

# 高功率激光通过有中心遮拦透镜的聚焦\*

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

**摘 要** 用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分对有振幅调制和位相畸变的高功率激光束通过有中心遮拦透镜的聚焦特性作了详细研究, 并对焦面处光束的可聚焦性进行了讨论。数值计算结果表明, 功率(能量)集中度与光阑的遮拦比、光束截断参数以及振幅调制和位要畸变参数等有关。

**关键词** 有振幅调制和位相畸变高功率激光, 聚焦特性, 遮拦比, 功率(能量)集中度。

## 1 引 言

为获得高功率、高光束质量激光输出, 使用非稳腔是一个有效途径, 但其近场输出常为环状光束, 因此, 对环状光束的聚焦特性的研究是有意义的, 或者等效地研究激光光束通过有中心遮拦透镜的聚焦。对于理想平面波和高斯光束通过有中心遮拦透镜的聚焦特性已作了详细研究<sup>[1, 2]</sup>。然而, 从高功率激光系统输出的激光常具有振幅调制和位相畸变<sup>[3]</sup>。本文从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分出发, 在较为一般情况下, 对有振幅调制和位相畸变高功率激光通过有中心遮拦透镜的聚焦特性作了研究, 并对焦面处光束的可聚焦性进行了讨论。研究结果表明, 对高功率激光, 功率(能量)集中度不仅与光阑遮拦比有关<sup>[2]</sup>, 而且与光束的截断参数、振幅调制和位相畸变参数都有关。

## 2 聚焦场光强分布

为简单起见, 且不失一般性, 本文研究二维情况。在准单色场近似和高斯型随机位相畸变假设下, 在  $z = 0$  处有振幅调制和位相畸变光束的场分布可由互强度描述<sup>[3]</sup>:

$$J_1(x'_1, x'_2, z = 0) = \exp\left(-\frac{x_1'^2 + x_2'^2}{w_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(x'_1 - x'_2)^2 \sigma_p^2}{L_p^2}\right] + \sigma_A^2 \exp\left[-\left(\frac{1}{L_A^2} + \frac{\sigma_p^2}{L_p^2}\right)(x'_1 - x'_2)^2\right] \quad (1)$$

式中,  $x'_1, x'_2$  表示在  $x'$  轴上二点坐标,  $w_0$  为光束的束腰半宽度,  $L_A$  和  $L_P$  分别表示振幅调制和位相畸变的尺度,  $\sigma_A^2$  为光强调制强度,  $\sigma_p^2$  为位相误差幅度。为确定起见, (1) 式中已设无畸变( $\sigma_A^2 = \sigma_p^2 = 0$ ) 时的互强度为高斯分布。令  $w_0 \rightarrow \infty$  就得到平面波的互强度表示式。

互强度通过  $ABCD$  光学系统的传输遵从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分<sup>[4]</sup>:

\* 国家高技术青年基金和强辐射重点实验室资助项目。

$$J_2(x_1, x_2, z) = \frac{k}{2\pi B} \iint J_1(x'_1, x'_2, 0) \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [A(x_1'^2 - x_2'^2) - 2(x_1 x'_1 - x_2 x'_2) + D(x_1'^2 - x_2'^2)] \right\} dx'_1 dx'_2 \quad (2)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长。

假设半宽度为  $b$ , 中心遮拦比为  $e = b_0/b$  ( $b_0$  为中心遮拦的半宽度,  $b$  为透镜的半宽度), 焦距为  $f$  的透镜置于  $z = 0$  处, 于是, 传输矩阵可写为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta z & f(1 + \Delta z) \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,

