

文章编号: 1001-3806(2010)05-0704-04

平顶高斯光束在失调光学系统中的传输特性

韩玉东, 沈学举*, 王 龙

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为了研究平顶高斯光束经含失调窄缝光阑的失调光学系统的传输特性, 采用广义衍射积分法和用有限个复高斯函数之和来逼近窄缝光阑孔径函数的方法, 得出了输出光束场分布的近似解析公式, 并针对给定的光学系统和平顶高斯光束进行了分析和数值模拟。结果表明, 当光阑半宽度与光束束腰半宽度之比较大时(大于1), 光学系统的失调量比光阑的失调量对输出光束特性影响更显著。这一结果对分析平顶高斯光束传输特性是有帮助的。

关键词: 激光光学; 平顶高斯光束; 失调光学系统; 广义衍射积分; 传输特性

中图分类号: TN012 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.035

Transmission characteristics of flattened Gaussian beams passing through a misaligned optical system

HAN Yu-dong, SHEN Xue-ju, WANG Long

(Department of Optics and Electronic, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to study the transmission characteristics of flattened Gaussian beams passing through a misaligned optical system with a narrow slot aperture, the approximate analytical transmission equations of output light field distributions was derived adopting generalized diffraction formula and the approximate expansion equations of the narrow slot aperture. Consequently, the analysis and simulation in accordance with the preset optical system and flattened Gaussian beams was made. The result shows that influence of misalignments of optical system on the characteristics of the output light is more notable than misalignments of diaphragm's when the ratio of half width of the aperture to half waist width of the flattened Gaussian beams is more than one. This method is helpful for the analysis of the transmission characteristic of flattened Gaussian beams.

Key words: laser optics; flattened Gaussian beams; misaligned optical system; generalized diffraction integral; transmission characteristic

引言

在激光技术的许多应用中,如激光材料加工、惯性约束核聚变中的靶面辐照等均要求光束高度均匀化,为改进激光束性能,常将激光束整形成平顶光束输出,因此,其传输特性的研究具有十分广泛的实际意义。描述平顶光束的模型之一,平顶高斯光束的优点是其传输公式可写为解析的形式,易于分析和数值模拟^[1-8]。本文中,对应用广义衍射积分公式直接计算与应用近似解析公式计算两种方法进行了讨论,并应用近似解析公式方法分析了平顶高斯光束通过含失调窄缝光阑的失调光学系统的传输特性。

1 理论分析

图1为一个含失调窄缝光阑的失调光学系统,入

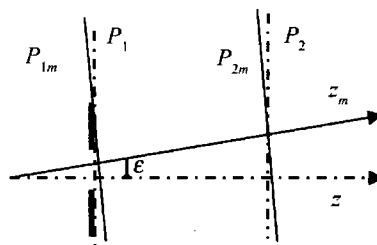


Fig. 1 Misaligned optical system with a misaligned narrow slot aperture
射、出射平面分别为 P_1 和 P_2 , 可由广义衍射积分公式定量描述激光束通过该系统的传输。其表示式为^[9]:

$$E_2(x_2, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi B}} \int_{-\infty}^{\infty} T(x_1) E_1(x_1, 0) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[Ax_1^2 - 2x_1x_2 + Dx_2^2 + Ex_1 + Gx_2]\right\} dx_1 \quad (1)$$

式中, A, B, C, D 为光学系统矩阵元, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数,

作者简介: 韩玉东(1980-), 男, 硕士研究生, 现从事激光技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: shxjoptics@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-09-21; 收到修改稿日期: 2009-12-28

λ 为波长, x_1, x_2 分别表示入射平面、出射平面上的坐标。参量 E, G 表示式为:

$$\begin{cases} E = 2(\alpha_1 \varepsilon + \beta_1 \varepsilon') \\ G = 2(B\gamma_1 - D\alpha_1)\varepsilon + 2(B\delta_1 - D\beta_1)\varepsilon' \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\alpha_1 = 1 - A, \beta_1 = l - B, \gamma_1 = -C, \delta_1 = \pm 1 - D$ 。 ε 是光学系统垂直于 z 轴的横向位移, ε' 是光学系统相对于 z 轴的倾角, $E_1(x_1, 0)$ 为入射面上光场分布, l 是光阑到出射面的距离。

