

激光器阵列的部分相干性对相干合成远场输出特性的影响^{*}

肖 瑞[†] 侯 静 姜宗福

(国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2006 年 7 月 7 日收到 2007 年 6 月 6 日收到修改稿)

对于相干合成的光纤激光器阵列来说,如何定量的分析阵列的相干性对于评价阵列的性能具有极其重要的意义.文章推导了光纤激光器阵列部分相干合成远场强度分布的解析表达式,详细探讨了激光器阵列的部分相干性对相干合成远场图样分布、中心主瓣宽度、斯特列尔比、桶中功率的影响.最后采用主振荡并联储放大器方案对三路掺镜光纤放大器进行实时相位探测与校正,实验给出了三路光纤放大器相干合成的结果.

关键词:光纤激光器阵列,相干合成,相干度

PACC: 4225K, 4281P, 4210M

1. 引 言

近年来,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率逐步提高,目前采用单根光纤,已经实现了千瓦量级的激光输出.而且同其他高功率激光系统相比,双包层光纤激光器在体积、效率、重量、亮度和照射面积等方面均有显著的优势,从而使其在军事、国防等领域极具吸引力.然而,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理的限制,要想大幅度地提高单个激光器的功率是相当困难的.为了在提高总的激光功率的同时,保持光纤激光良好的光束质量,发展提出了高功率光纤激光的相干组束技术^[1,2].目前,高功率光纤激光的相干合成技术已经为国际上研究的热点,美国、德国等国家正在鼓励和支持这类研究的开展^[3].

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.非相干合成最典型的代表是美国 IPG 商用的万瓦级以上的光纤激光器系列,它是用光纤合束器将来自不同激光器的光合成为一束激光输出,各激光器之间没有空间的干涉效

应产生,只是能量上的一种简单迭加.光束的相干合成大致又可以分为主动的相干合成和自组织的相干合成两大类.自组织的相干合成一般依靠阵列中各个激光器之间的相互注入来达到整个系统的锁相合成输出;主动的相干合成则要求有快速的电路回馈系统来控制阵列中各光束的相位,保证在光束阵面口径上各光束相位一致,从而实现激光束的远场相干迭加输出.国防科技大学光电学院定向能技术研究所于 2006 年初采用主振荡并联储放大器(MOPA)的主动相干合成方案,在国内首次成功实现了三路连续波瓦级锁相光纤激光的相干输出^[4,5].本文从理论上分析在主动控制的光纤激光器阵列中,阵元之间的部分相干性对相干合成远场输出的影响,并给出了三路光纤放大器相干合成的实验结果.

2. 理论分析

如图 1 所示,阵列的出光孔径被排列在一矩形栅格之内,孔径个数为 N ,每个孔径输出光束的位相为 ϕ_i ; x, y 方向的孔径周期分别为 d_x, d_y ; θ_x, θ_y 分别是光束与 xoz, yoz 平面的夹角.设阵列中各孔径出射光束的场振幅服从高斯分布:

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60608008)和国防科技大学校预研基金(批准号:JC05-07-04)资助的课题.

[†] E-mail: ruixiao203@163.com

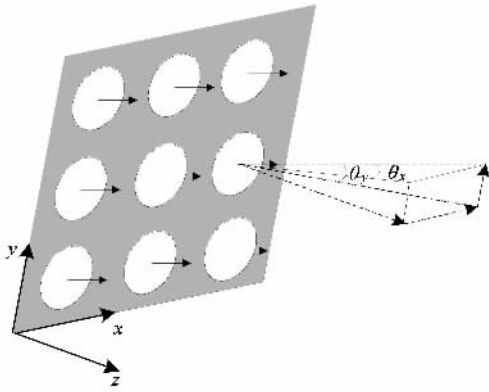


图 1 激光器阵列出光示意图

$$A(x, y) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} A_{mn} \times \exp \left[- \left(\frac{(x - md_x)^2 + (y - nd_y)^2}{\omega^2} \right) + i\phi_{mn} \right], \quad (1)$$

