

有振幅调制和位相畸变光束通过光阑的变化*

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-菲涅耳衍射积分和统计光学方法对有振幅调制和位相畸变光束分别通过硬边和软边光阑的传输特性作了详细研究。数值计算结果表明近场和远场光强分布与截断参数、系统菲涅耳数、光束的振幅调制和位相畸变参数均有关。

关键词: 有振幅调制和位相畸变光束 硬边光阑 软边光阑 近场 远场

Changes of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations passing through an aperture

Zhang Bin, Lü Baida

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

Abstract: In this paper, using the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral and statistical-optics method, the propagation properties of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations passing through hard-edged and soft-edged apertures have been studied in detail. Numerical calculation results have illustrated that the intensity distributions in the near and far fields are dependent on the truncation parameter, Fresnel number of the system, and parameters of amplitude modulations and phase fluctuations.

Key words: laser beam with amplitude modulations and phase fluctuations hard-edged aperture soft-edged aperture near field far field

引 言

文献[1]指出,在惯性约束聚变驱动器中传输的高功率激光通常有振幅调制和位相畸变,且具有统计特性。在互强度仅依赖于横平面上二点间距离和激光场可用高斯型随机变量描述前提下,建立了描述有振幅调制和位相畸变高功率激光的数学物理模型。利用文献[1]的结果,从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分出发,对有振幅调制和位相畸变光束分别通过硬边和软边光阑的传输特性作了详细研究。通过大量的数值计算说明了截断参数、系统菲涅耳数、光束的振幅调制和位相畸变参数对近场和远场光强分布的影响。

一、理 论 分 析

在准单色场近似和高斯型随机位相畸变假设下,有振幅调制和位相畸变光束的场分布可由互强度描述^[1]

$$J_1(x'_1, x'_2, z=0) = I \exp[-(x'_1 - x'_2)^2 \sigma_p^2 / L_p^2] + \sigma_A^2 \exp[-(1/L_A^2 + \sigma_p^2 / L_p^2)(x'_1 - x'_2)^2] \quad (1)$$

式中, L_A 和 L_p 分别表示振幅调制和位相畸变的尺度, σ_A^2 为光强调制强度, σ_p^2 为位相误差幅

* 国家高技术青年科学基金和国家高技术惯性约束聚变主题青年基金项目资助。

度。通常, I 远大于噪声光强 σ_n^2 。计算中设在 $z = 0$ 处 I 具有高斯分布

$$I = \exp[-(x_1'^2 + x_2'^2)/w_0^2] \tag{2}$$

式中, w_0 为光束的束腰半径。

互强度通过半径为 a , 透过率函数为 $T(x)$ 的光阑的传输由广义惠更斯菲涅耳衍射积分公式描述^[2]

$$J_2(x_1, x_2, z) = \frac{k}{2\pi z} u \iint T(x_1') T^*(x_2') J_1(x_1', x_2', z=0) \exp\{-\frac{ik}{2z} [(x_1'^2 - x_2'^2) - 2(x_1x_2' - x_2x_1') + (x_1^2 - x_2^2)]\} dx_1' dx_2' \tag{3}$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。将 (1) 和 (2) 式代入 (3) 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光阑传输的光强分布为

$$I_2(x) = N_w \int_{-a/w_0}^{a/w_0} \int_{-a/w_0}^{a/w_0} T(w_0x''_1) T^*(w_0x''_2) \{ \exp[-(x''_1^2 + x''_2^2)] \cdot \exp[-\frac{\sigma_p^2(x''_1 - x''_2)^2}{(L_p/w_0)^2} + \sigma_A^2 \exp[-\frac{\sigma_p^2}{(L_p/w_0)^2} + \frac{\sigma_A^2}{(L_A/w_0)^2} (x''_1 - x''_2)^2]] \exp[-i\pi N_w [(x''_1^2 - x''_2^2) - (2x/w_0)(x''_1 - x''_2)]] \} dx''_1 dx''_2 \tag{4}$$

