

光学学报

后向级联泵浦的 10 kW 高光束质量光纤激光器

肖虎^{1,2,3}, 李瑞显^{1,2,3}, 陈子伦^{1,2,3}, 奚小明^{1,2,3}, 吴函烁^{1,2,3}, 冷进勇^{1,2,3}, 黄良金^{1,2,3}, 潘志勇^{1,2,3}, 王小林^{1,2,3},
王泽锋^{1,2,3}, 周朴^{1*}, 陈金宝^{1,2,3**}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 实现万瓦级高光束质量光纤激光面临模式控制和非线性效应抑制等技术难题。为兼顾光束质量和功率, 设计了基于纤芯直径为 30 μm 、包层直径为 250 μm 的双包层掺镱光纤的后向级联泵浦激光器, 实现了输出功率为 10.03 kW、 M^2 因子为 1.92、拉曼抑制比大于 38 dB 的激光输出, 实现万瓦级光纤激光器的光束质量 M^2 优于 2, 这验证了常规双包层光纤具有支撑万瓦高光束质量激光产生和放大能力。

关键词 激光器; 高功率光纤激光器; 级联泵浦; 后向泵浦; 双包层光纤; 受激拉曼散射

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS2336001

10 kW Counter-Tandem-Pumped Fiber Laser with High Beam Quality

Xiao Hu^{1,2,3}, Li Ruixian^{1,2,3}, Chen Zilun^{1,2,3}, Xi Xiaoming^{1,2,3}, Wu Hanshuo^{1,2,3}, Leng Jinyong^{1,2,3},
Huang Liangjin^{1,2,3}, Pan Zhiyong^{1,2,3}, Wang Xiaolin^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3}, Zhou Pu^{1*},
Chen Jinbao^{1,2,3**}

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

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract Mode control and nonlinear effect suppression are technical problems to obtain 10 kW-level fiber laser with high beam quality. For the purpose of high beam quality and output power, a counter-tandem-pumped fiber laser employing a double clad fiber with a fiber core diameter of 30 μm and a clad diameter of 250 μm is demonstrated. A laser output with an output power of 10.03 kW, a beam quality factor M^2 of 1.92, and a Raman inhibition ratio of 38 dB is achieved. A beam quality factor M^2 better than 2 is realized, which confirms the possibility of generation and amplification of 10 kW-level fiber laser of high beam quality with conventional double clad fibers.

Key words lasers; high-power fiber laser; tandem pump; counter pump; double-clad fiber; stimulated Raman scattering

2009年,美国IPG公司报道了10 kW单模光纤激光器,在国际高功率光纤激光领域引起了巨大轰动^[1]。不同于半导体激光器(LD)泵浦方案,IPG公司的10 kW单模光纤激光器采用级联泵浦技术,以高亮度的1018 nm光纤激光器为泵浦源,解决了当时LD亮度不足的问题,使单模光纤激光器功率实现了从千瓦级到万瓦级的提升。此后,国内外多家研究机构开展了高功率级联泵浦研究^[2-4]。为解决镱离子固有的

1018 nm附近弱吸收问题,通常需增大掺镱光纤纤芯直径以增强泵浦光吸收。近年来,国内多家单位基于超大模场光纤(芯径约为50 μm)实现了10~20 kW的高功率输出^[5-9]。但在提升输出功率的同时保持良好的光束质量仍面临巨大挑战。目前公开报道的10 kW级光纤激光器的最优光束质量 M^2 约为3,仍有较大的优化空间。引入弯曲损耗以抑制纤芯高阶模式,是高功率大模场光纤激光器常见的光束质量控制方法。但

收稿日期: 2022-09-19; 修回日期: 2022-10-19; 录用日期: 2022-11-07

通信作者: *zhoupu203@163.com; **kdchenjinbao@aliyun.com

随着纤芯直径的增大,基模与高阶模式间的有效折射率差值逐渐减小,通过弯曲光纤难以有效滤除高阶模式^[10]。适当减小纤芯直径是获得高光束质量激光的关键。采用后向/双向泵浦技术可有效解决芯径减小引起的受激拉曼散射(SRS)阈值降低问题,实现功率的提升^[11-12]。