其中 ω 为腰斑半径. 对 (1) 式作夫琅和费衍射积分可得激光器阵列远场光强分布

$$\begin{aligned} K(\theta_x, \theta_y) &\propto \left| \int_{x=0}^{\infty} \int_{y=0}^{\infty} A(x, y) \exp[-ik(x \sin \theta_x + y \sin \theta_y)] dx dy \right|^2 \\ &\propto \left| \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} A_{mn} \exp\{-i[k(m\theta_x d_x + n\theta_y d_y) - \phi_{mn}]\} \right|^2 \exp \left[-\frac{1}{2} k^2 \omega^2 (\theta_x^2 + \theta_y^2) \right] \\ &\propto \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} \sum_{j=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} \exp[-ik\theta_x d_x (m - j)] \\ &\quad \times \exp[-ik\theta_y d_y (n - l)] \exp[i(\phi_{mn} - \phi_{jl})] \exp \left[-\frac{1}{2} k^2 \omega^2 (\theta_x^2 + \theta_y^2) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $(\phi_{mn} - \phi_{jl})$ 表示阵列中任意两孔径间的相对位相变化, 它们是时间随机量, 两孔间的复空间相干度 (由于光源的相干长度远远大于阵元之间的光程差, 时间相干性可以忽略) 可以表示为

$$\gamma_{pq} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2T} \int_{-T}^T \exp[i(\phi_{mn}(t) - \phi_{jl}(t))] dt \right) \quad (3)$$

这里 $p = (m - j), q = (n - l)$.

引入关系式:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_m I_n}}{I_m + I_n} |\gamma_{pq}|, \quad (4)$$

这样, 复空间相干度直接与可测量的干涉条纹的可见度联系起来. 对于一个激光器阵列来说, 衡量它的相干性的最直接的办法是测量阵列元素对的相干度^[6], 当 $I_m = I_n$ 时有 $V = |\gamma_{pq}|$, 即使 $I_m \neq I_n$, V 与 $|\gamma_{pq}|$ 也有很好的近似. 因此, 激光器阵列的相干性可以通过阵列元素对的相干合成远场干涉条纹的可见度来测量. $V \approx 1$ 对应于阵列元素对的完全相干, $V < 1$ 对应于部分相干, $V \approx 0$ 对应于完全非相干.

将方程 (3) 代入方程 (2), 整理后可得部分相干阵列远场光强的时间平均为^[7]

$$\begin{aligned} K(\theta_x, \theta_y) &\propto \left\{ N_x N_y + 2N_y \sum_{p=1}^{N_x-1} (N_x - p) |\gamma_{p,0}| \cos(kd_x p \theta_x) + 2N_x \sum_{q=1}^{N_y-1} (N_y - q) |\gamma_{0,q}| \cos(kd_y q \theta_y) \right. \\ &\quad \left. + 2 \sum_{q=1}^{N_y-1} \sum_{p=1}^{N_x-1} (N_y - q) (N_x - p) \cos(kd_y q \theta_y) \left[e^{-ik\theta_x d_x p} r_{p,q} + e^{ik\theta_x d_x p} r_{-p,q} \right] \right\} \\ &\quad \times \exp \left[-\frac{1}{2} k^2 \omega^2 (\theta_x^2 + \theta_y^2) \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

3. 计算结果和讨论

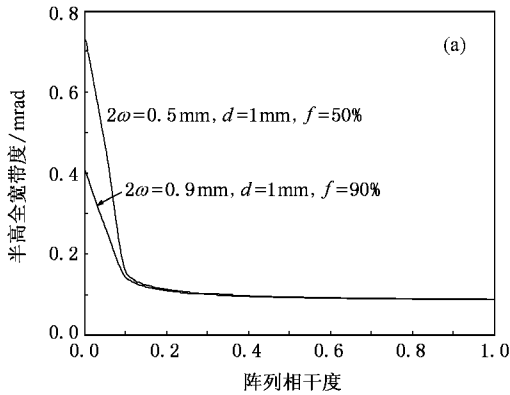
上面通过推导得到了部分相干激光器阵列远场

$$I(\theta_x) \propto \left\{ N_x + 2 \sum_{p=1}^{N_x-1} (N_x - p) |\gamma_p| \cos(kd_x p \theta_x) \right\} \exp\left(-\frac{1}{2} k^2 \omega^2 \theta_x^2\right). \quad (6)$$

方程(6)是一维阵列远场光强分布的时间平均表达式,在下面的讨论中,假定所有阵列元素对间的相干度相等(以下都简称阵列相干度)。

3.1. 相干合成远场光强分布中心主瓣的 FWHM 与相干度的关系

图2是占空比($f = 2\omega/d$)取不同值时,相干合成远场光强分布中心主瓣的半高全带宽(FWHM)



