



·强激光物理与技术·研究快报·

用于 10 kW 级高光束质量激光输出的 国产部分掺杂光纤*

黄良金, 吴函烁, 李瑞显, 肖虎, 杨欢, 闫志平,
冷进勇, 潘志勇, 周朴

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

摘 要: 当前光纤激光功率提升受限于模式不稳定效应及非线性效应, 为了克服上述功率提升限制因素, 自主设计并研制了大模场部分掺杂光纤。最终, 采用自研部分掺杂光纤及后向级联泵浦方案, 成功实现了 10.1 kW 的光纤激光输出, 对应的光束质量因子 (M^2) 为 2.16。

关键词: 高功率; 光纤激光; 部分掺杂光纤; 高光束质量

中图分类号: TN242

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220232

Homemade confined-doped fiber for 10 kW level fiber laser output with good beam quality

Huang Liangjin, Wu Hanshuo, Li Ruixian, Xiao Hu, Yang Huan, Yan Zhiping,
Leng Jinyong, Pan Zhiyong, Zhou Pu

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

Abstract: Power scaling of high-brightness fiber laser is limited by the mode instability and nonlinear effects. To overcome these limiting factors, a large mode area confined-doped fiber is designed and fabricated. By utilizing the homemade confined-doped fiber and backward tandem pumping scheme, fiber laser with output power of 10.1 kW is successfully achieved, where the corresponding beam quality factor (M^2) is 2.16.

Key words: high power, fiber laser, confined-doped fiber, good beam quality

光纤激光由于其光束质量好、转换效率高和可柔性操作等优点, 在先进制造、精密测量、军事国防等领域获得了广泛的应用^[1-2]。近年来, 国防科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国工程物理研究院和清华大学等单位均实现了 10 kW 级及以上的光纤激光输出^[3-5], 但是由于缺乏有效的模式控制手段, 输出光束质量有较大的提升空间。为了实现功率提升的同时保持较好的光束质量, 国内外研究人员探索了采用部分掺杂光纤 (CDF) 实现高亮度激光功率提升的方案。其中, 日本藤仓公司和新加坡 DSO 国家实验室基于 CDF 分别实现了 3 kW^[6] 和 4 kW^[7] 的高亮度光纤激光输出, 国内的华中科技大学^[8]、中国电子科技集团第四十六研究所^[9] 和中国工程物理研究院^[10] 等均基于 CDF 实现了 2~3 kW 级的激光输出。近两年, 国防科技大学基于自研的 CDF, 通过前向和双向级联泵浦放大器实现了 7 kW^[11] 和 8 kW^[12] 级的高光束质量激光输出, 但功率提升仍受限于受激拉曼散射效应, 因此, 自研 CDF 高光束质量激光输出功率仍有提升空间。

近期, 国防科技大学自主研制了用于 10 kW 级高亮度激光输出的 CDF, 采用后向级联泵浦方案实现了 10.1 kW 高光束质量激光输出。自研 CDF 的纤芯折射率及掺杂区域荧光强度分布测量结果如图 1 所示。其中, 根据折射率分布曲线可知纤芯直径约为 38.1 μm , 荧光强度分布曲线(由基于激光诱导荧光成像技术的 SHR-1802AF 仪器

* 收稿日期: 2022-07-23; 修订日期: 2022-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62035015, 61805280); 湖南省创新研究群体项目 (2019JJ1005)

联系方式: 黄良金, hlj203@nudt.edu.cn。

通信作者: 潘志勇, panzy168@163.com;

周朴, zhoupu203@163.com。

测得)的半高全宽约为 29.6 μm , 表明镱离子掺杂区域直径约为纤芯直径的 77.7%。此外, 光纤内包层直径约为 250 μm , 通过截断法测得该光纤在 1018 nm 处的包层吸收系数约为 0.4 dB/m。

