

文章编号: 1001-3806(2008)04-0413-04

## 光纤激光相干合成与谱合成的比较

周 朴, 侯 静, 陈子伦, 刘泽金

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要:** 相干合成和谱合成是两种不同的光束合成方案, 近年来均取得了显著进展。为了比较系统地研究这两种新兴的光束合成技术, 从光纤激光器的基本要求、关键技术、可扩展性、光束质量、系统稳定性和光束控制等 6 个方面, 对目前已经获得高功率且有望获得更高功率输出的两种典型方案进行了比较研究。结果表明, 基于主振荡功率放大器结构的相干合成方案和谱合成方案均难以同时获得高功率、高光束质量的激光输出。对于不同的应用场合, 需要在高功率和高光束质量中选择较好的平衡点。

**关键词:** 激光技术; 相干合成; 谱合成; 相位噪声; 光束质量

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

### Comparison for coherent combining and spectrum combining of fiber lasers

ZHOU Pu, HOU Jing, CHEN Zi-lun, LIU Ze-jin

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

**Abstract** Significant progress has been recently reported on beam combination of fiber laser arrays using coherent combining and spectrum combining technology. Analyzing the basic requirement for the fiber laser key technology, number scalability, beam quality, system stability and beam steering comes to a comparative study on these two technologies. The results show coherent combining using master oscillator power amplifier fiber arrays configuration and spectrum combining cannot give high power laser beam with good beam quality at the same time that we have to balance the pros and cons of each technology for different application.

**Key words** laser technique; coherent combining; spectrum combining; phase noise; beam quality

### 引 言

光纤激光器是近年来光电子领域的研究热点。由于掺杂光纤的非线性效应、光学损伤、热损伤等物理机制的限制, 单根光纤激光器的输出功率有限<sup>[1]</sup>。为了获得高功率、高光束质量的激光输出, 对多个光纤激光器的输出光束进行合成是一种有效的方法。目前人们已经提出了多种光束合成的方案<sup>[2-4]</sup>。其中相干合成<sup>[5]</sup>与谱合成<sup>[6]</sup>是研究得最多的两种。诺格公司研究的基于主振荡功率放大器 (master oscillator power amplifier fiber arrays MOPA) 结构的相干合成方案目前已经取得了 470W 高功率激光输出<sup>[7]</sup>, 该方案也获得了美国国防部高能技术联合办公室和美国空军的资助。Acu light 公司研究的谱合成方案也已获得 258W 高功率激光输出<sup>[8]</sup>, 该公司还为美国国防部高能技术联合办公室和美国海

军提出了输出功率为 10kW 的解决方案<sup>[9]</sup>。

因物理机制的不同, 相干合成和谱合成的光学系统性能也不一致, 故导致应用范围的差异。如主动照明要求尽可能小的散斑效应, 谱合成就是较合适的方案; 而对于相控阵雷达等领域, 相干合成是首选。目前国内对于这两种合成技术的报道大都限于对原理和国外文献的简单介绍, 缺乏对它们的比较研究。国外也仅有 2 篇文献进行了初步的比较<sup>[10-11]</sup>, 而对一些具体的技术指标没有进行深入讨论。作者拟对这两种光纤激光器合成方案进行深入比较, 以期获得一些有用的结论。

### 1 相干合成和谱合成的基本实现方案

基于 MOPA 结构的相干合成方案设计的系统结构如图 1 所示。主振荡器的种子激光被分成多束子光

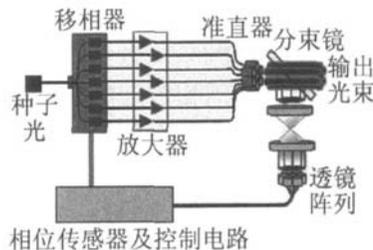


图 1 MOPA 方案实现原理图

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (60608008); 国防科学技术大学科研资助项目 (JC05-07-04)

作者简介: 周 朴 (1984-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail: jk621@163.com

