

2×2 全光纤激光器阵列部分相干合成的实验研究

赵保银^{1,2}, 段开棕¹, 赵 卫¹, 钱凤臣^{1,2,3}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119 ;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049 ; 3. 西安通信学院, 陕西 西安 710106)

摘 要: 对 2×2 全光纤激光器阵列的部分相干合成进行了实验研究。将四台全光纤激光器阵列分为两组, 组内两光纤激光器通过一个对激光波长具有一定反射率的光纤光栅实现腔模互注入相位锁定, 而两组激光阵列元之间非相干。四束激光经一个四面直角棱镜反射后尽量接近并实现对称排布。获得两组清晰的干涉条纹, 条纹最大可见度分别约为 43% 和 38%。整个激光器阵列在泵浦光总功率为 1624W 时获得 925W 高功率部分相干输出。在合成光束占空比为 0.54 时, 合成光束的光束质量 BQ 值约为 1.95。激光器阵列由全光纤元件组成, 系统结构紧凑, 在长时间的高功率合成实验中, 性能稳定, 没有观察到光热损伤现象。

关键词: 全光纤激光器阵列; 光束合成; 部分相干; 互注入相位锁定

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0058-05

Experimental study on partially coherent combination of a 2×2 all-fiber laser array

Zhao Baoyin^{1,2}, Duan Kailiang¹, Zhao Wei¹, Qian Fengchen^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China)

Abstract: By using partially coherent combining technique, beam combining of a 2×2 all-fiber laser array was experimentally studied. The laser array consisted of two incoherent laser groups. Each group contained two all-fiber lasers which were phase-locked by using direct mode mutual injection method through a fiber Bragg grating with proper reflectivity. The four laser beams were arranged symmetrically. And they were placed as close as possible by using a four-right-angle prism. In the experiment, two groups of clear interfere strips with maximum visibility of about 43% and 38% were observed, respectively. The whole laser array finally generates 925 W output power when the total pump power was 1 624 W. The beam-

收稿日期: 2011-05-02; 修订日期: 2011-06-15

基金项目: 中国科学院“西部之光”“联合学者”项目(0729591213)

作者简介: 赵保银(1974-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事大功率全光纤激光技术研究。Email: joseph.zhao@opt.ac.cn

导师简介: 段开棕(1968-), 男, 副研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率激光技术等方面的研究。Email: kl.duan@163.com

quality value BQ of the combined beam emitting from the laser array was 1.95 when the fill factor of the laser array was 0.54. This fiber laser combining array was constructed by all-fiber components, thereby was monolithic with stable performance. During the long time of high power operation, the monolithic fiber laser array works with excellent stability, no thermal distortion and damage are observed.

Key words: all-fiber laser array; beam combination; partially coherent; mutual injection phase-locking

0 引言

近几年,光纤激光器的输出功率水平迅速提高^[1-5]。然而,强激光束通过光纤时产生的光热损伤和非线性效应限制了光纤激光器单光纤输出功率的进一步提高,为此,需要采用光束合成的办法获得更高的功率输出。目前,已有许多技术对光束合成进行了探索性研究。按照激光器阵列元间的相位关系,光束合成技术可分为谱合成和相干合束两大类^[6-8]。谱合成是一种非相干合束技术,它使多个不同波长的单模激光束沿同一传输轴传播合成一束,而不用考虑光束之间的相干性^[9]。相干合束则采用主动锁相或被动锁相技术,使激光器阵列各个单元相位一致。其中,主动锁相合成技术涉及到对激光器阵列元相位的检测和调制,一般采用主振荡功率放大(MOPA)结构来使各阵列元间相干^[7];而被动锁相技术众多,如瞬逝波耦合^[10]、自傅里叶变换腔技术^[11]、自成像腔技术^[12]、光纤耦合器的干涉注入方法等^[13],这些本质上都是利用互注入技术实现各阵列元的相位锁定。

