

文章编号: 0258-7025(2010)04-1007-05

占空比对相干组束影响的实验研究

王 炜^{1,2,3} 何 兵^{1,2} 李 震^{1,2,3} 薛宇豪^{1,2,3} 周 军^{1,2} 刘 侠^{1,2,3} 楼祺洪^{1,2} 许 辉⁴

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049
⁴ 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 研究了相干组束中激光器阵列出射光束的占空比,对相干组束后远场中心光斑能量比值的影响,进行了理论分析,并在一维二路自成像相干组束实验中,进行了占空比调节的实验。理论分析认为,在一定单元出射光束宽度下,增大占空比值,可以提高相干组束后中心光斑能量比值,同时可以减少次级光斑的数量。通过实验验证,当光束的腰斑不大于1 mm时,相邻光束间距从2.06 mm增大至6.02 mm,中心光斑能量比从42%降至11.13%。

关键词 激光技术;相干组束;光强分布;光纤激光器;光束质量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1007

Experimental Study on Coherent Beam Combination in Lasers Array in Different Duty Ratios

Wang Wei^{1,2,3} He Bing^{1,2} Li Zhen^{1,2,3} Xue Yuhao^{1,2,3} Zhou Jun^{1,2} Liu Xia^{1,2,3}
Lou Qihong^{1,2} Xu Hui⁴

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai 201800, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
⁴ School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract In the coherent beam combination of lasers array, the duty ratio has influence on efficiency of coherent beam combination, which is researched with mathematic analysis. Coherent beam combination experiment with 1×2 laser arrays is carried out in self-Fourier cavity. The result of mathematic analysis shows that through increasing the duty ratio, the energy duty of the central spot increases, and the number of secondary spot decreases. It is proved by the results of experiment that the energy duty of the central spot decreases from 42% to 11.13%, when the distance of two adjacent beam increases from 2.06 mm to 6.02 mm.

Key words laser technique; coherent beam combination; intensity distribution; fiber laser; beam quality

1 引 言

由于光纤激光器具有光束质量好、效率高、散热性能好等特殊优点,在远程焊接、三维切割、激光打标等工业领域得到了广泛应用^[1~4]。2005年,美国

IPG公司全光纤激光器单模连续输出功率已经达到2 kW^[5]。但是由于受到非线性、热效应等因素的影响,单根光纤激光器的输出功率也不能无限提高^[6]。Dawson等^[7]认为,按照目前的材料和条件,考虑各

收稿日期:2009-03-24;收到修改稿日期:2009-07-14

基金项目:国家863计划(2008AA03Z405)资助课题。

作者简介:王 炜(1977—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及相干组束方面的研究。

E-mail:ww76151@163.com

导师简介:楼祺洪(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事准分子激光器和光纤激光器等方面的研究。

E-mail:qhlou@mail.shcnc.ac.cn

种物理因素,包括热限制、非线性光学影响、输出端限制等,对于宽带光纤激光器,输出衍射极限激光的功率上限为36.6 kW,对于窄带光纤激光器,输出上限则是18.6 kW。

目前常用的解决办法采用光纤激光器阵列进行组束达到提高输出功率的目的。但作为高性能的激光器仅得到简单的高功率合成输出是不够的,还必须保证组束后的激光光束质量不能降低,甚至能够得到提高。光纤激光器阵列的相干合成(即相干组束)是产生高功率、高质量光束的常用选择^[8~13]。在激光阵列相干合成中,最为关心的是相干输出激光束中心区域的光强分布。激光器阵列的占空比(激光器阵列出射激光束腰斑直径与两相邻激光束中心距离之间的比值)的大小对于中心区域的光强有很大的影响。本文通过理论分析,并且在光纤激光自相干组束实验中通过改变占空比比值,发现当占空比改变时,相干输出光束的中心区域光强分布也相应变化。