收稿日期: 2007-04-02 收到修改稿日期: 2007-10-11

束, 然后对每路子光束都进行两级放大, 最后对这些放大的子光束通过一个准直器阵列整合成一束输出。其中种子光还要另外引出一路作为参考光。利用外差法探测每一路输出光束与参考光束的相位差, 实时控制相位控制器调节所有子光束的相位一致, 达到相干合成、锁相输出的目的。

谱合成方案的基本原理如图 2 所示。该方案的核

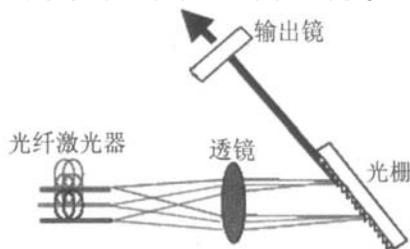


图 2 谱合成方案实现原理图

心技术是制作一个全息光栅, 光栅将不同角度入射的不同波长的激光合成一束, 使得各单元激光器发出的光束在空间重叠(包括远场区和近场区)。该方案要求各单元激光的波长有差异, 输出的激光包含多个频率成分, 但是整个系统的输出功率得到了提高。

## 2 比较研究

### 2.1 基本要求

基于 MOPA 结构的相干合成与谱合成最根本的区别在于它们对于激光器单元的输出光束分别进行电场矢量叠加和光强的简单叠加, 因此对光纤激光器单元的要求不尽相同, 如表 1 所示。

表 1 相干合成和谱合成对光纤激光器单元的基本要求<sup>[3]</sup>

性质	谱合成	相干合成
频谱	各激光器的频谱互不相同	各激光器的频谱一致
相位差	无限制	实时控制各激光器输出光束相位一致
偏振	无限制	实时控制各激光器的偏振方向一致
振幅控制	无限制	需要实时控制

总体说来, 相干合成对光纤激光器单元的要求十分严格, 而谱合成仅要求各单元的出光波长不相同, 因此, 谱合成对光纤激光器的基本要求相对宽松。

### 2.2 关键技术

基于 MOPA 结构的相干合成方案属于主动锁相技术, 需要对结构中阵元的相位进行独立控制, 这就要求处理阵元相位噪声。光波波段的相位控制难度较大<sup>[12]</sup>, 因为要获得高的光束质量, 要求光纤激光器阵列的波前误差在波长的  $1/10$  范围之内<sup>[10, 13]</sup>, 而光波的波长仅为微米量级。随着发射源的增多, 对相位控制的要求会更加苛刻。

相位噪声的产生机制非常复杂, 从实验报道的情

况看, 相位噪声的产生主要分为两个阶段: 其一是暂态过程, 即在开关闭合后短暂的工作过程; 其二是稳态过程, 即激光器工作处于稳定的状态, 系统达到热平衡。文献[12]中报道的实验结果说明, 当阵元输出功率为 10W 时, 毫秒时间段内相位变化达到波长的  $1/10$  量级。为了获得高质量的光束输出, 就要求控制系统的响应时间小于 1ms。随着输出功率的增大, 相位变化会更加剧烈。阵元的相位控制是基于 MOPA 结构的相干合成方案的难点所在。

谱合成方案要求各激光器单元的出光波长不一致, 从而利用衍射光栅将其合成一束激光输出, 这可以通过设计合适的衍射光栅和谐振腔来实现, 属于工艺上的问题。谱合成的关键在于衍射光栅的设计。由于激光器的输出光不可避免地具有一定的线宽, 衍射时会出现光束的扩展, 因此, 需要设计补偿光栅来补偿因线宽导致的光束扩展<sup>[9]</sup>。另外, 光栅上的热效应也会影响合成效果, 在 LOFTUS 等人的实验中<sup>[8]</sup>, 最大功率密度为  $1.5\text{ kW/cm}^2$  的激光会使衍射光栅发生  $0.1$  个波长量级的变形, 从而使得激光器的线宽增大。采用谱合成方案需要设计在高功率情况下具有高损坏阈值并具有低热变形的光栅。

