

## 基于光纤拉伸器锁相实现两路超快激光相干偏振合成

王 涛<sup>1</sup>, 李 灿<sup>1\*</sup>, 刘 洋<sup>2</sup>, 任 博<sup>1</sup>, 唐振强<sup>2</sup>, 常洪祥<sup>1</sup>, 谢戈辉<sup>2</sup>, 郭 琨<sup>1</sup>, 吴 坚<sup>1</sup>,  
许将明<sup>1</sup>, 冷进勇<sup>1</sup>, 马鹏飞<sup>1,3</sup>, 粟荣涛<sup>1,3</sup>, 李文雪<sup>2</sup>, 周 朴<sup>1\*</sup>

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

2. 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;

3. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 超快光纤激光相干合成技术是突破飞秒激光单根光纤功率提升受限的有效技术手段。基于光纤拉伸器锁相, 并结合随机并行梯度下降 (SPGD) 算法, 成功实现了两路超快激光相干偏振合成。该锁相方案不仅避免了采用常规电光相位调制器对脉冲信号造成的光谱调制, 而且可有效降低系统的插入损耗, 提高相位调制范围、耐受功率以及前级光源系统的紧凑性与鲁棒性。合成的最高功率为 10.9 W, 最高功率下合成效率为 90.1%, 闭环状态下锁相残差为  $\lambda/31$ 。实验结果表明, 采用光纤拉伸器和 SPGD 算法组成的相位控制系统, 在超快激光相干合成领域具有较强的发展潜力。合成的脉冲在最高功率下可压缩至 494 fs, 压缩效率为 73.3%, 对应的单脉冲能量为 3.99  $\mu\text{J}$ 。

**关键词:** 相干合成; 相干偏振合成; 超快激光; 光纤激光

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220869

### 0 引言

高功率超快光纤激光在高能物理、高次谐波产生、先进制造、高精度测量与加工等前沿科学和工业领域中都具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。与连续激光放大不同的是, 飞秒激光在光纤中放大受到严重的非线性效应的制约, 在光纤中传输累积的非线性相移也会劣化脉冲质量。为了实现高功率/能量的飞秒光纤激光, 科研人员提出了啁啾脉冲放大 (CPA) 技术<sup>[4]</sup>, 即将飞秒激光在放大之前, 在时域将脉冲展宽到数百皮秒甚至纳秒量级, 从而大大降低脉冲的峰值功率实现高功率放大, 并在输出端通过色散补偿元件将脉宽压缩回飞秒量级。目前, 基于全光纤结构和空间耦合结构的光纤 CPA 系统所实现的最高平均功率为 440.6 W<sup>[5]</sup> 和 830 W<sup>[6]</sup>。然而, 受到光纤非线性效应以及模式不稳定效应的影响<sup>[7]</sup>, 基于光纤 CPA 技术的飞秒激光功率进一步提升遭遇瓶颈<sup>[8-9]</sup>。

超快光纤激光相干合成技术是突破飞秒激光单根光纤功率受限的有效技术手段, 成为国际上的研究热点<sup>[10-14]</sup>。德国耶拿大学在超快光纤激光相干合成领域在国际上处于领先地位, 2020 年, 通过 12 路光纤激光相干偏振合成实现了平均功率 10.4 kW 的飞秒激光输出<sup>[15]</sup>, 在 2019 年实现了单脉冲能量 23 mJ 的飞秒激光输出<sup>[16]</sup>, 创造了最高平均功率和单脉冲能量两项纪录。在合成路数方面, 法国的 XCAN 项目团队采用微透镜阵列合束方案实现了 61 路飞秒光纤激光的相干合成<sup>[17]</sup>, 实现了平均功率 1.5 kW、单脉冲能量 500  $\mu\text{J}$ 、脉宽 257 fs 的超快激光输出。国内在超快光纤激光相干合成研究方面与国外相比尚有较大差距。2016 年, 上海理工大学与华东师范大学联合实现了两路超快激光相干偏振合成, 合成的最高平均功率为 30.4 W<sup>[18]</sup>。2018 年, 国防科技大学同样实现了两路超快光纤激光相干偏振合成<sup>[19]</sup>, 最高合成功率为

