

光学学报

主动相位控制光纤激光相干合成技术研究

周朴^{1*}, 粟荣涛^{1,2,3*}, 马阎星^{1,2,3}, 吴坚¹, 马鹏飞^{1,2,3}, 李灿¹, 王小林^{1,2,3}, 冷进勇^{1,2,3}, 张雨秋¹, 任帅^{1,4}, 常洪祥¹,
龙金虎¹, 王涛¹, 蒋敏^{1,5}, 李俊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国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南长沙 410073;

⁴国防科技大学信息通信学院, 湖北武汉 430035;

⁵国防科技大学试验训练基地, 陕西西安 710106

摘要 主动相位控制光纤激光相干合成是突破单束光纤激光功率极限, 实现更高功率输出, 同时保持高光束质量的有效技术途径。本文结合国内外研究进展, 介绍近 20 年来课题组在相关领域取得的代表性成果, 并对未来发展方向进行分析研判。

关键词 光纤激光; 相干合成; 主动相位控制

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231395

1 引言

光纤激光以细长的光纤波导作为增益介质和能量传输介质, 具有热管理方便、光束质量优良、结构紧凑、性能稳定、可柔性操作等优势, 在制造、能源、医疗、科研等领域得到了广泛应用。光纤激光器并不是一种新型激光器, 早在 20 世纪 60 年代就已出现^[1-2], 在很长一段时间内, 受限于光纤工艺和泵浦能力等, 输出功率一直不高。20 世纪 80 年代末, 双包层光纤与高速发展的半导体泵浦源结合, 使得光纤激光的输出功率得到快速提升, 1999 年单根光纤激光的输出功率突破百瓦^[3], 随后在十年内又先后突破了千瓦^[4]和万瓦^[5]。随着光纤激光功率水平的不断提升, 非线性效应和模式不稳定性等物理效应对光纤激光输出功率的限制逐渐凸显, 近 10 年来, 单根宽谱光纤激光的输出功率尚未取得新的较大突破。但是, 针对线偏振光纤激光、窄线宽光纤激光等特殊光纤激光, 非线性效应抑制等技术得到发展, 输出功率等性能指标有显著提升^[6]。

构建模块化的光纤激光相干阵列, 实现激光阵列的相干合成, 是突破单路光纤激光物理限制, 获得高功率高质量激光输出的有效方法^[7]。根据相位控制的基本实现方式, 激光相干合成方法主要分为主动相位控制和被动相位控制两大类^[8], 目前采用主动相位控制方法取得了许多具有代表性的高功率实验

结果^[9-11]。国防科技大学是国内较早开展光纤激光相干合成研究工作的单位之一, 先后获得国家自然科学基金青年科学基金项目 and 面上项目、湖南省自然科学基金创新群体项目、国家重点研发计划以及国家军队人才类项目的支持, 迄今已有近 20 年的历程, 研究工作基本覆盖了光纤激光相干合成的各个方面。本文聚焦光纤激光主动相位控制相干合成技术, 结合国内外的研究进展, 从关键器件、激光参数控制、光束拼接、系统集成、相干合成新技术与新应用等方面介绍课题组的研究成果, 并对未来发展趋势进行分析与展望。

2 关键器件

主动相位控制相干合成系统的典型结构如图 1 所示, 利用分束器 (splitter) 将种子激光 (laser seed) 分为多路, 每一路激光中由相位调制器 (PM)、光纤延迟线 (DL)、光纤放大器 (AMP) 和激光准直器 (CO) 等关键器件传输, 这些器件分别对激光进行活塞相位控制、光程差控制、光功率放大、倾斜控制和准直发射等。通常利用光束分光镜 (BS1) 提取小部分激光进行误差探测 (error detecting), 获得活塞相位、光程、倾斜和离焦等光参量的误差, 从而对这些误差进行自适应控制, 以获得良好的相干合成效果。一般情况下, 还会利用光束分光镜 (BS2) 提取小部分光, 经过透镜 (lens) 形成远

收稿日期: 2023-08-13; 修回日期: 2023-08-17; 录用日期: 2023-08-28; 网络首发日期: 2023-09-05

基金项目: 国家自然科学基金 (62275272, 62035015, 61705265, 61705264)、国家重点研发计划 (2022YFB3606000)

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

场,对合成效果进行评价。分束器、种子激光器和光纤延迟线可以不是高功率器件,也可以与通信商用器件兼容^[12]。但是,要提高总输出功率,除了进行路数拓展外,还必须研制高功率的单链路器件,以实现单路激光

的功率提升。比如,具有高功率耐受能力(或者支持特殊波段激光工作)的相位调制器、高功率激光放大器、具备像差校正能力的激光准直器等,需要根据实际场景进行研发。

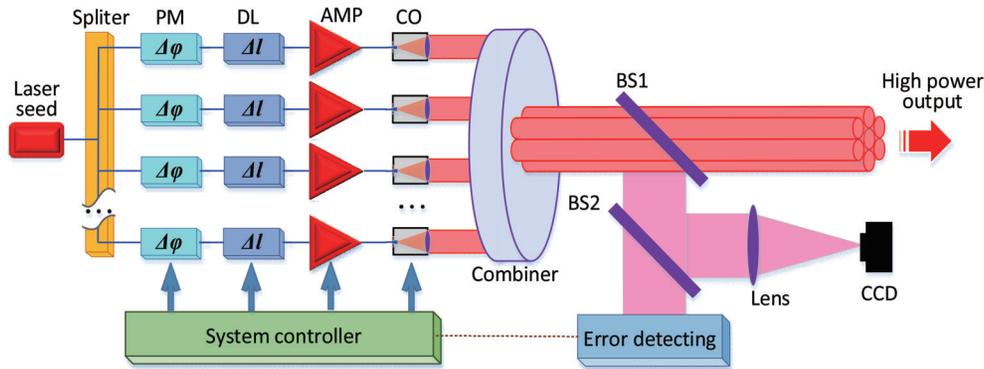


图 1 主动相位控制相干合成系统的结构示意图^[7]

Fig. 1 Schematic setup of active phase control coherent beam combining^[7]

2.1 高功率光纤放大器

单一种子激光分束后,经过多通道并行放大的激光阵列,此时具有任何时空频特性(连续或超快,单频或宽带,单模或高阶模等)的激光在理论上都可以进行相干合成。综合考虑应用需求等因素,目前用于相干合成的激光多是单频激光、窄线宽激光和超快激光^[7],因此面向此类合成的高功率光纤放大器也成为相关领域的研究前沿,课题组在上述三类光纤放大器方面开展了大量的研究工作^[13-15]。

单频激光光纤放大器、窄线宽激光光纤放大器和超快激光光纤放大器在功率提升的同时保持高光束质量所面临的技术挑战及物理机制有共通性:横向模式不稳定(TMI)效应^[16-17]和传统光纤光学非线性效应^[18]

[主要是受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)]的抑制,以及相关抑制方法之间的不一致性^[19]。近年来,课题组提出了降低量子亏损、优化光纤弯曲与泵浦方式、研发特种光纤与器件等综合调控方法^[20-24],实现了全光纤结构单频激光放大器大于 500 W 的高光束质量激光输出^[25-26]、窄线宽光纤放大器大于 7 kW 的高光束质量激光输出^[27-29]和超快激光光纤放大器 500 W 级高功率激光输出^[30]。

图 2 所示为课题组实现的 6 kW 级近单模窄线宽光纤激光系统结构及实验结果。窄线宽种子经过级联预放大器后,依次经过滤波环行器(filtered circulator)和模场适配器(MFA)并注入到主放大器。滤波环行器将放大过程中的后向回光导出,达到同时保护前级

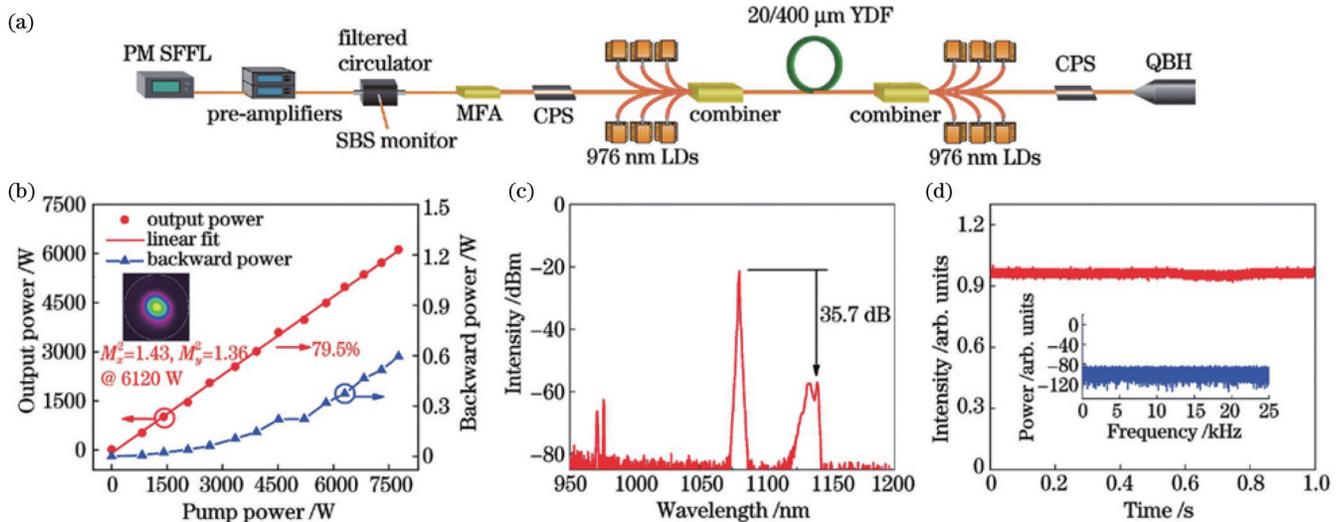


图 2 6 kW 级窄线宽光纤激光系统结构和典型结果^[27]。(a)系统结构;(b)输出功率和回光功率随泵浦功率的变化;(c)最高功率下的光谱;(d)最高功率下的功率时序

Fig. 2 Structural diagram and typical results of a 6 kW narrow line-width fiber laser^[27]. (a) Structural diagram; (b) output power and backward power as a function of pump power; (c) output spectrum at maximum output power; (d) temporal trace at maximum output power

系统和观测 SBS 效应的目的。半导体激光器(LD)通过泵浦信号合束器注入增益光纤,实现功率放大;主放大器增益光纤选用长度为 14.5 m,纤芯直径为 20 μm 的双包层掺镱光纤(YDF),通过弯曲增加高阶模式相对损耗,并与双向泵浦方式结合以抑制 TMI 效应。随着泵浦功率的提升,输出功率近似呈线性增长趋势;当泵浦功率为 7767 W 时,最高可实现 6120 W 激光输出,光光效率为 78.5%。在最高功率下采用光束质量测量仪测量两个方向的光束质量因子,均小于 1.5。最高功率下输出信号光的 3 dB 线宽约为 0.86 nm, SRS 信噪比约为 35.7 dB。最高功率下输出激光时序特性稳定,未出现 TMI 诱导的起伏和频谱特征峰;后向回光功率未出现非线性增长,没有观察到 SBS 效应。

2.2 压电陶瓷相位调制器

基于 LiNbO_3 波导的相位调制器具有大带宽、低插入损耗等优势,商用 LiNbO_3 波导的相位调制器已经在主动相位控制相干合成系统中得到广泛应用。然而,商用 LiNbO_3 波导也存在耐受功率不高、适用波段有限等劣势,对于高功率紧凑型系统以及特殊波段激光相干合成系统,基于压电陶瓷的相位调制器是一个可行的选项,这在光纤传感等领域已经得到广泛应用。课题组先后研发了适用于 2 μm 波段(当时尚没有工作在该波段的商用 LiNbO_3 波导调制器)的相位调制器和基于大芯径光纤的高功率相位调制器^[31-32],在国际上首次实现掺铒光纤激光主动相位控制相干合成^[33],并实现对 10 W 级激光的相位控制,这有助于减少放大链路

级数、提高系统紧凑度。

2.3 自适应光纤准直器

自适应光纤准直器(AFOC)是研究人员针对光纤激光器研制的一种新型光束倾斜控制器件。AFOC 通过直接控制激光输出端光纤的空间位置来对光束进行倾斜控制,从而实现倾斜控制和激光准直的一体化设计。相比于传统的倾斜镜方案,AFOC 具有结构紧凑、体积小、质量轻、惯性小、谐振频率高等优点。美国陆军实验室^[34]、美国 Dayton 大学^[35]和中国科学院光电技术研究所^[36-37]等单位采用压电陶瓷直接驱动输出光纤,改变其在准直透镜焦平面处的位置,实现了光纤激光的高精度倾斜控制。但是,高功率的光纤激光一般采用光纤端帽输出的方式,这就需要 AFOC 的能动器件具有更大的推力。

针对高功率光纤激光的应用需求,课题组于 2014 年研制出基于光纤端帽和柔性铰链的 AFOC,验证了 AFOC 应用于高功率光纤激光倾斜控制的可行性^[38-39]。2016 年,通过对柔性铰链进行优化,课题组进一步提升了其综合性能^[40]。优化后的 AFOC 结构如图 3(a)所示,将光纤端帽夹持在控制机构上,控制机构通过改变光纤端帽的横向位移,使输出的准直光束产生倾斜。倾斜角度 φ 和准直透镜焦距 f 、光纤位移 Δx 之间的关系为 $\varphi \approx \arctan(\Delta x/f) \approx \Delta x/f$ 。控制系统由基座、2 个叠堆型压电陶瓷、2 个杠杆和支架、8 个对称分布的柔性铰链、光纤端帽和端帽夹持具组成,如图 3(b)所示。将光纤端帽置于端帽夹持具内,端帽夹持

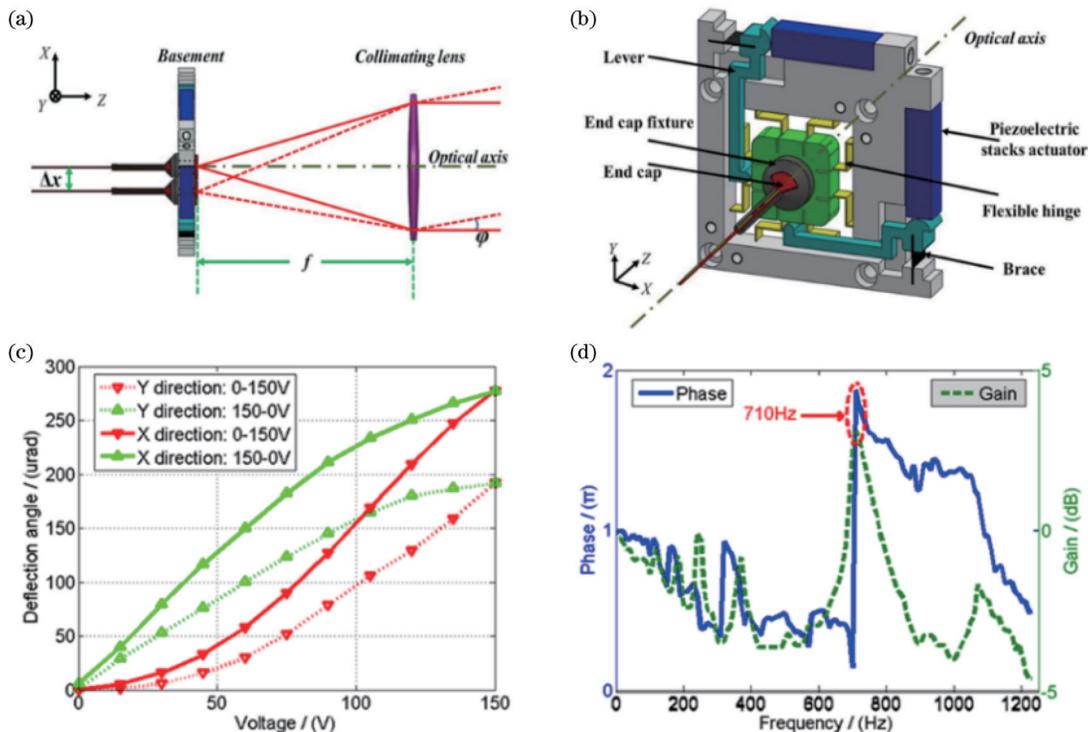


图 3 基于柔性铰链的 AFOC^[40]。(a)工作原理图;(b)结构图;(c)倾斜控制范围测量结果;(d)频率响应的振幅及相位、增益曲线
Fig. 3 AFOC based on flexible hinge^[40]. (a) Schematic diagram; (b) structural diagram; (c) deviation angle as a function of applied driving voltage; (d) frequency behavior as a function of driving frequency with phase and gain curves

具通过 8 个对称分布的片状柔性铰链与基座连接, 杠杆通过弹性支架与基座连接。杠杆两端分别与端帽夹持具和压电陶瓷紧密接触, 压电陶瓷产生的形变以杠杆为传动机构, 使得端帽夹持具按杠杆比例产生放大位移, 达到改变输出光束倾斜相位的目的。由于采用光纤端帽作为激光输出端, 因此该 AFOC 可以应用到高功率光纤激光系统中。基于柔性铰链的 AFOC 典型的测试数据如图 3(c)、(d) 所示, X 方向最大倾斜控制范围为 $270 \mu\text{rad}$ ($49 \mu\text{m}$), Y 方向最大倾斜控制范围为 $190 \mu\text{rad}$ ($34.2 \mu\text{m}$), 器件的一阶谐振频率约为 710 Hz。

2022 年, 课题组进一步改进了光纤端帽的定位方式, 采用压电双晶片的悬臂梁式光纤端帽定位器, 研制

出更紧凑的 AFOC^[41]。如图 4(a) 所示, 此装置主要由一个基座、两块压电双晶片、两个弹簧片、一个转接件和一个光纤端固定件组成。压电双晶片 A 与 B 可分别独立地控制一个方向上的移动, 通过转接件上正交的凹槽卡住压电双晶片 A 和 B 并粘结固定, 使得 A 与 B 被正交地装配到两个方向上。该转接件的作用是连接两块压电双晶片且让它们的控制方向相互正交, 以此实现一个平面上的二维移动。如图 4(b) 所示, 当输出功率为 2.12 kW 时, 器件的最高温度在 32°C 左右, 说明该器件具有很好的功率承受能力。当外加电压为 0~150 V 时, 在 X 方向实现了 $350 \mu\text{m}$ 左右的位移, 在 Y 方向实现了 $780 \mu\text{m}$ 左右的位移, 如图 4(c)、(d) 所示。