$$\Delta z = (z - f)/f.$$

将(1)和(3)式代入(2)式, 并令  $x_1 = x_2 = x$ , 可得到有振幅调制和位相畸变光束通过有中心遮拦透镜聚焦后聚焦场光强分布为

$$\begin{aligned} I_2\left(\frac{x}{w_0}, \Delta z\right) &= \frac{N}{1 + \Delta z} \int_{-eb/w_0}^{-eb/w_0} \int_{-eb/w_0}^{-eb/w_0} \left\{ \exp[-(x_1''^2 + x_2''^2)] \exp\left[-\frac{\sigma_p^2(x_1'' - x_2'')^2}{(L_p/w_0)^2}\right] \right. \\ &+ \sigma_A^2 \exp\left[-\left(\frac{\sigma_p^2}{(L_p/w_0)^2} + \frac{1}{(L_A/w_0)^2}\right)(x_1'' - x_2'')^2\right] \\ &\times \exp\left\{\frac{i\pi N}{1 + \Delta z} [\Delta z(x_1''^2 - x_2''^2) + 2\frac{x}{w_0}(x_1'' - x_2'')]\right\} dx_1'' dx_2'' \\ &+ \frac{N}{1 + \Delta z} \int_{-eb/w_0}^{-eb/w_0} \int_{eb/w_0}^{eb/w_0} \left\{ \exp[-(x_1''^2 + x_2''^2)] \exp\left[-\frac{\sigma_p^2(x_1'' - x_2'')^2}{(L_p/w_0)^2}\right] \right. \\ &+ \sigma_A^2 \exp\left[-\left(\frac{\sigma_p^2}{(L_p/w_0)^2} + \frac{1}{(L_A/w_0)^2}\right)(x_1'' - x_2'')^2\right] \\ &\times \exp\left\{\frac{i\pi N}{1 + \Delta z} [\Delta z(x_1''^2 - x_2''^2) + 2\frac{x}{w_0}(x_1'' - x_2'')]\right\} dx_1'' dx_2'' \\ &+ \frac{N}{1 + \Delta z} \int_{eb/w_0}^{eb/w_0} \int_{-eb/w_0}^{-eb/w_0} \left\{ \exp[-(x_1''^2 + x_2''^2)] \exp\left[-\frac{\sigma_p^2(x_1'' - x_2'')^2}{(L_p/w_0)^2}\right] \right. \\ &+ \sigma_A^2 \exp\left[-\left(\frac{\sigma_p^2}{(L_p/w_0)^2} + \frac{1}{(L_A/w_0)^2}\right)(x_1'' - x_2'')^2\right] \\ &\times \exp\left\{\frac{i\pi N}{1 + \Delta z} [\Delta z(x_1''^2 - x_2''^2) + 2\frac{x}{w_0}(x_1'' - x_2'')]\right\} dx_1'' dx_2'' \\ &+ \frac{N}{1 + \Delta z} \int_{eb/w_0}^{eb/w_0} \int_{eb/w_0}^{eb/w_0} \left\{ \exp[-(x_1''^2 + x_2''^2)] \exp\left[-\frac{\sigma_p^2(x_1'' - x_2'')^2}{(L_p/w_0)^2}\right] \right. \\ &+ \sigma_A^2 \exp\left[-\left(\frac{\sigma_p^2}{(L_p/w_0)^2} + \frac{1}{(L_A/w_0)^2}\right)(x_1'' - x_2'')^2\right] \\ &\times \exp\left\{\frac{i\pi N}{1 + \Delta z} [\Delta z(x_1''^2 - x_2''^2) + 2\frac{x}{w_0}(x_1'' - x_2'')]\right\} dx_1'' dx_2'' \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $x_i'' = x_i'/w_0$  ( $i = 1, 2$ ),  $N = w_0^2/\lambda f$  为与光束有关的菲涅耳数。

为便于比较, 在计算中令有振幅调制和位相畸变光束在不同遮拦比时的总功率相等, 得到相对聚焦场光强分布

$$I\left(\frac{x}{w_0}, \Delta z\right) = \frac{I_2(x/w_0, \Delta z)}{I_0} \quad (5)$$

式中,  $I_2(x/w_0, \Delta z)$  由(4)式决定,

$$I_0 = 2 \int_{be}^b \exp(-2x'^2/w_0^2) dx' + \sigma_A^2(b - be) \quad (6)$$

### 3 数值计算结果

用(5)式对有振幅调制和位相畸变光束进行数值计算。图1给出截断参数  $b/w_0 = 0.5$  时, 有振幅调制和位相畸变光束通过有中心遮拦透镜聚焦的焦面上横向光强分布  $I(x/w_0, 0)$  (a. u.)。计算参数  $N = 5$ , (a)  $e = 0$ ; (b)  $e = 0.3$ ; (c)  $e = 0.5$ 。图2给出截断参数  $b/w_0 = 2$  时, 有振幅调制和位相畸变光束通过有中心遮拦透镜聚焦的焦面上横向光强分布  $I(x/w_0, 0)$  (a. u.)。计算参数  $N = 5$ , (a)  $e = 0$ ; (b)  $e = 0.3$ ; (c)  $e = 0.5$ 。为讨论方便, 图1、2中同时还给出了无畸变光束 ( $\sigma_A^2 = \sigma_p^2 = 0$ ) 的计算结果。