光强分布的时间平均表达式,这里我们将重点讨论阵列孔径间的部分相干性对相干合成的影响,为简单起见,仅取阵列的一维分布,二维的情况是一样的。

与阵列相干度的关系曲线,在计算中我们取阵列元素个数 $N_x = 10$. 这里分两种情况进行讨论:图2(a)阵列周期 d 不变, $f = 59\%$, $f = 90\%$; 图2(b)阵元出光直径 2ω 不变, $f = 50\%$, $f = 80\%$. 从图2可以看出,阵列相干度对远场光强分布中心主瓣的宽度几乎没有影响;中心主瓣的宽度随阵列周期的增大而减小(图2(b));只有在相干度非常低时,阵元出光直径才会对中心主瓣的宽度有影响(图2(a)).

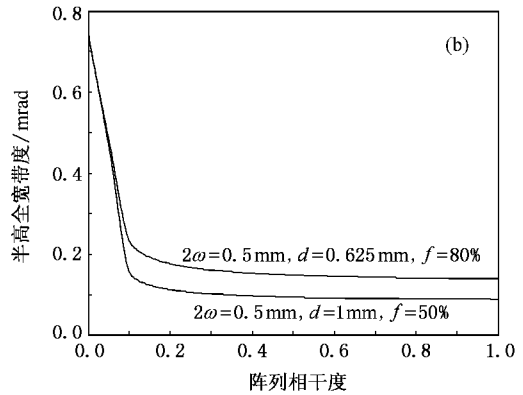


图2 相干合成远场光强分布中心主瓣的 FWHM 与阵列相干度的关系曲线

3.2. 相干合成 Strehl Ratio 与相干度的关系

仿照单光束斯特列尔比(Strehl)的定义,激光器阵列相干合成的斯特列尔比可以表示为^[8]

$$\text{Strehl} = \frac{\text{实际激光器阵列相干合成远场光强的峰值功率}}{\text{理想相干合成远场光强的峰值功率}} = |\gamma_p| + \frac{1}{N_x}(1 - |\gamma_p|), \quad (7)$$

这里理想相干合成是指实际激光器阵列相干合成的相干度 $|\gamma_p| = 1$ 的情况。

图3是阵列个数为 $N_x = 10$, 阵列相干度与相干合成斯特列尔比的关系曲线。从图上可以看出,相干合成的斯特列尔比随阵列相干度的升高线性增加。

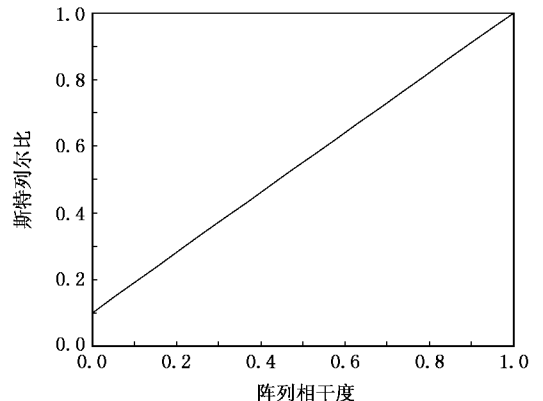


图3 阵列相干度与斯特列尔比的关系曲线

3.3. 相干合成桶中功率与相干度的关系

图 4 是相干合成的激光器个数为 10, 阵列占空比取不同值时, 相干合成远场光强分布中心主瓣所占能量与总能量的比(即桶中功率)随阵列相干度的变化关系. 这里桶中功率的直径取相干合成远场光强分布中心主瓣相邻两个极小值间的距离.

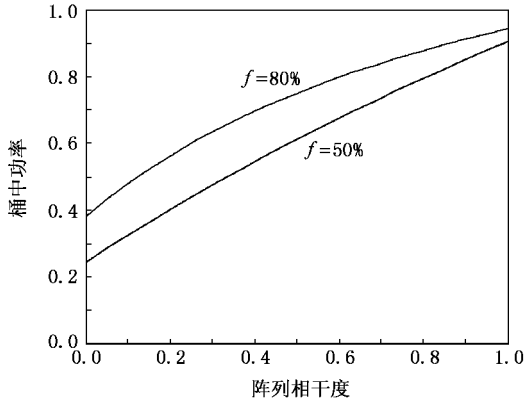


图 4 阵列相干度与桶中功率的关系曲线

从图 4 可以看出, 桶中功率随阵列相干度的增加几乎线性增长, 而且桶中功率还随占空比的增大而增大.