收稿日期: 2022-12-04; 修订日期: 2023-02-11

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金 (SKL2020 ZR02); 湖南省研究生科研创新项目 (QL20220007)

作者简介: 王涛, 男, 博士生, 主要从事超快光纤激光方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 周朴, 男, 研究员, 博士, 主要从事光纤激光、光束合成以及相关交叉科学等方面的研究。

通讯作者: 李灿, 男, 副研究员, 博士, 主要从事超快光纤激光和单频激光方面的研究。

313 W, 脉宽为 827 fs, 是目前国内的最高功率水平。

为了实现高效率的超快激光相干合成, 不同光纤放大器之间的相位差需要精确补偿和锁定。相位控制技术是光纤激光相干合成的关键, 目的是使各路激光同相输出, 从而实现多路激光功率相干叠加的效果。依据相位差探测方式的不同, 可以分为直接探测和间接探测。直接探测通过 Hänsch-Couillaud (HC) 探测<sup>[20]</sup>、外差法<sup>[21]</sup>等方法获取单元激光之间的相位差并校正, 具有控制带宽高、控制速率快的优点, 但是随着阵列路数的增加, 探测系统的复杂度会显著提升<sup>[11-12]</sup>。间接探测不对相位差直接测量, 通过光电探测器探测合成光束的远场中央主瓣能量, 利用一定算法不断更新优化迭代使其达到最大值, 该方法具有系统拓展性高、控制系统简单的优点<sup>[11-12]</sup>。基于间接探测方法, 国防科技大学已经实现了百路以上大阵列连续光纤激光相干合成<sup>[22]</sup>和 19 路 21.6 kW<sup>[23]</sup> 高功率光纤激光相干合成。在间接探测中, 随机并行梯度下降 (SPGD) 控制算法的应用最为广泛<sup>[17, 22, 24]</sup>。在实际应用中, 要求锁相系统具有较高的稳定性, 并具有自动寻找最优锁相点和重锁相的功能, 基于 SPGD 算法的数字电路系统可以满足上述需求。此外, 相位调制器是锁相系统中极为关键的器件, 目前多采用基于铌酸锂电光效应的相位调制器实现对相位的控制<sup>[19, 24-25]</sup>。但是该类调制器插损较大, 损伤阈值低, 前级光源需经过多级放大才能实现高功率输出, 增加了光源设计的复杂性并且会影响系统的稳定性。另一种基于压电陶瓷 (PZT) 的光纤拉伸器, 通过压电陶瓷的电致伸缩效应实现对光纤的拉伸来达到控制相位的目的。此外, 光纤拉伸器具有较大的动态调节范围, 可同时对激光光程的调节。该锁相器件可有效降低系统的插入损耗, 提高相位调制范围、耐受功率以及前级光源系统的紧凑性与鲁棒性, 避免了采用常规电光相位调制器对脉冲信号造成光谱调制, 且具有低成本的优势。

文中基于光纤拉伸器结合 SPGD 算法进行相位控制, 成功实现了两路超快光纤激光高效率相干偏振合成。合成的最高功率为 10.9 W, 在最高功率下合成效率为 90.1%。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  $\lambda/31$ 。合成的脉冲在最高功率下可压缩至 494 fs, 压缩效率为 73.3%, 对应的单

