

## 基于简单 MOPA 结构实现 4.45 kW 近单模窄线宽激光输出

高功率窄线宽光纤激光在非线性频率转换、光束合成等领域有着巨大的应用需求。主振荡功率放大(MOPA)结构是实现高功率窄线宽光纤激光器的主要技术方案。目前常用的种子主要包括相位调制单频激光器和窄谱光纤振荡器两类。前者的时序特性较好,在功率放大时非线性效应和光谱展宽弱,功率提升受到的限制因素相对较少。近期基于该方案的输出功率已经突破 6 kW。但是该方案系统较为复杂,鲁棒性欠佳。为了避免受激布里渊散射(SBS)的影响,需要使用复杂且昂贵的相位调制设备来展宽种子的线宽。同时,由于一级或多级相位调制之后种子功率下降严重,进入主放大器之前需要经过多级放大来提升种子功率。相比较而言,采用窄谱光纤振荡器作为种子的 MOPA 系统结构简单,可以大大提升系统的鲁棒性。但是,其时序稳定性通常远不如相位调制单频种子,因此功率放大过程中各种非线性效应要强得多,抑制光谱展宽和受激拉曼散射(SRS)的难度大大增加。

最近,国防科技大学高能激光技术研究所通过优

化光纤振荡器种子的时序特性,基于自研光纤与器件,采用单级放大方案实现了 4.45 kW 近单模窄线宽激光输出。实验结构如图 1 所示,光纤振荡器种子为后向泵浦结构,增益光纤为  $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$  双包层掺镱光纤(YDF),高反光栅 1(HR 1)、高反光栅 2(HR 2)和低反光栅(OC)的中心波长均约为 1080 nm,3 dB 带宽分别为 3、3、0.05 nm,反射率分别为 99%、99%和 10%。种子激光经过包层光滤除器(CPS)后注入放大级,种子功率为 24 W。放大级采用双向泵浦结构,泵浦源为稳波长 976 nm 半导体激光器(WS LD),增益光纤为  $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$  双包层掺镱光纤,光纤长度约为 12 m。输出激光经过 CPS 净化后由光纤端帽(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。放大级中的后向泵浦合束器及其之后的器件均采用纤芯为  $25\ \mu\text{m}$  的传能光纤,且均为一体化制备的器件,大大缩短了激光输出距离,有效降低了系统的受激拉曼散射效应。另外,种子的合束器及放大级前向合束器均采用侧面泵浦/信号合束器,降低了器件对输出激光光束质量的影响。

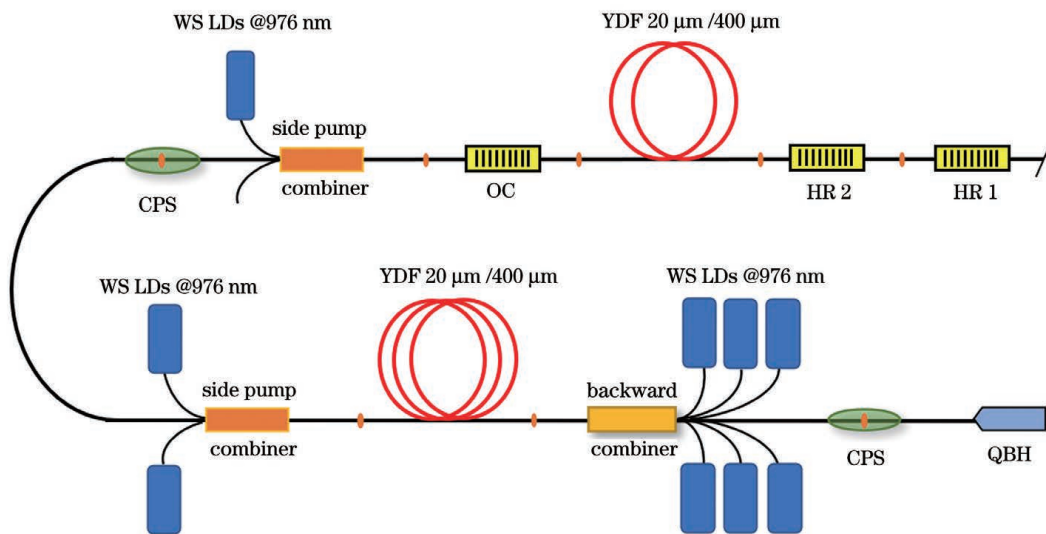


图 1 基于光纤振荡器种子的窄线宽单级 MOPA 结构激光系统示意图

Fig. 1 Schematic of narrow-linewidth one-stage master oscillator power-amplifier (MOPA) laser system based on fiber oscillator seed

