

Multiple Cascaded Raman Fiber Laser with a Cavity-Free Configuration*

Chunyu Guo[#], Yiming Wu, Jinhui Yang

Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen
Email: [#]cyguo@szu.edu.cn

Received: Jul. 24th, 2013; revised: Jul. 28th, 2013; accepted: Aug. 3rd, 2013

Copyright © 2013 Chunyu Guo et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: By using a 520-m-long highly nonlinear fiber (HNLf) pumped by a 20 W CW Yb-doped fiber laser, four Raman Stokes emissions are demonstrated in a simple cavity-free configuration. The Stokes wavelengths are 1121 nm, 1178 nm, 1247 nm and 1319 nm respectively with a total frequency shift of 53 THz, and the maximum output power is 3.2 W. The evolution of the multiple Raman Stokes emission is presented and analyzed. The generation of the multiple Stokes from the cavity-free configuration is attributed to the random distributed feedback based on Rayleigh scattering. It is also demonstrated that the fiber length of the cavity-free Raman fiber laser can be largely shortened by using a HNLf as the Raman gain medium.

Keywords: Raman Fiber Laser; Multiple Stokes Emission; Cavity-Free Laser; Highly Nonlinear Fiber

无谐振腔结构的四级级联拉曼光纤激光器*

郭春雨[#], 伍一鸣, 杨锦辉

深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 深圳
Email: [#]cyguo@szu.edu.cn

收稿日期: 2013年7月24日; 修回日期: 2013年7月28日; 录用日期: 2013年8月3日

摘要: 利用 20 W 连续波掺 Yb 光纤激光器泵浦一段 520 m 长的高非线性光纤, 在无谐振腔的简单结构中实现了四级级联拉曼激光输出, 各阶斯托克斯波长分别为 1121 nm、1178 nm、1247 nm 和 1319 nm, 总的频移量为 53 THz, 最大输出功率达到 3.2 W。实验中描述了斯托克斯光的转换过程, 并进行了相应分析。无谐振腔结构中多级拉曼激光的产生被认为是基于瑞利散射效应的随机分布反馈, 并且证实通过高非线性光纤作为拉曼增益介质可以缩短无谐振腔拉曼光纤激光器所需的光纤长度。

关键词: 拉曼光纤激光器; 多阶斯托克斯辐射; 无谐振腔激光器; 高非线性光纤

1. 引言

由于具有通常掺稀土离子光纤激光器所没有的宽带增益谱和灵活的激光输出波长, 拉曼光纤激光器在科研和产业中一直都得到人们广泛的关注。随着近

些年高功率光纤激光器和各种非线性光纤控制技术成熟, 拉曼光纤激光器的研究不断取得新的进展^[1-3]。

2009年, Yan Feng 等利用 200 W 连续波掺 Yb 光纤激光器泵浦一段 30 m 长的单模光纤, 由一对光纤布拉格光栅(FBG)构成拉曼激光谐振腔, 实现了最大

*资助信息: 国家自然科学基金(61275144), 深圳市科技计划项目(Nos. JCYJ20120613110637373 & JCYJ20130329142022715)。

[#]通讯作者。

功率为 150 W 的 1120 nm 一阶拉曼激光输出,这是目前所报导的最高输出功率的拉曼光纤激光器^[3]。此外,为了拓展拉曼激光输出波长,级联拉曼光纤激光器的研究也不断深入^[4,5]。2010 年, OFS 实验室的 J. W. Nicholson 等利用中心波长为 1117 nm, 输出功率达到 162 W 的 MOPA 结构掺 Yb 光纤激光器泵浦一段 120 m 的长波截止拉曼滤波光纤(RFF), 通过五对 FBG 组成的级联拉曼谐振腔将泵浦波长拉曼频移到了 1480 nm, 采用损耗峰位于 1175 nm 一阶斯托克斯波长处的长周期光纤光栅(LPG)来避免一阶拉曼反馈光对掺 Yb 放大系统的影响, 从而保证掺 Yb 泵浦源的高功率稳定运行, 最终实现了输出功率为 81 W 的 1480 nm 级联拉曼激光输出^[6]。2012 年, 他们将之前的窄带长周期光纤光栅替换为 1117/1175 nm 宽带波分复用器(WDM), 进一步降低一阶斯托克斯反射光对泵浦源的影响, 从而将 1480 nm 的级联拉曼激光输出功率提高到了 104 W^[7]。

尽管拉曼光纤激光器的输出功率不断得到提高, 激光波长不断得到拓展, 但是通常拉曼光纤激光器的实现要求高质量的 FBG、WDM 或 LPG 等器件, 这增加了整个系统的复杂性及其成本。那么一个非常值得关注的问题就是是否可以通过一种简单的结构和较低的成本实现级联拉曼激光输出。

