

畸变光束远场光强叠加特性研究

吴超, 赵雅慧, 张蓉竹

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在远场将阵列激光的光强进行叠加是获取高功率激光输出的一种有效方法, 由于激光在传输过程中会产生波前相位畸变, 进而导致远场光强分布不均匀。基于惠更斯-菲涅耳原理, 建立了多束具有随机相位畸变的二维矩形阵列高斯光束非相干合成模型。模拟了光强合成过程远场焦斑的质量变化, 计算了远场焦斑 RMS 和 PSD 与合成光束数量之间的关系。结果表明: 光束非相干合成不仅能够有效提高激光的输出功率, 还可以使畸变光束合成后的焦斑分布更加均匀, 提高光束的质量。

关键词: 非相干光束合成; 位相畸变; 激光阵列; 光束质量

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2437-05

Irradiance superposition characteristic of distorted beams in far field

Wu Chao, Zhao Yahui, Zhang Rongzhu

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Irradiance superposition of laser array in far field is an effective way to achieve output laser beam with high power and high beam quality. However, the wavefront of laser beams will distort in the process of transmission. Because of the distortion of wavefront, in the far-field the irradiance distributions are not smooth anymore. Based on the Huggens-Fresnel principle, the incoherent beams combination model of random phase distorted Gaussian beams with 2D rectangular symmetry array was established. The variation of far-field focus quality in beams combination was simulated. The relationships between PSD as well as RMS in the far field and the number of combination beams were calculated. The analytical and numerical calculation results were given to illustrate that incoherent combination of Gaussian beams not only can raise the output power, but also improve the quality of output laser.

Key words: incoherent beams combination; phase distortion; laser array; beam quality

收稿日期: 2013-12-20; 修订日期: 2014-01-24

基金项目: 国家高技术发展计划(2012AA8042038); 四川省教育厅创新团队资助项目(13TD0048)

作者简介: 吴超(1987-), 男, 硕士生, 主要从事光电子技术方面的研究。Email: cxzswc@163.com

导师简介: 张蓉竹(1975-), 女, 教授, 主要从事激光与光电子学方面的研究。Email: zhang_rz@scu.edu.cn

0 引言

在保证激光光束质量的同时,提高激光输出功率是大功率激光器应用于国防、科研以及工业等行业中的挑战性课题。使用大口径激光器可以提高激光的输出功率,但是大口径激光器因其体积庞大、造价高、热管理成本高^[1]等缺点限制了功率的进一步提升。使用多束激光合成,即将多路激光的能量合在一起,是一种获得高功率、高光束质量激光输出的有效途径^[2],因此受到了广泛的关注。

光束合成的主要方法可以分为两类:相干合成和非相干合成^[3]。相干合成的基本思路是将多束激光束经相干控制后合成一束光,从而获得高功率的单束激光输出,同时保持良好的光束质量,其中最关键、最核心的技术是位相控制^[4]。这使得该技术对单个激光偏振态、线宽、位相起伏等方面提出了非常苛刻的要求。非相干合成,即是采用一些光学元件将各个参与合成的子光束在近场和远场合成一束,但并不保证各束间的相干性。这种方法因不用保证子光束参数的一致性,只是能量的简单叠加,故装置相对简单,且其最终出射的光束质量取决于合束装置。然而在实际应用过程中,光学元件质量、泵浦噪声、非线性 B 积分效应、大气湍流都会引起光束位相畸变,进而影响合成光斑的光学质量。

文中基于广义惠更斯-菲涅耳原理,研究了具有相位畸变二维阵列高斯光束的非相干合成特性。建立了矩形阵列畸变高斯光束的远场光强叠加分析模型,模拟了多个具有随机位相畸变光束远场叠加的焦斑。为了更加清楚地说明叠加过程对光斑质量的影响,分析了合成远场的 RMS、能量集中度及 PSD 随合成光束数目的变化曲线。