设 a 为光阑半宽度, d 为光阑中心偏离 z 轴的距离, α 是光阑相对于 z 轴垂轴截面的倾角, 则光阑孔径函数为:

$$T(x_1) = \begin{cases} 1, & (|x_1 - d| \leq r) \\ 0, & (|x_1 - d| > r) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $r = a \cos \alpha$ 。

平顶高斯光束的场分布可表示为:

$$E(x_1, 0) = E_0 \times \exp\left[-\frac{(N+1)x_1^2}{w_0^2}\right] \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left(\frac{N+1}{w_0^2} x_1^2\right)^n \quad (4)$$

式中, w_0 为 $z=0$ 处平顶高斯光束的腰斑半径, N 为阶数; 当 $N=0$ 时, 即为高斯光束的场分布公式。高斯光束和平顶高斯光束场分布如图 2 所示。

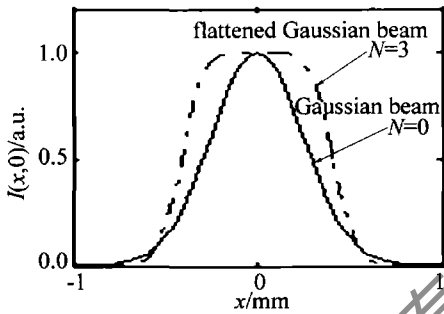


Fig. 2 Field distributions of Gaussian beams and flattened Gaussian beams

将(3)式、(4)式代入(1)式得:

$$E_2(x_2, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi B}} \int_{-a}^a E_0 \times \exp\left[-\frac{(N+1)x_1^2}{w_0^2}\right] \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left(\frac{N+1}{w_0^2} x_1^2\right)^n \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[Ax_1^2 - 2x_1x_2 + Dx_2^2 + Ex_1 + Gx_2]\right\} dx_1 \quad (5)$$

应用(5)式直接数值积分计算含有多个光阑的复杂光学系统将过于复杂, 计算量大。此时, 可采用将(3)式展开为有限项复高斯函数之和^[10]的方法, 得出近似解析式进行计算。用有限项复高斯函数之和来逼近窄缝光阑孔径函数, 可得:

$$T(x_1) = \sum_{m=1}^M F_m \exp\left[-\frac{G_m(x_1 - d)^2}{(a \cos \alpha)^2}\right] \quad (6)$$

图 3 所示为(3)式和(6)式所得光阑孔径函数曲线的比较。

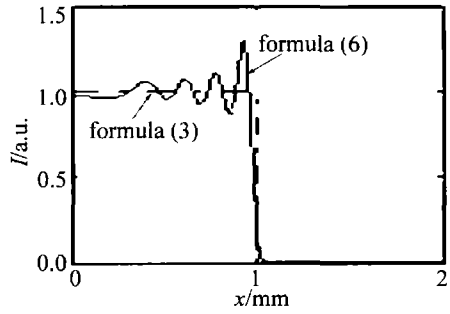


Fig. 3 Comparison of diaphragm aperture function curve

将(4)式、(6)式代入(1)式得:

$$E_2(x_2, z) = E_0 \sqrt{\frac{ik}{2\pi B}} \exp\left[-\frac{ik}{2B}(Dx_2^2 + Gx_2)\right] \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N \exp\left[-\frac{G_m d^2}{(a \cos \alpha)^2}\right] \frac{F_m}{n!} \left(\frac{N+1}{w_0^2}\right)^n \times \int_{-\infty}^{\infty} x_1^{2n} \exp(-Sx_1^2 + Tx_1) dx_1 \quad (7)$$

式中, $S = \frac{G_m}{(a \cos \alpha)^2} + \frac{N+1}{w_0^2} + \frac{ikA}{2B}$, $T = \frac{G_m 2d}{(a \cos \alpha)^2} - \frac{ik(-2x_2 + E)}{2B} = O + iP$, $O = \frac{\text{Re}(G_m)2d}{(a \cos \alpha)^2}$, $P = \frac{\text{Im}(G_m)2d}{(a \cos \alpha)^2} - \frac{k(-2x_2 + E)}{2B}$ 。利用积分公式:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^{2n} \exp(-\alpha^2 x^2) \times \cos(\beta x) dx = (-1)^n \pi^{\frac{1}{2}} 2^{-2n} \alpha^{-2n-1} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4\alpha^2}\right) \times H_{2n}\left(\frac{\beta}{2\alpha}\right)$$