目前,有关光纤激光器光束合成技术的研究未取得令人满意的实验结果,许多合成技术仍处于原理性探索阶段。随着功率的提高和合成路数的增加,利用有限的激光单元获得较高的合成功率仍然面临极大的困难。因此,探索光纤激光器新的合成方法仍是一项充满挑战而有意义的工作^[14]。

近几年国内对光纤激光的相干合成进行了积极的探索。2008年上海光学精密机械研究所利用自成像腔技术实现了4路光纤激光的相位锁定^[12]。2009年1月,武汉军械士官学院使用外腔互注入锁相技术实现两双包层光纤激光器相干^[15]。11月国防科学与技术大学采用互注入技术成功实验三路掺铒光纤激光器的相位锁定^[16]。总体看来,光束合成研究获得的功率有限,而且许多研究只关注激光器阵列的相

位锁定,对如何获得较好的合成效果(光束质量)关注较少。

文中报道了大功率全光纤激光器部分相干光束合成的最新实验研究成果。实验所建2×2全光纤激光器阵列包含2组光纤激光器,两组之间为非相干关系,每组两台全光纤激光器采用腔模互注入技术实现相位锁定。利用一个四面直角棱镜实现四束激光的高占空比对称排布,从而在远场获得了较高的合成功率 and 较好的合成光束质量。

1 2×2 部分相干全光纤激光器阵列

如图1(a)所示,2×2部分相干全光纤激光器阵列由全光纤激光器 Laser 1-Laser 4 组成。其中,增益光纤 YDF 1-YDF 4 为双包层掺镱光纤,纤芯和包层直径分别为 20 μm 和 400 μm;数值孔径为 0.06 和 0.46;对 915 nm 波长泵浦光的吸收系数为 0.55 dB/m;对 976 nm 波长泵浦光的吸收系数为 1.7 dB/m。YDF 1、YDF 2 长度为 32 m, YDF 3、YDF 4 长度为 13 m。C1-C8 为(6+1)×1 泵浦耦合器,其信号光纤与增益光纤的参数相同,泵浦光纤纤芯/包层直径为 200/220 μm,数值孔径为 0.22。C1-C8 分别熔接于增益光纤 YDF 1-YDF 4 两端。LD 1 和 LD 2 为最大输出功率 100 W 的大功率半导体泵浦光源,其泵浦光波长分别为 915 nm 和 976 nm,谱宽为 5 nm。20 台 LD 1 和 LD 2 分别与耦合器 C1-C8 的泵浦传输光纤熔接,为增益光纤 YDF 1-YDF 4 提供泵浦功率。光纤光栅 FBG 1、FBG 2、FBG 4 和 FBG 5 对 1080 nm 波长激光的反射率为 10%,分别与 C2、C4、C6 和 C8 的信号光纤熔接,成为 Laser 1-Laser 4 的输出腔镜。光纤光栅 FBG 3 和 FBG 6 对 1080 nm 波长激光的反射率为 80%。FBG 3 两端分别与 C1 和 C3 的信号光纤熔接,成为 Laser 1 和 Laser 2 的共用腔镜,这样两激光器的腔模通过 FBG 3 互相注入对方实现相

位锁定,成为第一组相干激光器。同样,FBG 6 的两端分别与 C5 和 C7 的信号光纤熔接,成为 Laser 3 和 Laser 4 的共用腔镜,使激光器 Laser 3 和 Laser 4 成为第二组相干光纤激光器。4 束激光分别经准直器 OC 1-OC 4 准直输出。

部分相干合束原理如图 1(b)所示,P 为反射面与底面成 45° 夹角的四面直角棱镜,使用其可以将 4 束准直激光尽量靠近,提高出射光束占空比。将 OC 1 和 OC 2、OC 3 和 OC 4 两两相对放置,并调节 4 个准直器的位置使激光束以 45° 角分别入射到直角棱镜 P 的 4 个反射面,并经棱镜反射后变为 4 束平行光。调节棱镜 P 的前后位置,使 4 束平行光的出射光斑成为光束中心距约为 2 mm 的正方形,此时出射光束占空比达到 0.54。该方法使两组激光束对称排列,组内光束两两相干合成后功率密度最高的零频分量位置重合并保证同轴传输,从而在远场获得组间非相干合成的高功率激光束。