### 2.3 可扩展性

光纤激光器合成方案的可扩展性决定了合成光束的功率量级, 从而影响到该方案的实用范围。前面已经提及, 对于基于 MOPA 结构的相干合成方案, 关键在于高功率光纤激光器的相位控制。如果这项技术能够实现, 则能很方便地扩展到多束激光相干合成。基于此, 美国空军实验室提出了激光系统的新技术和新结构<sup>[14, 15]</sup>。这种结构实质上就是一种光纤激光的相控阵, 它利用了光纤激光器的固有优势, 用光纤激光器代替其它类型的激光器, 并通过单独控制单根光纤激光器的相位, 使得每一根光纤激光器的输出光束相位保持一致, 从而获得高效率的高能激光输出。在这样的结构中, 每一根光纤激光的输出相位都可以单独控制, 这样不仅仅可以获得高能激光, 还可以控制光束的方向、补偿激光传输过程中的相位畸变等。光纤激光器相控阵可以级联, 能够实现 10kW, 100kW 甚至更高功率的高能激光输出, 如图 3 所示<sup>[14]</sup>。可见该方案有着较好的可扩展性。

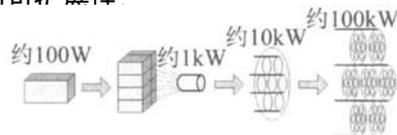


图 3 级联光纤激光器获得高功率激光

谱合成方案的可扩展性面临着一个问题: 衍射光栅的频谱范围是有限的, 需要在这有限的范围内保证

尽可能多的激光器单元数。为了达到上述目的,每个激光器单元的输出光束需要保持微量的波长差,而且这种波长差还要求能够被分辨<sup>[16]</sup>,这对谐振腔的设计提出了较高的要求。无论体系设计如何紧凑,衍射光栅的有限频谱范围决定了谱合成方案在理论上也不可能无限扩展。文献[11]中报道的实验结果说明他们采用的衍射光栅仅能对 10 根光纤激光器的输出光束进行合成。

## 2.4 光束质量

光束合成的目的除了获得高功率的激光输出之外,还期望能获得良好的光束质量。基于 MOPA 结构的相干合成方案由于光纤激光器单元在空间上是分离的,因而不可能获得达到衍射极限的光束输出<sup>[11]</sup>。该方案的输出光束与高斯光束大不相同,相当一部分的能量集中在高频分量里<sup>[17,18]</sup>。另外,相位控制得不好<sup>[13]</sup>、激光器单元出光功率的不一致(包含部分激光器单元无法正常工作的情形)<sup>[10]</sup>均会对影响光束质量。

谱合成方案通过设计合适的衍射光栅使得每一个光纤激光器单元的输出光束在空间上重合。对于线宽引起的光束扩散可以通过设计补偿光栅加以消除,而合适的光学设计可以使得光栅的衍射效率在 95% 以上。因此,如果激光器单元均输出基模光束,那么合成后的光束质量将是相当好的。LOFTUS 等人<sup>[8]</sup>实现了两根百瓦级光纤激光器的谱合成,合成后的光束质量  $M^2$  因子为 1.06 接近衍射极限。

## 2.5 系统稳定性

高能激光系统在实际应用时往往会受到很多外界因素的影响,如部分单元激光器损坏、外界存在严重的干扰(如剧烈的震动、抖动)、激光器单元的输出光束特性偏离期望值等,此时系统的稳定性决定了它的实用价值。相比之下,基于 MOPA 结构的相干合成方案

稳定性不如谱合成方案。相干合成方案的本质在于:不同激光器单元的出射光束在传输的过程中彼此干涉,从而在远场目标处获得较高的峰值功率密度。根据多光束干涉理论,远场峰值功率密度是和激光器单元数目  $N$  的平方成正比的。然而当外界存在严重的干扰,导致相位控制器不能保持所有光束的相位一致,或者部分激光器单元损坏无法正常工作,或者激光器单元输出光束的功率大小不一,均有可能造成远场中心峰值偏移,峰值功率密度急剧下降,导致系统无法正常运行。而谱合成方案由于采用衍射光栅获得了一束激光,因此受激光器相位、振幅的影响很小,并且峰值功率密度是和激光器单元数目  $N$  成正比,即使部分激光器单元损坏,整个系统依然能够正常运行,只是峰值功率密度有所下降。