采用 35 m 上述自研 CDF 搭建后向级联泵浦光纤激光放大器, 输出激光功率随泵浦功率的变化如图 2(a) 所示。随着泵浦功率增加, 放大器的输出功率近似线性增长, 在泵浦功率约为 12.80 kW 时, 输出功率达到约 10.10 kW, 对应的光-光效率约为 78.3%。不同输出功率下的光谱如图 2(b) 所示, 随着输出功率提高, 光谱不断展宽, 最高输出功率下的拉曼抑制比约为 40 dB。最高输出功率下光束质量的测量结果如图 2(c) 所示, 此时测得光束质量因子为 $M^2=2.16$ 。

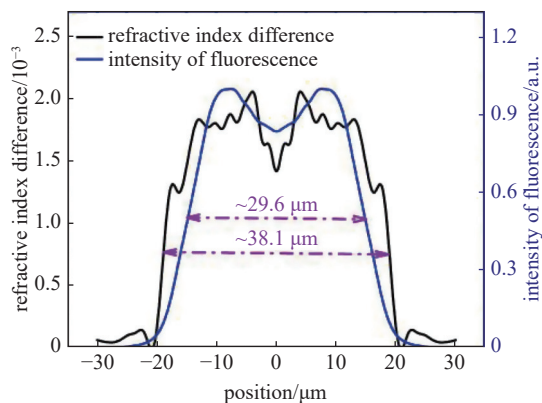
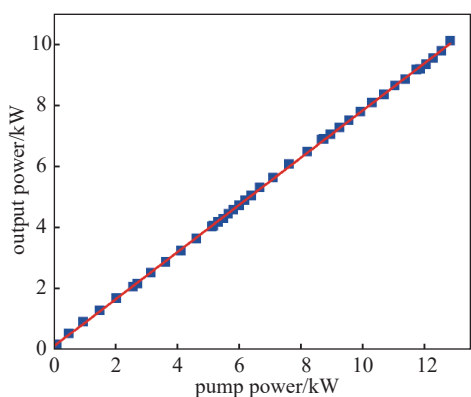
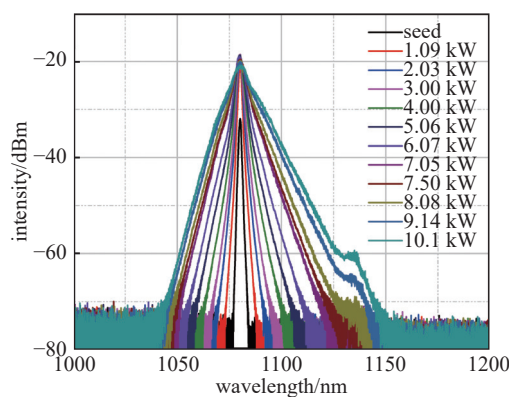


Fig. 1 Refractive index profile and fluorescence intensity distribution of the confined-doped fiber

