

文章编号: 0258-7025(2010)09-2221-14

激光相干合成的历史、现状与发展趋势

(邀请论文)

刘泽金 周 朴 王小林 马阎星 许晓军 侯 静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 回顾了激光相干合成的发展历史,分析了近两年来光纤激光相干合成技术的发展现状,梳理了光纤激光相干合成发展的若干重要动向,为激光相干合成技术发展提供参考。

关键词 激光光学;相干合成;光纤激光

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2221

The History, Development and Tend of Coherent Combining of Laser Beams

(Invited Paper)

Liu Zejin Zhou Pu Wang Xiaolin Ma Yanxing Xu Xiaojun Hou Jing

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

Abstract The history of coherent beam combining is briefly summarized, the newest development of coherent beam combining of fiber lasers is analyzed, and several important trends of coherent beam combining are pointed out, which can be a reference for future development of laser technology.

Key words laser optics; coherent beam combining; fiber laser

1 引 言

相干合成近年来成为激光技术领域的热点研究课题。激光器采用多模块结构,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。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;另一方面,模块化的结构分散了热效应,有利于克服“热”造成的高能激光平均亮度下降。基于相干合成的高能激光系统同时解决了亮度和热管理两个难题,已经成为高能激光系统发展的重要方向。进入 21 世纪以来,高功率光纤激光技术得到了迅速发展,其在高能激光系统中的巨大应用潜力也被各国军方和科研人员一致看好;而光纤激光器固有的紧凑结构非常适合于构建激光阵列,光纤激光相干合成技术成为了相干合成技术领域最为热门的研究内容。美国定向能协会(DEPS)举办的定向能系统年会和固体与二极管激光技术年会几年来均开设专题研讨相干合成技

术,激光科学领域 CLEO 和 SPIE Photonics West 等国际会议以及斯坦福大学均设置了相干合成技术研讨班。仔细研究激光技术的发展历史不难发现,相干合成技术的发展历史和激光器本身的历史几乎一样长,并且涉及气体激光器、化学激光器、半导体激光器、固体激光器、光纤激光器等各种类型。本文对激光相干合成的发展历史进行简要回顾,阐明光纤激光的出现极大地促进了相干合成技术的发展,深入分析近两年来光纤激光相干合成技术的发展现状,梳理出光纤激光相干合成发展的若干重要动向,为激光相干合成技术发展提供参考。

2 相干合成的发展历史

2.1 气体激光相干合成

早在 1964 年,美国 Bell 实验室 L. H. Enloe 等^[1,2]就实现了两路单频 He-Ne 激光器的相干合成,系统结构和实验结果如图 1 所示。进入 20 世纪

收稿日期: 2010-06-27; 收到修改稿日期: 2010-07-10

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领域方面的研究。

E-mail: zejinliu@vip.sina.com

70年代,随着高能 CO₂ 激光器的迅猛发展及其在工业、军事等领域应用潜力的不断展现,美国、前苏联

等国家的研究人员开展了大量 CO₂ 激光相干合成的理论与实验研究。

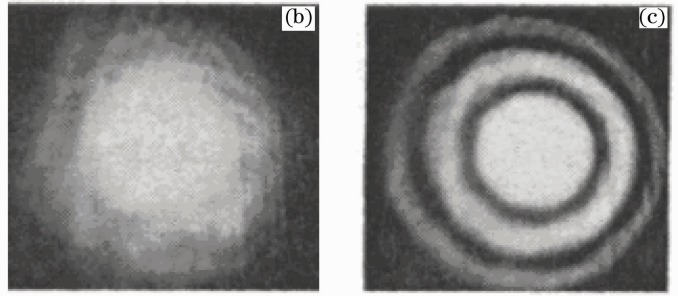
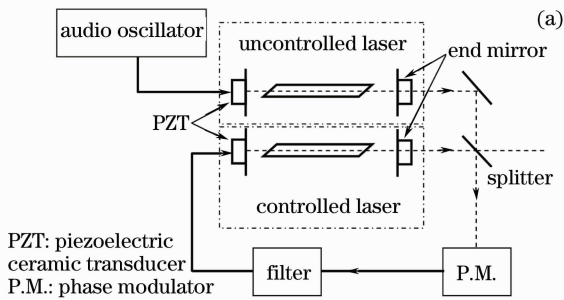


图 1 两路 He-Ne 激光相干合成系统结构与实验结果。(a)系统结构;(b)开环远场光斑;(c)闭环远场光斑

Fig. 1 System configuration and experimental results of coherent beam combining of two He-Ne laser. (a) system configuration; (b) far-field intensity pattern in open-loop; (c) far-field intensity pattern in close-loop

在美国,1971年,美国国家航空研究实验室 C. J. Buczek 等^[3]利用激光能量注入首次实现了对 60 W CO₂ 激光的相位控制。1984年, D. G. Youmans 等^[4]利用倏逝波耦合的方法实现了两路波导 CO₂ 激光的锁相输出,输出功率为瓦量级。1986年, L. A. Newman 等^[5]实现了三路波导 CO₂ 激光的锁相输出,输出功率达到了 50 W。随着 DF 化学激光器、化学氧碘激光器(COIL)等类型的化学激光器异军突起^[6],美国研究人员的研究热情很快转移到化学激光相干合成领域。

前苏联在 CO₂ 激光相干合成研究领域的研究成果无疑最为突出,为此 SPIE 专门出版了题为《Selected Papers: High-Power Multibeam Lasers and Their Phase Locking》的专辑,选录并翻译前苏联在 CO₂ 激光相干合成领域的经典文章。从 20 世纪 70 年代开始,前苏联的研究人员就对大数目、高功率 CO₂ 激光相干合成开展了研究^[7~16]。1986年, V. V. Antyukhov 等^[7~10]利用 Talbot 外腔能量相互注入的方式实现了 61 路激光相干合成,合成效率为 15%,输出功率在千瓦量级。1990年, A. A. Golubentsev 等^[11]利用腔内空间滤波的方式实现了二维 36 束激光阵列的锁相输出。1993年, V. V. Vasil'tsov 等^[12,13]利用腔内空间滤波的方式实现了 85 路激光相干合成,实验系统结构如图 2 所示,在输出功率为 500 W 时合成效率达到了 40%。I. V. Bahanov 等^[14,15]利用腔内空间滤波的方式实现了 55 路激光相干合成,输出功率为 7 kW,合成效率约为 12%,图 3 是该激光系统的外观图。

除此之外,法国、英国、加拿大、澳大利亚以及我国的研究人员也在 CO₂ 激光相干合成领域开展了大量卓有成效的工作^[17~24]。1991年,法国 G. L.

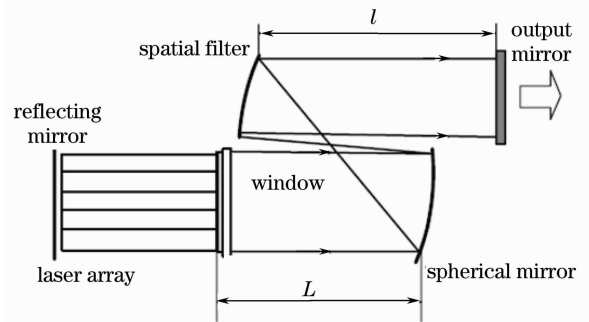


图 2 85 路 CO₂ 激光相干合成实验系统结构

Fig. 2 System configuration for coherent beam combining of 85 channels of CO₂ laser



图 3 7 kW 功率输出激光系统的外观图

Fig. 3 Picture of coherent beam combining of 55 channels of CO₂ laser with an output power of 7 kW

Bourdet 等^[17]利用倏逝波耦合的方法实现了 9 路激光相干合成,输出功率为 160 W;1992年英国 K. M. Abramski 等^[18]利用倏逝波耦合的方法实现了 5 路激光相干合成,输出功率为 125 W;A. M. Hornby 等^[19,20]还利用 Talbot 外腔能量相互注入的方式实现 7 路激光相干合成,输出功率为 100 W,合成效率为 10%。值得注意的是,虽然 CO₂ 激光器在金属焊接、熔覆、烧结和钎焊等众多领域正在被光纤激光器

逐步取代,但 CO₂ 激光器在处理聚合物和有机材料等非金属材料方面有更好的效果,CO₂ 激光器及其相干合成技术仍为工业部门和科研人员所关注^[24]。

2.2 化学激光相干合成

美国 Aerospace 公司的 D. J. Spencer 等^[25,26] 在 1969 年成功研制出了第一台连续波 HF 激光器,并在研制初期获得了 10 kW 的功率输出。与此同时,人们开始对高功率 HF/DF 激光器(大于 10 MW)的功率提取问题进行研究。研究结果表明,要获得更高的

功率输出,必须对激光器进行特殊设计,如将功率有效地分布在多条谱线上,但各条谱线的波阵面的相位难以保持一致,由此人们提出利用自适应技术及传感元件来控制不同谱线的相位。Aerospace 公司 C. P. Wang 等^[27,28] 提出了利用主振荡器和子振荡器阵列(MOSOA)实现相位控制和光束合成的方法,并设计了利用外差法进行 HF 激光器相位控制的伺服系统,如图 4 所示。