代入(7)式得:

$$E_2(x_2, z) = E_0 \sqrt{\frac{ik}{2B}} \exp\left[-\frac{ik}{2B}(Dx_2^2 + Gx_2)\right] \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N \left(\frac{1}{2}\right)^{2n} \exp\left[-\frac{G_m d^2}{(a \cos \alpha)^2}\right] \frac{F_m}{n!} \left(-\frac{N+1}{w_0^2}\right)^n \left(\frac{1}{S}\right)^{n+\frac{1}{2}} \times \exp\left(\frac{O^2 - P^2}{4S} + i\frac{PO}{2S}\right) H_{2n}\left(\frac{P}{2\sqrt{S}}\right) \quad (8)$$

式中, H 为厄米特多项式。

$$\text{光强分布为: } I(x_2, z) = |E_2(x_2, z)|^2 \quad (9)$$

2 数值模拟及结果分析

设平顶高斯光束通过图 4 所示光学系统, 光阑距

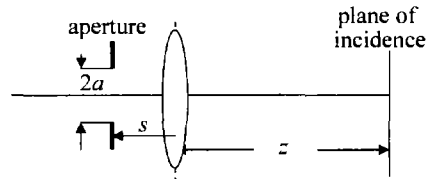


Fig. 4 Optical system with an aperture

透镜距离为 s , 透镜到出射面的距离为 z , 透镜焦距为 f , 则该系统的 $ABCD$ 矩阵为^[11]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/f & s + z - zs/f \\ -1/f & 1 - s/f \end{bmatrix} \quad (10)$$

代入(2)式可得:

$$\begin{cases} E = \frac{2z}{f}\varepsilon + \frac{2zs}{f}\varepsilon' \\ G = 2\frac{s}{f}\varepsilon + 2\left(\frac{s^2 + zs - s}{f} + \frac{-zs^2}{f^2}\right)\varepsilon' \end{cases} \quad (11)$$

2.1 直接数值积分法与近似解析公式法比较及分析

应用广义衍射积分法直接数值积分对含有多个光阑的复杂光学系统,计算量大。将光阑孔径函数展开成有限项复高斯函数之和的近似方法,可以得到输出

光场的近似解析公式,便于分析和计算。

计算中取光束和图4所示的光学系统参量分别为, $M = 10, N = 3, w_0 = 0.5\text{mm}, \lambda = 0.53\mu\text{m}, a = 1\text{mm}, f = 100\text{mm}, s = 10\text{mm}$;对光阑和薄透镜不失调,即 $d = 0, \alpha = 0, \varepsilon = 0, \varepsilon' = 0$ 的情况,直接数值积分得到的输出平面上相对光强分布曲线如图5所示,图中曲线是用透镜焦面上最大光强归一化后画出的。直接数值积分时采用复合梯形公式求积分,积分区间划分为200份。