本文首次利用百米级高非线性光纤实现了无谐振腔结构的瓦级高功率四级级联拉曼激光输出, 提供了一种实现简单的无谐振腔结构的多级拉曼光纤激光器的方案。

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 利用最大输出功率为 20 W 的连续波掺 Yb 光纤激光器(YFL)直接泵浦一段长度为 520 m 的高非线性光纤(HNLF)。掺 Yb 光纤激光器输出中心波长为 1070 nm, 谱宽(FWHM)为 0.5 nm。高非线性光纤的非线性系数和拉曼增益系数分别为 $10 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 和 $4.8 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$, 模场直径和数值孔径分别为 $3.6 \mu\text{m}$ 和 0.35。高非线性光纤的零色散波长为 1840 nm, 位于 1070 nm 泵浦激光前几级级联斯托克斯线的长波方向, 有利于位于光纤正常色散区的拉曼斯托克斯光的产生。掺 Yb 光纤激光器尾纤(HI1060)和高非线性光纤之间存在着比较大的模场失配, 如果

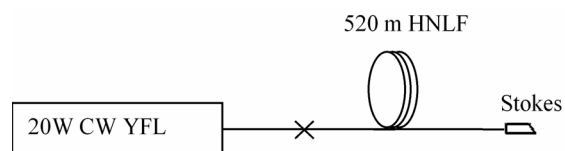


Figure 1. The experimental setup of the multiple Stokes generation
图 1. 多阶拉曼斯托克斯光产生的实验装置图

直接熔接将引入较大的熔接损耗, 因此首先对高非线性光纤进行纤芯热扩散, 然后再与激光器的 HI1060 尾纤进行模场匹配熔接, 最终得到了 0.2 dB 的熔接损耗。为了简化系统结构, 在泵浦激光器和高非线性光纤之间并未采用通常的拉曼波长高反射光纤布拉格光栅, 此外, 为了避免端面光反射对泵浦激光器造成的损伤, 对高非线性光纤的输出端面进行了 8° 角切割, 利用光功率计(PM: 407A, Spectrum Physics)和光谱仪(OSA: AQ6370 B, YOKOGAWA, 0.05 nm resolution)对输出功率和光谱分别进行测量。

3. 实验结果及讨论

随着 1070 nm 泵浦功率的增加, 系统输出光谱的演化如图 2 所示。当泵浦功率达到 1.9 W 时, 在 1121 nm 处出现了一阶拉曼斯托克斯光(S1)。当泵浦功率为 4.8 W 时, 一阶斯托克斯光达到了最大的 1.3 W。泵浦激光和一阶斯托克斯光之间的频移为 12.8 THz (425 cm^{-1})。继续增加泵浦功率, 位于 1178 nm 的二阶斯托克斯光(S2)也逐渐出现, 并在 9.4 W 的泵浦功率下, 输出功率达到 1.9 W。一阶和二阶斯托克斯光之间的频移为 12.9 THz (432 cm^{-1})。当泵浦功率从 9.4 W 增大到 20 W 的过程中, 分别出现了位于 1247 nm 处的三阶斯托克斯光(S3)和 1319 nm 处的四阶斯托克斯光(S4), 与上阶斯托克斯光的频移分别为 14.1 THz (470 cm^{-1})和 13.1 THz (438 cm^{-1}), 最大输出功率分别为 2.5 W 和 3.2 W。然而从图 2 中可以看出, 在泵浦为最大的 20 W 输出功率下, 三阶斯托克斯光并未全部转化到四阶斯托克斯输出。相信泵浦功率如果可以继续增大, 还可以实现更高阶的拉曼斯托克斯输出。

图 3(a)为系统输出功率随泵浦功率的关系, 在泵浦为最大的 20 W 时, 输出功率为 3.2 W, 整体光光转化效率为 16%。图 3(b)为单独出现的各阶斯托克斯光波长与泵浦功率的关系。可见, 各阶斯托克斯输出功率和波长与泵浦功率有着比较好的线性关系, 预示着此系统结构对多阶拉曼斯托克斯光产生的潜力。

