

文章编号: 0258-7025(2009)11-2773-07

## 激光相干合成的研究进展

刘泽金 侯 静 许晓军 冯 莹 周 朴 陈子伦 马阎星 王小林 雷 兵 曹润秋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 基于相干合成的新型高能激光体系结构是高能激光技术发展的重要方向。报道利用主动相位控制和自组织相干实现多路光纤放大器以及光纤-板条混合放大链路相干合成的最新实验结果。

**关键词** 高能激光系统; 相干合成; 主动相位控制; 自组织

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2773

## Research Progress of Laser Beam Combining

Liu Zejin Hou Jing Xu Xiaojun Feng Ying Zhou Pu Chen Zilun

Ma Yanxing Wang Xiaolin Lei Bing Cao Jianqiu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The high energy laser system architecture based on coherent beam combining has been an important research field for high energy laser technology. The recent experimental results of coherent beam combining of multiple fiber amplifiers and fiber-slab compound amplifiers using active phase controlling and self-organization are presented in detail.

**Key words** high energy laser system; coherent beam combining; active phase control; self-organization

### 1 引 言

提高光源的平均亮度是激光技术领域一个重要命题,实现平均亮度提高的一个重要手段就是提高激光器输出能量。由于激光器的效率问题,提高激光输出能量必将产生大量废热,成倍增加的废热造成的各种热效应进一步限制了光束质量,又降低了平均亮度。另一个重要手段就是提高光束质量,因而在自适应光学产生后,许多提高光束质量的技术,如自适应谐振腔<sup>[1]</sup>、光束净化<sup>[2]</sup>、相位共轭<sup>[3]</sup>和对大气效应的自适应补偿等在提高光束质量方面得到了许多应用,但随着输出能量的进一步增加,这些单孔径自适应光学技术也正在受到热的挑战。因而“热”和“亮度”这一对矛盾已经成为提高传统结构激光器平均亮度的最大障碍。

自从半导体激光抽运技术诞生以来,全固态激光的高效率和高亮度输出正在引起激光技术领域一

场新的革命。但由于介质的非线性效应、热损伤等物理机制的限制,单台激光器的平均亮度仍然受限。为实现更高的亮度输出,必须在提高激光输出功率的同时保持良好的光束质量。一种重要的技术途径是采用激光器相干合成的方法,即激光器采用多模块结构,利用多孔径自适应光学技术,控制各单元(孔径)激光器输出光束的相位达到锁相输出,实现光束的相干合成。相干合成的意义在于:一方面,在保持光束质量的同时,提高了输出光束的功率,实现了亮度的提高,实现了远距离传输;另一方面,模块化的结构,分散了热效应,克服了“热”造成高能激光平均亮度下降的主要影响因素。因而,相对于内部能量高度集中的高能固体激光传统体系结构而言,基于相干合成的新型体系结构有可能解决亮度和热管理两个难题,已经成为高能激光技术发展的重要方向。由于固态激光的相干合成技术在国防和民用

收稿日期: 2009-03-25; 收到修改稿日期: 2009-08-21

作者简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

的多个领域都将有广阔的应用前景,目前国内外多家研究机构都开展了相关研究,比较常用的方法有基于主振荡功率放大器(MOPA)结构的主动相位控制方案<sup>[4~10]</sup>以及自组织相干合成<sup>[11~21]</sup>等。本文介绍我们在光纤激光和固体激光相干合成方面的最新研究进展。