为研制万瓦级高光束质量光纤激光器,国防科技大学开展了后向/双向级联泵浦技术研究,在 1018 nm 光纤激光器结构优化和大模场光纤后向合束器研制等方面取得了进展。基于后向和双向级联泵浦,先后实现了 5.03 kW^[13] ($M^2=1.54$) 和 6.22 kW^[14] ($M^2=1.53$) 高功率输出。2022 年,李瑞显等^[15] 基于自研的纤芯直径为 30 μm 、包层直径为 250 μm (30 $\mu\text{m}/250 \mu\text{m}$) 的双包层掺镱光纤(YDF),采用后向泵浦方案实现了 8.38 kW 的高光束质量激光输出 ($M^2=1.8$)。近期,在进一步抑制模式不稳定(TMI)和 SRS 的基础上,实现了 10.03 kW 的高光束质量激光稳定输出。激光器结构示意图如图 1 所示,1080 nm 种子激光经倾斜光栅(CTFBG)、模式适配器(MFA)和包层光滤波器(CPS1)后进入掺镱光纤(YDF)。YDF 为常规双包层光纤,纤芯直径和数值孔径分别为 30 μm 和 0.06,内包层直径和数值孔径分别为 250 μm 和 0.46。YDF 的内包层为八边形结构,其包层小信号吸收系数约为 0.4 dB/m@1018 nm,长度为 38 m。YDF 固定于内径为 16 cm 的跑道型水冷板上进行冷却。1018 nm 泵浦光经自研的后向(6+1) \times 1 合束器(PSC)泵浦臂注入 YDF 内包层。PSC 的信号输入/输出臂均为 YDF 匹配的 30 $\mu\text{m}/250 \mu\text{m}$ 无源光纤。残余泵浦光由 CPS1 滤除,放大后的激光经 CPS2 滤除少量包层光后从端帽(QBH)输出。为实时监测激光器特性,输出激光经准直器(CO)准直后由高反镜(HR)进行分束。大部分激光经 HR 反射后进入功率计(PM),HR 透射光

进入光束质量仪(LQM)、光谱仪(OSA)和光电探测器(PD)以监测输出激光的光束质量、光谱和时域稳定性。

激光器的输出功率随泵浦功率线性增长,如图 2(a)所示。当注入最大泵浦功率为 12.47 kW 时,输出激光功率为 10.03 kW,对应的整体斜率效率为 79.1%。图 2(b)所示为激光器输出光谱。光谱随输出功率的增加逐渐展宽,最高功率时的 3 dB 线宽为 3.72 nm。从图中可以看出,随着功率的增加,模间四波混频效应逐渐增强。在模间四波混频的作用下,在 1070 nm 和 1090 nm 附近各产生了一个次峰并且峰值随功率的增加迅速增长,导致光谱的 10 dB 线宽迅速增大,最高功率时的 10 dB 线宽为 18.56 nm。尽管在最高功率时光谱已展宽至 1160 nm,但 1135 nm 附近未出现明显的拉曼特征峰。输出激光光束质量随功率的变化如图 2(c)所示。激光功率由 1000 W 增长至 8000 W 的过程中,光束质量 M^2 在 1.65~1.75 区间小幅度变化。当输出激光功率大于 8 kW 时,光束质量随功率的增加缓慢退化。9200 W 时 $M^2=1.85$, 10030 W 时 M^2 为 1.92。准直透镜和高反镜的热效应可能是导致高功率时光束质量缓慢退化的原因之一。图 2(d)所示为输出激光的时序稳定性测量结果。激光器进行了多次满功率出光测试,功率和光谱一致性较好。图 2(c)记录了满功率运行时的功率稳定性。200 s 测量时间内功率起伏小于 1%,频谱分析结果表明此时未出现 TMI。激光器满功率运行时增益光纤的最高温度为 60 $^{\circ}\text{C}$,仍处于长时间安全工作温度范围内。当前激光器功率提升受限于可注入泵浦功率,从输出功率线性增长趋势和光谱信噪比判断,在泵浦功率充足的前提下,输出功率仍有一定的提升空间。通过改善测试光路光学元件性能并优化增益光纤的弯曲半径,输出激光的光束质量有望得到进一步优化。