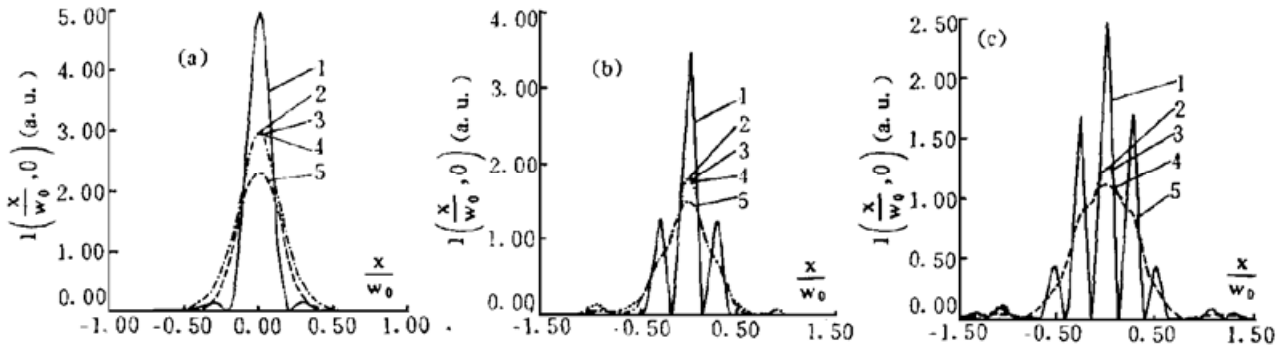


Fig. 1 For the truncation case of  $b/w_0 = 0.5$ , the transverse intensity  $I(x/w_0, 0)$  (a. u.) at the geometrical focal plane of laser beams with phase fluctuations and amplitude modulations passing through a lens with a central obstruction aperture as a function of  $x/w_0$ , the calculation parameters are  $N = 5$ ,  $b/w_0 = 0.5$ , and (a)  $e = 0$ ; (b)  $e = 0.3$ ; (c)  $e = 0.5$ .

1:  $\sigma_A^2 = \sigma_p^2 = 0$ ; 2:  $\sigma_A^2 = 0.1$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 5$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 5$ ; 3:  $\sigma_A^2 = 0.1$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 1$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 5$ ; 4:  $\sigma_A^2 = 0.2$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 1$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 5$ ; 5:  $\sigma_A^2 = 0.1$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 1$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 10$

分析图1、2可知, 随着位相畸变参数  $[\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2}]$  的增大, 有振幅调制和位相畸变光束通过有中心遮拦透镜聚焦的焦面上横向光强分布变平滑, 焦斑尺寸变大, 且中心光强值变小, 这是由于随着  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2}$  的增大, 光束的空间相干性变差的缘故。随着振幅调制参数  $\sigma_A^2$  的增加, 焦面上的中心光强值变小, 但光强分布几乎不随振幅调制参数  $(L_A/w_0)^2$  而变。当透镜无中心遮拦 ( $e = 0$ ) 时, 因透镜的有限尺寸所引起的衍射效应随着截断参数  $b/w_0$  的增大而减小。在截断参数较小 ( $b/w_0 = 0.5$ ) 时, 振幅调制和位相畸变参数对聚焦场光强分布的影响要比截断参数较大 ( $b/w_0 = 2$ ) 时小, 具体地, 当透镜有中心遮拦 ( $e \neq 0$ ) 时, 无论光束截断参数的大小如何, 无畸变光束在焦面上的光强分布均出现明显的旁瓣, 如图1(b)、(c)、图2(b)、(c)所示。对于有振幅调制和位相畸变光束, 在截断参数较大时, 焦面上光强分布因位相畸变参数的作用而变得很光滑, 如图2(b)、(c)所示。而在截断参数较小时, 因位相畸变参数对光强分布的平滑作用比截断参数大时小, 此时, 光强分布仍有小的起伏, 且存在旁瓣,

