

双向同带泵浦光纤激光实现大于 6 kW 的近单模输出

李瑞显, 吴函烁, 肖虎*, 冷进勇, 周朴*

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210822

高功率光纤激光器具有电光效率高、光束质量好、结构紧凑、可柔性操作等特点, 已经在多个领域得到广泛应用。同带泵浦具有泵浦亮度高、热管理方便等优势, 是实现高功率高光束质量光纤激光器的有效途径。2010 年, IPG 公司利用同带泵浦技术实现了 10 kW 单模光纤激光输出, 并于 2012 年进一步将功率提升至 20 kW。自此同带泵浦成为国内外高功率光纤激光领域的研究热点。

2017 年, 国防科技大学课题组采用 1 018 nm 激光器对纤芯直径为 30 μm 的双包层掺镱光纤进行同带泵浦, 实现了 3.51 kW 的激光放大器输出, 斜率效率 87.5%, 最大功率时, 光束质量因子 (M^2) 为 1.98, 在输出光谱中观察到了受激拉曼散射 (SRS) 成分。2018 年, 该课题组将同带泵浦应用到窄线宽激光放大器中, 实现了 3.94 kW 高功率窄线宽输出, 斜率效率 78%, 最高输出功率时 $M^2=1.86$, SRS 抑制比~22 dB。同时, 实验证明了同带泵浦对模式不稳定 (TMI) 具有良好的抑制效果。2018 年, 清华大学团队利用同带泵浦技术, 将 75 W 的 1 080 nm 种子激光放大至 5 448 W, 光光转换效率为 91.3%, $M^2=2.2$ 。2019 年, 国防科技大学课题组在同带泵浦放大器中引入啁啾倾斜光栅抑制 SRS, 实现了 4.2 kW 高功率输出, 斜率效率 79%, 光束质量 $M^2=1.8$, 在输出功率 4 kW 时 SRS 抑制比约 29 dB。2021 年, 清华大学报道了使用带通滤波器抑制 SRS 效应的 1 018 nm 同带泵浦随机光纤激光器, 实现了 5.1 kW 高功率输出, 光光转换效率 89.0%,

最大功率下 $M^2=2.62$, 拉曼抑制比 27 dB。以上报道的研究成果均采用纤芯直径为 30 μm 双包层掺镱光纤作为放大器增益光纤, 在泵浦功率充足时, SRS 是限制激光器功率提升的主要因素。

由于镱离子在同带泵浦典型波长 1 018 nm 的吸收截面比其在 976 nm 吸收截面低约 1 个量级, 为保证充足的泵浦吸收, 在使用同带泵浦方案时往往选用纤芯尺寸较大、长度较长的掺镱光纤, 光纤中的非线性效应 (主要为 SRS, 由较长的光纤长度引起) 和 TMI (由较大的纤芯尺寸引起) 是限制常规宽谱激光器功率提升的主要因素。同时, 已有研究发现 TMI 和 SRS 存在相互作用。因而, 同时抑制 SRS 和 TMI 是实现更高输出功率的关键。

采用双向泵浦是同时抑制 SRS 和 TMI 的有效方案。尽管在半导体激光 (LD) 泵浦的光纤激光系统中, 双向泵浦结构已经得到了大量运用, 但在同带泵浦激光系统中, 双向同带泵浦的验证仍未见相关报道。

近期, 国防科技大学课题组首次将双向泵浦方案应用到同带泵浦放大器, 基于 30 μm 纤芯尺寸的常规双包层掺镱光纤实现了 6.22 kW 的高功率输出, 斜率效率 78.3%, 最大功率下拉曼抑制比为~22 dB, $M^2=1.53$ 。

系统结构如图 1 所示, 种子激光为 1 080 nm 百瓦级单模光纤激光器, 信号光经前向合束器进入放大器。泵浦源为四台 2 kW 级的 1 018 nm 光纤激光器, 泵浦光分别通过前向合束器和后向合束器注入掺镱

收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2021-11-11

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

作者简介: 李瑞显, 男, 博士生, 主要从事大功率光纤激光技术方面的研究。

通讯作者: 肖虎, 男, 副研究员, 博士, 主要从事大功率光纤激光技术方面的研究。

周朴, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大功率光纤激光、光束合成等方面的研究。

光纤, 放大后的信号光经过后向合束器、包层光滤除器后从激光输出头输出。

放大器功率曲线如图 2(a) 所示, 输出功率随注入的 1 018 nm 泵浦功率线性增加, 在 1 080 nm 种子功率

70 W, 泵浦功率 7 885 W 时, 输出功率达到了 6 220 W, 斜率效率 78.3%。图 2(b) 为不同功率下的光谱图, 放大器输出功率接近 6 kW 时开始出现拉曼光迹象, 最高功率下拉曼抑制比为~22 dB。图 3(a) 中的时序及