1 基本模型

1.1 光强叠加过程的描述

如图 1 所示,多个激光器在一个平面内可组成一个 $M \times N$ 二维激光阵列。在理想情况下,多束高斯光束非相干叠加会在 P 点得到一个高能量的光斑。

设 $E_0(x_0, y_0)$ 为物平面子光波复振幅,经距离 f 的衍射到达观测平面的光波复振幅 $E(x, y)$ 由菲涅耳衍射积分给出^[5]:

$$E(x, y) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x_0, y_0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2f} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 \quad (1)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$; λ 为光波长; $k = 2\pi/\lambda$ 为光波矢; f 为透镜到观察屏的距离。

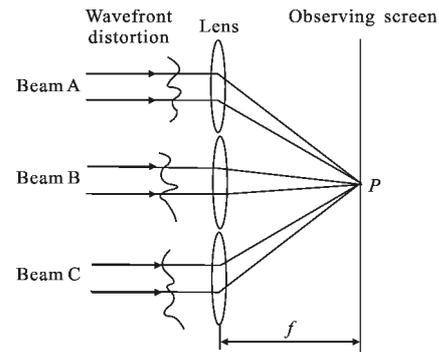


图 1 畸变光束合成模型

Fig.1 Combination model for distorted beam

令 f_x, f_y 为频域坐标,上式可以借助傅里叶变换表达为:

$$E(x, y) = F^{-1}\{F\{E_0(x_0, y_0)\}H_F(f_x, f_y)\} \quad (2)$$

式中: $H_F(f_x, f_y) = F\left\{\frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left[\frac{ik}{2f}(x^2 + y^2)\right]\right\}$ 称为菲涅耳衍射传递函数; F 为傅里叶变换; F^{-1} 为傅里叶逆变换。则每一子光束的焦斑光强的数学描述为:

$$I = EE^* \quad (3)$$

由光场复振幅为 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_p$ 的 p 束子光束组成,非相干叠加以后的光强表示为:

$$I_{\text{incoh}} = \sum_{p=1}^{MN} I_p = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E_{mn} E_{mn}^* \quad (4)$$

式中: E_{mn} 表示第 m 行 n 列子光束的复振幅; E_{mn}^* 表示 E_{mn} 的共轭; I_p 表示第 p 束子光束的光强。

然而实际应用中不能忽略光束传输过程中外界作用产生的随机位相畸变,这会导致单个激光的焦斑光强分布不均匀。而总的焦斑光强也是多个畸变光焦斑光强在空间上的重新分布。

1.2 波前畸变对焦平面光强分布的影响

用一个随机的高斯位相分布来表示位相的畸变。设位相畸变光波的位相分布为 $\varphi(x_1, y_1)$, 可以把它看作一个均匀分布的随机数组和高斯噪声函数的卷积的位相分布:

$$\varphi(x_1, y_1) = A \cdot \text{random}(-1, 1) * \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\} \quad (5)$$

式中: A 为描述元件位相起伏深度的常数; $\text{random}(-1, 1)$ 为 $-1 \sim 1$ 之间的二维随机均匀分布; “*” 表示卷积运算; 在函数 $\exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\}$ 中, x, y 表示在光波口径中对应方向上位相点的位置; σ_x, σ_y 表示位相分布的空间尺度。值得注意的是, 具有相同空间尺度、强度的波前畸变具有相同的统计特性, 所以任意一畸变光束都具有代表性。

当平面光波通过公式(5)的位相畸变后, 光强分布公式如下:

$$I(x, y) = \left| F \left[\text{rect} \left(\frac{x_1}{a}, \frac{y_1}{b} \right) * \exp[i\varphi(x_1, y_1)] \right] \right|^2 \quad (6)$$

式中: $\text{rect} \left(\frac{x_1}{a}, \frac{y_1}{b} \right)$ 为矩孔函数^[6]。

采用 YAG 作为单元激光器, 其波长为 1 064 nm, 光束口径为 0.02 m, 透镜焦距为 30 m, 取 $\sigma_x = \sigma_y = 10 \text{ mm}$ 。计算得到的畸变波前及其聚焦后的远场光强分布分别如图 2 和图 3 所示。

