

文章编号: 1001-3806(2005)05-0516-03

光纤激光器的相干合成技术

肖 瑞, 侯 静, 姜宗福*

(国防科学技术大学 理学院, 长沙 410073)

摘要: 介绍了光纤激光器相干合成的研究现状, 分析了几种典型的相干合成方法, 指出了最佳的相干合成方法。

关键词: 光纤激光器; 光纤放大器; 相干合成; 锁相

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

Coherent combining of fiber lasers

XIAO Rui, HOU Jing, JIANG Zong-fu

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The recent progress of coherent combining of fiber lasers is briefly introduced. Then some typical coherent combination methods are analyzed. Finally, the best one is presented among many actual coherent combination techniques.

Key words: fiber laser; fiber amplifier; coherent combining; phased-locked

引 言

光纤激光器是当今光电子技术研究领域中最前沿的研究课题, 同气体或常规固体激光器相比, 光纤激光器具有结构简单、散热效果好、转换效率高、低阈值等优点。特别是近年来, 国际上发展的以双包层光纤为基础的包层抽运技术, 为提高光纤激光器的输出功率提供了解决途径, 改变了光纤激光器只是一种小功率光子器件的历史。利用该技术, 光纤激光器的转换效率可达 50% 以上, 输出功率可提高几个数量级, 且有着接近衍射极限的光束质量和小巧、全固化、低阈值等显著优点。2003 年 8 月, SPI 公司跟英国的南安普敦大学的光电子研究中心合作研究出一单光纤激光器, 功率达到 1kW, 光束质量因子大约是 3, 这一数字是十分惊人的。单根光纤激光虽然可以通过上述技术提高输出功率, 但由于受到掺杂光纤的非线性效应, 光学损伤及热损伤等物理机制的限制^[1], 要想大幅度地提高单个激光器的功率是相当困难的。为达到高的激光输出功率和近衍射极限的光束质量, 一种可能采用的技术途径是: 激光器采用多模块结构, 同时对多道的输出激光束进行合成叠加。

实际工作中, 对两类光束的合成问题十分感兴趣, 即相干合成和非相干合成。光束的相干合成, 必须要精确控制激光器的位相, 从而使输出光束相干; 而非相

干合成, 阵列中每一个单元的波长或频率是有些微差异的, 它们相互间没有空间的干涉效应产生, 只是能量上的一种简单叠加, 因此, 位相是不重要的。光纤激光的非相干合成虽然也可以提高输出功率, 且比常规固体或气体激光有优势, 但相对于相干合成技术, 非相干合成光束的相干性差, 从而使其应用受到很大限制。因此, 研究光纤激光的组合相干叠加技术, 以获得千瓦级以上的相干激光输出, 是今后发展的一个重要方向。近来, 美国也在鼓励和资助光纤激光的相干组束技术研究。并已在 2003 年获得千瓦输出, 预期 2007 年获得 100kW 的相干激光输出。

1 国内外研究现状

激光器的相干合成作为一个非常活跃的研究领域, 日益引起人们的重视和关注, 并开展了大量的理论和实验研究工作。但迄今为止, 已实现商业化, 并得到应用的只有半导体激光器锁相阵列, 其它类型的激光器的相干合成尚处于实验室研究阶段, 有待于进一步开展这方面的研究工作。特别是光纤激光器的相干合成更是近一两年才发展起来的, 由于军事上的保密作用, 详细的报道并不多, 下面简单地介绍一下有关的几种实验方案。

1.1 多芯双包层光纤

多芯掺杂双包层光纤如图 1 所示^[2]。在较大的内包层中有多个掺杂纤芯, 每个纤芯的直径、掺杂浓度等均相同, 且均为单模, 纤芯之间的距离较近。由于振荡激光瞬逝波的耦合, 使得各纤芯受激发射的激光相互作用, 达到同相位激光输出。采用这种技术, 就可以在

作者简介: 肖 瑞 (1978-), 女, 博士研究生, 主要从事光纤激光器的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: jiangzongfu@yahoo.com

收稿日期: 2004-07-05; 收到修改稿日期: 2004-10-27

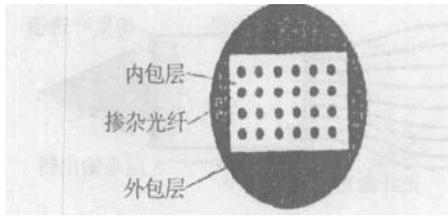


图 1 多芯双包层光纤

保持高光束质量的同时,达到高能的激光输出。

理论上,多芯双包层光纤激光器可以连续产生 2MW 的输出功率,但目前该结构仍有许多基本的物理和工程问题没有解决,而且实验上也只是实现了 7 个芯的双包层光纤激光器,输出功率仅几十瓦。

