

中国激光

全光纤单频近单模激光首次突破千瓦输出

高功率单频光纤激光器在引力波探测、非线性频率转换、超远距离激光通信等领域具有巨大的应用需求。受激布里渊散射(SBS)效应是单频光纤激光器输出功率提升的主要受限因素。自2013年发现热致模式不稳定(TMI)效应以来,SBS和TMI双重制约致使近单模运转的单频光纤激光功率的进一步提升异常困难。经过近20年的发展,研究人员提出了外部应力/温度调控、基于光纤设计的光场/声波场调控等多种策略来抑制SBS和TMI效应,但是单频光纤激光的输出功率迟迟未能突破千瓦量级。2014年,基于空间结构,美国空军实验室采用分区掺杂光子晶体光纤配合温度梯度综合抑制了SBS与TMI效应,实现了811 W单频激光输出,光束质量因子 $M^2 < 1.2$,这是目前公开报道的最高功率单频激光。针对全光纤结构单频激光,2017年和2020年,国防科技大学报道了基于应力梯度的414 W($M^2=1.34$)线偏振单频激光输出和基于锥形光纤的550 W($M^2=1.47$)单频激光输出;2020年,法国波尔多大学利用低数值孔径增益光纤实现了 $M^2 < 1.1$ 的365 W单频激光输出;2022年,德国汉诺威激光中心利用纤芯手性耦合掺杂光纤实现了 $M^2 < 1.1$ 的336 W线偏振单频激光输出;2023年,华南理工大学采用锥形光纤配合混合泵浦方式将线偏振单频激光的输出功率提升到了650 W($M^2 \approx 1.7$);同年,天津大学采用级联增益调控配合混合泵浦和注入偏振优化等策略,将单频激光的输出功率提升至703 W

($M^2=1.47$)。

近期,国防科技大学基于新型增益-模场复合调控掺镱双包层光纤结合种子波长优化,率先突破了千瓦全光纤单频近单模激光输出。得益于精确的增益设计和折射率分布调控,该新型掺镱双包层光纤具有高增益、超大模场面积和超过100 dB/m的高阶模损耗系数等优势。图1是基于该增益光纤的单频放大器结构图。输出功率为50 mW的1030 nm单频种子激光首先经过两级预放大器(Pre-1和Pre-2)放大至10 W量级,随后注入主放大器。主放大器增益光纤的有效模场面积为 $815.9 \mu\text{m}^2$,泵浦吸收系数约为7 dB/m@976 nm。放大后的激光通过包层光滤除器和端帽(QBH)输出。在泵浦功率为1650 W时,实现了1010 W单频激光输出,最高功率下的光光转换效率为61.2%。放大过程的功率曲线如图2(a)所示,输出功率的进一步提升仅受限于SBS效应。最高功率下测得激光器的输出光谱如图2(b)所示,输出激光中无明显的放大自发辐射(ASE)。图2(b)中的插图是法布里-珀罗(FP)谐振腔记录的干涉光谱,测得输出激光的光谱线宽小于28 MHz(线宽测量结果受限于FP的精度)。最高功率下测得输出激光的光束质量因子为 $M_x^2=1.10$, $M_y^2=1.18$,具体如图2(c)所示。这一研究结果是目前国际上公开报道的全光纤化单频近单模激光的最高输出功率,为下一代引力波探测等前沿应用光源的研制提供了技术支撑。

