

中国激光

2 μm 波段高功率超快光纤激光相干合成

近年来,中心波长拓展到 2 μm 附近的高功率超快光纤激光器在基础研究、医疗、工业等领域中的应用越来越受到人们的关注。掺铥光纤啁啾脉冲放大器(CPA)具有高转换效率、易散热和优异的光束质量等优点,是产生 2 μm 波段高平均功率超快激光的理想选择。目前,基于掺铥大模场光子晶体光纤的啁啾脉冲放大系统已实现了 1 kW 的平均功率输出,但由于存在自由空间耦合模块,为避免 1900 nm 波长附近显著的水吸收峰对输出光束及脉冲质量的影响,往往需要抽真空或充入惰性气体,故激光系统的紧凑性和鲁棒性受到挑战。相比之下,基于全保偏双包层掺铥光纤的啁啾脉冲放大系统在稳定性和紧凑性方面具有优势,目前本课题组已实现了百瓦级平均功率的飞秒脉冲激光输出。但放大器中累积的非线性效应以及较强的热效应等因素也限制了功率的进一步提升。相干合成技术是突破单路光纤放大功率极限的有效手段,德国耶拿大学基于掺铥大模场光子晶体光纤已实现了 1.65 mJ 的 2 μm 波段飞秒脉冲激光输出。基于全光纤结构啁

啾脉冲放大器的相干合成系统研究鲜有报道,国内在 2 μm 波段超快激光相干合成方面的研究也未见报道,与国外存在一定差距。

近期,本课题组基于全保偏掺铥光纤啁啾脉冲放大器,利用随机并行梯度下降(SPGD)算法驱动的光纤拉伸器对超快激光进行锁相控制,实现了 2 μm 波段超快激光的相干合成。实验系统如图 1 所示,重复频率为 80 MHz 的种子脉冲先经过两个级联光纤啁啾布拉格光栅(CFBG)展宽至 800 ps,再经分束器分别注入到两路平行配置的放大通道中。各通道均由一级预放大级和一级大模场掺铥光纤主功率放大级组成。此外,在其中一路中加入了光纤延迟线对两路光程进行精确补偿,另一路引入光纤拉伸器实现锁相控制。两通道输出光经过偏振合束棱镜 1(PBC1)后在空间上重叠,利用半波片(HWP)调节偏振方向保证正交偏振,再利用 HWP 和 PBC2 检测合成效率。光电探测器对反射镜部分透射的激光信号进行检测并将其转化为电信号,通过示波器和相位控制器后转化为电压信号,