2 理论分析

首先计算理想情况下相干合成光束在远场的光强分布。采用的激光器阵列分布如图1所示。

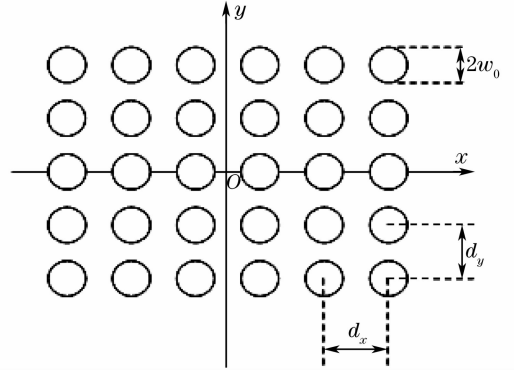


图1 激光器阵列二维分布图

Fig. 1 Two-dimensional distribution of laser-array

假设在 x 方向分布有 N 个单元, y 方向分布有 M 个单元,每相邻单元在 x, y 的间隔分别为 d_x, d_y , 单路激光器的出光口径为 $2w_0$ 。波长为 λ , 在坐标原点的单路激光器出射光束的振幅分布为

$$U_i = A_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) = A_0 U(x, y), \quad (1)$$

式中 A_0 为振幅, w_0 为每路激光束的腰斑半径, $U(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right)$ 。由文献[14], 可以计算出远场 z 处的光强分布公式为

$$I_0(f_x, f_y, z) = \frac{A_0^2}{\lambda^2 z^2} |\mathcal{F}\{U(x, y)\}|^2 \times \frac{\sin^2(\pi N d_x f_x)}{\sin^2(\pi d_x f_x)} \frac{\sin^2(\pi M d_y f_y)}{\sin^2(\pi d_y f_y)}, \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}\{U(x, y)\} = \iint U(x, y) \exp[j2\pi(f_x x_s + f_y y_s)] dx_s dy_s = \pi w_0^2 \exp[-\pi^2 w_0^2 (f_x^2 + f_y^2)]$, $f_x = \frac{x_s}{\lambda z}$, $f_y = \frac{y_s}{\lambda z}$, (x_s, y_s) 为远场 z 处坐标系。

$$I_0(f_x, f_y, z) = \frac{\pi^2 w_0^4 A_0^2}{\lambda^2 z^2} \{\exp[-\pi^2 w_0^2 (f_x^2 + f_y^2)]\}^2 \times \frac{\sin^2(\pi N d_x f_x)}{\sin^2(\pi d_x f_x)} \frac{\sin^2(\pi M d_y f_y)}{\sin^2(\pi d_y f_y)}, \quad (3)$$

从(3)式可以看出,相干组束中,远场中心峰值光强为

$$I_{\text{center}}(f_x, f_y, z) = \frac{\pi^2 A_0^2 w_0^4}{\lambda^2 z^2} N^2 M^2, \quad (4)$$

中心光斑在远场 z 处的 x_s 和 y_s 方向的宽度为

$$\Delta X = \frac{2\lambda z}{N d_x}, \quad \Delta Y = \frac{2\lambda z}{M d_y}, \quad (5)$$

从(3)~(5)式可以看出,激光阵列相干组束实验中,远场中心峰值光强只与激光阵列个数、输出激光振幅和单元激光器输出光束的腰斑半径有关,而与相邻光束之间的中心距离无关。由(3)式第二项 $\exp[-\pi^2 w_0^2 (f_x^2 + f_y^2)]$ 可知,单元激光器的出射光束腰斑半径决定了单个激光束在远场的光强分布区域,由于每个单元光束在远场光强分布区域相同,从而也决定了相干组束后远场光强分布最大区域。而由(3)式中的最后一项 $\frac{\sin^2(\pi N d_x f_x)}{\sin^2(\pi d_x f_x)} \frac{\sin^2(\pi M d_y f_y)}{\sin^2(\pi d_y f_y)}$ 可以看出,相邻光束间距则决定了中心光斑和次级光斑的分布区域,远场中心光斑区域的大小由激光阵列在 x, y 方向的排列个数 N, M , 以及相邻激光束中心间距 d_x, d_y 共同决定。中心光斑所占整个能量的比值——中心光斑能量比 P , 可以由(3)和(5)式写成

$$P = \left[\int_{-1/(Nd)_x}^{1/(Nd)_x} \int_{-1/(Md)_y}^{1/(Md)_y} I_0(f_x, f_y, z) df_x df_y \right] \times J^{-1}, \quad (6)$$