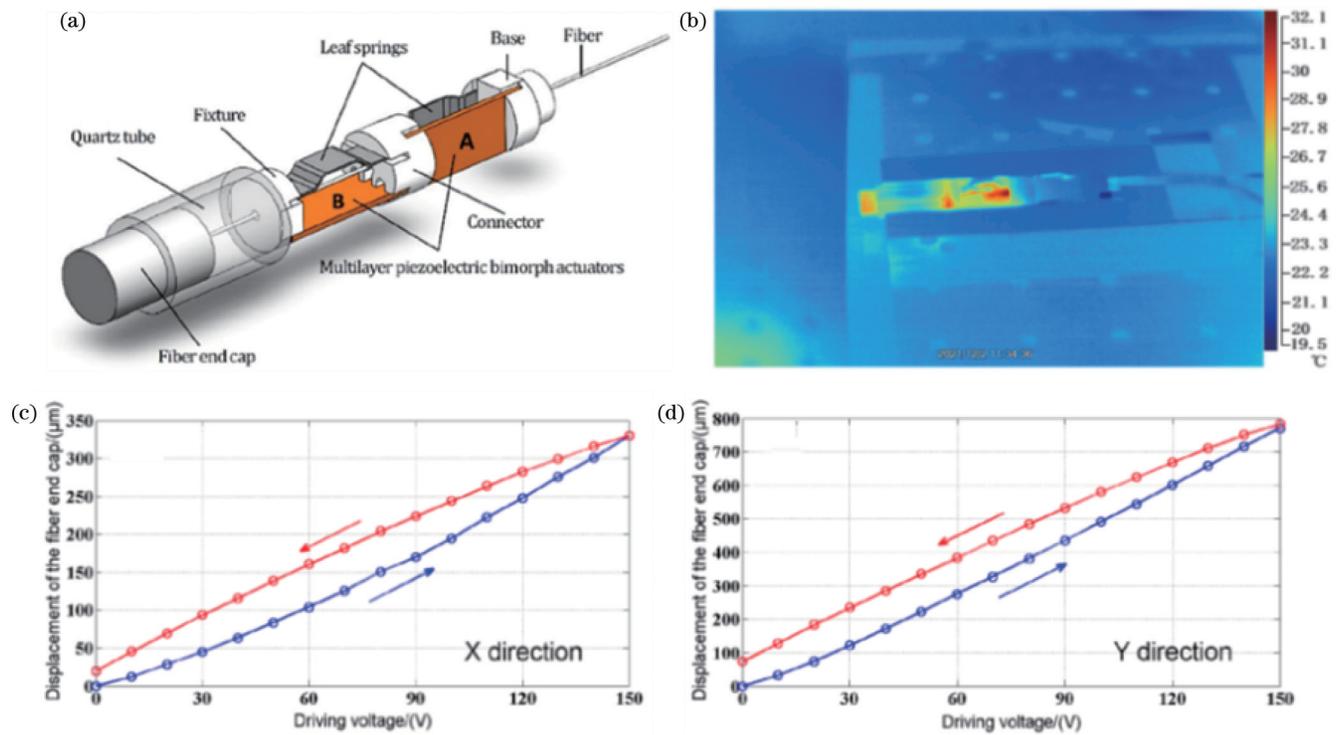


图 4 基于压电双晶片的悬臂梁式光纤端帽定位器^[41]。(a)定位器结构图;(b)2.12 kW 功率条件下的温度分布;(c)X 方向的位移范围;(d)Y 方向的位移范围

Fig. 4 Fiber endcap positioner based on piezoelectric bimorph actuators^[41]. (a) Structure of the positioner; (b) temperature distribution at the output power of 2.12 kW; (c) displacement distance at the X direction; (d) displacement distance at the Y direction

3 相位控制

主动相位控制利用相位检测和控制系统对各路激光的活塞相位起伏进行补偿。根据相位误差的探测方式, 可以将其分为直接探测和间接探测。直接探测采用外差法^[42-45]、H-C 偏振探测法^[46]、剪切干涉法^[47]和零差干涉法^[48-49]等获取各路激光之间的活塞相位误差, 具有算法迭代步数较少、控制带宽较高等优点, 但是相位误差探测系统较为复杂。间接探测利用光电探测器提取合成光束的远场中央主斑能量, 利用并行梯度随机下降 (SPGD) 算法^[37,50-51]、抖动法^[31,52-53]等进行优化

迭代, 使其达到最大值。间接探测具有结构简单的优点, 但是对算法的收敛速度提出了较高要求。多年来, 课题组在直接、间接探测方法研究方面取得了重要成果, 并提出了具有自主知识产权的原创方法。

3.1 SPGD 算法

SPGD 算法借鉴了“扰动随机逼近”的思想, 通过并行地对各个控制参量施加扰动, 根据系统评价函数的变化情况, 确定各个控制参量的优化方向。1997 年, 美国陆军研究实验室的 Vorontsov 等^[54]提出了 SPGD 算法, 并将该算法用于自适应成像领域。随后, SPGD 算法被广泛应用于相干合成系统的相位控

制^[37,50-51]。基于 SPGD 算法的相干合成系统结构和图 1 相同,执行过程如下:

1) 随机生成扰动向量 $\delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n\}^{(k)}$, 其中, $\delta u_i (i=1, 2, \dots, n)$ 相互独立、均值为零、方差相等,且概率密度关于均值对称。

2) 对各路激光施加正向扰动。将随机扰动电压 $\delta \mathbf{u}^{(k)}$ 与初始控制电压 $\mathbf{u}^{(k-1)}$ 累加后,施加到相位调制器。

3) 获取正向扰动后的性能评价函数 $J_+^{(k)}$ 。一般利用光电探测器获取合成光束的重要主斑能量,作为性能评价函数(其探测方法与图 5 中的抖动法相干合成探测方法相同)。

4) 对各路激光施加负向扰动。将随机扰动电压 $\delta \mathbf{u}^{(k)}$ 与初始控制电压 $\mathbf{u}^{(k-1)}$ 相减后,施加到相位调制器。

5) 获取负向扰动后的性能评价函数 $J_-^{(k)}$ 。

6) 根据性能评价函数变化量 $\delta J^{(k)}$ 更新相位控制参数 \mathbf{u} :

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \gamma \delta \mathbf{u}^{(k)} \delta J^{(k)}, \quad (1)$$

式中: $\delta J^{(k)} = (J_+^{(k)} - J_-^{(k)})/2$; γ 为步进增益。重复以上步骤,直到停止 SPGD 算法运行。

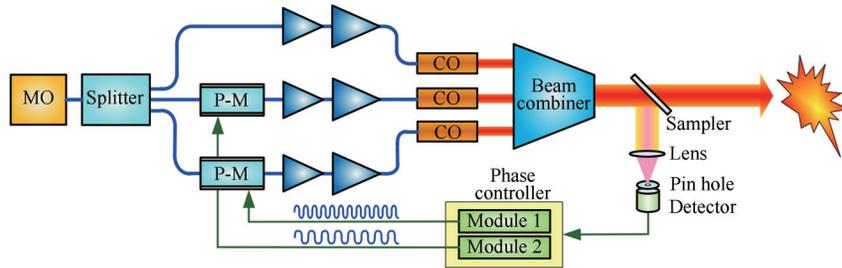


图 5 多抖动法相位控制系统结构图

Fig. 5 Schematic setup of coherent beam combining phase control system based on multi-dithering

在多抖动算法中,需要在每一路激光上加载一个不同频率的调制信号,且各调制信号之间的频率差必须大于相位噪声的频率,以保证在解调时不会丢失高频的相位噪声信息^[59-60]。因此,多抖动算法在阵列路数扩展方面存在一定的限制。为此,课题组于 2010 年提出了单抖动算法,该方法类似于通信领域中的时分复用技术,采用一个固定频率的调制信号,分时刻对各路激光进行相位调制;相应地,相位控制器也分时刻对各路激光的调制信号进行解调^[61]。基于单抖动算法,2011 年在国际上首次实现了千瓦级光纤激光的相干合成^[62]。为了进一步提高控制带宽,同年又提出了正交编码抖动算法,利用相同频率的正交调制信号进行相位调制,能够增加同一时间进行相位调制的激光路数^[63]。此外,课题组还结合 SPGD 算法和抖动法,提出了级联相位控制算法,该算法可以大幅提升相位控制带宽^[64]。

3.3 零差干涉法

零差干涉法采用广义马赫-曾德尔干涉仪的结构,通过一路参考激光与阵列激光的缩束激光进行零差干

涉,根据二维干涉条纹图像中的信息计算每一路激光阵元的相位误差并进行补偿。如图 6 所示,相干合成系统与采用 SPGD 算法和抖动法进行相位控制的系统基本相同,不同之处在于相干合成系统采用高速相机(如 CCD)进行相位误差探测,采用二维干涉图像计算控制器并进行活塞相位与倾斜相位计算。高速相机将探测面干涉条纹的光强分布转化为图像数据;二维干涉图像计算控制器是相位控制系统的核心计算控制部分,它接收高速相机采集的图像数据,基于二维干涉图像处理方法计算各路激光阵元的相位信息并控制执行器件进行相位补偿。美国林肯实验室^[48]、法国 Thales 研究所^[65]等单位采用该技术,均实现了数十路光纤激光的相干合成。

3.2 抖动法

课题组从 2008 年开始系统开展 SPGD 算法用于相干合成相位控制方面的研究^[55-56]。2014 年,首次基于 SPGD 算法实现了 32 路光纤激光的相位锁定^[57];2020 年,在国际上首次实现百束(107 束)规模光纤激光相干合成,合成后光斑条纹对比度大于 96%^[58];2021 年,报道了 19 路高功率相干合成系统,总输出功率为 21.6 kW,为国际上公开报道的光纤激光相干合成系统的最高输出功率值^[11]。

抖动法借鉴了光通信系统中的调制和解调过程,典型的多抖动法相干合成系统结构如图 5 所示(以三路为例)。首先,通过相位调制器在各路激光上加载一个不同频率的小幅载波信号,因此各路激光的活塞相位存在一个振幅调制,这就会引起合成光束的光斑条纹抖动或功率起伏;然后,利用光电探测器将这一光信号转换为电信号,该电信号包含了各路激光本身的活塞相位误差和载波信号施加的调制相位信息;最后,相位控制器基于解调原理,从该电信号中分别提取出光束间的相位误差信息,并对各路激光的相位误差进行实时校正。

2021 年,课题组基于零差干涉法,首次提出了活塞与倾斜相位噪声同时、单步补偿的方法^[66];2022 年,在国际上首次实现了 397 路激光的高效活塞相位补偿,校正残差优于 $\lambda/31$ ^[67];2023 年,采用超大阵元激光阵列生成和高速并行相位计算,将相位控制的阵元数目进一步提升至 1027 路,校正残差优于 $\lambda/27$ ^[68],为国际上公开

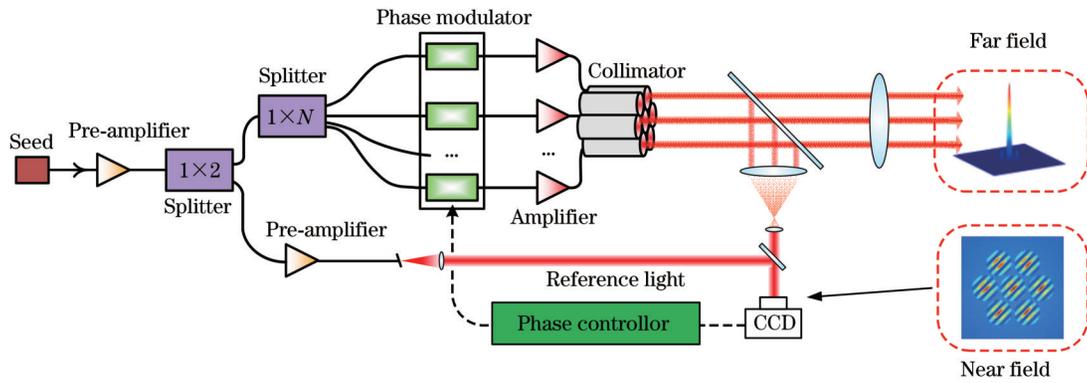


图 6 零差干涉法相位控制系统结构图

Fig. 6 Schematic setup of coherent beam combining phase control system based on heterodyne interferometer

报道的光纤激光相干合成系统最大控制单元数目。

3.4 深度学习算法

深度学习(DL)是机器学习领域的一个研究方向,由于具有强大的分析和特征提取能力,已被广泛应用于图像识别、机器翻译、自动驾驶等领域,近年来受到相干合成领域研究人员的广泛关注^[69-75]。基于DL算法的相干合成系统和图1相同,相位控制基本思路如

图7所示。神经网络将远场光强图像作为输入,预测各通道的输出相位误差,再根据相位标签和预测结果的差异来训练神经网络;训练完毕,神经网络根据实时输入来预测输出相位误差,并直接进行补偿校正。基于DL算法的相位控制的核心思想是将神经网络视为一个波前探测器,通过光强图像探测到相位误差后,直接进行补偿校正以实现共相输出。

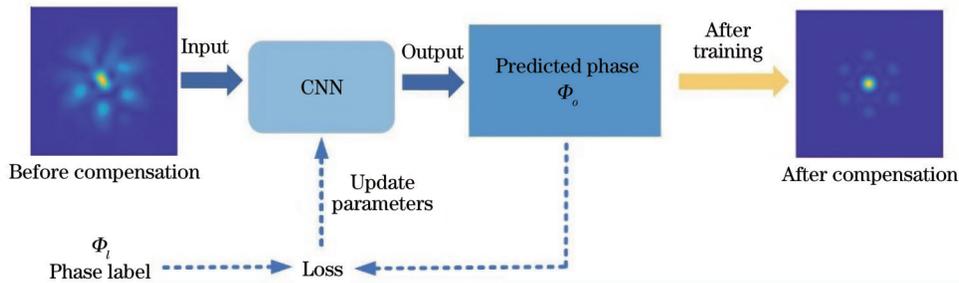


图 7 基于DL算法的相位控制原理

Fig. 7 Principle of phase control based on DL algorithm

DL算法在提取相位时利用了更多信息,待训练完毕可以单步提取相位信息,避免了在参数空间迭代搜索过程中,该算法的执行速度对路数拓展和初始相位误差不敏感的问题,因此在理论上对高频大幅相位噪声的补偿校正更有优势。然而,DL算法在求解相位误差时存在多解问题,在焦平面处对称共轭的相位分布会产生相同的光强分布,这种非唯一的映射关系会导致神经网络的训练无法收敛。

课题组是国际上较早提出采用DL算法进行相位控制的团队之一。2019年,课题组首次将DL算法引入到相干合成系统中,通过非焦平面处收集光强图像来训练神经网络,解决了相位误差的多解问题,仿真验证了7路和19路阵列相位控制的可行性^[76]。2020年,进一步提出DL算法辅助的两级相位控制方案,并将其用于产生高功率、模式可编程的轨道角动量(OAM)光束:先由DL算法初步补偿相位误差,大幅减少优化算法的迭代步数;再由优化算法进一步提高锁相精度^[77]。同年,提出在信号采集端前加入扩散器

(diffuser),通过强度和相位调制,解决了光强分布在焦平面处简并带来的解算困难问题^[78]。由于在此方向获得重要原创成果,课题组于2022年初在Photonics West会议上作邀请报告^[79]。

4 其他参数控制

4.1 光程差控制

各路激光之间存在时间相干性是实现相干合成的基本前提。对于高功率光纤激光和超短脉冲光纤激光,激光的相干长度通常较短。为了保证相对较高的相干合成效率,需要严格控制各路激光的光程差。如果要实现99%的相干合成效率,则光程差均方根值应控制在相干长度的10%以内^[80]。例如,对于光谱宽度为10 nm的激光,光程差的控制精度需要达到10 μm ^[81]。

对于GHz量级的窄线宽激光相干合成,光程差控制精度达到cm量级就能获得较好的合成效果,此时只需要采用空间光路调节^[82]和被动光纤匹配熔接^[83]等方

法,就能获得较好的相干合成效果。对于超快激光相干合成所需的更高精度光程差控制,可采用动态光纤延迟线^[84]、压电陶瓷高精度空间位移器^[9]、光纤拉伸器^[85]等高精度光程控制器件进行控制。为实现飞秒脉冲激光的高精度光程差控制,课题组于 2016 年设计了一种高精度实时控制光程差方案^[86]。首先,通过空间光路调节和熔接被动光纤,使光程差控制在 cm 量级;然后,静态调节光学延迟线(精度约为 0.3 μm ,范围约为 180 mm)以消除固定光程差;最后,通过光纤拉伸器(控制精度约为 0.035 $\mu\text{m}/\text{V}$,1 阶谐振频率约为 50 kHz)实现光程差漂移的自适应补偿,有效补偿了光纤放大器中热效应引起的光程差慢漂移。

2023 年,课题组提出采用光谱滤波技术实现光程和相位的解耦控制的新方案^[87]。实验结构如图 8(a)所示,利用保偏宽谱放大自发辐射光源和光纤滤波器滤出中心波长为 1064 nm、3 dB 光谱宽度为 10 nm 的光

纤激光。输出激光经 50:50 光纤耦合器分成两束,分别经过相位调制器(PM)、光学延迟线(DL)、光纤拉伸器(FS)后,由另一个 50:50 光纤耦合器合成为一束光。从合成后的激光中取部分光作为反馈信号,经过两个带通滤波器(BPF 1 & 2)分别滤出中心波长为 1061 nm 和 1066 nm,3 dB 光谱宽度均为 2 nm 的激光。将两束滤波后的激光光程和相位控制作为评价函数,通过数据采集卡(DAQ)采集和计算机(PC)执行相位控制算法,分别将光程和相位控制信号施加到光纤拉伸器和相位调制器上,使各评价函数分别达到极大值。实验结果如图 8(b)所示:在系统开环时,由于未对相位和光程进行控制,干涉光强在噪声的影响下随机起伏;在进行相位控制后,干涉光强稳定在低于极大值的某一固定值附近;当启动光程控制后,各干涉光强均得到了有效提升,说明对光程进行了有效补偿,光程补偿范围优于 0.1 ps,光纤拉伸器的控制精度可达 0.1 fs。