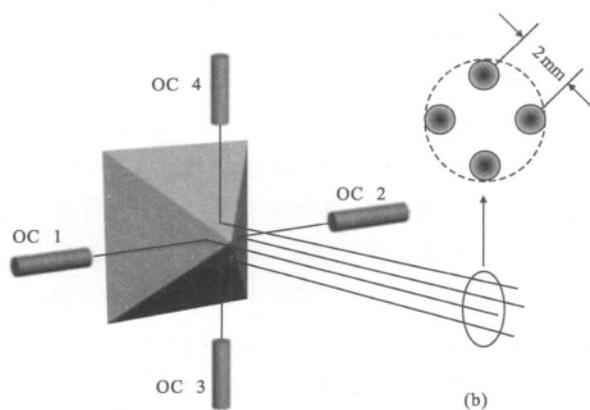
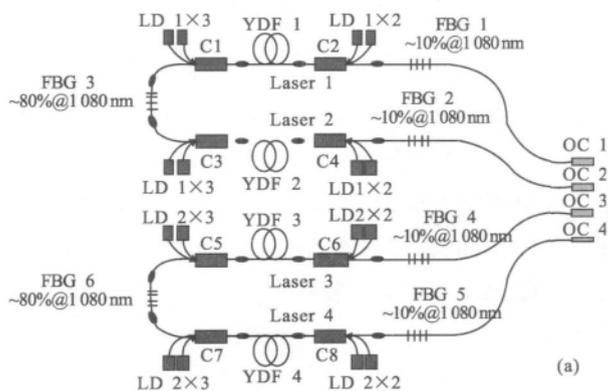


图 1 全光纤激光器阵列和部分相干合成实验原理

Fig.1 All-fiber laser array and experimental principle of partially coherent combination

2 实验结果与分析

为证明两组光纤激光器的相干性,分别开启图 1 中的第一组 (Laser 1 和 Laser 2) 或第二组 (Laser 3 和 Laser 4) 激光器,并使激光束经棱镜 P 后,通过一长焦距透镜,进入放置于透镜焦平面上的 CCD,分别观察两组光纤激光在远场叠加后的光强分布。实验发现,虽然每组光纤激光器在结构上是对称的,但由于泵浦功率、光纤、光纤器件以及光纤熔接损耗等方面的差异,两组激光束的输出强度都存在不平衡的现象。为了得到可见度较好的相干图样,需要适度拉开光束之间的距离,并使用衰减片对输出较强的一路激光进行衰减,使之与另一路激光强度近似相等。实验观察到的干涉图样如图 2 所示,图 2(a) 为 Laser 1 和 Laser 2 的相干条纹,图 2(b) 为 Laser 3 和 Laser 4 的干涉条纹,两组干涉条纹的可见度约分别为 43% 和 38%,表明两组全光纤激光器 Laser 1 和 Laser 2, Laser 3 和 Laser 4 均已实现相位锁定。

