

后向泵浦长锥形掺镱光纤实现 6 kW 激光输出

叶云¹, 奚小明^{1,2}, 杨保来^{1,2}, 张汉伟^{1,2}, 王鹏^{1,2}, 史尘^{1,2}, 王小林^{1,2*}, 许晓军^{1,2*}

(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)

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220596

高功率掺镱光纤激光器由于高转换效率、高光束质量、热管理方便、系统结构紧凑等优势,在工业加工、智能制造和国防军事等领域得到广泛应用。随着输出功率的提高,光纤中的受激拉曼散射(SRS)和模式不稳定效应(TMI)成为宽谱光纤激光器的主要限制因素。为了综合抑制这两种效应,优化有源光纤的结构设计成为了有效的解决方案之一。不同于常规均匀直径光纤,长锥形光纤采用熔融拉锥、机械抛磨、变速拉丝等手段使得光纤纤芯直径沿长度方向逐渐变化。由于其独特的结构优势,使其能够在保持良好模式特性的同时抑制光纤中的非线性效应。此外,长锥形光纤的阶跃折射率结构能够较好地与商用光纤器件匹配,具有应用于高功率光纤激光的较大潜力。

近年来,国内外多家单位开展了基于长锥形掺镱光纤的高功率/高能量光纤激光器研究。2008年,芬兰坦佩雷理工大学以锥形掺镱光纤作为增益介质,基于空间耦合结构实现了最高 212 W、中心波长为 1079 nm 的宽谱激光输出,光束质量因子(M^2)约为 1.02。2010年,该单位将锥形掺镱光纤激光器的输出功率提升至 750 W, M^2 约为 1.7。2019年,笔者课题组基于合作单位研制的长锥形掺镱光纤搭建了全光纤结构的光纤激光振荡器和放大器,最高实现 2 kW 宽谱功率输出, $M^2 > 2.1$ 。目前,锥形掺镱光纤主要应用在脉冲功率放大、单频激光输出等领域,在高功率宽谱激光输出时依然面临 SRS 和 TMI 等效应的挑战。

近期,笔者课题组在前期工作的基础上,优化了

长锥形掺镱光纤参数和激光器系统结构,采用后向泵浦主振荡功率放大器(MOPA)结构有效地抑制了 SRS 效应,最终实现了 6.11 kW 宽谱激光功率输出,光光转换效率约为 82.8%,该结果是目前公开报道的基于长锥形掺镱光纤的最高功率。该激光器的结构示意图如图 1 所示,种子激光为单级谐振腔光纤激光器,种子中心波长约为 1080 nm,注入种子功率约为 112 W,放大级采用单独后向泵浦结构,利用(36+1)×1 泵浦/信号合束器将多组中心波长为 981 nm 半导体泵浦源(LDs)注入增益光纤,该合束器信号输入纤尺寸为 30/600 μm,信号输出纤尺寸为 30/250 μm。增益光纤为长锥形双包层掺镱光纤,输入端纤芯/内包层直径约为 20/400 μm,输出端纤芯/内包层直径约为 30/600 μm,纤芯数值孔径(NA)约为 0.065,光纤长度约为 35.4 m,其中光纤锥区长度约为 30 m,大芯径区长度约为 5.4 m,该光纤在 981 nm 的包层吸收系数约为 0.63 dB/m。输出激光经过包层光滤除器(CLS)后熔接尾纤为 30/250 μm 的光纤端帽(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。

实验中对输出激光的功率、光谱、时域信号和光束质量进行了监测,相关实验结果如图 2 所示。在总泵浦功率为 7.24 kW 时,输出激光功率达到最大 6.11 kW,斜率效率约为 81.3%。不同输出功率时测得的输出光谱如图 2(b)所示,信号光中心波长约为 1080 nm,得益于后向泵浦的结构优势,光谱中没有残余泵浦光成分,在最高功率时输出激光光谱 3 dB 带

收稿日期:2022-08-22; 修订日期:2022-09-23

基金项目:长沙市杰出创新青年培养计划(kq2106008);脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(SKL2020ZR04);

国家自然科学基金(61905282,62005315)

作者简介:叶云,男,博士生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。

导师(通讯作者)简介:许晓军,男,研究员,博士,主要从事高能激光技术、自适应光学等方面研究。

通讯作者:王小林,男,副研究员,博士,主要从事高功率光纤激光器技术研究。

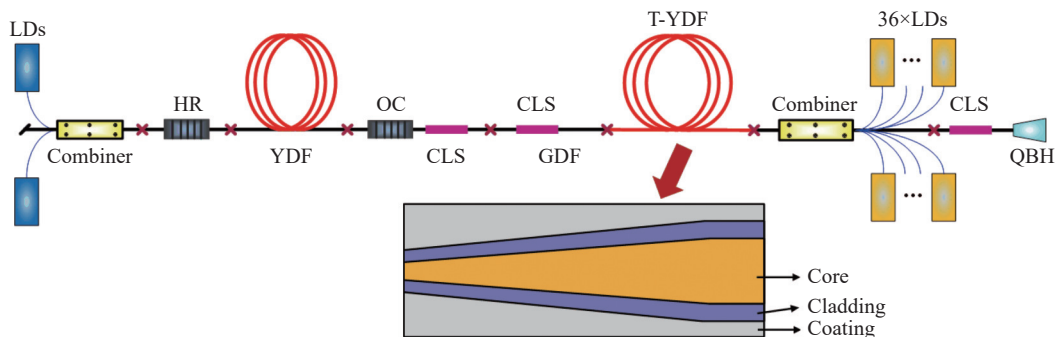


图 1 后向泵浦长锥形掺镱光纤放大器实验结构示意图

Fig.1 Schematic of the counter-pumped long-tapered ytterbium-doped fiber amplifier