1.2 光栅外腔式耦合

1992 年, JACQUES 等人首次报道了用光栅来实现单模光纤激光器的相干耦合^[3]。如图 2 所示,将光栅

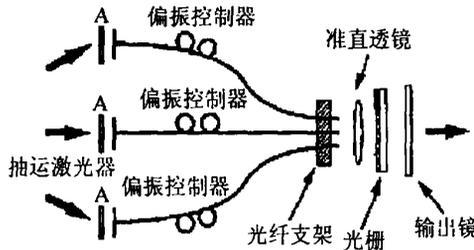


图 2 三个掺铒单模光纤激光器的相干耦合结构示意图

置于复合腔内部,所有激光器共有—个输出镜,光栅使得各光纤激光器都有部分能量进入其它光纤激光器中,各个光纤激光器中的光振荡互相牵制,达到锁模锁相的目的。图 3、图 4 分别是此激光器阵列的输出强

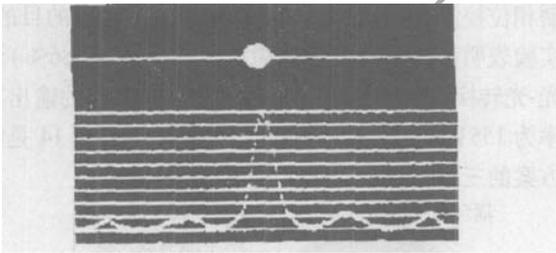


图 3 光纤激光器阵列输出光场的强度分布

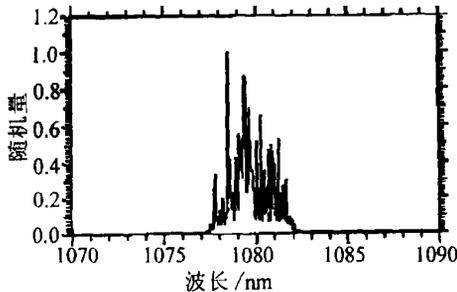


图 4 激光器阵列的功率谱分布

度和光谱分布。该方案理论上 有 93.8% 的耦合效率,实验实现了 70% 的耦合效率。

该结构对各个激光器的位相和振幅的匹配程度要求极高,否则耦合效率将会显著下降,而激光器的相对

位相是通过耦合腔自行调整的,这对实现相干耦合输出的关键元件光栅的制作标准要求很高。

1.3 输出端直接耦合

2002 年,美国 HRL Laboratory 提出以下两种实验方案。

图 5 为最初的试验方案,利用商用的光耦合器将

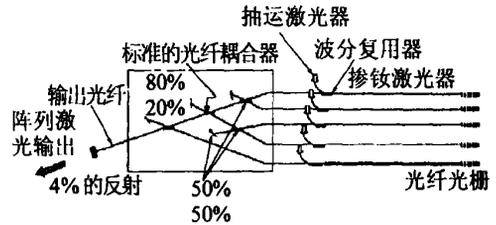


图 5 复合腔式激光器阵列

多束光纤激光器的输出端相互连接,从而实现各个激光器之间的相干耦合输出。图 6 反映了系统的输出功

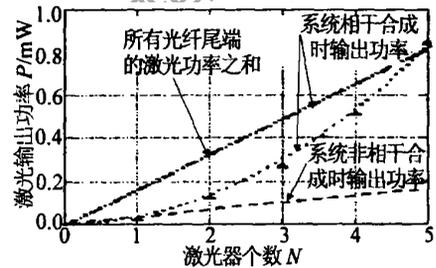


图 6 系统的输出功率和阵列中光纤激光器个数之间的关系图

率和阵列中光纤激光器个数之间的关系,从图中可以看出,系统相干合成的输出功率随着光纤激光器个数的增加成 N^2 倍增加,而当系统中各个光纤激光器之间不相干时,系统总的输出功率只是和光纤激光器的个数呈线性关系。

方案 2 如图 7 所示,将多束光纤激光器的输出端

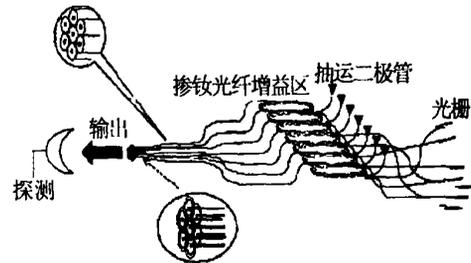


图 7 输出端直接熔接耦合的激光器阵列

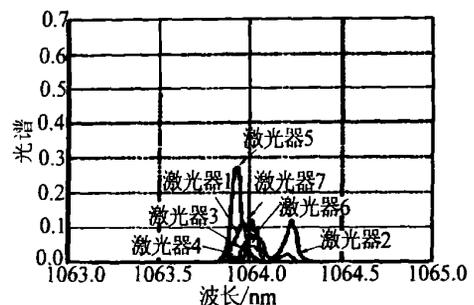


图 8 各个光纤激光器独立工作时的光谱图

用熔融方法耦合,各光纤都有泄漏模进入相邻的光纤激光器中,这使得光纤激光器中的光振荡互相牵制达到平衡,自动实现锁模锁相。图 8、图 9 分别是各个光纤激光器独立工作时和所有光纤激光器相干合成输出时的光谱图。