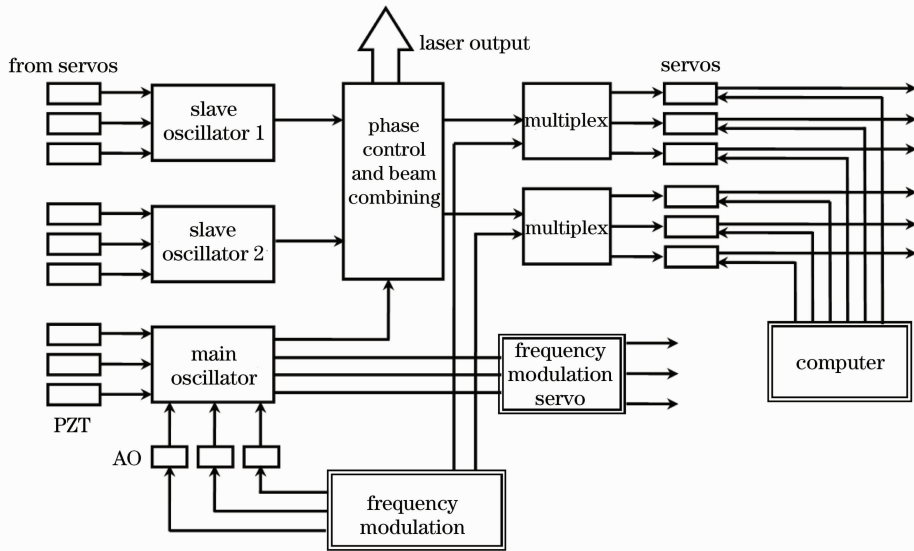


图 4 MOSOA 系统结构图

Fig. 4 System configuration of MOSOA

MOSOA 系统的提出正好处于自适应光学技术发展的初期^[29],能够实施光束相位控制的能动器件在控制精度、响应速度各方面的性能以及自动控制技术都不成熟,因此 MOSOA 系统停留在概念研究阶段。直至 1983 年, Aerospace 公司的 G. Coffey 等^[30]才利用爬山法实现了多谱线 HF 激光的相位控制。光路自动调节、能动器件等因素仍是制约该方案发展的技术瓶颈,C. P. Wang 等^[31]则更多地投入到能动器件的研究领域。

随着化学激光器性能的不不断提升,美国军方也不断加大投资和研发力度,在相干合成方面,原 TRW 公司根据美国战略防御计划组织(SDIO)的天基激光武器(SBL)项目,提出利用非线性光学相位共轭技术补偿相位畸变,同时匹配各束激光之间的相位,并提出了研制激光器相控阵系统(PALS)的计划^[32]。美国海军研究实验室(NRL)与马里兰大学的研究人员合作,利用非线性光学相位共轭技术实现了单谱线 HF 激光、多谱线 HF 激光和主振荡功率放大器(MOPA)结构多谱线 HF 放大模块的相

位控制^[33~35]。Aerospace 的 J. M. Bernard 等^[36]在空军武器实验室(AFWL)的资助下进行了两路 MOPA 结构 HF 放大器相干合成,系统没有使用相位控制器件,而是利用白光干涉技术保证两放大链路的光程差为零,获得了总功率为 12 W 的 HF 激光锁相输出。Bernard 还利用激光能量相互耦合实现了激光器阵列锁相输出^[37,38]。图 5 所示为能量耦合的光束合成实验系统结构,两个多谱线 HF 激光器通过一个分束镜将各自输出功率的 20%耦合进另一个激光器的谐振腔内,以实现两个激光器的相位锁定。两束多谱线 HF 激光干涉能够获得 97%的条纹可见度。

与此同时,原 TRW 公司化学激光的研制水平不断飞跃,1989 年该公司高功率 HF 激光 Alpha 出光成功。1990 年,该公司联合海军研究实验室向战略防御计划组织(SDIO)递交了先进相控阵高能激光项目(APACHE)的报告,提出了利用相干合成 HF 激光阵列构建天基激光武器的构想^[39]。但在世纪之交化学激光在激光领域中的地位发生了变化。由于连续波高功率化学激光器无一例外地都

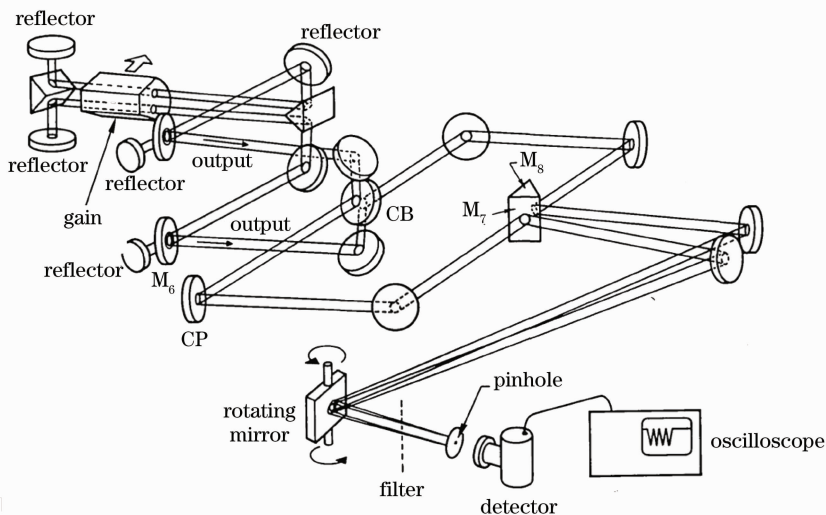


图 5 基于能量耦合的光束合成实验系统结构图

Fig. 5 System setup for coherent beam combining based on energy coupling

运转在低腔压下,在现有的技术水平下,需要复杂而庞大的压力恢复系统将废气排到大气中去,庞大的系统体积使得人们对化学激光器的实用性产生了质疑。随着 SBL 计划中止^[40],MTHEL 计划搁浅^[41]和 TRW 由于自身引起的债务危机被 Northrop Grumman 公司收购^[42],化学激光器的研究转入低潮,涉及 COIL 的 ABL 项目进度也不断延迟^[43],化学激光相干合成逐渐淡出人们的研究视野。

2.3 半导体激光相干合成

半导体激光器是指以半导体晶体材料为工作物质的激光器,具有体积小、寿命长、结构简单、可与集成电路单片集成等优点。早在 1970 年,美国 Bell 通讯实验室的 J. E. Ripper 等^[44]就观察到了 2 路 GaAs 激光通过倏逝波耦合产生锁相输出的实验现

象。1975 年,IBM 公司的 E. M. Philipp-Rutz^[45,46]利用倏逝波耦合实现了 3 路 GaAs 激光相干合成,输出功率达到了 5 W。1978 年 D. R. Scifres 等^[47]实现了 5 路 GaAs 激光锁相输出。

进入 20 世纪 80 年代,半导体激光阵列相干合成技术进入了研究高潮期,倏逝波耦合, Talbot 外腔耦合以及二元光学等技术的广泛应用使得半导体激光阵列得到了快速的发展^[48~58]。1994 年, S. Sanders 等^[59]利用 Talbot 外腔耦合获得了 144 路二维半导体激光锁相输出,激光功率为 1.4 W。

由于半导体激光的自身特性,激光的相位可以由电流或电压直接控制^[60,61],无需辅助的相位控制器件。基于主动相位控制的半导体放大器阵列相干合成也逐渐引起了人们的关注。SDI 公司的 J. S.

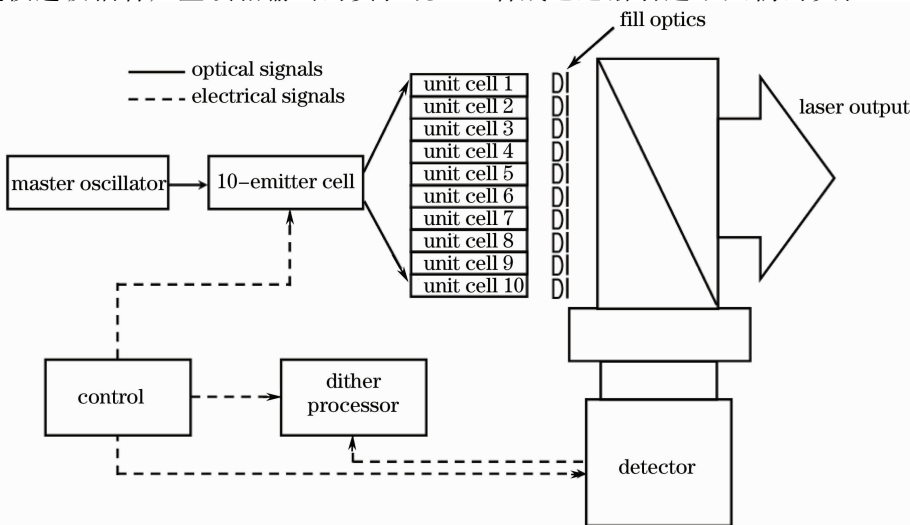


图 6 900 路半导体放大器相干合成实验结构图

Fig. 6 System setup for coherent beam combining of 900 channels semiconductor laser amplifier

Osinski 等^[61]实现了 4 路半导体放大器相干合成, 输出平均功率为 5 W。原麦道公司的 K. H. No 等^[62~65]实现了 100 路, 400 路和 900 路半导体放大器相干合成, 其中 900 路放大器相干合成时总输出功率为 36 W, 系统结构如图 6 所示。值得说明的是, 半导体放大器相干合成中控制的一般是静态相位畸变, 系统在初始化完成后, 各路放大器的相位在几天内都不会发生变化^[65]。

尽管单管半导体激光器在输出功率和光束质量等方面与其他类型的高能激光器相比没有优势, 但是由于半导体激光器低成本、高效率、全固态、高可靠性等优势, 其在军事领域的应用前景还是被普遍看好。半导体激光相干合成的计划至今仍在进行中, 美国国防部高级研究计划局(DARPA)近年来连续启动相干合成高功率单模发射器(COCHISE)和高能半导体激光系统体系结构(ADHELIS)等项目^[66~68], 旨在通过大功率、高效率的半导体激光阵列相干合成产生 100 kW 量级的高亮度激光。