脉冲能量为 3.99  $\mu\text{J}$ 。

## 1 实验结构

两路超快光纤激光相干偏振合成实验装置如图 1(a) 所示, 种子激光是一个自行搭建的重复频率为 50 MHz、输出功率为 282 mW 的锁模振荡器, 中心波长为 1040 nm, 输出脉冲宽度为 1.86 ps, 如图 1(b) 和 (c) 所示。种子信号随后经一个啁啾光纤布拉格光栅 (CFBG, 中心波长为 1040 nm, 3 dB 带宽为 22 nm) 将脉宽展宽至 500 ps, 然后经一个选频器降频至 2 MHz。降频后的信号功率为 2.9 mW, 之后经一个长度为 1 m 的单模光纤预放大器 (Pre-amp1) 将功率提升至 30 mW, 放大后的信号被一个分束比为 1:1 的耦合器均分成两路, 经过两个平行配置的放大链路实现功率的提升。其中一路在第二级预放大器前接入了基于压电陶瓷环的光纤拉伸器用于锁相, 拉伸器内部紧密盘绕了 12.4 m 的保偏单模光纤, 确保该光纤拉伸器在调相的同时不会影响信号的偏振态。光纤拉伸器的驱动电压为  $\pm 500$  V, 拉伸系数为 0.159  $\mu\text{m}/\text{V}$ , 对应的相位移动系数为 1.45 rad/V @ 1  $\mu\text{m}$ 。由此, 该光纤拉伸器可实现的相位调节范围约为  $\pm 115.5\lambda$ 。此路信号在进入主放大器之前又再次引入了由偏振分束棱镜 (PBS)、1/4 波片 (QWP) 和置于调节范围为 25 mm 的一维高精度位移台上的反射镜组成的空间延迟线实现光程差的有效补偿。第二级预放大器 (Pre-amp2) 采用的是长度为 2 m、纤芯/包层直径分别为 10/125  $\mu\text{m}$  的保偏掺镱增益光纤, 经过第二级预放大器后单路功率被提升至 500 mW。两路主放大器采用的都是长度为 2.5 m、纤芯/包层直径分别为 25/250  $\mu\text{m}$  的保偏掺镱增益光纤。最后, 两路激光信号经一个偏振合束镜输出。由于两路正交偏振的信号之间具有随机的相位差, 合束后的激光具有随机的偏振态, 因此合束后的激光再次经一个半波片和偏振分束棱镜 (PBS3) 输出, 用于探测相干合成系统的误差信号。当系统没有锁相时, 经 PBS3 分束后的信号功率不稳定, 反射光再次经高反镜 M4(99:1) 取样后将少量透射光反馈给光电探测器。为避免脉冲基频信号对相位控制产生影响, 因此将光电探测器测得的信号进行 500 kHz 低通滤波后再反馈到相位控制系统。基于现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 设计的相位控制系统由

一路高速模数转换器和一路高速数模转换器构成, 转换速度均大于 50 MSPS, 可根据合成路数对通道进行扩展。数模转换器输出电压范围为  $-5\sim 5$  V, 经 20 倍高压放大器放大后对光纤拉伸器施加控制电压, 用来提高相位控制范围。受限于压电陶瓷环的二阶频率响应峰, 相位控制系统以 140 kHz 的迭代频率执行 SPGD 算法。该算法在相干合成领域应用较为广泛, 适用于多变量的优化控制系统。其基本原理是, 首先根据当前控制的多变量, 输出对应的控制电压到光纤

拉伸器改变激光输出相位, 由于相位变化引起合成后的光强变化, 可将光电探测器测得的光强由高速模数转换器采集并作为合成系统评价函数。在此基础上, 相位控制系统对变量施加随机扰动并重新由数模转换器输出, 获取相应的评价函数值, 根据扰动前后评价函数的变化对相位进行反馈控制, 如此反复迭代使合成后的光强达到极值, 以获得最佳的干涉效果, 实现有效的相位锁定。