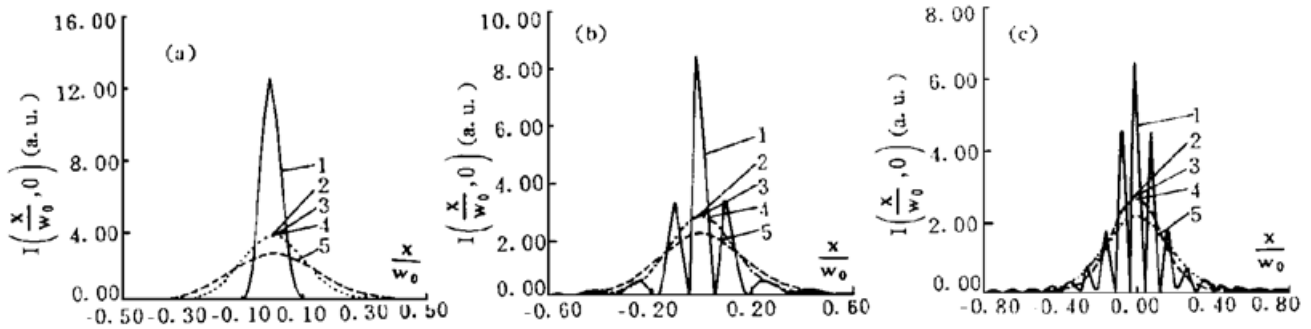


Fig. 2 For the truncation case of  $b/w_0 = 2$ , the transverse intensity  $I(x/w_0, 0)$  (a. u.) at the geometrical focal plane of laser beams with phase fluctuations and amplitude modulations passing through a lens with a central obstruction aperture as a function of  $x/w_0$ , the calculation parameters are  $N = 5$ ,  $b/w_0 = 2$ , and (a)  $e = 0$ ; (b)  $e = 0.3$ ; (c)  $e = 0.5$ .

1:  $\sigma_A^2 = \sigma_p^2 = 0$ ; 2:  $\sigma_A^2 = 0.1$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 5$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 5$ ; 3:  $\sigma_A^2 = 0.1$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 1$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 5$ ; 4:  $\sigma_A = 0.2$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 1$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 5$ ; 5:  $\sigma_A^2 = 0.1$ ,  $(L_A/w_0)^2 = 1$ ,  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 10$

如图 1(b)、(c) 所示。对于截断参数较小 ( $b/w_0 = 0.5$ ) 时, 振幅调制参数  $\sigma_A^2$  和  $(L_A/w_0)^2$  对光强分布的影响几乎可以忽略。同时, 由图 1、2 可以看出, 对于无畸变光束, 随着遮拦比  $e$  的增大, 焦面处的中心光强值减小, 且中心亮斑尺寸减小, 旁瓣光强值增大, 功率(能量)从中心向旁边扩散, 而对于有振幅调制和位相畸变光束, 焦面处的中心光强减小更多, 中心亮斑尺寸增大, 功率(能量)仍从中心向旁边扩散。功率(能量)集中度可以用规定的尺寸内所占功率(能量)百分比表示; 亦可以规定功率(能量)百分比, 用尺寸大小来表示。本文将采用前者, 用功率集中度来描述远场光束质量。表 1 列出在不同的截断参数情况下分别以不同遮拦比  $e$  时无畸变光束在焦面上占总功率 86.5% 的尺寸为标准, 计算出在此尺寸内有振幅调制和位相畸变光束在焦面上占总功率的百分比。分析表 1 可知, 随着振幅调制参数  $\sigma_A^2$  和位相畸变参数  $\sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2}$  的增大, 功率(能量)集中度减小, 但遮拦比  $e$  越大, 振幅调制和位相畸变参数对光束的功率(能量)集中度的影响越小。

Table 1. The power (energy) focusability of lasers with amplitude modulations and phase fluctuations for the truncation case of  $b/w_0 = 0.5$  and  $b/w_0 = 2$