式中, $x''_i = x'_i/w_0$ ($i = 1, 2$), $N_w = w_0^2/\lambda$ 为与光束有关的菲涅耳数, 与光阑孔径有关的菲涅耳数为 $N_a = a^2/\lambda z = (a/w_0)^2 N_w$, a/w_0 为截断参数。

二、数值计算结果

数值计算采用 (4) 式对有振幅调制和位相畸变光束分别通过 $T(x') = 1$ 的硬边光阑和 $T(x') = \exp(-x'^2/s^2)$ 的软边光阑

两种情况进行, 典型例示于图 1~ 4。为简单起见, 设 $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2$, σ_A^2 和 $(L_A/w_0)^2$ 均为常数。图 1 给出有振幅调制和位相畸变光束通过硬边光阑传输的近场和远场横向光强分布, a: $a/w_0 = 0.5, N_a = 2$ (近场); b: $a/w_0 = 0.5, N_a = 0.1$ (远场); c: $a/w_0 = 2, N_w = 2$ (近场); d: $a/w_0 = 2, N_w = 0.1$ (远场)。图 2 给出有振幅调制和位相畸变光束通过硬边光阑传输的三维光强分布, $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2 = 1, \sigma_A^2 = 0.1, (L_A/w_0)^2 = 1$, a: $a/w_0 = 0.5$; b: $a/w_0 = 2$ 。图 3 给出有振幅调制和位相畸变光束通过软边光阑传输的近场和远场横向光强分布, $T(a) = 0.01$, a: $a/w_0 = 0.5, N_a = 2$ (近场); b: $a/w_0 = 0.5, N_a = 0.1$ (远场); c: $a/w_0 = 2, N_w = 2$ (近场); d: $a/w_0 = 2, N_w = 0.1$ (远场)。图 4 给出有振幅调制和位相畸变光束通过软边光阑传输

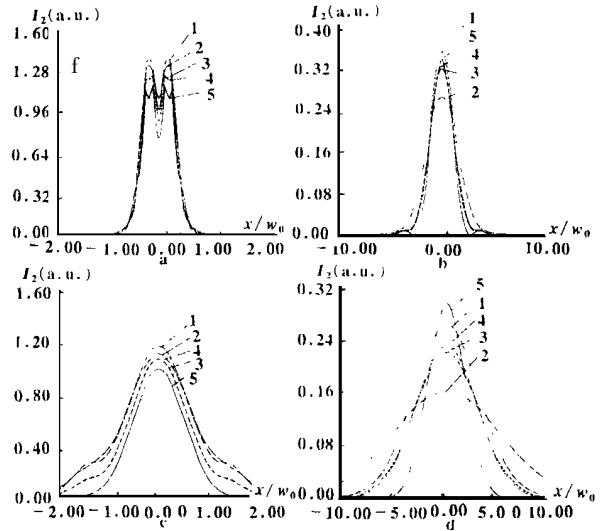


Fig. 1 The transverse intensity distributions I_2 (a. u.) of the beams with both amplitude modulations and phase fluctuations passing through a hard-edged aperture

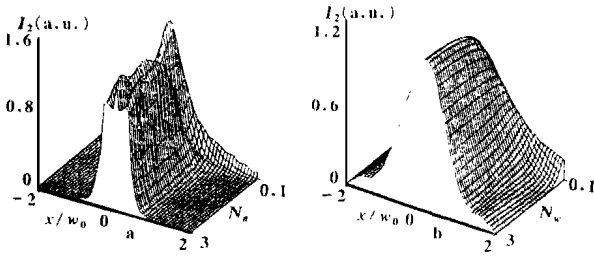


Fig. 2 The intensity distribution I_2 (a. u.) of beams with both amplitude modulations and phase fluctuations passing through a hard-edged aperture as a function of x/w_0 and $N_a(N_w)$

