

# 中国激光

## 基于 FBG 窄谱光纤激光放大器实现新突破

高功率高光束质量的窄谱光纤光源作为光束合成系统的重要单元,对提高光纤激光系统的输出功率有重要的作用。主振荡功率放大(MOPA)结构是获得高功率窄谱光纤激光的主要技术方案,其种子通常可以用单频相位调制种子和振荡器两种。一方面,单频相位调制种子的光谱得到一定展宽,受激布里渊散射(SBS)的阈值得到提升。另一方面,单频激光的时序特性得到保持,受激拉曼散射(SRS)、自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)等非线性效应较弱。近期,中国工程物理研究院和国防科技大学基于该方案分别报道了 5 kW 和 7 kW 高光束质量的保偏和非保偏窄线宽光纤激光放大器,但多级放大结构和复杂的相位调制系统导致其性价比和鲁棒性欠佳。

窄谱光纤振荡器种子方案可直接通过单级放大实现高功率窄线宽激光输出,大大提升了系统的紧凑性和鲁棒性,性价比较高。基于此方案,中国工程物理研究院和清华大学等均报道了大于 3 kW 的窄线宽激光输出。本课题组围绕该方案开展了大量研究,先后突破了 4.45 kW 和 5.00 kW 近单模窄线宽激光输出。最近,国防科技大学南湖之光实验室大功率光纤激光研究团队进一步优化了系统结构,抑制了光纤放大器中

的非线性效应和模式不稳定(TMI)效应,利用单级 MOPA 结构实现了 6 kW 高光束质量的窄线宽激光输出。

实验结构如图 1 所示,种子的光纤和器件均采用 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  双包层光纤,输出功率约为 20 W。利用级间环形器(BPFC)防止回光对种子产生影响,同时监测回光功率。放大级增益光纤是长度约为 12.5 m 的 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  掺镱光纤(YDF),泵浦源为 976 nm 稳波长半导体激光(WS LDs)。放大级采用双向泵浦结构,为保持注入激光的光束质量,前向合束器为侧面泵浦合束器(SPSC)。在盘绕方式和盘绕半径上对增益光纤进行了特别优化设计,大大提高了系统的 TMI 阈值,光纤的最小弯曲直径为 80 mm,最大弯曲直径为 110 mm。在单独后向泵浦方式下测得 TMI 阈值大于 5 kW。为减弱放大器的非线性效应,一方面,利用外部反馈的方式大大提升了种子激光的时序稳定性,另一方面,将后向合束器(PSC)、包层光滤除器(CLS)和光纤端帽(QBH)合为一体,自研了具有光束质量保持能力的一体化无熔点输出器件。该器件的输入光纤尺寸为 25  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ ,输出尾纤尺寸为 50  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ ,长度约为 1.5 m。

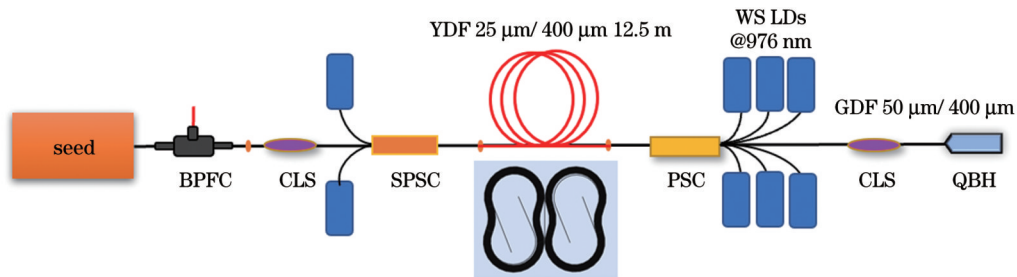


图 1 实验装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of experimental device

如图 2(a)所示,当双向泵浦总功率为 7060 W (前后向泵浦比约为 1:6)时实现了 6.04 kW 的窄谱激光输出,光光转换效率达到了 85.0%,最高功率下的回光功率为 1.6 W。图 2(b)为最高功率下的激光光谱,信号光的 3 dB 线宽为 0.63 nm, 20 dB 线宽为 2.81 nm, SRS 抑制比约为 30.25 dB, Stokes 光

的占比约为 1%。图 2(c)为横向光束质量因子( $M_x^2$ )和纵向光束质量因子( $M_y^2$ )随输出功率的变化,最高功率下光束质量约为 1.41。本文的研究结果和技术突破对宽谱光纤激光器和窄谱光纤激光器中的非线性效应抑制以及 TMI 阈值提升都具有重要的意义。

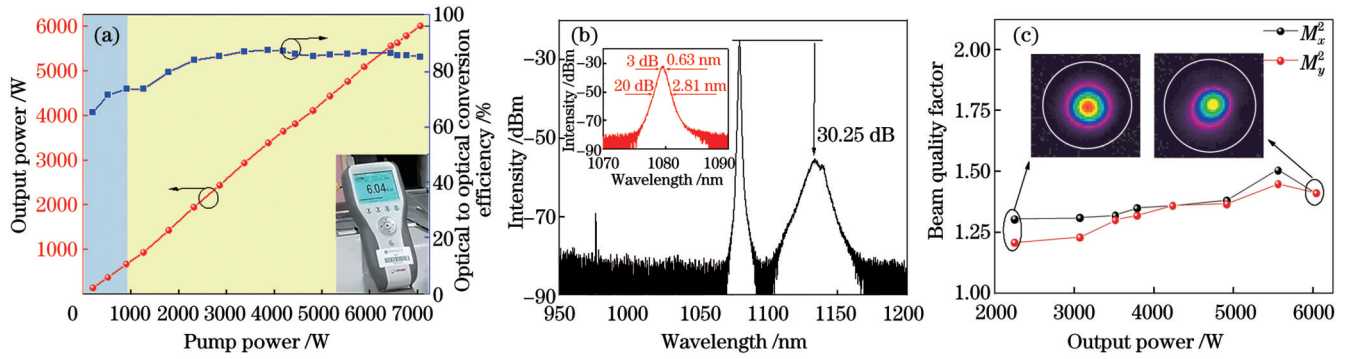


图2 放大器输出激光特性。(a)输出功率和光光转换效率随泵浦功率的变化,插图为双向泵浦总功率为7060 W时的窄谱激光输出功率;(b)最高功率下的光谱,插图为信号线宽;(c)光束质量因子随输出功率的变化,插图为光斑形态

Fig. 2 Output laser characteristics of fiber amplifier. (a) Output power and optical to optical conversion efficiency versus pump power with output power of narrow-spectrum laser at 7060 W total bi-directional pump power shown in inset; (b) spectrum at maximum power with signal linewidth shown in inset; (c) beam quality factor versus output power with beam profiles shown in inset

王泽锋<sup>1,2\*</sup>, 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>, 陈子伦<sup>1,2</sup>, 肖虎<sup>1,2</sup>, 马鹏飞<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>,  
潘志勇<sup>1,2</sup>, 黄良金<sup>1,2</sup>, 杨保来<sup>1,2</sup>, 王小林<sup>1,2</sup>, 陈金宝<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>国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073

通信作者: \*zefengwang\_nudt@163.com; \*\*kdchenjinbao@aliyun.com

收稿日期: 2023-07-25; 修回日期: 2023-08-21; 录用日期: 2023-09-04; 网络首发日期: 2023-09-11

基金项目: 湖南省科技创新领军人才项目(2021RC4027)