由图5可知,当 $z = 100\text{mm}$ (即焦平面处)时,两种

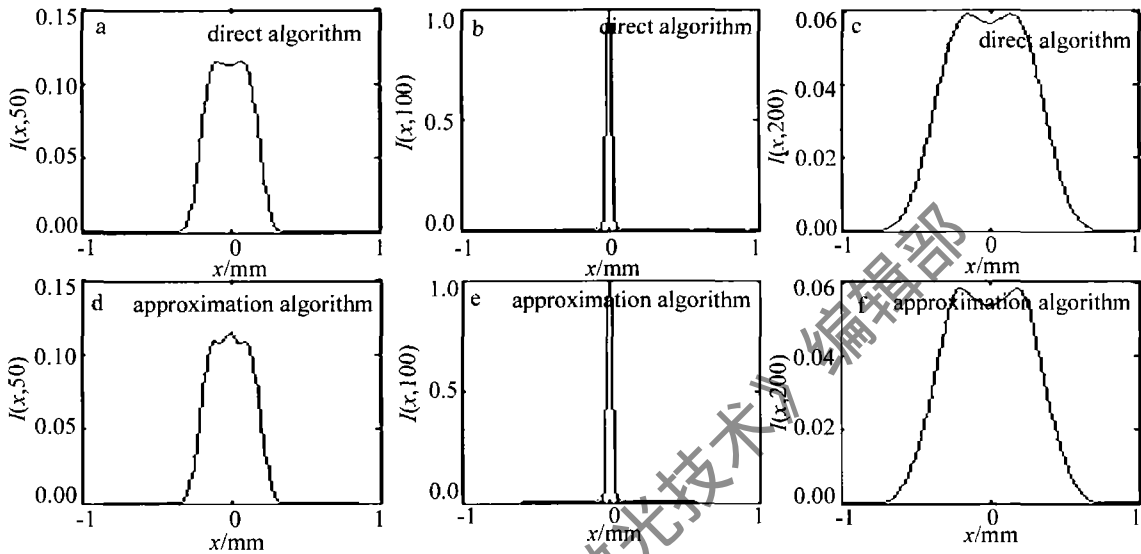


Fig. 5 Comparison of directly diffraction formula integral with approximate method

方法所得结果符合较好。以 $z = 100\text{mm}$ 时为例,在奔4 (2.8G), 512M 内存微机应用直接衍射积分方法与应用近似方法所用机时比为 1.64:1。可以预见,在远场条件下,对于含有多个光阑的复杂光学系统,近似方法将显著节省计算时间。

2.2 光阑及光学系统失调量对输出光束强度分布的影响

根据(7)式,应用近似解析公式方法,各参量设置同上,计算并分析光阑及光学系统失调量对沿 z 轴传播的平顶高斯光束通过透镜后在距透镜 z 处垂直于 z 轴截面上沿 x_2 轴的光强分布的影响,如图6所示。

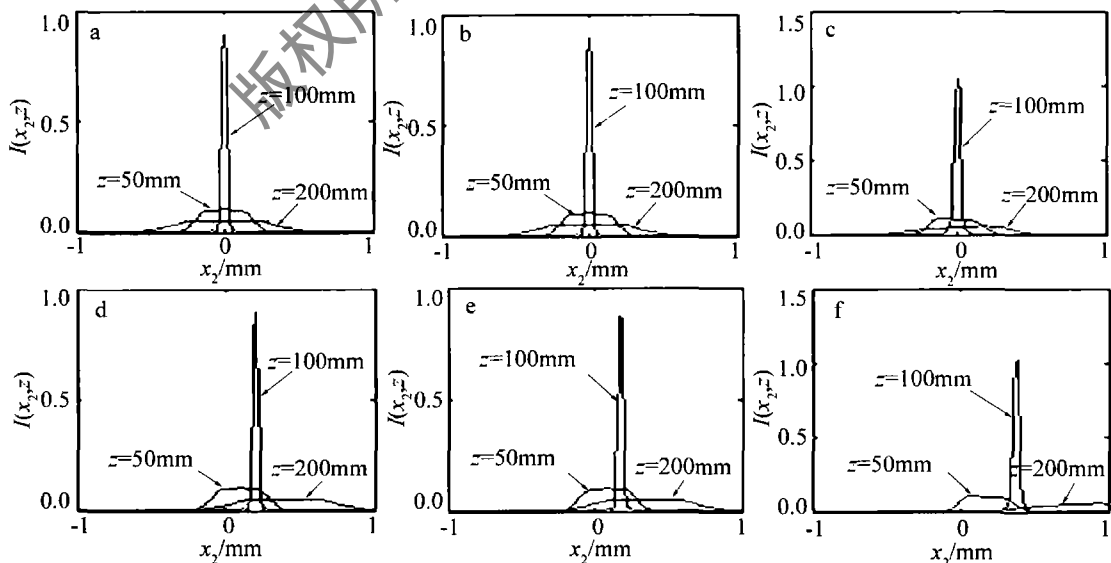


Fig. 6 Relative intensity distribution of output beams vs. misaligned parameters of aperture and lens

a— $d = 0, \alpha = 0, \varepsilon = 0, \varepsilon' = 0$ b— $d = 0, \alpha = 3^\circ, \varepsilon = 0, \varepsilon' = 0$ c— $d = 0.2\text{mm}, \alpha = 0, \varepsilon = 0, \varepsilon' = 0$ d— $d = 0, \alpha = 0, \varepsilon = 0.2\text{mm}, \varepsilon' = 0$ e— $d = 0, \alpha = 0, \varepsilon = 0, \varepsilon' = 1^\circ$ f— $d = 0.2\text{mm}, \alpha = 3^\circ, \varepsilon = 0.2\text{mm}, \varepsilon' = 1^\circ$

