

# 光纤放大器阵列的远场特性研究\*

肖 瑞 侯 静 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2006 年 6 月 9 日收到,2007 年 3 月 27 日收到修改稿)

从光纤激光器阵列相干合成远场光强分布的解析表达式出发,详细研究了阵列占空比、阵元个数以及阵元的相位误差对相干合成远场图样分布、中心主瓣的角宽度及所占能量的影响,给出了占空比为 12.5% 时,三路保偏光纤放大器相干合成的实验结果.

关键词:光纤激光器阵列,相干合成,相位

PACC:4225K,4281P

## 1. 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之一,特别是近年来,由于大模式面积双包层(LMA-DC)光纤的出现以及高亮度半导体二极管抽运的进展,使得光纤激光器的输出功率得到了极大的提高,单模光纤输出功率已达到 1.5 kW,就当前的光纤技术而言,理论上可接近 10 kW 的功率输出<sup>[1]</sup>. 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制的限制,要想大幅度(万瓦级以上)地提高单个激光器的功率是相当困难的. 随着 Michelson-Vernier 干涉仪的引入,20 世纪 60 年代就有人提出在谐振腔内对激光光束叠加输出,其后人们又提出了许许多多光束叠加的方法和技术<sup>[2-4]</sup>,把多个相对小功率的激光器功率输出进行叠加,从而获得所需要的高功率高亮度激光输出. 而光纤由于本身所具有的优点很容易束缚在一起,形成光纤阵列,有望获得高功率相干输出.

实际工作中,两类光束的合成问题成为研究的热点,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 公司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叠加. 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反馈系统来控制阵列中各光束的相位,保证在光束端面口径上各光束相位一致,从而实现激光束的远场相干叠加输出. 本文从理论上分析了在主动控制的光纤激光器阵列中相干合成的远场输出特性,并给出三路光纤放大器相干合成的实验结果.

## 2. 理论基础

如图 1 所示,阵列的出光孔被排列在一矩形栅格之内,出光孔个数为  $N = N_x \times N_y$ ,每个孔径的中心坐标为  $(x_i, y_i)$ ,输出光束的相位为  $\phi_i$ ,各孔径的中心间距为  $d$ , $\theta_x$  和  $\theta_y$  分别是光束与  $xoz$  平面和  $yoz$  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<sup>[5]</sup>,即

$$A(x, y) = \sum_{i=1}^N A_i \exp\left[-\left(\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\omega^2}\right) - i\phi_i\right] \quad (1)$$

式中  $\omega$  为腰斑半径. 对(1)式作夫琅禾费衍射积分,可得激光器阵列远场光强分布

$$I(\theta_x, \theta_y) = \left| \int_{x=0}^{\infty} \int_{y=0}^{\infty} A(x, y) \exp[-ik(x \sin\theta_x + y \sin\theta_y)] dx dy \right|^2$$

\* 国家自然科学基金(批准号 60608008)和国防科学技术大学预研基金(批准号 JC05-07-04)资助的课题.

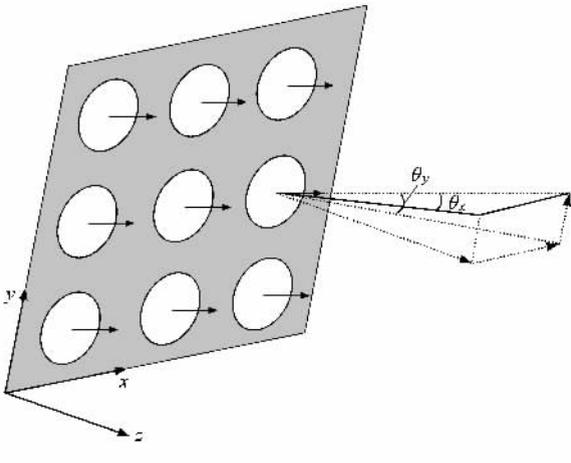


图 1 激光器阵列出光示意图

$$\propto \left| \sum_{i=1}^N A_i \exp\{i[k\theta_x x_i + \theta_y y_i] - \phi_i\} \right|^2 \times \exp\left[-\frac{1}{2}k^2\omega^2(\theta_x^2 + \theta_y^2)\right]. \quad (2)$$

