

# 中国激光

## 主动控制光谱合成倾斜抖动实现 8 kW 近单模输出

光纤激光器具有优良的光束质量、可柔性操作、热管理方便、结构紧凑等优点,被广泛应用于工业加工、医疗卫生、基础研究等领域。然而,受光纤非线性效应以及模式不稳定效应的影响,单纤近单模光纤激光(光束质量因子 $M^2 \leq 1.5$ )输出功率的提升存在很大难度。光谱合成技术的提出有效地解决了该问题,其能够将多路不同波长激光进行合成以实现功率提升,同时又能保持较好的光束质量。其中,双色镜合成是一种操作简单、成本低、可靠性高的光谱合成方案。但是,受到环境抖动、镜面热效应、传输通道气体热效应等因素的影响,单元光束间的指向误差(或称为倾斜相差)会影响合成光束质量,严重时高功率合成激光会出现光斑分裂、抖动、光束质量下降等现象,这会影响其实际应用并可能会对光束合成系统造成严重危害。

为了解决该问题,本课题组将主动控制技术应用于高功率双色镜光谱合成系统,实现了输出功率为 8.3 kW 的稳定近单模激光输出。实验原理如图 1 所示,采用两台中心波长分别为 1070 nm 和 1085 nm 的宽谱光纤激光放大器,激光经过高反镜(HR)后在双色镜(DM)中合成,其中高反镜 HR1 和 HR3 可由固定于背面的压电偏转台(POT)进行快速方位调节。1085 nm 放大器的输出功率为 3.9 kW,横向/纵向光束质量因子( $M_x^2/M_y^2$ )约为 1.32/1.19;1070 nm 放大器的输出功率约为 4.8 kW, $M_x^2/M_y^2$  约为 1.36/1.17。双色镜对 1085 nm 激光高透,对 1070 nm 激光高反。合束激光经过高反镜 HR4 后被注入到功率计(PM)中进行

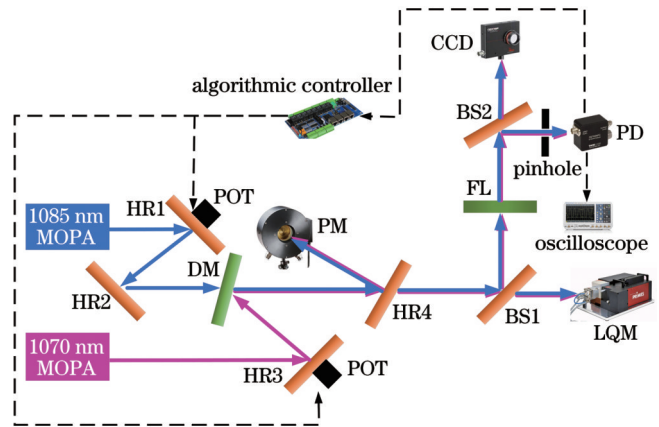


图 1 基于主动控制技术的宽谱激光双色镜合成实验结构示意图

Fig. 1 Schematic of combining experiment of wide-spectrum lasers in DM based on active control technology

功率测量。透射光被分束镜 1(BS1)分束后,一路进入到光束质量分析仪(LQM)中进行光束质量测试,另一路经过焦距为 750 mm 的聚焦透镜(FL)后再次被分束镜 2(BS2)分为两束,并分别被注入到位于光束焦点处的电荷耦合元件(CCD)和光电探测器(PD)中。在光电探测器的靶面前放置了一个小孔以获取控制系统的性能评价函数,PD 输出信号同时被输入到示波器和算法控制器中。实验中,利用随机并行梯度下降(SPGD)算法对压电偏转台进行控制,对两路激光的倾斜进行锁定。图 2(a)给出了开环和闭环状态下的性能评价函数随时间的变化曲线,结果表明,在系统开