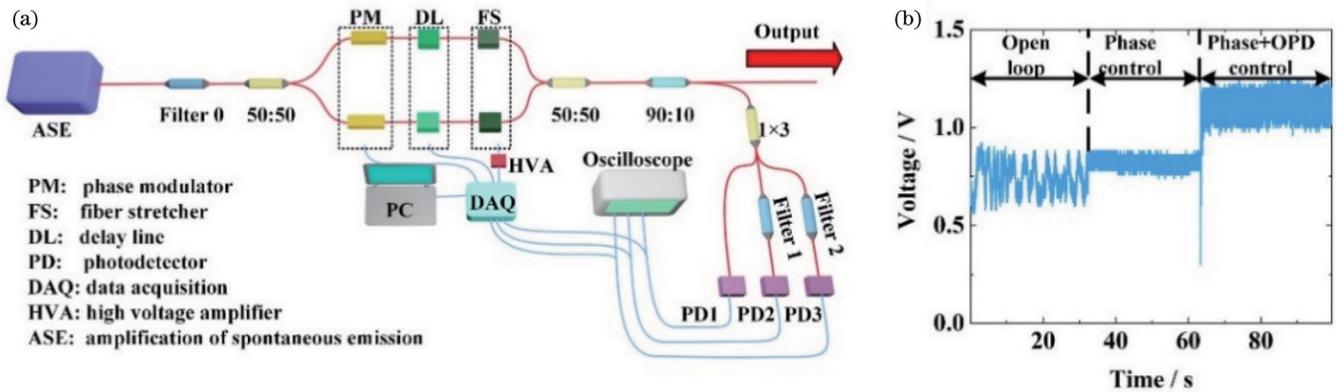


图 8 基于光谱滤波的光程和相位的解耦控制^[87]。(a)实验系统结构;(b)干涉光强变化曲线

Fig. 8 Optical path and phase simultaneous control based on spectral filtering^[87]. (a) Experimental setup; (b) interference light intensity variation curve

4.2 倾斜相差控制

各路激光在目标处的精确重叠,是提高合成激光峰值功率的关键环节。为了保证较好的合成效果,各路激光的倾斜像差需要控制在波长与单元光束直径比值的 1/20 以内^[58,88]。例如,对于波长为 1064 nm、光束直径在 20 mm 左右的激光,倾斜像差通常需要控制在 50 μrad 以内。静态倾斜像差的控制可以通过高精度的光学调节来实现,而热效应、机械振动以及远距离传输大气湍流等因素会引起动态倾斜像差,需要进一步进行动态的倾斜控制。最常见的倾斜控制器件是快速倾斜镜,倾斜镜通过外加电压控制信号,改变反射镜面的整体倾斜量。倾斜镜技术成熟,但是也有惯性较大、系统光路较为复杂等不足。AFOC 作为专门用于光纤激光器的新型光束倾斜控制器件,具有体积小、惯性小、结构紧凑等优点,被广泛应用于光纤激光相干合成的倾斜控制。美国 Dayton 大学于 2011 年和 2016 年基于 AFOC 先后搭建了 7 路和 21 路相干阵列,开展了 7 km 距离目标在回路相干合成实验^[89-90]。中国科学院

光电技术研究所于 2011 年实现了 3 路 AFOC 阵列的相干合成^[36],并于 2021 年和 2022 年先后开展了 19 孔和 57 孔的 2 km 距离目标在回路相干合成实验^[91-92]。

2012 年,课题组基于 AFOC 和 SPGD 算法,对 2 路百瓦级光纤激光进行倾斜和活塞相位控制,实现了 350 W 光纤激光的相干合成^[93]。2018 年,课题组利用柔性铰链的 AFOC,实现了 km 级湍流大气环境下的光纤激光高效相干合成^[94];2022 年,采用压电双晶片结构研制出更紧凑的 AFOC,承受功率可达 2 kW,能够实现高功率、紧凑结构的阵列光纤激光相干合成^[41]。

4.3 离焦像差控制

在高功率光纤激光系统中,辐照到光纤端帽、准直器、分光镜等光学元件上的功率密度很高,导致这些光学元件产生热透镜效应,从而引起离焦像差,使各路激光无法聚焦在同一目标位置。为此,课题组设计了高功率离焦补偿型准直器^[95],其基本原理如图 9(a)所示。其中:Endcap 为光纤端帽,用于对光束进行扩束;F1 和 F2 为两个组合式透镜,可实现光束准直。通过

机械装配设计使透镜 F1 和 F2 之间的距离可调,就能实现组合式透镜的等效焦距调节。由于热透镜效应可以等效为准直器等效焦距的变化,因此改变组合式透镜的等效焦距,也就实现了离焦像差的补偿。透镜 F1 和 F2 之间的距离调节既可以采用手动调节(称为“被动调焦”),也可以采用电控自适应调节(称为“主动调焦”)。如果在高功率条件下,当光学元件的热透镜效应在热平衡后不随时间发生明显变化时,则可采用被动调焦;当光学元件的热透镜效应随时间发生明显变

化时,则需要采用主动调焦。在主动调焦过程中,通常将透镜装配到电动导轨上,以远场光斑形态或阵列激光合成效率为评价函数,采用优化算法驱动电动导轨运动到最佳位置,从而实现自适应主动调焦。图 9(b) 为被动调焦条件下,不同输出功率时的激光光束质量。可以看到,该离焦补偿型准直器输出激光的光束质量基本上不随功率的增加而发生退化,说明所研制的离焦补偿型准直器满足高功率相干合成系统的应用需求。

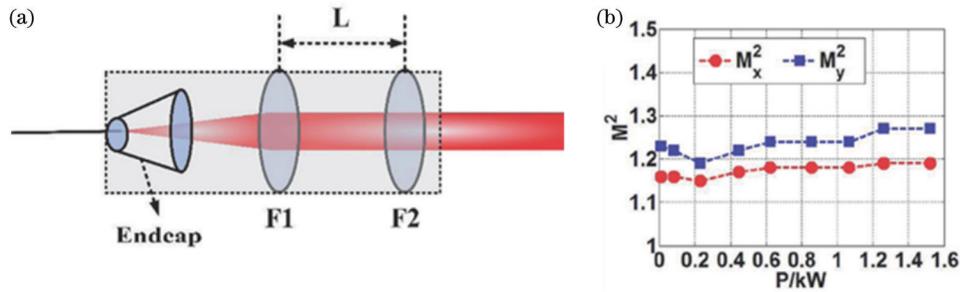


图 9 高功率离焦补偿型准直器^[95]。(a) 基本原理;(b) 测试结果

Fig. 9 High power laser collimator based on defocus compensation^[95]. (a) Principle schematic; (b) experimental results

5 光束合成

为了提高阵列光束远场光斑的能量集中度,通常需要通过合束器提升阵列光束的占空比,其技术方案可以分为分孔径合成和共孔径合成两大类。分孔径合成通过压缩阵列光束的占空比,减少阵列光束远场光斑中旁瓣的能量占比,主要方法有准直器直接拼接^[90,92,94]、空间光路拼接^[43,62]和微透镜阵列^[47,84]等。共孔径合成通过使各路激光在空间上完全重合,从而形成一束激光输出,主要方法/器件有相干偏振合成^[96-97]、自成像光波导^[98-100]、衍射光学元件(DOE)^[10,101]、M-Z干涉仪^[9,102]等。

5.1 高占空比拼接技术

分孔径合成是对各路激光进行紧密拼接,合成过程中不存在能量损失,但是远场光斑的能量会向旁瓣

分散,导致中央主斑的能量损失。分孔径合成的关键就是要保持各路激光在远场的高重合度,尽可能减小占空比,提升远场光斑中央主斑的能量占比。

2009年,课题组提出一种台阶状的光束拼接方案,子光束从合成器两侧入射,经合束器上的45°高反镜反射后,形成阵列光束并从合束器前端输出^[103]。为了进一步提高合束系统的紧凑性,课题组于2019年提出一种基于多面棱镜的光束合成方案,可以通过准直透镜组与多面棱镜组成的“单一准直器”来对阵列光束进行准直^[104]。如图10所示,从左到右依次放置光纤阵列、准直透镜组以及多面棱镜。光纤阵列由特定排列分布的光纤端帽组成,放置在准直透镜组的前焦平面上,在透镜组的另一侧设置多面棱镜,使棱镜的阶梯面数量、棱角大小、折射率等参数与光纤阵列、透镜的参数匹配,就能实现各路激光紧密排列并相互平行输出。

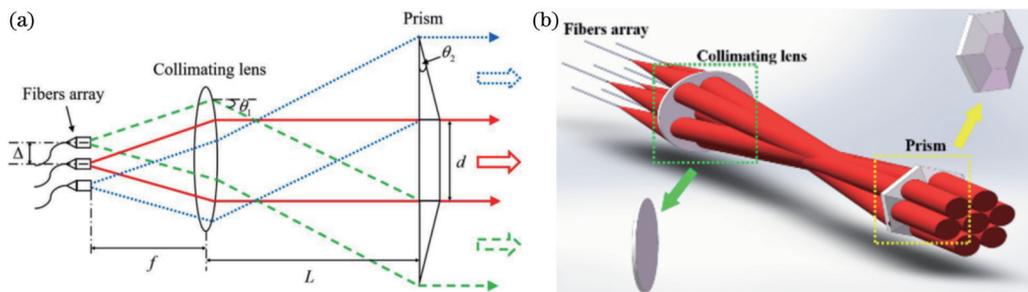


图 10 基于多面棱镜的光束合成原理图^[104]。(a) 3路;(b) 7路

Fig. 10 Schematic of the beam combiner based on prism^[104]. (a) 3 channels; (b) 7 channels

2020年,课题组对准直透镜进行密集排布,研制出百路级高占空比光束合成装置^[58]。为了实现更大规模的光纤激光相干合成,课题组于2023年提出了

基于棒状透镜准直器的阵列光束拼接方案^[105]。棒状透镜的一端直径较小,是光纤熔接端;另一端直径较大,端面为球面,用于准直并输出光束,称为出射端。

激光在棒状透镜的传输过程中以较大角度发散,激光束的中心部分直接到达棒状透镜的球面端并被准直,如图 11(a)中的蓝色实线所示;激光束的边缘部分先传输到棒状透镜侧面发生全反射,再经球面端输出到空间,如图 11(a)中的红色虚线所示,这部分

光就是截断的废光。如图 11(b)所示,将多个棒状透镜堆叠在一起,既能获得最优的光束截断因子,从而提高远场光斑的能量集中度,又能使截断后的废光发射到棒状透镜外,避免在光束拼接装置内产生废热。

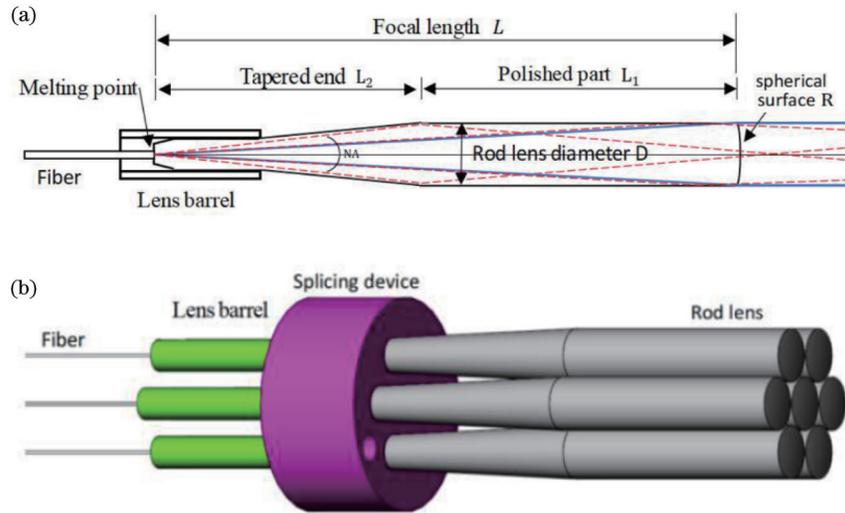


图 11 基于棒状透镜的光束合成原理图^[105]。(a)单个棒状透镜准直器;(b)合束器

Fig. 11 Schematic of the beam combiner based on rod lens^[105]. (a) A single rod lens collimator; (b) combiner

5.2 相干偏振合成技术

相干偏振合成是充分运用光束矢量特性实现光束拼接的技术。如图 12(a)所示,在传统的偏振合成方案中,两束线偏振光通过 PBC 合成一束,合成后的光束为非偏振光,只能实现两路激光的合成。该方案被广泛应用于半导体激光器,以提高泵浦功率。如图 12(b)所示,相干偏振合成通过各路光束

之间相位的锁定,使得合成后的光束为线偏振光,而合成后的光束可以继续偏振合成。理论上,相干偏振合成可以实现超大规模的激光合成。相干偏振合成是一种有效的共孔径合成方式,美国洛克希德马丁公司^[96]、德国耶拿大学^[46]、中国科学院光电技术研究所^[106]、上海理工大学^[107]等单位开展了相关研究。

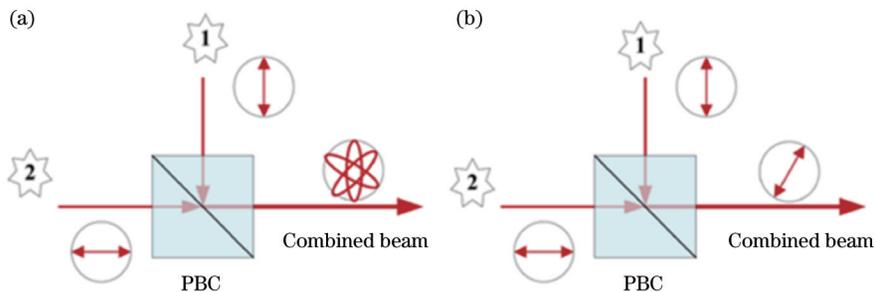


图 12 两路光束偏振合成原理图。(a)非相干偏振合成;(b)相干偏振合成

Fig. 12 Schematic of polarization beam combination of two beams. (a) Non-coherent beam combination; (b) coherent beam combination

2012年,课题组先后实现了4路^[108]和8路^[109]光纤激光的相干偏振合成。随后,为了提升输出功率,课题组在离焦像差补偿、相位和倾斜控制、高精度光程控制、窄线宽线偏振光纤放大器功率提升等方面开展了系统研究^[97]。2013年,实现了4路总功率为481 W的光学激光相干偏振合成,合成效率为91%,合成后光束质量 M^2 优于1.2^[110];2017年,将4路激光的总功率

提升到2.16 kW,合成效率为94.5%^[97];同年,实现了4路5.02 kW总功率输出,系统合成效率达93.8%,合成激光的光束质量 $M^2 < 1.3$,实验装置及实验结果如图 13所示^[111]。此外,课题组还成功将其应用于脉冲体制,实现了4束ps脉冲光纤激光相干偏振合成,平均功率为88 W,合成效率为90%,合成激光的光束质量 M^2 约为1.1^[112]。

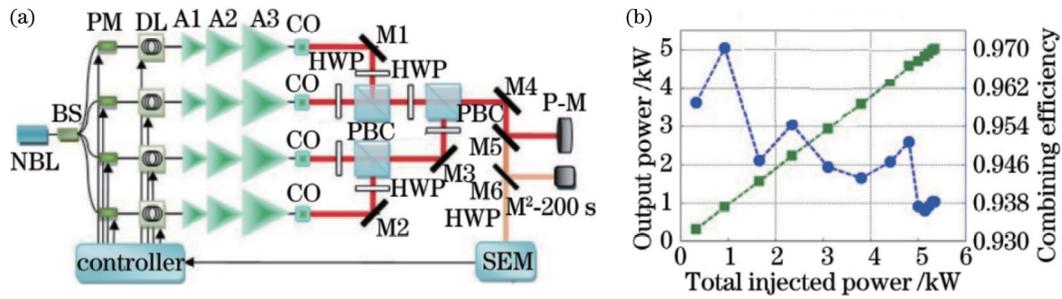


图 13 4 路 5.02 kW 光纤激光相干偏振合成^[111]。(a) 实验装置示意图；(b) 输出功率和合成效率随总入射功率的变化
Fig. 13 Coherent polarization beam combination of four fiber lasers with output power of 5.02 kW^[111]. (a) Experimental setup; (b) variations in output power and combining efficiency with total injected power

6 系统集成

6.1 高功率激光相干合成

向高功率扩展是相干合成技术迈向实际应用的关键。美国林肯实验室^[84]、美国空军实验室^[10]、德国耶拿大学^[9]、以色列 Civan 先进技术公司^[113]、中国工程物理研究院^[114]和国防科技大学^[11]等单位利用多路高功率光纤激光相干合成实现了数千瓦(以上)的功率输出。2016 年,美国空军实验室实现了 5 路千瓦级光纤激光的相干合成,总输出功率为 4.9 kW^[10]。2020 年,德国耶拿大学实现了 12 路超短脉冲激光相干合成,平均输出功率为 10.4 kW^[9];同年,以色列 Civan 公司实现了 32 路光纤激光相干合成,总输出功率为 16 kW^[113]。

课题组在 2010 年实现了 9 路 1.08 kW 光纤激光的相干合成,这是国际上光纤激光相干合成突破千瓦的首次报道^[62];2012 年,实现了 2 kW 级输出^[115];2020 年,实现了 7 路千瓦级窄线宽、线偏振、近单模光纤激光相干合成,总输出功率为 7.1 kW^[116];2021 年,对合成路数进行扩展,实现了 19 路千瓦级光纤激光的相干

