

## 高光束质量 6 kW 级窄线宽光纤激光

吴函烁, 宋家鑫, 马鹏飞\*, 任 帅, 王广建, 肖 虎, 黄良金, 冷进勇, 潘志勇, 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/IRLA20210859

高功率窄线宽光纤激光在光束合成、激光雷达、非线性频率变换等领域具有重要应用, 是高功率光纤激光领域的研究热点。国内外多家单位对高功率窄线宽光纤激光展开了一系列的研究, 并实现了数千瓦的功率输出。2015 年, 海富光子和天津大学采用窄线宽振荡器作为种子激光, 通过半导体激光二极管 (LD) 前向泵浦实现了 2.05 kW 的窄线宽光纤激光输出。2016 年, 麻省理工学院采用伪随机编码相位调制的单频激光器作为种子源, 基于空间结构的双向 LD 泵浦实现了 3.1 kW 的窄线宽激光输出。2017 年, 耶拿大学采用相位调制的半导体激光器作为种子源, 基于空间结构的后向 LD 泵浦实现了 3.5 kW 的窄线宽光纤激光输出。2019 年, 清华大学采用窄线宽振荡器作为种子激光, 通过 LD 后向泵浦实现了 2.05 kW 的窄线宽光纤激光输出。同年, 中国科学院上海光学精密机械研究所通过采用白噪声源相位调制的单频激光作为种子源, 通过 LD 后向泵浦实现了 3.01 kW 的窄线宽光纤激光输出。2021 年, 国防科技大学和中国工程物理研究院均基于白噪声源相位调制的单频激光作为种子源, 采用双向 LD 泵浦实现了 5 kW 级的窄线宽光纤激光输出。当前窄线宽光纤激光器输出功率进一步提升受限于受激布里渊散射 (SBS)、受激拉曼散射 (SRS)、模式不稳定 (TMI) 等效应。

级联泵浦方式具有量子亏损小、泵浦亮度高等优势, 是实现高亮度光纤激光输出的典型技术方案之一。2018 年, 笔者课题组首次将级联泵浦方式引入窄

线宽光纤激光放大, 采用前向泵浦方式实现 3.94 kW 窄线宽光纤激光输出。

近期, 笔者课题组基于自研大模场部分掺杂光纤 (Confined-doped fiber, CDF), 通过采用双向侧面泵浦和级联泵浦相结合的方式, 兼顾了 SBS、SRS 和 TMI 的综合抑制, 使得高光束质量窄线宽光纤激光输出功率突破 6 kW 级。

实验采用图 1 所示的主振荡功率放大结构。主振荡器为单频种子施加白噪声相位调制产生的窄线宽激光种子源, 其中心波长为  $\sim 1080$  nm, 3 dB 线宽为  $\sim 0.75$  nm。种子激光通过三级预放大器功率放大至  $\sim 34$  W, 随后注入主放大器进行最终功率提升。其中第二级和第三级放大器之间通过光纤环形器连接以实现回光的监测。放大器采用  $\sim 38$  m 长、纤芯和包层直径分别为  $40 \mu\text{m}$  和  $250 \mu\text{m}$  的 CDF, 其纤芯中央部分掺杂直径约为  $30 \mu\text{m}$ , 在 1018 nm 处的吸收系数为  $\sim 0.4$  dB/m。泵浦源为三台中心波长为 1018 nm 的光纤激光模组, 信号光以及前向泵浦光和后向泵浦光分别通过前向和后向  $(2+1)\times 1$  侧面泵浦合束器 (Pump and signal combiner, PSC) 注入放大器, 放大后的激光经过包层模式滤除器 (Cladding mode stripper, CMS) 后通过端帽 (End cap) 输出。如图 2(a) 所示, 放大器的输出激光功率随着泵浦功率增加呈线性增长, 前、后向泵浦激光同步注入放大器, 当泵浦功率达到最大时, 前向泵浦功率为 2.41 kW, 后向泵浦功率为 4.82 kW, 总泵浦功率为 7.23 kW, 输出功率达到 5.96 kW, 斜率效率为  $\sim 82\%$ 。在功率提升过程中, 后向

收稿日期: 2021-11-18; 修订日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (61705264); 湖南省自然科学基金创新群体 (2019 JJ10005)