假定随机变化的相位服从均值为零、均方根为  $\sigma_\phi$  的高斯统计, 利用公式<sup>[6]</sup>

$$\exp(i\phi_i) = \exp\left(-\frac{\sigma_\phi^2}{2}\right),$$

由方程(2)可推导出平均远场光强的表达式为

$$\begin{aligned} & \mathcal{K}(\theta_x, \theta_y) \\ & \propto \left\{ N_x N_y (1 - \exp(-\sigma_\phi^2)) + \exp(-\sigma_\phi^2) \right. \\ & \quad \times \left. \left[ \frac{\sin\left(\frac{1}{2}N_x k d \theta_x\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}k d \theta_x\right)} \frac{\sin\left(\frac{1}{2}N_y k d \theta_y\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}k d \theta_y\right)} \right]^2 \right\} \\ & \quad \times \exp\left[-\frac{1}{2}k^2\omega^2(\theta_x^2 + \theta_y^2)\right]. \quad (3) \end{aligned}$$

(3)式右端前两项分别代表了非相干合成和相干合成对远场光强的贡献。当  $\sigma_\phi = 0$  时, 激光器阵列完全相干合成的平均峰值光强是单根光束峰值光强的  $N^2$  倍,  $N^2 = (N_x N_y)^2$ 。当  $\sigma_\phi \rightarrow \infty$  时, 激光器阵列趋于非相干合成, 平均峰值光强是单根光束峰值光强的  $N_x N_y$  倍。

下面我们将以一维阵列为例, 对影响相干合成远场光强分布的因素进行分析, 由于  $x, y$  的相对独立性, 二维的情况是一样的。令(3)式中的  $N_y = 1$ , 则可得到一维激光器阵列的相干合成远场光强分布表达式

$$\begin{aligned} \mathcal{K}(\theta_x) & \propto \left\{ N_x (1 - \exp(-\sigma_\phi^2)) \right. \\ & \quad \left. + \exp(-\sigma_\phi^2) \left[ \frac{\sin\left(\frac{1}{2}N_x k d \theta_x\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}k d \theta_x\right)} \right]^2 \right\} \\ & \quad \times \exp\left(-\frac{1}{2}k^2\omega^2\theta_x^2\right). \quad (4) \end{aligned}$$

当相位的均方根  $\sigma_\phi = 0$  时, 激光器阵列的平均远场光强表达式由周期为  $d$  的光栅夫琅禾费衍射远场光强  $I_G$  和单孔径衍射的远场光强  $I_0$  两部分的乘积组成。周期为  $d$  的光栅夫琅禾费衍射远场光强为

$$I_G = \left[ \frac{\sin\left(\frac{1}{2}N_x k d \theta_x\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}k d \theta_x\right)} \right]^2, \quad (5)$$

单孔径衍射的远场光强为

$$I_0 = \exp\left(-\frac{1}{2}k^2\omega^2\theta_x^2\right). \quad (6)$$

当  $\frac{1}{2}k d \theta_x = m\pi$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) 时,  $I_G = N^2$ , 这些地方是光栅衍射的主极大。  $\frac{1}{2}k d \theta_x = m\pi$  意味着衍射角  $\theta$  满足下列条件:

$$\theta_x = m \frac{\lambda}{d_x}.$$

这就说明, 凡是在衍射角  $\theta_x$  满足此条件的方向上, 出现一个主极强, 它的强度是单孔径在该方向强度的  $N^2$  倍。相邻主极强的间距为

$$\theta_x = \frac{\lambda}{d_x},$$

只与阵列出光孔的排列周期  $d_x$  有关。定义中心主极大的中心到邻近暗线之间的角距离为远场光强分布中心主瓣的半角宽度, 由(5)式可得

$$\Delta\theta_x = \frac{\lambda}{N d_x}.$$

单孔径衍射的远场光强分布是光栅衍射的远场光强分布的包络, 它对光栅衍射的高阶主极大起到衰减作用, 当  $\theta_x = m \frac{\lambda}{d_x}$  时, 方程(6)只与激光器阵列的占空比  $f$  有关,

$$f = 2\omega_0/d_x.$$

这表明光纤激光器阵列相干合成能量在各个主瓣间的分配主要与占空比有关, 占空比越大, 中心主瓣所占能量越多, 高阶主瓣(旁瓣)所含能量就减少。

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \exp\left(-\frac{1}{2}k^2\omega^2\theta_x^2\right) \\
 &= \exp\left(-\frac{1}{2}f^2\pi^2m^2\right). \quad (7)
 \end{aligned}$$

当相位的均方根  $\sigma_\phi \neq 0$  时,激光器阵列平均远场光强分布的形状保持不变,但光强的值将会在原有基础上衰减  $\exp(-\sigma_\phi^2)$ ,而且光强分布还会有一个整体平移,平移量为  $N_x(1 - \exp(-\sigma_\phi^2))$ .