代表“ $\sigma_p^2 = \sigma_A^2 = 0$ ”, 为了比较方便, 图 1, 3 中同时给出了无畸变光束的计算结果。

分析图 1~ 2 可知, 有振幅调制和位相畸变光束通过光阑传输, 在近场和远场的光强分布与无畸变光束相差很大。当有振幅调制和位相畸变光束通过硬边光阑传输时, 随着 a/w_0 的增加, 由光阑的有限尺寸所引起的衍射效应减小。对于强截断情况 (见图 1a)。由于存在强烈的衍射效应, 近场光强分布起伏较大; 对于弱截断情况 (见图 1c), 即使衍射效应很弱, 因光束存在振幅调制, 近场光强分布仍存在明显畸变, 且振幅调制参数 σ_A^2 和 $(LA/w_0)^2$ 越大, 畸变越厉害。由于随着位相畸变参数 $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2$ 增大, 光束的空间相干性将变差, 因此, 随着 $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2$ 增大, 远场

的三维光强分布, $T(a) = 0.01$, $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2 = 1$, $\sigma_A^2 = 0.1$, $(LA/w_0)^2 = 1$, $a/w_0 = 0.5$; b: $a/w_0 = 2$ 。在图 1, 3 中, “1”代表“ $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2 = 1$, $\sigma_A^2 = 0.2$, $(LA/w_0)^2 = 1$ ”, “2”代表“ $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2 = 4$, $\sigma_A^2 = 0.2$, $(LA/w_0)^2 = 1$ ”, “3”代表“ $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2 = 1$, $\sigma_A^2 = 0.2$, $(LA/w_0)^2 = 1$ ”, “4”代表“ $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2 = 1$, $\sigma_A^2 = 0.2$, $(LA/w_0)^2 = 5$ ”, “5”

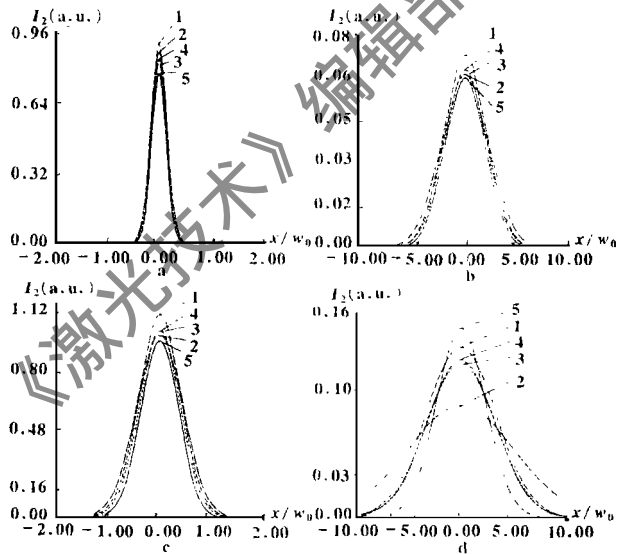


Fig. 3 The transverse intensity distributions I_2 (a. u.) of the beams with both amplitude modulations and phase fluctuations passing through a soft-edged aperture

光强分布变得平滑, 但对应的光斑尺寸变大, 轴上光强最大值变小 (见图 1b, d)。由图 3~ 4 可知, 当有振幅调制和位相畸变光束通过软边光阑传输时, 无论近场还是远场, 光强分布均被平滑化, 对于强截断情况 (见图 3a, b), 近场光强分布的强烈起伏和远场光强分布的旁瓣均消失。随着 $[\sigma_p/(L_p/w_0)]^2$ 增大, 远场光斑尺寸变大,

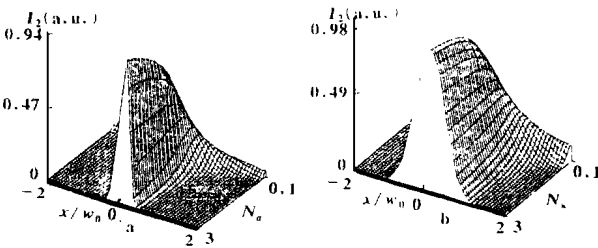


Fig. 4 The intensity distribution I_2 (a. u.) of the beams with both amplitude modulations and phase fluctuations passing through a soft-edged aperture as a function of x/w_0 and $N_a(N_w)$