式中 J 为整个激光阵列的全部出射能量。如果令 $f_x = X/d_x, f_y = Y/d_y$, 那么(6)式可以写成

$$P = \left\{ \int_{-1/N}^{1/N} \int_{-1/M}^{1/M} \frac{\pi^2 \omega_0^4 A_0^2}{d_x d_y \lambda^2 z^2} \{ \exp[-\pi^2 \omega_0^2 (d_x^{-2} X^2 + d_y^{-2} Y^2)] \}^2 \times \frac{\sin^2(\pi NX)}{\sin^2(\pi X)} \frac{\sin^2(\pi MY)}{\sin^2(\pi Y)} dXdY \right\} \times J^{-1}, \quad (7)$$

式中 $Q = \frac{\pi^2 \omega_0^4 A_0^2}{d_x d_y \lambda^2 z^2} \{ \exp[-\pi^2 \omega_0^2 (d_x^{-2} X^2 + d_y^{-2} Y^2)] \}^2$ 是关于间距 d_x, d_y 的影响, 以 x 方向为例, 对于不同的 x 方向的间距 d_{x1}, d_{x2} , 对应的比值可以写成

$$\frac{Q_{d_{x1}}}{Q_{d_{x2}}} = \frac{d_{x2}}{d_{x1}} \{ \exp[-\pi^2 \omega_0^2 X^2 (d_{x1}^{-2} - d_{x2}^{-2})] \}^2, \quad (8)$$

若 $d_{x1} > d_{x2}$, 那么 $\frac{Q_{d_{x1}}}{Q_{d_{x2}}} < 1$ 。由此可以得出, 当 d_x, d_y 减小时, 中心光斑包含的能量也越多, 中心光斑能量比 P 也越大。当出射光束的腰斑半径为 1 mm 时, 计算了一维二路激光阵列中心光斑能量比和相邻光束间距之间的关系曲线, 如图 2 所示。