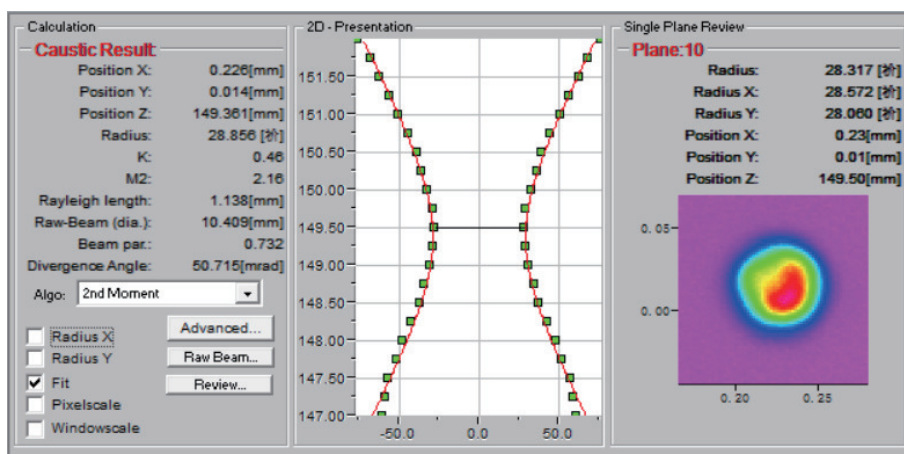
图 1 部分掺杂光纤的纤芯区域折射率分布及荧光强度分布



(a) output power as a function of the pump power



(b) output spectra at different output powers



(c) beam quality factor measurement result at the maximum output power

Fig. 2 Output property of the confined-doped fiber amplifier

图 2 部分掺杂光纤放大器输出特性

本工作实现了目前国际上基于同类光纤的最高输出激光功率, 同时本工作实现的光束质量为国内公开报道的 10 kW 级激光器最佳光束质量。下一步将对光纤的吸收系数及折射率分布进行优化, 从而进一步提高激光器的整体效率和光束质量。

致 谢 感谢陈子伦老师提供的合束器及端帽, 感谢肖亮在实验过程中的支持和帮助。

参考文献:

[1] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20: 0904123.
 [2] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J]. 中国激光, 2021, 48: 2000001. (Zhou Pu, Leng Jinyong, Xiao Hu, et al. High

- average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 2000001)
- [3] 李峰云, 黎玥, 宋华青, 等. 全国产光纤材料器件实现高SRS抑制比20.88 kW输出[J]. 中国激光, 2021, 48: 2116002. (Li Fengyun, Li Yue, Song Huaqing, et al. Homemade fiber enables 20.88 kW laser output with high SRS suppression ratio[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 2116002)
- [4] 林傲祥, 肖起榕, 倪力, 等. 国产YDF有源光纤实现单纤20 kW激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48: 0916003. (Lin Aoxiang, Xiao Qirong, Ni Li, et al. Homemade YDF active fiber realizes 20 kW laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0916003)
- [5] 陈晓龙, 何宇, 徐中巍, 等. 10kW高效率1070nm光纤放大器的理论与实验研究[J]. 中国激光, 2020, 47: 1006001. (Chen Xiaolong, He Yu, Xu Zhongwei, et al. Theoretical and experimental investigation of a 10-kW high-efficiency 1070-nm fiber amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 1006001)
- [6] Ikoma S, Nguyen H K, Kashiwagi M, et al. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing[C]//Proceedings of SPIE 10083, Fiber Lasers XIV: Technology and Systems. 2017: 100830Y.
- [7] Seah C P, Lim W Y W, Chua S L. A 4kW fiber amplifier with good beam quality employing confined-doped gain fiber[C]//Advanced Solid State Lasers 2018. 2018: AM2A. 2.
- [8] 张志伦, 张芳芳, 林贤峰, 等. 国产部分掺杂光纤实现3 kW全光纤激光振荡输出[J]. 物理学报, 2020, 69: 234205. (Zhang Zhilun, Zhang Fangfang, Lin Xianfeng, et al. Home-made confined-doped fiber with 3-kW all-fiber laser oscillating output[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69: 234205)
- [9] Wang Biao, Pang Lu, Liu Jun. Single mode 2.4kW part-doped ytterbium fiber fabricated by modified chemical vapor deposition technique[C]//Proceedings of SPIE 11427, Second Target Recognition and Artificial Intelligence Summit Forum. 2020: 114271X.
- [10] Huang Zhimeng, Shu Qiang, Luo Yun, et al. 3.5 kW narrow-linewidth monolithic fiber amplifier at 1064 nm by employing a confined doping fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(10): 2945-2952.
- [11] 吴函烁, 安毅, 肖虎, 等. 国产部分掺杂光纤实现7 kW高光束质量激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48: 2416002. (Wu Hanshuo, An Yi, Xiao Hu, et al. Homemade confined-doped fiber enables 7 kW laser output with good beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 2416002)
- [12] Wu Hanshuo, Li Ruixian, Xiao Hu, et al. First demonstration of a bidirectional tandem-pumped high-brightness 8 kW level confined-doped fiber amplifier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(16): 5673-5681.