轴上光强最大值变小 (见图 3b, d)。值得注意的是, 由于按文献 [1] 引入的统计光学模型中入射光场的总能量没有归一, 因此, 有振幅调制和位相畸变光束在近场或远场的光强值可能大

于无畸变光束的光强值。

三、结 束 语

用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和统计光学方法对有振幅调制和位相畸变光束通过硬边光阑和软边光阑传输的近场和远场特性作了详细研究。这是比描述部分相干光的高斯-谢尔模型光束或者仅有位相畸变光束更为一般的描述有部分相干性且有振幅调制光束的物理模型。由本文计算分析可得到以下结论:

1. 有振幅调制和位相畸变光束通过硬边光阑传输时,衍射效应随截断参数 a/w_0 和位相畸变参数 $[\varphi_p/(L_p/w_0)]^2$ 的增大而减小,随着振幅调制参数 σ_A^2 和 $(L_A/w_0)^2$ 的增大,近场光强分布的畸变越厉害,随着位相畸变参数 $[\varphi_p/(L_p/w_0)]^2$ 的增大,远场光强分布被平滑,且相应的光斑尺寸变大,轴上光强最大值变小;

2. 有振幅调制和位相畸变光束通过软边光阑传输时,近场和远场光强分布起伏均被平滑,在强截断情况下,振幅调制参数 σ_A^2 , $(L_A/w_0)^2$ 和位相畸变参数 $[\varphi_p/(L_p/w_0)]^2$ 对近场和远场光强分布的影响很小。在弱截断情况下,振幅调制参数 σ_A^2 , $(L_A/w_0)^2$ 和位相畸变参数 $[\varphi_p/(L_p/w_0)]^2$ 对近场光强分布的影响很小,随着位相畸变参数 $[\varphi_p/(L_p/w_0)]^2$ 增大,远场光斑尺寸变大,轴上光强极大值变小。在 $\sigma_A^2 \ll 1$ 条件下, σ_A^2 对远场光强分布影响不大。

利用上述所得计算结果可对有振幅调制和位相畸变光束的近场调制度和远场能量(功率)可聚焦度等作定量计算分析。限于篇幅,仅对同时有振幅调制和位相畸变光束进行了讨论。若分别令(4)式中的 $\sigma_A^2 = 0$ 和 $\sigma_p^2 = 0$,则能对只有位相畸变光束和只有振幅调制光束的光阑衍射效应进行讨论。虽然本文仅对二维情况作了研究,但所用方法和有关结果可直接推广用于三维情况。此外,还可以利用本文的方法为其它类型分布有振幅调制和位相畸变光束通过光阑的传输特性以及有振幅调制和位相畸变光束的聚焦特性和通过空间滤波器的传输特性作进一步研究,所得结果将另文发表。

参 考 文 献

- 1 Manes K R, Simmon W W. J. O. S. A. (A), 1985; 4(4): 528~ 538
- 2 Shirai T, Asakura T. Optik, 1993; 94(1): 1~ 15

作者简介: 张 彬,女,1969年9月出生。博士生,副研究员。主要从事激光光束的传输变换的研究。

收稿日期: 1996-07-09 收到修改稿日期: 1997-03-17

• 产品简讯 •

倍频离子激光器

美国加利福尼亚州的 Lexel Laser 公司推出 95-SHG 型腔内倍频离子激光器,采用 BBO 非线性晶体,输出二次谐波深紫外光波。该系统结构以一组标准的 6W 氩离子激光器为基础,多谱线输出 TEM₀₀ 100mW 可见光,波长 457.9~ 528.7nm。

中尧 马理 供稿