

中国激光

高功率窄线宽光纤激光突破 6 kW 级近单模输出

高功率、窄线宽光纤激光是构建光谱合成、相干合成等系统的单元光束,其输出功率提升能力和光束质量保持特性是决定合成系统亮度的重要因素。然而,受限于受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)等非线性效应以及热致模式动态耦合,高功率、高光束质量窄线宽光纤激光的输出功率明显滞后于工业加工等领域的常规宽谱光纤激光。目前,美国麻省理工学院、德国耶拿大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位报道了 3 kW 以上高功率窄线宽光纤激光系统,中国工程物理研究院相继报道了 3.7 kW 级和 5 kW 级高功率窄线宽光纤激光研究成果,国防科技大学相继报道了 4 kW 级和 5 kW 级高效率、高光束质量窄线宽光纤激光研究成果。

最近,国防科技大学某课题组实现了 6 kW 级近单模窄线宽光纤激光输出。系统结构如图 1(a) 所示。窄线宽主振荡源(PM SFFL)由中心波长约为 1080 nm 的超短腔单频种子经过相位调制产生,

其 3 dB 线宽约为 0.78 nm;窄线宽种子经过级联预放大器(pre-amplifiers)后将输出功率放大到约 50 W。放大后的激光依次经过滤波环形器(filtered circulator)和模场适配器(MFA)后注入到主放大器。滤波环形器将放大过程中的后向回光导出,达到同时保护前级系统和观测 SBS 效应的作用。中心波长为 976 nm 的半导体激光器(LDs)通过 $(6+1) \times 1$ 泵浦信号合束器注入增益光纤,实现功率放大;主放大器增益光纤选用纤芯/包层为 $20 \mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 的掺镱光纤(YDF),长度约为 14.5 m,它通过弯曲增加高阶模式相对损耗与双向泵浦相结合的方式抑制模式不稳定(TMI)效应。前后向剩余泵浦光分别通过自研包层功率滤除器(CPS)进行滤除,输出激光通过高功率激光器输出头(QBH)输出。后向合束器输出端与 QBH 之间的传能光纤总长约为 2.5 m。图 1(b)为输出功率和回光功率随泵浦功率的变化曲线。随着泵浦功率的

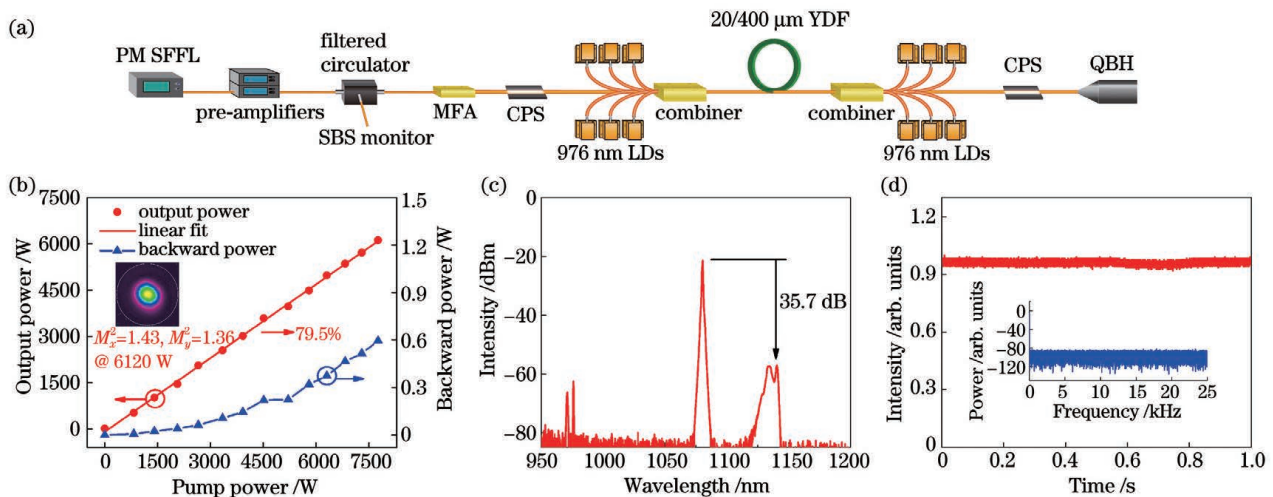


图 1 实验结构图和典型结果。(a)实验结构示意图;(b)输出功率和回光功率随泵浦功率的变化,插图为最高功率下的焦点光斑和光束质量;(c)最高功率下的光谱;(d)最高功率下的时序,插图为频谱

Fig. 1 Experimental setup and typical results. (a) Experimental setup; (b) output power and backward power as a function of pump power, where the inset is beam profile at the focal point and beam quality at the maximum output power; (c) output spectrum at maximum output power; (d) temporal trace at maximum output power, where the inset is Fourier spectrum

提升,输出功率近似呈线性增长趋势,拟合的斜率效率约为 79.5%。当泵浦功率为 7767 W 时,最高可实现 6120 W 激光输出,光光效率为 78.5%。图 1(b)中给出了最大功率下光束质量测量仪焦点处的光斑分布,光束质量因子测试结果为: $M_x^2 \approx 1.43, M_y^2 \approx 1.36$ 。最大功率下的输出光谱如图 1(c)所示,输出信号光的 3 dB 线宽约为 0.86 nm, SRS 信噪比约为 35.7 dB。图 1(d)为最大功率下的典型时序和对应的频谱,输出激光时序特性稳定,未出现 TMI 诱导的起伏和频谱特征峰。此外,在整个功率

提升过程中,后向回光功率未出现非线性增长,没有观察到 SBS 效应的产生。

当前系统功率的进一步提升主要受限于 SRS 效应。下一步拟对增益光纤的结构参数进行优化设计,进一步综合调控 SBS、SRS 和 TMI 效应对输出功率和光束质量的影响,在实现更高功率突破的同时,保持良好的光束质量。

致谢 感谢陈子伦、刘鹏提供的器件支持,感谢周聪、肖亮在实验过程中的帮助!

马鹏飞, 宋家鑫, 王广建, 陈益沙, 任帅, 刘伟, 姚天甫, 周朴*

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

通信作者: *zhoupu203@163.com

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-01-25; 录用日期: 2022-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61705264, 62005313, 62035015)、湖南省创新研究群体项目(2019JJ10005)