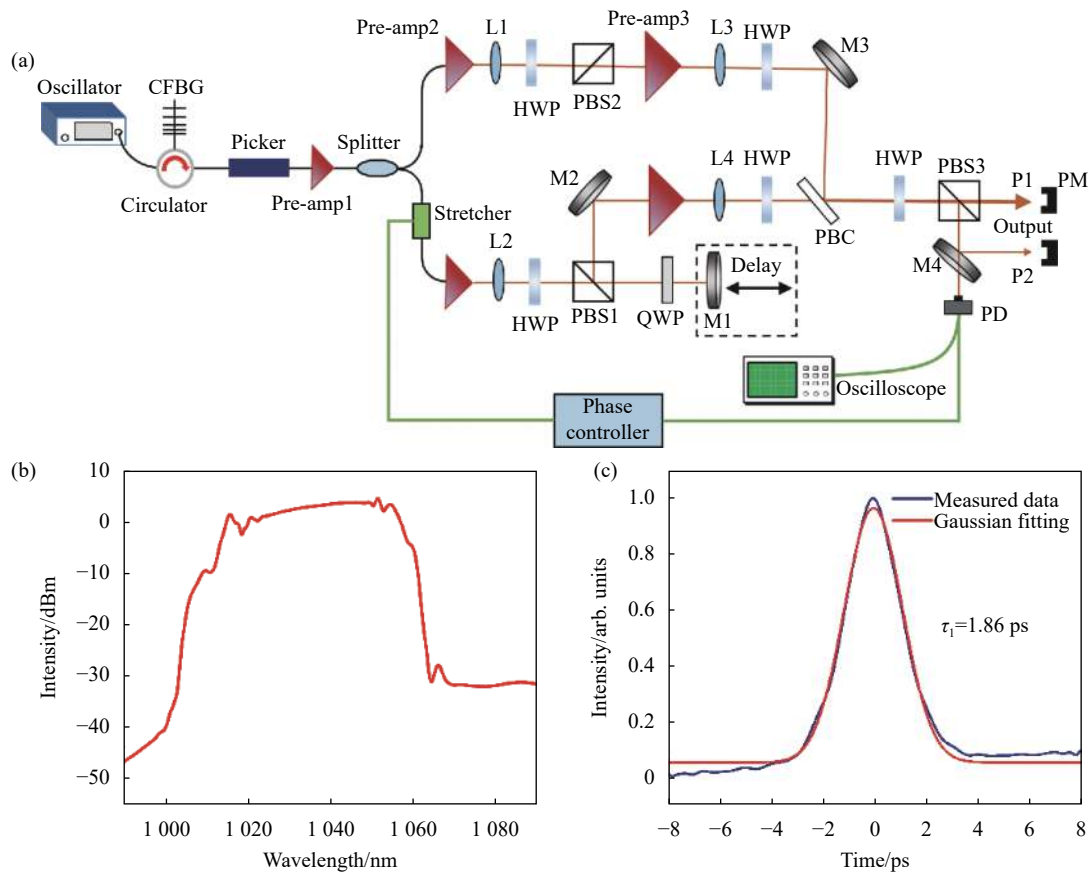


图 1 (a) 两路超快激光相干偏振合成实验装置图。CFBG: 啁啾光纤布拉格光栅; Pre-amp: 预放大器; HWP: 半波片; PBS: 偏振分束棱镜; QWP: 1/4 波片; L1~L4: 透镜; M1~M4: 高反镜; PBC: 偏振合束镜; PD: 光电探测器; PM: 功率计; 种子激光的 (b) 输出光谱和 (c) 脉冲宽度

Fig.1 Experimental setup of two ultrafast laser channels coherent polarization beam combination. CFBG: chirped fiber Bragg grating; Pre-amp: pre-amplifier; HWP: half-wave plate; PBS: polarization beam splitter; QWP: quarter-wave plate; L1-L4: lens; M1-M4, high-reflection mirror; PBC: polarization beam combiner; PD: photodiode; PM: power meter; (b) output spectrum and (c) pulse width of the seed laser

## 2 实验结果

实验首先测试了系统的锁相效果。采用空间延迟线对两路信号光程差进行补偿后达到干涉状态, 再基于光纤拉伸器对相位差进行精确补偿。图 2(a) 是

在单路信号都为最高 6.1 W 时的长时间归一化时域强度起伏。可以看出, 锁相前由于光纤放大器相位噪声的影响, 以及环境噪声的扰动, 系统的输出功率剧烈、随机地抖动。当对两路激光信号相位差进行实时反馈控制后, 系统的输出功率趋于稳定, 归一化时域