合成^[11]。19 路相干合成系统的组成和图 1 类似,单频种子激光先经过相位调制进行光谱展宽,再经过预放大器进行功率预放大,然后由光纤分束器分为 19 路,每路依次连接一个相位调制器、一根光纤延迟线和一个千瓦级线偏振窄线宽光纤放大器。19 路放大器输出的激光经过一个占空比约为 95% 的合束装置,形成正六边形的激光阵列。该阵列光束首先经过高反镜进行分光,其中约 99.99% 的反射光束被功率计接收,约 0.01% 的透射光束经过衰减、缩束和聚焦后用于观察远场光斑和探测相位误差。为了获得良好的相干合成效果,通过熔接被动光纤、调节光纤延迟线等方法对光程进行高精度控制;通过静态光路调节消除各路激光之间的偏振方向误差、离焦相差和倾斜误差;基于光电探测器输出性能的评价函数,执行 SPGD 算法,对各路激光之间的活塞相差进行实时控制。合成的远场光斑长曝光形态如图 14 所示:当系统闭环时,远场中央主瓣内的能量得到了显著提升,条纹对比度为 73%;当系统稳定运行时,总输出功率为 21.6 kW,为当时国际上公开报道的光纤激光相干合成系统的最高输出功率值。

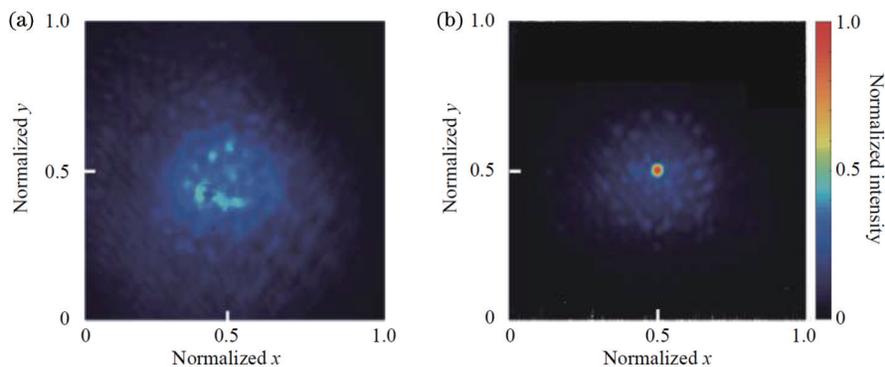


图 14 20 kW 级光纤激光相干合成的远场光斑长曝光图^[11]。(a) 开环；(b) 闭环
Fig. 14 Far-field long exposure patterns of coherent beam combining with 20 kW level fiber laser^[11]. (a) Open loop; (b) close loop

6.2 大数目激光相干合成

向大阵元数目扩展是近年来光纤激光相干合成的重要发展方向。目前,美国林肯实验室^[48]、美国 Dayton 大学^[90]、法国 Thales 研究所^[47,65]、法国 Limoges 大学^[117]、中国科学院光电技术研究所^[92]、中国工程物

理研究院^[52]和国防科技大学等单位都实现了数十路规模及以上的光纤激光相干合成。2006 年,美国林肯实验室利用零差干涉技术实现了 48 路光纤激光的相位锁定^[48];2011 年,法国 Thales 研究所利用剪切干涉技术实现了 64 路光纤激光的相干合成^[47];2016 年,美国

Dayton 大学实现了 21 路光纤激光的目标在回路相干合成^[90];2016 年,中国工程物理研究院利用方波扰动算法实现了 30 路光纤激光的相干合成^[52];2022 年,中国科学院光电技术研究所实现了 57 路光纤激光的目标在回路相干合成^[92]。

课题组于 2014 年利用 SPGD 算法实现了 32 路光纤激光的相位锁定^[57];2016 年,提出了基于级联相位控制扩展合成路数的方法,并实验验证了该方法在提升相位控制带宽方面的优势^[64];2019 年,基于 SPGD 算法实现了 60 路光纤激光的相干合成^[118],并在 2020 年将路数扩展到 107 路,为当时公开报道的光纤激光相干合成的最高路数^[58]。如图 15(a)所示,种子激光经过一个光纤分束器被分为 8 路,其中 6 路经过光纤放大器将功率放大到 1 W 左右,再将每一路分为 20 路。107 个相位调制器分别连接在 107 路光纤激光中(合成路数受限于相位调制器数量),用于活塞相位控制。输出光纤按照正

六边形排布,并通过透镜阵列形成阵列光束输出,激光阵列的占空比约为 92%,如图 15(b)所示。利用一个凹透镜和一个凸透镜对阵列光束进行缩束。通过一个分光镜提取部分阵列光束,并经过一个透镜形成远场,其中一部分直接进入 CCD,用于远场光斑探测;另一部分经过小孔后进入光电探测器(PD),作为相位控制电路的反馈信号。PD 探测到的远场光斑中央主瓣能量作为性能评价函数 J 输入到 SPGD 相位控制器中。基于 FPGA 的相位控制器执行 SPGD 算法,使性能评价函数 J 稳定到最大值。控制器执行 SPGD 算法的迭代频率 >1 MHz。实验中,当系统处于开环状态时,远场光斑 40 s 长曝光图如图 15(c)所示;当系统处于闭环状态时,远场光斑 40 s 长曝光图如图 15(d)所示,闭环时中央主瓣的能量显著提升,光斑条纹对比度 $>96%$;远场光斑理论仿真图如图 15(e)所示,对比图 15(d)、(e)可以看出,实验取得了非常理想的效果。

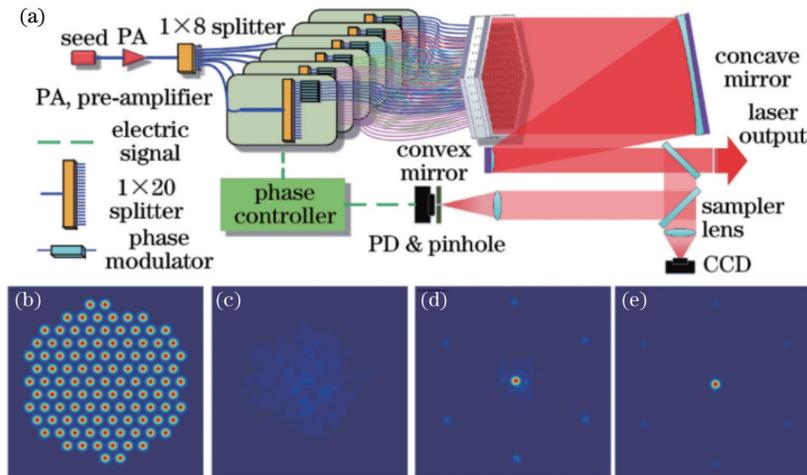


图 15 百路级光纤激光相干合成实验结构与实验结果^[58]。(a)实验结构示意图;(b)激光阵列近场强度仿真图;(c)开环时激光阵列远场长曝光光斑;(d)闭环时激光阵列远场长曝光光斑;(e)远场光斑仿真图

Fig. 15 Structure and experimental results of coherent beam combining of a hundred level fiber lasers^[58]. (a) Experimental setup; (b) simulated near-field pattern; (c) measured long-exposure far-field pattern in open loop; (d) measured long-exposure far-field pattern in closed loop; (e) simulated far-field pattern

2022 年,课题组基于零差干涉法实现了 397 路激光的高效活塞相位补偿,校正残差优于 $\lambda/31$ ^[67];2023 年,采用超大阵元激光阵列生成和高速并行相位计算方法,将相位控制的阵元数目进一步提升至 1027 路,为国际上公开报道的光纤激光相干合成系统的最大控制单元数目^[68]。实验结构如图 16(a)所示,单频种子光经准直(CO)和扩束(BE)后,由分光镜分为两路,反射光为参考光,透射光为主激光。主激光由空间光调制器 1(SLM1)进行调制后生成包含 1027 个阵元的激光阵列,激光阵列占空比约为 90%,排布如图 16(b)所示。同时对全部阵元进行相位调制,以 200 Hz 的刷新频率施加均匀分布于 $[0, 2\pi)$ 的随机相位噪声。参考光在经过一个半波片(HWP)和偏振片(P)后,与主激光通过另一个分光镜发生干涉并形成干涉条纹。高速

相机与计算机根据干涉条纹信息计算每束激光的相位,并将其施加给空间光调制器 2(SLM2),从而对每一束激光的相位噪声进行实时校正。相机(CCD)探测得到的开闭环条件下的远场光斑长曝光图如图 16(c)、(d)所示,合成光斑中央主瓣能量集中度在闭环时得到显著提升,桶中功率占比为 53.5%(理论计算值为 56.6%)。

6.3 脉冲光纤激光相干合成

随着连续光纤激光相干合成相关技术的成熟以及高功率脉冲激光需求的不断提升,脉冲光纤激光相干合成逐渐成为研究热点。国外,德国耶拿大学^[46,119-120]、法国 Thales 研究所^[65,121]、法国南巴黎大学^[122]、美国密歇根大学^[123]、俄罗斯科学院^[124]等单位开展了相关研究。其中,德国耶拿大学在超短脉冲相干合成方面的

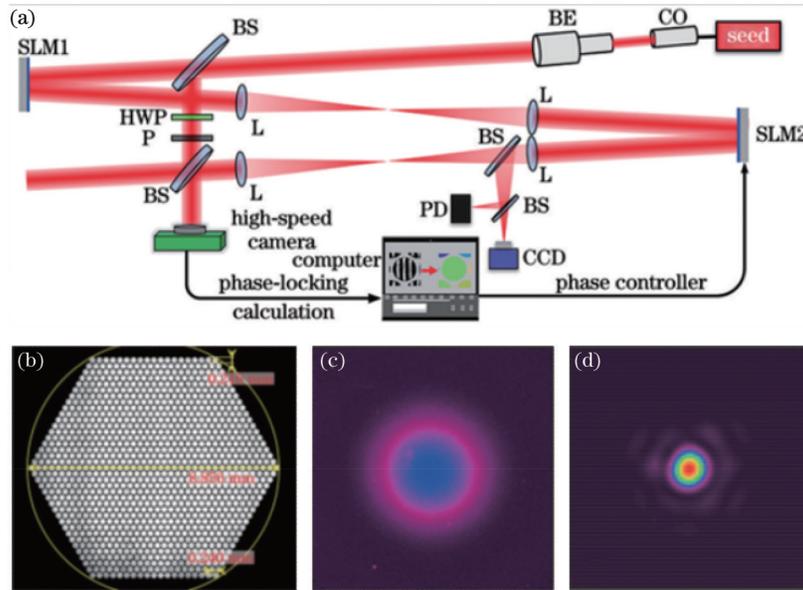


图 16 千路级相干合成实验结构与实验结果^[68]。(a)实验结构示意图;(b)激光阵列近场强度图;(c)开环时激光阵列远场长曝光光斑;(d)闭环时激光阵列远场长曝光光斑

Fig. 16 Experimental structure and typical results of coherent beam combining of thousand level laser beams^[68]. (a) Experimental structure diagram; (b) laser array intensity map in the near field; (c) long-exposure far-field pattern in open loop; (d) long-exposure far-field pattern in closed loop

研究最具代表性,他们在 2020 年实现了 12 路飞秒脉冲激光相干合成,平均功率达到 10.4 kW^[9]。2021 年,他们对 16 路超短脉冲光纤激光进行相干合成,实现了平均功率为 1 kW、单脉冲能量为 10 mJ 的超快激光输出^[119],并在 2023 年进一步结合时域脉冲合成实现了平均功率为 640 W、单脉冲能量为 32 mJ 的超快激光输出^[120]。法国 Thales 研究所在 2020 年实现了 61 路飞秒脉冲激光相干合成,该路数为目前脉冲光纤激光相干合成的最高路数^[65]。国内开展脉冲激光相干合成的单位主要有中国科学院上海光学精密机械研究所^[125]、中国工程物理研究院^[126]、上海理工大学^[107]和国防科技大学等。2016 年,上海理工大学实现了 2 路、30.4 W 平均功率的飞秒脉冲激光相干合成^[107];同年,中国工程物理研究院实现了 2 路飞秒固体激光的相干合成^[126];2017 年,中国科学院上海光学精密机械研究所实现了 2 路 100 Hz 重复频率的飞秒固体激光的相干合成^[127];2021 年,中国科学院上海光学精密机械研究所又实现了 2 路超短脉冲大能量固体激光的相干合成,在中红外波段获得了脉冲能量为 2.7 mJ、脉宽为 22.9 fs 的脉冲激光^[125]。

课题组于 2012 年先后实现了 2 路 215.8 W 和 5 路 800 W 平均功率的纳秒脉冲激光的相干合成^[82-83];2013 年,将路数提升到 7 路,实现 1.2 kW 平均功率的纳秒脉冲输出^[128];同年,针对低重复频率脉冲激光的相干合成,提出了利用脉冲间泄漏光进行相位控制的方法,实现了 2 路低重复频率脉冲激光的相干合成^[129];2018 年,实现了 2 路飞秒脉冲光纤激光的相干偏振合成,平

均功率为 313 W,脉冲宽度为 827 fs^[85];2022 年,基于光纤拉伸器锁相,实现了 2 路 10.9 W 飞秒激光相干偏振合成^[130],实验结果如图 17 所示。图 17(a)为开环和闭环时的归一化时域强度起伏情况,当对 2 路激光的相差进行实时反馈控制后,系统的输出功率趋于稳定,归一化时域强度的平均值为 0.9582,锁相残差约为 $\lambda/31$ 。图 17(b)所示为单路激光及合成后激光信号的输出光谱,两路信号的输出光谱在 1035 nm 附近存在一定的差异,主要来源于 2 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。单路及合成后脉冲压缩的时域自相关曲线如图 17(c)所示,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,合成后信号的脉宽可压缩至 494 fs,压缩效率约为 73.3%。

6.4 目标在回路相干合成系统

由于输出激光的发散角与发射口径成反比,相干合成阵列光束能够实现激光亮度的提升,便于远距离传输。然而,大气中的湍流效应等会引起传输激光的波前畸变,导致光束质量在传输过程中严重退化。在真空中传输时,相干合成光束(发射口径等效于阵列光束直径)的传输效率明显大于非相干合成光束(发射口径等效于单元光束直径)的传输效率;在湍流大气中传输时,阵列光束的空间相干性会遭到破坏,当湍流强度增加到一定程度时,相干合成的效果可能会退化到和非相干合成相当的水平^[131]。传统的相干合成系统只能保证阵列光束在出射面实现相位锁定,但经长距离大气传输至目标后,湍流引入了附加扰动,目标面阵列

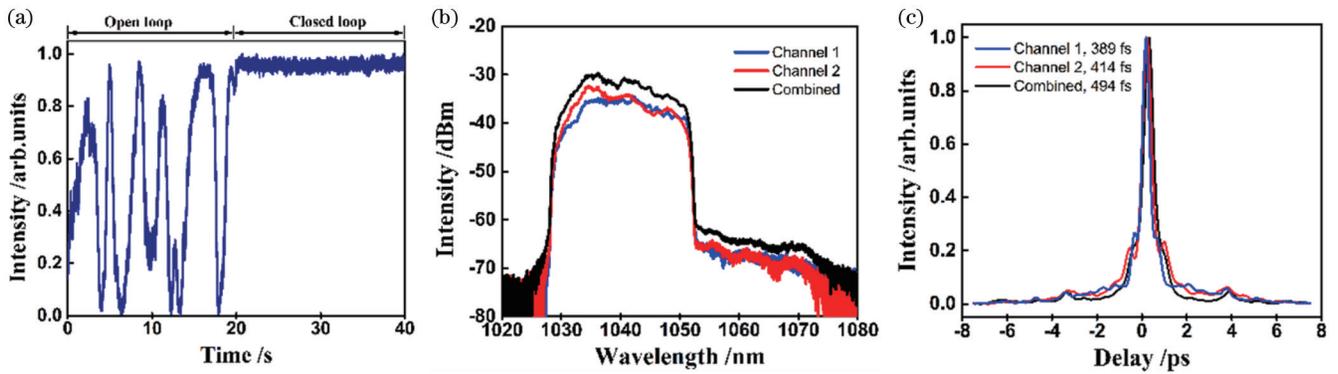


图 17 基于光纤拉伸器锁相的超快激光合成实验结果^[130]。(a)开环和闭环时的归一化时域强度起伏；(b)单路与合成后的激光光谱；(c)单路与合成后压缩脉冲的时域自相关曲线

Fig. 17 Experimental results of coherent beam combining of ultrafast lasers based on fiber stretcher phase locking^[130]. (a) Normalized temporal intensity fluctuation in the open and closed loop; (b) spectra of lasers before and after combination; (c) autocorrelation curves of the compressed pulse of single channel and combined beam

光场便不再是理想的情况。为了解决这个问题,研究人员提出了目标在回路(TIL)技术。与传统的自适应光学技术相比,目标在回路技术对每一个子孔径的活塞相差和倾斜相差进行校正,从而校正湍流大气造成的波前畸变,提升阵列光束的空间相干性,保持合成光束在目标处的光束质量,提升合成光束远场光斑的能量集中度。国内外多家研究单位开展了目标在回路技术研究,如美国陆军实验室^[132-133]、美国 HRL 实验室^[134]、美国 Dayton 大学^[89-90]、法国航空航天研究院(ONERA)^[135]、中国科学院光电技术研究所^[91-92,106]和国防科技大学等。

2011年,课题组实现了2路10W级光纤激光的目标在回路相干合成^[136],并于2013年将路数拓展至9路,采用漫反射非合作目标,在10m距离处实现了总功率为100W的目标在回路相干合成^[137]。随后,课题组针对高功率光纤激光阵列应用需求,研制了基于柔性铰链的AFOC^[38-40,138],并于2018年实现了km级目标在回路相干合成^[94]。km级目标在回路实验结构如图18所示。将光纤激光相干阵列放置在建

