



·强激光物理与技术·研究快报·

基于锥形掺镱光纤实现 20 kW 高光束质量激光输出

肖 虎^{1,2}, 潘志勇^{1,2}, 陈子伦^{1,2}, 马鹏飞^{1,2}, 刘 伟^{1,2}, 杨 欢^{1,2}, 闫志平^{1,2},
王 蒙^{1,2}, 奚小明^{1,2}, 李智贤^{1,2}, 杨保来^{1,2}, 杨林永^{1,2}, 黄良金^{1,2},
黄值河^{1,2}, 曹润秋^{1,2}, 王小林^{1,2}, 王泽锋^{1,2}, 陈金宝^{1,2}

(1. 国防科学技术大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 长沙 410073)

摘 要: 锥形光纤能够有效兼顾非线性效应抑制和模式控制, 具备实现高功率、高光束质量光纤激光的潜力。近期国防科技大学研制了锥形掺镱光纤, 采用 1018 nm 光纤激光后向级联泵浦实现了 20.2 kW 激光输出, 光束质量 β 因子平均值优于 2, 拉曼抑制比为 33 dB。研究结果展示了锥形光纤在实现万瓦级高光束质量激光方面的优势。

关键词: 光纤激光器; 级联泵浦; 锥形光纤; 光束质量

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230418

20 kW fiber laser with high beam quality enabled by tapered ytterbium-doped fiber

Xiao Hu^{1,2}, Pan Zhiyong^{1,2}, Chen Zilun^{1,2}, Ma Pengfei^{1,2}, Liu Wei^{1,2}, Yang Huan^{1,2}, Yan Zhiping^{1,2},
Wang Meng^{1,2}, Xi Xiaoming^{1,2}, Li Zhixian^{1,2}, Yang Baolai^{1,2}, Yang Linyong^{1,2}, Huang Liangjin^{1,2},
Huang Zhihe^{1,2}, Cao Jianqiu^{1,2}, Wang Xiaolin^{1,2}, Wang Zefeng^{1,2}, Chen Jinbao^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The tapered fiber with varied core diameter along the longitudinal direction has a unique advantage in balancing Stimulated Raman Scattering (SRS) suppression and beam quality, making it a promising approach for purchasing high power laser with high beam quality. Recently, a monolithic high power fiber laser counter pumped by 1018 nm fiber lasers has been experimentally established employing tapered ytterbium-doped fiber made in house. A maximum power of 20.2 kW is achieved with the beam quality factor $\beta < 2$ and Raman-suppression ratio of 33 dB. The results have demonstrated the great potential of tapered fiber in power scaling to tens of kW fiber laser while achieving good beam quality.

Key words: fiber laser, tandem pump, tapered fiber, beam quality

非线性效应(主要是受激拉曼散射(SRS))抑制和模式控制是目前高功率掺镱光纤激光器(YDFL)功率提升面临的技术难题^[1]。增大 YDF 纤芯直径有利于提高 SRS 阈值,但导致高阶模控制更为困难,难以实现高光束质量^[2-7]。与均匀双包层光纤相比,锥形光纤(TYDF)在兼顾 SRS 抑制和模式控制方面具有一定的优势^[8-9]。根据纤芯直径大小,锥形光纤通常可分为小芯径区、锥区和大芯径区三部分。锥形光纤的小芯径部分可减少纤芯导模数量以实现有效的模式控制,大芯径部分则有利于降低纤芯功率密度以提高 SRS 阈值。2022 年,国防科技大学基于均匀双包层掺镱光纤已实现了 20 kW 激光输出,光束质量 M^2 因子为 3.3^[4]。为进一步提高光束质量,团队开展了锥形掺镱光纤(TYDF)激光器理论和实验研究,近期实现了最高功率 20.2 kW,光束质量 β 因子平均值优于 2 的激光输出。

激光器结构如图 1 所示。为提高 SRS 阈值,激光器采用后向泵浦的主振荡功率放大(MOPA)结构。1080 nm 种子光依次经模场适配器(MFA)、倾斜光栅(CTFBG)和包层光滤波器(CPS 1)后从 TYDF 的小芯径端注入。1018 nm

* 收稿日期:2023-11-27; 修订日期:2024-01-04

联系方式:肖 虎, xhwise@163.com。

通信作者:王泽锋, zefengwang_nudt@163.com;