## 2 光纤激光相干合成研究进展

光纤激光的相干合成技术在国防和民用的多个领域都将有广阔的应用前景,目前国内外多家研究机构都开展了相关研究,比较常用的方法有自组织相干合成和以及基于 MOPA 结构的主动相位控制方案等。在 MOPA 结构的主动相位控制方案中,通常采用的主动相位控制方法主要有 3 种,即外差法、多抖动法以及优化算法相位控制。利用外差法主动相位控制进行相干合成是目前研究最为热门的方法,诺格(Northrop Grumman)公司、麻省理工学院、英国 Qineti Q 公司等单位开展了外差法光纤激光相干合成的理论与实验研究。诺格公司利用外差法实现了 7 路固体激光相干合成,总的输出功率达到了 105 kW<sup>[4,5]</sup>。多抖动法是美国空军研究实验室 T. M. shay 等<sup>[8]</sup>提出的一种新型相位控制方法,与外差法相比,该方法不需要参考光,并且只需要一个光电探测器,利用电学相关检测的方法即可分离出多路相位控制信号,因此也备受关注。美国空军研究实验室已经<sup>[8]</sup>利用多抖动法实现 5 路光纤激光相干合成,总的输出功率超过 725 W。优化算法直接对系统性能指标进行优化,具有实现容易、控制参数的所有维并行计算等特点,近年来在自适应光学技术和自适应光学系统中得到了广泛的运用。马里兰大学 Liu<sup>[9]</sup>和麻省理工学院的 Kansky 等<sup>[10]</sup>已经分别实现了基于(SPGD)算法的多路光束相干合成,其中 Kansky 于 2006 年报道了基于 SPGD 算法的 48 路光纤激光相干合成实验结果。但上述 SPGD 算法相干合成都限于种子光分束后直接合成,并没有引入放大器带来的动态相位噪声。

光纤激光器自组织相干合成的研究热潮始于 20 世纪 90 年代末期,以光纤耦合器或多芯光纤为基础构建全光纤结构的合成阵列是其主要特点。Sabourdy 等<sup>[11]</sup>利用 M-Z 树型结构实现了 4 路光纤激光的合成,输出功率为 152 mW,合成效率为 95%。美国 HRL 实验室 Bruesselbach 等<sup>[12]</sup>利用 4 个耦合器构成树型复合结构实现了 5 路光纤激光自组织相干合成,Minden 等<sup>[13]</sup>利用锥形光纤束作输出耦合器,各

激光器通过锥形光纤束产生倏逝波耦合而实现锁相输出,成功实现 5 路光纤激光的相干合成。为了避免单一光纤输出功率的限制,随后发展了带公共外腔的合成阵列,包括泰伯腔、自傅里叶变换腔、自成像腔、维纳-迈克尔孙腔及其改进型。德国 M. Wrage 等<sup>[14]</sup>利用泰伯腔对 18 核掺铍多芯光纤进行模式选择实现了锁相输出。美国 C. J. Corcoran 等<sup>[15]</sup>利用自傅里叶变换腔实现了 7 路光纤激光的相干组束。Zhou Yi 等<sup>[16]</sup>先后利用自成像腔实现二单元光纤激光器的相位锁定。中国科学院物理所<sup>[17]</sup>、中国科学院西安光学精密机械研究所<sup>[18]</sup>和中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[19,20]</sup>分别利用自成像腔实现了光纤激光器的相位锁定。其中中国科学院上海光学精密机械研究所利用自成像腔实现 4 路光纤激光相干合成,总输出功率达到了 26 W<sup>[20]</sup>。

本课题组对光纤激光主动相位控制相干合成和自组织相干合成开展了大量的理论与实验研究<sup>[20]</sup>。在主动相位控制相干合成方面,迄今为止,已经分别利用外差法、多抖动法以及 SPGD 法实现了 3 路瓦量级光纤放大器相干合成,并利用多抖动法实现了两路高功率光纤放大器相干合成,总输出功率超过 29 W,在此基础上实现了两路光纤-板条混合放大链的相干合成;利用 SPGD 算法进行了 6 路高功率光纤放大器相干合成实验,总输出功率为 73.5 W。在自组织相干合成方面,提出了两种自组织相干合成的实验结构,目前已经利用互注入结构实现了 4 路光纤激光相干合成,利用耦合环结构实现了 3 路光纤激光相干合成。

### 2.1 主动相位控制相干合成

主动相位控制相干合成的基本原理如图 1 所示,主振荡激光器(MO)作为种子激光器,输出的光束经分束器分为  $N$  路,每一路均各含有一个相位调制器(PM)和一个光纤放大器(AMP),相位调制器