2.4 全固态激光相干合成

半导体激光抽运全固态激光器是 20 世纪 80 年代末期出现的新型激光器, 它集半导体激光器(LD)和固体激光器的优势于一体, 具有体积小、效率高、可靠性高、运转轻便等优点^[69]。全固态激光器主要类型有圆棒激光器(Rod Laser)、板条激光器(Slab Laser)、薄片激光器(Thin disk Laser)、光纤激光器(Fiber Laser)、热容激光器(SSHCL)等(光纤激光器将在其他章节专门讨论)。随着半导体激光技术的日臻完善和半导体激光器件性能的大幅提高, 各种结构的激光器均取得了显著进展。与此同时, 相干合成技术作为解决全固态高功率激光的核心科学问题——“三高”(高功率、高光束质量和高转换效率)的可行途径也受到了研究人员的广泛关注^[70~80]。

早在 1986 年, 原 TRW 公司的 M. Valley 等^[70]和 HRL 实验室的 D. A. Rockwell 等^[71]就利用受激布里渊散射(SBS)相位共轭的方式实现了对固体激光的相位控制和相干输出。1992 年, 日本科学家 M. Oka 等^[75]利用倏逝波耦合的方法实现了 4 路半导体抽运的 Nd:YAG 激光的相干合成, 输出功率为 1.2 W, 实验系统结构与相干合成光束远场光斑图样如图 7 所示, 这也是关于全固态激光相干合成的首次实验报道。

2000 年, Y. Kono 等^[76]利用 Talbot 腔实现了 9 路 Nd:YAG 激光的相干合成, 输出功率为 360 mW, 主瓣宽度为非相干合成情形下的 16%。2002 年, D.

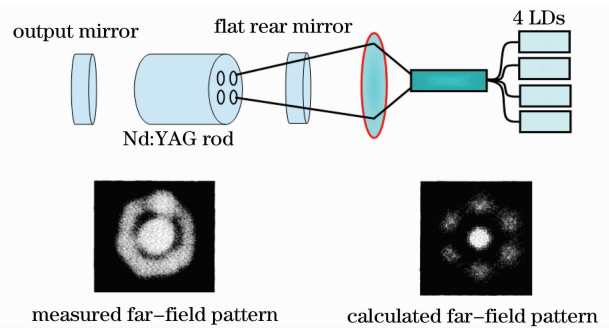


图 7 4 路半导体抽运 Nd:YAG 激光相干合成实验系统结构与实验结果

Fig. 7 System setup and experimental results for

coherent beam combining of four Nd:YAG laser beams

Sabourdy 等^[77]利用维纳-迈克耳孙腔实现了 2 路 Nd:YVO₄ 激光锁相输出。2004 年, Y. Zhou 等^[78]利用自成像腔实现了二维 4 束 Nd:YVO₄ 激光锁相输出, 输出功率为 500 mW。另外, HRL 实验室的 D. S. Sumida 等^[79]利用 SBS 相位共轭的方式实现了 8 路闪光灯抽运的 Cr:Nd:GSGG 放大器长脉冲激光相干合成, 输出激光重复频率为 1.25 Hz, 单脉冲能量为 8.2 J。以色列的 L. Shimshi 等^[80]实现了 25 路闪光灯抽运 Nd:YAG 脉冲激光相干合成输出, 单脉冲能量为 1.5 mJ。

2.5 小结

采用相位控制技术锁定各路激光的相位是实现相干合成的基本条件^[81,82]。相位控制技术可以分为主动相位控制和被动相位控制两大类^[83,84]。回顾并分析相干合成的发展历史不难发现, 在光纤激光发展成大功率器件及其相干合成技术引起人们关注之前, 各国学者已经对包括气体激光、化学激光、半导体激光、固体激光在内的各种类型激光光束相干合成开展了深入的研究。但实验结果在合成效率和数目可扩展性方面的性能并不令人满意。对于外腔能量耦合、倏逝波耦合、SBS 光学相位共轭等被动相位控制技术, 以 CO₂ 激光相干合成为例, Antyukhov 等利用 Talbot 外腔能量耦合实现的 61 路激光相干合成效率为 15%, Bahanov 等利用腔内空间滤波实现的 55 路激光相干合成, 在输出功率为 7 kW 时合成效率约为 12%, 最高的合成效率为 Vasil'tsov 利用腔内空间滤波实现的 85 路激光相干合成, 在输出功率为 500 W 时合成效率为 40%。A. F. Glova 等^[8]通过理论计算得出, 被动相位控制相干合成效率不超过 50%。在数目扩展方面, 大量实验结果表明, 随着激光路数的增多, 被动相位控制方案的锁相效果降低^[3], 甚至不能实现锁相输

出^[18],相干合成的效率也随着激光数目的增多而下降^[19,82]。较为常见的腔内空间滤波被动相位控制在理论上就存在合成效率随着激光数目增加而降低的不足^[16]。另外,利用 SBS 相位共轭法实现化学激光、固体激光输出的理论和实验结果表明,对光路对准近乎苛刻的要求以及激发产生受激布里渊效应需要的高功率密度阻碍了其向实用化的发展^[85~87]。除此之外,由于单台 CO₂ 激光器、化学激光器等本身结构就较为复杂,对于多路激光的被动相位控制,需要设计复杂的空间光路,实验系统设计和工程施工难度较大。被动相位控制相干合成还在系统复杂度、激光数目、合成效率等参数方面寻求平衡的过程中^[82]。对于主动相位控制相干合成技术,在其发展前期由于具备相位控制功能的能动器件在控制精度、响应速度及自动控制技术等都不满足要求,因此没有能够向大数目、高功率的方向发展,停留在理论探讨和概念性演示阶段。20 世纪 90 年代进行半导体激光放大器的主动相位控制取得了一定的实验效果,但停留在校正静态像差的层次。100 路和 900 路放大器阵列合成功率分别为 7.9 W 和 36 W,远不及工业加工和战术使用需要的量级。总体说来,相干合成技术取得的实验结果没有突破当时相应单链路激光的最大输出功率,因此效果不甚明显。

3 光纤激光相干合成发展现状

光纤激光器的出现使得相干合成技术获得了突飞猛进的发展。其原因除了光纤激光器本身的独特优势、紧凑的结构特别适合于相干合成和百千瓦战术使用的需求外,光纤通信商业推广过程中配套产生的几种器件(即光纤熔锥耦合器、多芯光纤、带尾纤的相位调制器与声光移频器等)起到了至关重要的作用。光纤熔锥耦合器、多芯光纤使得基于激光能量注入耦合和倏逝波耦合的被动相位控制十分便利^[88~91],带尾纤的相位调制器与声光移频器使得主动相位控制能够具备兆赫兹量级的控制带宽,可以用于控制大功率条件下的相位起伏,实现锁相输出^[92~94]。研究人员在探索和实践不断推陈出新,提出了不同机理、不同类型的相干合成实现方式并进行了实验验证,相干合成技术以前所未有的速度取得了一系列突破性进展。2003 年,美国 Northrop Grumman 公司和麻省理工学院的 J. Anderegg 等^[95,96]实现了 4 路瓦量级和 2 路十瓦量级光纤激光相干合成。2004 年,HRL 实验室的 H. Bruesselbach 等^[97,98]实现了 7 路瓦量级光纤激光相干合成。2006

年,Northrop Grumman 公司和美国空军研究实验室的 J. Anderegg 等^[99,100]实现了 4 路百瓦量级和 9 路十瓦量级光纤激光相干合成。2006 年,Northrop Grumman 公司的 G. D. Goodno 等^[101]以光纤激光作为种子源,利用 LiNbO₃ 相位调制器进行主动相位控制实现了 2 路万瓦级板条放大器的相干合成,输出功率为 19 kW。2008 年通过技术改进实现了 2 路万瓦级板条放大器相干合成,输出功率达到 30 kW^[102]。截至 2009 年 3 月,Northrop Grumman 公司的 J. Marmo 等^[103,104]以光纤激光作为种子源,利用 LiNbO₃ 相位调制器进行主动相位控制实现了 4 路和 7 路万瓦级板条放大器的相干合成,输出功率为 63 kW 和 105.5 kW。研究人员花费 6 年左右的时间实现了从瓦量级到十万瓦量级质的飞跃,这在相干合成乃至高能激光发展史上都具有里程碑式的重要意义。与此同时,国内外研究人员也在不断地归纳总结这些相干合成实现方式,形成了大量综述性文章和报道,为后续人员的研究提供了宝贵的经验^[105~111]。

值得注意的是,尽管光纤激光相干合成的技术方案很多,但目前获得百瓦级以上高功率输出的大都由主动相位控制多路 MOPA 结构光纤放大器相干合成的方案实现。Northrop Grumman 公司 J. Anderegg 等^[99]对 4 路百瓦级光纤放大器进行相干合成获得了 470 W 的总功率输出;美国空军研究实验室 T. M. Shay 等^[112]对 5 路百瓦级光纤放大器进行相干合成获得了 725 W 的总功率输出。截至目前,仅用光纤激光作为单元模块进行相干合成获得的总输出功率依然没有突破千瓦级,其根本原因在于:研究人员普遍认为主动相位控制相干合成要求各路单元光束单频、线偏振输出^[113,114],而受限于 SBS 等因素的影响,单频掺铋光纤放大器的输出功率多年来一直未突破 500 W^[115],掺铟单频光纤激光最高功率为 608 W^[116]。因此,根据现在的技术发展水平及单频单模激光的功率极限,如仅以单频线偏振光纤放大器作为组成模块构建百千瓦级高能激光系统,需要对多路激光进行合成,无疑大大增加了系统的复杂性,提高了对控制系统的技术要求。为实现用光纤激光作为单元模块进行相干合成获得百千瓦级高能激光输出的目标,近两年来,研究人员将工作重点放在提升单链可相干合成的光纤激光模块和相干合成控制系统性能上。

