



·激光合束技术·

# 基于空间结构内部锁相的光纤激光相干合成技术

龙金虎<sup>1</sup>, 粟荣涛<sup>1,2,3</sup>, 常洪祥<sup>1</sup>, 侯天悦<sup>1</sup>, 常琦<sup>1</sup>, 蒋敏<sup>1</sup>,  
张嘉怡<sup>1</sup>, 马阎星<sup>1,2,3</sup>, 马鹏飞<sup>1,2,3</sup>, 周朴<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 长沙 410073;  
3. 国防科技大学 高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

**摘 要:** 介绍了本课题组近年来在基于空间结构内部锁相的光纤激光相干合成方面的研究工作, 给出了空间结构内部锁相相干合成的基本原理, 搭建了七路低功率光纤激光阵列实验系统, 结果表明在内部相位噪声校正基础之上, 可以稳定补偿外部相位差进而实现激光阵列同相位输出, 验证了内部锁相方法的可行性。进一步介绍了空间结构内部锁相技术在目标在回路相干合成、阵列光束光场调控等方面的拓展应用, 通过实验论证了空间结构内部锁相技术能够有效提升目标在回路相干合成系统的相位控制带宽, 并在远场有效生成轨道角动量光束阵列, 其拓扑荷数可从-1到+1切换。

**关键词:** 光纤激光; 相干合成; 相位控制; 内部锁相; 光场调控

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220258

## Coherent combining of fiber laser based on internal phase locking in spatial structure

Long Jinhu<sup>1</sup>, Su Rongtao<sup>1,2,3</sup>, Chang Hongxiang<sup>1</sup>, Hou Tianyue<sup>1</sup>, Chang Qi<sup>1</sup>, Jiang Min<sup>1</sup>,  
Zhang Jiayi<sup>1</sup>, Ma Yanxing<sup>1,2,3</sup>, Ma Pengfei<sup>1,2,3</sup>, Zhou Pu<sup>1</sup>

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

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper introduces our recent research on the coherently combined fiber laser based on spatial structure internal phase locking including the principle of spatial structure internal phase locking, and the experiment of 7-channel fiber laser array carried out to experimentally verify the feasibility of this technique. The detailed results indicate that when the phase noises in the laser channels are locked, the external phase differences can be compensated together, and the laser array can be locked with a same phase wavefront. In addition, the researches on the CBC of target in the loop (TIL) technique and constructing the light fields are introduced as well. In the experiment, the control bandwidth of the CBC system of TIL could be improved effectively, and the orbital angular momentum beams could be generated in the far field, the topological charge could be changed from -1 to +1.

**Key words:** fiber laser, coherent beam combining, phase control, internal phase control, constructing light field

光纤激光器具有高光束质量、便利的热管理、紧凑的系统结构等优势<sup>[1-3]</sup>, 被广泛应用于工业加工、科学研究等领域<sup>[3-5]</sup>。当前, 单根光纤的输出功率已达 10 kW 级<sup>[3,6-11]</sup>, 但其输出功率的进一步提升受到非线性效应、模式不稳定效应等物理因素的限制<sup>[12-16]</sup>。光纤激光相干合成(CBC)可以在提升输出功率的同时保持良好的光束质量, 成为了构建高亮度激光光源的有效途径之一<sup>[17-22]</sup>。随着光纤激光相干合成技术的不断发展, 一系列成果不断涌现<sup>[23]</sup>, 合成路数从数十路<sup>[24-30]</sup>提升到百路级<sup>[31-33]</sup>, 合成功率从数 kW<sup>[34-40]</sup>提升到数 10 kW<sup>[41-43]</sup>。

\* 收稿日期: 2022-08-23; 修订日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62275272, 62075242); 湖南省自然科学基金创新研究群体项目 (2019JJ10005); 长沙市优秀青年创新人才培养计划项目 (kq2206003); 湖南省研究生科研创新项目 (QL20220013)

联系方式: 龙金虎, ljh65923@163.com。

通信作者: 粟荣涛, surongtao@126.com;

周朴, zhoupu203@163.com。

实现激光相干合成的关键技术之一是相位控制,也就是对阵列激光的相位进行实时探测以反馈控制,从而实现各路激光同相位输出。依据探测方式的不同,可以将其分为直接探测或间接探测。直接探测方法通过外差法<sup>[44]</sup>、H-C 偏振探测<sup>[45]</sup>、剪切干涉<sup>[24]</sup>、集体相位探测<sup>[30,46]</sup>等方法实时获取阵列激光之间的相位差,具有算法迭代时间较小、控制带宽高等优势。间接探测方法通过利用光电探测器等传感器,探测阵列激光的远场合成中央主瓣能量,并作为相位控制系统的评价函数,最后利用随机并行梯度下降(SPGD)算法<sup>[36,40,47-48]</sup>、抖动法<sup>[27,34,42,49]</sup>等算法优化迭代,使桶中功率(PIB)达到最大值,具有结构简单、系统拓展性高的优点。目前,基于间接探测方法已经实现了107路低功率光纤激光相干合成<sup>[31]</sup>和19路21.6 kW高功率光纤激光相干合成<sup>[43]</sup>。

在传统的相干合成系统中,需要在发射光路中设置一个分光镜,提取小部分合成光束作为信号光。相位控制系统利用该信号光来解算各路激光之间的相位差,进而对每路激光的相位进行闭环控制,实现激光阵列相干合成输出。由于该方法在激光阵列系统外部利用分光镜提取用于相位控制的光信号,我们称之为外部锁相方法。随着合成路数和功率的增加,外部锁相方法的相位探测和控制将面临两方面的挑战:其一,随着高功率条件下的单元口径增加以及合成路数的提升,阵列光束的发射口径将大幅增加<sup>[40,50]</sup>。在外部锁相方法中,不但需要用到大口径的分光镜提取一部分合成的阵列光束来探测相位,还需要利用聚焦透镜等大口径光学元件来获取阵列光束的远场。此外,取样的激光阵列将经过较长距离的空间传输以匹配光电探测器等传感器件的尺寸<sup>[51-52]</sup>。因此,相位探测系统的体积很庞大,系统紧凑性低,实际操作困难。此外,大口径强光元件的加工成本与其口径的2.76次方成正比<sup>[53]</sup>,相位控制系统的成本将急剧增大,限制应用拓展;其二,随着激光阵列路数提升,相位控制系统将面临控制带宽和控制精度下降的问题<sup>[31,54]</sup>。尤其是在高功率条件下,相位噪声相较低功率时大幅度增加<sup>[36]</sup>,相位控制系统将面临控制算法失效的困难,降低相干合成效率。

为了应对这些挑战,需要分别对相干合成系统的相位探测系统和相位控制方法进行优化。为规避大口径光学元件,提高相位探测系统紧凑性,可以在发射大口径的激光阵列之前完成相位探测<sup>[52,55]</sup>。由于这种方法在阵列激光从合成系统中发射出去之前就完成相位探测与锁定,因而被称为内部锁相方法<sup>[52,55]</sup>,具有结构紧凑、无需外部反馈光学器件和易于扩展等优点。近年来,澳大利亚国立大学<sup>[56-58]</sup>、中国科学院光电技术研究所<sup>[59-60]</sup>等单位提出了各具优势的内部锁相相位控制方法,本课题组也提出了基于空间结构的内部锁相技术方案<sup>[52,55]</sup>。