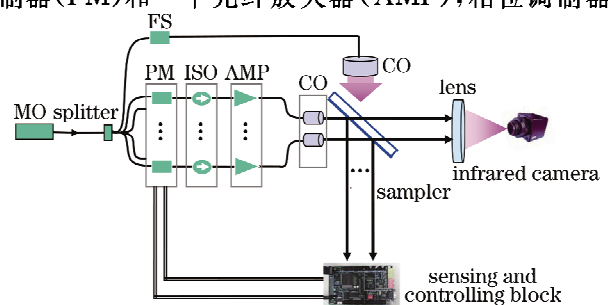


图 1 主动相位控制相干合成方案基本原理

Fig. 1 Basic setup for coherent beam combining using active phase controlling

的后端接隔离器(ISO)加以保护。同时还分出一路作为参考光,光路上设置移频器(FS)。多路光纤放大器的光束通过准直器阵列(CO)输出。阵列光束经过分光镜后,一部分光束进入探测与控制模块,得出每路的相位校正器件的控制电压,实现对光纤放大器相位变化的实时补偿,确保准直器阵列输出的光束相位保持一致。阵列光束经过分光镜的另一部分光束经过透镜聚焦,相机放置在透镜的后焦平面上,用来观察光束的远场图样及相干合成的效果。

在外差法主动相位控制相干合成系统中,阵列光束经过分光镜后,一部分与参考光干涉,通过外差法<sup>[4~7]</sup>探测干涉信号,实时检测到多路光纤放大器的相位变化情况。在多抖动法主动相位控制相干合成系统中,首先分别对不同频率的射频(RF)进行调相,阵列光束经过分光镜后,一部分光束经透镜聚焦于光电探测器上,通过信号处理电路<sup>[8]</sup>分离出每一路的相位误差信号。在利用 SPGD 算法主动相位控制相干合成系统中,阵列光束经过分光镜后被分成两部分,一部分光束经透镜聚焦,光电探测器放置于透镜的后焦平面上,紧贴于探测器前端放置小孔

光阑,信号处理电路执行 SPGD 算法并将计算得到的相位控制信号施加给相位调制器用于相位控制<sup>[9,10]</sup>,完成系统闭环。

利用外差法主动相位控制,我们实现了 3 路瓦量级光纤激光的相干合成<sup>[22~25]</sup>。实验采用全保偏光路,主振荡激光器是分布反馈式保偏光纤激光器,中心波长 1083 nm,线宽小于 1 MHz,相位控制用 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器实现,所有调制器的半波电压均在 3.5 V 左右。主振荡的光束通过保偏光纤分束器后被分为 4 路,1 路参考臂,3 路信号臂。参考臂中的光频移 40 MHz,3 路信号臂中各有一个保偏光纤相位调制器以及一个输出功率 0~1 W 连续可调保偏光纤放大器,准直输出后的光束直径为 0.5 mm。定义光斑可见度  $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 。系统开环时,远场光斑为动态、模糊干涉条纹,如图 2(a)所示,条纹可见度为 6%;系统闭环运行时,远场光斑为稳定、高对比度干涉条纹,如图 2(b)所示,条纹可见度达到 48%。实验中 3 路光束是线性一字排开,因此得到的干涉图样是类似的条纹图形。

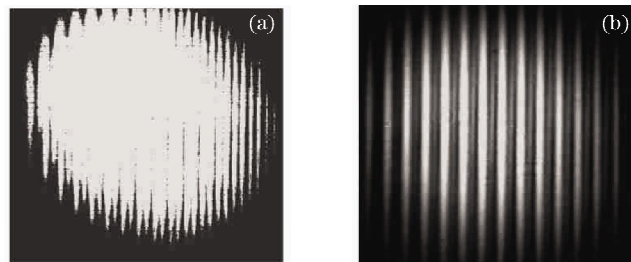


图 2 外差法主动相位控制相干合成实验结果。(a)系统开环;(b)系统闭环

Fig. 2 Experimental results of coherent beam combining using heterodyne method. (a) Open-loop; (b) close-loop

利用多抖动法主动相位控制<sup>[26~28]</sup>,实现了两路十瓦量级高功率光纤放大器相干合成,总输出功率超过了 29 W。我们对其中一路光束的相位进行了 60 kHz 的正弦调制,利用 Stanford Research System SR830 DSP 数字锁相放大器实现相位误差信号的分离,并施加到相位调制器上,实现系统闭