在单元模块方面,英国 QinetiQ 公司 D. C. Jones 等^[117]通过利用高速相位调制器对一束单频光纤激光进行相位调制将激光线宽展宽至 2 GHz,

从而有效抑制后端高功率放大链路中的非线性效应,并据此实现了 4 路百瓦级光纤放大器相干合成。无独有偶, Northrop Grumman 公司 G. D. Goodno 等^[118] 也通过高速相位调制的方式将单频激光线宽展宽至 25 GHz, 如图 8 所示, 随后进行 3 级链路功率放大, 获得了 1.4 kW 高功率光纤激光输出, 并利

用外差法对这束激光进行了主动相位控制, 控制残差小于 $\lambda/80$ 。利用这种线宽展宽方案, 美国 Nufern 公司已经实现了千瓦级可相干合成光纤放大器的商品化^[119,120], 预计不久的将来会有更多的研究单位实现千瓦级光纤激光模块相干合成。

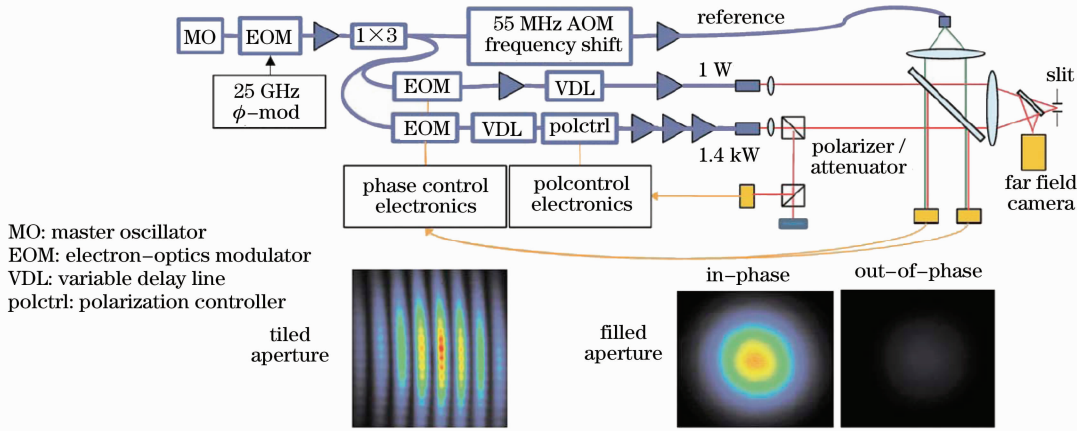


图 8 1.4 kW 高功率光纤激光相位控制系统结构图

Fig. 8 System setup for phase control of 1.4 kW high power fiber amplifier

在相干合成控制系统性能方面, 提高甚多路激光参与相干合成时系统对各路激光相位起伏的校正能力是目前研究的重点。现有的多抖动法主动相位控制虽然具备良好的相位噪声校正能力, 但在向大数量光束相干合成扩展时至少存在两个困难, 一是随着路数的增多占用的频率资源也越来越多, 直到电路不能实现; 二是由于每束光需要单独的控制回路, 随着控制路数的增多, 所需的控制电路会越来越多, 成本和系统复杂性也随之增加。为了缓解这些困难, 本课题组的 Y. Ma 等^[121] 提出了单抖动法相干合成方案。该方案原理如图 9 所示, 所有参与合成的光束使用一个调制频率, 这一调制频率分时加载到各光束上, 分时探测每一路光束与其他光束间的相位差, 并以此作为反馈信号分时加载到各路相位调制器上对各路相位进行校正, 这些信号在时

间轴上是分时串行进行的。这样, 单抖动法可以只用一路控制电路, 产生一路调制信号对多路光束进行相位校正, 这就有力地缓解了多抖动法对频率资源的需求和控制电路的难度。

4 光纤激光相干合成的新动向

4.1 向中红外波段发展

截止目前, 光纤激光相干合成的研究绝大多数集中于 $1 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 等近红外波段。近年来, 在激光雷达、探测、遥感、光电对抗等方面有广泛应用前景的中红外光纤激光由于其特有的稳定性和高效率逐渐成为激光技术领域的研究热点。2009 年 11 月, 加拿大科学家 Dominic Faucher 等^[122] 报道了输出功率达 5.2 W 的 $2.94 \mu\text{m}$ 全光纤中红外激光器, 同年悉

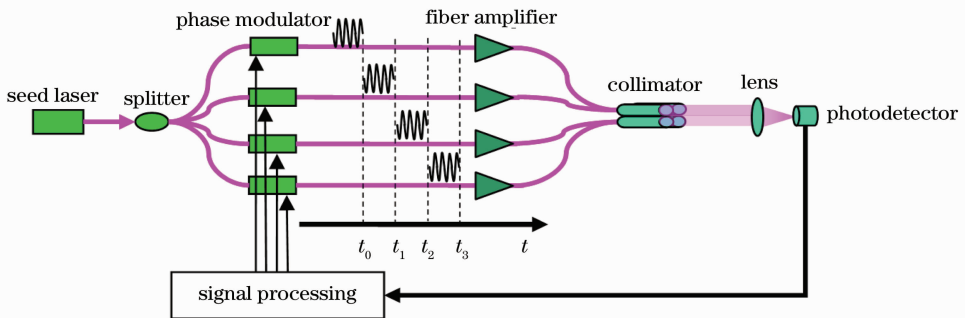


图 9 单抖动法相干合成原理图

Fig. 9 System configuration for coherent beam combining based on single-dithering technique

尼大学 S. D. Jackson 等^[123]也报道了掺铥光纤实现 4.6 W 中红外激光输出的实验结果。鉴于中红外激光的广泛应用前景,美国国防部高级研究计划局于 2010 年 2 月发布了中红外激光相干合成的研究项目,计划通过 3 个实施阶段,获得百瓦量级 3~5 μm 高功率中红外激光^[124]。2010 年 4 月,法国 G. Bloom 等^[125]利用迈氏腔结构成功实现了 2 路量子级联激光器的相干合成,激光中心波长为 4.5 μm ,合成效率高达 85%。利用现有光纤激光相干合成的成熟技术,实现中红外光纤激光相干合成也绝非难事。

光纤激光的另一个热门领域是 2 μm 波段的掺铥

光纤激光^[126~129]。近年来,随着 790 nm 波段半导体激光技术和大模场掺铥光纤工艺的成熟,掺铥光纤激光的输出功率以惊人的速度迅速提高。在 2010 年的 Photonics West 会议上,美国 Qpeak 公司的 T. Ehrenreich 等^[127]报道了输出功率大于 1kW 的掺铥光纤激光器。由于 2 μm 波段的人眼安全特性以及比传统掺铥光纤低近一个量级的非线性效应阈值的优势^[129],2 μm 激光的相干合成也有可能成为高能光纤激光的有效实现方式。最近本课题组^[130]利用相互注入锁定的方式实现了两路掺铥光纤激光的相干合成,实验系统结构如图 10 所示。

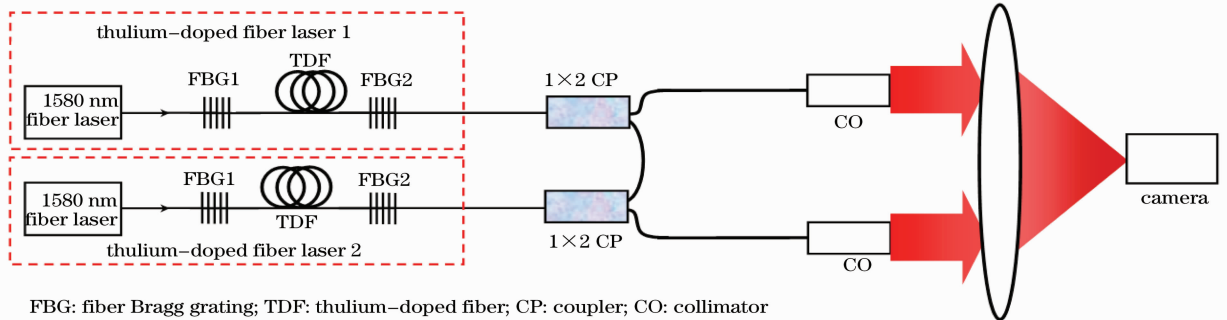


图 10 2 路掺铥光纤激光的相干合成系统结构图

Fig. 10 System setup for coherent beam combining of two Tm-doped fiber lasers

掺铥光纤抽运源为自行研制的 1580 nm 掺铥光纤激光。光纤激光谐振腔由一对中心波长 1948.8 nm 的光纤光栅组成,反射率分别为 99% 和 10%。两路光纤激光经由两只 1×2 单模耦合器实现相互注入锁定。在两只耦合器的输出端测量激光光谱,结果如图 11 所示。两束激光经准直器发射至自由空间,利用透镜聚焦模拟远场效果,红外相机 (Microviewer 7290 A) 放置在焦平面上观察相干合成的效果。

在实验中,当两个激光器同时开启,两只 1×2 耦合器中间断开,没有能量相互注入时,远场光斑是两个激光器光强的简单叠加,如图 12(a) 所示。而将两只 1×2 耦合器熔接实现能量相互注入时,由于