本文主要介绍了本课题组近年来在基于空间结构内部锁相的光纤激光相干合成相关方面的研究成果。具体地,从基本原理、实验研究等方面对空间结构内部锁相相干合成技术进行深入介绍。此外,结合目标在回路技术、阵列光束光场调控等方面对空间结构内部锁相相干合成技术的应用进行了拓展研究。

## 1 锁相原理及实验验证

### 1.1 锁相原理

传统的外部锁相相干合成系统原理如图1(a)所示。为主动锁定相位,需要在发射系统外部光路中设置一个大口径分光镜来提取合成光束的弱光作为信号光,并通过大口径透镜聚焦信号光形成远场,进而通过光电探测器探测远场信息反馈给相位控制系统,对每路激光的相位进行闭环控制,实现激光阵列相干合成输出。可知,相位探测系统体积庞大,光路长,实际应用拓展受限。

为实现紧凑性、分布式的相位探测,本课题组提出了基于空间结构的内部锁相技术,原理如图1(b)所示<sup>[52]</sup>。种子激光经过预放大器、激光分束器分为多路输出。每一路激光经过相位调制器、级联放大器、准直器后,排列成阵列激光。在阵列激光进入激光发射系统前由分光镜阵列分为两个部分:光强较小的部分进入相位探测系统,作为取样的阵列激光,另外大部分功率的阵列激光进入激光发射系统,由激光扩束器将其扩束形成大口径高占空比的高功率阵列激光,并发射到自由空间进行应用。

在相位控制方面,进入相位探测系统的取样阵列激光穿过空间调相器件,由激光合束器将其合束。合束后的取样阵列激光先通过透镜聚焦形成远场,并由针孔探测器探测取样的阵列激光的远场中央主瓣能量,作为性能评价函数反馈给相位控制系统,进而控制相位调制器校正阵列激光经过放大器等过程中引入的相位噪声。对比图1(a)中的外部锁相方法可知,所提出的空间结构内部锁相技术具有结构紧凑、规避大口径光学器件、应用拓展性强的优点。此外,通过分布式的相位探测,可以分散高功率条件下的热效应,便于实际应用的拓展。然而,由于高功率的发射阵列激光与取样的阵列激光光路不同,发射的阵列激光在进入激光发射系统后将附加额外相位差。因此在实际应用中,需要提前进行外部相位差测量与预补偿。具体地,通过控制空间调相器件使得取样的每一路激光产

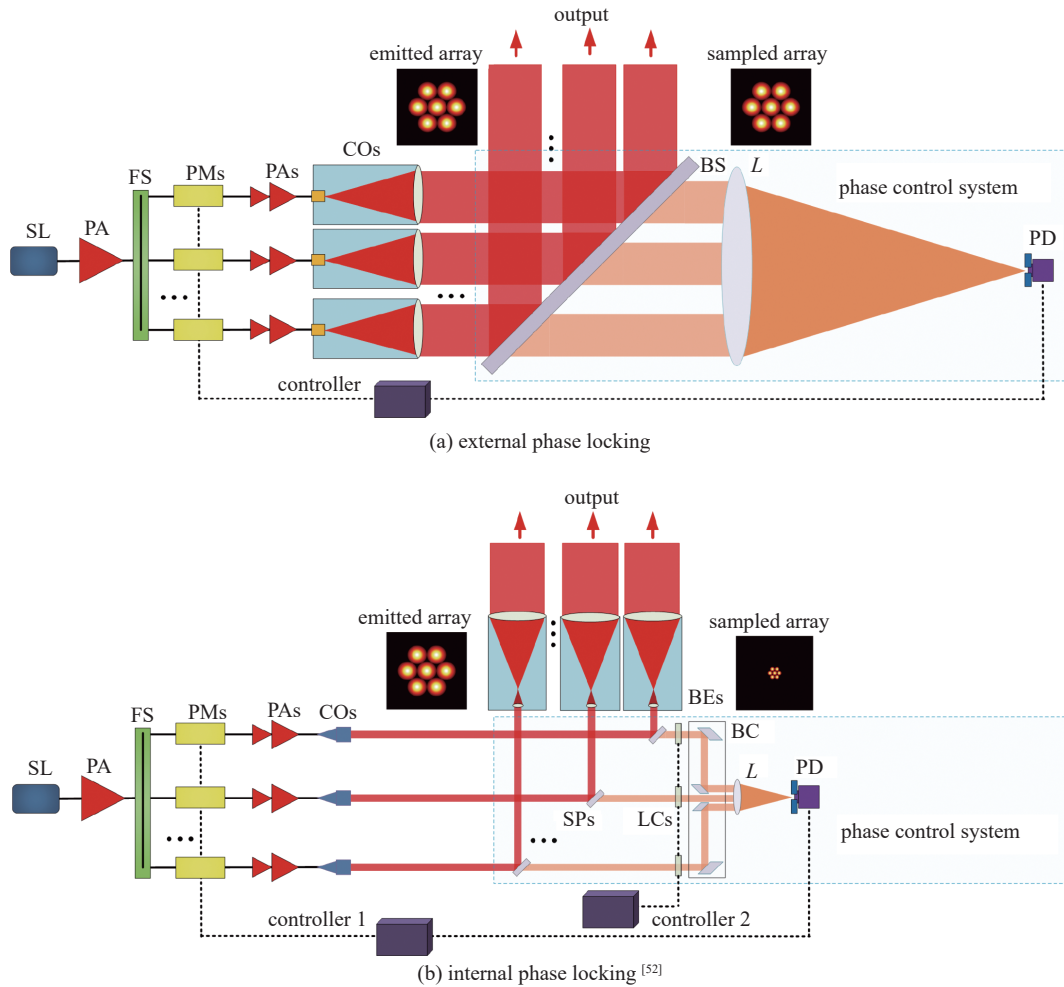


Fig. 1 System configuration of fiber laser coherent combining based on internal phase locking<sup>[52]</sup>

图 1 光纤激光相干合成系统示意图<sup>[52]</sup>

活塞相位移,此活塞相位移大小与对应的发射激光在进入激光发射系统后引入的相位差共轭。最后在相位调制器的下一步校正时,发射的阵列激光将具有与引入的相位差共轭的相位波前,进而在激光发射时实现同相位输出<sup>[52]</sup>。

## 1.2 实验验证及结果

为验证空间结构内部锁相技术的可行性,本课题组搭建了低功率实验平台,如图 2 所示<sup>[52]</sup>。输出功率为 50 mW 的 1064 nm 光纤激光器通过一个预放大器把激光功率放大到 500 mW,后由激光分束器分成 7 路。随后每一路激光连接 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器,并由激光准直器准直输出。最后由反射率为 90% 的分光镜阵列将激光分为两个部分:弱光部分进入相位探测系统,称之为采样阵列;大部分激光进入激光发射系统,并由激光扩束器形成正六边形的高占空比激光阵列发射到自由空间,称之为发射阵列。

在相位控制方面,取样阵列首先经过液晶阵列,并由一个激光合束器将其合束,形成高占空比的采样阵列输出。随后使用焦距为 1 m 的透镜对合束后的激光阵列聚焦形成远场,最后由一个反射率为 50% 的分光镜将其分成两部分:一部分由光斑分析仪探测,以观察取样阵列的远场相干合成强度分布;另一部分激光耦合进一个前置有直径为 50 μm 的针孔的光电探测器,进而探测远场合成光斑的中央主瓣能量,并输送到基于现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 的相位控制器 1,控制相位调制器校正阵列激光经过放大器等过程中引起的相位噪声。在实验中,相位控制器 1 运行 SPGD 算法,迭代速率约为 2 MHz。实验按照如下过程进行:首先,两个控制器都关闭;然后,相位控制器 1 打开,相位控制器 2 仍关闭;最后,同时打开两个相位控制器。