本次实验通过优化种子结构和光栅参数来提升种子激光的时序特性,同时对放大级增益光纤的弯曲半径和前后向泵浦比例进行优化,以提高系统的模式不

稳定(TMI)阈值。最终在泵浦功率约为 5.5 kW 时(前后向泵浦比例约为 1 : 4.5)实现了 4.45 kW 的近单模激光输出,如图 2 所示,放大器的斜率效率约为

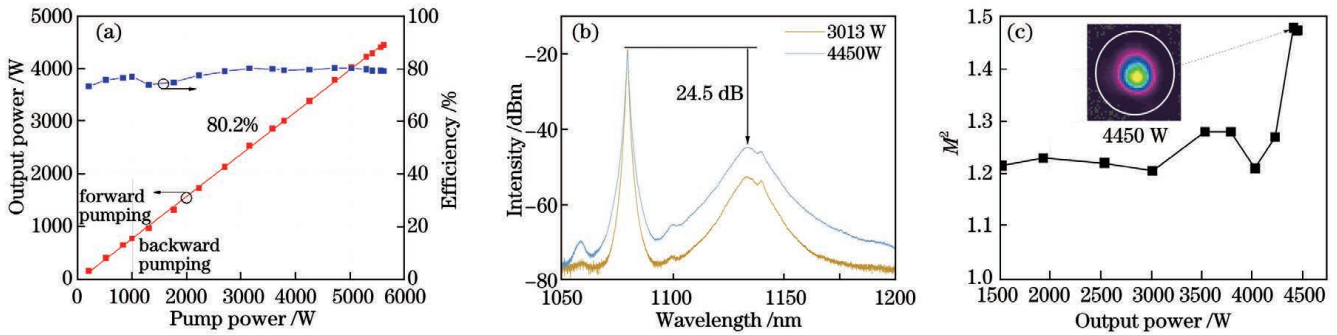


图 2 窄线宽光纤放大器的实验结果。(a)输出功率和光光效率;(b)输出光谱;(c)输出激光的光束质量演化

Fig. 2 Experimental results of narrow-linewidth fiber amplifier. (a) Output power and O-O efficiency; (b) output spectrum; (c) beam quality evolution of output laser

80.2%。在最高功率时,信号光的中心波长为 1079.6 nm,3 dB 线宽约为 0.5 nm,20 dB 线宽为 3.63 nm,受激拉曼散射信噪比约为 24.5 dB。由于模间四波混频(FWM)效应,在输出功率达到 3 kW 时出现了 1059 nm 和 1100 nm 附近的次峰。在放大过程中,种子后向光功率始终保持稳定,放大器引起的部分光反射未影响种子振荡,输出激光能够保持近单

模,4.25 kW 以前的光束质量因子  $M^2$  小于 1.3,最大功率时的  $M^2$  约为 1.48。激光器共计运行了约 30 min,其间工作稳定。放大器输出功率的进一步提升主要受限于模式不稳定效应。下一步将继续优化种子时序,对放大级增益光纤进行优化设计,综合抑制受激拉曼散射、模间四波混频和模式不稳定效应,在保持高光束质量的同时实现更高功率输出。

田鑫<sup>1,2</sup>, 饶斌裕<sup>1,2</sup>, 王蒙<sup>1,2</sup>, 奚小明<sup>1,2</sup>, 李智贤<sup>1,2</sup>, 王崇伟<sup>1,2</sup>, 李昊<sup>1,2</sup>, 陈子伦<sup>1,2</sup>, 潘志勇<sup>1,2</sup>,  
王小林<sup>1,2</sup>, 王泽锋<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院,湖南长沙 410073;

<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室,湖南长沙 410073

通信作者:\*zefengwang\_nudt@163.com

收稿日期:2022-05-12;修回日期:2022-05-22;录用日期:2022-05-24