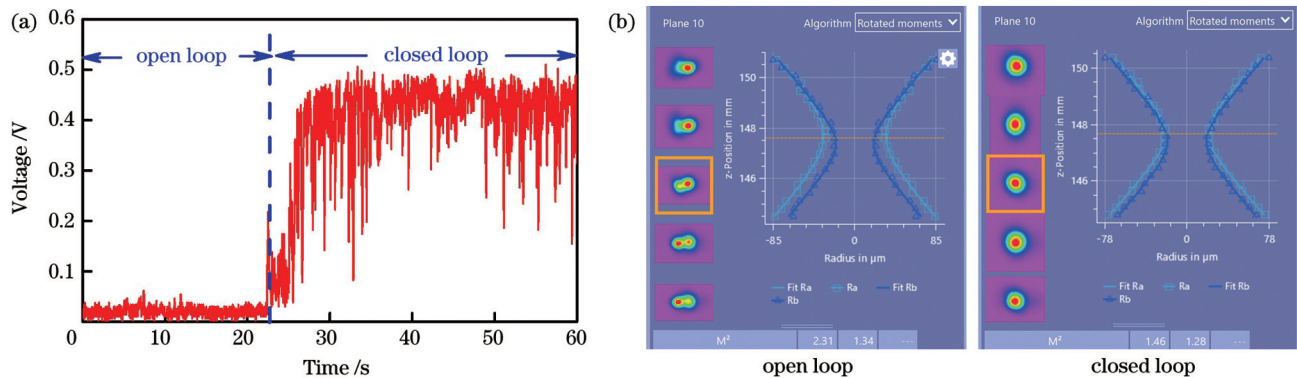


图 2 最高合成功率处开环和闭环条件下的实验结果。(a)性能评价函数随时间的变化;(b)合成光束质量

Fig. 2 Experimental results under open loop and closed loop conditions at highest combining power. (a) Performance evaluation function versus time; (b) combined beam quality

环状态下,性能评价函数约为 30 mV,闭环后提升至约 450 mV,提升了约 15 倍。对应的合成光束光斑形态演化如图 2(b)所示,在最高合成功率下,开环状态下合成光束的  $M_x^2/M_y^2$  为 2.31/1.34,闭环后提升至 1.46/1.28。总合成输出功率为 8.3 kW,合成功率约为 95.4%,产生 4.6% 合成功率损耗的主要原因是两台光纤激光放大器输出的激光均为宽谱激光,部分激光未被双色镜有效反射或透射。闭环控制后光斑不发生分离,为近单模状态,合成输出功率和合成功率无显著变

化。图 3 给出了最高输出功率下连续运行 3 min 过程中开环和闭环远场光斑形态随时间的演化。结果表明:开环状态下由于受到镜片热效应和环境因素的影响,两束激光远场光斑无法重合且相对位置一直变化,稳定度低,而闭环后合成光束的光束质量得到保证,稳定度高。实验初步验证了利用主动控制技术实现稳定高功率光谱合成激光的可行性,通过增加合束路数和提高单路激光功率,有希望实现更高功率的稳定近单模激光输出。

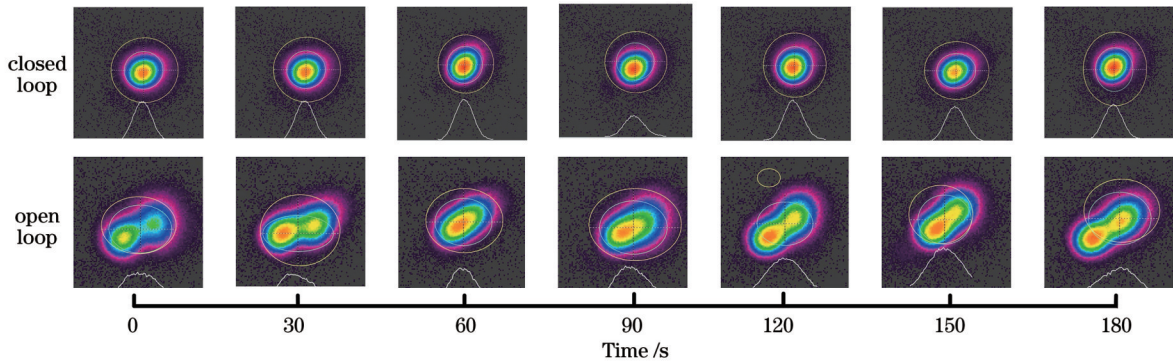


图 3 合成激光远场光斑

Fig. 3 Far-field spots of combined lasers

王鹏<sup>1,2,3</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 孟祥明<sup>1</sup>, 王小林<sup>1,2,3\*</sup>, 吴函烁<sup>1,2,3</sup>, 杨保来<sup>1,2,3</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3</sup>, 马鹏飞<sup>1,2,3</sup>, 马阎星<sup>1,2,3</sup>,  
刘文广<sup>1,2,3</sup>, 习锋杰<sup>1,2,3</sup>, 韩凯<sup>1,2,3</sup>, 王泽锋<sup>1,2,3</sup>, 许晓军<sup>1,2,3</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3\*\*</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;

<sup>3</sup>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: \*chinaphotonics@163.com; \*\*kdchenjinbao@aliyun.com

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2023-07-28; 录用日期: 2023-08-28; 网络首发日期: 2023-09-04

致谢 感谢陈景春设计控制电路,感谢徐小勇、钟鹏飞、宋涛在实验中提供帮助。