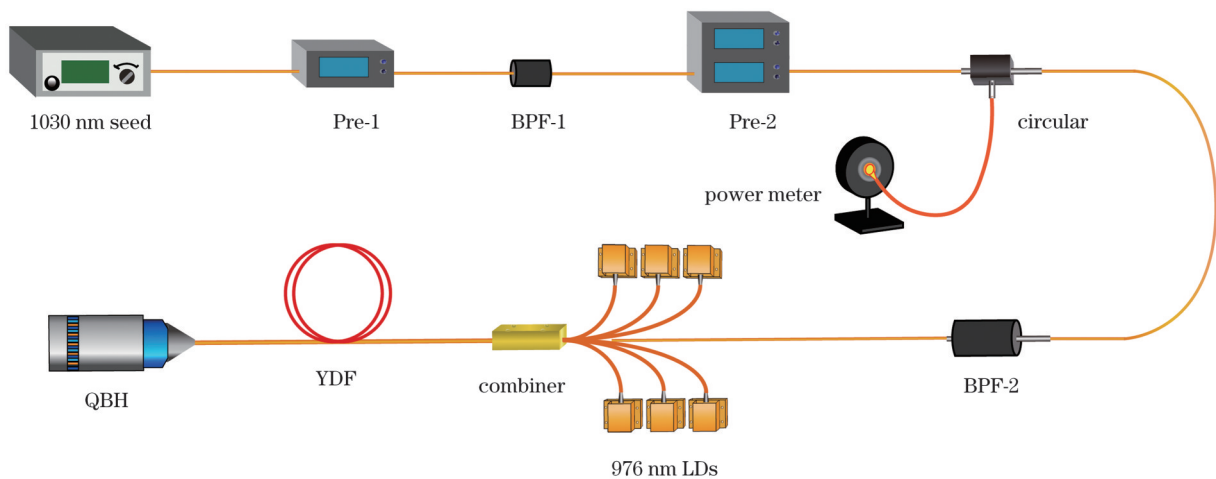


图1 系统结构示意图(BPF:带通滤波器;LD:激光二极管)

Fig. 1 Structural diagram of the system (BPF: band-pass filter; LD: laser diode)

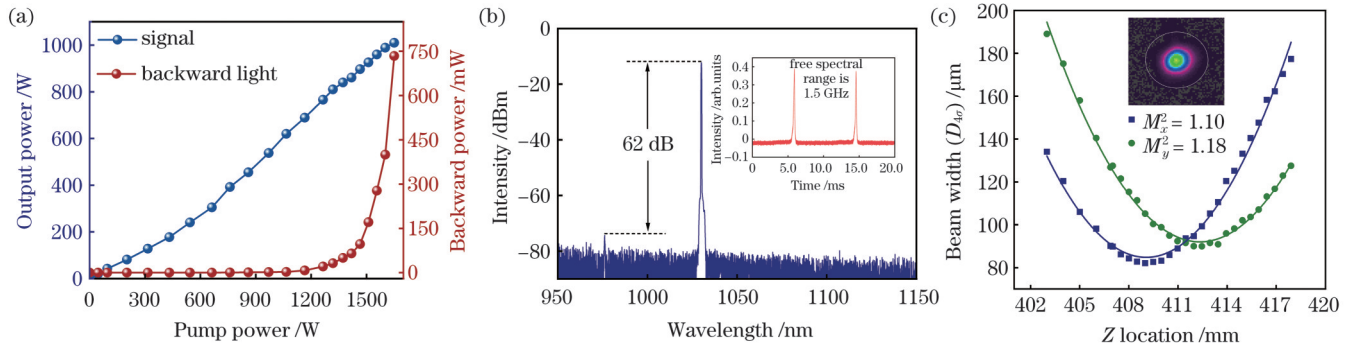


图 2 输出激光特征参数。(a)功率曲线;(b)输出光谱(插入图为FP光谱);(c) 1010 W下的光束质量

Fig. 2 Characteristic parameters of the output laser. (a) Power curves; (b) output spectra (FP spectrum inserted); (c) beam quality at output power of 1010 W

李魏¹, 马鹏飞^{1,2,3*}, 邓宇¹, 陈益沙^{1,2,3}, 陈琪¹, 刘伟^{1,2,3}, 肖虎^{1,2,3}, 陈子伦^{1,2,3}, 司磊^{1,2,3}, 周朴¹

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;

³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

通信作者: *shandapengfei@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3606400)、国家自然科学基金重点项目(62035015)

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-02-24; 录用日期: 2024-03-11; 网络首发日期: 2024-03-25