图 2 是相位的均方根  $\sigma_\phi = 0, 1$  两种情况时相干合成的远场光强分布,其中占空比  $f = 2\omega_0/d = 0.125, N_x = 3$ .

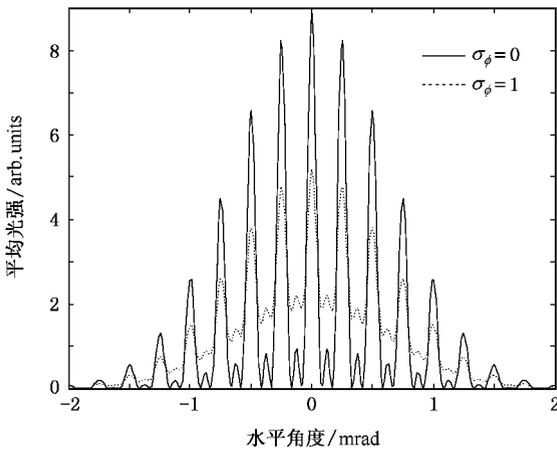


图 2 相位对远场干涉图样的影响

图 3 是  $N_x = 3, 8$ , 占空比  $f = 2\omega_0/d = 0.4$ , 相位的均方根  $\sigma_\phi = 0$  时,相干合成远场光强分布水平剖面图.从图 3 可以看出,主瓣的角宽度随  $N_x$  的增大而减小.而且,从上述分析也可以看出,阵列相位的变化对主瓣宽度没有影响.

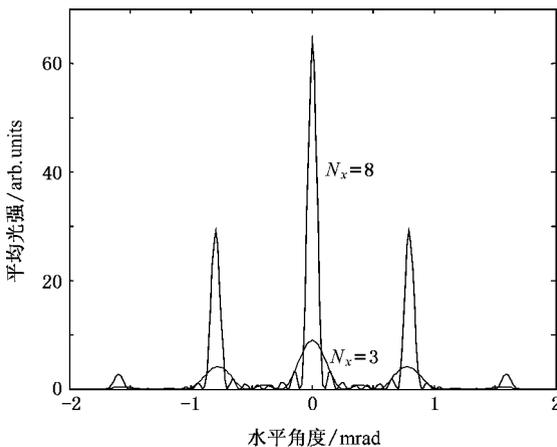


图 3 相干合成远场光强分布与阵列单元数的关系

图 4、图 5 分别是相位的均方根  $\sigma_\phi = 0, 0.5$  时,相干合成远场光强分布中心主瓣所包含的能量与总能量之比  $R$  随阵列单元数的变化曲线.从图 4、图 5 可以看出,随着相干合成阵列单元数的逐渐增加,中心主瓣所包含的能量与总能量的比值仅略有下降,我们可以认为该比值与  $N_x$  无关.而当相干合成各阵列的相位不一致时,中心主瓣所包含的能量将会下降.

