

# 全光纤单频光纤放大器实现 550 W 近衍射极限输出

来文昌, 马鹏飞\*, 刘伟, 黄龙, 李灿, 周朴\*\*

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 通过引入长锥形增益光纤综合抑制受激布里渊散射和模式不稳定效应, 兼顾 1030 nm 波段信号光放大的高模式不稳定阈值特性, 基于全光纤放大器实现了 550 W 的近衍射极限单频光纤激光输出, 整个放大器的斜率效率达 80%, 最高功率时的光束质量测量值  $M^2$  约为 1.47; 系统亮度的进一步提升受限于热致模式不稳定效应。

**关键词** 激光器; 高功率光纤激光; 单频; 受激布里渊散射; 模式不稳定

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0415001

## 550-W Single-Frequency All-Fiber Amplifier with Near-Diffraction-Limited Beam Quality

Lai Wenchang, Ma Pengfei\*, Liu Wei, Huang Long, Li Can, Zhou Pu\*\*

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** In this study, a 550-W single-frequency all-fiber laser with near diffraction-limited beam quality is achieved by simultaneously suppressing the stimulated Brillouin scattering and mode instability effects with a long-tapered gain fiber and employing the ability of high mode instability threshold of 1030-nm signal laser. The slope efficiency of the whole amplifier is observed to be as high as 80% and the measured beam quality  $M^2$  is approximately 1.47 at the maximum output power. Further brightness scaling is limited owing to the mode instability effect.

**Key words** lasers; high power fiber laser; single frequency; stimulated Brillouin scattering; mode instability

**OCIS codes** 140.3510; 140.3298; 190.4370

高功率单频光纤激光器在引力波探测、非线性频率转换、激光雷达、相干合成等领域具有巨大的应用需求<sup>[1-3]</sup>。然而, 受限于受激布里渊散射(SBS)与热致模式不稳定(TMI)效应的双重影响<sup>[4-5]</sup>, 单频光纤激光器的输出功率始终未能突破千瓦量级。2013年, 本课题组采用大模场、高掺杂保偏增益光纤抑制SBS效应, 基于全光纤结构实现了332 W单频线偏振光纤激光输出<sup>[6]</sup>; 2014年, 美国空军研究实验室基于光子晶体光纤和温度梯度相结合的方法综合抑制了SBS与TMI, 基于空间结构实现了811 W的单频光纤激光输出<sup>[7]</sup>。然而, 温度梯度的引入和空间结构特性会导致系统的稳定性、可维护性和可柔性操作能力下降。2017年初, 本课题组通过引入应

力梯度抑制SBS效应, 将全光纤单频线偏振光纤放大器的输出功率进一步提升至414 W<sup>[8]</sup>。

最近, 本课题组基于大模场长锥形增益光纤特殊的结构设计和强泵浦吸收特性, 实现了全光纤单频光纤放大器中SBS、TMI和放大自发辐射(ASE)等多重受限因素的综合抑制。此外, 本课题组充分利用1030 nm波段发射截面大、上能级反转粒子数小、增益饱和效应强等特性<sup>[9]</sup>, 实现了系统中模式不稳定效应的优化控制, 获得了输出功率达550 W的近衍射极限单频光纤激光输出。整个实验结构如图1所示, 中心波长为1030 nm、输出功率达40 mW的单频种子源首先经过两级全光纤预放大器进行功率预放大, 将功率提升至约8 W; 预放大后的激光经

收稿日期: 2020-02-04; 修回日期: 2020-02-19; 录用日期: 2020-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61705264)、湖南省创新研究群体基金(2019JJ10005)、湖南创新型省份建设专项(2019RS3017)、广东省重点领域研发计划(2018B090904001)

\* E-mail: shandapengfei@126.com; \*\* E-mail: zhoup203@163.com

过环形器后注入到主放大器,其中环形器用来监测放大过程中的回光变化和实现前级链路的保护。主放大器抽运源由 6 个输出功率约为 180 W、中心波长为 976 nm 的稳波长半导体激光器模块构成;大模场长锥形掺镱增益光纤(Tapered-YDF) 输入端纤芯、包

