



·强激光物理与技术·研究快报·

国产纺锤形渐变掺镱光纤实现 6 kW 宽谱激光输出

杨保来, 杨欢, 叶云, 奚小明, 张汉伟, 黄良金, 王鹏, 史尘,
王小林, 闫志平, 潘志勇, 王泽锋, 周朴, 许晓军, 陈金宝

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 高功率高光束质量光纤激光器在工业加工等领域有着广泛的应用, 然而光纤中的非线性效应和模式不稳定效应限制着高光束质量光纤激光器的功率提升, 采用新型结构大模场增益光纤在同时抑制非线性效应和模式不稳定效应方面具有较大潜力。报道了基于单位自研的纺锤形渐变掺镱光纤激光成功实现 6 kW 功率、高光束质量激光输出。激光器采用主振荡功率放大结构, 放大级采用双向 981 nm 泵浦纺锤形渐变掺镱光纤, 在总泵浦功率为 7.68 kW 时, 输出功率达到 6.02 kW, 光束质量 M^2 因子约为 1.9。通过进一步优化纺锤形掺镱光纤制作工艺及结构参数, 有望实现更高功率、近单模光束质量的光纤激光输出。

关键词: 光纤放大器; 高功率; 锥形光纤; 纺锤形渐变光纤

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220220

6 kW broadband fiber laser based on home-made ytterbium-doped fiber with gradually varying spindle-shape structure

Yang Baolai, Yang Huan, Ye Yun, Xi Xiaoming, Zhang Hanwei, Huang Liangjin, Wang Peng, Shi Chen,
Wang Xiaolin, Yan Zhiping, Pan Zhiyong, Wang Zefeng, Zhou Pu, Xu Xiaojun, Chen Jinbao

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

Abstract: High power fiber lasers with high beam quality have been widely employed in applications of industrial manufacture. However, the power scaling of the fiber lasers with high beam quality are limited by the fiber nonlinear effects and the transverse mode instability. It is promising to simultaneously mitigate the fiber nonlinear effects and transverse mode instability by employing large mode area gain fiber with novel structure. In this letter, we report a 6 kW fiber laser with high beam quality, which is realized based on home-made ytterbium-doped fiber with gradually varying spindle-shape structure. The fiber laser employs the master oscillation power amplification structure. In the stage of laser amplifier, spindle-shape ytterbium-doped fiber is bidirectionally pumped by laser diodes with 981 nm wavelength. At the total pump power of 7.68 kW, the maximum output power reaches 6.02 kW with a beam quality M^2 factor of 1.9. By optimizing the manufacture techniques and structure parameters of the spindle-shape ytterbium-doped fiber, it is promising to achieve fiber lasers with higher power and nearly single mode beam quality.

Key words: fiber amplifier, high power, tapered fiber, gradually varying spindle-shaped fiber

高功率高光束质量光纤激光器在工业加工和军事国防等领域有着广泛的应用。随着光纤激光器输出功率的提升, 激光器中的模式不稳定效应(TMI)和非线性效应(NLE)成为主要的限制因素, 其中, 对于宽谱激光, 非线性效应中的受激拉曼散射效应(SRS)最为显著^[1-3]。为实现同时有效抑制非线性效应和模式不稳定效应, 新型结构大模场增益光纤成为重要的研究课题^[4-5]。锥形光纤具有沿光纤纵向缓慢变化的模场面积^[6], 能够在保持较好的模式特性的同时, 有效提升光纤的非线性效应阈值, 具有应用于高功率光纤激光的较大潜力。“纺锤形”渐变锥掺镱光纤^[7], 能够较好地匹配合束器、光纤光栅等无源器件, 且不显著降低光纤的 TMI 阈值, 通过合理设计激光器结构, 可实现

* 收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2022-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61905282, 62005315)

联系方式: 杨保来, yangbaolai1989@163.com。

通信作者: 张汉伟, zhanghanwei100@163.com;

潘志勇, panzy168@163.com。

高功率高光束质量激光输出。

本课题组采用单位自研的纺锤形渐变掺镱光纤结合 981 nm 波长泵浦源双向泵浦方案, 实现了功率大于 6 kW 的高光束质量 ($M^2 < 2$) 宽谱激光输出。激光器的原理结构示意图如图 1 所示, 采用主振荡功率放大(MOPA)结构, 种子激光为单级谐振腔光纤激光器, 种子功率约为 100 W, 放大级采用双端泵浦结构, 利用 (6+1)×1 泵浦/信号合束器将多组半导体泵浦源(LDs)耦合注入双包层掺镱光纤, 该掺镱光纤纤芯和内包层为纺锤形渐变结构, 输入/输出端纤芯/内包层直径为 25/400 μm , 光纤中部区域纤芯/内包层直径为 37.5/600 μm , 纤芯数值孔径为 0.06, 纺锤形渐变掺镱光纤总长度为 30 m, 其中, 输入/输出端长度均约为 5 m, 中部区域长度约为 8 m, 两侧锥形渐变区域长度均约为 6 m, 光纤在 981 nm 泵浦的吸收系数约为 0.8 dB/m, 前向/后向泵浦光都能够被充分吸收。