筑A内,受限于激光放大器等实验条件,阵列激光的数目为6路,每路激光连接一个相位调制器进行活塞相位控制,并连接一个光纤放大器将激光功率放大到1W左右。阵列光束共型发射基于课题组研制的7路柔性铰链AFOC模块,但实验中只用到其中6路。采用一个卡塞格林式望远镜对回光进行接收,并由一个光电探测器将收集的回光信号转换为电信号,作为活塞相位和倾斜相位控制的性能评价函数。控制模块根据回光信号对相位调制器和AFOC施加控制信号,活塞相位控制采用单抖动算法,抖动频率约为100kHz;倾斜控制采用SPGD算法,迭代频率约为100Hz。将目标平台放置在与建筑A相距0.8km的建筑B内。阵列光束传输到目标平台后经分光镜透射至目标靶面(Target),另一部分光经分光镜反射至观察屏(Screen)。利用一个红外相机(CCD)对观察屏上的激光光斑进行成像,以评价实验效果。在目标靶面中心处放置一个直径为10mm的角锥,保证望远镜能够接收到足够高功率的回光信号。

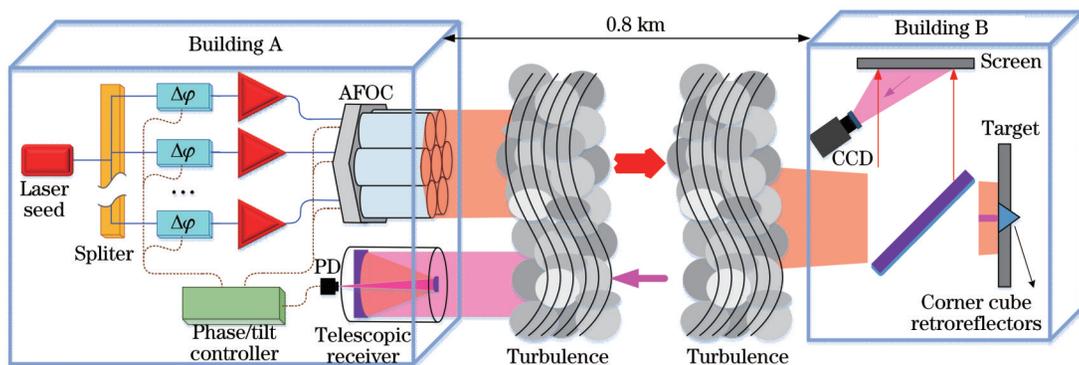


图 18 光纤激光目标在回路相干合成实验结构图

Fig. 18 Experimental setup for target in the loop coherent beam combining

图 19(a)为不同条件下 PD 探测到的归一化评价函数(回光功率)。当系统开环(OFF control)时,归一化评价函数均值仅为 0.29;当仅进行倾斜控制(TT control)时,归一化评价函数均值提高至 0.42;当系统完全闭环(TT&PL control)时,归一化评价函数均值提升至 0.67。不同条件下归一化评价函数的概率密度分布如图 19(b)所示,在施加倾斜控制和活塞控制后,归一化评价函数的均值得到提升。由于湍流强度

较大,存在部分未被校正的像差,因此归一化评价函数分布区域较广。CCD 探测到的阵列光斑光曝光图如图 19(c)~(h)所示。目标靶面处的归一化光强极大值在开环时仅为 0.068,在进行倾斜控制时为 0.40,在闭环时为 1。零级衍射区内的中央主斑能量占比在开环时仅为 25%,在进行倾斜控制时为 11.3%,在闭环时为 21.1%。系统闭环时目标处的光强极大值提高了 4 倍,中央主斑能量提升了 3.1 倍。

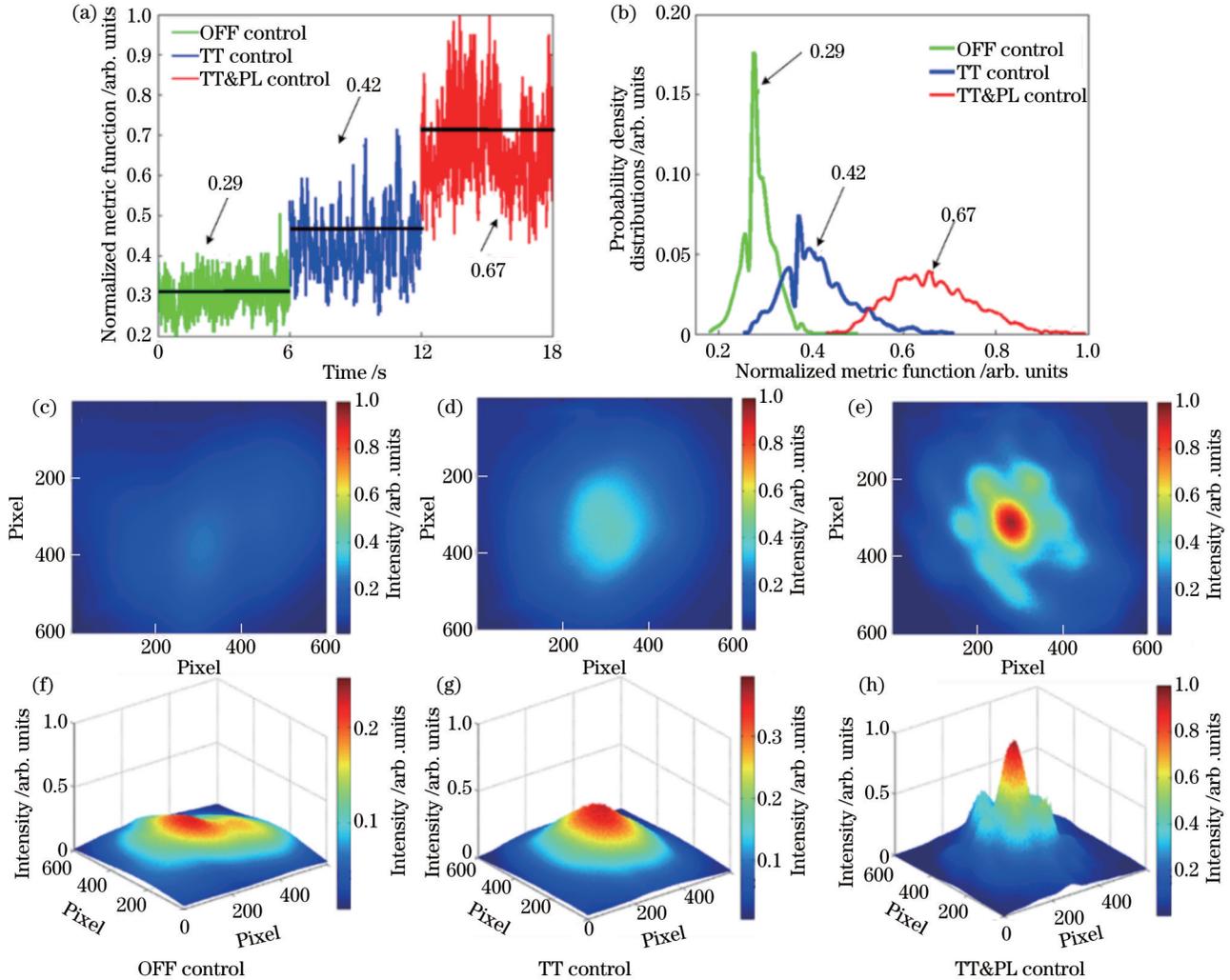


图 19 光纤激光目标在回路相干合成的实验结果。(a)归一化评价函数;(b)评价函数概率密度分布;(c)~(h)远场光斑长曝光图
Fig. 19 Experimental results for target in the loop coherent beam combining. (a) Normalized evaluation function; (b) probability density distribution of normalized evaluation function; (c)~(h) long exposure far-field intensity patterns

6.5 特殊波长激光相干合成

无论是连续激光还是脉冲激光,课题组在激光相干合成方面的研究工作集中在 $1\ \mu\text{m}$ 波段,中心波长为 $1050\sim 1080\ \text{nm}$ (比较适合于掺镱光纤进行功率放大)。实际上,激光相干合成技术几乎可以适用于任意波长的激光^[139],课题组在此方面进行了初步探索。 $1018\ \text{nm}$ 光纤激光在级联泵浦等方面有广泛的应用需求^[140-141],研究早期,受限于掺杂光纤的性能、放大自发辐射抑制技术等因素,输出功率一直不高。课题组成功验证了相干合成技术可以用于提升 $1018\ \text{nm}$ 光纤激

光的输出功率,搭建了两台高功率、低量子损耗的 $1018\ \text{nm}$ 短波长掺镱光纤激光器,进行了全光纤结构下两路光纤激光器的相干合成实验,获得了功率为 $55\ \text{W}$ 、合成效率为 90.2% 的相干输出^[142]。此外,课题组还实现了 2 路百瓦级掺镱光纤激光放大器的相干合成,获得了百瓦级高功率输出^[143]。

7 内部锁相相干合成技术

在传统的相干合成系统中,通常利用分光镜提取小部分合成光束作为信号光,用于解算各路激光之间

的相差(图 1)。由于该光信号是在激光阵列的外部获得的,因此将相应的方法称为外部锁相方法。在高功率、大路数条件下,外部锁相方法面临两方面的挑战:第一,由于需要使用大口径分光镜提取一部分合成光束作为信号光,同时利用聚焦透镜等大口径光学元件来获取阵列光束的远场,使得相位探测系统体积庞大,从而限制了其应用拓展;第二,随着激光路数的增加,相位控制带宽和控制精度降低,而相位噪声在高功率条件下将大幅度增加,相干合成效率可能会显著下降。为此,研究人员提出了内部相位控制方法,即在激光阵列形成之前完成相位探测与相位锁定。2013年,澳大利亚国立大学利用数字增强干涉(DEHI)技术实现了3束激光的全光纤结构的主动内部相位控制^[144];2016年,他们基于非对称光纤耦合器,实现了2路15 W的全光纤结构的内部相位控制^[145]。2017年,中国科学院光电技术研究所基于3 dB耦合器实现了2路全光纤结

构的内部相位控制^[146]。近年来,课题组也开展了相关研究,提出了基于空间结构和全光纤结构的两种内部锁相技术方案。

7.1 空间结构内部锁相技术

空间结构内部锁相技术方案的基本原理如图 20 所示。种子激光经过预放大器进行放大后,被分束器分为多路,每一路激光依次经过相位调制器、级联放大器和准直器输出。准直器输出的激光由高反镜阵列分为两部分:光强较大的部分进入激光发射系统,由扩束系统对每一路子光束进行扩束,并将其排列成大口径、高占空比的激光阵列,直接发射到自由空间;光强较小的部分传输到相位探测系统,作为取样阵列激光,用于相位探测和相位控制。该方案通过分布式相位探测,可以利用紧凑的小体积探测系统实现任意口径的阵列激光发射,在功率拓展和路数提升上具有较大优势^[147-148]。

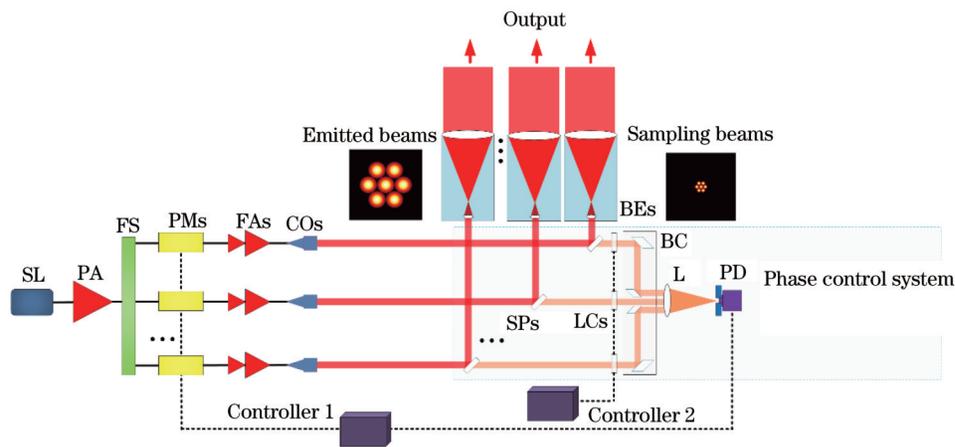


图 20 内部锁相技术原理示意图

Fig. 20 Schematic drawing of the internal sensing phase-locking technique

2020年,课题组搭建了实验验证平台,实现了7路光纤激光阵列内部锁相相干合成,验证了其长期稳定工作的可行性^[147]。随后,针对目标在回路技术中相位控制带宽随传输距离的增大而减小的问题,提出了基于内部锁相技术的目标在回路相干合成技术方案,搭建了三路光纤激光实验系统,在40 m大气传输实验中实现了激光发射系统相位噪声和大气湍流的分级校正,验证了该方案在提升相位控制带宽方面的优势^[149]。

2022年,为了进一步提升相位控制带宽,从而增加相干合成系统的可合成路数,课题组提出了级联内部锁相技术方案,并通过理论仿真论证了该方案提升相位控制带宽和控制精度的可行性^[150]。该方案的基本原理如图 21 所示,将整个激光阵列分为多个子阵列,每个子阵列独立进行相位误差的探测和控制,再从每个子阵列中选取一路,形成新的阵列进行相位误差的探测和控制,从而将整个阵列锁定为同相输出。该方案的优势在于:一方面,通过分布式相位探测,使系

统的集成设计更加方便;另一方面,通过分组级联控制,提高了相位控制带宽和精度,提高了路数扩展能力。2023年,课题组开展了12路光纤激光级联内部锁相实验验证^[151],在3个子阵列(每个子阵列有4路)完成相位锁定并对外部相差进行补偿后,整个阵列获得了良好的相干合成效果,闭环后远场合成光斑条纹对比度为93%,如图 22(c)所示,桶中功率为42%,相位控制残差小于 $\lambda/20$,合成效率为84%,验证了级联内部锁相技术的可行性。

近期,课题组通过优化热管理系统,不仅实现了高功率条件下对热效应的有效抑制,还实现了3路1.5 kW总功率的光纤激光阵列内部锁相相干合成,相位控制残差小于 $\lambda/27$,合成光斑远场条纹对比度为93%,桶中功率达到47%,合成效率为86%,初步论证了内部锁相技术在高功率相干合成上的应用潜力。

7.2 全光纤内部锁相技术

利用全光纤结构实现阵列激光主动相位控制的基本原理如图 23 所示,种子激光经过一个 1×2 分束器件

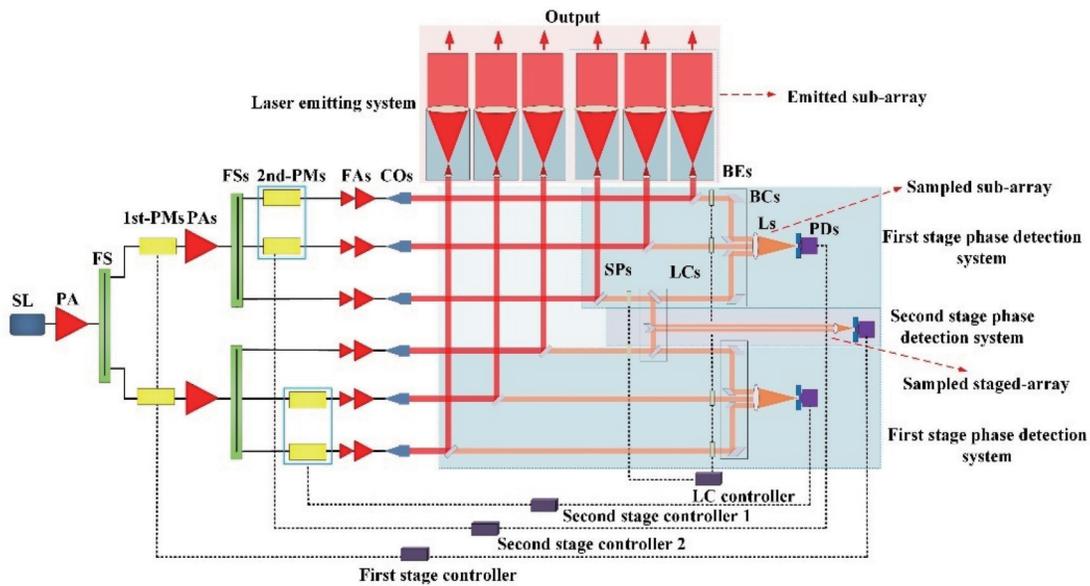
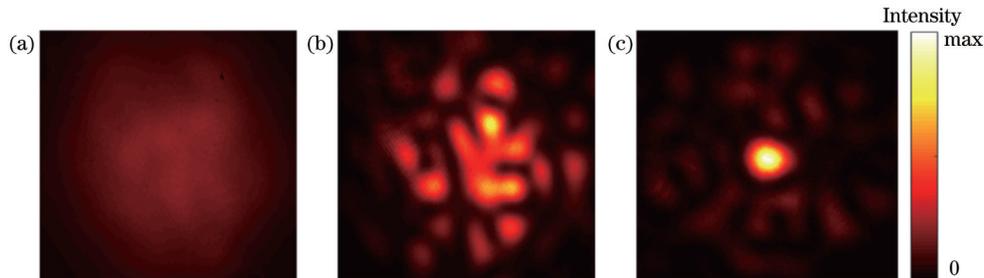
图 21 级联内部锁相技术原理示意图^[150]Fig. 21 Schematic drawing of cascaded internal sensing phase-locking technique^[150]

图 22 级联内部锁相相干合成实验结果。(a)开环状态;(b)开启相位控制器但未补偿外部静态相差;(c)开启相位控制器并补偿外部静态相差

Fig. 22 Experimental results of coherent beam combining based on the cascaded internal sensing phase-locking. (a) In the open loop; (b) controllers were turned on without external phase differences compensation; (c) after external phase differences compensation

后被分成两束:一束为信号光,用于功率放大,这束激光经过一个 $1 \times N$ 分束器被分成 N 束光,每一束光都先经过一个相位调制器再进行功率放大,然后经高分光比(99.9:0.1)光纤耦合器和准直器输出到自由空间;另一束为参考光,用于相位探测,经过一个光纤环形器后,由一个 $1 \times N$ 分束器分成 N 束光,每一束光经过相位调制器后与对应放大的激光经过同一个高分光比的光纤耦合器,最终大部分作为探测激光到达前向光电探测器。通过前向光电探测器探测放大激光与探测激光的干涉信号,并对探测激光的相位进行控制,使得每一路激光满足 $\varphi_{ai} = \varphi_{ci}$ (φ_{ai} 为第 i 束信号光从第一个 $1 \times N$ 分束器到耦合器之间的光相位, φ_{ci} 为第 i 束参考光从第二个 $1 \times N$ 分束器到耦合器之间的光相位)。当放大后的激光由准直器输出时,由于菲涅耳反射,小部分光会返回到光纤中,各路放大后激光的返回光由探测端的环形器导出并发生干涉。通过后向光电探测器探测返回光的干涉光强并对放大后激光的相位进行控制,使得每一路激光满足 $\varphi_{ai} + 2\varphi_{bi} + \varphi_{ci} = \varphi_{aj} +$