3.4. 相干合成远场条纹可见度与相干度的关系

图 5 是阵列相干度取不同值时, 相干合成远场光强分布剖视图(阵列个数同上), 阵列占空比 $f = 50\%$.

从图 5 可以看出, 随着阵列相干度的降低, 相干合成远场条纹可见度也在下降. 这是因为相干度的降低会造成远场峰值功率的下降, 同时由于远场光强分布中非相干成份的增加致使它有一个本底漂移量. 另外我们还发现即使在阵列 ($N > 2$) 相干度很低的情况下, 也可以有高的远场条纹可见度(图 5(c)).

图 6 是阵列占空比取 $f = 50\%$, 阵列相干度、远场干涉条纹可见度以及阵列个数之间的关系曲线. 从图 6 可以更直观的看出, 激光器阵列相干合成远场干涉条纹可见度与阵列相干度之间并不是线性关

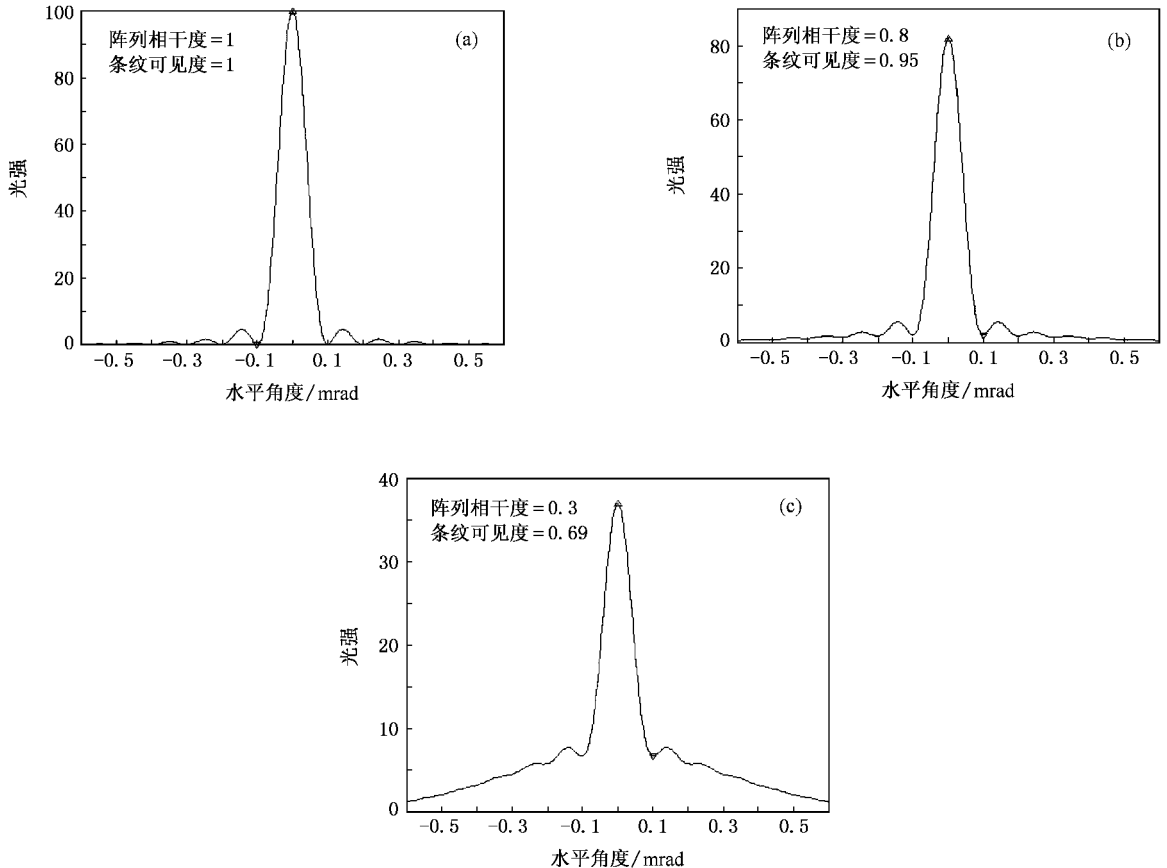


图 5 光纤激光器阵列相干合成远场光强分布剖视图



系 相干合成远场干涉条纹的可见度还和阵列个数有关,在阵列相干度相同的情况下,阵列个数越多,远场干涉条纹的可见度越大。