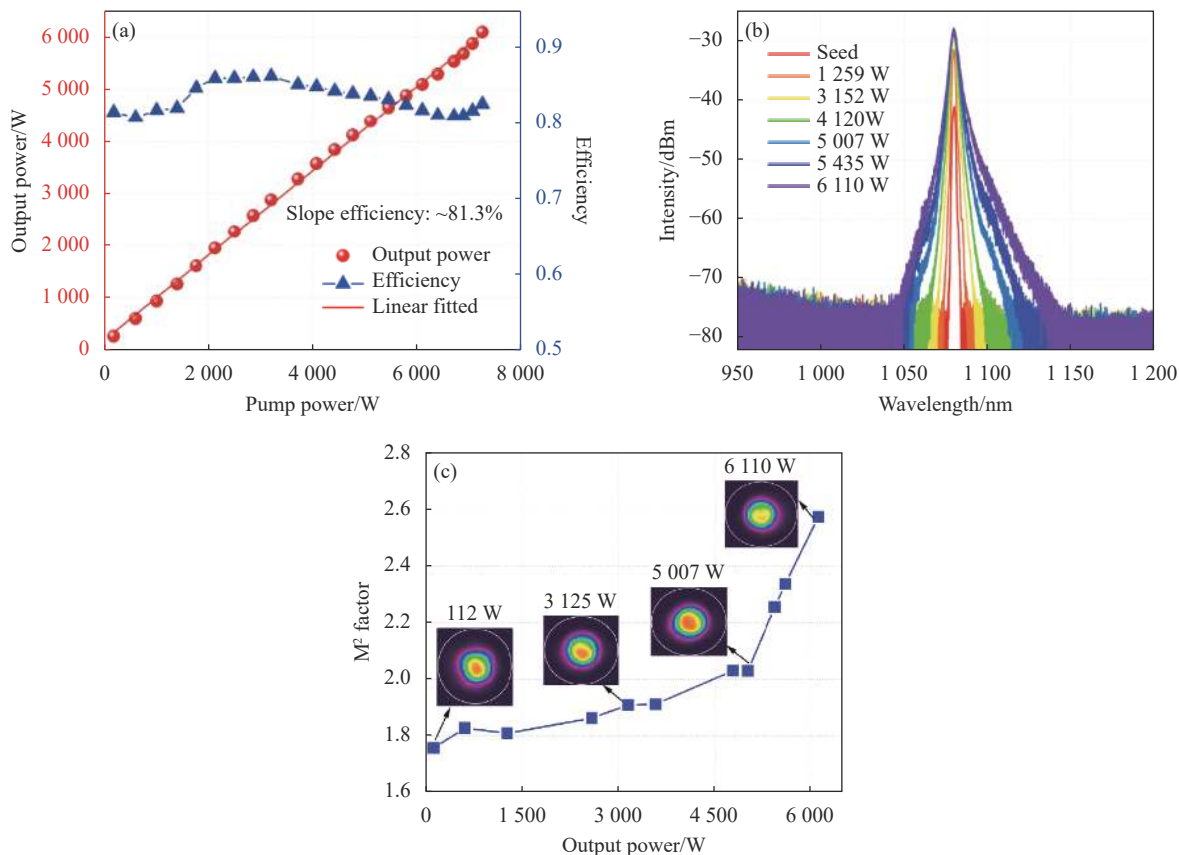


图 2 后向泵浦长锥形掺镱光纤放大器实验结果。(a) 输出功率和光光转换效率;(b) 不同输出功率下的输出光谱;(c) 输出激光的光束质量演化
Fig.2 Experimental results of the long-tapered ytterbium-doped fiber amplifier. (a) Output power and optical-to-optical efficiency; (b) Output spectra under different output powers; (c) Beam quality with respect to output power

宽为 3.74 nm, 光谱中未发现明显拉曼光成分, 拉曼抑制比大于 42 dB, 表明该激光器具有良好的非线性效应抑制能力。不同输出功率下采集到的光束质量演化如图 2(c) 所示, 输出功率提升到 5 007 W 时, M^2 从 1.8 缓慢变化到 2.0, 然而随着输出功率进一步提升, M^2 出现明显的退化, 结合时域信号, 表明此时模式不稳定效应已出现。在最高功率 6.11 kW 时, 输出激光

的光束质量为 $M^2 \sim 2.57$ 。

下一步将继续改进光纤制作工艺, 优化锥形光纤背景损耗、折射率分布等参数, 有望在保持高质量、高转换效率的同时实现更高功率输出。

致谢: 感谢中国电子科技集团公司第二十三研究所提供的锥形光纤, 感谢曾令筏、钟鹏林、文榆钧、王力等在实验过程中提供的帮助。