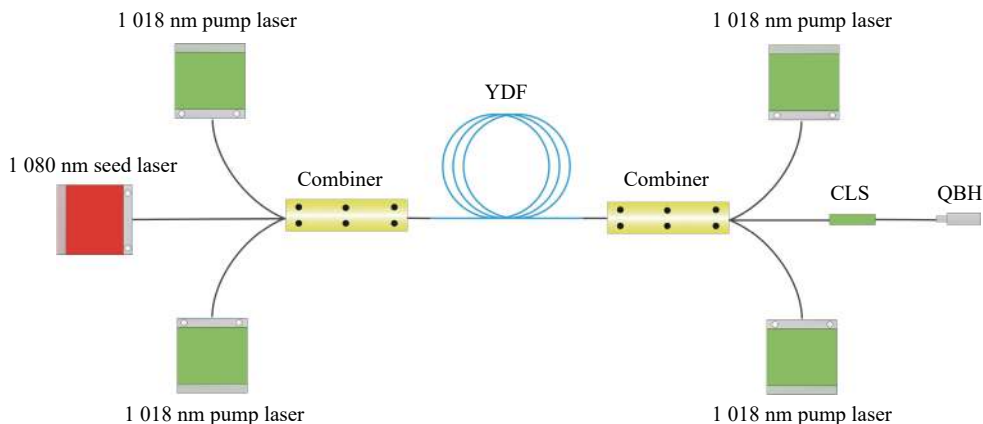


图 1 双向同带泵浦光纤放大器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of the fiber amplifier based on a bidirectional tandem pumping

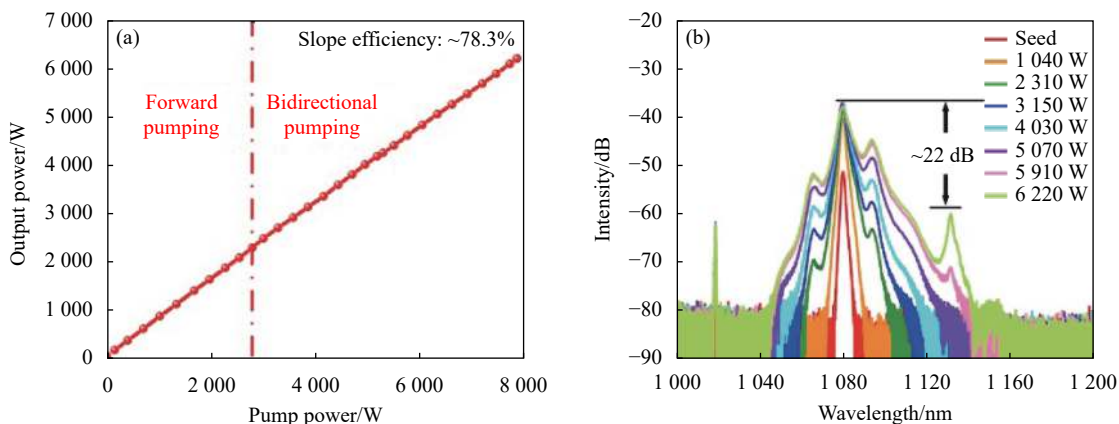


图 2 (a) 输出功率随泵浦功率变化曲线; (b) 不同功率下的输出光谱

Fig.2 (a) Output power as a function of pump power; (b) Output spectra under different powers

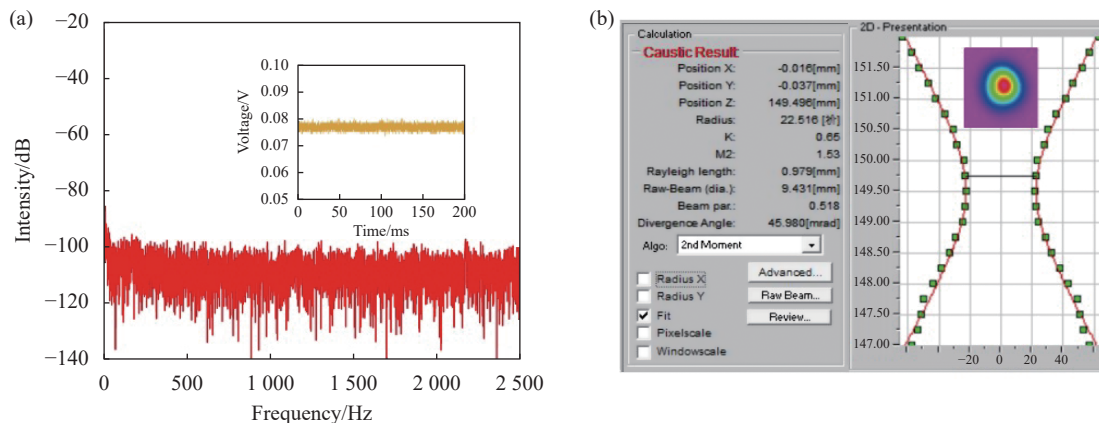


图 3 (a) 最大功率 6.22 kW 时放大器的时序和频谱; (b) 最大功率 6.22 kW 时的光束质量

Fig.3 (a) Temporal PD traces and corresponding frequency components at maximum power 6.22 kW; (b) Beam quality at maximum power 6.22 kW

频谱分析表明系统未出现 TMI 现象。在最高输出功率为 6.22 kW 时, 光束质量 $M^2=1.53$, 如图 3(b) 所示。

目前, 制约放大器功率提升的主要因素是 SRS 效应, 通过优化后向合束器提高可注入的后向泵浦功率、选用高吸收系数掺镱光纤、缩短光纤长度等方式, 输出功率有望进一步提升。

该工作首次报道了双向同带泵浦的高功率光纤激光, 为获得更高功率更高光束质量的光纤激光器提供了技术支撑。

致谢 感谢陈子伦老师、任帅老师, 肖亮、宋家鑫等在实验过程中的支持和帮助。