



·强激光物理与技术·研究快报·

简单 MOPA 结构窄线宽激光突破 5 kW 近单模输出

田 鑫, 饶斌裕, 王 蒙, 王崇伟, 奚小明, 袁纬仪, 李智贤, 李 昊,
陈子伦, 潘志勇, 王小林, 马鹏飞, 王泽锋, 陈金宝

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 南湖之光实验室, 高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 高功率窄线宽光纤激光器在非线形频率转换、光谱合成以及相干合成等领域有着重要的应用前景。本文基于自研的复合腔结构窄线宽振荡器作为种子, 采用单级主振荡功率放大技术(MOPA), 实现了 5 kW 高效率的近单模窄谱激光输出。通过优化振荡器的时序特性和放大级结构, 受激拉曼散射、光谱展宽和热致模式不稳定效应得到综合抑制。在最高功率时, 信号光的 3 dB 和 20 dB 线宽分别为 0.48 nm 和 2.1 nm, 放大器的斜率效率约为 86.1%, 拉曼抑制比为 28.3 dB, 光束质量 M^2 约 1.35。本研究工作对于高功率窄线宽光纤激光的发展和研究具有重要的指导意义。

关键词: 高功率; 光纤激光器; 窄线宽; 主振荡功率放大

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220267

5 kW near single mode output of narrow linewidth laser with simple MOPA structure

Tian Xin, Rao Binyu, Wang Meng, Wang Chongwei, Xi Xiaoming, Yuan Weiyi, Li Zhixian, Li Hao,
Chen Zilun, Pan Zhiyong, Wang Xiaolin, Ma Pengfei, Wang Zefeng, Chen Jinbao

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, Nanhu Laser Laboratory, Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: High-power narrow-linewidth fiber lasers are highly desired for nonlinear frequency conversion, spectral combination, and coherent combination. In this work, a 5 kW near single mode narrow-linewidth fiber laser system is established based on a composite fiber oscillator seed. By optimizing temporal characteristic of seed and structure of amplifier, the stimulated Raman scattering, spectral broadening, and transverse mode instability effects are suppressed comprehensively. Consequently, the output power is scaled up to 5 kW with a slope efficiency as high as approximately 86.1%. The peak signal to noise ratio is about 28.3 dB compared with the Raman Stokes light. The 3 dB and 20 dB linewidths are 0.48 nm and 2.1 nm, respectively. The beam quality (M^2 factor) is about 1.35. This work shows a amplification potential of narrow-linewidth fiber lasers based on such a simple structure.

Key words: high power, fiber laser, narrow linewidth, master oscillator power amplifier

高功率窄线宽光纤激光在光束合成、非线性频率变换等领域具有重要应用需求, 近年来成为光纤激光领域的研究热点。由于谱功率密度高、相干性好, 窄线宽光纤激光提升输出功率的同时保持光束质量面临较大困难, 需要平衡多种非线性效应, 如自相位调制 (SPM)、模间四波混频 (IMFWM)、受激拉曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS) 以及模式不稳定 (TMI) 效应。目前, 获得高功率窄线宽激光的主要技术方案是通过主振荡功率放大结构, 即 MOPA 结构。其种子通常有相位调制单频激光和窄谱光纤振荡器等选择。前者时序特性较好, 在放大时非线性效应和光谱展宽较弱, 功率提升受到的限制因素相对较少。目前, 中国工程物理研究院和国防科技大学分别报道了 5 kW 和 6 kW 高光束质量的窄线宽光纤放大器^[1-3]。但该方案系统结构较为复杂, 需要使用相位调制和随机信

* 收稿日期: 2022-08-29; 修订日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12004431); 湖南省科技创新人才计划科技创新领军人才项目 (2021RC4027)

联系方式: 田 鑫, 769368131@qq.com。

通信作者: 奚小明, exixiaoming@163.com;