图 3 为 CCD1 探测的取样阵列的远场合成强度分布图。当两个相位控制器均处于关闭状态时,由于系统相位噪声的存在,各路激光相位随机起伏,干涉条纹不断变化,长曝光下的条纹对比度接近于零,如图 3(a) 所示。相比之下,当相位控制器 1 打开,运行 SPGD 算法对相位噪声进行校正。此时取样阵列激光的相位差被锁定为零,如图 3(b)

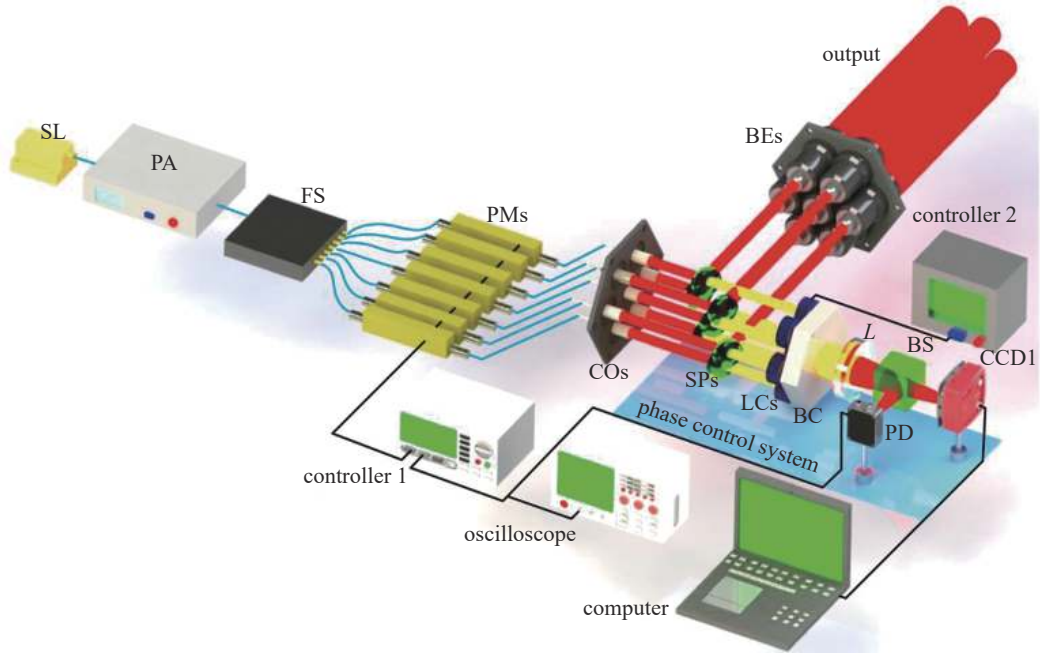


Fig. 2 Experimental setup of coherent fiber laser array based on internal phase control<sup>[52]</sup>

图 2 光纤激光内部锁相相干合成实验系统<sup>[52]</sup>

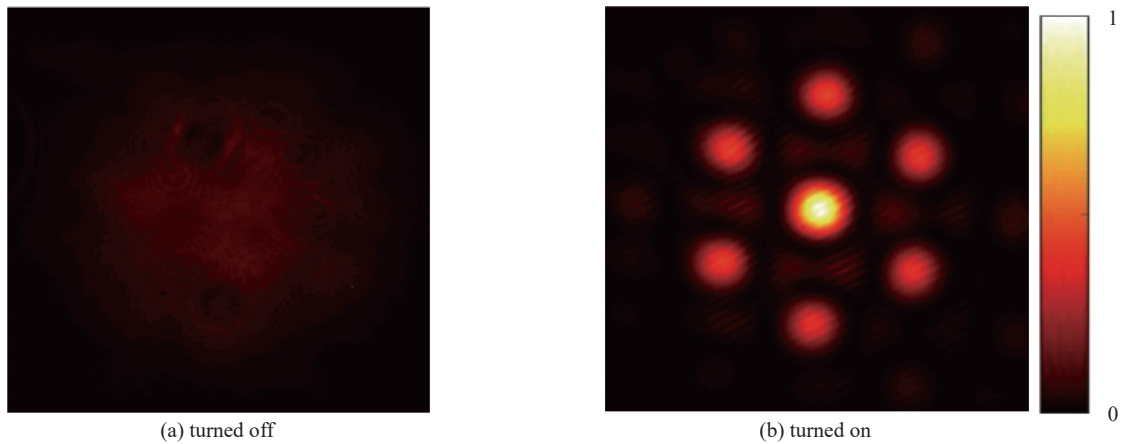


Fig. 3 Irradiance distribution of the sampled array detected by CCD1 before and after turning on Controller 1<sup>[52]</sup>

图 3 CCD1 采集到的采样阵列的强度分布当相位控制器 1<sup>[52]</sup>

所示,远场相干合成光斑具有明显的中央主瓣,条纹对比度为 98.4%,这意味着激光放大器等引起的内部相位噪声得到了有效校正。

为观察发射阵列的相干合成效果,利用一个大口径透镜将发射阵列聚焦形成等效远场,并由 CCD2 探测,如图 4(a)所示。图 4(b)和图 4(c)为发射阵列的远场相干合成强度分布。可知当两个相位控制器都关闭时,由于内部相位噪声和外部相位差影响,发射阵列的相位随机变化,远场光斑的对比度较低,亮度较弱,如图 4(b)所示。相比之下,当相位控制器 1 打开时,内部相位噪声被有效补偿。此时,由于发射阵列激光仅存在外部的相位差,此时的激光能量虽未集中在中央主瓣,但可以观察到稳定的干涉条纹,如图 4(c)所示。

由于内部相位噪声被锁定,由激光扩束器引入的相位差一般是静态的,可以通过干涉测量来探测和补偿<sup>[35-36]</sup>。分别将发射阵列的第  $i$  束激光与第一束激光(正六边形中心)进行干涉获取相位信息,其中  $i$  为 2, 3, ..., 7, 并将控制信号设置在相位控制器 2 上,进而施加到液晶上进行补偿。补偿后的发射阵列远场相干合成强度分布如图 5 所示,可见激光能量集中在中央主瓣上,可见度为 96.3%,如图 5(a)所示。为验证相位探测和控制系统具备长时间稳定运行的能力,课题组在进行相位校正和补偿后关闭 5 d 再打开系统。此时,获得的发射阵列远场相干合成强度分布如图 5(b)所示,可见发射阵列的相位依然被稳定锁定,激光能量集中在中央主瓣上,可见度为 91.7%,初步验证了系统的长期工作能力。然而,远场光斑的可见度相较初次校正时下降了 4.6%。在实验中,通过柔性铰链调节