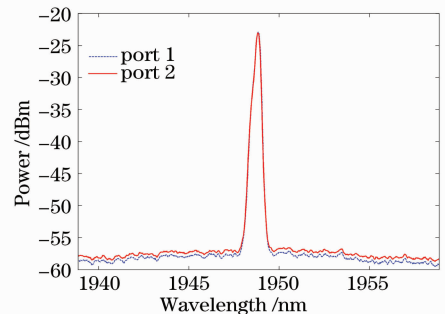


图 11 掺铥光纤输出激光光谱

光纤激光器中的光场振荡互相牵制,激光器实现了相干合成,远场光斑是具有高相干度的干涉条纹,如

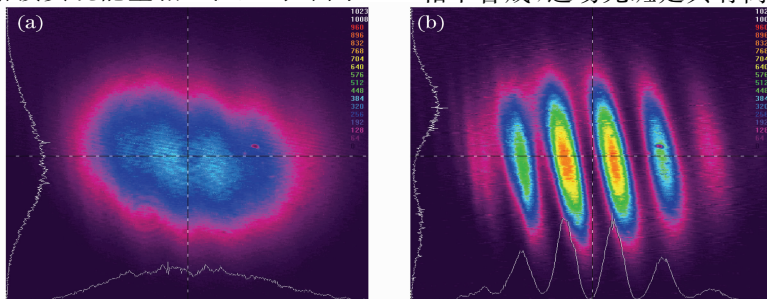


图 12 掺铥光纤激光相干合成实验结果。(a) 两个激光器独立运行时远场光斑;(b) 相互注入时远场光斑

Fig. 12 Experimental results for coherent beam combining of two Tm-doped fiber lasers. (a) free-running; (b) mutual injection locking

图 12(b)所示,经计算条纹对比度达到了 93%,获得了较好的相干合成效果。

4.2 向宽谱、多波长合成方向拓展

在以往进行的 MOPA 结构相干合成实验系统中,大都采用单频种子源激光器以保证各路光束之间的时间相干性,但由此引入的非线性效应使得单频光纤放大器的输出功率受限。种子源采用宽谱线激光和多波长输出是抑制非线性效应、提高光纤放大器输出功率的有效手段。如采用宽谱线或多波长激光作为 MOPA 结构的种子激光源,并能成功实现多路放大器的相干合成,那么有望成量级地提升单链路的最大输出功率,减少系统的复杂度。

2010 年初,国外研究人员已陆续报道了 2 GHz 光纤激光相干合成^[117]和 25 GHz 光纤激光相位控制的实验结果^[118]。上述宽谱激光均是通过对单频激光进行高速相位调制从而获得展宽谱线的,高速

相位调制器及其高频调制信号源均是昂贵的设备,提高了系统的成本。本课题组提出了另一种宽谱激光相干合成的方案,并进行了实验研究。该方案原理图如图 13 所示,图中虚框内表示的是一个双端抽运的 ASE 光源,经一个光纤带通滤波器(BPF,带宽为 180 GHz)后作为种子光,在 A 点测得的光谱如图 14(a)所示,其 10 dB 谱宽为 1.5 nm(对应 180 GHz),种子光经分束后分别进入两个掺铒光纤放大器,采用随机并行梯度下降算法^[131~135]对激光相位进行控制,获得了良好的相干合成效果,系统闭环情形下远场光斑如图 14(b)所示,条纹对比度高达 65%。该方案无需高速相位调制器、高频调制信号源等,节约了系统成本。需要说明的是,180 GHz 谱宽对应的激光相干长度约为 1 mm,在实验中需要精确控制光纤的长度,并在激光准直输出端精确调节两束激光之间的光程差。

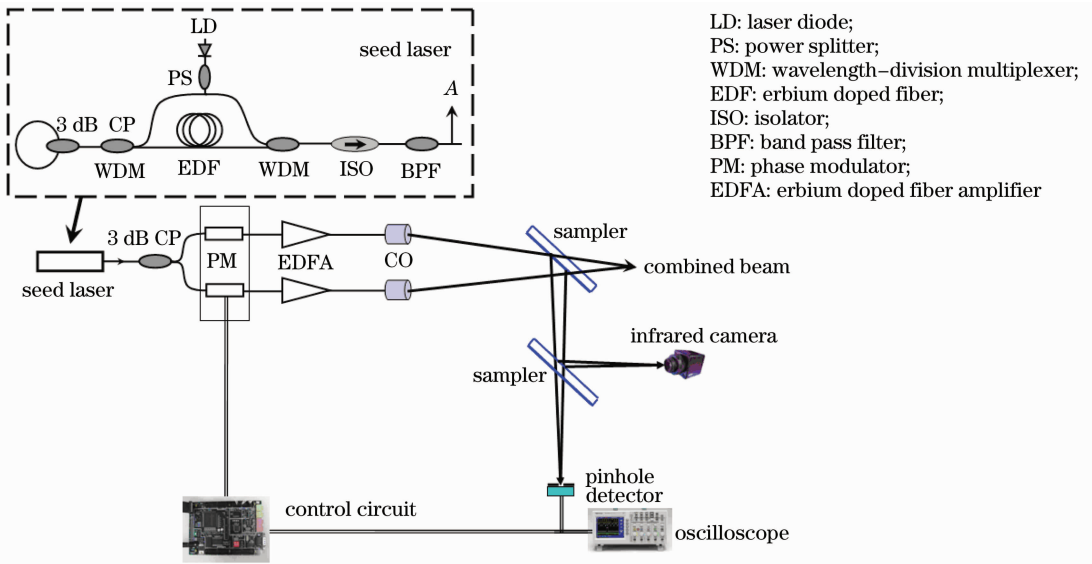


图 13 2 路宽谱光纤激光相干合成系统结构图

Fig. 13 System setup for coherent combining of two broadband fiber lasers

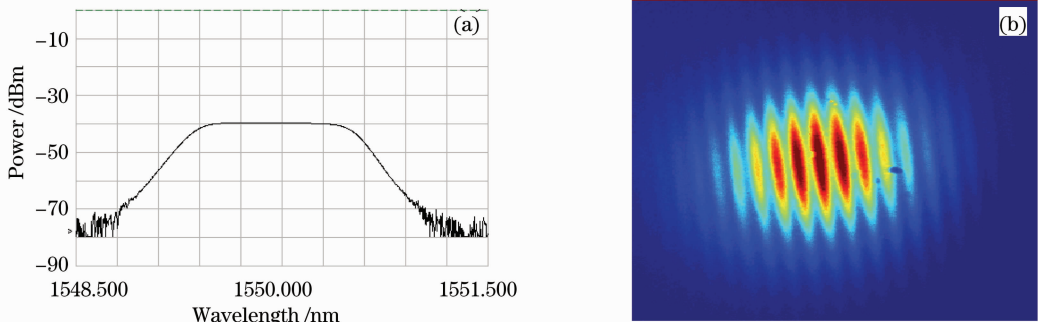


图 14 2 路宽谱光纤激光的相干合成结果。(a)激光光谱图;(b)闭环情形下远场光斑图

Fig. 14 Experimental results for coherent beam combining of two broadband fiber lasers. (a) laser spectrum; (b) far-field intensity pattern in close-loop

除了展宽种子激光的线宽外,采用多波长激光作为种子也是抑制非线性效应的有效方式^[136~138]。本课题组自行构建了4路不同波长的光纤激光器,通过一个1×4耦合器构成1束4波长的种子源,经分束后进入4路瓦量级光纤放大器分别进行放大,采用随机并行梯度下降算法对4路激光相位进行控

制,实现相干合成,实验系统如图15所示。

实验中测得放大后的激光光谱如图16(a)所示,系统闭环情形下远场光斑如图16(b)所示,条纹对比度高达75%,获得了良好的相干合成效果。上述实验均证明了宽谱、多波长激光相干合成的可行性。

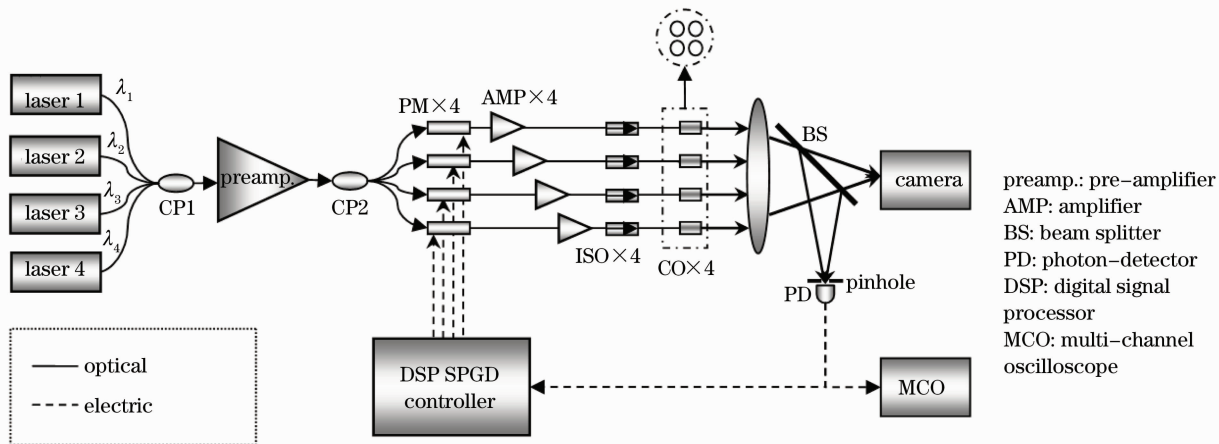


图15 四路四波长光纤激光相干合成系统结构图

Fig. 15 System setup for coherent beam combining of four channel of four-wavelength fiber amplifiers

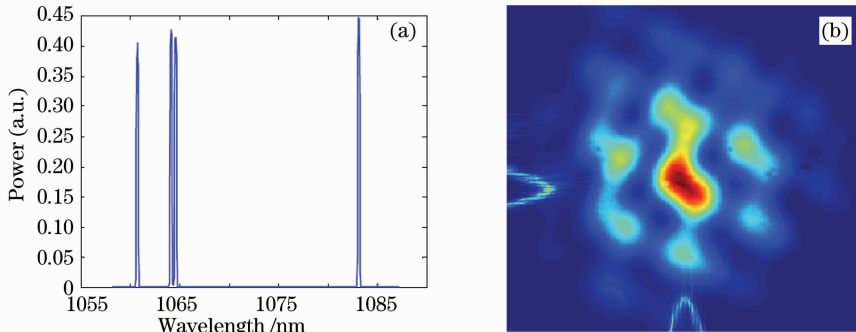


图16 4路4波长光纤放大器相干合成实验结果。(a)激光光谱图;(b)闭环情形下远场光斑图

Fig. 16 Experimental results for coherent beam combining of four channel of four-wavelength fiber amplifiers.