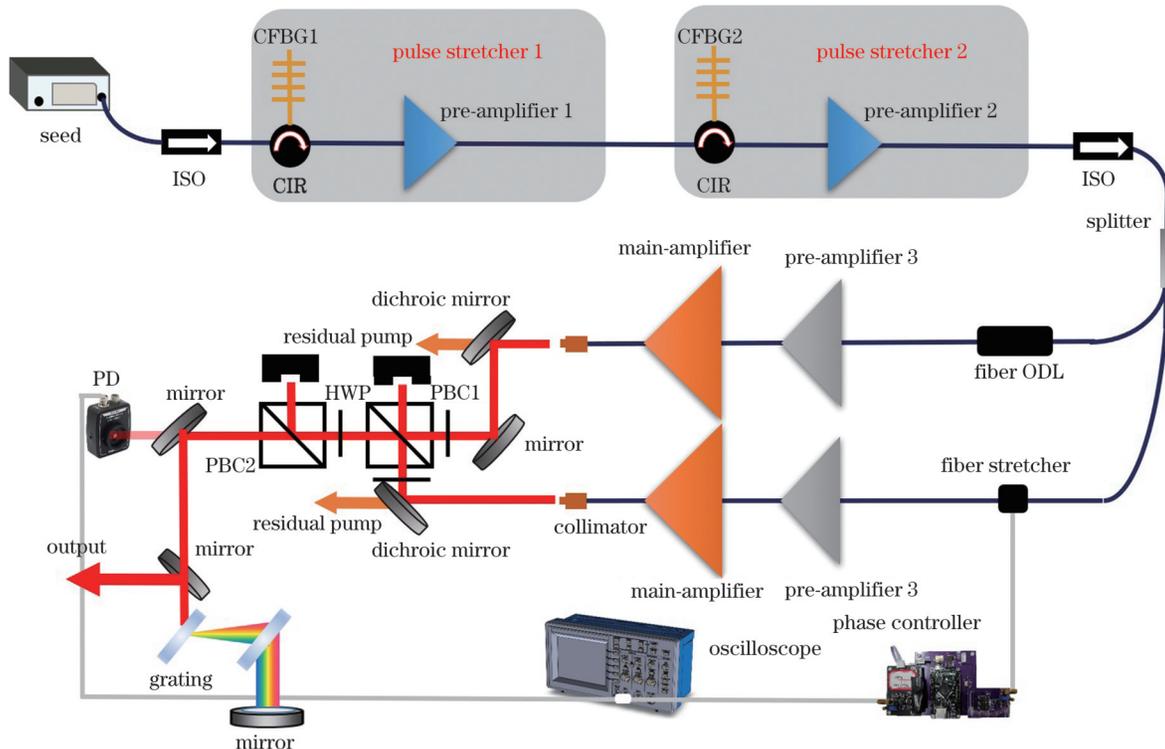


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

并基于 SPGD 算法对光纤拉伸器进行实时控制。理论上两束正交偏振的光在相干合成后将产生一束具有高偏振消光比(PER)的线偏振光束。最后,利用反射镜将合成光束反射进由透射式光栅对组成的脉冲压缩光路进行去啁啾处理。受限于可使用的最大泵浦功率,两通道输出功率分别放大至 152 W 及 180 W,最终实现了 265 W 合成功率输出,考虑到两放大通道的输出消光比分别为 19.3 dB 和 20.4 dB,PBC1 透射输出的功率分别降低为 150 W 和 178 W,相应的合成效率为 81%。图 2(a)为最大功率下系统锁相前后的归一化

输出时域特性。在闭环状态下,系统的相位噪声得到了有效抑制,锁相残差约为 $\lambda/17$ (λ 为波长)。图 2(b)为最高功率下单路及合成后的光谱,合成后光谱的中心波长为 1972 nm,3 dB 带宽为 7 nm。图 2(c)为最高合成功率下的压缩脉冲自相关曲线,合成输出脉冲压缩至 690 fs(洛伦兹拟合)。考虑光栅压缩效率及脉冲主瓣峰值能量占比均为 90%,实际输出的峰值功率为 4 MW。后续课题组将进一步增加放大通道数量并优化控制回路,降低锁相残差,提高合成效率,实现更高功率和能量的 2 μ m 飞秒激光输出。

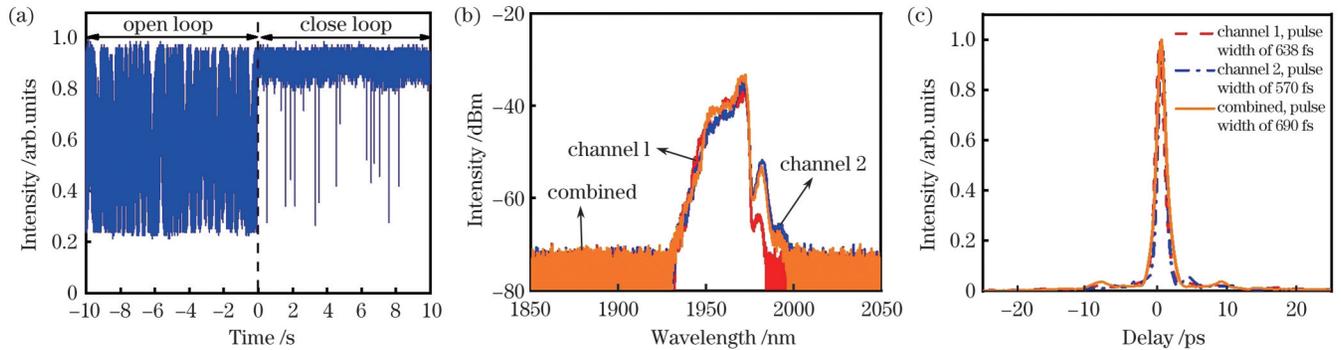


图 2 合成输出功率为 265 W 时的输出特性。(a)锁相前后的归一化输出时域特性;(b)单通道及合成输出光谱;(c)单通道及合成输出压缩脉冲的自相关曲线

Fig. 2 Output characteristics at combined output power of 265 W. (a) Normalized output temporal characteristics before and after phase locking; (b) output spectra of single amplification channels and combined beam; (c) pulse autocorrelation traces of single amplification channels and combined beam after compression

任博¹, 常洪祥¹, 王涛¹, 李灿^{1*}, 靳凯凯¹, 张嘉怡¹, 郭琨¹, 栗荣涛^{1,2,3}, 冷进勇^{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: *lc0616@163.com; **zhoupu203@163.com

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-10-26; 录用日期: 2023-10-30; 网络首发日期: 2023-11-06