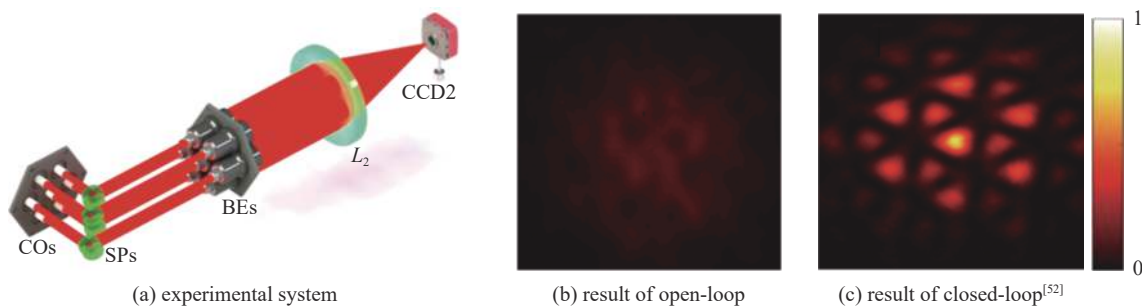
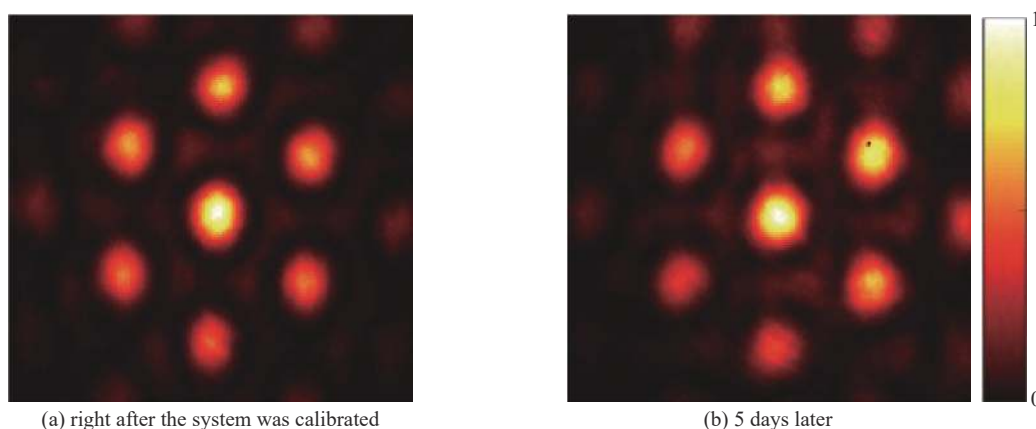
Fig. 4 Experimental system, result of open-loop and result of closed-loop<sup>[52]</sup>图4 实验系统及开环实验结果和闭环实验结果<sup>[52]</sup>

Fig. 5 Irradiance distribution of the emitted array

图5 发射阵列的强度分布

反射镜倾斜位置,使得阵列激光在远场重合。系统在较长时间的稳定后,由于环境振动和重力的影响,固定反射镜所用等机械器件会发生应力释放和形变,机械器件通常会产生微小位移,造成阵列激光存在倾斜和活塞相差,降低相位控制效果。在未来工作中,本课题组将进一步在光机系统设计、装配等方面进行优化,以减轻环境振动等对相位探测和控制系统的影

## 2 应用拓展研究

随着相干合成技术的不断发展,相干合成光源走向实际应用成为了现实。基于空间结构的内部锁相相干合成系统具备分布式的相位探测性能,具有结构紧凑,规避大口径光学器件,应用拓展性强的优点,在许多领域中拥有良好的应用前景。针对空间结构内部锁相相干合成技术的应用拓展,本课题组近年来开展了目标在回路相干合成和阵列光束光场调控等方面的研究,下面对其进行简要介绍。

### 2.1 目标在回路相干合成

通过相干合成,可以保持阵列激光在发射端良好的相干性。然而,经过长距离的大气传输,大气湍流的影响将造成阵列激光的波前畸变,这将导致目标靶面功率密度下降<sup>[61]</sup>。目标在回路技术<sup>[61-70]</sup>(TIL)通过探测目标靶面散射回光进行相位控制,可以有效补偿大气湍流引入的波前畸变。目前,科研人员已经实现了数 km 级的目标在回路相干合成实验研究<sup>[47, 67, 69-70]</sup>,验证了目标在回路技术校正大气湍流,实现激光能量有效传输的可行性。目前的目标在回路相干合成技术普遍采用远场目标的散射回光作为反馈信号,用于同时校正激光发射系统的相位噪声和大气湍流引入的波前畸变。由于反馈信号需要在激光发射处和目标表面来回传输,当传输距离增大后,传输的时间延迟将造成系统相位控制带宽下降<sup>[61, 67]</sup>,难以校正光纤放大器中的相位噪声。

为此,本课题组提出基于内部锁相技术来实现相位噪声分级控制,提升目标在回路相干合成系统的相位控制带宽<sup>[61-62]</sup>。基本原理如图 6 所示:种子激光经过预放大器进行功率预放大,后经激光分束器将激光功率分为多路输出。而后每一路激光耦合相位调制器、光纤延迟器、偏振控制器、多级光纤激光放大器和自适应光纤准直器(AFOC),由 AFOC 将激光排列成阵列激光发射,并由分光镜在发射处将阵列激光分为两个部分:光强较小的阵列激光进入内部相位探测系统,用以校正阵列激光经过放大器等过程中引起的相位噪声。另一大部分阵列激光经过激光扩束

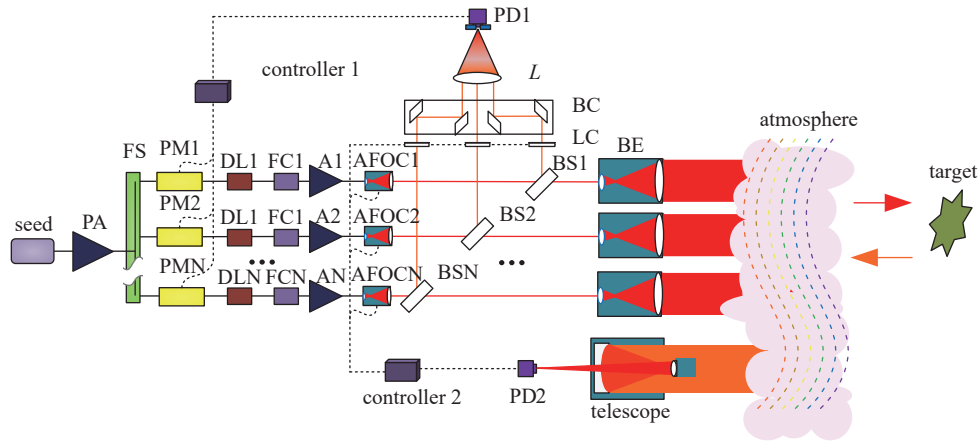
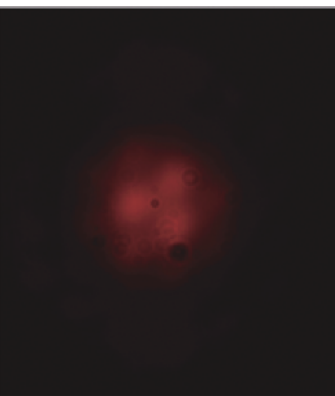
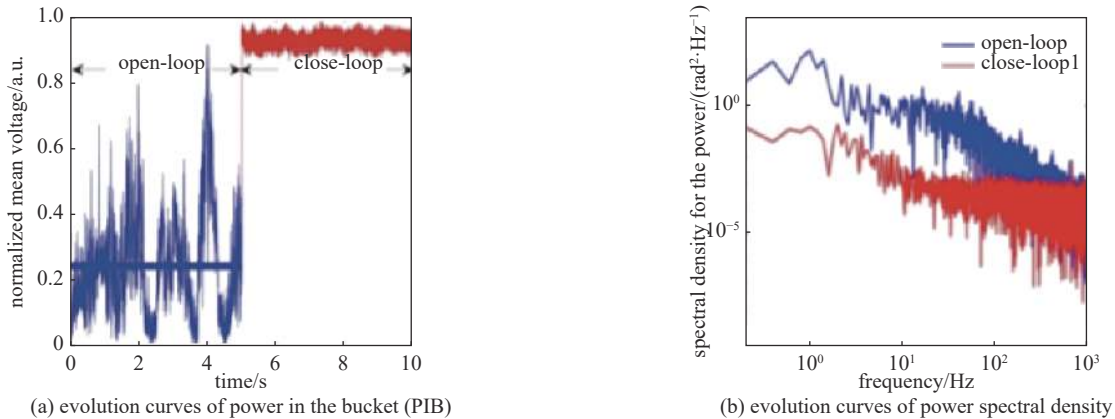