(a) laser spectrum; (b) far-field intensity pattern in close-loop

4.3 向特殊应用领域进军

以往进行的光纤激光相干合成实验大都针对连续激光进行,旨在获得高平均功率高光束质量光纤激光输出,对于脉冲光纤激光,特别是通过主动相位控制相干合成获得高能量脉冲光纤激光输出则较少受到关注^[139~141]。美国国防部高级研究计划局2009年11月发布了光纤激光脉冲源(FILPS)的项目公告,用于发展高能量脉冲光纤激光器和放大器,通过对多路光束的相干合成,实现高能量脉冲光纤激光输出。项目将分为3个阶段进行,预计项目完成后,激光器能够输出能量超过10 mJ,脉冲脉宽小于纳秒量级,重复率为25 kHz,总电-光转换效率大于15%,输出脉冲能量通过相干合成技术升级到100 mJ量级^[139]。最

近,法国的S. Jiang等^[141]报道了飞秒脉冲光纤激光相干合成的研究成果。脉冲光纤激光相干合成将成为科研人员越来越关注的焦点。

利用589 nm光源形成的激光导星协同自适应光学系统能够补偿大气湍流造成的相位畸变,改善地基望远镜的成像清晰度。多年来,通过对1178 nm光纤激光器输出光束倍频获得的589 nm激光功率一直无法达到这一应用领域要求的20 W功率水平。这一状况一直持续到2009年欧洲南方天文台的Y. Feng等^[142,143]利用两台相干合成的拉曼光纤放大器获得的589 nm光纤激光器激光导星,输出功率大于25 W,实验系统结构如图17所示。2010年初,欧洲南方天文台L. R. Taylor等^[144]

又报道了利用 3 台相干合成的拉曼光纤放大器获得功率大于 10 W 589 nm 激光导星的最新研究成果。

相干合成技术的引入,使得光纤激光器在激光导星领域有了用武之地。

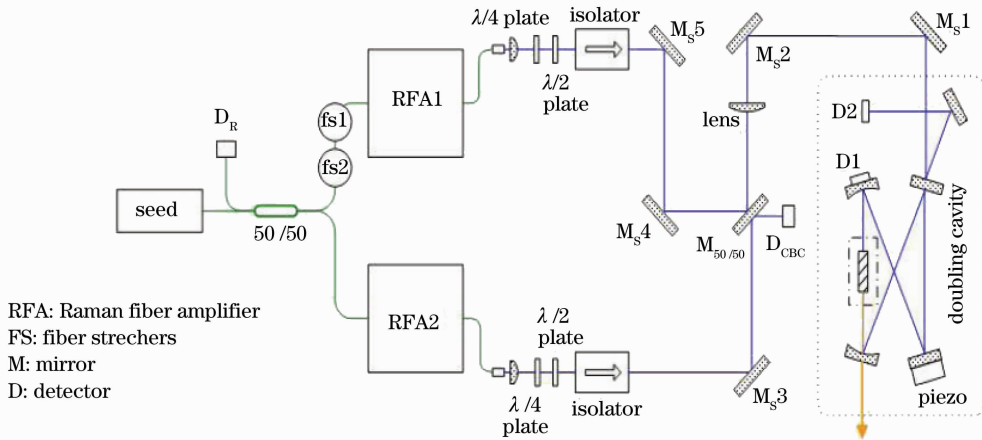


图 17 两路拉曼光纤放大器相干合成实验系统结构

Fig. 17 Diagram of the optical setup for coherent beam combination

光纤激光相干合成的另一个应用领域是光斑形态操控。2009 年, R. S Kurti 等^[145]在美国海军的资助下,利用相干合成的光纤激光阵列获得了远场中空的光强分布,如图 18 所示。光斑形态操控有可能在光镊、激光医学等领域获得广泛应用。

相干合成光纤激光阵列的研究可对高能激光系统战略发展提供极为重要的参考。除此之外,光纤激光相干合成技术还可以拓展到激光技术的其他领域,成为提升任意波段激光功率水平的有效手段。相干合成技术将继续伴随激光器一起发展,在国民经济、国防领域等将发挥越来越大的作用。

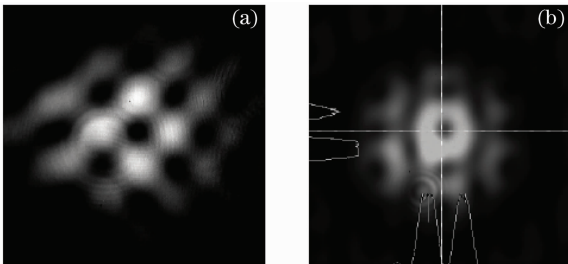


图 18 相干合成的光纤激光阵列获得了远场中空的光强分布。(a)4 路光纤激光;(b)6 路光纤激光

Fig. 18 Far field intensity profiles of coherently combine fiber laser. (a) four fiber channels; (b) six fiber channels

5 结束语

相干合成技术几乎是伴随着激光器的发展同步进行的,光纤激光的出现极大地促进了相干合成技术的发展。近年来,研究人员将工作重点放在提升单链可相干合成的光纤激光模块和相干合成控制系统性能上,目前千瓦级可相干合成光纤放大器已经实现商品化,基于千瓦级光纤激光模块相干合成的万瓦级以上光纤激光相干合成预计不久可以实现。与传统单口径高能激光系统相比,相干合成激光阵列构成的高能激光系统在系统成本、热管理、光束控制等方面都具有显著优势,极有可能是未来百千瓦高平均功率高光束质量战术激光的实现方式。开展

参考文献

- 1 L. H. Enloe, J. L. Rodda. Laser phase-locked loop [C]. Proc. IEEE, 1965, **53**: 165~166
- 2 H. L. Stover, W. H. Steier. Locking of laser oscillators by light injection[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **8**(4): 91~93
- 3 C. J. Buczek, R. J. Freiberg. Hybrid injection locking of higher power CO₂ lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **8**(7): 641~650
- 4 D. G. Youmans. Phase locking of adjacent channel leaky waveguide CO₂ lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(4): 365~367
- 5 L. A. Newman, R. A. Hart, J. T. Kennedy *et al.*. High power coupled CO₂ waveguide laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(25): 1701~1703
- 6 D. J. Spencer, H. Mirels, T. A. Jacobs *et al.*. Continuous-Wave Chemical Laser; US, 3688215[P], 1972
- 7 V. V. Antyukhov, A. F. Glova, O. R. Kachurin *et al.*. Effective phase locking of an array of laser [J]. 1986, **44**: 78~80
- 8 A. F. Glova. Phase locking of optically coupled lasers [J]. *Quantum. Electron.*, 2003, **33**(4): 283~306
- 9 O. R. Kachurin, F. V. Lebedev, A. P. Napartovich. Properties of an array of phase-locked CO₂ lasers [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1988, **18**(9): 1128~1131
- 10 A. F. Glova. CO₂ lasers excited with a capacitive ac discharge [J]. *Laser Physics*, 2000, **10**(5): 975~993
- 11 A. A. Golubentsev, O. P. Kachurin, F. V. Lebedev. Use of a spatial filter for phase locking of a laser array [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1990, **20**(8): 934~937
- 12 V. V. Vasil'tsov, Y. V. Zelenov, Y. A. Kurushin *et al.*. Synchronization of high-power CO₂ lasers [C]. *SPIE*, 1993, **2109**: 107
- 13 V. V. Vasil'tsov, V. S. Golubev, Y. V. Zelenov *et al.*. Using diffraction optics for formation single-lobe far-field beam intensity distribution in waveguide CO₂-lasers synchronized arrays [C]. *SPIE*, 1993, **2109**: 122~128
- 14 I. V. Bahanov, A. F. Glova, E. A. Lebedev. Output characteristics of the MKL-10 multichannel CO₂ laser [J]. *Quantum Electron.*, 1993, **23**(3): 184~185