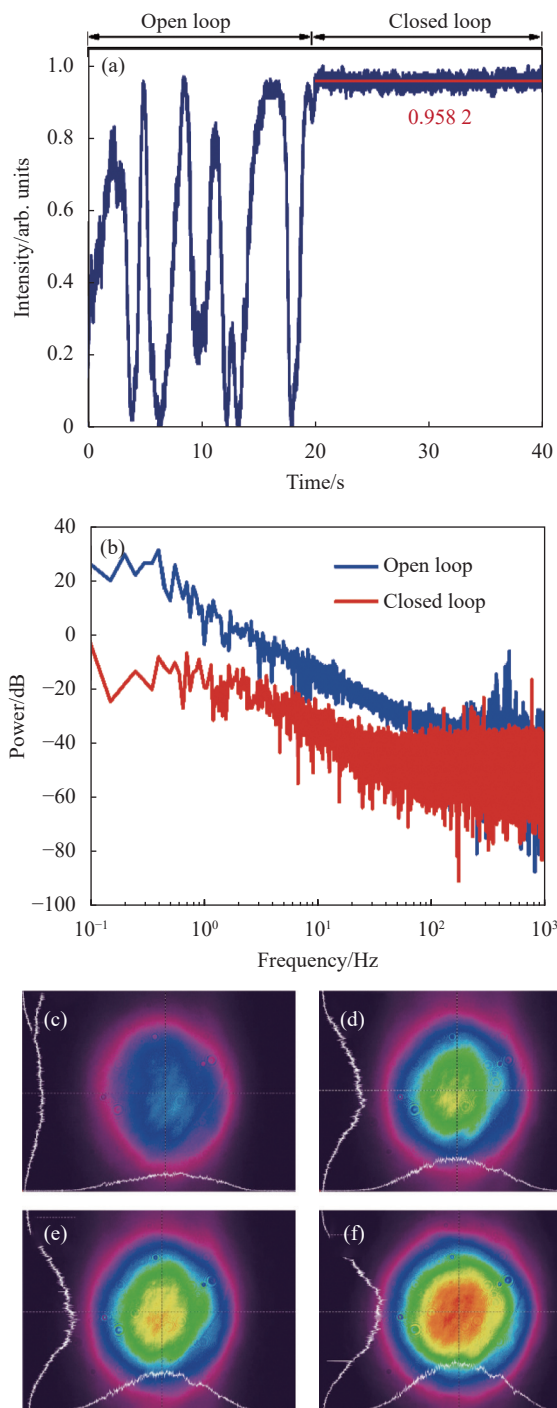


图 2 (a) 系统锁相前后的归一化时间强度起伏 (开环和闭环); (b) 开环和闭环状态下的功率谱密度曲线; (c)-(e) 系统开环状态下的合成光斑; (f) 系统闭环状态下的合成光斑

Fig.2 (a) Normalized temporal intensity fluctuation before and after phase locking (open loop and closed loop); (b) Power spectral density curves at the open and closed loop; system combined beam profile in (c) -(e) open loop and (f) closed loop

强度的平均值为 0.9582, 标准差为 0.0101。图 2(b) 是锁相前后的功率谱密度, 可知系统在低频下的相位噪声得到了有效抑制, 相位噪声性能得到了极大改善。系统锁相残差由下列公式<sup>[26]</sup> 计算:

$$\sigma = 2 \sqrt{V_{RMS} / V_{MAX}} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  代表系统锁相残差;  $V_{RMS}$  为探测器输出电压的均方根误差;  $V_{MAX}$  为输出电压最大值。由上式计算的系统在最高合成功率 10.9 W 下的锁相残差约为  $\lambda/31$ , 该光纤拉伸器表现出了较好的稳定性, 功率长时间稳定性良好。图 2(c)~(e) 为系统在开环状态下测得的合成信号强度分布。可以看出, 系统没有锁相时, 输出光斑同样不稳定、随机变化, 但开启相位控制系统后, 在闭环状态下输出光斑会趋于稳定, 如图 2(f) 所示。

图 3 是系统在不同合成功率下的合成效率, 合成效率  $\eta$  由下式计算:

$$\eta = P1 / (P1 + 1.01 \times P2) \quad (2)$$

式中:  $P1$  和  $P2$  分别为合成信号经 PBS3 后的透射和反射光功率。在激光放大的过程中, 由于单元光束间激光指向、光斑大小及光束发散角的不完美匹配, 不同功率下的合成效率在 90% 左右小幅波动, 在最高合成功率 10.9 W 下, 合成效率约为 90.1%。

