

中国激光

基于光纤拉伸器锁相实现超快激光高效相干偏振合成

超快光纤激光在高精度测量与加工、超高速现象探测、粒子加速、生物医学等工业领域和前沿科学研究领域被广泛应用。然而,受限于光纤极小的模场面积,单路超快光纤激光功率(能量)的提升受到了非线性效应、光纤损伤、模式不稳定等的制约。超快光纤激光相干合成技术是突破单根光纤功率极限的有效手段,已成为当前国际上的研究热点。目前,德国耶拿大学基于相干合成技术实现了平均功率为 10.4 kW 和单脉冲能量为 23 mJ 的超快光纤激光输出,法国的 XCAN 团队则实现了 61 路超快光纤激光相干合成。本课题组前期基于相位调制器锁相已经实现了两路百瓦级飞秒光纤激光的相干合成,这一成果代表了目前国内超快激光相干合成的最高功率水平。综合来看,我国超快光纤激光相干合成技术的研究水平与国外尚有较大差距。

最近,笔者所在课题组采用基于压电陶瓷环的光纤拉伸器进行锁相控制,结合随机并行梯度下降 (SPGD) 算法,成功实现了两路超快光纤激光的高效相干合成。该锁相方案不仅可以避免常规电光相位调制器对脉冲信号产生光谱调制,还可以有效降低系统的插入损耗,增大相位的调制范围,提高耐受功率以及前级光源系统的紧凑性与鲁棒性。合成系统装置如图 1 所示。重复频率为 50 MHz 的超快激光首先经过一个啁啾光纤布拉格光栅 (CFBG) 实现脉冲展宽,然

后经过选频器降至重复频率为 2 MHz,经单模放大器后脉冲激光信号被均分为两路,再通过两个平行配置的保偏光纤放大链路将平均功率提升至 6.1 W。对于其中的一个光路,在主放大器前插入由偏振分束镜 (PBS)、1/4 波片和置于高精度位移台上的反射镜组成的空间延迟线,用于实现光程差的有效补偿。两路激光信号经偏振合束镜合束后,大部分光通过 PBS3 透射输出,反射光再次分束取样后进入光电探测器,光电探测器测得的信号经锁相控制电路处理后转换为电压信号,电压信号被反馈到光纤拉伸器,实现有效的相位锁定。最终成功实现了两路超快光纤激光的相干偏振合成,合成的最大功率为 10.9 W,最大功率下的合成效率为 90.1%。图 2(a) 是最大功率下系统锁相前后的长时间归一化输出时域特性。可以看出,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 $\lambda/31$,功率的长时间稳定性较好。图 2(b) 是最大功率下单路及合成后的激光光谱,合成后的光谱的中心波长和 3 dB 线宽分别为 1036.1 nm 和 6.5 nm。图 2(c) 是单路及合成后压缩脉冲的时域自相关信号。可见,在最大功率下,合成后的脉冲可压缩至 494 fs(假定脉冲为高斯型)。本工作在国内首次基于光纤拉伸器锁相实现了超快激光的高效相干偏振合成,系统结构简单且运行稳定。下一步本课题组拟考虑向更高功率、更多合成路数拓展。

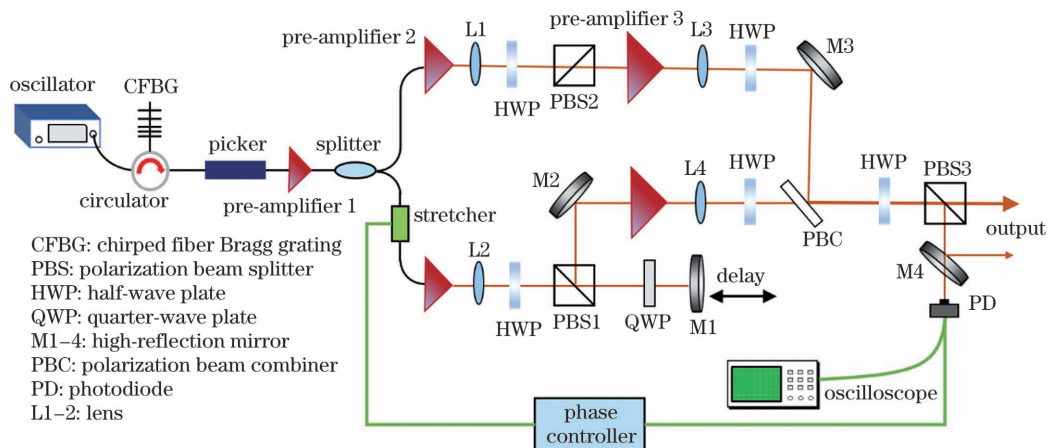


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

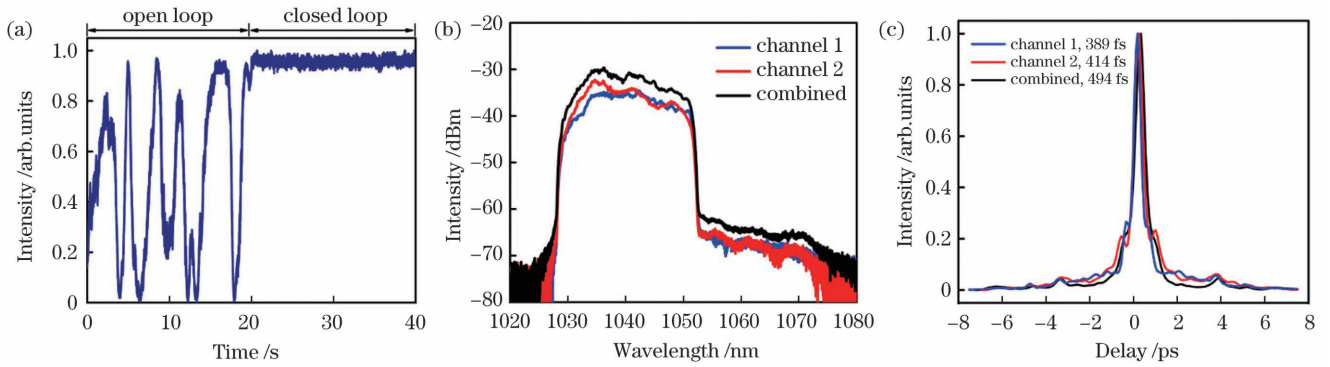


图 2 最高功率下的实验结果。(a)归一化时域强度起伏(开环和闭环);(b)单路与合成后的激光光谱;(c)单路与合成后压缩脉冲的时域自相关曲线

Fig. 2 Experimental results at the highest power. (a) Normalized temporal intensity fluctuations (open loop and closed loop); (b) output spectra of single channel and combined beam; (c) autocorrelation traces of single channel and combined beam after compression

王涛¹, 李灿^{1*}, 刘洋³, 任博¹, 唐振强³, 常洪祥¹, 谢戈辉³, 郭琨¹, 吴坚¹, 冷进勇¹,
马鹏飞^{1,2}, 栗荣涛^{1,2}, 李文雪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华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

通信作者:*lc0616@163.com; **zhoupu203@163.com

收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2022-10-11; 录用日期: 2022-10-19