Fig. 6 Schematic drawing of TIL-CBC based on internal phase control

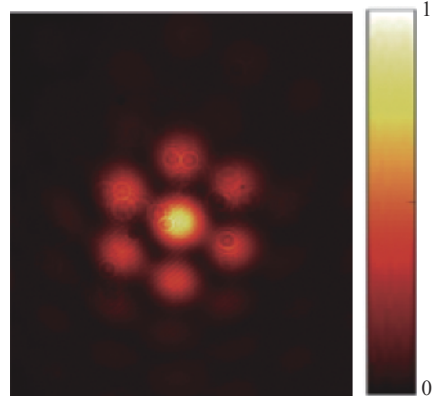
图 6 基于空间结构内部锁相的目标在回路相干合成示意图

器、大气环境传输到目标靶面,通过望远镜、光电探测器探测目标表面的散射回光信号,作为性能评价函数反馈给相位控制系统 2:一部分控制信号通过控制 AFOC,校正大气湍流引入的倾斜相差;另一部分控制信号反馈给空间调相器件,用来控制大气湍流引入的活塞相位误差。为此,基于内部锁相技术,能够近场取样、远场探测,实现阵列激光发射系统的高频噪声和大气湍流的分级控制,提升激光发射系统的相位控制带宽。

本课题组搭建了 3 路光纤激光实验平台并进行 40 m 的大气传输实验验证<sup>[61]</sup>。在相位控制过程中,首先,关闭两个相位控制器,系统工作在开环状态。然后,打开控制器 1,保持控制器 2 关闭(第一级闭环);最后,在打开控制器 1 的基础之上,再打开控制器 2(第二级闭环)。实验过程中 PD1 探测的时域信号如图 7(a)所示。在开环过程中,由于热噪声和环境噪声的影响,特别是光纤放大器引起的相位噪声,PD1 探测到的 PIB 值快速、随机的变化,其归一化均值为 0.26。相比之下,当打开控制器 1 时,发射系统的热噪声和环境噪声引入的相位误差被 LiNbO<sub>3</sub> 相



(c) intensity distribution of open-loop



(d) intensity distribution of close-loop

Fig. 7 Experimental results of coherent beam combining (CBC) in the near field<sup>[61]</sup>

图 7 近场相干合成的实验结果<sup>[61]</sup>

位调制器校正,此时的 PIB 值被稳定锁定为最大值,归一化均值为 0.94,是开环的 3.6 倍。图 7(b)给出了开环和闭环时功率谱密度,可知,特征频率在 1 kHz 以下的相位噪声均得到了有效校正,相位残差约为  $\lambda/30$ ,初步验证了内部锁相技术在系统的噪声抑制方面,具有很高的控制带宽。图 7(c)和(d)显示了 CCD1 探测到的相干合成强度分布,阵列激光在发射端保持良好的相干性。

由于实现了发射系统的内部锁相,光纤放大器等引入的高频相位误差已经被 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器校正,此时目标处的光斑较为稳定,具有较高的条纹对比度,如图 8(b)所示。相比之下,在系统开环状态下,相干合成光斑呈现极低的条纹对比度,类似于高斯形状,如图 8(a)所示。然而,由于大气湍流和不同的光路引起的波前畸变,远场相干合成强度分布的能量并不集中在主瓣上。为此,打开控制器 2,对大气环境引入的波前畸变进行补偿,此时目标处的干涉条纹对比度得到进一步提高,中央主瓣能量突出,如图 8(c)所示。然而,由于在实验中没有使用 AFOC,大气环境引入的倾斜相差无法校正,远场相干合成的光斑形态存在较为严重的旁瓣,且其分布不对称。

以上实验初步验证了空间结构内部锁相技术对激光发射系统中高频相位噪声和大气湍流引入的波前畸变的分级控制的可行性,可以有效提升目标在回路相干合成系统的相位控制带宽,以适应长距离激光传输的应用需求。未来将结合本课题组自研的 AFOC<sup>[23,69]</sup> 进行长距离、多路数的目标在回路相干合成实验研究。

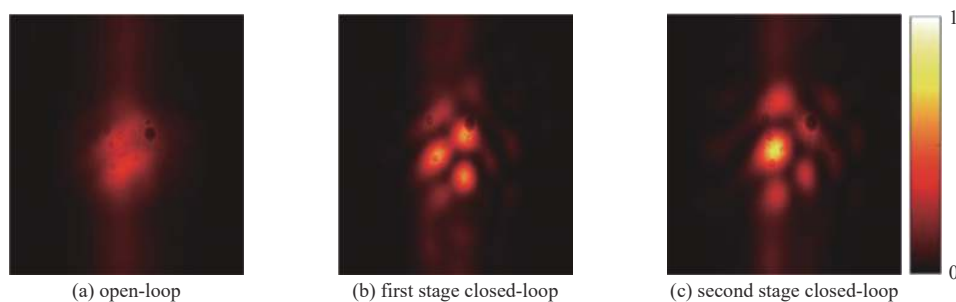


Fig. 8 Intensity distributions of combined beams on the target<sup>[61]</sup>

图 8 目标处合成光束的强度分布<sup>[61]</sup>

## 2.2 阵列光束光场调控

具有螺旋相位结构的轨道角动量(OAM)光束<sup>[71-72]</sup> 由于具有独特的相位和空间结构,在自由空间光通信、光学成像、光镊等领域得到了广泛的研究和应用<sup>[73-75]</sup>。其中,作为 OAM 光束功率拓展和模式切换速度提升的有效方法,阵列光束光场调控在近年来引起了广泛关注<sup>[76-85]</sup>。由于传统的阵列光束光场调控方法需要在相干合成系统外部进行相位探测和控制,以构建阵列光束在源平面特定的相位分布,相位控制存在困难。相较于传统方法,内部锁相相干合成系统能够在锁定内部相位噪声基础上,利用空间调相器件灵活改变发射激光阵列的相位分布,用于阵列光束光场调控<sup>[76-85]</sup>,生成具有特殊光场性质的结构光束,如涡旋光束<sup>[80-82]</sup>、光学涡旋晶格<sup>[85]</sup>等,拓展相干合成技术的应用范围。

本课题组搭建了相应的实验系统<sup>[85]</sup>,其原理与图 2 所示一致,然而与 7 路光纤激光内部锁相相干合成实验不同的是,这里采用正六边形顶点上的 6 路呈环形排布的激光阵列。在实验中,PD 探测的取样阵列 PIB 如图 9 所示。当系统处于开环状态时,由于热噪声和环境因素,针孔内的激光能量随机变化,归一化均值约为 0.11。相比之下,在相位控制过程中,针孔内的归一化能量被稳定锁住,归一化均值为 0.92,为开环过程的 8.4 倍。插图显示了在开环和闭环过程中,由 CCD1 探测的取样阵列激光的远场相干合成强度分布。