$2\varphi_{bj} + \varphi_{cj}$ (φ_{bi} 为第 i 束光从耦合器到准直器之间的光相位, φ_{aj} 为第 j 束信号光从第一个 $1 \times N$ 分束器到耦合器之间的光相位, φ_{bj} 为第 j 束光从耦合器到准直器之间的光相位, φ_{cj} 为第 j 束参考光从第二个 $1 \times N$ 分束器到耦合器之间的光相位)。由以上两式可知,阵列激光满足 $2(\varphi_{ai} + \varphi_{bi}) = 2(\varphi_{aj} + \varphi_{bj})$,也就是说,通过两次相位控制,可使输出激光之间的相差恒定,从而实现对各路激光的相位控制。该方案不再依赖外部空间反馈器件,在路数扩展上更具优势,具有构建大阵元规模光纤激光相干阵列的潜力。

2021年,课题组先后实现了2路和3路全光纤结构的内部相位控制,并通过静态调节和相位控制流程优化消除了 π 相位模糊问题^[152-153],其中三路合成实验结果如图24所示。系统开环时远场光斑长曝光图如图24(a)所示,无明显主瓣;系统闭环后中央主瓣能量大幅提升,如图24(b)所示,实验结果与仿真结果[图24(c)]非常接近;从图24(d)~(f)可以看出,输出光束两两之间的相差能够在闭环状态时保持稳定,实验得

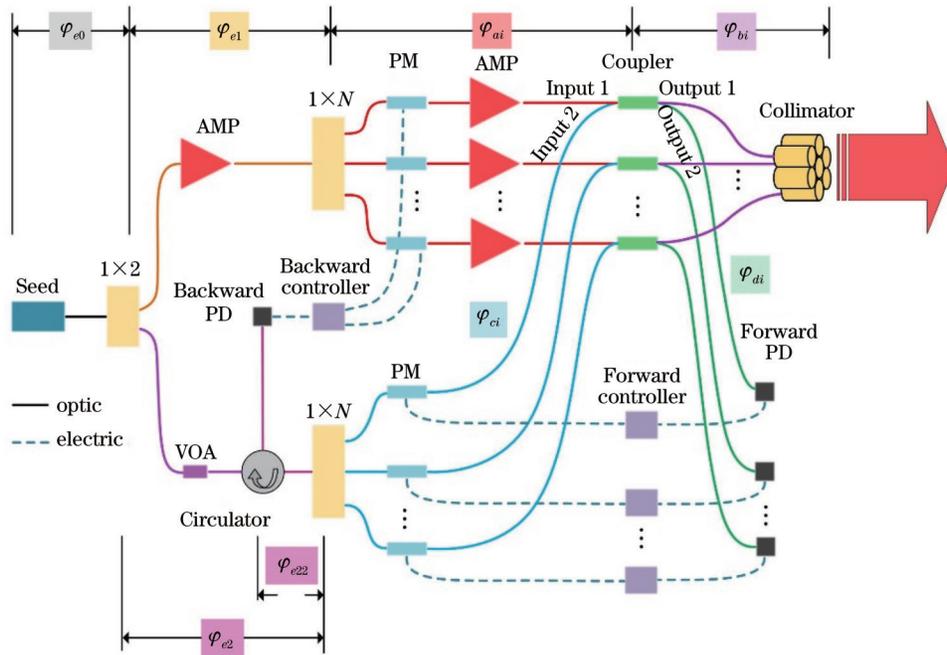


图 23 全光纤结构的内部锁相相干合成系统结构图

Fig. 23 Schematic of all-fiber active internal phase control coherent beam combining system

到的相位控制残差优于 $\lambda/22$ ^[153]。2022年,为了解决相位控制中的 π 相位模糊问题,课题组提出了一种双波长相位探测控制方法,并论证了该方法的可行性^[154];同年,针对阵列路数扩展问题,又提出了大数目全光纤

网络相干阵列内部锁相方法,可以利用级联方案实现 M 路激光的“两级激光阵列”,或者 M 路激光的“三级激光阵列”,或者更多路数的激光阵列的相干合成,使该方法具有极强的路数扩展能力^[155]。

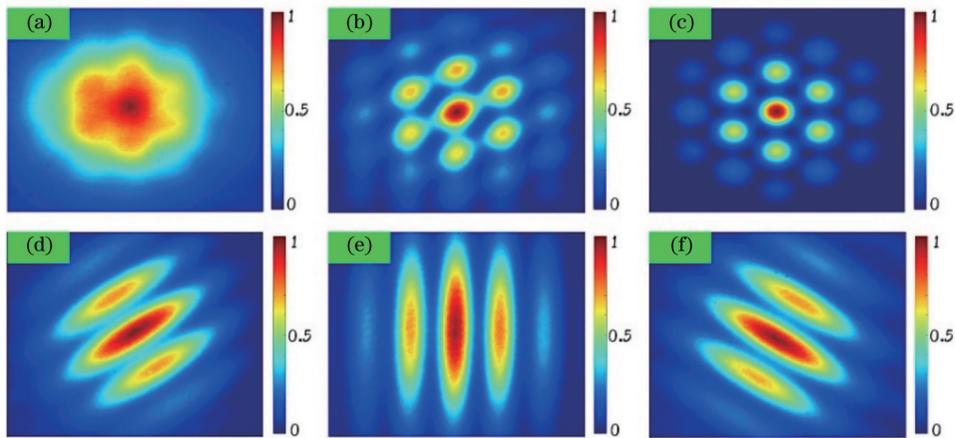


图 24 三路全光纤内部锁相相干合成远场长曝光图^[153]。(a) 开环; (b) 闭环; (c) 仿真结果; (d) 第 1、3 路激光干涉图样; (e) 第 1、2 路激光干涉图样; (f) 第 2、3 路激光干涉图样

Fig. 24 Long-exposure far-field patterns of coherent beam combining of three fiber lasers based on all-fiber internal phase locking^[153]. (a) Open loop; (b) closed loop; (c) simulation result; (d) interference fringe of beams 1 & 3; (e) interference fringe of beams 1 & 2; (f) interference fringe of beams 2 & 3

8 光场调控技术

在相当长的一段时间内,光纤激光相干合成的研究目的主要在于实现高功率、高光束质量的激光输出。近年来,随着光场调控领域的飞速发展以及相干合成系统对光场相干性等特性调控能力的日臻成熟完善,光纤激光相干合成的发展也逐渐走向多元化,

基于激光相干合成的特殊光场生成就是其中的典型代表。

8.1 涡旋光束生成技术

作为一种经典的结构光束,涡旋光束具有独特的相位和空间结构,在自由空间光通信、粒子操纵、量子信息处理等领域得到了广泛的研究和应用,而相干合成技术为产生高功率涡旋光束提供了一种新的技术手

段。2018年,课题组基于时间反演和贪心算法,构建了具有特定分布的激光阵列,理论分析了在任意距离目标平面产生阵列涡旋光束的可行性^[156];2019年,搭建了6路光纤激光相干合成实验平台,通过利用空间光相位调制器(SLM)构建特殊相位结构,在实验上产生了拓扑荷数为+1和-1的涡旋光束^[157]。

2021年,课题组提出通过改变激光阵列占空比来控制远场合成光斑的旁瓣分布方法^[158],实现了阵列涡旋光束的产生。该方法的原理如图25所示,通过调控占空比,发现:当激光阵列的活塞相位相同(光场A)时,将在远场相干合成具有多个旁瓣的类高斯光束阵列(光场C);当平面波在源平面(光场B)经过螺旋相

位板衍射后,将在远场形成涡旋光束(光场D)。为此,当激光阵列的活塞相位被调制以拟合螺旋相位波前时,其源平面的光场与光场A和B的乘积成正比。根据傅里叶光学理论,其远场的合成光场与光场C和D的卷积成正比,即等效于在类高斯光束阵列上复制光学涡旋,产生阵列涡旋光束。课题组搭建了6路光纤激光相干合成实验平台,产生了拓扑荷数为+1和-1的阵列涡旋光束。液晶施加的活塞相位结构分别如图26(a)、(d)所示,所产生的阵列涡旋光束如图26(c)、(f)所示,可见在远场生成了具有多个呈正六边形分布的涡旋光束。通过对比理论仿真结果[图26(b)、(e)]可以看出,实验结果与理论仿真结果高度吻合。

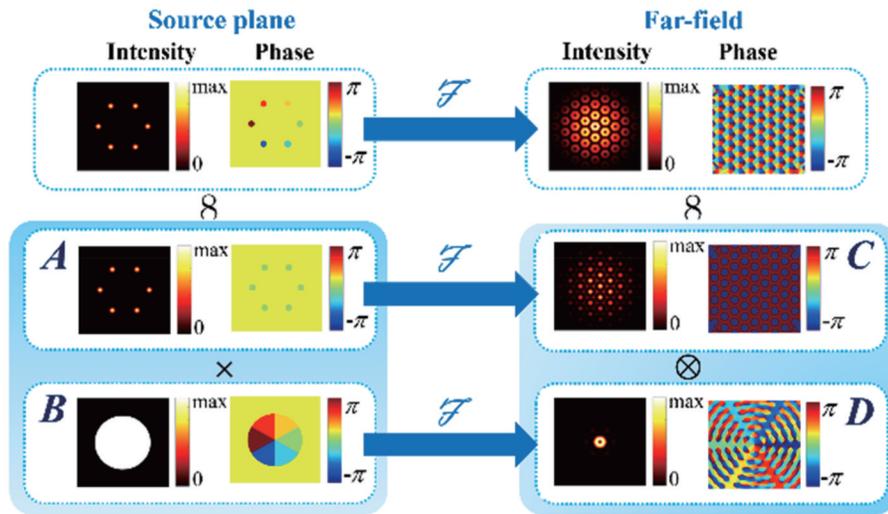


图 25 通过激光阵列占空比调制产生阵列涡旋光束原理示意图^[158]

Fig. 25 Schematic drawing of generating the vortex beams array by modulating fill factor of laser array^[158]

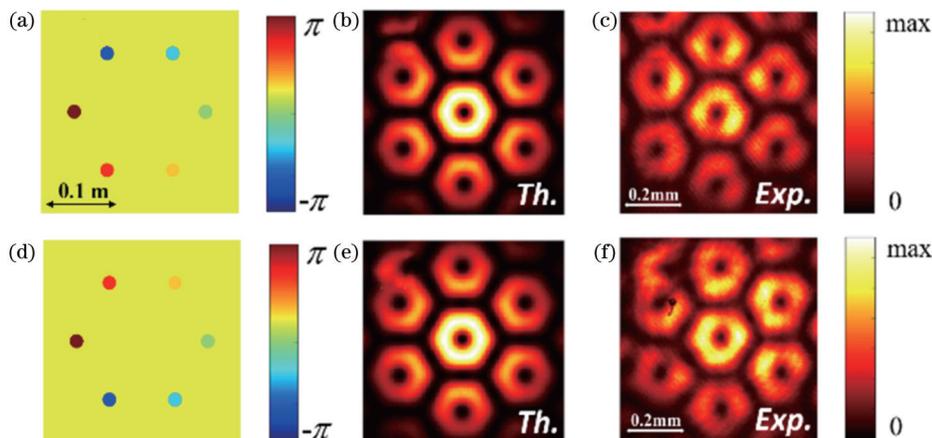


图 26 阵列涡旋光束实验与仿真结果^[158]。(a)拓扑荷数为+1时的活塞相位分布;(b)拓扑荷数为+1时的理论仿真强度分布;(c)拓扑荷数为+1时的实验强度分布;(d)拓扑荷数为-1时的活塞相位分布;(e)拓扑荷数为-1时的理论仿真强度分布;(f)拓扑荷数为-1时的实验强度分布

Fig. 26 Theoretical and experimental results of vortex beams array^[158]. (a) Phase distributions when TC value was +1; (b) corresponding simulated intensity distribution when TC value was +1; (c) experimental intensity distribution when TC value was +1; (d) phase distributions when TC value was -1; (e) corresponding simulated intensity distribution when TC value was -1; (f) experimental intensity distribution when TC value was -1

2023年,课题组针对合成涡旋光束模式单一的特点,通过优化激光阵列的活塞相位结构,在远场产生了具有多个模式的阵列涡旋光束,并且发现了阵列涡旋光束的复制现象。通过优化激光阵列的光束排布,实现了涡旋光束的产生,由于该方法无需构建特殊的活塞相位结构,可以简化相位控制系统^[159]。近期,针对高功率涡旋光束的应用需求,课题组开展了高功率涡旋光束产生的实验研究,通过6路高功率光纤激光阵列内部锁相相干合成首次产生了总功率超过

1.5 kW的涡旋光束。当系统处于开环状态时,远场合成光斑长曝光图如图27(a)所示;当系统处于闭环状态时,远场合成光斑长曝光图如图27(b)所示,桶中功率约为43%,合成效率达到95%,获得了良好的相干合成效果。使系统处于闭环状态并实时调控活塞相位结构,产生了拓扑荷数为-1、-2和-3的远场合成涡旋光束,如图27(c)~(e)所示。通过进一步降低激光阵列的占空比,产生了拓扑荷数为-1的阵列涡旋光束,如图27(f)所示。

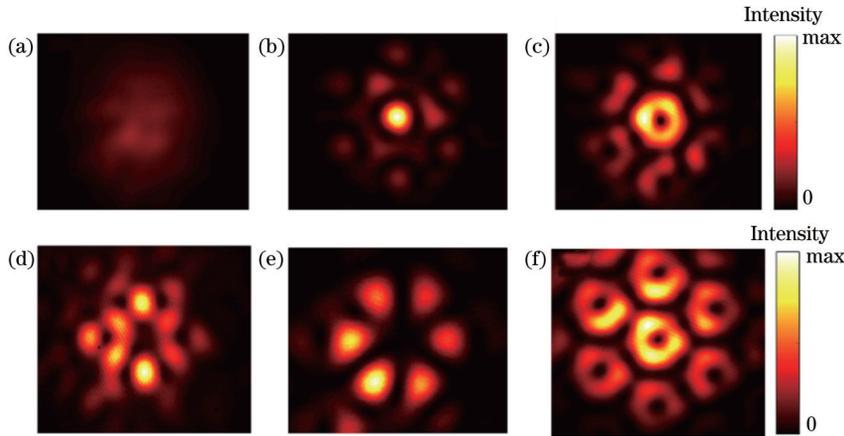


图 27 1.5 kW 涡旋光束实验结果。(a)系统开环下的远场光斑;(b)系统闭环下的远场光斑;(c)拓扑荷数为-1的涡旋光束强度分布;(d)拓扑荷数为-2的涡旋光束强度分布;(e)拓扑荷数为-3的涡旋光束强度分布;(f)拓扑荷数为-1的阵列涡旋光束强度分布
Fig. 27 Experimental results of 1.5 kW vortex beams. (a) Far-field pattern in the open loop; (b) far-field pattern in the closed loop; (c) intensity distribution of vortex beam with a topological charge (TC) value of -1; (d) intensity distribution of vortex beam with a TC value of -2; (e) intensity distribution of vortex beam with a TC value of -3; (f) intensity distribution of vortex beams array with a TC value of -1

8.2 矢量光场调控技术

矢量光束在信息存储、高分辨率成像和材料加工等方面具有良好的应用前景。光纤激光相干阵列具有独立的子孔排布,具备灵活的调控能力,可通过特殊的调控方法使得光束的偏振态呈现出规律性的分布。早在2009年,Kurti等^[160]利用线偏振高斯阵列光束在实验上产生了矢量光束,验证了光纤激光阵列偏振控制的可行性。2012年,课题组设计了一种新型实验结构,通过将两种正交偏振 LP_{11} 光纤模式进行叠加,并基于相干偏振合成技术产生了纯度大于95%的高纯度矢量光束^[161]。

柱矢量光束是一种特殊的矢量光束,因具有柱对称的局部线偏振分布和环形的强度分布,在紧聚焦平面呈现出独特的聚焦模式。2020年,课题组建立了基于光纤激光相干合成的柱矢量光束紧聚焦理论模型,通过相干合成柱矢量光束的紧聚焦光场的解析表达式分析了其紧聚焦特性^[162]。相干合成柱矢量光束紧聚焦示意图如图28所示,初始场由环形排布的线偏振高斯光束组成,子孔径的有效出射孔径为 R ,相邻子孔径的中心间距为 $2R$,定义子孔径的偏振方向与径向的夹角为初始偏振角, $\varphi_0 = 0$ 和 $\varphi_0 = \pi/2$ 分别表示径向偏

振和切向偏振,可通过控制子孔径光束的偏振方向与激光阵列排布实现对紧聚焦场的灵活调控。

根据相干合成柱矢量光束的紧聚焦理论模型,对紧聚焦平面的光强分布和偏振特性进行数值仿真分析,不同初始偏振角的相干合成柱矢量光束在焦平面上的光强分布和偏振分布如图29所示^[162]。图29(a1)~(c1)为不同初始偏振角的相干合成柱矢量光束在紧聚焦平面的光强分布,可以看到,随着初始偏振角的增大,紧聚焦平面的光强分布逐渐从类高斯分布变为平顶分布再到环形分布,说明通过控制子孔径的初始偏振方向能够实现紧聚焦平面光强的灵活调控。图29(a2)~(c2)为不同初始偏振角的相干合成柱矢量光束在紧聚焦平面的偏振分布,可以看到,紧聚焦平面的偏振方向与初始偏振方向一致。

为了验证相干合成柱矢量光束的紧聚焦特性,课题组搭建了3路相干合成实验平台,相干阵列经过准直器输出后依次经过半波片和高数值孔径透镜,通过旋转半波片控制光束的偏振方向,从而在紧聚焦平面生成不同类型的矢量光场^[163],数值仿真结果和实验结果如图30所示。图30(a1)、(b1)分别为径向偏振柱矢量光束在紧聚焦平面的光强分布的数值仿真结果和实