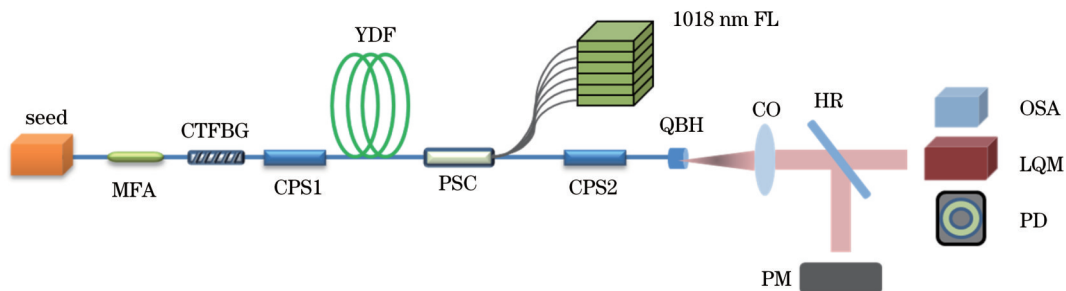


图 1 10 kW 光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 10 kW fiber laser

基于自研常规双包层掺镱光纤,本工作实现了高光束质量($M^2<2$)单纤万瓦光纤激光稳定输出:一方面证明了后向泵浦是级联泵浦光纤激光器大幅提升 SRS 和 TMI 阈值的重要技术途径;另一方面验证了常规大模场双包层光纤具有支撑万瓦级高光束质量激光

的产生和放大能力,可为万瓦级单模光纤激光器的设计和研制提供参考。下一步工作中将通过优化光纤弯曲半径以抑制高阶模,同时适当增大纤芯直径并减小数值孔径以增大模场面积,实现功率和光束质量的稳步提升。