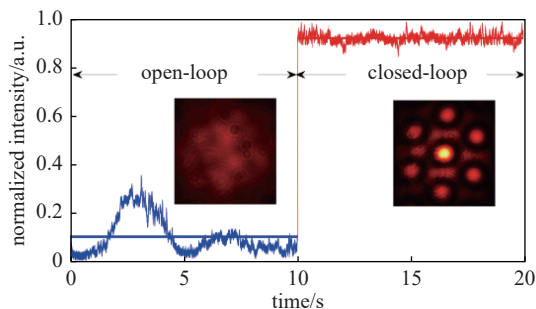


Fig. 9 Experimental results of sampled laser array<sup>[85]</sup>

图 9 取样阵列实验结果<sup>[85]</sup>

当系统处于闭环状态时,内部相位噪声被有效校正。此时给空间调相器件施加控制电压来实现源平面上阵列激光的活塞相移,进而改变发射阵列的相位分布,此时发射阵列的相位分布和所施加的相位移是共轭的。为了生成拓扑荷数为+1和-1的阵列 OAM 光束,其中拓扑荷数为任意整数,其大小代表环绕相位奇点一周,相位改变  $2\pi$  的整数倍,控制发射阵列上的相位分布如图 10(a)和 10(d)所示,此时仿真计算出的强度分布如图 10(b)和图 10(e)

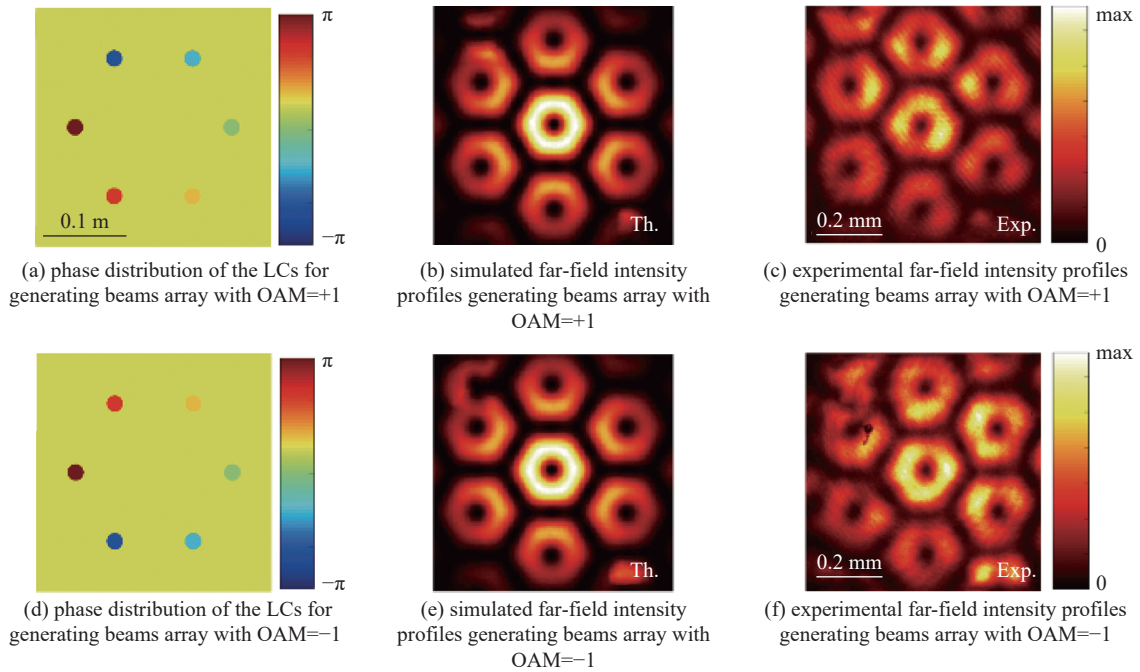
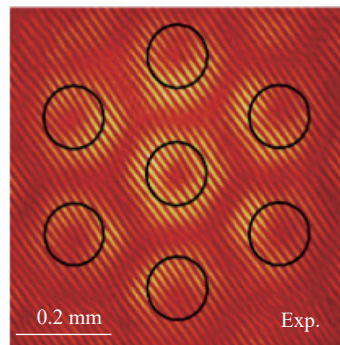
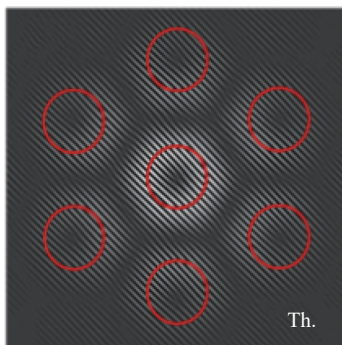
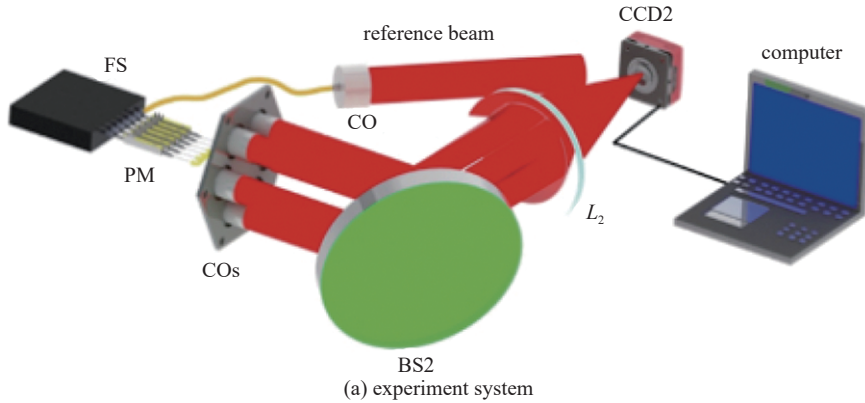


Fig. 10 Theoretical and experimental results of the combined OAM beams<sup>[85]</sup>

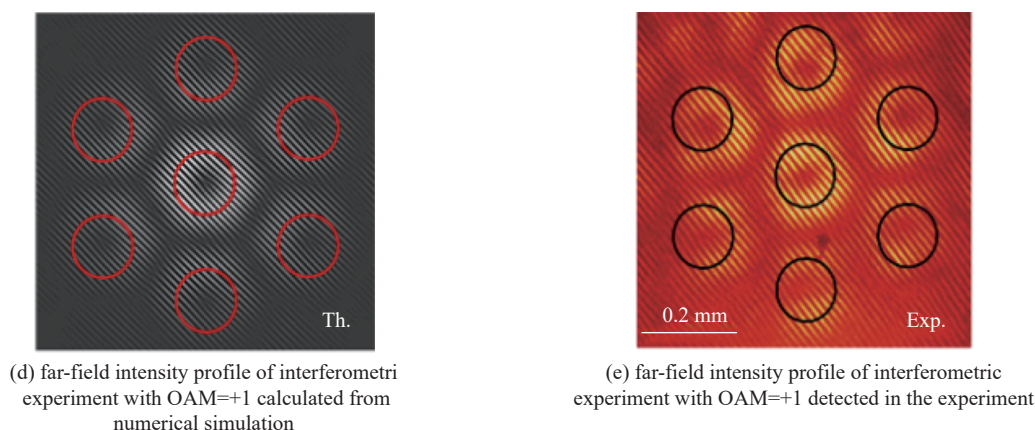
图 10 合成 OAM 光束的理论和实验结果<sup>[85]</sup>

所示;实验中 CCD2 探测到的发射阵列远场相干合成强度分布如图 10(c)和图 10(f)所示。可知实验结果和理论仿真结果具有很高的保真度,实验中生成的阵列 OAM 光束包含 7 个子 OAM 光束。在拓扑荷数为 1 和-1 条件下,产生的 OAM 光束具有相似的强度分布。