陈金宝, kdchenjinbao@aliyun.com。

泵浦光经后向(6+1)×1合束器(PSC)泵浦臂注入TYDF大芯径端。放大后的信号光经包层光滤除器(CPS 2)和光纤端帽(QBH)后输出。CPS 1的尾纤为30/250 μm双包层传能光纤。PSC、CPS2和QBH尾纤均为48/400 μm双包层传能光纤。TYDF为国防科技大学自主设计研制,其小芯径区的纤芯/内包层直径为30/250 μm,大芯径区的纤芯/内包层直径为48/400 μm。TYDF的纤芯数值孔径为0.066。TYDF的包层吸收系数约为0.36 dB/m@1018 nm,光纤的小芯径区、锥区、大芯径区长度分别为15 m、30 m、15 m。TYDF采用螺旋型盘绕方式固定于光纤水冷板上,最小盘绕直径大于25 cm。

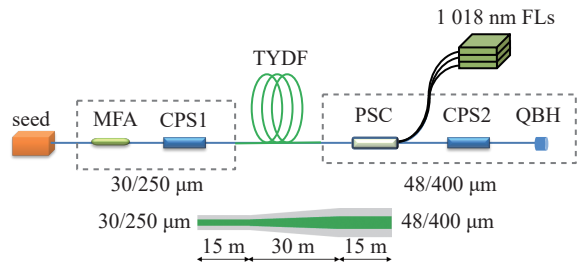
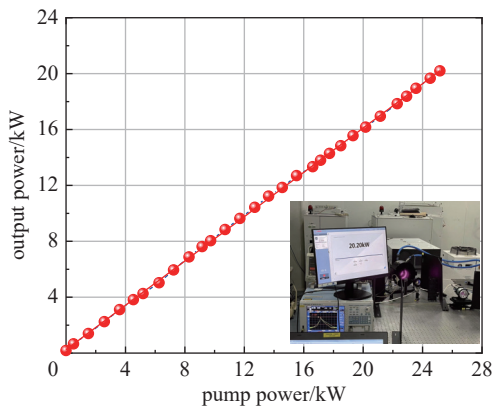
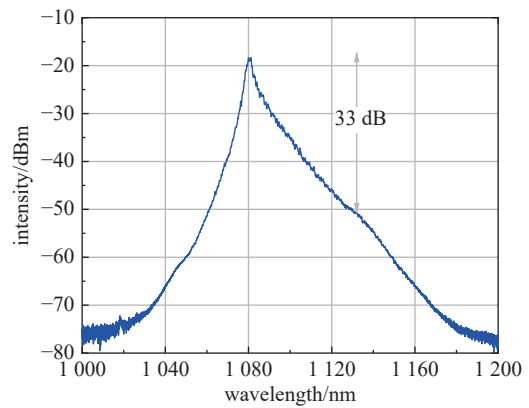


Fig. 1 Schematic diagram of the 20 kW fiber laser
图 1 20 kW 光纤激光器结构示意图

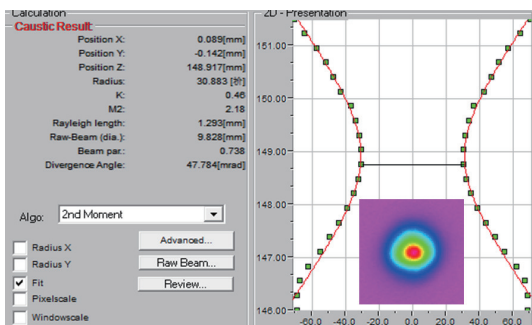
激光器输出功率变化如图2(a)所示。200 W的1080 nm种子激光经放大器后的输出功率为160 W。当注入TYDF的最高泵浦功率为24.8 kW时,输出激光功率为20.2 kW,对应的整体斜率效率为80.8%。最高输出功率时的光谱如图2(b)所示,此时SRS抑制比为33 dB且未观察到明显的拉曼光成份。输出激光功率为13.5 kW时光束质量 M^2 因子为2.18(如图2(c)所示,使用Primes LQM 200测量,准直器焦距为120 mm)相比团队2022年基于48/400 μm均匀光纤时同等功率下的测量结果($M^2=2.8$),光束质量得到了明显提升。由于激光光斑较小(LQM 200入射光斑直径需小于15 mm),随着输出功率的增加,准直器镜片的热效应加剧,导致了明显的离焦相差和光斑畸变,因此暂未能完成20 kW输出功率时 M^2 的准确测量。实验中还使用中国科学院合肥物质科学研究院研制的光束质量测量仪(GYM-100),依据《GJB 7367-2011 高能激光光束质量因子 β 测量方法》,对光束质量 β 因子进行了测试。由于使用了长焦距(190 mm)的大光斑准直器,一定程度上缓解了准直器的热效应对测量结果的影响。13.5 kW时的 β 因子为1.92,20 kW时的 β 测试结果如图2(d)所示。150 s内测得 β 因子最小值为1.93,最大值为2.05,平均值为1.99。因目前尚无 β 因子与 M^2 因子的精确换算方法,暂无法由 β 因子测试结果得出20 kW时的 M^2 因子真实值。



