avec une efficacité de 67%.

Dans cette contribution, nous rapportons une source laser Raman à fibre monomode, polarisée rectilignement et émettant en régime continu une puissance supérieure à 6 W avec une efficacité de conversion de 76 % [8]. En utilisant un réseau de diffraction intra-cavité, nous obtenons un accord en longueur d'onde entre 1615 nm et 1690 nm.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La génération d'une onde Raman Stokes polarisée rectilignement est possible en utilisant une fibre biréfringente pompée par une source polarisée rectilignement. Le schéma du montage expérimental est représenté sur la Figure 1. Le laser de pompage est un système MOPA (master-oscillator power-amplifier) entièrement fibré et polarisé rectilignement. Il met en œuvre une fibre PM codopée Er-Yb. Cette fibre est à structure double-gaine avec un cœur de 12 μm de diamètre ($\text{ON} = 0,2$) et une

gaine de 125 μm de diamètre ($\text{ON} = 0,45$). La puissance de pompage maximale couplée dans la gaine interne est de 48 W. L'amplificateur est injecté par une diode laser Fabry-Perot qui est pré-amplifiée dans une fibre monomode dopée Erbium. La modulation du courant d'alimentation à 500 kHz de la diode laser source permet d'élargir son spectre d'émission et ainsi d'éliminer la diffusion Brillouin stimulée dans la fibre Raman. La diode laser est de plus accordable entre 1534 nm et 1551 nm en ajustant sa température. La puissance de sortie maximale du laser de pompage autour de 1545 nm est de 11,4 W, avec un taux d'extinction de la polarisation de 20 dB. La fibre Raman est une fibre PM monomode dopée Ge (6 μm de diamètre de cœur, $\text{ON} = 0,17$), de longueur 300 m. Deux configurations de cavité ont été mises en œuvre. Dans la première configuration (fig. 1(a)), le laser Raman fonctionne en mode "free-running" avec un couplage en espace libre du faisceau de pompage. L'efficacité de couplage de la pompe dans la fibre Raman est mesurée proche de 75%. La cavité laser Raman est formée de deux miroirs dichroïques. Le miroir M_1 est le miroir de fond de cavité et présente un coefficient de réflexion élevé ($\sim 99,8\%$) à la longueur d'onde de la pompe (1545 nm) et à la longueur d'onde Raman (1700 nm). Ce miroir assure un double passage de la pompe dans la fibre Raman ce qui permet de réduire le seuil de fonctionnement du laser Raman. M_2 est le coupleur de sortie ($R_2 = 25\%$ ou $R_2 = 70\%$). Ce miroir peut également être remplacé par la réflexion de Fresnel de 3,6% sur la facette d'entrée de la fibre Raman clivée à angle droit. Le miroir M_3 est inséré dans la cavité et permet de séparer le faisceau pompe et le faisceau signal. Dans la seconde configuration (fig. 1(b)), l'insertion d'un réseau de diffraction en transmission dans la cavité du RFL permet d'accorder la longueur d'onde d'émission du laser et de réduire sa largeur spectrale. Nous avons également réalisé une modélisation numérique du laser Raman à partir des équations différentielles couplant les ondes pompe et signal co- et contra-propagatives. Cette modélisation permet d'optimiser les paramètres du laser Raman en accord avec l'expérience et de vérifier la prise en compte de tous les phénomènes de pertes.

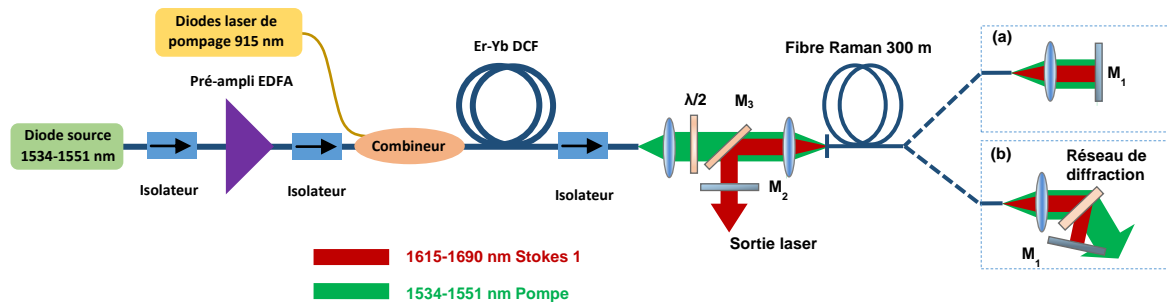


Fig. 1 : Schéma du RFL polarisé rectilignement, (a) en configuration de pompage double passage ou (b) pompage simple passage accordable en longueur d'onde.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats obtenus en configuration « free-running » sont donnés à la figure 2(a). La longueur d'onde de la diode laser source est ajustée à 1544 nm. L'utilisation d'un coupleur de sortie $R_2 = 70\%$ abaisse le seuil laser à 0,7 W mais l'efficacité de conversion est alors limitée par les pertes intra-cavité. En utilisant la réflexion de Fresnel de 3,6% sur la facette d'entrée de la fibre comme coupleur de sortie, le seuil laser augmente fortement mais les pertes intracavités sont réduites. On obtient alors les meilleures performances avec une puissance de sortie de 6,2 W à 1655 nm et une efficacité de conversion de 76%. Les calculs numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux (fig. 2(a)), ce qui indique une bonne évaluation du gain Raman et des pertes intra-cavité. Le faisceau en sortie est limité par diffraction et polarisé rectilignement avec un taux d'extinction de 20 dB. Le spectre du laser Raman a une forme gaussienne avec une largeur à mi-hauteur de 5 nm. En insérant le réseau de diffraction dans la cavité et en ajustant la longueur d'onde de pompage, il est alors possible d'accorder le laser Raman sur près de 70 nm (fig. 2(b)). Bien que

l'efficacité soit plus faible, la sélection en longueur d'onde permet d'atteindre une largeur spectrale de 0,2 nm (FWHM).