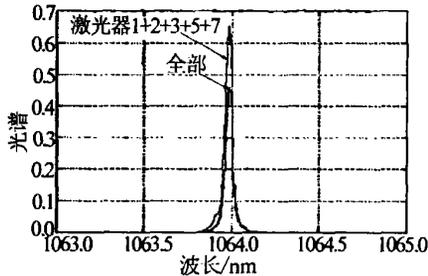


图 9 所有光纤激光器相干合成时的光谱图

这两种结构的共同特点就是没有任何的位相控制,完全依靠系统本身的瞬逝波耦合来达到相干输出,随机性较大,操作起来比较困难。而且实验表明,随着阵列中光纤激光器功率和个数的增加,相干输出的谱宽将加宽,系统性能下降。

1.4 傅里叶变换 外腔式耦合

在 2002 年的定向能研讨会上,MIT 和 Lincoln 实验室提出了图 10 所示的实验方案。

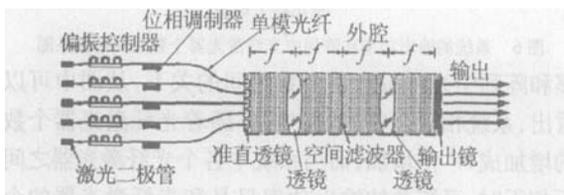


图 10 4f 外腔耦合式激光器阵列

将多束光纤激光器的输出端用 4f 系统形成的外腔耦合,所有激光器共有个 end mirror,利用 4f 系统让各光纤激光器都有部分能量进入其它光纤激光器中,使得光纤激光器中的光振荡互相牵制,达到相干耦合输出。图 11 是所有光纤激光器锁相合成时和和各光纤激光器独立工作时的光谱对照图。

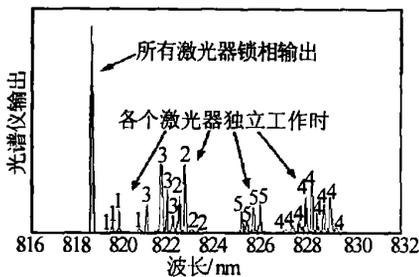


图 11 实验光谱图

后来,将多束光纤激光器输出端的外腔耦合方式改为紧凑 4f 系统,各光纤端面输出的光场符合自再现条件。改进后的方案如图 12 所示。

该紧凑系统不仅体积更小,而且能量利用率高。1369 个光纤激光器相干耦合输出时,其功率为 55kW。

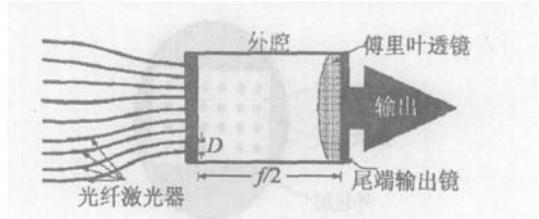


图 12 紧凑型 4f 外腔耦合式激光器阵列

傅里叶变换-外腔式耦合对实验工艺的要求很苛刻,而且阵列中元素的数目越少越难以实现。

1.5 并联主振荡 功率放大 (MOPA) 系统

2003 年,NGST 的研究人员提出了以下的 MOPA 实验方案。

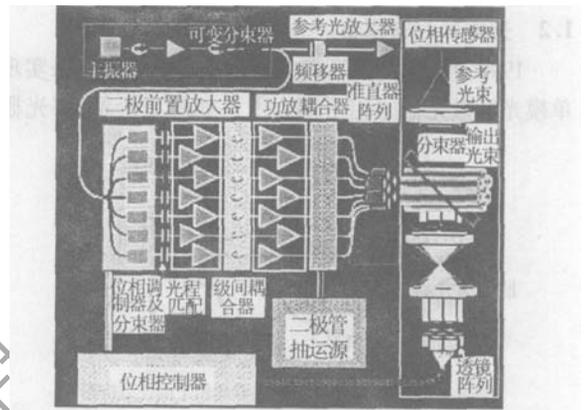


图 13 MOPA 激光器阵列

方案中主振荡器的激光被分为多束进行两级放大,其中另引出一路作为参考光波,利用外差法探测各光纤放大器的输出光波与参考光波的相位差,实时控制相位控制器,形成闭环控制,可以达到锁相的目的。实验表明该方案具有很高的抽运耦合效率 (86%) 和光-光转换效率 (82%)。每一路光纤放大器的输出功率为 155W 时,系统总功率可以达到 1kW。图 14 是该方案的三维实物图。