环。系统开环时,远场光强分布形态为动态、模糊的光斑,如图 3(a)所示。系统闭环时,远场光强分布形态为稳定、清晰的高对比度光斑,如图 3(b)所示。系统闭环远场光斑中央主瓣内的功率明显提高,系统闭环时中央主瓣功率是开环情况下的 1.72 倍,达到了理想情形的 86%。

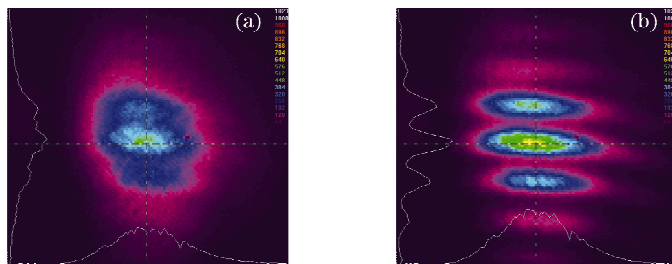


图 3 多抖动法主动相位控制相干合成实验结果。(a)系统开环;(b)系统闭环

Fig. 3 Experimental results of coherent beam combining using multi-dithering method. (a) Open-loop; (b) close-loop

利用 SPGD 算法主动相位控制<sup>[29~32]</sup>,我们实现了 6 路十瓦量级高功率光纤放大器相干合成,总输出功率达到了 73.5 W。其中 SPGD 算法由数字信号处理器(DSP)执行,控制信号更新速度已经达到 30,000 次/秒。系统开环时,远场光强分布形态为

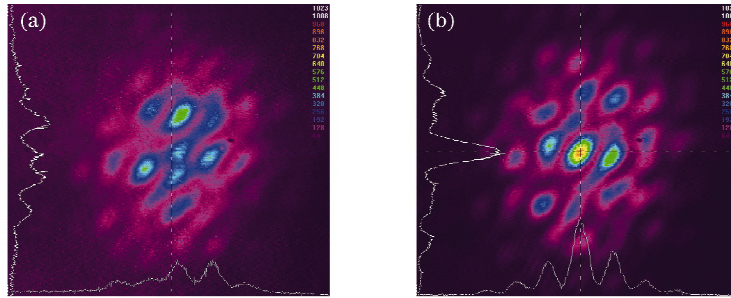


图 4 SPGD 算法 6 路十瓦量级光纤放大器相干合成实验结果。(a) 系统开环;(b) 系统闭环

Fig. 4 Experimental results of coherent beam combining of six ten-watt-level fiber amplifiers using multi-SPGD algorithm.

(a) Open-loop; (b) close-loop

## 2.2 自组织相干合成

自组织相干合成是一种自组织机理的无源相位自调整方案,其基本思路是通过光纤激光器阵列单元间的能量相互注入耦合实现自动的相位锁定,合适的能量耦合方式(即各单元间的连接方式)和足够的耦合强度是自组织锁相有效进行的关键影响因素。该方法的优点是结构简单易于实现,无需复杂的外部反馈控制回路。通过理论分析和实验研究得出,光纤激光相位受外界环境、抽运源功率不稳定等因素影响产生的随机变化以及各路光束的偏振特性都是影响相干合成效率的重要因素<sup>[34~37]</sup>。

动态、模糊的光斑,如图 4(a)所示;系统闭环时,远场光强如图 4(b)所示的光斑,能量集中度得到了明显提高,远场条纹可见度超过 81%。除了 SPGD 算法外,我们还对基于位置敏感器(PSD)的新型相位控制方法进行了理论研究<sup>[33]</sup>。

互注入结构相干合成是我们提出的一种自组织相干合成方案<sup>[38~40]</sup>。该方案通过分束器分光实现光纤激光器的互相注入锁定,此方法不需要相位监测和控制,对光纤激光器的输出功率没有特殊要求,并有很好的拓展性,可以实现高功率运行,系统结构如图 5(a)所示。目前已经利用互注入结构实现了 4 路光纤激光相干合成,图 5(b)是 4 个激光器互相注入锁定情况下的远场光斑,远场光斑是具有高对比度的干涉图样,说明激光器阵列达到了相位锁定,实现了相干输出。