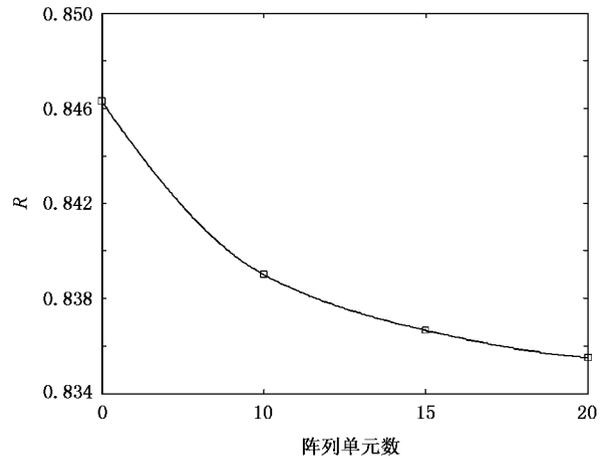


图 4 相位的均方根  $\sigma_\phi = 0$  时,主瓣能量与总能量之比  $R$  随阵列单元数的变化

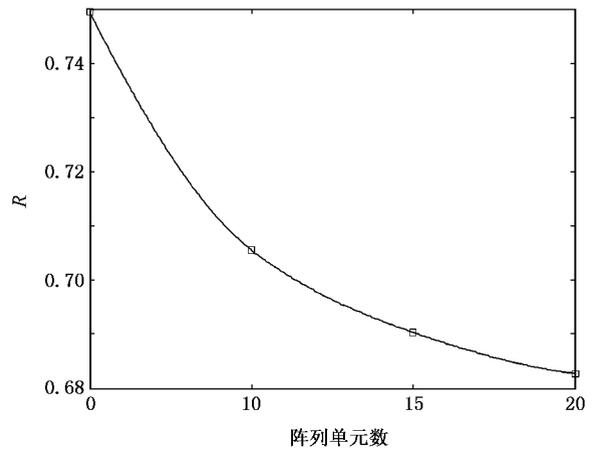


图 5 相位的均方根  $\sigma_\phi = 0.5$  时,主瓣能量与总能量之比  $R$  随阵列单元数的变化

图 6 是  $N_x = 8$ , 占空比  $f = 0.4, 1$ , 相位的均方根  $\sigma_\phi = 0$  时,相干合成远场光强分布水平剖面图.从图 6 可以看出,阵列占空比越大,中心主瓣的角宽度越宽,旁瓣的光强就越小.当阵列的占空比  $f = 1$  时,相干合成远场光强分布将只有一个中心主瓣出现.

图 7 是  $N_x = 8$  相位的均方根  $\sigma_\phi = 0$  时,主瓣能量与总能量之比  $R$  随占空比  $f$  的变化关系.从图 7

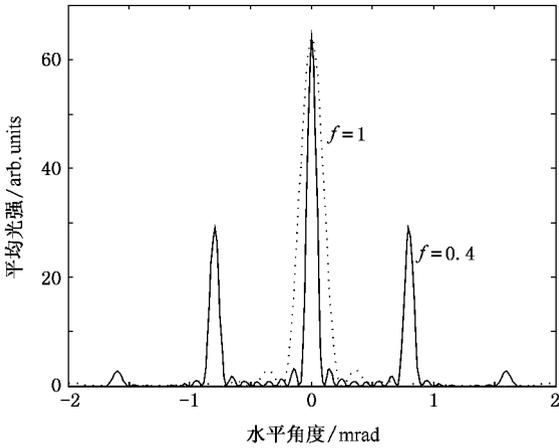


图 6 占空比取不同值时 相干合成远场光强分布

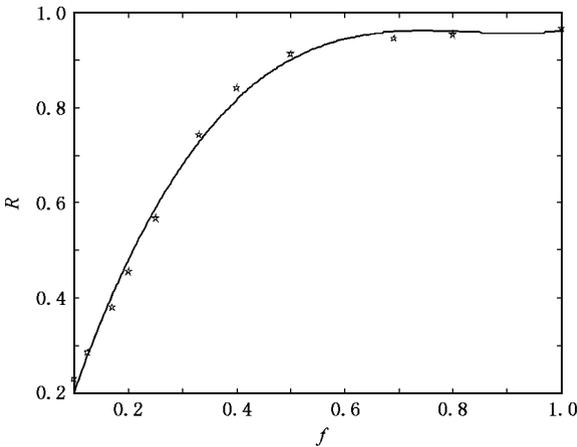


图 7 主瓣能量与总能量之比 R 随占空比 f 的变化关系

可以看出,主瓣包含的能量随占空比的增大平滑上升,可以将之拟合为如下的关系式:

$$R = 2.0362f^3 - 5.0688f^2 + 4.1604f - 0.1671, \tag{8}$$

式中 R 代表主瓣能量与总能量之比.

图 8 是关于光纤激光器阵列占空比、阵列单元数、主瓣能量与总能量之比的一个总关系图.