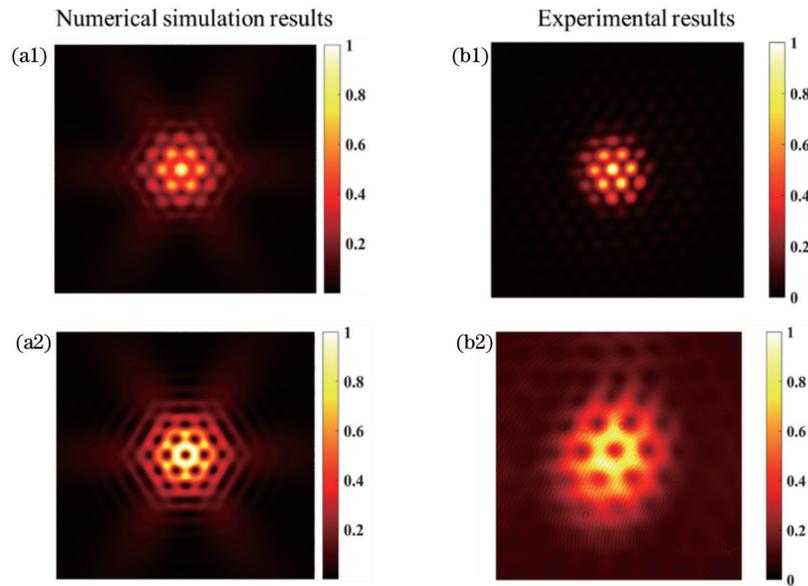


图 30 不同初始偏振方向的相干合成柱矢量光束在焦平面的光强分布数值模拟结果和实验结果对比^[163]。(a1)(b1) $\varphi_0 = 0$;
(a2)(b2) $\varphi_0 = \pi/2$

Fig. 30 Comparison of numerical simulation and experimental results of intensity distributions of combined cylindrical vector beams at the focal plane for different values of initial polarized orientation^[163]. (a1) (b1) $\varphi_0 = 0$; (a2) (b2) $\varphi_0 = \pi/2$

光纤激光是可行的。

2) 具备更加灵巧的光场调控能力, 加速在先进制造等领域的应用。以色列和德国的研究结果^[113]已经初步展示了光纤激光相干合成对改善激光加工性能的潜力, 而大规模光纤激光相位控制技术的突破, 使得光纤激光阵列具备生成矢量光束等特殊光场分布的激光以及高速全电扫描的能力^[167], 有望为相关领域带来全新的研究工具。

3) 助力半导体激光、超快激光行业的跨越式发展。半导体激光相干合成并不是一个新的主题, 但由于控制能力的限制、半导体激光自身发展的需求牵引等, 在较长时间内, 半导体激光与相干合成技术是相互独立发展的。近年来, 随着大规模半导体芯片集成工艺等技术的发展和成本降低, 半导体激光相干合成重新成为活跃的主题。与半导体激光类似, 超快激光也可能再次获得突破, 德国耶拿大学近 10 年已经明显呈现出超快激光与相干合成技术融合发展的特征^[119-120, 168-171]。

此外, 在主动相位控制光纤激光相干合成系统中, 相位调制器、光纤延迟线等器件带有电光接口, 使得科研人员具备对阵列光场多维参数的调控能力, 进而具备对阵列光场进行编辑的能力, 使得按需定制的高功率光场及其灵巧变换变为可能。

10 结 语

国防科技大学开展主动相位控制光纤激光相干合成研究已有近 20 年的历史, 取得了首次实现光纤激光相干合成千瓦级输出、百束规模大阵元数目相位控制等代表性研究成果, 并较早将其与人工智能、光场调控

等技术融合, 在交叉学科研究与交叉学科建设方面也取得了一定的创新突破。在近 20 年的研究历程中, 科研成果不断被写入《物理光学》《高能激光技术前沿》等本科生、研究生教材^[172-173], 一大批研究生成为科研的“生力军”, 他们毕业后成长为教学、科研、管理等岗位的骨干, 为学校光学工程学科在新一轮学科评估中取得历史性突破做出了突出贡献。未来, 激光相干合成研究将继续坚持教育、科技、人才一体发展的理念, 为我国在相关领域保持并跑、领跑状态而不懈努力。

致谢 感谢已毕业博士研究生于海龙、侯天悦、常琦、支冬, 在读博士研究生艾博文、高志强、陈思雨、刘昊宇、金坤, 已毕业硕士研究生张志新、奚加超、何姝玥、罗根等对本文的贡献。

参 考 文 献

- [1] Snitzer E. Optical maser action of Nd^{3+} in a Barium crown glass [J]. Physical Review Letters, 1961, 7(12): 444-446.
- [2] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. Applied Optics, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [3] Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110 W fibre laser [J]. Electronics Letters, 1999, 35(14): 1158-1160.
- [4] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW continuous-wave output power[C]// Advanced Solid-State Photonics, February 1-4, 2004, Santa Fe, New Mexico. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2004: PDP13.
- [5] IPG-Photonics-Corporation. IPG Photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser[EB/OL]. [2023-03-05]. http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10kW_SM_laser.
- [6] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2000001.

- Zhou P, Leng J Y, Xiao H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2000001.
- [7] 周朴, 粟荣涛, 马阎星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401003.
- Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401003.
- [8] Brignon A. Coherent laser beam combining[M]. Hoboken: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [9] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [10] Flores A, Ehreich T, Holten R, et al. Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97281Y.
- [11] 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(9): 20210621.
- Wu J, Ma Y X, Ma P F, et al. Coherent synthesis of 20 kW high power output by fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 20210621.
- [12] 周朴. 光纤激光相干合成技术研究[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2015.
- Zhou P. Research on coherent combination technology of fiber laser[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2015.
- [13] Li C, Tao Y, Jiang M, et al. High-power single-frequency fiber amplifiers: progress and challenge[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(9): 090002.
- [14] 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(12): 121001.
- Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121001.
- [15] Wu H S, Li R X, Xiao H, et al. New avenues for high-power high-brightness tandem-pumped fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12595: 125952D.
- [16] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. Advances in Optics and Photonics, 2020, 12(2): 429-484.
- [17] Stihler C, Jauregui C, Kholaf S E, et al. Intensity noise as a driver for transverse mode instability in fiber amplifiers[J]. Photonix, 2020, 1(1): 1-17.
- [18] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. 5th ed. Oxford: Academic Press, 2013.
- [19] Zhou P. High average power fiber lasers in the past decade[C]. Plenary Talk in Advanced Fiber Laser conference, 2020.
- [20] Tao R M, Wang X L, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 0903319.
- [21] Wu H S, Li H B, An Y, et al. Transverse mode instability mitigation in a high-power confined-doped fiber amplifier with good beam quality through seed laser control[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10(6): e44.
- [22] Chen X, Yao T F, Huang L J, et al. Functional fibers and functional fiber-based components for high-power lasers[J]. Advanced Fiber Materials, 2023, 5(1): 59-106.
- [23] Ma X Y, Zhang Y, Ye J, et al. Pure silica fiber Raman gain enabled high-power low-quantum defect fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108833.
- [24] Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. More than 5 kW counter tandem pumped fiber amplifier with near single-mode beam quality[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108204.
- [25] Huang L, Wu H S, Li R X, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2016, 42(1): 1-4.
- [26] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20908-20919.
- [27] 马鹏飞, 宋家鑫, 王广建, 等. 高功率窄线宽光纤激光突破 6 kW 级近单模输出[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0916002.
- Ma P F, Song J X, Wang G J, et al. High-power narrow linewidth fiber laser breaks through 6 kW near single-mode output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0916002.
- [28] 任帅, 马鹏飞, 陈益沙, 等. 国产保偏光纤实现 5 kW 级窄线宽激光输出[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 20220900.
- Ren S, Ma P F, Chen Y S, et al. Realization of 5 kW narrow linewidth laser output by domestic polarization maintaining fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20220900.
- [29] Ma P F, Yao T F, Chen Y S, et al. New progress of high-power narrow-linewidth fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12310: 123100E.
- [30] Wang T, Li C, Ren B, et al. High-power femtosecond laser generation from an all-fiber linearly polarized chirped pulse amplifier[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11(2): e25.
- [31] Ma Y X, Zhou P, Wang X L, et al. Coherent beam combination of two thulium-doped fiber laser beams with the multi-dithering technique[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(3): 721-724.
- [32] Ma Y, Zhou P, Zhang K, et al. A coherent beam combination system based on double PZT phase modulators[J]. Applied Physics B, 2012, 107(3): 765-769.
- [33] Zhou P, Ma Y, Wang X, et al. Coherent beam combination of thulium-doped fiber lasers[EB/OL]. [2023-03-05]. <https://spie.org/news/3488-coherent-beam-combination-of-thulium-doped-fiber-lasers?SSO=1>.
- [34] Beresnev L A, Weyrauch T, Vorontsov M A, et al. Development of adaptive fiber collimators for conformal fiber-based beam projection systems[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7090: 709008.
- [35] Vorontsov M A, Weyrauch T. High-power lasers for directed-energy applications: comment[J]. Applied Optics, 2016, 55(35): 9950-9953.
- [36] Li X Y, Geng C, Zhang X J, et al. Coherent beam combining of collimated fiber array based on target-in-the-loop technique[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8178: 81780M.
- [37] Geng C, Luo W, Tan Y, 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.
- [38] Zhi D, Ma Y X, Ma P F, et al. Adaptive fiber optics collimator based on flexible hinges[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5434-5438.
- [39] Zhi D, Ma P F, Ma Y X, et al. Novel adaptive fiber-optics collimator for coherent beam combination[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 31520-31528.
- [40] Zhi D, Ma Y X, Chen Z L, et al. Large deflection angle, high-power adaptive fiber optics collimator with preserved near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2217-2220.
- [41] Ma Y X, Luo G, He S Y, et al. Cantilevered adaptive fiber-optics collimator based on piezoelectric bimorph actuators[J]. Applied Optics, 2022, 61(11): 3195-3200.
- [42] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [43] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, et al. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(1): 48-51.
- [44] 黄智蒙, 骆永全, 张大勇, 等. 基于液晶光调制器的激光相干合成主动相位控制[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1713-1716.
- Huang Z M, Luo Y Q, Zhang D Y, et al. Active phase control in laser coherent combination based on liquid crystal optical modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1713-

- 1716.
- [45] 肖瑞, 侯静, 姜宗福, 等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6464-6469.
- Xiao R, Hou J, Jiang Z F, et al. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6464-6469.
- [46] Seise E, Klenke A, Breitkopf S, et al. 88 W 0.5 mJ femtosecond laser pulses from two coherently combined fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2011, 36(19): 3858-3860.
- [47] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [48] Yu C X, Kinsky J E, Shaw S E J, et al. Coherent beam combining of large number of PM fibres in 2-D fibre array[J]. Electronics Letters, 2006, 42(18): 1024-1025.
- [49] 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(5): 182-187.
- [50] Vorontsov M A, Lachinova S L, Beresnev L A, et al. Obscuration-free pupil-plane phase locking of a coherent array of fiber collimators[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(11): A106-A121.
- [51] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 248-256.
- [52] Huang Z M, Tang X, Luo Y Q, et al. Active phase locking of thirty fiber channels using multilevel phase dithering method[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(3): 033109.
- [53] Shay T M, Benham V, Baker J T, et al. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12015-12021.
- [54] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 907-909.
- [55] 周朴, 马阎星, 王小林, 等. 基于随机并行梯度下降算法光纤放大器相干合成的动态模拟与控制带宽分析[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2972-2977.
- Zhou P, Ma Y X, Wang X L, et al. Dynamical simulation and control bandwidth analysis on coherent beam combining of fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 2972-2977.
- [56] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 231106.
- [57] 粟荣涛, 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(11): 110101.
- Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Phase locking of a coherent array of 32 fiber lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11): 110101.
- [58] Chang H X, Chang Q, Xi J C, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams[J]. Photonics Research, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [59] Shay T M. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12188-12195.
- [60] Ma Y X, Liu Z, Zhou P, et al. Coherent beam combination of three fiber amplifiers with multi-dithering technique[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(4): 044204.
- [61] Ma Y X, Zhou P, Wang X L, et al. Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. Optics Letters, 2010, 35(9): 1308-1310.
- [62] Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, 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.
- [63] Ma Y X, Zhou P, Wang X L, et al. Active phase locking of fiber amplifiers using sine-cosine single-frequency dithering technique[J]. Applied Optics, 2011, 50(19): 3330-3336.
- [64] Su R T, Zhang Z X, Zhou P, 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.
- [65] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [66] Chang Q, Hou T Y, Chang H X, et al. Iteration-free, simultaneous correction of piston and tilt distortions in large-scale coherent beam combination systems[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 34863-34879.
- [67] Chang Q, Hou T Y, Long J H, et al. Experimental phase stabilization of a 397-channel laser beam array via image processing in dynamic noise environment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(19): 6542-6547.
- [68] 常琦, 高志强, 邓宇, 等. 强噪声下光纤激光相干合成突破千路[J]. 中国激光, 2023, 50(6): 0616001.
- Chang Q, Gao Z Q, Deng Y, et al. Coherent synthesis of fiber laser breaks through thousands of paths under strong noise[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(6): 0616001.
- [69] Tünnermann H, Shirakawa A. Deep reinforcement learning for coherent beam combining applications[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24223-24230.
- [70] Du Q, Wang D, Zhou T, et al. 81-beam coherent combination using a programmable array generator[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5407-5418.
- [71] Jia H L, Zuo J, Bao Q L, et al. A phase-error prediction method for coherent beam combining via convolutional neural network[J]. Optik, 2021, 246: 167827.
- [72] Liu R Q, Peng C, Liang X Y, et al. Coherent beam combination far-field measuring method based on amplitude modulation and deep learning[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(4): 041402.
- [73] 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.
- [74] 高志强, 常琦, 刘昊宇, 等. 机器学习在光纤激光阵列相位调控中的研究进展与发展趋势[J]. 中国激光, 2023, 50(11): 1101010.
- Gao Z Q, Chang Q, Liu H Y, et al. Research progress and development trend of machine learning in phase control of fiber laser arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(11): 1101010.
- [75] Jiang M, Wu H S, An Y, et al. Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect[J]. Photonix, 2022, 3(1): 1-27.
- [76] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-based phase control method for tiled aperture coherent beam combining systems[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(4): e59.
- [77] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-assisted, two-stage phase control method for high-power mode-programmable orbital angular momentum beam generation[J]. Photonics Research, 2020, 8(5): 715-722.
- [78] Chang Q, An Y, Hou T Y, et al. Phase-locking system in fiber laser array through deep learning with diffusers[C]//Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC), October 24-27, 2020, Beijing. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2020: M4A.96.
- [79] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-based coherent fiber laser array system for power scaling and spatial light

- structuring[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 11981: 119810F.
- [80] Goodno G D, Shih C C, Rothenberg J E. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers[J]. Optics Express, 2010, 18(24): 25403-25414.
- [81] Yu H L, Ma P F, Wang X L, et al. Influence of temporal-spectral effects on ultrafast fiber coherent polarization beam combining system[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(10): 105301.
- [82] Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Active coherent beam combination of two high-power single-frequency nanosecond fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 497-499.
- [83] Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Active coherent beam combining of a five-element, 800 W nanosecond fiber amplifier array[J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 3978-3980.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 张志新, 于海龙, 支冬, 等. 飞秒光纤激光相干偏振合成系统全光纤光程差自适应控制方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0906003.
Zhang Z X, Yu H L, Zhi D, et al. All fiber optical path difference adaptive control method in femtosecond fiber laser coherent polarization beam combination system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0906003.
- [87] 常洪祥, 靳凯凯, 张雨秋, 等. 基于光谱滤波的宽谱激光相干合成光程与相位同步控制研究[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1706003.
Chang H X, Jin K K, Zhang Y Q, et al. Research on optical path and phase simultaneous control in coherent beam combining of broadband laser based on spectral filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(17): 1706003.
- [88] Jabczyński J K, Gontar P, Gorajek Ł, et al. Simplified sensitivity analysis of coherent beam combining in a tiled aperture architecture[J]. Applied Optics, 2021, 60(17): 5012-5019.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 李枫, 左竞, 黄冠, 等. 19 孔径光纤阵列激光经 2 km 湍流传输实现目标在回路的相干合成[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0316002.
Li F, Zuo J, Huang G, et al. Coherent synthesis of target in loop by 19-aperture fiber array laser through 2 km turbulent transmission[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0316002.
- [92] 李枫, 邹凡, 姜佳丽, 等. 57 孔径光纤激光相控阵自适应光学系统实现经 2 km 大气传输的目标在回路相干合成[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0616002.
Li F, Zou F, Jiang J L, et al. 57-aperture fiber laser phased array adaptive optical system realizes the coherent synthesis of targets transmitted through 2 km atmosphere in the loop[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0616002.
- [93] Wang X, Wang X L, Zhou P, et al. 350-W coherent beam combining of fiber amplifiers with tilt-tip and phase-locking control[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(19): 1781-1784.
- [94] 支冬, 马闯星, 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(10): 1005007.
Zhi D, Ma Y X, Ma P F, et al. Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10): 1005007.
- [95] 马鹏飞. 高功率光纤激光相干偏振合成系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
Ma P F. Study on coherent polarization synthesis system of high power fiber laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [96] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(8): 1191-1196.
- [97] Liu Z J, Ma P F, Su R T, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: progress and prospect[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 34(3): A7-A14.
- [98] Uberna R, Bratcher A, Alley T G, et al. Coherent combination of high power fiber amplifiers in a two-dimensional re-imaging waveguide[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13547-13553.
- [99] Tao R M, Si L, Ma Y X, et al. Coherent beam combination of fiber lasers with a strongly confined waveguide: numerical model[J]. Applied Optics, 2012, 51(24): 5826-5833.
- [100] Yan Y F, Liu Y, Zhang H Y, et al. Principle and numerical demonstration of high power all-fiber coherent beam combination based on self-imaging effect in a square core fiber[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 444-455.
- [101] Cheung E C, Ho J G, Goodno G D, et al. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array[J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 354-356.
- [102] Aleshire C, Steinkopf A, Jauregui C, et al. Simplified design of optical elements for filled-aperture coherent beam combination[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 21035-21045.
- [103] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, et al. Coherent beam combination of a hexagonal distributed high power fiber amplifier array[J]. Applied Optics, 2009, 48(33): 6537-6540.
- [104] Zhang M Q, Zhi D, Ma Y X, et al. Coherent fiber-optics-array collimator based on a single unitary collimating lens: proposal design and experimental verification[J]. Applied Optics, 2019, 58(6): 1491-1495.
- [105] He S Y, Ma Y X, Luo G, et al. A novel fiber collimator with the rod lens for coherent beam combination of fiber laser array[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12554: 1255418.
- [106] 耿超, 杨燕, 李枫, 等. 光纤激光相干合成研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170692.
Geng C, Yang Y, Li F, et al. Research progress of fiber laser coherent combining[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170692.
- [107] Yang K W, Zhu G S, Hao Q, et al. Coherent polarization beam combination by microcontroller-based phase-locking method[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2129-2132.
- [108] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, et al. Coherent polarization beam combining of four high-power fiber amplifiers using single-frequency dithering technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(12): 1024-1026.
- [109] Ma P F, Zhou P, Su R T, et al. Coherent polarization beam combining of eight fiber lasers using single-frequency dithering technique[J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(6): 456-458.
- [110] Ma P F, Zhou P, Xiao H, et al. Generation of a 481-W single frequency and linearly polarized beam by coherent polarization locking[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(19): 1936-1938.
- [111] 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 5 kW 级高亮度激光输出[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0415004.
Liu Z J, Zhou P, Ma P F, et al. Coherent polarization combination of four fiber amplifiers with high power and narrow line width to achieve 5 kW high brightness laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415004.