- 15 A. F. Glova, S. V. Drobyazko, V. V. Likhanskii. Multi-beam CO₂ lasers and their applications[C]. CAOL, 2005. 43~46
- 16 A. F. Glova, A. Yu. Lysikov, E. I. Musena. Phase locking of 2D laser arrays by the spatial filter method [J]. *Quantum Electron.*, 2002, **32**(3): 277~278
- 17 G. L. Bourdet, Y. B. Andre, R. A. Müller *et al.*. 100 W RF excited phased array of self-focusing waveguide CO₂ laser [C]. Conference on Laser and Electro-Optics, San Diego, 1991
- 18 K. M. Abramski, A. D. Colley, H. J. Baker *et al.*. Phase-locked CO₂ laser array using diagonal coupling of waveguide channels [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **60**(5): 530~532
- 19 A. M. Hornby, H. J. Baker, A. D. Colley *et al.*. Phase locking of linear arrays of CO₂ waveguide lasers by the waveguide confined Talbot effect[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(19): 2591~2593
- 20 A. M. Hornby, H. J. Baker, D. R. Hall. Combined array/slab waveguide CO₂ lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **108**: 97
- 21 E. F. Yelden, H. J. J. Seguin, C. E. Capjack *et al.*. Phase-locking phenomena in a radial multislot CO₂ laser array [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(8): 1475~1482
- 22 K. Schröder, A. Müller, D. Schuöcker. Phase locking of CO₂ lasers by the use of diffraction effects [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26): 8252~8259
- 23 W. Weingartner, K. Schröder, D. Schuöcker. Active length control of two phase locked CO₂ lasers with a digital signal processor [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(9): 3298~3305
- 24 Y. Xu, Y. Li, T. Feng *et al.*. Phase-locking principle of axisymmetric structural CO₂ laser and theoretical study of the influences of parameters-changes on phase-locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(8): 1303~1311
- 25 D. J. Spencer, T. A. Jacobs, H. Mirels *et al.*. Continuous-wave chemical laser [J]. *International J. Chemical Kinetics*, 1969, **1**(5): 493~494
- 26 D. J. Spencer, H. Mirels, T. A. Jacobs *et al.*. Continuous-wave chemical laser; US, 3688215[P], 1972
- 27 C. P. Wang. Master and slave oscillator array system for very large multiline lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(1): 83~86
- 28 C. P. Wang, P. L. Smith. Phase control of HF chemical lasers for coherent optical recombination [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(9): 1322~1327
- 29 J. W. Hardy. Adaptive optics; a new technology for the control of light [C]. Proc. IEEE, 1978, **66**(6): 651~697
- 30 G. Coffer, J. M. Bernard, R. A. Chodzko *et al.*. Experiments with active phase matching of parallel-amplified multiline HF laser beams by a phase-locked Mach-Zehnder interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(1): 142~148
- 31 C. P. Wang, P. L. Smith. Charged-large-array-flexible mirror [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(12): 1838~1843
- 32 A. D. Schnurr, S. Meisenholder, M. Litvak *et al.*. Phased Array Laser System (PALS) [R]. ADA169635, 1986
- 33 M. T. Duignan, B. J. Feldman, W. T. Whitney. Stimulated Brillouin scattering and phase conjugation of hydrogen fluoride laser radiation [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(2): 111~113
- 34 W. T. Whitney, M. T. Duignan, B. J. Feldman. Stimulated Brillouin scattering and phase conjugation of multiline hydrogen fluoride laser radiation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(11): 2160~2168
- 35 W. T. Whitney, M. T. Duignan, B. J. Feldman. Stimulated Brillouin scattering phase conjugation of an amplified hydrogen fluoride laser beam [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(6): 699~703
- 36 J. M. Bernard, R. A. Chodzko, J. G. Coffer. Master oscillator with power amplifiers; performance of a two-element cw HF phased laser array [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(21): 4543~4547
- 37 J. M. Bernard, R. A. Chodzko, H. Mirels. Mutual coherence of two coupled multiline continuous-wave HF lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 897~899
- 38 J. M. Bernard, R. A. Chodzko, H. Mirels. Coupled multiline CW HF lasers; experimental performance [J]. *AIAA Journal*, 1988, **26**(11): 1369
- 39 G. Koop, B. Bendow, D. Dee *et al.*. Advanced Phased Array Chemical High Energy (APACHE) laser Program [R]. ADA035153, 1990
- 40 Ren Guoguang. Review of significant adjustment of American space-based laser program [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(3): 163~166
任国光. 评述美国天基激光计划的重大调整[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(3): 163~166
- 41 Ren Guoguang, Huang Jijin. Major progress of U. S. 2005' high-energy laser technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 3~9
任国光, 黄吉金. 美国高能激光技术 2005 年主要进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(6): 3~9
- 42 Northrop Grumman Coporation [EB/OL] <http://www.st.northropgrumman.com>
- 43 Ren Guoguang. Current situation and development trend of high energy laser weapon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(9): 62~69
任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(9): 62~69
- 44 J. E. Ripper, T. L. Paoli. Optical coupling of adjacent stripe-geometry junction lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**(9): 371~373
- 45 E. M. Philipp-Rutz. Spatially coherent radiation from an array of GaAs lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(8): 475~477
- 46 E. M. Philipp-Rutz. Single laser beam of spatial coherence from an array of GaAs lasers: free-running mode [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(10): 4554~4556
- 47 D. R. Scifres, R. D. Burnham, W. Streifer. Phase-locked semiconductor laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**(12): 1015~1017
- 48 J. Katz, S. Margalit, A. Yariv. Diffraction coupled phase-locked semiconductor laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**(7): 554~556
- 49 J. K. Butler, D. E. Ackley, D. Botez. Coupled-mode analysis of phase-locked injection laser arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(3): 293~295
- 50 Y. Twu, A. Dienes, S. Wang *et al.*. High power coupled ridge waveguide semiconductor laser arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(7): 709~711
- 51 J. R. Leger, G. J. Swanson, M. Holz. Efficient side lobe suppression of laser diode arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(16): 1044~1046
- 52 J. R. Leger, M. L. Scott, W. B. Veldkamp. Coherent addition of AlGaAs lasers using microlenses and diffractive coupling [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(21): 1771~1773
- 53 M. Jansen, J. J. Yang, S. S. Ou *et al.*. Diffraction-limited operation from monolithically integrated diode laser array and self-imaging (Talbot) cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(19): 1949~1951
- 54 J. P. Hobimer, D. R. Myer, T. M. Brennan *et al.*. Integrated injection-locked high-power CW diode laser arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(6): 531~533
- 55 J. R. Leger, M. P. Griswold. Binary-optics miniature talbot cavities for laser beam combination [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(1): 4~6
- 56 C. J. Corcoran, R. H. Redike. Operation of five individual diode lasers as a coherent ensemble by fiber coupling into an external cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(7): 759~761
- 57 W. Wang, K. Nakagawa, S. Sayama. Coherent addition of injection-locked high-power AlGaAs diode lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22): 1593~1595
- 58 J. Buus, P. J. Williams, I. Goodridge *et al.*. Surface-emitting two-dimensional coherent semiconductor laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(4): 331~333
- 59 S. Sanders, R. Waarts, D. Nam *et al.*. High power coherent two-dimensional semiconductor laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(12): 1478~1480
- 60 K. H. No, R. J. Blackwell, Robert W. Herrick. Monolithic integration of an amplifier and a phase modulator fabricated in a GRINSCH-SQW structure by placing the junction below the quantum well [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1993, **5**(9): 990~993