王泽锋, zefengwang_nudt@163.com。

号发生器等设备来展宽种子线宽来提升 SBS 的阈值,且进入主放大器之前需要经过多级放大来提升种子功率,导致系统性价比和鲁棒性欠佳。与相位调制单频激光种子相比,采用窄谱光纤振荡器种子可直接通过单级放大实现高功率窄线宽激光输出,这种方案结构简单,成本更低,可以大大提升系统的紧凑性和鲁棒性,近年来受到了广泛关注。目前,中国工程物理研究院和清华大学均实现了大于 3 kW 的窄线宽激光输出^[4-6]。但该方案的功率提升受非线性效应影响更为严重,在放大过程中需注意光谱展宽和 SRS 效应的抑制,解决的重点和难点在于窄谱振荡器种子时序的优化。本课题组前期针对窄谱振荡器单级放大方案,在窄谱光纤光栅、种子振荡腔和放大级结构等方面开展了大量研究^[7-9]。

近期,国防科技大学高能激光技术研究团队进一步优化了种子和放大级的结构,采用单级 MOPA 结构实现了 5 kW 近单模窄线宽激光输出,实验结构如图 1 所示。该放大器种子为复合腔结构的窄谱振荡器种子,采用后向泵浦方式,增益光纤采用 20/400 μm 双包层掺镱光纤(YDF),两个高反和低反光栅的中心波长约为 1080 nm,3 dB 带宽分别为 3 nm、3 nm 和 0.05 nm,反射率分别为 99%、50% 和 10%。该结构很好地抑制了振荡器的类弛豫振荡和自锁模脉冲现象,优化了种子的时序特性。另外,在种子和放大级间加入隔离带通滤波器(BPF),有效地减弱了放大级对种子的影响。种子激光经过包层光滤除器(CLS 1)注入放大级,功率约 24 W。放大级泵浦源为稳波长 976 nm 的半导体激光(WS-LD),增益光纤为 20/400 μm YDF,光纤长度约为 12.5 m。输出激光经过包层光滤除器(CLS 2)净化后由光纤端帽(QBH)输出。激光器的有源光纤和无源器件均放置在水冷板上进行制冷。为有效减弱了系统的 SRS 效应,放大级的后向泵浦合束器、CLS 2 和 QBH 均采用纤芯为 25 μm 的传能光纤。并且我们将 CLS 2 和 QBH 制作到后向泵浦合束器的输出尾纤上(无熔点一体化器件),使系统输出更为紧凑,输出光纤总长度约为 1.7 m。另一方面,种子的合束器及放大级前向合束器均采用侧面泵浦/信号合束器,降低了器件对输出激光光束质量的影响。

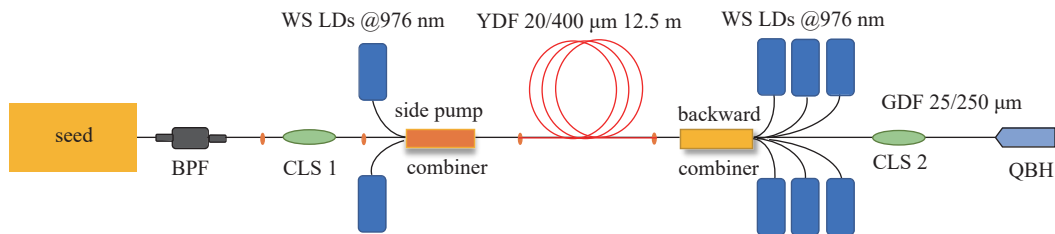


Fig. 1 Schematic diagram of the narrow linewidth fiber amplifier

图 1 窄线宽光纤放大器结构示意图

实验中,通过优化种子激光的时序特性,提高了放大器中的 SRS 阈值,降低了光谱展宽速度,通过双向泵浦结合减小 YDF 弯曲半径的方式抑制了 TMI 效应。最终在泵浦功率为 6020 W 时实现了 5 kW 的近单模激光输出,前后向泵浦比例约为 1:6,放大级的斜率效率约为 86.1%,如图 2 所示。在最高功率时,3 dB 线宽约 0.48 nm,20 dB 线宽为 2.1 nm,SRS 信噪比约为 28.3 dB,多次测量光束质量,没有出现退化迹象,测量的平均结果为: $M_x^2 \approx 1.44$, $M_y^2 \approx 1.25$ 。该放大器经过 5 次出光测试,每次均能到达到 5 kW 稳定输出,5 kW 的工作时间超过 30 min,表明该放大器可长时间稳定工作。