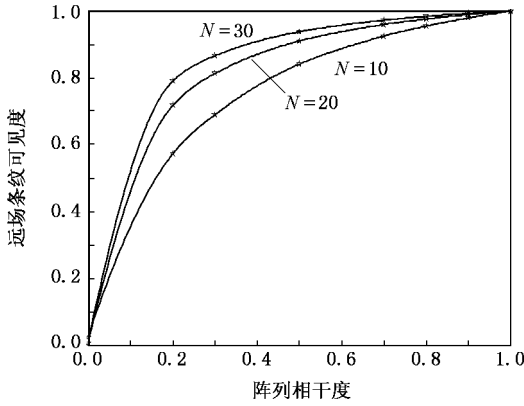


图 6 阵列相干度与远场干涉条纹可见度的关系曲线

4. 实验结果

我们从实验上实现了三路 1 W 光纤放大器的相

干合成输出,实验原理如图 7 所示。

实验采用全保偏光路,主振荡激光器是商用的分布反馈式保偏光纤激光器,它的中心波长为 1083 nm,线宽小于 1 MHz。主振荡的光束通过保偏光纤分束器后被分为四路,一路参考臂,三路信号臂。参考臂中保偏光纤声光移频器的移频量为 40 MHz,三路信号臂中各有一个保偏光纤相位调制器以及一个输出功率为 0—1 W 连续可调的保偏光纤放大器,每一路光纤放大器的输出端各用一保偏光纤准直器对其输出进行准直。准直输出后的光束直径为 0.5 mm。为了测得每一路信号臂与参考臂的相位差,光路中加入了一分光镜,将三路保偏光纤放大器的输出光进行取样,取样所得的每一路信号光分别和参考光干涉产生一外差的拍频信号。系统中的控制电路可以实时探测每一路的相位变化,并将得到的误差电压作用于铌酸锂相位调制器,从而可以将系统中三路信号稳定于同一静态工作点上,达到相干合成的目的。