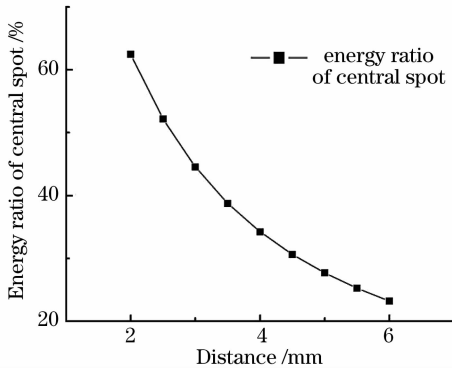


图 2 中心光斑能量比与间距的曲线图

Fig. 2 Central spot energy ratio of different spacing distances

3 自成像相干组束占空比调节实验

3.1 实验装置

在原有采用自傅里叶变换实现相干组束的实验

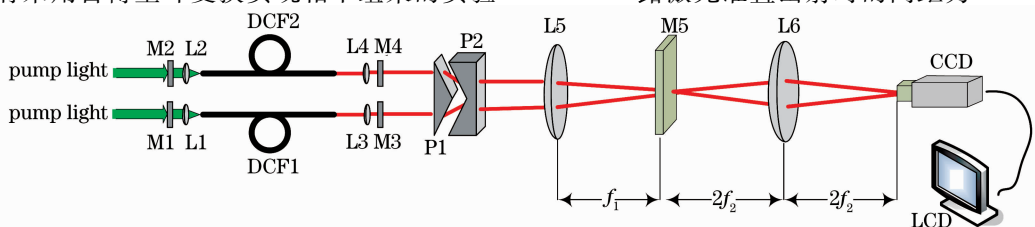


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

基础上^[15]进行了自成像相干组束占空比调节实验, 实验装置如图 3 所示, 双色镜(M1 和 M3), 会聚透镜 L1, 掺铒光纤 DCF1 和准直透镜 L3 组成一个光纤激光器单元, 其中双色镜 M1 对 1064~1110 nm 波长激光高反而对 975 nm 波长的抽运激光高透, M3 对 1064~1110 nm 波长激光高透而对 975 nm 波长抽运激光高反, 准直透镜 L3 的直径为 4 mm, 焦距为 6.3 mm, 掺铒光纤的具体参数是, 内包层为矩形, 边长为 330 μm \times 170 μm , 数值孔径为 0.47, 纤芯直径为 9 μm , 数值孔径为 0.1。另外一个激光器单元也采用相同结构, 这两个激光器共同组成了一个一维二路的光纤激光器发射阵列。由等腰棱镜 P1 和 V 型棱镜 P2 组成一维激光阵列间距调节机构, 增大等腰棱镜 P1 和 V 型棱镜在光束传输方向的距离, 可以减小光束之间的间距。透镜 L5 为傅里叶透镜, 焦距为 $f_1 = 50$ cm, 在傅里叶透镜的后焦面处放置了对 1064~1110 nm 波长激光的透过率为 70% 的平面镜 M5, 在平面镜 M5 表面, 沿竖直方向放置了一根具有高熔点(1769 $^{\circ}\text{C}$)的细铂金线作为空间滤波器, 铂金线的直径为 20 μm 。傅里叶透镜 L5 和平面镜 M5 共同构成了傅里叶变换自成像腔, 透镜 L6 是成像透镜, 焦距为 $f_2 = 15$ cm, 用于将 M5 上的相干光强分布成像于 CCD 中, M5 与 L6 的距离为 $2f_2$ 。在成像透镜 L6 后 $2f_2$ 处, 用一个 CCD (型号为 COHU4810) 和 SpiriconInc 公司生产的 LBA-PC300 型激光波面分析仪 (软件版本 3.23) 对相干激光组束图样进行采集和分析。

3.2 实验结果

二路激光准直出射时的间距为 8 mm, 光束直径

约为2 mm,通过增大等腰棱镜 P1 和 V 型棱镜 P2 之间距离可以将出射激光束的间距变小,从而增大占空比。实验中观察到了明显相干合成后光斑的变化,如图 4 所示。图 4(a1)~(a4)分别是观察到的