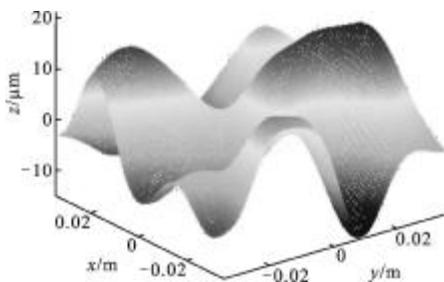


图 2 畸变波前位相分布

Fig.2 Phase distribution of distorted wavefront

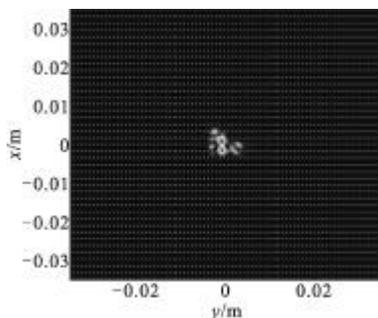


图 3 单束畸变光聚焦

Fig.3 Focus of single distorted beam

从图中可以看出, 具有随机畸变波前的高斯光束的聚焦分布不均匀。

2 远场能量叠加结果

显然畸变光束对应的焦斑能量分布是很不理想的, 为了定量说明焦斑能量分布的均匀性, 可以采用两个参数来分析, 分别是空域参数 RMS^[7]和频率参数 PSD^[8]。

计算得到图 3 所示焦斑的 RMS 值为 $3.50 \times 10^{-3} \lambda$, 对光强进行归一化后计算得到的 PSD 曲线如图 4 所示。

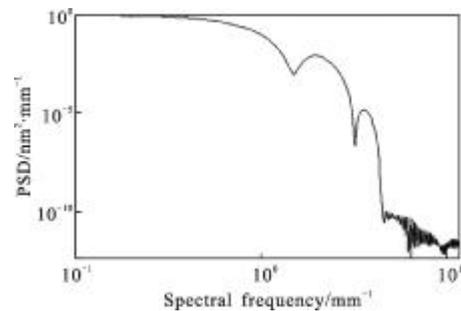


图 4 焦斑光强 PSD 曲线

Fig.4 PSD value of focus irradiance distribution

从图中可以看出, 在空间频率小于 1 mm^{-1} 时, PSD 曲线变化很平缓; 在空间频率大于 1 mm^{-1} 而小于 4.5 mm^{-1} 时, 曲线有很明显的起伏, 表明焦斑光强分布在该空间频段很不均匀。

2.1 4×4 矩阵光束合成分析

在将多个畸变光束进行远场光强叠加时, 需要考虑到不同的单元光束具有不同的畸变波前, 这也将使得焦斑上的光强分布具有不确定性。从本质上讲, 同一个系统中导致光束波前发生畸变的因素是相同的, 因此虽然每一个子光束具有不同的畸变形态, 但是却具有相同的统计特性。为了研究多束畸变光叠加后光强的分布特性, 首先需要了解畸变光束的统计特性。如公式(5)所使用的模型, 在高功率激光器中, 可用高斯型随机函数来描述位相畸变^[9], 也就是说畸变相位的随机特性是满足高斯分布的。一个高斯随机函数的傅里叶变换仍然满足高斯分布特性, 因此其焦斑的随机特性也可以用高斯随机函数来描述。有限个相互独立的高斯随机变量的线性组合仍然服从高斯分布^[10]。高斯随机变量的分布定义:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} dt \quad (7)$$

其概率密度函数:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad (8)$$

式中： σ 和 μ 分别为方差与期望，且均为常数， $\sigma > 0$ ，并且 $-\infty < \mu < \infty$ 。

在焦斑上任意一点的光强都是一个高斯随机变量，根据高斯随机变量的特性^[11]，随着样本数量的增加，每一点的值会趋于一个稳定的期望，其方差会降低。

根据建立的光束非相干合成模型，以 16(4×4)束子光束为例进行了模拟分析，计算所用参数如下：矩形长宽相等 $a=b=0.02\text{ m}$ ，透镜焦距 $f=30\text{ m}$ ， $\sigma_x=\sigma_y=10\text{ mm}$ ，波长 $\lambda=1\ 064\text{ nm}$ 。