## 2.6 光束控制

在光束控制方面,基于 MOPA 结构的相干合成方案和谱合成方案均能使得光束控制摆脱传统的机电传动方式,实现灵巧、轻便、快速的光束控制。相干合成方案的光束控制类似于相控阵雷达,通过控制相控阵中的各激光器单元发射光束的相位,可以使得一束或多束高强度光束指向按设计的程序实现随机的空域扫描。但是这种方法的有效扫描范围和分辨率均有限<sup>[19]</sup>,仅能实现有限范围内的抖动式扫描。如果要实现大角度的光束控制,还需要辅以其它方案。

与相干合成相比,谱合成方案的分辨率要高得多。AUGST 等人<sup>[20]</sup>通过转动谱合成系统中谐振腔的外腔镜成功实现了光束控制。但是这种方法仅在一个方向上实用,实现二维平面内的光束控制还有一定的难度。

## 2.7 综合分析

综上所述,将基于 MOPA 结构的相干合成方案和谱合成方案比较的研究结果列于表 2 中。

表 2 相干合成与谱合成的比较

	基于 MOPA 结构的相干合成方案	谱合成方案
基本要求	严格	宽松
关键技术	MOPA 结构中阵元的相位控制	能够承受高功率的高分辨率衍射光栅
可扩展性	无限制 <sup>[8]</sup>	仅能对有限个单元激光器输出光束进行合成 <sup>[8]</sup>
光束质量	不可能获得达到衍射极限的光束输出 <sup>[11]</sup>	共轴发射,光束质量好( $M^2 \approx 1.06 @ 258W$ <sup>[8]</sup> )
稳定性	外界因素的影响有可能造成远场中心峰值偏移、峰值功率密度急剧下降,导致系统无法正常运行	受单元激光器性能影响很小,即使部分激光器单元损坏,系统依然能够正常运行
光束控制	在小角度范围内快速、灵巧,但有效扫描范围和分辨率均有限	二维平面内的光束控制还有一定的难度
最高输出功率	目前最高输出功率为 470W <sup>[7]</sup>	目前最高输出功率为 258W <sup>[8]</sup>
光束合成数量	目前最多合成路数为 4 路 <sup>[7]</sup>	目前最多合成路数为 3 路 <sup>[21]</sup>

### 3 小 结

将单根光纤激光器的输出光束进行合成, 目的在于获得高功率、高光束质量的光束。基于 MOPA 结构的相干合成和谱合成是两种良好的实现方案。从光纤激光器的基本要求、关键技术、可扩展性、光束质量、系统稳定性和光束控制等 6 个方面对基于 MOPA 结构的相干合成方案和谱合成方案进行了比较分析。两种方案均有各自的优缺点, 如基于 MOPA 结构的相干合成方案在理论上可以无限制扩展, 获得高功率激光输出, 但合成光束数目的增多也会带来光束质量的下降; 而谱合成方案由于多路光束同轴输出, 保持了光纤激光固有的单模特性, 可获得高光束质量, 但受限于衍射光栅的性能, 这种方案不可能无限制扩展, 这也限制了谱合成方案的输出功率。对于不同的应用场合, 还需要在高功率和高光束质量中选择较好的平衡点。