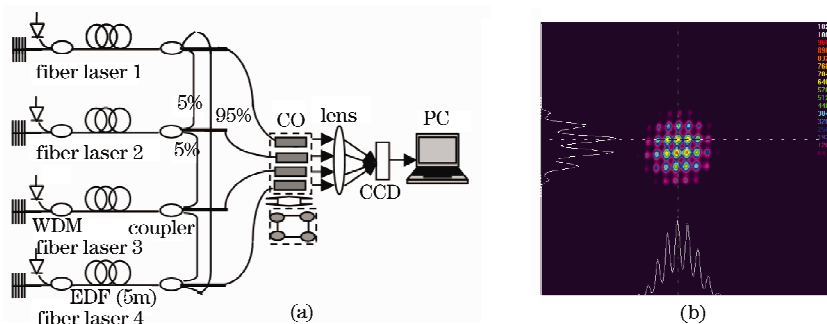


图 5 互注入结构相干合成系统结构与实验结果。(a) 系统结构;(b) 实验结果

Fig. 5 Mutual injection-locking and coherent beam combining system. (a) system setup; (b) experimental results

耦合环结构相干合成是我们提出的另一种自组织相干合成方案<sup>[41~43]</sup>。该方案的核心部分是引入的全光纤耦合环,它为各个单元激光器之间的能量相互注入耦合提供了一个全光纤通道,同时光纤环还可以起到光学滤波器的作用,只有满足原有线性腔和光纤环行腔谐振条件的模式才具有最低的损耗而起振。将熔拉型光纤耦合器的两个端口按一定规

则与相邻耦合器的端口两两相连以构成耦合环,每个耦合器余下的两个端口中一个与单元激光器相连,另一个作为激光器的输出端口,如图 6(a)所示,每个激光器均有部分能量通过耦合器进入光纤环,而光纤环中的能量在经过每个耦合器时,一部分注入耦合到与该耦合器相连的单元激光器,一部分耦合到输出端直接输出。目前已经利用耦合环结

构实现了 3 路光纤激光相干输出,实验结果如 6(b) 所示。

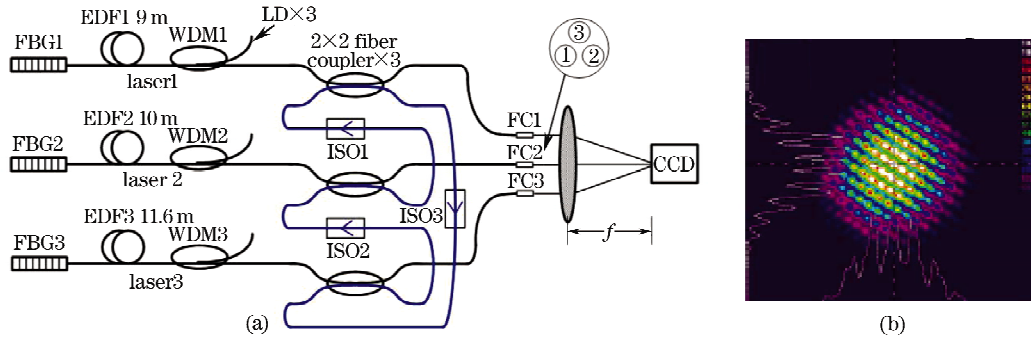


图 6 耦合环结构相干合成系统结构与实验结果。(a) 系统结构;(b)实验结果

Fig. 6 Coherent beam combining system based on power coupling-loop. (a) System setup; (b) experimental results

### 3 固体激光相干合成研究进展

迄今为止,最高相干合成输出是由基于 MOPA 结构的主动相位控制方案获得<sup>[4,5]</sup>。为了获得接近理想的相干合成的效果,MOPA 结构的主动相位控制方案一般要求各路光束保持单频、线偏光输出<sup>[44]</sup>。受限于受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)等非线性效应的影响,单路单频、线偏振光纤放大器的输出功率有限,至今仍未突破 500 W 量级<sup>[45,46]</sup>。为了获得高功率(如百千瓦量级)激光输出,则需要相当数目的光纤放大器参与相干合成,这样无疑将增加系统的复杂性,同时给相位控制带来了更多压力。美国诺格公司采用的光纤-板条混合放大链可以很好地解决这个问题,是保持高功率输出同时减少放大器单元输出、缓解相位控制系统压