图 4(a) 是最高功率下单路激光及合成后激光信号的输出光谱。可以看出, 两路信号的输出光谱在 1035 nm 附近存在一定的差异, 推测其主要来源于两

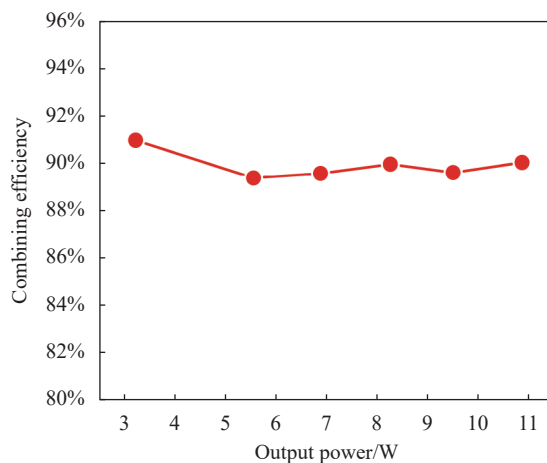


图 3 不同输出功率下的合成效率

Fig.3 Combining efficiency at different output powers

路放大通道中光学器件损耗的波长相关性,以及相应激光信号所经历的非线性相移差。需要强调的是,尽管非线性相移差会对合成效率造成一定程度的影响,但通过严格控制两路放大器结构的一致性(如光纤长度、输入信号功率以及泵浦功率等),该影响可忽略不计<sup>[27]</sup>。合成后的光谱中心波长为 1036.1 nm, 3 dB 线宽为 6.5 nm。图 4(b) 是最高功率下单路及合成后脉冲压缩的时域自相关曲线,假定脉冲为高斯型,单路脉冲压缩的脉宽分别为 389 fs 和 414 fs,合成后的信号可压缩至 494 fs。压缩效率约为 73.3%,考虑到激光重复频率为 2 MHz,合成后的压缩信号单脉冲能量为 3.99  $\mu\text{J}$ 。

黎综合理工学院则在 2020 年实现了 61 路超快光纤激光的分孔径相干合成<sup>[17]</sup>。然而,前期工作所使用的光纤拉伸器相位调节范围有限 ( $\pm 18.4\lambda$ ),因此,主要被利用反馈控制合成系统的相位噪声,而对由光程差漂移引起的较大幅度相位变化则需使用额外的光纤延迟线来补偿,导致系统的控制环路增加、可靠性变差。文中工作所使用的光纤拉伸器具有更大的相位调节范围 ( $\pm 115.5\lambda$ ),通过结合 SPGD 算法,基于单个控制环路实现了对光程差与相位噪声的同时有效控制,这使得该系统的紧凑性与可靠性更强。下一步工作将基于该光纤拉伸器实现更高功率、更多合成路数的超快光纤激光相干合成系统。

### 3 结 论

文中基于光纤拉伸器并结合 SPGD 算法,成功实现了两路超快光纤激光相干偏振合成。与常规电光相位调制器相比,光纤拉伸器不仅避免了对脉冲信号带来的光谱调制,而且具有较小的插入损耗、较大的相位调节范围和高的损伤阈值。实验中实现的最高合成功率率为 10.9 W,合成效率 90.1%,在闭环状态下的锁相残差约为  $\lambda/31$ 。合成的脉冲可压缩至 494 fs,压缩效率为 73.3%,对应的单脉冲能量为 3.99  $\mu\text{J}$ 。以上实验结果验证了采用光纤拉伸器在光纤激光相干合成中控制相位的可行性,下一步工作拟考虑将该系统向更多合成路数和更高合成功率拓展。

### 参考文献:

- [1] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 868.
- [2] Chang G, Wei Z. Ultrafast fiber lasers: an expanding versatile toolbox [J]. *iScience*, 2020, 23(5): 101101.
- [3] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(8): e16133.
- [4] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [5] 王涛, 李灿, 任博, 等. 全光纤线偏振飞秒光纤放大器实现 440 W 功率输出 [J]. *中国激光*, 2022, 49(17): 1716001.
- [6] Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power [J]. *Optics Letters*, 2010,