$b/w_0$	0.5			2		
	0	0.3	0.5	0	0.3	0.5
$e$						
$\sigma_A^2 = \sigma_p^2 = 0$	86.5%	86.5%	86.5%	86.5%	86.5%	86.5%
$\sigma_A^2 = 0.1, (L_A/w_0)^2 = 1, \sigma_p^2 = 0$	85.7%	86.3%	86.4%	80.8%	86.4%	86.5%
$\sigma_A^2 = 0.3, (L_A/w_0)^2 = 1, \sigma_p^2 = 0$	84.6%	86.1%	86.3%	74.9%	86.3%	86.4%
$\sigma_A^2 = 0, \sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 5$	64.3%	80.4%	85.1%	34.9%	82.9%	85.0%
$\sigma_A^2 = 0, \sigma_p^2(L_p/w_0)^{-2} = 10$	53.2%	77.6%	83.7%	25.6%	77.5%	82.6%

### 4 结束语

本文在较为一般情况下, 从美国利弗莫尔实验室提出的高功率激光统计模型出发<sup>[3]</sup>, 利用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分对有振幅调制和位相畸变光束通过有中心遮拦透镜的聚焦特性作了详细研究, 并对焦面处光束的功率(能量)集中度进行了讨论。用本文所使用的计算模

型,同时包含了遮拦比、截断参数、振幅调制和位相畸变参数对聚焦特性的影响,以及这些参数都变化时的数值计算结果。采用文献[5]提出的评价远场光束质量标准,即功率(能量)集中度,在一般情况下,对高功率激光远场的功率(能量)集中度作了数值计算和分析。研究表明,高功率激光通过有中心遮拦透镜的聚焦,或者等价环状光束的聚焦,其远场功率(能量)集中度不仅随遮拦比的增大(环宽度的减小)而降低,而且还随振幅调制和位相畸变参数的增大而降低,且位相畸变的增加有平滑光强分布的作用。因此,实际强激光的振幅调制和位相畸变会对其传输和聚焦特性产生影响,这是实际工作中应当注意的。本文的理论分析结果,例如,遮拦比和位相畸变参数对聚焦特性的影响是与实验结果一致的,物理上也是十分清楚的<sup>[5]</sup>。理论计算所揭示出在不同截断参数情况下实际强激光的振幅调制和位相畸变对聚焦特性的影响是十分有意义的,应当通过专门设计实验来进一步校核。在(1)式中若令 $w_0 \rightarrow \infty$ ,则可对有振幅调制和位相畸变平面波通过有中心遮拦透镜的聚焦进行分析。最后,本文虽然对二维情况进行了研究,但所用方法可直接推广用于三维情况,虽然定量计算结果有所不同,但本文所得主要物理结论对三维情况应是适用的。

### 参 考 文 献

- [1] C. J. Sheppard, T. Wilson, Gaussian-beam theory of lenses with annular aperture. *Microwaves, Optics and Acoustics*, 1978, 2(4) : 105~ 109
- [2] M. Born, E. Wolf, *Principle of Optics*, Fifth Edition, Oxford, Pergamon Press, 1980 : 416
- [3] K. R. Manes, W. W. Simmon, Statistical optics applied to high-power glass lasers. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1985, 2(4) : 528~ 538
- [4] T. Shirai, T. Asakura, Spatial coherence of light generated from a partially coherent source and its control using a source filter. *Optik*, 1993, 94(1) : 1~ 15
- [5] 魏燕明,刘晶儒,孙瑞蕃,虚共焦非稳腔束散角研究. *激光杂志*, 1994, 15(4) : 145~ 150

## Focusing of High-Power Laser Passing Through a Lens with a Central Obstruction Aperture

Zhang Bin      Lu Baida

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 11 August 1996; revised 12 December 1996)

**Abstract** By using the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral, the focusing of high-power laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations passing a lens with a central obstruction aperture has been studied in detail. The beam focusability in the focal plane has been discussed. Numerical calculation results show the dependence of the power (energy) focusability on the obstruction ratio, truncation parameter, the amplitude modulation and phase fluctuation parameters.

**Key words** high-power laser with amplitude modulations and phase fluctuations, focusing properties, obstruction ratio, power (energy) focusability.