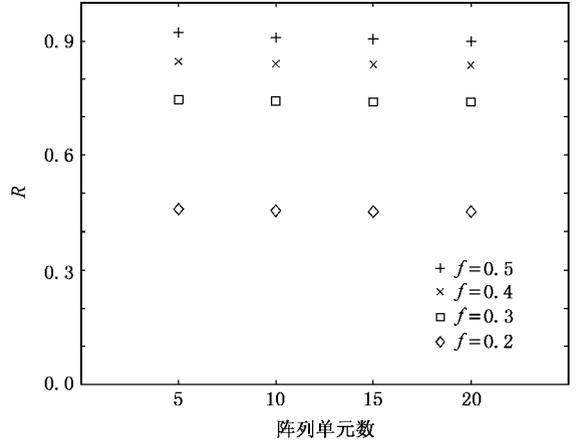


图 8 占空比取不同值时 相干合成远场光强分布与阵列单元数的关系

### 3. 实验及结果

我们从实验上实现了三个 1 W 光纤放大器的相干合成输出,实验原理如图 9 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

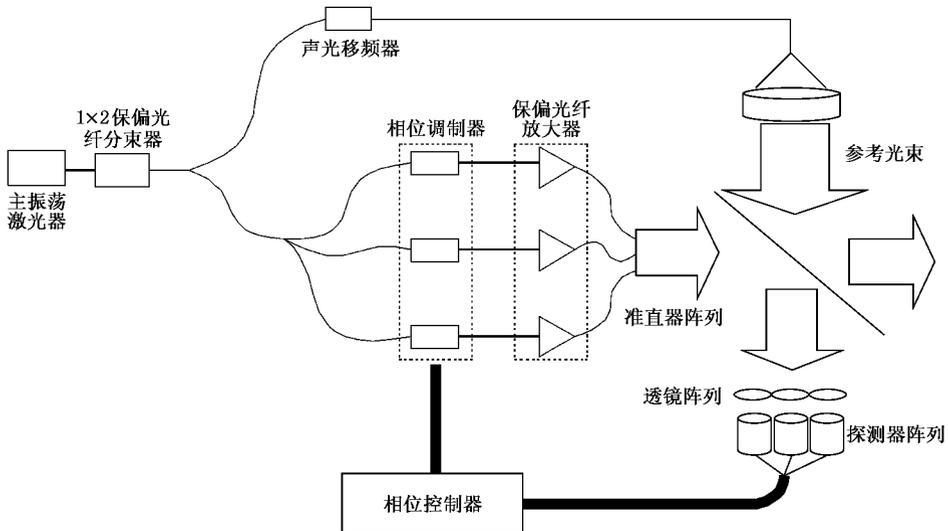


图 9 光纤放大器阵列相干合成的实验原理示意图

考臂中的光被所加的保偏光纤声光移频器频移了 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.相干合成的远场图样可以通过透镜后面的 CCD 来观测.

图 10、图 11 分别是三个光纤放大器相干合成的远场强度分布及其切面剖视图,占空比  $f$  约为 12.5%.由于阵列的占空比较小,造成相干合成远场光强分布的旁瓣较多,中心主瓣的总能量只占总能量的 12%.

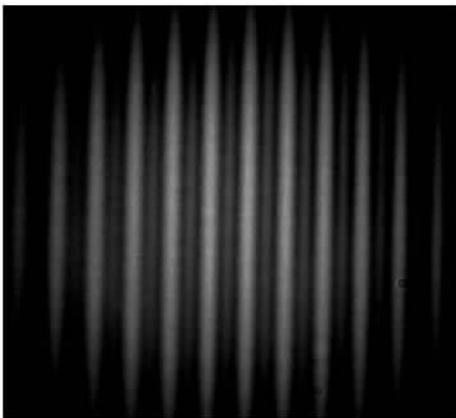


图 10 三路光纤放大器相干合成远场光强分布

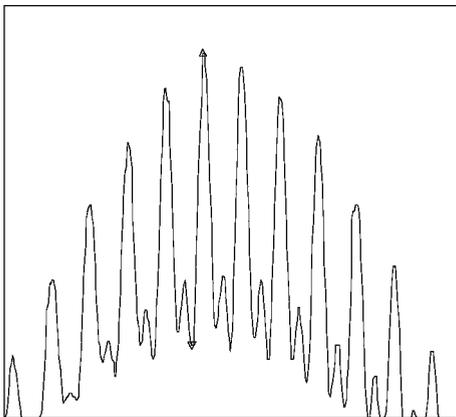


图 11 远场图样切向剖视图

图 12 是阵列占空比取不同值时相干合成远场光强的分布,图 12(a)(b)的占空比分别为 12.5%, 8.3%.从图 12 可以看出,阵列占空比越大,中心主瓣的宽度越宽,旁瓣的数量越小.