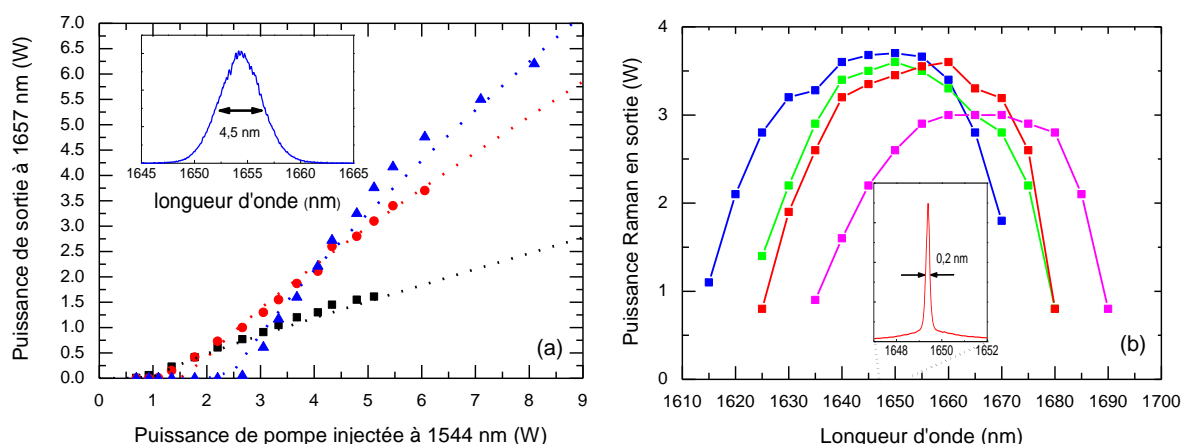


Fig. 2 : (a) Puissance de sortie du RFL à 1657 nm en fonction de la puissance de pompe injectée à 1544 nm avec la configuration sans élément sélectif : coupleur de sortie de réflexion 25% (noir), 70% (rouge), 3,6% (bleu) ; expérience (points) et simulation numérique (courbe pointillés). En encart, spectre du laser Raman avec le coupleur 3,6 %.

(b) Courbe d'accord en longueur d'onde, configuration avec réseau de diffraction et coupleur de sortie $R_2 = 3,6\%$: pompage à 1534 nm (bleu), 1542 nm (vert), 1546 nm (rouge), 1551 nm (magenta), avec respectivement 9,4 W, 9,2 W, 9 W et 7,8 W de puissance de pompe injectée. En encart, spectre du laser Raman à 1649,6 nm.

CONCLUSION

Pour conclure, nous avons développé un RFL fonctionnant à une longueur d'onde proche de 1657 nm et délivrant une puissance maximale de 6,2 W avec une efficacité de conversion de 76%. Le faisceau de sortie est limité par diffraction et polarisé rectilignement. De plus, le laser peut être accordé de 1615 à 1690 nm, ce qui permet de combler le gap en longueur d'onde entre les lasers à fibres dopées Erbium et Thulium.

RÉFÉRENCES

- [1] Balaswamy V, Aparanji S, Arun S, Ramachandran S and Supradeepa V R “High power, ultra-widely tunable wavelength, cascaded Raman fiber laser”, Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (San Jose, CA) pp 1–2, 2018.
- [2] Sharma U, Chang E W and Yun S H “Long-wavelength optical coherence tomography at 1.7 μm for enhanced imaging depth”, Opt. Express **16** 19712–23, 2008.
- [3] Majewski M R, Woodward R I, and Jackson S D, “Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from 2.8 μm to 3.4 μm , pumped at 1.7 μm ”, Opt. Lett. **43** 971–974, 2018.
- [4] Kalachev Y L, Mihailov V A, Podreshetnikov V V and Shcherbakov I A “The study of a Tm:YLF laser pumped by a Raman shifted Erbium fiber laser at 1678 nm”, Opt. Com. **284** 3357–3360, 2011.
- [5] Firstov S V, Alyshev S V, Riumkin K E, Khagai A M, Kharakhordin A V, Melkumov M A and Dianov E M “Laser-active fibers doped with bismuth for a wavelength region of 1.6–1.8 μm ” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **24** 1–15, 2018.
- [6] Liu J, Shen D, Huang H, Zhao C, Zhang X and Fan D “High-power and highly efficient operation of wavelength-tunable Raman fiber lasers based on volume Bragg gratings” Opt. Express **22** 6605–12, 2014.
- [7] Svane A S, Liu X and Rottwitz K “Highly stable PM Raman fiber laser at 1680 nm” CLEO: 2013, OSA Technical Digest paper CW1M.6, 2013.
- [8] Thouroude R, Gilles H, Hideur A and Laroche M “Linearly-polarized high-power Raman fiber lasers near 1670 nm”, Laser Phys. Lett. **16** 025102, 2019.