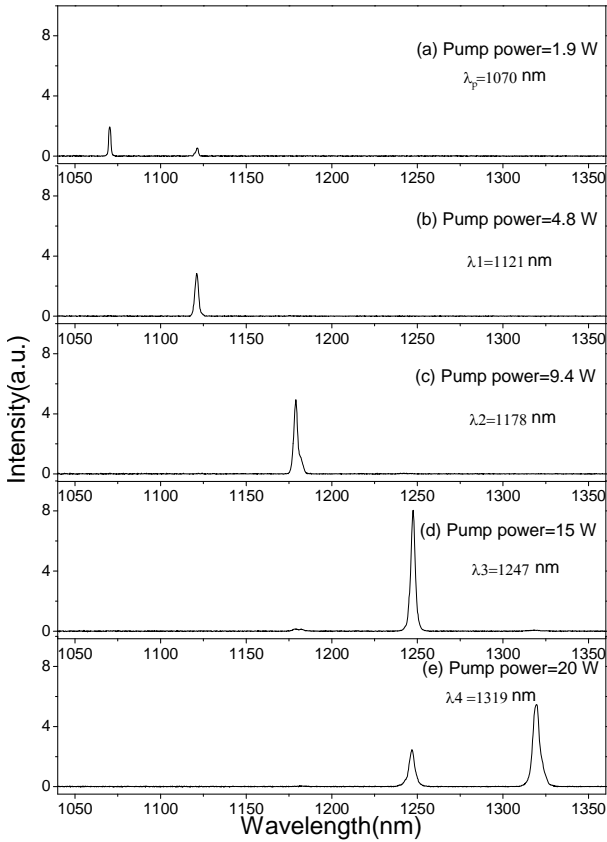


Figure 2. The output spectrum evolution at different pump powers
图2. 不同泵浦功率下的输出光谱演化

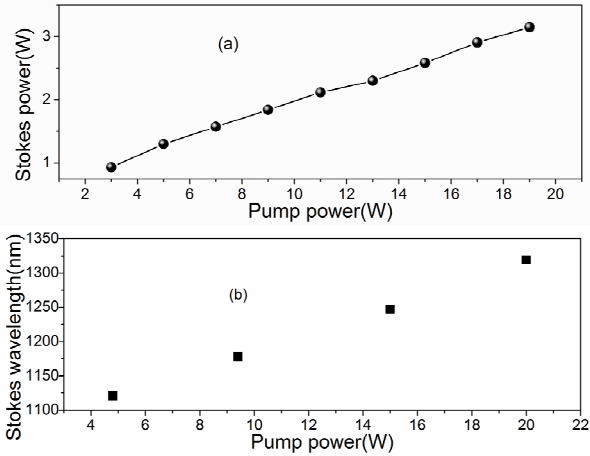


Figure 3. (a) Stokes power as a function of pump power; (b) Stokes wavelengths as a function of pump power
图3. (a) 输出拉曼激光功率与泵浦功率关系图; (b) 输出的拉曼激光波长与泵浦功率关系图

图 4 为各阶拉曼斯托克斯光的线宽(FWHM)，一阶到四阶斯托克斯线宽分别为 2.46 nm、2.55 nm、2.84 nm 和 4.30 nm。高阶斯托克斯线宽宽于低阶斯托克斯线宽。这一线宽扩展主要是由于受激布里渊散射效应

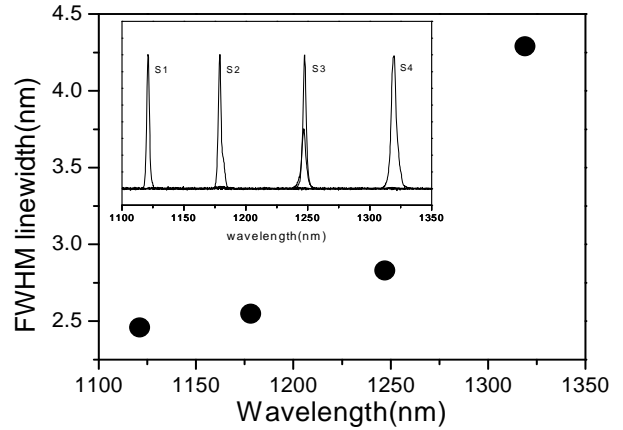


Figure 4. FWHM linewidths of the Raman Stokes lines
图 4. 各阶斯托克斯谱线线宽

(SBS)和四波混频(FWM)等多种非线性效应的共同作用导致的，并会限制斯托克斯总级数的增加^[8]。

值得注意的是传统拉曼光纤激光器需要利用二色镜或光纤布拉格光栅等作为拉曼谐振腔来实现斯托克斯光输出，而本文中各阶拉曼斯托克斯光的产生是在系统并未提供任何外在拉曼谐振腔的情况下实现的。这与当前一种新型光纤激光器——随机分布反馈光纤激光器(Random Distributed Feedback Fiber Laser, RDFFL)的特征非常相似。与传统光纤激光器相比，RDFFL 没有谐振腔，仅包括泵浦源和增益介质两部分，其结构简单，方向性好，能提供稳定的、空间不相干的连续激光输出，是一种重要的新光源^[9]。RDFFL 的实现是基于光纤中传输光的分布式瑞利散射和拉曼散射效应。光在光纤中传输时，由于材料的固有不均匀性，将会产生背向瑞利散射，虽然背向瑞利散射系数很小，但当采用超长距离的光纤，且光纤中存在分布式拉曼泵浦光时，这些微弱的背向散射光在传输过程中就会得到持续不断的放大，在空间上形成了随机的光学反馈。当泵浦功率和光纤长度增加到一定程度时，散射光的增益克服损耗，将会形成稳定的自激振荡^[9-11]。