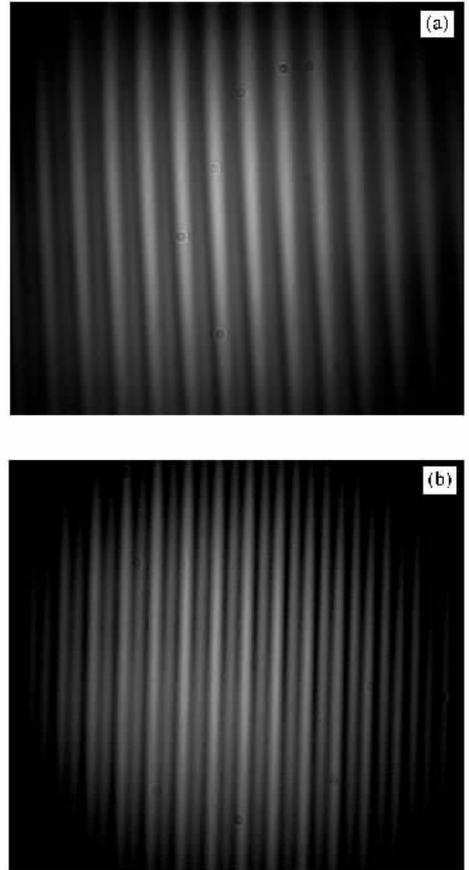


图 12 占空比取不同值时,三路光纤放大器相干合成远场光强分布 (a)  $f=12.5%$  (b)  $f=8.3%$

## 4. 结 论

本文推导了光纤激光器阵列相干合成远场光强分布的解析表达式,在此基础上详细分析了光纤激光器阵列的占空比、阵列单元数以及相位误差对相干合成远场图样的影响.结果表明:光纤激光器阵列在远场各个旁瓣间的能量分配主要依赖于占空比.相干合成的阵列单元数不会改变中心主瓣所含能量与总能量的比例关系.相位误差会使相干合成中心主瓣所含能量下降,但不会改变中心主瓣的半角宽度.上述结论将对大功率光纤激光器阵列的相干合成实验有一定的指导意义.

- [ 1 ] Carter A , Samson B 2005 *Mil. Aerospace Electron.* **16** 16 Chinese)[ 肖 瑞、侯 静、姜宗福 2006 物理学报 **55** 184 ]
- [ 2 ] Xiao R , Hou J , Jiang Z F 2005 *J. Laser Technol.* **29** 516 ( in Chinese)[ 肖 瑞、侯 静、姜宗福 2005 激光技术 **29** 516 ]
- [ 3 ] 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
- [ 4 ] 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 ]
- [ 5 ] Jones D C , Scott A M , Clark S , Stace C , Clarke R G 2004 *Proc. SPIE* **5335** 125
- [ 6 ] Goodman J W 1992 *Statistical Optics* ( Beijing :Science Press )( in Chinese)[ 顾德门 J W 1992 统计光学( 中译本 )( 北京 科学出版社 )]

## Study of far field distribution of fiber amplifier arrays <sup>\*</sup>

Xiao Rui Hou Jing Jiang Zong-Fu

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

( Received 9 June 2006 ; revised manuscript received 27 March 2007 )

### Abstract

In this paper , according to the analytical equation of the far-field intensity distribution in coherent combination of fiber laser arrays , we investigate the influence of fill factor of the laser arrays , elements and phase errors on the far-field patterns , the energy and angular width of the main lobe. At last , we describe the experimental study of the coherent combining of three-element fiber-laser arrays based on ytterbium polarization-maintaining single-mode power amplifiers with the fill factor of 12.5% .

**Keywords** : fiber laser array , coherent combining , phase

**PACC** : 4225K , 4281P

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60608008 ) and the Advanced Research Foundation of National University of Defense Technology , China ( Grant No. JC05-07-04 ).