力的有效途径。我们利用多抖动法实现两路光纤-板条混合放大链的相干合成,实验系统结构如图 7 所示。主振荡激光器中心波长为 1064 nm,线宽小于 1 MHz,输出激光为线偏振光。种子光经分束器分为两路,分别输入两路光纤放大器进行功率放大,其中一路在进入放大器之前接入 PM 用于相位控制。经光纤放大器后两束激光的功率分别放大至 0.53 W 和 0.72 W。光纤放大器输出光束经准直器后,以两个不同的角度入射同一 Nd:YAG 板条。由于仅进行了单程放大,放大倍数有限。经板条放大器后,两路激光功率分别为 1.02 W 和 1.27 W,输出光束的几何特征为 5 mm×2 mm 的矩形光斑。两路放大光束在近场利用几何光路进行拼接,提高阵列激光的填充因子。

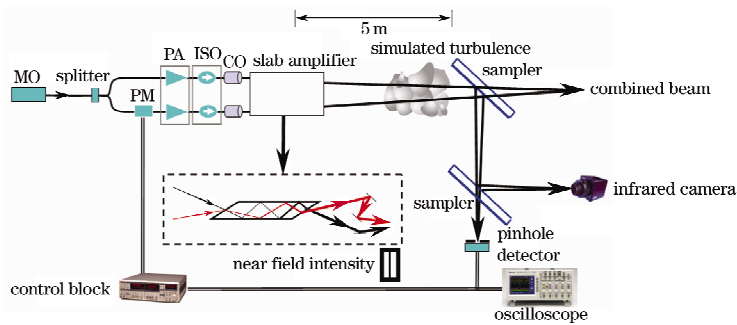


图 7 两路光纤-板条混合放大链相干合成系统示意图

Fig. 7 System setup for coherent combining of two fiber-slab amplifier chains

系统开环时,由于两路光束相位随机起伏,远场光斑图样是两路激光非相干叠加的效果,如图 8(a) 所示。系统闭环控制由多抖动法<sup>[8,31~33]</sup>实现,图 8 中的控制模块(Control block)采用电学相关检测的方法从探测信号中分离出各路光束的相位误差,对该误差信号进行适当放大后作为相位控制信号反馈

给相位调制器,形成闭环控制,实现各光束的相位锁定。由于两路激光的相位一致,闭环时远场光斑形成稳定的干涉条纹图样,如图 8(b)所示。光斑条纹可见度为 60%。系统闭环时峰值强度是开环情形下的 1.67 倍。

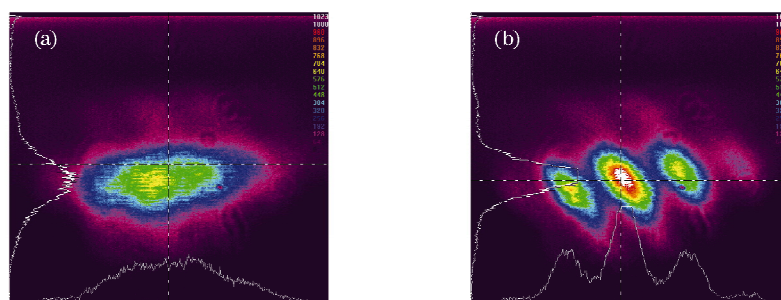


图 8 多抖动法主动相位控制固体激光相干合成实验结果。(a)系统开环；(b)系统闭环

Fig. 8 Experimental results of coherent beam combining of solid state laser using multi-dithering technique.