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

导师(通讯作者)简介: 周朴, 男, 研究员, 博士, 主要从事大功率光纤激光、光束合成等方面的研究。

通讯作者: 马鹏飞, 男, 副研究员, 博士, 主要从事大功率窄线宽光纤激光技术方面的研究。

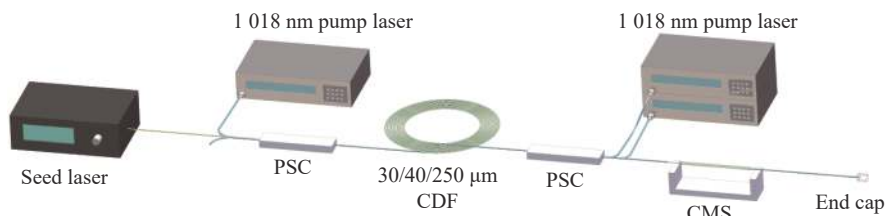


图 1 双向级联泵浦部分掺杂光纤激光放大器实验结构图

Fig.1 Experimental schematic of the bidirectional tandem-pumped confined-doped fiber amplifier

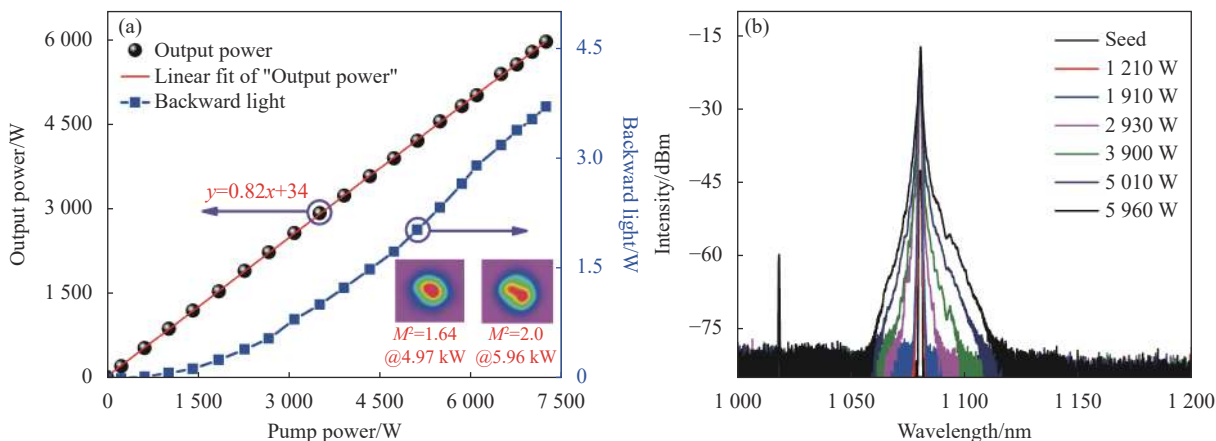


图 2 部分掺杂光纤激光放大器测量结果。(a) 不同泵浦功率下的输出功率及回光功率(插图: 光斑形态); (b) 不同激光功率下的输出光谱

Fig.2 Experimental results of the confined-doped fiber amplifier. (a) Output power and backward power versus pump power (inset: beam profiles);

(b) Output spectra under different output powers

回光未出现非线性增长, 最高输出功率下回光功率为 3.7 W 左右, 占总输出功率的~0.06%, 结果如图 2(a) 所示, 该光纤激光放大器模式不稳定阈值功率为 ~5.01 kW, 在输出功率为 4.97 kW 时光束质量因子  $M^2=1.64$ , 最高输出功率下, 光束质量因子保持在  $M^2=2.0$ , 对应的光斑形态如图 2(a) 插图所示。不同输出功率下的光谱如图 2(b) 所示, 随着输出功率提升, 由于前向泵浦激光噪声传递及模间四波混频效应导致光谱边带不断展宽, 同时激光能量从中心波长向边

带转移导致 3 dB 线宽窄化, 最高功率时, 输出光谱的 3 dB 线宽为 0.42 nm, 在信噪比~61.4 dB 下未观察到受激拉曼散射效应。

下一步将继续对泵浦源的时序特性以及光纤的吸收系数、折射率分布等参数进行优化, 以实现更好的线宽保持, 更高的转换效率和输出功率以及更好的光束质量。

**致谢** 感谢陈子伦老师提供的合束器及端帽, 感谢李瑞显、李魏、肖亮等在实验过程中提供的帮助。