- 61 J. S. Osinski, D. Mehuys, D. F. Welch. Phased array of high-power, coherent, monolithic flared amplifier master oscillator power amplifiers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(5): 556~558
- 62 K. H. No, R. W. Herrick, C. Leung *et al.*. One dimensional scaling of 100 ridge waveguide amplifiers [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1994, **6**(9): 1062~1064
- 63 K. H. No, R. W. Herrick, C. Leung *et al.*. Two dimensional scaling of ridge waveguide amplifiers [C]. *SPIE*, 1994, **2148**: 80~90
- 64 D. Krebs, R. Herrick, K. No *et al.*. 22 W coherent GaAlAs amplifier array with 400 emitters [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1991, **3**(4): 292~295
- 65 J. Levy, K. Roh. Coherent array of 900 semiconductor laser amplifiers [C]. *SPIE*, 1995, **2382**: 58~69
- 66 P. Rudy. The best defense is a bright diode laser [J]. *Photonics Spectra*, 2005, **39**(12): 30~33
- 67 Coherently-Combined High-Power Single-Mode Emitters (COCHISE) [EB/OL] http://www.mtosymposium.org/2007/posters/Energy/48_Mangano_COCHISE.pdf[2009-12-27]
- 68 Architecture for Diode High Energy Laser Systems (ADHELIS) [EB/OL] http://www.mtosymposium.org/2007/posters/Energy/47_Mangano_ADHELIS.pdf[2009-12-27]
- 69 C. M. Stickle. Architecture for diode high energy laser systems [EB/OL] <http://www.darpa.mil/mto/programs/adhels/index.htm>[2009-12-27]
- 70 M. Valley, G. Lombardi, R. Aprahamian. Beam combination by stimulated Brillouin scattering [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(10): 1492~1497
- 71 D. A. Rockwell, C. R. Giuliano. Coherent coupling of laser gain media using phase conjugation [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(3): 147~149
- 72 R. H. Moyer, M. Valley, M. C. Cimolino. Beam combination through stimulated Brillouin scattering [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(12): 2473~2489
- 73 D. L. Carroll, R. Johnson, S. J. Pfeifer *et al.*. Experimental investigations of stimulated Brillouin scattering beam combination [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(12): 2214~2224
- 74 R. A. Lamb, M. J. Damzen. Phase locking of multiple stimulated Brillouin scattering by a phase-conjugate laser resonator [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7): 1468~1472
- 75 M. Oka, H. Masuda, Y. Kaneda *et al.*. Laser-diode-pumped phase-locked Nd:YAG laser arrays [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1142~1147
- 76 Y. Kono, M. Takeoka, K. Uto *et al.*. A coherent all-solid-state laser array using the talbot effect in a three-mirror cavity [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(5): 607~614
- 77 D. Sabourdy, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot *et al.*. Coherent combining of two Nd:YAG lasers in a Vernier-Michelson-type cavity [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(4-5): 503~507
- 78 Y. Zhou, L. Liu, C. Eton *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
- 79 D. S. Sumida, D. C. Jones, D. A. Rockwell. An 8.2 J phase-conjugate solid-state laser coherently combining eight parallel amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(11): 2617~2627
- 80 L. Shimshi, A. A. Ishaaya, V. Eckhouse *et al.*. Upscaling coherent addition of laser distributions [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **275**: 389~393
- 81 I. S. Goldobin, N. N. Evtikhiev, A. G. Plyavenek *et al.*. Phase-locked integrated arrays of injection lasers [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1989, **19**(10): 1261~1284
- 82 A. P. Napartovich. Phase-locking of laser arrays: problems and solutions [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 748~758
- 83 C. Bellanger, A. Brignon, J. Colineau *et al.*. Coherent fiber combining by digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(24): 2937~2939
- 84 L. Liu. Analysis and Experimental Demonstration of Conformal Adaptive Phase-Locked Fiber Array for Laser Communications and Beam Projection Applications [D]. Maryland; University of Maryland, 2008
- 85 J. Falk, M. Kanefsky, P. Suni. Limits to the efficiency of beam combination by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 13~15
- 86 S. Sternklar, D. Chomsky, S. Jackel *et al.*. Misalignment sensitivity of beam combining by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9): 469~470
- 87 B. C. Rodgers, T. H. Russell, W. B. Roh. Laser beam combining and cleanup by stimulated Brillouin scattering in a multimode optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16): 1124~1126
- 88 A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermene, D. Sabourdy *et al.*. Coherent combining of fiber lasers [J]. *C. R. Physique*, 2006, **7**: 244~253
- 89 N. M. Lyndin, V. A. Sychugov, A. E. Tikhomirov *et al.*. Laser system composed of several active elements connected by single-mode couplers [J]. *Quantum Electron.*, 1994, **24**: 1058
- 90 V. A. Kozlov, J. H. Cordero, T. F. Morse. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(24): 1814~1816
- 91 P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. *Photonics Tech. Lett.*, 2001, **13**(5): 439~441
- 92 Electro-Optical integrated circuits (ICs) and components. [EB/OL] <http://www.eospace.com>[2009-12-27]
- 93 S. J. Augst, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 474~476
- 94 Acousto-Optic components. [EB/OL] <http://www.brimrose.com>[2009-12-27]
- 95 J. Anderegg, S. Brosnan, M. Weber *et al.*. 8-watt coherently phased 4-element fiber array [C]. *SPIE*, 2003, **4974**: 1~5
- 96 S. J. Augst, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining of ytterbium fiber laser amplifiers [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003
- 97 H. Bruesselbach, M. L. Minden, S. Q. Wang *et al.*. A coherent fiber array based laser link for atmospheric aberration mitigation and power scaling [C]. *SPIE*, 2004, **5338**: 90~101
- 98 M. Mangir, H. Bruesselbach, M. Minden *et al.*. Atmospheric aberration mitigation and transmitter power scaling using a coherent fiber array [C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004. 1745~1750
- 99 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 100 T. M. Shay, V. Benham, L. J. Spring *et al.*. Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020V
- 101 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
- 102 Northrop Grumman Space Technology, El Segundo, CA, [EB/OL]. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=149444[2009-12-27]
- 103 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements Northrop Grumman [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719507
- 104 Northrop Grumman Space Technology, El Segundo, CA, [EB/OL] http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575[2009-12-27]
- 105 Wang Shuangyi, Lin Dianyong, Wang Chao *et al.*. Recent progress of fiber beam combination [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(6): 657~661
王双义, 林殿阳, 王超等. 光纤束束研究的新进展 [J]. *激光技术*, 2005, **29**(6): 657~661
- 106 Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 26~29
李永忠, 范滇元. 光纤激光器的叠加技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 26~29
- 107 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Coherent beam combining technology of fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5): 516~518

- 肖 瑞, 侯 静, 姜宗福. 光纤激光器的相干合成技术[J]. 激光技术, 2005, **29**(5): 516~518
- 108 Zhao Shuai, Fan Wande, Sheng Qiuqin. The research of coherent combining of fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(10): 921~924
- 赵 帅, 范万德, 盛秋琴. 光纤激光器相干组束技术研究[J]. 激光与红外, 2006, **36**(10): 921~924
- 109 Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and it's coherent beam combination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 155~159
- 楼祺洪, 何 兵, 周 军. 光纤激光器及其相干组束 [J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(2): 155~159
- 110 Wu Bo, Liu Yongzhi. Coherent combination of high power fiber laser beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **43**(8): 56~61
- 伍 波, 刘永智. 高功率光纤激光器相干合成研究[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **43**(8): 56~61
- 111 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 163~166
- 程 勇, 刘 洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(2): 163~166
- 112 T. M. Shay, J. T. Baker, A. D. Sanchez *et al.*. High power phase locking of a fiber amplifier array [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71951M
- 113 J. Limpert, Fabian Röser, S. Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 114 Towards 100 kW fiber laser systems [EB/OL]. [http://www.crystallfiber.com\[2006-06-10\]](http://www.crystallfiber.com[2006-06-10])
- 115 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 116 G. D. Goodno, L. D. Book, J. E. Rothenberg. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
- 117 D. C. Jones, A. J. Turner, A. M. Scott *et al.*. A multi-channel phase locked fibre bundle laser [C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 75801V
- 118 G. D. Goodno, S. J. McNaught, J. E. Rothenberg *et al.*. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1542~1544
- 119 V. Khitrov, K. Farley, R. Leveille *et al.*. kW Level narrow linewidth Yb fiber amplifiers for beam combining [R]. Photonics West 2010
- 120 NukW: Kilowatt laser amplifier platform [EB/OL]. [http://www.nufern.com/kilowatt-amp.php\[2009-12-28\]](http://www.nufern.com/kilowatt-amp.php[2009-12-28])
- 121 Y. Ma, P. Zhou, X. Wang *et al.*. Coherent beam combination with single frequency dithering technique [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1308~1310
- 122 Dominic Faucher, Martin Bernier, Nicolas Caron *et al.*. Erbium-doped all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3313~3315
- 123 S. D. Jackson. High-power erbium cascade fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(16): 830~832
- 124 Army FY10A-Coherent Beam Combining of Mid-IR Lasers [EB/OL]. [http://www.zyn.com/sbir/sbres/sttr/dod/army/army10-007.htm\[2009-12-28\]](http://www.zyn.com/sbir/sbres/sttr/dod/army/army10-007.htm[2009-12-28])
- 125 G. Bloom, C. Larat, E. Lallier *et al.*. Coherent combining of two quantum-cascade lasers in a Michelson cavity [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(11): 1917~1919
- 126 T. McComb, L. Shah, R. A. Sims *et al.*. High power, tunable thulium fiber laser system for atmospheric propagation experiments[C]. Conf. Lasers Electro-Opt., 2009
- 127 T. Ehrenreich, R. Leveille, I. Majid *et al.*. 1-kW, All-glass Tm: fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 16
- 128 P. F. Moulton, G. A. Rines, E. V. Slobodtchikov *et al.*. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling[C]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 85~92
- 129 P. F. Moulton. Power Scaling of Tm: fiber Lasers to the kW Level [EB/OL]. [http://www.9-peak.com\[2010-06-10\]](http://www.9-peak.com[2010-06-10])
- 130 Z. Chen, J. Hou, P. Zhou *et al.*. Mutual injection locking and coherent combining of two individual fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(6): 515~519
- 131 Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing *et al.*. Research of coherent beam combining using actively 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
- 132 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
- 133 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Experimental explorations of the laser beam cleanup system based on stochastic parallel-gradient-descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 613~618
- 梁永辉, 王三宏, 龙学军 等. 随机并行梯度下降光束净化实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 613~618
- 134 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun *et al.*. Experimental research for real-time beam cleanup in turbulence based on stochastic parallel-gradient-descent method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 582~586
- 王三宏, 梁永辉, 龙学军 等. 随机并行梯度下降湍流场光束净化的实时校正实验研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 582~586
- 135 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Dynamical simulation and control bandwidth analysis on coherent beam combining of fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2972~2977
- 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
- 136 I. Dajani, C. Zeringue, T. Shay. Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow-linewidth high-power amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 406~414
- 137 P. Zhou, Y. Ma, X. Wang *et al.*. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2939~2941
- 138 X. Wang, P. Zhou, Y. Ma *et al.*. Coherent combining of multi-wavelength fiber amplifiers using a stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(7): 075701
- 139 Fiber Laser Pulse Source Project [EB/OL] [https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&tab=c&id=9e5d9751405cdc7895e316b1299480b7&_cview=1\[2010-06-10\]](https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&tab=c&id=9e5d9751405cdc7895e316b1299480b7&_cview=1[2010-06-10])
- 140 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Xu Xiaojun *et al.*. Coherent beam combination of pulsed fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 13~23
- 王小林, 周 朴, 许晓军 等. 脉冲光纤激光相干合成技术[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(5): 13~23
- 141 S. Jiang, M. Hanna, F. Druon *et al.*. Impact of self-phase-modulation on coherently combined fiber chirped-pulse amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1293~1295
- 142 Y. Feng, L. R. Taylor, D. B. Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23678~23683
- 143 Y. Feng, L. Taylor, D. B. Calia. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 19021~19026
- 144 L. R. Taylor, Y. Feng, D. B. Calia. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 8540~8555
- 145 R. S. Kurti, K. Halterman, R. K. Shori *et al.*. Discrete cylindrical vector beam generation from an array of optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13982~13988