(a) Open-loop; (b) close-loop

## 4 结 论

由于受到稳定性、热效应、激光介质本身特性等结构因素的限制,单台全固态激光器很难获得百千瓦的高光束质量输出<sup>[47]</sup>。突破全固态激光器高功率化的发展瓶颈,解决全固态高功率激光的核心科学问题——“三高”(即高功率、高光束质量和高转换效率),将多路中等功率激光进行相干合成是一条十分可行的途径。基于相干合成的新型体系结构已经成为高能激光技术发展的重要方向。国外科研人员已经相继开始实施各类计划,如 JHPSSL<sup>[48]</sup>, APPLE<sup>[49]</sup>, ADHEL<sup>[50]</sup>等,用于支持研究板条激光、光纤激光以及半导体激光阵列的相干合成试验。本课题组近年来对光纤激光/固体激光相干合成进行了大量的理论与实验研究,目前已经利用主动相位控制方法实现了 6 路光纤相干合成,并实现了两路光纤—板条混合放大链的相干合成。但总体看来,我们对于激光相干合成的研究才刚刚起步,合成激光的路数偏少、激光功率偏低、合成光束质量离衍射极限输出还有较大差距。接下来将研究单路高功率窄线宽光纤放大器、高功率板条放大模块、放大器相位噪声带宽特性等关键技术,研判大功率光纤激光相干合成的可行性。针对高功率、高光束质量输出这个目标,优化主动相位控制系统的设计,对相干合成的配套关键技术,如光束净化技术、孔径填充技术、系统标校技术等进行研究,提高参与合成的单路大功率激光光束质量,增大激光阵列的填充因子、消除系统的倾斜像差,并开展更多路数高功率光纤放大器相干合成的实验。

## 参 考 文 献

- 1 K. N. Lafortune, R. L. Hurd, J. M. Brase *et al.*. Intracavity adaptive correction of a 10 kW, solid-state heat-capacity laser [R]. *Solid State & Diode Laser Technology Review*, Albuquerque, NM, United States, 2004
- 2 Martin Wacks. The alpha program [J]. *J. Directed Energy*, 2006, 1: 311~317
- 3 Arnaud Brignon, Jean-Pierre Huignard. Phase Conjugate Laser Optics [M]. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004
- 4 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(9): 1247~1249
- 5 S. J. McNaught, H. Komine, S. B. Weiss *et al.*. 100 kW coherently combined slab MOPAs [C]. CLEO 2009
- 6 J. Anderegg, S. Brosnan, E. C. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, 6102: 61020U
- 7 S. J. Augst, J. Ranka, T. Y. Fan *et al.*. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2007, 24(8): 1707~1715
- 8 T. M. Shay, J. T. Baker, Anthony D. Sanchez *et al.*. High power phase locking of a fiber amplifier array [C]. *SPIE*, 2009, 7195: 71951M
- 9 L. Liu, M. A. Vorontsov, E. Polnau *et al.*. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners [C]. *SPIE.*, 2007, 6708: 67080K
- 10 J. E. Kinsky, C. X. Yu, D. V. Murphy *et al.*. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count [C]. *SPIE.*, 2006, 6306: 63060G
- 11 D. Sabourdy, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot *et al.*. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2003, 11(2): 87~97
- 12 H. Bruesselbach, D. C. Jones, M. S. Mangir *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(11): 1339~1341
- 13 M. L. Minden, H. Bruesselbach, J. L. Rogers *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays [C]. *SPIE*, 2004, 5335: 89~97
- 14 M. Wrage, P. Glas, D. Fischer *et al.*. Phase locking in a multicore fiber laser by means of a Talbot resonator [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(19): 1436~1438
- 15 C. J. Corcoran, F. Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(20): 201118
- 16 Y. Zhou, L. P. Liu, C. Etson *et al.*. Phase locking of a two-dimensional laser array by controlling the far-field pattern [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(16): 3025~3027
- 17 Q. Peng, Y. Zhou, Y. Chen *et al.*. Phase locking of fibre lasers by self-imaging resonator [J]. *Electron. Lett.*, 2005, 41(4): 171~173
- 18 J. Li, K. Duan, Y. Wang *et al.*. High-power coherent beam