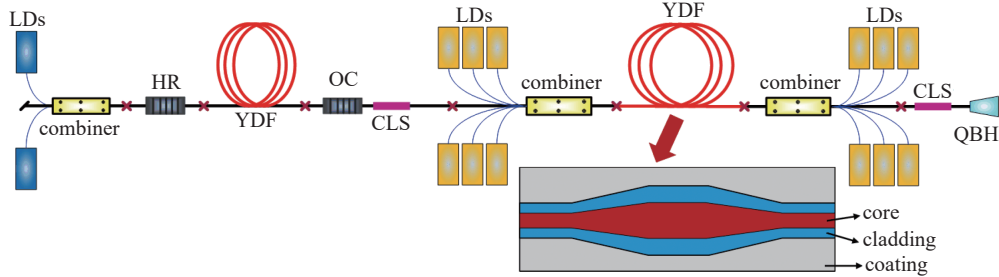


Fig. 1 Schematic of the bidirectional pumped all fiber laser

图 1 双向泵浦纺锤形掺镱光纤激光器实验结构示意图

随泵浦功率增加, 激光器的输出功率和效率曲线如图 2(a) 所示, 在前向和后向泵浦功率分别为 2.42 kW 和 5.26 kW 时, 激光器输出功率达到最大 6.02 kW, 斜率效率约为 78.3%。不同输出功率时的输出激光光谱如图 2(b) 所示, 激光中心波长为 1080 nm, 功率提升过程中出现明显的光谱展宽现象, 在最高功率时输出激光光谱 3 dB 带宽为 4.76 nm。使用光束测量设备测试最高输出功率时的光束质量, 结果如图 2(c) 所示, x 和 y 方向的 M^2 因子分别为 1.87 和 1.85, 束腰位置光斑形态如图 2(c) 中插图所示。实验中监测输出激光的时域信号, 并未发现模式不稳定效应对应的典型时域信号特征。由于纺锤形渐变掺镱光纤存在一定的制作难度, 与常规掺镱光纤产品相比一致性相对较差, 且与无源器件之间存在一定的匹配性差异, 导致放大级输出激光光束质量存在一定的退化。通过进一步改进光纤制作工艺、优化光纤结构参数和匹配无源器件等方式, 有望实现更高功率、更好的光束质量激光输出。

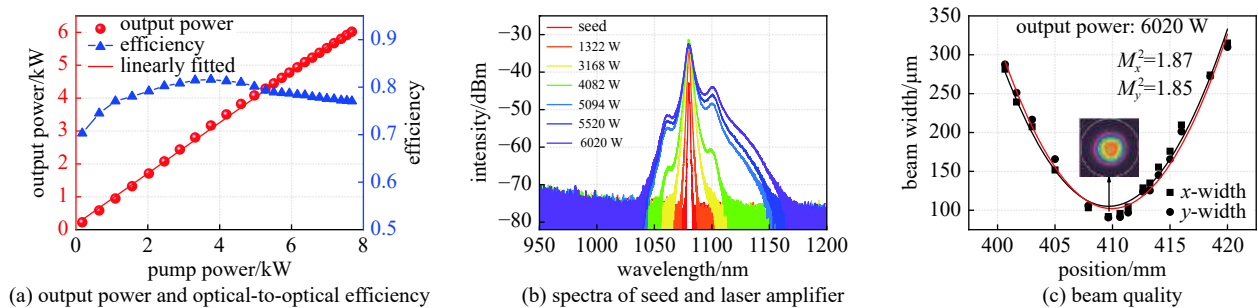


Fig. 2 Experimental results of the spindle-shape ytterbium-doped fiber laser

图 2 纺锤形掺镱光纤激光器实验结果

参考文献:

- [1] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] Otto H J, Jauregui C, Limpert J, et al. Average power limit of fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality[C]//Proceedings of the SPIE 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. 2016: 97280E.
- [3] 张春, 谢亮华, 楚秋慧, 等. 高功率光纤激光受激拉曼散射效应研究新进展[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 021002. (Zhang Chun, Xie Lianghua, Chu Qiuhui, et al. Research progress of stimulated Raman scattering effect in high power fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 021002)
- [4] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. Ultra-large mode area fibers for high power lasers[C]//Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition. 2018: 1-3.
- [5] Stutzki F, Jansen F, Otto H J, et al. Designing advanced very-large-mode-area fibers for power scaling of fiber-laser systems[J]. *Optica*, 2014, 1(4): 233-242.
- [6] Kerttula J, Filippov V, Ustimchik V, et al. Mode evolution in long tapered fibers with high tapering ratio[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25461-25470.
- [7] Zeng Lingfa, Xi Xiaoming, Ye Yun, et al. Near-single-mode 3 kW monolithic fiber oscillator based on a longitudinally spindle-shaped Yb-doped fiber: publisher's note[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(21): 5949.