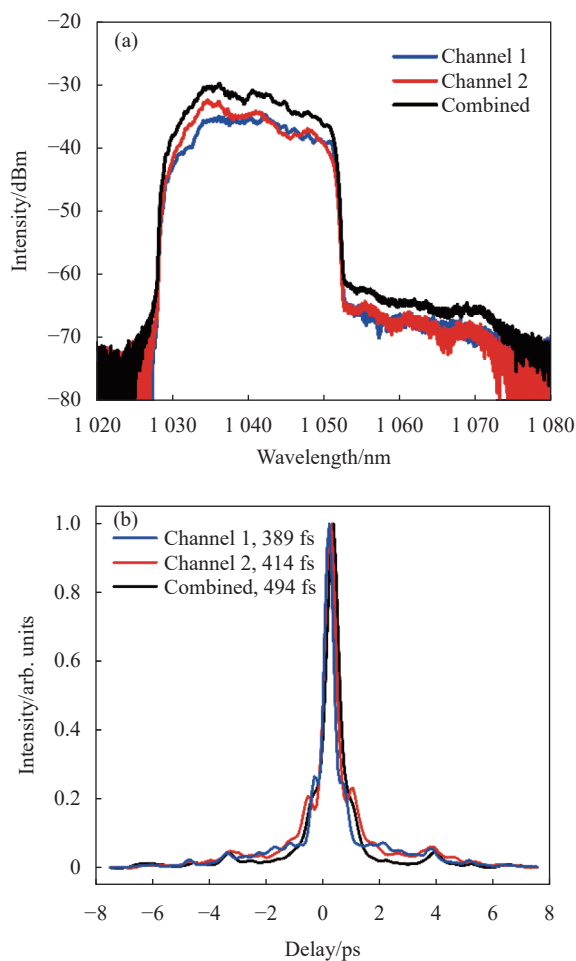


图 4 最高功率下单路及合成后的 (a) 光谱和 (b) 压缩脉冲的自相关曲线

Fig.4 (a) Output spectra and (b) autocorrelation trace of the compressed pulse of single channel and combined beam at the highest power

需要指出的是,笔者所在单位在 2018 年实现了两路超快光纤激光的共孔径相干偏振合成<sup>[19]</sup>,法国巴

- 35(2): 94-96.
- [7] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [8] Yan Dongyu, Liu Bowen, Song Huanyu, et al. Research status and development trend of high power femtosecond fiber laser amplifiers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508012. (in Chinese)
- [9] Liu Yizhou, Qiao Wenchao, Gao Kong, et al. Development of high-power ultrafast fiber laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201003. (in Chinese)
- [10] Wang Jingshang, Zhang Yao, Wang Junli, et al. Recent progress of coherent combining technology in femtosecond fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(3): 034206. (in Chinese)
- [11] Su Rongtao, Zhou Pu, Zhang Pengfei, et al. Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 103001. (in Chinese)
- [12] Zhou Pu, Su Rongtao, Ma Yanxin. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401003. (in Chinese)
- [13] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, et al. Current situation tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201001. (in Chinese)
- [14] Klenke A, Müller M, Stark H, et al. Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-9.
- [15] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [16] Stark H, Buldt J, Müller M, et al. 23 mJ high-power fiber CPA system using electro-optically controlled divided-pulse amplification [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5529-5532.
- [17] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [18] Yang K, Zhu G, Hao Q, et al. Coherent polarization beam combination by microcontroller-based phase-locking method [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(20): 2129-2132.
- [19] Yu H L, Zhang Z X, Wang X L, et al. High average power coherent femtosecond pulse combining system based on an all fiber active control method [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(7): 075101.
- [20] Müller M, Kienel M, Klenke A, et al. 1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3439-3442.
- [21] Fan X, Liu J, Liu J, et al. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 48-51.
- [22] Chang H, Chang Q, Xi J, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [23] 吴坚, 马闯星, 马鹏飞, 等. 光纤激光相干合成20 kW级高功率输出[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(9): 20210621.
- [24] Ma P, Chang H, Ma Y, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107016.
- [25] Long J, Chang H, Zhang Y, et al. Compact internal sensing phase locking system for coherent combining of fiber laser array [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107775.
- [26] Jolivet V, Bourdon P, Bennai B, et al. Beam shaping of single-mode and multimode fiber amplifier arrays for propagation through atmospheric turbulence [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 257-268.
- [27] Yu Hailong, Ma Pengfei, Wang Xiaolin, et al. Influence of temporal-spectral effects on ultrafast fiber coherent polarization beam combining system [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(10): 105301.