- combining of two photonic crystal fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(11): 888~890
- 19 B. He, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 20 Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing *et al.*. The research of coherent beam combining using active phase-controlling [J]. *Chinese J. lasers*. 2009, **36**(3): 518~524  
刘泽金, 周朴, 侯静等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 518~524
- 21 B. He, Q. Lou, W. Wang *et al.*. Experimental demonstration of phase locking of a two-dimensional fiber laser array using a self-imaging resonator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(25): 251115
- 22 Rui Xiao, Jing Hou, Ming Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2015~2022
- 23 Hou Jing, Xiao Rui. Phase-locked fiber array for coherent combination and atmosphere aberration compensation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(12): 3288~3290
- 24 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Experimental investigation of phase detection and compensation in coherent combining of fiber laser array [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 184~187  
肖瑞, 侯静, 姜宗福. 光纤激光器阵列相干合成中的相位探测与校正方法研究 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(1): 184~187
- 25 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 362~366  
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): 362~366
- 26 Ma Yanxing, Liu Zejin, Pu Zhou *et al.*. Coherent beam combination of three fiber amplifiers with multi-dithering technique [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044204
- 27 Ma Yanxing, Si Lei, Xu Xiaojun. Comparison of two phase-locking methods in fiber laser coherent combination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 110~113  
马阎星, 司磊, 许晓军. 光纤激光器相干合成中两种相位控制方法的比较 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 110~113
- 28 Yanxing Ma, Lei Si, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combination of two fiber amplifiers with multi-dithering technique [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2009, **5**(1): 18~20
- 29 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 248~256
- 30 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combining of three watt-level fiber amplifiers using DSP-based stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044202
- 31 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combining of two fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 431~436  
周朴, 刘泽金, 马阎星等. 随机并行梯度下降算法模拟两路光纤放大器相干合成与实验研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 431~436
- 32 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaolin Wang *et al.*. Coherent beam combining of two fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **5**(1): 853~856
- 33 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaojun Xu. Phase-difference detection based on a double position sensing detector configuration for coherent combination [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4868~4873
- 34 Jianqiu Cao, Qisheng Lu, Shengping Chen *et al.*. Effect of polarization controlling on coherent beam combining of two-fiber laser arrays of interferometric configuration [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 133~135
- 35 Jianqiu Cao, Jing Hou, Qisheng Lu *et al.*. Numerical research on self-organized coherent fiber laser arrays with circulating field theory [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(7): 1187~1192
- 36 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output [J]. *Chinese J. lasers*. 2008, **35**(3): 351~358  
曹润秋, 陆启生, 侯静等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 351~358
- 37 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative study of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers [J]. *Chinese J. lasers*. 2009, **36**(2): 276~280  
周朴, 刘泽金, 许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 276~280
- 38 Zilun Chen, Jing Hou, Pu Zhou *et al.*. Mutual injection-locking and coherent combining of two individual fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 2008, **44**(6): 515~519
- 39 Zilun Chen, Jing Hou, Pu Zhou *et al.*. Mutual injection locking and coherent combining of three individual fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(1): 60~63
- 40 Chen Zilun, Hou Jing, Zhou Pu *et al.*. Mutual injection locking of two individual fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7046~7050  
陈子伦, 侯静, 周朴等. 两个光纤激光器的互相注入锁定 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 7046~7050
- 41 Bing Lei, Ying Feng. Phase locking of an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 17114~17119
- 42 Lei Bing, Feng Ying, Liu Zejin. Phase locking of three fiber lasers using an all-fiber coupling loop [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6419~6424  
雷兵, 冯莹, 刘泽金. 利用全光纤耦合环实现三路光纤激光器的相位锁定 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6419~6424
- 43 Bing Lei, Ying Feng, Lian Wei *et al.*. Efficient phase locking of erbium-doped fiber ring lasers by a common ring filter [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2009, **11**: 015509
- 44 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 45 Jens Limpert, Fabian Roser, Sandro Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 46 Jay W. Dawson, Michael J. Messerly, Raymond J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13240~13266
- 47 Li Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 16~29  
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 16~29
- 48 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint High Power Solid State Laser program advancements at Northrop Grumman [J]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719507
- 49 Terry A. Dorschner. Adaptive photonic phase locked elements [R]. MTO Symposium, March, 2007
- 50 Joe Mangano. Architecture for diode high energy laser systems [R]. MTO Symposium, March 7, 2007