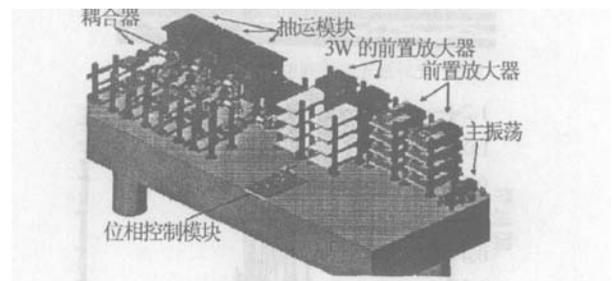


图 14 三维立体实验结构图

并联主振荡 功率放大 (MOPA) 系统对位相处理单元的精度和稳定性要求很高。

以上重点介绍了光纤激光器的相干组束技术在国外的状况,至于国内方面,迄今为止,还没有发现相关的报道。而且,实验证明,虽然目前有多种办法可以实现光纤激光器的相干合成,但是,当参与相干合成

(下转第 532 页)

大。倾斜角度 θ 与滤波小孔口径和透镜口径的比值 m 成正比,即对于焦距相同的透镜, m 越大,透镜所需要偏转的角度也就越大。

4 结 论

高功率激光器中,空间滤波器的基本功能是改善光束质量。与此同时,滤波针孔兼有限制鬼光束的作用。国内学者在分析滤波器鬼光束时,通常假设针孔板抑制了透镜 L_2 向左反射光束的潜在危害,而不深究起源于 L_2 的笔形光束的去向^[1]。李银柱等人^[3]在分析笔形光束影响时,提出了预防神光装置中笔形光束危害的必要性,但是没有给出定量分析结果。

计算结果表明:对两透镜同轴的滤波器而言,针孔板不能完全遮断鬼光束,笔形光束的潜在危害不容忽视。按作者提出的两透镜非同轴构型,选取适当的滤波器设计参数,并适当倾斜透镜 L_2 ,能有效地避免笔形光束对高能激光系统造成的危害。

透镜倾斜会使空间滤波器输出主光束的像差增

大,需要在后续光路中调整光路结构或引入特定的元件来减小这类不良影响。光束经透镜两曲面多次折、反射,存在高阶鬼像,并生成高阶笔型光束。关于失调空间滤波器中主光束像差以及高阶鬼像所产生的笔形光束等,文中未能深入研究,有待今后作进一步分析。

参 考 文 献

- [1] 冯国英,陈建国,马再如 *et al* 高功率激光系统中近轴鬼点的寻找 [J]. 光学学报, 2003, 23(5): 632~635.
- [2] 李良珏,王仕璠,李银柱 *et al* “神光”装置中空间滤波器的鬼点分析 [J]. 中国激光, 2001, 28(9): 826~828.
- [3] 李银柱,李良钰,戴亚平 *et al* 高功率激光装置中的鬼点反射分析 [J]. 中国激光, 2001, 28(8): 677~680.
- [4] MURRAY J E, Van WANTERGHEN B, SEPALA L *et al* Parasitic pencil beam caused by lens reflections in laser compfier chains [J]. SPIE, 1997, 2633: 609.
- [5] 谭吉春,景峰,朱启华 *et al* 多通放大器腔内的杂散光 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 159~163.
- [6] 卢亚雄,吕百达. 矩阵光学 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 1988. 82~95.

(上接第 518页)

的激光器或放大器的数目增大到一定程度时,最佳的实验方案当属并联主振荡功率放大(MOPA)系统。现在,国外的锁相光纤激光器阵列采用的基本方案都是利用种子激光器经过分束器,进入多路光纤放大器中进行功率放大,再进行锁相。

2 小 结

总之,光纤激光器的相干合成技术才刚刚起步,尚处于实验室探索阶段,没有很多现成的方法和结论可供借鉴。但是,相干合成的主要目的是要获得比从单个激光器输出功率更高的激光束,并保持良好光束质

量。因此,对于一个阵列系统来说,主要任务就是要在高的激光效率,稳定的位相锁定及高的光束质量三者之间寻找一个最佳的匹配关系。从而使系统的输出满足需要。

参 考 文 献

- [1] JOHAN N, JAYANTA K S, YOONCHAN J *et al* High power fiber laser: new developments [J]. SPIE, 2003, 4974: 50~59.
- [2] 楼祺洪,朱健强,周军 *et al* 双包层光纤激光器及其在军事中的应用 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2003, 14(5): 28~32.
- [3] JACQUES M, ALAN W, REN ÉD. Coherent coupling of an array of Nd^{3+} doped single-mode fiber lasers using an intracavity phase grating [J]. SPIE, 1992, 1789: 13~17.