#### 参 考 文 献

- [1] GALVANAUSKAS A. High power fiber lasers [J]. *Optics & Photonics News* 2004, 15(7): 42-47.
- [2] XIAO R, HOU J, JIANG Z F. Coherent combining of fiber lasers [J]. *Laser Technology* 2005, 29(5): 516-520 (in Chinese).
- [3] FAN T Y. Laser beam combining for high power high radiance sources [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2005, 11(3): 567-577.
- [4] HE B, LOU Q H, ZHOU J *et al*. Coherent beam combination of fiber lasers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress* 2006(9): 47-54 (in Chinese).
- [5] WICKHAM M. Coherently coupled high power fiber arrays [EB/OL]. [2007-04-01]. <http://www.stanford.edu/group/SPRC/Report/Arrmg.pdf>
- [6] LIU A P, MEAD R, VATTER T, *et al*. Spectral beam combining of high power fiber lasers [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5335: 81-88.
- [7] ANDEREGG J, BROSNAN S, CHEUNG F, *et al*. Coherently coupled high power fiber arrays [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6102: 61020U-1-61020U-5
- [8] LOFTUS T H, LIU A P, HOFFMAN P K, *et al*. 258W of spectrally beam combined power with near diffraction limited beam quality [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6102: 61020S-1-61020S-8.
- [9] BROWN A. Spectrally beam combined lasers for high brightness high power applications [EB/OL]. [2007-04-01]. <http://www.dowrbreaker.com/virtua2004>.
- [10] FAN T Y, SANCHEZ A. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5709: 157-164.
- [11] LOWENTHAL D. Spectral vs coherent beam combining how do they compare? [EB/OL]. [2007-04-01]. [http://www.nasa.gov/Briefs/Jan06/5654\\_200.html](http://www.nasa.gov/Briefs/Jan06/5654_200.html)
- [12] AUGST S J, FAN T Y, SANCHEZ A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Opt Lett* 2004, 29(5): 474-476.
- [13] NABORS C D. Effect of phase errors on coherent emitter arrays [J]. *Appl Opt* 1994, 33(12): 2284-2289.
- [14] MAMAMON P F, WILLIAM T E. New technologies and architectures for laser systems—revolutionary beam control [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5413: 1-14.
- [15] MAMAMON P F. Agile nonmechanical beam steering [J]. *Optics & Photonics News* 2006, 17(3): 24-29.
- [16] RÖSER F, KLINGEBEL S, LEM A, *et al*. Spectral beam combining of fiber lasers [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6102: 61020T-1-61020T-6.
- [17] SPRANGLE P, PENANO J, HAFIZI B, *et al*. Incoherent combining of high power fiber lasers for long range directed energy applications [EB/OL]. [2007-04-01]. <http://www.stommedia.us/25/2542/25425.htm>
- [18] SEGMAN A E. How to (maybe) measure laser beam quality [EB/OL]. [2007-04-01]. <http://www.stanford.edu/~sigman/index.html>
- [19] POLLISHUK A, ARNON S. Communication performance analysis of microsatellites using an optical phased array antenna [J]. *Opt Engng* 2003, 42(7): 2015-2024.
- [20] AUGST S J, GOYAL A K, AGGARWAL R L, *et al*. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. *Opt Lett* 2003, 28(5): 331-333.
- [21] KLINGEBEL S, RÖSER F, BÜLEND O, *et al*. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. *JOSA*, 2007, B24(8): 1716-1720.

(上接第 401 页)

- [2] WALLACE R J, BASS M, COPLEY S M. Curvature of laser-machined grooves in  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [J]. *JAP*, 1986, 59(15): 3555-3560.
- [3] OLSEN F O. Cutting with polarized laser beams [J]. *DVS-Berichte*, 1980, 63: 197-200.
- [4] van HALEWIJN H J. *The industrial laser handbook* [M]. New York: Springer Verlag, 1992: 108-112.
- [5] SCHRENER-MOHR U, DAUSINGER F, HÜGEL H. New aspects of cutting with  $\text{CO}_2$  lasers [C]//CALEO'91. San José: Laser Institute of America, 1991: 263-271.
- [6] NZIEV V G, NESTEROV A V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency [J]. *Journal of Physics* 1999, 31(13): 1455-1461.
- [7] TREYZ G V, BEACH R, OSGOOD R M, Jr. Rapid direct writing of high-aspect ratio trenches in silicon [J]. *A P L*, 1987, 50(8): 475-477.
- [8] BONSE J, RUDOLPH P, KRUGER J, *et al*. Femtosecond pulse laser processing of TN on silicon [J]. *Applied Surface Science* 2000(154): 659-663.
- [9] BONSE J, GEUSS M, BAUDACH S, *et al*. The precision of the femtosecond-pulse laser ablation of TN films on silicon [J]. *Appl Phys* 1999, A69(7): S399-S402.
- [10] TÖENSHOFF H K, OSTENDORF A, WAGNER T. Structuring silicon with femtosecond lasers [J]. *SPIE* 2001, 4274: 88-97.