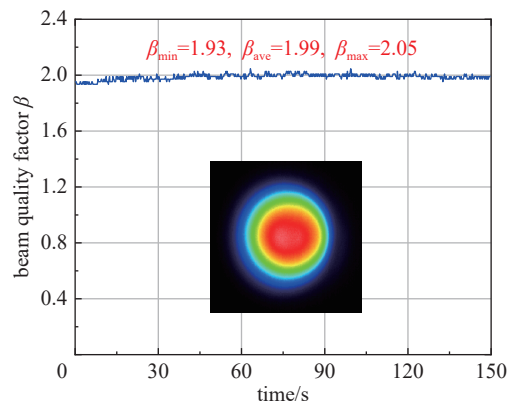
(a) output power versus pump power



(b) spectrum measured at 20.2 kW



(c) M^2 and intensity distribution at 13.5 kW



(d) β and intensity distribution at 20.2 kW

Fig. 2 Laser output power and measurement results

图 2 激光输出功率及测试结果

但对比团队 2022 年基于 48/400 μm 均匀 YDF 实现的 20 kW 激光器(基于相同测试系统测得 β 因子平均值为 2.94), 光束质量得到了明显提升。实验结果验证了基于锥形光纤实现高功率高光束质量激光的可行性。在后续工作中, 团队将继续优化 TYDF 和光纤器件结构参数, 实现功率和光束质量的进一步提升。

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] 李峰云, 黎玥, 宋华青, 等. 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. National production of fiber optic material devices achieves high SRS suppression ratio of 20.88 kW output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48: 2116002)
- [3] 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. Domestic YDF active fiber realizes single fiber 20 kW laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48: 0916003)
- [4] 高聪, 刘念, 李峰云, 等. (1+1) 型长距离侧面泵浦光纤实现 17.4 kW 激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 051002 (Gao Cong, Liu Nian, Li Fengyun, et al. 17.4 kW (1+1) long distance side-pumped laser fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 051002)
- [5] 肖虎, 潘志勇, 陈子伦, 等. 基于自研光纤和器件实现 20 kW 高光束质量激光稳定输出[J]. 中国激光, 2022, 49: 1616002. (Xiao Hu, Pan Zhiyong, Chen Zilun, et al. Output of 20 kW high beam quality laser based on self-developed optical fibers and devices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49: 1616002)
- [6] 施建宏, 杜天怡, 马盖明, 等. 国产化工业光纤激光器实现单纤 22.07 kW 功率稳定输出[J]. 中国激光, 2022, 49: 2416003. (Shi Jianhong, Du Tianyi, Ma Gaiming, et al. National industrial fiber laser achieves stable output of 22.07 kW power per fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49: 2416003)
- [7] 奚小明, 杨保来, 张汉伟, 等. LD 直接泵浦全光纤激光器输出功率突破 20 kW[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35: 021001. (Xi Xiaoming, Yang Baolai, Zhang Hanwei, et al. 20 kW monolithic fiber amplifier directly pumped by LDs[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35: 021001)
- [8] 王小林, 文榆钧, 张汉伟, 等. 变纤芯直径掺镱光纤激光器: 现状与趋势[J]. 中国激光, 2022, 49: 2100001. (Wang Xiaolin, Wen Yujun, Zhang Hanwei, et al. Ytterbium-doped core-diameter-variable fiber laser: current situation and develop tendency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49: 2100001)
- [9] Wang Chongwei, Xiao Hu, Xi Xiaoming. 10 kW tandem pumping fiber amplifier with good beam quality based on tapered ytterbium-doped fiber[J]. Optics Express, 2023, 31(24): 40980-40990.