为验证产生的阵列 OAM 光束具有螺旋相位波前和相位奇点,本课题组进行了相应的干涉实验,如图 11(a)所示。在实验中,使用分束器输出的第 7 路光束和所产生的阵列 OAM 光束进行干涉,同时用 CCD2 对其干涉条纹进行观察。当拓扑荷数为-1 时,实验探测的干涉条纹如图 11(c)所示,可以观察到 7 个“Y”字形干涉条纹,相位奇





Fig. 11 Results of interferometric experiment<sup>[84]</sup>图 11 干涉实验系统及结果<sup>[84]</sup>

点位于“Y”型条纹的分叉位置<sup>[80,86-87]</sup>,可推算出生成的每个 OAM 子光束的拓扑荷数均为-1。图 11(e)显示了当拓扑荷数+1 时实验探测的干涉条纹,可观察到 7 个倒“Y”字叉形干涉条纹,由此可以推断出每个 OAM 子光束的拓扑荷数均为+1。因此,干涉实验结果表明,空间结构内部锁相相干合成技术能够有效构建携带多个 OAM 的阵列 OAM 光束。

### 3 结 论

基于空间结构的内部锁相相干合成技术具有结构紧凑、扩展性强等优点,在合成路数拓展、合成功率提升等方面具有较大的潜力。论文全面介绍了本课题组近年来在该方面的研究结果,给出了基于空间结构的内部锁相相干合成技术的基本原理,搭建了 7 路低功率实验系统并验证了该方法的可行性。进一步介绍了空间结构内部锁相技术在目标在回路相干合成、阵列光束光场调控等方面的应用,并实验论证了空间结构内部锁相技术提升目标在回路相干合成系统相位控制带宽和构建 OAM 光束的优势。下一步,针对高功率条件下光学元件的热效应,本课题组将深入开展光机优化设计,搭建高功率实验平台,论证空间结构内部锁相相干合成系统的功率提升能力。此外,针对系统的路数拓展需求,本课题组还将综合考虑系统紧凑性、相位控制带宽和精度等因素,借助级联相位控制<sup>[54]</sup>、机器学习<sup>[88-91]</sup>等技术来进一步提升相位控制系统的综合性能。随着相关技术的进一步发展,空间结构内部锁相相干合成可能成为一条具有优势的技术路线。

**致 谢** 感谢激光所喻湘荣、杨家忠、蒋昭舜、陈景春、杨旭等人在实验系统搭建、光学器件加工等方面给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [3] 来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 121001. (Lai Wenchang, Ma Pengfei, Xiao Hu, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 121001)
- [4] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e54.
- [5] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811W output power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [6] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10kW[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference. 2009.
- [7] Fang Qiang, Li Jinhui, Shi Wei, et al. 5 kW near-diffraction-limited and 8 kW high-brightness monolithic continuous wave fiber lasers directly pumped by laser diodes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9: 1506107.
- [8] Lin Honghuan, Xu Lixin, Li Chengyu, et al. 10.6 kW high-brightness cascade-end-pumped monolithic fiber lasers directly pumped by laser diodes in step-index large mode area double cladding fiber[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102479.
- [9] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[C]//Proceedings of SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. 2020: 1126022.
- [10] Du Shanshan, Qi Tiancheng, Li Dan, et al. 10 kW fiber amplifier seeded by random fiber laser with suppression of spectral broadening and SRS[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(14): 721-724.

- [11] Wu Hanshuo, Li Ruixian, Xiao Hu, et al. First demonstration of a bidirectional tandem-pumped high-brightness 8 kW level confined-doped fiber amplifier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(16): 5673-5681.
- [12] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [13] Liu Wei, Ma Pengfei, Lv Haibin, et al. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26715-26721.
- [14] Stihler C, Jauregui C, Kholif S E, et al. Intensity noise as a driver for transverse mode instability in fiber amplifiers[J]. *PhotonIX*, 2020, 1(1): 8.
- [15] Huang Zhimeng, Shu Qiang, Tao Rumao, et al. >5kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [16] Ren Shuai, Lai Wenchang, Wang Guangjian, et al. Experimental study on the impact of signal bandwidth on the transverse mode instability threshold of fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7845-7853.
- [17] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
- [18] Xue Yuhao, He Bin, Zhou Jun, et al. High power passive phase locking of four Yb-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28: 054212.
- [19] Brignon A. Coherent laser beam combining[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
- [20] 周军, 何兵, 薛宇豪, 等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31: 0900129. (Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao, et al. Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31: 0900129)
- [21] Liu Zejin, Jin Xiaoxi, Su Rongtao, et al. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2019, 62: 41301.
- [22] Niu Xiaxia, Liu Meizhong, Zhang Haibo, et al. Coherent beam combining of a nine-fiber laser array using an all-optical ring cavity feedback loop based on diffractive optical element[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59: 116108.
- [23] 周朴, 栗荣涛, 马阎星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011-2020[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0401003. (Zhou Pu, Su Rongtao, Ma Yanxing, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0401003)
- [24] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [25] 栗荣涛, 周朴, 王小林, 等. 32路光纤激光相干阵列的相位锁定[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 110101. (Su Rongtao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. Phase locking of a coherent array of 32 fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 110101)
- [26] Ahn H K, Kong H J. Cascaded multi-dithering theory for coherent beam combining of multiplexed beam elements[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12407-12413.
- [27] Huang Zhimeng, Tang Xuan, Luo Yongquan, et al. Active phase locking of thirty fiber channels using multilevel phase dithering method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 033109.
- [28] Kabeya D, Kermène V, Fabert M, et al. Efficient phase-locking of 37 fiber amplifiers by phase-intensity mapping in an optimization loop[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13816-13821.
- [29] Chang Hongxiang, Xi Jiachao, Su Rongtao, et al. Efficient phase-locking of 60 fiber lasers by stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18: 101403.
- [30] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [31] Chang Hongxiang, Chang Qi, Xi Jiachao, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [32] Shpakovych M, Maulion G, Kermene V, et al. Experimental phase control of a 100 laser beam array with quasi-reinforcement learning of a neural network in an error reduction loop[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12307-12318.
- [33] 常琦, 侯天悦, 邓宇, 等. 基于二维光场计算的400束规模激光相干合成[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51: 20220276. (Chang Qi, Hou Tianyue, Deng Yu, et al. Coherent combined of 400 scale lasers based on two-dimensional light field calculation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51: 20220276)
- [34] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jingyong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 951-953.
- [35] Flores A, Shay T M, Lu C A, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime[C]//CLEO: 2011—Laser Applications to Photonic Applications. 2011.
- [36] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [37] McNaught S J, Thielen P A, Adams L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20: 0901008.
- [38] Flores A, Dajani I, Holten R H, et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55: 096101.
- [39] 刘泽金, 周朴, 马鹏飞, 等. 4路高功率窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成实现5kW级高亮度激光输出[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0415004. (Liu Zejin, Zhou Pu, Ma Pengfei, et al. 4 channels of high-power narrow linewidth linear polarization fiber amplifiers coherent polarization combining to achieve 5kW high-brightness laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0415004)