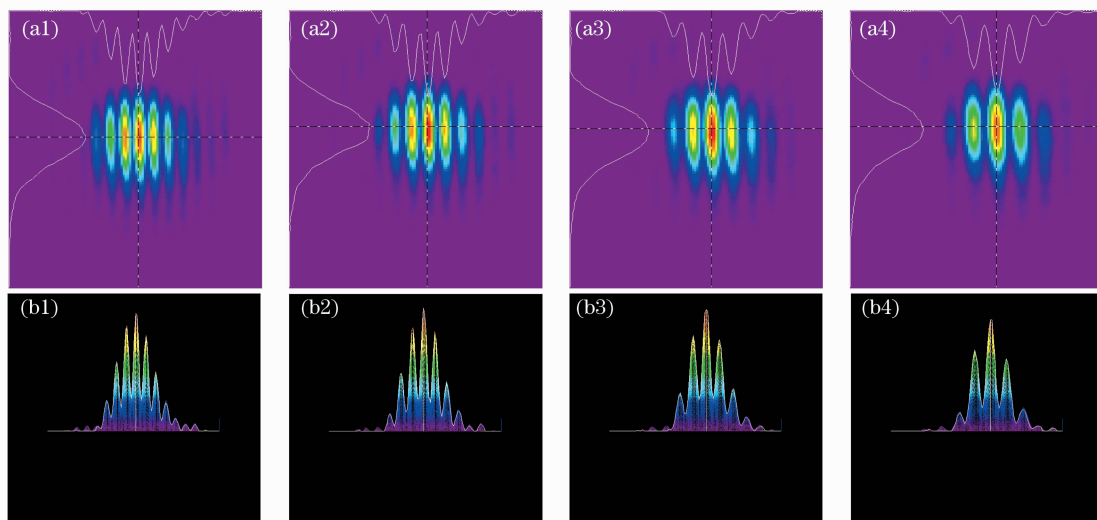


图 4 不同占空比实验结果

Fig. 4 Experimental results of different duty ratios

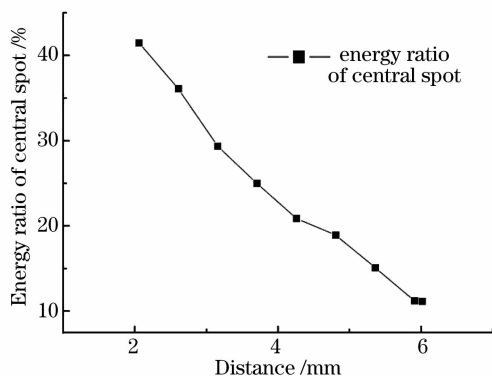


图 5 中心光斑能量比与间距的实验曲线图

Fig. 5 Experimental central spot energy ratio of different spacing distances

实验中是通过改变了光束之间的间距,来实现占空比的调节,但是光束的宽度没有改变,图 4 中光强分布区域也是没有变化的,从而可以验证前面关于出射光束的宽度决定相干组束后远场的光场分布区域的理论分析。从图 4,5 可以看出,随着间距的变小,在水平方向增大了占空比,所以水平方向相干合成后的光斑数量减少,中心光斑的宽度增大,光强分布发生了变化,中心光斑能量比值也变大,与前面的理论分析相一致。

4 结 论

通过理论分析及实验研究可以看出,在激光器

不同间距下的相干组束后的光斑图样,间距分别为 4.26,3.71,3.16和2.61 mm,(b1)~(b4)为与之对应的水平方向光强分布图。图 5 为中心光斑所占能量比与光束间距的变化曲线图。

阵列相干组束中,在单元激光器输出功率一定的情况下,如果减小单元出射光束的腰斑直径,可以减小远场相干组束的光强分布范围,提高能量的集中度,而减小相邻光束间距可以减小远场相干组束中的次级光斑数量,同时可以让中心光斑所占区域也相应变大,包含的能量也越多。总之,在激光器阵列相干组束中,提高占空比,可以增大中心光斑能量与整个能量的比值。

参 考 文 献

- Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Mode selection of a tapered large-mode-area fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1625~1628
李立波,楼祺洪,周 军等. 大模场面积光纤激光器拉锥法模式选择[J]. 中国激光, 2007, **34**(12):1625~1628
- Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):323~326
李立波,楼祺洪,周 军等. 弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(3):323~326
- He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1153~1158
何 兵,楼祺洪,周 军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1153~1158
- Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1):77~81
程 勇,刘 洋,许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(1):77~81
- Wu Bo, Liu Yongzhi. Coherent combination of high power fiber laser beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **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, 2006, **43**(8):56~61
- 6 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination [J]. *Optics & Photonics News*, 2008, **19**:46~51
- 7 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
- 8 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7):2721~2726
- 9 Akira Shirakawa, Keigo Matsuo, Ken-ichi Ueda. Fiber laser coherent array for power scaling, bandwidth narrowing, and coherent beam direction control [C]. *SPIE*, 2005, **5709**:165~174
- 10 Jianfeng Li, Kailiang Duan, Yishan Wang *et al.*. High-power coherent beam combining of two photonic crystal fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(11):888~890
- 11 Erik J. Bochove, Christopher J. Corcoran. In-phase supermode selection in a multicore fiber laser array by means of a self-Fourier external cavity [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22):5009~5017
- 12 Agnes Desfrages-Berthelemot, Vincent Kermene, David Sabourdy *et al.*. Coherent combining of fibre lasers [J]. *C. R. Physique*, 2006, **7**(2):244~253
- 13 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14):1200~1202
- 14 C. D. Nabors. Effects of phase errors on coherent emitter arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(12):2284~2489
- 15 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1279~1280
- 何 兵,楼祺洪,周 军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. 光学学报, 2006, **26**(8):1279~1280