首先给出了出一个随机的畸变波前与焦斑光强，分别如图 2 和图 3 所示。由于生成畸变的过程是随机的，这个畸变波前具有一般代表性。在工作环境一致的条件，多束光应该具有相同的畸变特性，这样就可以用相同的公式构建多个随机波前。

具有相同畸变特性的 4×4 束子光束在远场非相干叠加的光强如图 5 所示，焦斑如图 6 所示。

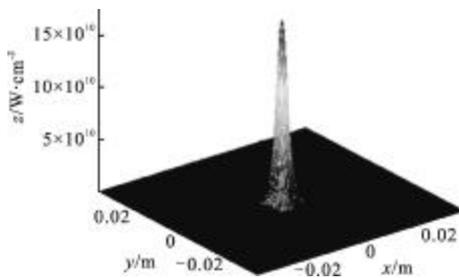


图 5 畸变高斯光束合成光强分布

Fig.5 Intensity distribution of distorted Gauss beams combination

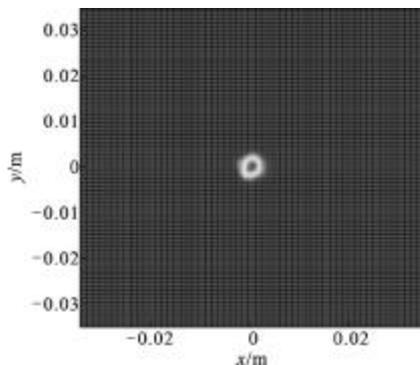


图 6 畸变高斯光束合成焦斑

Fig.6 Focus of distorted Gauss beams combination

从图中可以看出，非相干叠加后的远场分布更接近高斯分布，其焦斑分布也更匀滑，这表明具有随

机位相畸变的高斯光束通过非相干合成后能够有效的提高光束质量和输出功率。

2.2 畸变光数量对能量集中度、RMS、PSD 的影响

光束的能量集中度，即光束横截面上某一确定大小的光斑内光束功率(能量)的含量占总功率(能量)的百分比，是评价光束质量的手段之一^[12]。其定义为：

$$\eta = \frac{P}{P_t} \quad (9)$$

式中： P_t 为光斑总功率； P 为光束在所选取的半径为 r 的圆形光斑中的功率。

通过计算 1×1、2×2、4×4 束畸变光束合成后焦斑的能量集中度如图 7 所示。

在焦斑半径为 1 mm 时，1×1、2×2、4×4 束光合成后焦斑的能量集中度分别为 0.381、0.628、0.668。从图 7 中可以看出，随着合成光束数量的增加，能量集中度提高了，同时缩减了光束的光斑大小，提高了光束的质量。