当前的 RDFFL 大多是采用长度超过几十公里的光纤作为拉曼增益光纤来实现的，而且目前也主要集中于前两级级联拉曼输出^[12-14]，而本文中仅利用 520 m 长的增益光纤就实现了无谐振腔结构的四级级联拉曼激光输出。通过分析，我们认为本文中的无谐振腔结构的级联拉曼激光的产生仍然是基于瑞利散射的随机分布反馈，而仅利用几百米的增益光纤就可以实

现分布反馈拉曼激光输出是由于所用增益光纤具有很高的非线性系数和拉曼增益系数, 以及较强的瑞利散射系数, 增强了瑞利散射的拉曼放大, 进而降低了随机激光产生的泵浦功率阈值和所需光纤长度^[14]。因此通过高非线性光纤作为拉曼增益光纤在无谐振腔结构的级联拉曼光纤激光器方面具有重要的应用优势。

4. 结论

通过采用 520 m 长的高非线性光纤作为拉曼增益介质, 以 20 W 的掺 Yb 光纤激光器作为泵浦源, 通过无谐振腔结构, 实现了输出功率达到瓦级的四级级联拉曼激光输出。由于具有简单的结构和可覆盖从 1121 nm 到 1319 nm 宽带范围的四阶拉曼激光输出, 这一级联拉曼光纤激光器将在非线性光学、光传感和光通信等领域具有广泛的应用前景^[9,15]。

参考文献 (References)

- [1] Z. Xiong, N. Moore, Z. G. Li and G. C. Lim. 10-W Raman fiber lasers at 1248 nm using phosphosilicate fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(10): 2377-2381.
- [2] R. Vallée, E. Bélanger, B. Déry, M. Bernier and D. Faucher. Highly efficient and high-power Raman fiber laser based on broadband chirped fiber Bragg gratings. *Journal of Light Wave Technology*, 2006, 24(12): 5039-5043.
- [3] Y. Feng, L. R. Taylor and D. B. Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23678-23683.
- [4] Y. Emori, K. Tanaka, C. Headley and A. Fujisaki. High-power cascaded Raman fiber laser with 41-W output power at 1480-nm band. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, 6 May 2007.
- [5] P. Suret, N. Y. Joly, G. Mélin and S. Randoux. Self-oscillations in a cascaded Raman laser made with a highly nonlinear photonic crystal fiber. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11237-11246.
- [6] J. W. Nicholson, M. F. Yan, P. Wisk, J. Fleming, F. DiMarcello, E. Monberg, T. Taunay, C. Headley and D. J. DiGiovanni. Raman fiber laser with 81 W output power at 1480 nm. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3069-3071.
- [7] V. R. Supradeepa, J. W. Nicholson, C. Headley, Y.-W. Lee, B. Palsdottir and D. Jakobsen. Cascaded Raman fiber laser at 1480 nm with output power of 104 W. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8237: 82370J.
- [8] S. A. Babin, D. V. Churkin, A. E. Ismagulov, S. I. Kablukov and E. V. Podivilov. Spectral broadening in Raman fiber lasers. *Optics Letters*, 2006, 31(20): 3007-3009.
- [9] S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher, P. Harper, D. V. Churkin, S. I. Kablukov, J. D. Ania Castanon, V. Karalekas and E. V. Podivilov. Random distributed feedback fibre laser. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 231-235.
- [10] D. Churkin, S. Babin, A. E. El-Taher, P. Harper, S. Kablukov, V. Karalekas, J. D. Ania-Castañón, E. Podivilov and S. K. Turitsyn. Raman fiber lasers with a random distributed feedback based on Rayleigh scattering. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033828.
- [11] 胡朋兵, 董新永. 随机分布反馈光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48: 110606.
- [12] I. D. Vatnik, D. V. Churkin, S. A. Babin and S. K. Turitsyn. Cascaded random distributed feedback Raman fiber laser operating at 1.2 μm . *Optics Express*, 2011, 19(19): 18486-18494.
- [13] W. L. Zhang, Y. J. Rao, J. M. Zhu, Z. X. Yang, Z. N. Wang and X. H. Jia. Low threshold 2nd-order random lasing of a fiber laser with a half-opened cavity. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14400-14405.
- [14] W. L. Zhang, Y. Y. Zhu, Y. J. Rao, Z. N. Wang, X. H. Jia and H. Wu. Random fiber laser formed by mixing dispersion compensated fiber and single mode fiber. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8544-8549.
- [15] Z. N. Wang, Y. J. Rao, H. Wu, P. Y. Li, Y. Jiang, X. H. Jia and W. L. Zhang. Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17695-17700.