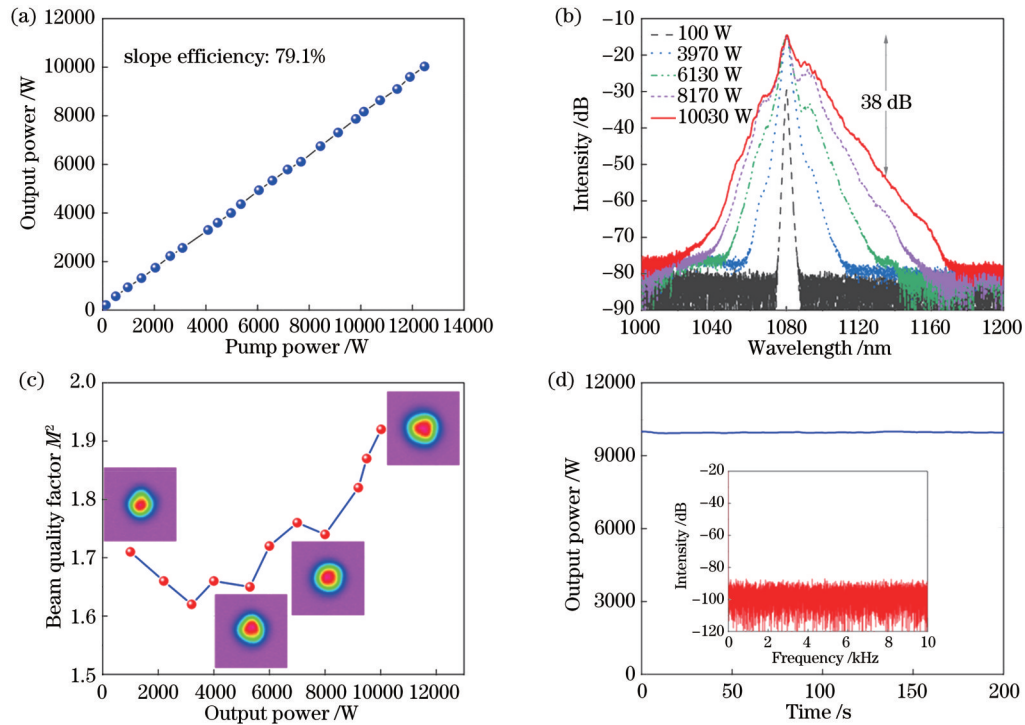


图 2 10 kW 激光器测试结果。(a)输出功率;(b)光谱随输出功率的变化;(c)光束质量随输出功率的变化;(d)时序和频谱(插图)
Fig. 2 Experimental results of 10 kW fiber laser. (a) Output power; (b) spectrum varying with output power; (c) beam quality varying with output power; (d) power fluctuation and its Fourier spectrum (inset)

参 考 文 献

- [1] Injeyan H, Goodno G. High-power laser handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2011: 524-525.
- [2] Zhou P, Xiao H, Leng J Y, et al. High-power fiber lasers based on tandem pumping[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): A29-A36.
- [3] 肖虎, 冷进勇, 周朴, 等. 高功率级联抽运掺镱光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201007.
Xiao H, Leng J Y, Zhou P, et al. High power tandem-pumped Yb-doped fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201007.
- [4] 肖起榕, 田佳丁, 李丹, 等. 级联泵浦高功率掺镱光纤激光器: 进展与展望[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501004.
Xiao Q R, Tian J D, Li D, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501004.
- [5] 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(9): 0916003.
Lin A X, Xiao Q R, Ni L, et al. YDF active fiber made in China realizes single fiber 20 kW laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0916003.
- [6] 张磊, 楼风光, 王孟, 等. 同带泵浦的万瓦级三包层掺镱光纤[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1315001.
Zhang L, Lou F G, Wang M, et al. Yb-doped triple-clad fiber for nearly 10 kW level tandem-pumped output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1315001.
- [7] 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(21): 2116002.
Li F Y, Li Y, Song H Q, et al. The national optical fiber material devices achieve high SRS suppression ratio of 20.88 kW output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2116002.
- [8] 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(5): 051002.
Gao C, Liu N, Li F Y, et al. 17.4 kW (1+1) long distance side-pumped laser fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(5): 051002.
- [9] 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(16): 1616002.
Xiao H, Pan Z Y, Chen Z L, et al. Realization of stable output of 20 kW high beam quality laser based on self-developed fiber and device[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1616002.
- [10] Li M J, Chen X, Liu A P, et al. Limit of effective area for single-mode operation in step-index large mode area laser fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3010-3016.
- [11] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. Derivation of Raman threshold formulas for CW double-clad fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8476-8490.
- [12] Ma P F, Xiao H, Liu W, et al. All-fiberized and narrow-linewidth 5 kW power-level fiber amplifier based on bidirectional pumping configuration[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9: 1-20.

- [13] Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. More than 5 kW counter tandem pumped fiber amplifier with near single-mode beam quality[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108204.
- [14] 李瑞显, 吴函烁, 肖虎, 等. 双向同带泵浦光纤激光实现大于 6 kW 的近单模输出[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210822.
- Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. Double-band pumped fiber laser achieves near single mode output greater than 6 kW[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210822.
- [15] 李瑞显, 吴函烁, 肖虎, 等. 后向同带泵浦光纤激光实现大于 8 千瓦高光束质量输出[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1436001.
- Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. More than 8 kW fiber laser amplifier with high beam quality enabled by counter tandem pumping scheme[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1436001