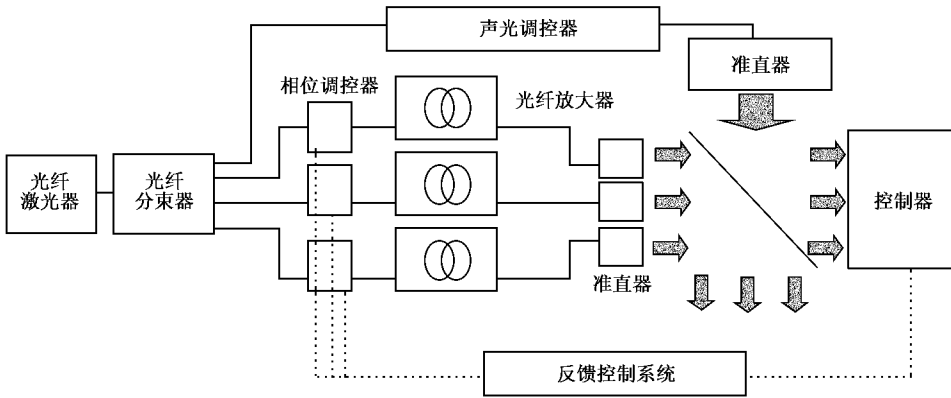


图 7 光纤放大器阵列相干合成的实验原理图

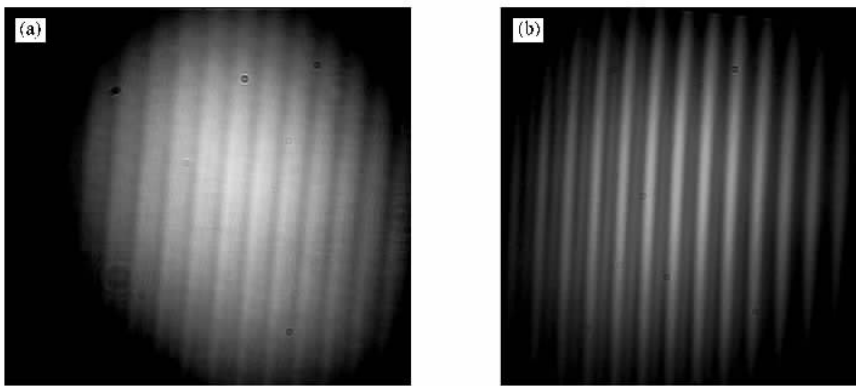


图 8 三路光纤放大器相干合成远场光斑 (a)开环结果 (b)闭环结果

图 8(a)(b)分别为三路光纤放大器非相干及相干合成时的远场光斑,系统从开环到闭环的时间延迟仅是毫秒量级.在开环时,如图 8(a)所示,远场干涉图样非常模糊,隐约的条纹图形不断地在移动,条纹可见度为 6%,在闭环情况下,如图 8(b)所示,远场干涉图样非常稳定且清晰分明,中心峰值功率有很大提高,条纹可见度为 53%.可见通过实时补偿光纤放大器相位变化,远场干涉条纹的可见度得到了大幅度提高,这说明闭环控制使两路光纤激光实现了锁相运行和高相干度的合成输出.

5. 结 论

本文推导了光纤激光器阵列部分相干合成远场光强分布的解析表达式,给出了测量激光器阵列空间相干度的最直接的办法即测量阵列元素对远场干涉条纹的可见度.在此基础上我们详细探讨了光纤

激光器阵列的空间相干度对相干合成远场输出特性的影响,并得出以下结论:相干合成的斯特列尔比、桶中功率随阵列相干度的增加几乎线性增长,而且相干度越大,相干合成的峰值功率越强,相干合成远场光强分布中心主瓣的 FWHM 几乎不随阵列相干度变化.对于一个 $N > 2$ 的激光器阵列来说,远场干涉条纹的可见度与阵列相干度并不是线性关系.

本文最后采用 MOPA 方案对三路掺镜光纤放大器进行实时相位控制与校正,实验中通过铌酸锂位相控制器实现了闭环控制,获得了三路光纤激光的相干合成输出.系统开环时,远场光斑为动态、模糊干涉条纹,条纹可见度为 6%;系统闭环运行时,远场光斑为稳定、高对比度干涉条纹,条纹可见度有大幅度提高,达到 53%.这表明闭环控制使三路光纤激光的相位变化得到了有效补偿,系统实现了相位锁定运行和高相干度合成输出.该工作为实现光纤激光器阵列的相干合成方案提供实验参考.

- [1] Hou J, Xiao R, Jiang Z F, Cheng X A, Shu B H, Chen J B, Liu Z J 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2273
- [2] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 184 (in Chinese)[肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 物理学报 **55** 184]
- [3] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2005 *Laser Technology* **29** 516 (in Chinese)[肖 瑞、侯 静、姜宗福 2005 激光技术 **29** 516]
- [4] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 362 (in Chinese)[肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 物理学报 **55** 362]

- [5] Hou J 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 426 (in Chinese)[侯 静 2006 强激光与粒子束 **18** 426]
- [6] Carlson N W, Masin V J, Lurie M, Goldstein B, Evans G A 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 643
- [7] Gary A E, Jacob M H 1993 *Surface Emitting Semiconductor Lasers and Arrays* (London : Academic Press)
- [8] Anatoliy K, Vladimir M 2004 *Solid State and Laser Technology Review* 312

Effect of partial coherence laser arrays on far-field output properties^{*}

Xiao Rui[†] Hou Jing Jiang Zong-Fu

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

(Received 7 July 2006 ; revised manuscript received 6 June 2007)

Abstract

Quantitative details about coherence are important for determining the performance of laser arrays. In this paper we deduce the analytical equation of the far-field intensity distribution in partially coherent combining of fiber laser arrays and investigate its effects on the far-field patterns, the FWHM of the central far-field lobe, strehl ratio and power in the bucket. The master oscillator-power amplifier scheme was used to realize phase control of three ytterbium fiber amplifiers, and the experimental results are presented.

Keywords : fiber laser array , coherent combining , coherence

PACC : 4225K , 4281P , 4210M

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 60608008) and Preview Research Foundation of National University of Defence Technology , China (Grants No. JC05-07-04).

[†] E-mail : ruixiao203@163.com