## Coherent polarization beam combination of two ultrafast laser channels based on fiber stretcher phase locking

Wang Tao<sup>1</sup>, Li Can<sup>1\*</sup>, Liu Yang<sup>2</sup>, Ren Bo<sup>1</sup>, Tang Zhenqiang<sup>2</sup>, Chang Hongxiang<sup>1</sup>, Xie Gehui<sup>2</sup>, Guo Kun<sup>1</sup>,  
Wu Jian<sup>1</sup>, Xu Jiangming<sup>1</sup>, Leng Jinyong<sup>1</sup>, Ma Pengfei<sup>1,3</sup>, Su Rongtao<sup>1,3</sup>, Li Wenxue<sup>2</sup>, Zhou Pu<sup>1\*</sup>

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

3. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

### Abstract:

**Objective** High-power ultrafast fiber lasers have broad applications in the frontier science and industry fields such as high-energy physics, high-order harmonic generation, advanced manufacturing and so on. Currently, the well-known fiber chirped pulse amplification (CPA) scheme has realized kW-level average power and multi-mJ single pulse energy of ultrafast laser, whilst further development is hindered by the influence of nonlinear effects and mode instability. At present, coherent beam combination (CBC) of ultrafast fiber laser is an effective way to break the power limitation of single-channel fiber, and has attracted much research interest. Essentially, the CBC system requires that each channel of amplifiers is phase locked, which is conventionally realized based on the electro-optical effect of lithium niobate, whereas with the compromise of large insertion loss and low damage threshold. In this study, we propose to utilize the fiber stretcher to control the laser phase by stretching the fiber based on piezoelectric ceramics. Compared with the lithium niobate modulator, the fiber stretcher has a larger dynamic adjustment range, lower insertion loss, higher damage threshold, as well as the additional merits of compactness and robustness.

**Methods** The ultrafast fiber laser with a repetition rate of 50 MHz is firstly broadened by a chirped fiber Bragg grating, and then reduced to a repetition rate of 2 MHz by a pulse picker. After a single-mode amplifier, the pulsed laser signal is divided into two channels. Then, the average power is scaled to 6.1 W through two parallel-configured polarization-maintaining fiber amplifiers. For one of the channels, a spatial delay line consisting of a polarizing beam splitter prism, a quarter wave plate and a mirror placed on a high precision displacement platform is inserted in front of the main amplifier to effectively compensate the optical path difference between the two channels. The amplified lasers are collimated and combined through the polarization beam combining mirror. The combined laser is sampled by a photodetector, processed by the phase-locked control system, and converted into a voltage signal, which is fed back to the fiber stretcher to realize effective phase locking (Fig.1).

**Results and Discussions** The effective coherent polarization beam combination of two ultrafast fiber lasers is realized based on the fiber stretcher and the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. The highest combined power is 10.9 W with a combining efficiency of 90.1 % (Fig.3). According to the normalized temporal intensity fluctuation before and after phase locking at the highest power, the phase noise of the system is effectively suppressed in the closed-loop state with a phase residue error of  $\lambda/31$ , and the output power shows good long-term stability. When the system is in the open-loop state, the output beam profile is unstable and changes randomly. However, after the phase control system is turned on, the beam profile tends to be stable (Fig.2). The central wavelength and 3 dB bandwidth of the combined beam at the highest power are 1 036.1 nm

and 6.5 nm, respectively. The combined beam can be compressed to 494 fs (assuming the pulse is Gaussian profile) with a compression efficiency of 73.3% (Fig.4).

**Conclusions** In this study, the coherent polarization beam combination of two ultrafast laser channels is successfully realized based on fiber stretcher and SPGD algorithm. Compared with the conventional electro-optical phase modulator, the fiber stretcher not only avoids the spectral modulation of the pulse signal, but also has smaller insertion loss, larger phase adjustment range and higher damage threshold. In the experiment, the highest combined power is 10.9 W with a combining efficiency of 90.1%, and the phase residue error is about  $\lambda/31$  in the closed-loop state. The combined beam can be compressed to 494 fs with a compression efficiency of 73.3%, and the corresponding single pulse energy is 3.99  $\mu\text{J}$ . The above experimental results verify the feasibility of the fiber stretcher to control the phase in fiber CBC system. The next step involves expanding the system to more channels and higher combined power.

**Key words:** coherent beam combination; coherent polarization beam combination; ultrafast laser; fiber laser

**Funding projects:** Director Fund of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (SKL2020 ZR02); Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (QL20220007)