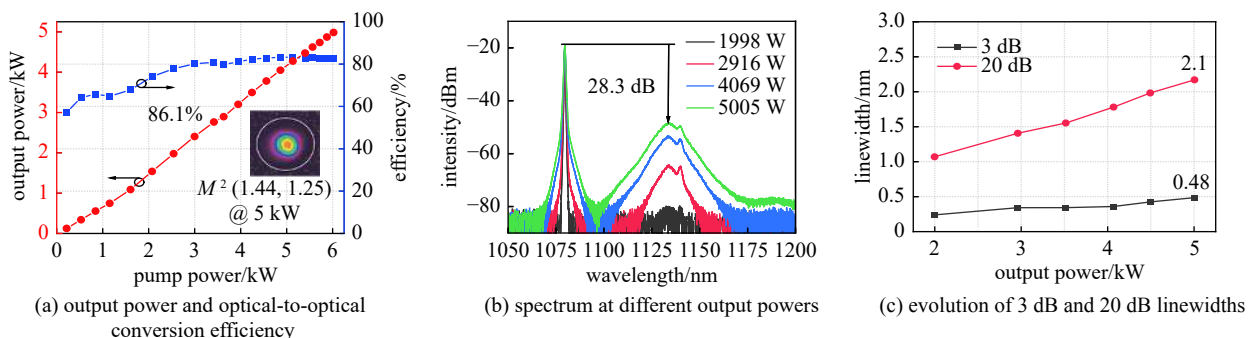


Fig. 2 Laser performance of the narrow linewidth fiber amplifier

图 2 窄线宽光纤放大器的激光特性

与此前报道结果相比,通过进一步优化种子激光时序,结合放大级泵浦比例的优化,实现了光谱线宽可控的和高拉曼抑制比的激光输出,提升了多项非线性效应的阈值,使得线宽更窄的同时拉曼更弱。当前系统功率的进一

步提升主要受限于 TMI 效应。下一步拟对放大级增益光纤的结构参数进行优化设计,综合抑制 SBS、SRS 和 TMI 效应对输出功率和光束质量的影响,实现激光器输出功率和光束质量的进一步提升。

致 谢 感谢肖虎、黄良金、宋涛、姚天甫、陈益沙等人对本实验提供的支持和帮助!

参考文献:

- [1] Ma P, Xiao H, Liu W, et al. All-fiberized and narrow-linewidth 5 kW power-level fiber amplifier based on a bidirectional pumping configuration[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e45.
- [2] Huang Z, Shu Q, Tao R, et al. >5 kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [3] Wang G, Song J, Chen Y, et al. Six kilowatt record all-fiberized and narrow-linewidth fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10, e22.
- [4] Wang Y S, Ke W W, Peng W J, et al. 3 kW, 0.2 nm narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a compact MOPA structure[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17: 075101.
- [5] Huang Y S, Xiao Q R, Li D, et al. 3 kW narrow linewidth high spectral density continuous wave fiber laser based on fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106538.
- [6] Du S, Fu G, Qi T, et al. 3.3 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *SSRN Electronic Journal*, 2022: 4076907.
- [7] 王蒙, 田鑫, 赵晓帆, 等. 基于简单 MOPA 结构实现 3.78 kW 全光纤窄线宽激光输出[J]. *中国激光*, 2022, 49: 0416001. (Wang Meng, Tian Xin, Zhao Xiaofan, et al. All-fiberized 3.78 kW narrow-linewidth fiber amplifier based on simple MOPA structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49: 0416001)
- [8] Tian X, Rao B, Wang M, et al. 4 kW narrow-linewidth fiber laser based on a simple one-stage MOPA structure[J]. *Laser Physics Letters*, 2022, 19: 115101.
- [9] 田鑫, 饶斌裕, 王蒙, 等. 基于简单 MOPA 结构实现 4.45kW 近单模窄线宽激光输出[J]. *中国激光*, 2022, 49: 1316001. (Tian Xin, Rao Binyu, Wang Meng, et al. 4.45 kW near single mode narrow-linewidth fiber amplifier based on simple MOPA structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49: 1316001)