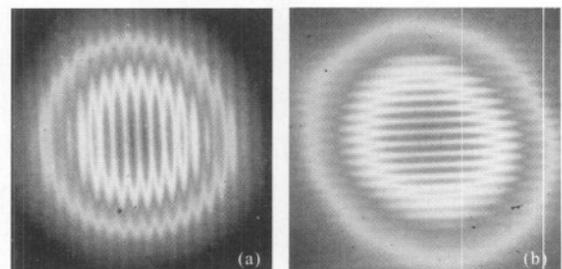


图 2 干涉图样

Fig.2 Interference pattern

为了提高激光束阵列的占空比,在远场获得较好的合成效果,移去了上述相干性实验中用来平衡光束强度的衰减片,并将 4 束激光尽量靠近,使彼此间距仍为 2 mm。图 3(a)、(b) 分别为 2×2 光纤激光阵列的近场和远场光强分布。由图 3(a) 可以看出,合成光束在近场为 4 个分离的光斑,其中互为对角的两束激光是具有相干性一组。由于没有使用衰减片,每组的两束激光光强相差较大;图 3(b) 为占空比为 0.54 时的远场光强分布,激光阵列在远场合成为单一光束。由于该实验 2×2 光纤激光阵列的两组激光束之间非相干,且每组相干激光束的光强相差较大,所以远场光束合成后并未出现干涉条纹。但这两组激光束的传输中心是重合的,因此在远场仍可获得

较好的光束质量。

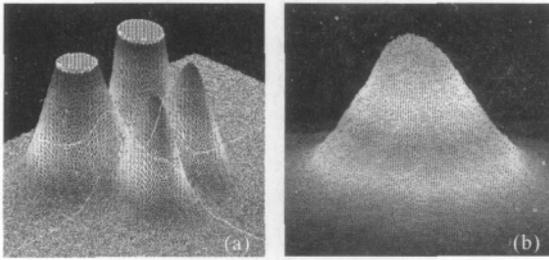


图 3 光场强度分布

Fig.3 Intensity distributes of near-field and far-field

使用 BQ 值来描述合成光束的光束质量。与 M^2 因子不同, 光束质量 BQ 值可以有效反映合成光束的远场聚焦能力, 因此成为评价合成光束质量的一项重要指标^[17-18]。图 4 为测量合成光束光束质量 BQ 值的实验装置, 会聚透镜 L 的焦距 $f=2\ 000\text{ mm}$, A 为透镜焦平面上直径 $D_a=0.7\text{ mm}$ 的小孔光阑, PM 为功率计。分别在光阑前、后测量合成光束的功率 P_i 和 P_a , 由公式 $BQ=(0.838 P_i/P_a)^{1/2}$ 可得合成光束的光束质量 BQ 值。表 1 为实验测得结果, 计算出光束质量 BQ 值的平均值约为 1.95。

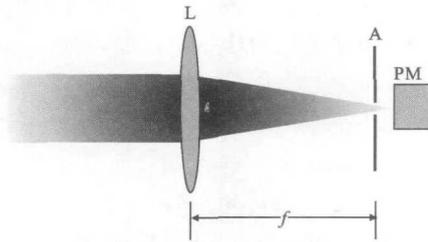


图 4 光束质量 BQ 值测量装置

Fig.4 Experimental setup for measuring beam quality BQ

表 1 光束质量 BQ 值

Tab.1 Beam quality BQ

Item	Value						
P_i/W	0.49	1.01	1.88	2.61	3.14	3.85	4.79
P_a/W	0.11	0.22	0.42	0.57	0.73	0.84	1.07
BQ	1.94	1.97	1.95	1.97	1.91	1.97	1.95

图 5 为两组光纤激光器输出及其部分相干合成后输出功率随泵浦功率的变化曲线图。两组激光器 Laser 1 和 Laser 2, Laser 3 和 Laser 4 的泵浦阈值功率分别约为 12 W 和 8 W, 各组输出功率随泵浦功率的增大而线性增加。当泵浦功率分别为 824.2 W 和

799.6 W 时, 两组相干激光器处于相位锁定状态, 分别获得 474 W 和 451 W 相干合成功率, 整个激光器阵列 Laser 1-Laser 4 部分相干合成后获得 925 W 高功率输出。在高功率输出状态, 增益光纤、光纤光栅、泵浦耦合器和光纤熔接点需放置在热沉上冷却, 在较长的实验时间内整个激光器阵列工作稳定, 没有观察到光热损伤现象。