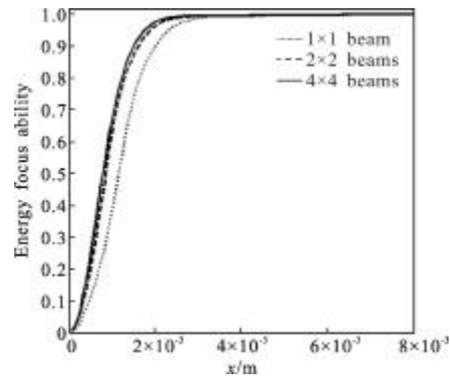


图 7 焦斑的能量集中度

Fig.7 Energy focusability of focus

图 8 为合成后的远场 RMS 与参与合成的具有

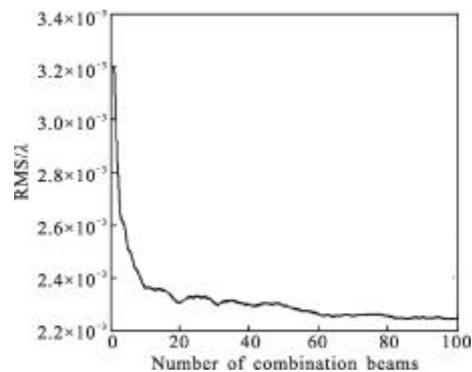


图 8 RMS 值与合成光束数量的关系曲线

Fig.8 Variation curves of RMS with number of combination beams

随机位相畸变高斯光束数量的关系。可以看出,当合成光束小于 10 时,随着合成光束数量的增加,远场 RMS 从 $3.20 \times 10^{-3} \lambda$ 很明显地减小到 $2.25 \times 10^{-3} \lambda$; 当合成光束大于 10 时, RMS 保持在 $2.30 \times 10^{-3} \lambda$ 左右,变化不是很明显,如果单元激光的波前畸变程度变大,这个数值将会相应增大。说明随着参与合成的光束数量增加,远场光斑能量分布变得更为匀滑,无规则的随机起伏变少。

图 9 为 PSD 值与合成光束数量的关系。从图中可以看出,在低频部分,即空间频率小于 1 mm^{-1} 时, PSD 曲线变化很平缓;在中频部分,即空间频率大于 1 mm^{-1} 而小于 4 mm^{-1} 时,随着合成光束数量的增加, PSD 曲线突变值的幅度越来越小,并且越来越平滑。表明光束合成能够有效提高激光输出功率,使焦斑更加匀滑,提高输出激光质量。

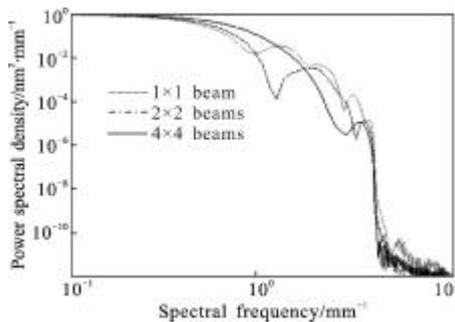


图 9 PSD 值与合成光束数量的关系曲线

Fig.9 Variation curves of PSD with number of combination beams

3 结 论

文中基于广义惠更斯-菲涅耳原理,并采用光束的非相干合成的方法,研究了二维阵列具有相位畸变的高斯光束的非相干合成的特性,远场光束焦斑质量,以及焦斑能量集中度、远场 RMS 和 PSD 随合成光束的数量的变化曲线。

数值计算结果表明,多束具有相位畸变的高斯光束合成后其远场焦斑分布更加匀滑,更接近高斯分布。合成后的功率随着参与合成数量递增。远场 RMS 随着合成数量的增加逐渐趋于一稳定值。

参考文献:

[1] Zhou Shouhuan. The heat management of the solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 497-509. (in Chinese)
周寿桓. 固体激光器中的热管理[J]. 量子电子学报, 2005,

22(4): 497-509.

- [2] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2005, 11(3): 567-577.
- [3] Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 163-166. (in Chinese)
程勇, 刘洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 163-166.
- [4] Zhao Na, Tang Chun, Xie Gang, et al. Numerical simulation on coherent combination of multi-beam super-Gaussian laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1779-1782. (in Chinese)
赵娜, 唐淳, 谢刚, 等. 多束超高斯激光相干合成的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1779-1782.
- [5] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 382-383. (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 382-383.
- [6] Su Xianyu, Li Jitiao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 1999: 3-5. (in Chinese)
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 3-5.
- [7] Zhang Rongzhu, Shi Qikai, Jiang Tengjiao, et al. RMS gradient analysis of the high power laser system components [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(2): 129-131. (in Chinese)
张蓉竹, 石琦凯, 江腾蛟, 等. 强激光系统光学元件波前相位梯度分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2): 129-131.
- [8] Zhang Rongzhu, Cai Bangwei, Yang Chunlin, et al. Numerical method of the power spectral density [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(6): 661-664. (in Chinese)
张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林, 等. 功率谱密度的数值计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 661-664.
- [9] Manes K R, Simmons W W. Statistical optics applied to high-power glass lasers[J]. J Opt Soc Am A, 1985, 2(4): 528-538.
- [10] Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 76-83. (in Chinese)
盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 76-83.
- [11] Goodman J W. Statistical Optics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985: 34-37.
- [12] Lv Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong, et al. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 14-17. (in Chinese)
吕百达, 季小玲, 罗时荣, 等. 激光的参数描述和光束质量[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 14-17.