- [40] Ma Pengfei, Chang Hongxing, Ma Yanxing, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107016.
- [41] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[C]//Proceedings of SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. 2020: 1126021.
- [42] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [43] 吴坚, 马阎星, 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: 20210621. (Wu Jian, Ma Yanxing, Ma Pengfei, et al. Coherently combined fiber laser with 20 kW high power output[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50: 20210621)
- [44] Goodno G D, Asman C P, Anderegg J, et al. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 460-472.
- [45] Seise E, Klenke A, Limpert J, et al. Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses[J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27827-27835.
- [46] Antier M, Bourderionnet J, Larat C, et al. kHz closed loop interferometric technique for coherent fiber beam combining[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20: 090150.
- [47] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 840-843.
- [48] Geng Chao, Luo Wen, Tan Yi, et al. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25045-25055.
- [49] Flores A, Ehrehreich T, Holten R, et al. Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[C]//Proceedings of SPIE 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. 2016: 97281Y.
- [50] Beresnev L A, Motes R A, Townes K J, et al. Design of a noncooled fiber collimator for compact, high-efficiency fiber laser arrays[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): B169-B178.
- [51] Boju A, Maulion G, Saucourt J, et al. Small footprint phase locking system for a large tiled aperture laser array[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11445-11452.
- [52] Long Jinhu, Chang Hongxiang, Zhang Yuqiu, et al. Compact internal sensing phase locking system for coherent combining of fiber laser array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107775.
- [53] 周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. (Zhou Pu. Study on the coherent beam combining of fiber laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010)
- [54] Su Rongtao, Zhang Zhixing, Zhou Pu, et al. Coherent beam combining of a fiber lasers array based on cascaded phase control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2585-2588.
- [55] 粟荣涛, 龙金虎, 马阎星, 等. 激光相干阵列和控制方法: 202110650427.6[P]. 2021-06-10. (Su Rongtao, Long Jinhu, Ma Yanxing, et al. The coherently beams laser array and its control method: 202110650427.6[P]. 2021-06-10)
- [56] Bowman D J, King M J, Sutton A J, et al. Internally sensed optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1137-1139.
- [57] Roberts L E, Ward R L, Sutton A J, et al. Coherent beam combining using a 2D internally sensed optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): 4881-4885.
- [58] Roberts L E, Ward R L, Smith C, et al. Coherent beam combining using an internally sensed optical phased array of frequency-offset phase locked lasers[J]. *Photonics*, 2020, 7: 118.
- [59] Yang Yan, Geng Chao, Li Feng, et al. Multi-aperture all-fiber active coherent beam combining for free-space optical communication receivers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27519-27532.
- [60] 李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于光纤耦合器的全光纤链路锁相控制[J]. *光电工程*, 2017, 44(6): 602-609. (Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(6): 602-609)
- [61] Long Jinhu, Jin Kaikai, Hou Tianyue, et al. Wavefront aberration mitigation with adaptive distributed aperture fiber array lasers[C]//Proceedings of SPIE 11890, Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XII. 2021: 1189008.
- [62] 粟荣涛, 龙金虎, 马阎星, 等. 一种活塞相位控制系统及方法: 110729628B[P]. 2021-05-25. (Su Rongtao, Long Jinhu, Ma Yanxing, et al. The system and method of piston phase control: 110729628B[P]. 2021-05-25.)
- [63] Primmerman C A, Price T R, Humphreys R A, et al. Atmospheric-compensation experiments in strong-scintillation conditions[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(12): 2081-2088.
- [64] Lukin V P. Limitations of adaptive control efficiency due to singular points in the wavefront of a laser beam[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): C176-C183.
- [65] 耿超, 李新阳, 张小军, 等. 基于目标在回路的三路光纤传输激光相干合成实验[J]. *物理学报, Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 034204. (Geng Chao, Li Xinyang, Zhang Xiaojun, et al. Experimental investigation on coherent beam combination of a three-element fiber array based on target-in-the-loop technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 034204)
- [66] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4455-4457.
- [67] Geng Chao, Li Feng, Zuo Jing, et al. Fiber laser transceiving and wavefront aberration mitigation with adaptive distributed aperture array for free-space optical communications[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1906-1909.
- [68] Vorontsov M A, Weyrauch T. Laser beam engineering and atmospheric turbulence effects mitigation with coherent fiber array systems[C]//Propagation

Through and Characterization of Atmospheric and Oceanic Phenomena. 2016.

- [69] 支冬, 马阎星, 马鹏飞, 等. 公里级湍流大气环境下光纤激光高效相干合成[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48: 1005007. (Zhi Dong, Ma Yanxing, Ma Pengfei, et al. Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48: 1005007)
- [70] Zuo Jing, Zou Fan, Zhou Xin, et al. Coherent combining of a large-scale fiber laser array over 2.1 km in turbulence based on a beam conformal projection system[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 365-368.
- [71] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [72] Dennis M R, O'Holleran K, Padgett M J. Singular optics: optical vortices and polarization singularities[J]. *Progress in Optics*, 2009, 53: 293-363.
- [73] Shen Yijie, Wang Xiejiao, Xie Zhenwei, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 90.
- [74] Wang Jian, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [75] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [76] Lachinova S L, Vorontsov M A. Exotic laser beam engineering with coherent fiber-array systems[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15: 105501.
- [77] Chu Xiuxiang, Sun Quan, Wang Jing, et al. Generating a Bessel-Gaussian beam for the application in optical engineering[J]. *Scientific Reports*, 2016, 5: 18665.
- [78] Xie Guodong, Liu Cong, Li Long, et al. Spatial light structuring using a combination of multiple orthogonal orbital angular momentum beams with complex coefficients[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(5): 991-994.
- [79] Aksenov V P, Dudorov V V, Filimonov G A, et al. Vortex beams with zero orbital angular momentum and non-zero topological charge[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 104: 159-163.
- [80] Zhi Dong, Hou Tianyue, Ma Pengfei, et al. Comprehensive investigation on producing high-power orbital angular momentum beams by coherent combining technology[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e33.
- [81] Yu Tao, Xia Hui, Xie Wenke, et al. Orbital angular momentum mode detection of the combined vortex beam generated by coherent combining technology[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35795-35806.
- [82] Hou Tianyue, Chang Qi, Yu Tao, et al. Switching the orbital angular momentum state of light with mode sorting assisted coherent laser array system[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13428-13440.
- [83] Veinhard M, Bellanger S, Daniault L, et al. Orbital angular momentum beams generation from 61 channels coherent beam combining femtosecond digital laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 25-28.
- [84] Adamov E V, Aksenov V P, Dudorov V V, et al. Controlling the spatial structure of vector beams synthesized by a fiber laser array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 154: 108351.
- [85] Long Jinhu, Hou Tianyue, Chang Qi, et al. Generation of optical vortex lattices by a coherent beam combining system[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3665-3668.
- [86] Basistiy I V, Bazhenov V Y, Soskin M S, et al. Optics of light beams with screw dislocations[J]. *Optics Communications*, 1993, 103(5/6): 422-428.
- [87] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [88] Hou Tianyue, An Yi, Chang Qi, et al. Deep-learning-based phase control method for tiled aperture coherent beam combining systems[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e59.
- [89] Liu Renqi, Peng Chun, Liang Xiaoyan, et al. Coherent beam combination far-field measuring method based on amplitude modulation and deep learning[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18: 041402.
- [90] Wang Dan, Du Qiang, Zhou Tong, et al. Stabilization of the 81-channel coherent beam combination using machine learning[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5694-5709.
- [91] Mirigaldi A, Carbone M, Perrone G. Non-uniform adaptive angular spectrum method and its application to neural network assisted coherent beam combining[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13269-13287.