由图 6a 所示,当光阑和透镜不失调时,不同 z 处强度分布曲线中心皆处于 $x_2 = 0$ 处,即光束沿 z 轴方向传播且光束中心与 z 轴重合。当 $z = 100\text{mm}$ (焦平面处)时,光束会聚并得到强度极大值,然后光束沿 z 轴方向传播并逐渐发散。由图 6b 所示,当光阑与 x_2 轴夹角为 3° 时,由于 $a/w_0 = 2$ 较大,仅相当于光阑宽度减小为 $a\cos 3^\circ$,出射光束仍沿 z 轴方向传播未发生偏离。由图 6c 所示,当光阑中心向 x_2 正方向平移 0.2mm 时,由于透过光阑(由复高斯函数拟合)的光束不再是 z 轴对称,因此经过透镜后,在垂直于 z 轴的截面内光强不再呈轴对称分布,但由于透镜未失调,焦平面上光斑仍处在透镜焦点处。由图 6d、图 6e 所示,在光阑相对于 z 轴不失调,但透镜相对于 z 轴失调的情况下,此时光束传播方向与透镜光轴不重合,经过透镜后,光束沿与 z 轴成一定夹角的方向传播。由图 6f 所示,在光阑和透镜都失调的情况下,光束沿与 z 轴成一定夹角的方向传播,在垂直于 z 轴截面内光强呈非对称分布,且焦平面上光斑位置明显偏离 z 轴位置。

3 结 论

作者应用近似解析传输公式,定量分析了光阑与光学系统失调量对输出光束场分布影响,结果表明,当 a/w_0 比较大时(大于 1),光学系统的失调量比光阑的失调量对输出光束特性影响更显著。并通过两种计算方法的比对分析,说明应用近似解析公式的方法效率较高,但存在计算误差,在焦平面附近误差较小,能够适用于分析含有多个光阑及透镜的

复杂光学系统。

参 考 文 献

- [1] LÜ B D. Laser optics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003:1-73 (in Chinese).
- [2] LU Y X, YANG Y P, CHEN Sh F. Laser transmission and transform technology [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 1997:53-59 (in Chinese).
- [3] JI X L, LÜ B D. Transformation properties of Gaussian beams passing through a tilted lens [J]. Laser Technology, 2001, 25(5):351-355 (in Chinese).
- [4] GORI F. Flattened Gaussian beam [J]. Opt Commun, 1994, 107(5):335-341.
- [5] HU L Y, ZHOU N R, TAO X Y, et al. Close-form equation for flattened-Gaussian beam [J]. Journal of Jiangxi Normal University, 2003, 27(4): 99-101 (in Chinese).
- [6] SHEN X J, SHEN H B, ZHOU Sh G, et al. Propagation properties of Gaussian beam passing through a misaligned optical system with misaligned narrow slot aperture [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1447-1451 (in Chinese).
- [7] ZHAO G P, LÜ B D. Improved algorithm for beam transformation through hard-aperture optics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(6):707-711 (in Chinese).
- [8] JI X L, LÜ B D. Focal shifts of flattened Gaussian beams passing through an aperture lens [J]. Laser Technology, 2003, 27(1):55-57 (in Chinese).
- [9] WANG Sh M, ZHAO D M. Principles of matrix optics [M]. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1994:40-198 (in Chinese).
- [10] MAO H D, ZHAO D M. Different models for a hard-aperture function and corresponding approximate analytical propagation equations of a Gaussian beam through an apertured optical system [J]. J O S A, 2005, A22(4):647-653.
- [11] WANG B Zh, ZHAO Zh G, DUAN K L. Propagation properties of hollow Gaussian beams through an optical system with a hard-edged aperture [J]. Laser Technology, 2007, 31(2):203-208 (in Chinese).