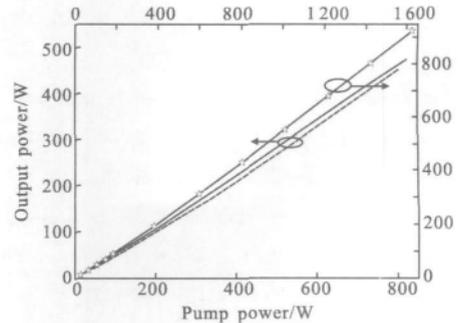


图 5 两组光纤激光器相干合成功率 and 它们的部分相干合成功率随泵浦功率的变化

Fig.5 Combined output power for the two individual laser groups and the overall laser array corresponding to their pump power

3 结 论

文中对 2×2 全光纤激光器阵列的部分相干合成进行了实验研究。实验中将 4 个全光纤激光器分为两组, 两组之间非相干, 而组内两激光器使用腔模互注入技术实现相位锁定。在输出端使用四面直角棱镜使 4 束激光尽量接近, 并使相干和非相干的两组激光束在空间上对称排布, 相干光束合成后功率密度最高的零频分量的空间位置重合并保证同轴传输, 从而在远场获得组间非相干合成的高功率输出。实验在较高占空比条件下获得了较好的合成效果。研究证明, 该综合利用相干和非相干技术进行光束合成的方法是获得较高合成功率的有效途径, 通过提高单根输出功率和增加激光器组数, 可使合成功率进一步提高。

参考文献:

[1] Hu Guijun, Shan Chengyu, Deng Xiaoying, et al. Threshold characteristics of linear cavity Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, 37(1): 3-7.
 [2] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output

- power[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088–6092.
- [3] Guo Wengang, Tu Chenghou, Luo Shaojun, et al. Theoretical and experimental investigation on transient regime of fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1039–1043. (in Chinese)
郭文刚, 涂成厚, 罗绍钧, 等. 光纤激光器时域瞬态特性的理论与实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1039–1043.
- [4] Bonati G, Voelckel H, Gabler T, et al. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]//*Photonics Conf West 2005 session 5709–2a*, 2005.
- [5] IPG Photonics. IPG Photonics successfully tests world's first 10 kw single-mode production laser[EB/OL]. [2009–06–15] <http://www.ipgphotonics.com/newsproduct.htm>.
- [6] 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.
- [7] Demoustier S, Bellanger C, Brignon A, et al. Coherent beam combining of 1.5 μm Er/Yb doped fiber amplifiers[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2008, 27(5): 392–406.
- [8] Cao Jianqiu, Xu Xiaojun, Hou Jing, et al. Coherent combining technology of fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 456–460. (in Chinese)
曹涧秋, 许晓军, 侯静, 等. 光纤激光器的相干合成技术. *红外与激光工程*[J]. 2008, 37(3): 456–460.
- [9] Liu A P, Mead R, Vatter T, et al. Spectral beam combining of high power fiber lasers[C]//*SPIE*, 2004, 5335: 81–88.
- [10] Huo Yanming, Cheo P K. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(11):2345–2349.
- [11] Corcoran C J, Durville F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20): 2011181–2011183.
- [12] He Bing, Lou Qihong, Wang Wei, et al. Experimental demonstration of phase locking of a two-dimensional fiber laser array using a self-imaging resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(25): 2511157–2511153.
- [13] Shirakawa A, Saitou T, Sekiguchi T, et al. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2002, 10(21): 1167–1172.
- [14] Lei Bing, Feng Ying. Coherent combining of two fiber lasers in a Michelson-type coupled cavity[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(4): 739–743.
- [15] Liu Y, Chen Y, Xu L, et al. Mutual injection-locking of two individual double-clad fibre lasers [J]. *IEEE Journal of Electronics Letters*, 2009, 45(8): 399–400.
- [16] Chen Zilun, Hou Jing, Zhou Pu, et al. Mutual injection locking and coherent combining of three individual fiber lasers[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(1): 60–63.
- [17] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(4): 733–738. (in Chinese)
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 733–738.
- [18] Lv Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 47–51. (in Chinese)
吕百达, 康小平. 对激光光束质量一些问题的认识[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 47–51.