层的直径分别为 36.1  $\mu\text{m}$  和 249.3  $\mu\text{m}$ ,输出端纤芯、包层的直径分别为 57.8  $\mu\text{m}$  和 397.3  $\mu\text{m}$ ,增益光纤长度为 1.3 m(其中锥区长度约为 0.74 m,数值孔径为 0.064)。主放大器最终放大的激光经实验室自行设计制备的光纤端帽输出到自由空间。

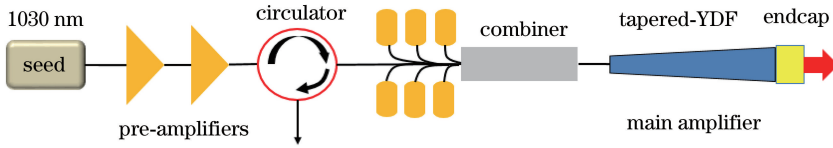


图 1 实验原理图

Fig. 1 Experimental principle

图 2 给出了输出功率、回光功率随泵浦功率的变化,可见:随着泵浦功率增大,输出功率近似呈线性增大;当泵浦功率为 676 W 时,输出激光功率达到 550 W,斜率效率达 80%,此时光束质量的测量值  $M^2=1.47$ 。在整个放大过程中,回光没有出现明显的非线性增长,表明 SBS 效应得到了良好的抑制。图 3 给出了输出功率为 550 W 时放大器的输出光谱,在信噪比约为 50 dB 的情况下仍未观察到明显的 ASE。图 3 中的插图为采用自由光谱范围为 1.5 GHz 的法布里-珀罗腔测试的激光输出光谱结果,计算得 3 dB 线宽约为 45 MHz。

下一步工作将从光纤结构优化设计、泵浦方式优化等方面进一步提升 TMI 阈值,基于全光纤结构实现更高功率的单频光纤激光输出。

致谢 感谢陈子伦、王涛、常洪祥、喻湘荣、郭淑香等在实验系统搭建和测试中给予的支持和帮助。

参 考 文 献

[1] Fu S J, Shi W, Feng Y, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): A49-A62.

[2] Yang C S, Chen D, Zhao Q L, et al. Research progress of 2.0  $\mu\text{m}$ -band Tm-doped continuous wave single-frequency fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201006.

杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. 2.0  $\mu\text{m}$  波段掺钪连续单频光纤激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201006.

[3] Liu C, Leng J Y, Qi Y F, et al. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency, single-mode, linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0502001.

刘驰, 冷进勇, 漆云凤, 等. 单频保偏掺 Yb 光纤放大器中的受激布里渊散射实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502001.

[4] Steinke M, Tunnermann H, Kuhn V, et al. Single-frequency fiber amplifiers for next-generation gravitational wave detectors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-13.

[5] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13218-13224.

[6] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, et al. Single-frequency 332 W, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier

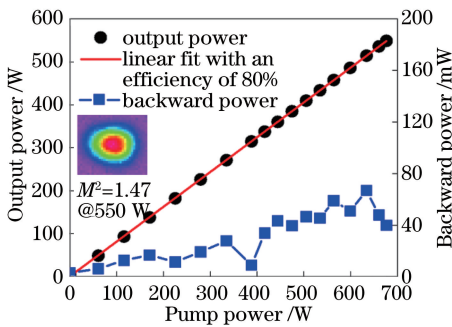


图 2 输出功率、回光功率随泵浦功率的变化

Fig. 2 Output power and backward power versus pump power

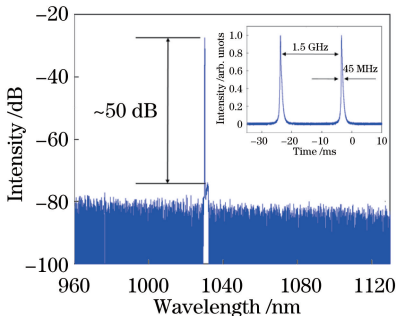


图 3 最高输出功率下的激光光谱

Fig. 3 Laser spectrum at maximum output power

- with near diffraction-limited beam quality [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4854-4857.
- [7] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [8] Huang L, Wu H S, Li R X, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 1-4.
- [9] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(8): 1-6.