- [112] Ma P F, Tao R M, Wang X L, et al. Coherent polarization beam combination of four mode-locked fiber MOPAs in picosecond regime[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4123-4130.
- [113] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126021.
- [114] 李雨薇, 刘珂, 谢亮华, 等. 全纤化相干合成实现高稳定性近单模万瓦激光输出[J]. *中国激光*, 2023, 50(3): 0316001.
Li Y W, Liu Y, Xie L H, et al. Realization of high stability near single-mode 10 thousand watt laser output by all-fiber coherent synthesis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(3): 0316001.
- [115] Wang X, Leng J, Zhou P, et al. 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(3): 785-790.
- [116] 马鹏飞, 马闯星, 栗荣涛, 等. 8 kW 级光纤激光优质高效相干合成[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(5): 20190577.
Ma P F, Ma Y X, Su R T, et al. High-quality and efficient coherent combination of 8 kW fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190577.
- [117] 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.
- [118] Su R T, Xi J C, Chang H X, et al. Coherent combing of 60 fiber lasers using stochastic parallel gradient descent algorithm [C]//*Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C)*, September 29-October 3, 2019, Vienna. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2019: JW2A.1.
- [119] Stark H, Buldt J, Müller M, et al. 1 kW, 10 mJ, 120 fs coherently combined fiber CPA laser system[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 969-972.
- [120] Stark H, Benner M, Buldt J, et al. Pulses of 32 mJ and 158 fs at 20-kHz repetition rate from a spatiotemporally combined fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 3007-3010.
- [121] Le Dortz J, Heilmann A, Antier M, et al. Highly scalable femtosecond coherent beam combining demonstrated with 19 fibers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1887-1890.
- [122] Daniault L, Hanna M, Lombard L, et al. Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 621-623.
- [123] Siiman L A, Chang W Z, Zhou T, et al. Coherent femtosecond pulse combining of multiple parallel chirped pulse fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 18097-18116.
- [124] Bagayev S N, Leshchenko V E, Trunov V I, et al. Coherent combining of femtosecond pulses parametrically amplified in BBO crystals[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1517-1520.
- [125] Qian J Y, Wang P F, Peng Y J, et al. Pulse combination and compression in hollow-core fiber for few-cycle intense mid-infrared laser generation[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 477-483.
- [126] Mu J E, Li Z L, Jing F, et al. Coherent combination of femtosecond pulses via non-collinear cross-correlation and far-field distribution[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 234-237.
- [127] Peng C, Liang X Y, Liu R Q, et al. High-precision active synchronization control of high-power, tiled-aperture coherent beam combining[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3960-3963.
- [128] Su R T, Zhou P, Ma Y X, et al. 1.2 kW average power from coherently combined single-frequency nanosecond all-fiber amplifier array[J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(12): 122702.
- [129] Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Actively coherent beam combining of two single-frequency 1083 nm nanosecond fiber amplifiers in low-repetition-rate[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(15): 1485-1487.
- [130] 王涛, 李灿, 刘洋, 等. 基于光纤拉伸器锁相实现两路超快激光相干偏振合成[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(6): 20220869.
Wang T, Li C, Liu Y, et al. Coherent polarization beam combination of two ultrafast laser channels based on fiber stretcher phase locking[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 20220869.
- [131] Zhou P, Liu Z J, Xu X J, et al. Comparative study on the propagation performance of coherently combined and incoherently combined beams[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 1640-1647.
- [132] Vorontsov M A, Kolosov V. Target-in-the-loop beam control: basic considerations for analysis and wave-front sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(1): 126-141.
- [133] Liu L, Vorontsov M A, Polnau E, et al. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6708: 67080K.
- [134] Bruesselbach H, Wang S, Minden M, et al. Coherent phase-locking of seven laser transmitters on a 408 meter outdoor range [C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 22-27, 2005, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2006: 746-748.
- [135] Jolivet V, Bourdon P, Bennai B Y, 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.
- [136] Tao R, Ma Y, Si L, et al. Target-in-the-loop high-power adaptive phase-locked fiber laser array using single-frequency dithering technique[J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(2): 285-291.
- [137] Ma Y X, Zhou P, Tao R M, et al. Target-in-the-loop coherent beam combination of 100 W level fiber laser array based on an extended target with a scattering surface[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1019-1021.
- [138] Zhi D, Zhang Z X, Ma Y X, et al. Realization of large energy proportion in the central lobe by coherent beam combination based on conformal projection system[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2199.
- [139] 周朴. 从“激光合成”到“合成激光”: 光束合成技术实现对激光的赋能[EB/OL]. [2023-03-05]. https://mp.weixin.qq.com/s/cm_JhDWpLRFC6n511iwuq.
Zhou P. From "laser synthesis" to "synthetic laser": beam synthesis technology realizes the empowerment of laser[EB/OL]. [2023-03-05]. https://mp.weixin.qq.com/s/cm_JhDWpLRFC6n511iwuq.
- [140] 肖虎. 掺镱光纤激光级联泵浦技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Xiao H. Study on Yb-doped fiber laser cascade pumping technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [141] 李瑞显. 掺镱光纤对短波长激光的吸收特性[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
Li R X. Absorption characteristics of Yb-doped fiber for short wavelength laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [142] 姜曼, 肖虎, 周朴, 等. 1018 nm 短波长掺镱光纤激光高功率自组织相干合成[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2219-2222.
Jiang M, Xiao H, Zhou P, et al. High power self-organized coherent beam combination of 1018 nm Yb-doped fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2219-2222.
- [143] Wang X, Zhou P, Wang X L, et al. 108 W coherent beam combining of two single-frequency Tm-doped fiber MOPAs[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105101.
- [144] Bowman D J, King M J, Sutton A J, et al. Internally sensed optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1137-1139.
- [145] Roberts L E, Ward R L, Francis S P, et al. High power compatible internally sensed optical phased array[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13467-13479.
- [146] 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 F, Geng C, Li X Y, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(6): 602-609.
- [147] Long J H, Su R T, Chang Q, et al. Coherently combining of fiber lasers based on two-stage phase control[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11562: 115620Y.
- [148] Long J H, Chang H X, Zhang Y Q, et al. Compact internal sensing phase locking system for coherent combining of fiber laser array[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 148: 107775.
- [149] Long J H, Jin K K, Hou T Y, et al. Wavefront aberration mitigation with adaptive distributed aperture fiber array lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11890: 1189008.
- [150] Long J H, Su R T, Hou T Y, et al. System design for coherent combined massive fiber laser array based on cascaded internal phase control[J]. Applied Optics, 2022, 61(34): 10222-10227.
- [151] Long J H, Zhang J Y, Chang H X, et al. Coherent combining of a fiber laser array via cascaded internal phase control technique [J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(8): 081402.
- [152] Chang H X, Su R T, Long J H, et al. Distributed active phase-locking of an all-fiber structured laser array by a stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1089-1098.
- [153] Chang H X, Su R T, Zhang Y Q, et al. Cascaded internal phase control of all-fiber coherent fiber laser array[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 913195.
- [154] Chang H X, Su R T, Chang Q, et al. Internal phase control of coherent fiber laser array without ambiguous phase based on double wavelength detection[J]. Applied Optics, 2022, 61(12): 3429-3434.
- [155] 常洪祥, 粟荣涛, 龙金虎, 等. 全光纤激光阵列主动相位控制技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(4): 041004.
- Chang H X, Su R T, Long J H, et al. Research progress of active phase-locking technique of an all-fiber coherent laser array [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(4): 041004.
- [156] Hou T Y, Zhi D, Tao R M, et al. Spatially-distributed orbital angular momentum beam array generation based on greedy algorithms and coherent combining technology[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 14945-14958.
- [157] Hou T, Zhang Y, Chang Q, et al. High-power vortex beam generation enabled by a phased beam array fed at the nonfocal-plane[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 4046-4059.
- [158] Long J H, Hou T Y, Chang Q, et al. Generation of optical vortex lattices by a coherent beam combining system[J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3665-3668.
- [159] Long J H, Chang H X, Zhang J Y, et al. Generating the optical vortex by optimizing beam arrangement of the coherent laser array[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109757.
- [160] Kurti R S, Halterman K, Shori R K, et al. Discrete cylindrical vector beam generation from an array of optical fibers[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13982-13988.
- [161] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, et al. Generation of azimuthally and radially polarized beams by coherent polarization beam combination[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2658-2660.
- [162] Zhang Y Q, Hou T Y, Chang H X, et al. Tight focusing properties and focal field tailoring of cylindrical vector beams generated from a linearly polarized coherent beam array[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5259-5269.
- [163] 张雨秋. 高功率光纤激光阵列的传输与调控[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.
- Zhang Y. Propagation and control of high-power fiber laser arrays [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.
- [164] 张钧翔, 付士杰, 盛泉, 等. 33.8 W 高效率中红外 2.8 μm 光纤激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(7): 0715001.
- Zhang J X, Fu S J, Sheng Q, et al. Efficient 33.8 W mid-infrared fiber laser operating at 2.8 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(7): 0715001.
- [165] 郭春雨, 董繁龙, 沈鹏生, 等. 20 W 中红外 2.8 μm 全光纤激光器研究[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1416001.
- Guo C Y, Dong F L, Shen P S, et al. Study on 20 W mid-infrared 2.8 μm all-fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1416001.
- [166] Zou J H, Hong J F, Zhao Z, et al. 3.6 W compact all-fiber Pr^{3+} -doped green laser at 521 nm[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(5): 056001.
- [167] 姜博王, 张雨秋, 常洪祥, 等. 倾斜可控阵列光场的二维扫描技术研究[J]. 中国激光, 2024, 51(2): 0205001.
- Shu B W, Zhang Y Q, Chang H X, et al. Two-dimensional quasi-continuous scanning by tilting phase controlled coherent laser arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(2): 0205001.
- [168] Klenke A, Breitkopf S, Kienel M, et al. 530 W, 13 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2283-2285.
- [169] 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.
- [170] Becker N C, Hädrich S, Eidam T, et al. Adaptive pre-amplification pulse shaping in a high-power, coherently combined fiber laser system[J]. Optics Letters, 2017, 42(19): 3916-3919.
- [171] Müller M, Klenke A, Steinkopf A, et al. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(24): 6037-6040.
- [172] 姜宗福, 孙全, 周朴, 等. 光纤激光相干合束”虚拟仿真课程 [EB/OL]. [2023-03-05]. <https://www.ilab-x.com/details/page?id=5040&.isView=true>.
- Jiang Z F, Sun Q, Zhou P, et al. Virtual simulation course of fiber laser coherent beam combination[EB/OL]. [2023-03-05]. <https://www.ilab-x.com/details/page?id=5040&.isView=true>.
- [173] 周朴. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[EB/OL]. [2023-03-05]. <https://www.opticsjournal.net/CL/Online/News/PT201221000082Yu2x5.html>.
- Zhou P. Research progress and development trend of high average power fiber laser[EB/OL]. [2023-03-05]. <https://www.opticsjournal.net/CL/Online/News/PT201221000082Yu2x5.html>.

Coherent Beam Combining of Fiber Lasers by Actively Phase Control

Zhou Pu^{1**}, Su Rongtao^{1,2,3*}, Ma Yanxing^{1,2,3}, Wu Jian¹, Ma Pengfei^{1,2,3}, Li Can¹,
Wang Xiaolin^{1,2,3}, Leng Jinyong^{1,2,3}, Zhang Yuqiu¹, Ren Shuai^{1,4}, Chang Hongxiang¹,
Long Jinhui¹, Wang Tao¹, Jiang Min^{1,5}, Li Jun¹

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

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

³State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

⁴School of Information and Communications, National University of Defense Technology, Wuhan 430035, Hubei, China;

⁵Test Center, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, Shaanxi, China

Abstract

Significance Coherent combining of fiber lasers by active phase control is an effective way to break through the power limit of a single fiber laser and achieve higher output power while maintaining good beam quality. Based on the research progress in China and abroad, this paper introduces the representative achievements in the past 20 years made by the coherent beam combination research group in National University of Defense Technology and presents the prospect of coherent beam combining (CBC) of fiber lasers.

Progress We present our representative achievements in CBC of fiber lasers in this paper, which are organized as follows.

First, the high power key components for CBC were designed and manufactured. Various types of fiber amplifiers have achieved power breakthroughs. For example, a 500 W level single-frequency fiber amplifier, 7 kW level narrow line-width fiber amplifier, and 500 W femtosecond fiber amplifier were obtained. High-power phase modulators based on piezoelectric ceramics were developed. We also designed two kinds of high power adaptive fiber-optics collimators (AFOC), which were based on flexible hinges and piezoelectric bimorph actuators respectively.

Second, the active phase control of fiber lasers was studied. Various phase control methods were deeply researched, including the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm, dithering technique, heterodyne interference measurement technique, and deep learning algorithm. Some innovative phase control techniques were proposed to increase the control bandwidth, such as the single dithering technique, orthogonal dithering technique, and cascaded phase control technique.

Third, we also studied the high precision control of other optical parameters for CBC, including optical path difference control, tilt-tip control, and defocus aberration control. For example, we proposed an all-fiber optical path difference adaptive control method and simultaneously controlled phase and optical path in coherent combing of broadband light sources based on spectral filtering. In addition, a collimator was designed for defocus aberration compensation.

Fourth, beam combination techniques were demonstrated. Beam combination can be classified into tiled aperture and filled aperture. In the aspect of tiled aperture, a series of beam combination methods with high fill factor were designed and developed. For example, we proposed a coherent fiber-optics-array collimator that was mainly composed of a single unitary collimating lens and a prism. We also proposed a novel scheme of fiber collimator based on rod lens, which had good application prospects in the CBC of a large number of fiber lasers. In the aspect of filled aperture, we experimentally testified coherent polarization beam combining (CPBC) of eight low power fiber lasers, and 5.02 kW output power was obtained by CPBC of four fiber lasers with combining efficiency of 93.8% and beam quality of $M^2 < 1.3$.

Fifth, based on the enabling technology mentioned above, a number of experimental systems were built. For high power fiber laser CBC systems, 1.08 kW output power was obtained by coherent combing of nine fiber lasers in 2011; CBC of a seven-channel fiber laser array with 7.1 kW overall output power was reported in 2020, and 21.6 kW was generated by CBC of 19 fiber lasers in 2021. For a large number of fiber laser CBC systems, phase locking of 32, 60, and 107 fiber lasers was realized by using the SPGD algorithm in 2014, 2019, and 2020 respectively. Based on the heterodyne interference measurement technique, efficient phase compensation of 397 and 1027 laser channels were realized in 2022 and 2023 respectively. For the pulsed fiber laser CBC system, 1.2 kW average power was generated by the coherent combining of seven nanosecond fiber amplifiers array in 2013; CPBC of two-femtosecond fiber lasers was realized with

313 W average power in 2018, and CPBC of two ultrafast laser channels was realized based on fiber stretcher and SPGD algorithm in 2022. For target-in-the-loop CBC systems, CBC of a fiber laser array with nine channels and 100 W level was reported in 2013, and atmospheric turbulence compensation was realized over a 1 km level propagation path for a six-channel fiber laser array based on target-in-the-loop CBC in 2018. In addition, CBC of fiber lasers with special wavelengths such as 1018 nm and 2 μm has also been achieved.

Sixth, the novel compact internal sensing phase locking techniques were presented. By using those techniques, the phase noises in the laser channels can be detected and compensated for before the lasers form the laser array. Based on spatial structure, internal phase locking of 12 fiber lasers was realized, and 1.5 kW output power was generated by CBC of three fiber lasers. Based on an all-fiber network, methods to compensate for π -ambiguity between channels were proposed, and CBC of three fiber lasers was experimentally verified.

Seventh, CBC technique was employed for light field control, and special light fields such as vortex beams and vectorial beams were generated. For example, by CBC of six fiber lasers, a vortex beam with an output power of more than 1.5 kW has been generated.

Conclusions and Prospects Our group has researched CBC for nearly 20 years. Some representative results have been achieved. Artificial intelligence and light field control have been integrated with CBC. Some innovative breakthroughs have also been made in interdisciplinarity. The scientific research results have been continuously added to undergraduate and graduate courses such as *Physical Optics* and *Advanced High Energy Laser Technology*. A large number of graduate students have become the backbone force of scientific research. In the future, we will focus on the development of science and technology, student education, and talent cultivation integrally and make unremitting efforts to produce innovative results in this field.

Key words fiber laser; coherent beam combining; active phase control