

文章编号: 1001-3806(2011)06-0861-04

## 平顶高斯光束通过扩束系统的传输特性研究

吴忠, 叶云霞, 张永康\*, 张磊, 管海兵  
(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了研究平顶高斯光束通过扩束系统的传输特性, 从柯林斯衍射积分公式出发, 推导出场强分布的解析式。以伽利略式和开普勒式这两种常见的扩束系统为例, 对平顶高斯光束扩束后在接收面的光强分布进行数值计算及分析。结果表明, 平顶高斯光束通过同等倍数但不同形式的扩束系统的传输特性不同, 且对于不同焦距的扩束系统, 其传输特性也有比较明显的差别; 平顶高斯光束通过开普勒式扩束系统, 不仅在成像面距离获得平顶光束, 还可在一定轴向范围之内保持平顶分布, 并且轴向范围和所选扩束系统的放大倍数有关, 随着放大倍数的增大, 轴向范围也增大。

**关键词:** 物理光学; 平顶高斯光束; 光束传输; 扩束系统; 光强分布

**中图分类号:** TN241; TN012 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.036

### Study on propagation properties of flattened Gaussian beam passing through a beam expander

WU Zhong, YE Yun-xia, ZHANG Yong-kang, ZHANG Lei, GUAN Hai-bing  
(Mechanical Engineering School, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Starting from the Collins diffraction integral formula, the propagation formula of flattened Gaussian beam passing through a beam expander was derived. Taking both Galileo and Kepler beam expander systems as examples, the intensity distribution was simulated. The numerical calculation shows that the propagation properties are different between the Galileo and Kepler beam expander systems with the same amplification as well as different focus length of the lens. What is more, the flat-topped beam is also obtained during certain axial displacement as well as the image plane of the Kepler beam expander, and the axial displacement is increased with the increase of the expander amplification.

**Key words:** physical optics; flattened Gaussian beam; beam propagation; beam expander; intensity distribution

## 引言

由于平顶光束具有较大填充因子和小的强度调制, 能减小非线性效应和提高系统效率, 所以, 在激光实际应用过程中常常需要光强分布为平顶的强激光束, 例如, 在激光冲击、激光核聚变等应用中, 就需要光束在一定横截面内保持光强分布均匀, 因此该种光束具有广泛的应用前景。平顶高斯光束是由 GORI 提出的一种描述平顶光束的一种数学物理模型<sup>[1]</sup>, 目前许多研究者对平顶高斯光束的传输特性<sup>[2-6]</sup>及其通过光学系统的传输特性<sup>[7-9]</sup>已进行大量研究, 但对于平顶高斯光束通过扩束系统的传输特性研究尚未提到, 因此, 定量分析扩束系统参量对输出激光束特性的影响对于光学系统设计和激光束控制有重要意义。本文中就拟

对平顶高斯光束通过扩束系统的传输特性进行相关研究。

扩束系统是激光器系统常用的一种光学系统, 通过扩束, 不仅能够改变激光光束直径, 实现多级激光器系统中光束尺寸的级间匹配, 而且可以压缩发散角, 有利于获得更小光斑尺寸和更高的能量密度。因此, 研究平顶光束通过扩束系统的传输特性对高功率激光器系统的总体设计和实际应用都具有非常重要的现实意义。目前常用的扩束系统有两种, 分别是伽利略式扩束系统和开普勒式扩束系统。作者就从科林斯公式和平顶高斯光束表达式出发, 研究平顶高斯光束通过这两种扩束系统的传输特性, 并分析和比较了各自的传输特性。

## 1 理论推导

常见的两种扩束系统如图 1 所示, 其中, 入射参考面  $RP_1$  到透镜  $F_1$  的距离和透镜  $F_2$  到输出参考面  $RP_2$  的距离分别为  $l_1$  和  $l_2$ 。  $F_1$  和  $F_2$  的焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ 。  $L$  为两透镜之间的距离, 当无失调量时,  $L = f_1 + f_2$ 。

作者简介: 吴忠(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光传输方面研究。

\* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2011-03-02; 收到修改稿日期: 2011-04-06

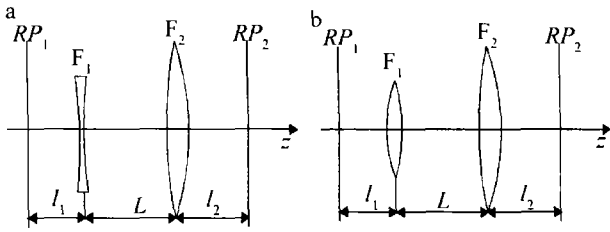


Fig. 1 Two common beam expander systems

a—Galileo beam expander b—Kepler beam expander

扩束系统的放大倍数  $M_1 = -f_2/f_1$ 。

扩束系统的变换元矩阵为<sup>[10]</sup>：

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 & L \\ 0 & 1/M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

化简得：

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & L + l_2/M_1 + M_1 l_1 \\ 0 & 1/M_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

设入射参考面  $RP_1$  处光束的场分布为<sup>[1]</sup>：

$$E_0(x_0, 0) = \exp\left[-\frac{(N+1)x_0^2}{w_0^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[-\frac{(N+1)x_0^2}{w_0^2}\right]^n \quad (3)$$

式中,  $N$  为平顶高斯光束的阶数 ( $N=0, 1, 2, \dots$ ),  $w_0$  为平顶高斯光束的束腰宽度。根据 Collins 衍射积分公式<sup>[11]</sup>：

$$E(x, z) = \sqrt{\frac{i}{\lambda B}} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x_0, 0) \times \exp\left[\frac{-ik}{2B}(Ax_0^2 - 2xx_0 + Dx^2)\right] dx_0 \quad (4)$$

式中,  $x_0, x$  分别为入射场和输出场的横向坐标,  $\lambda$  为波长,  $k=2\pi/\lambda$ 。

将(3)式代入(4)式中, 并利用如下积分公式：

$$\int_0^{\infty} x^{2n} \exp(-\alpha^2 x^2) \cos(\alpha x) dx = (-1)^n \pi^{1/2} 2^{-(2n+1)} \alpha^{-(2n+1)} \times \exp\left(-\frac{y^2}{4\alpha^2}\right) H_{2n}\left(\frac{y}{2\alpha}\right) \quad (5)$$

式中,  $H_{2n}$  为  $2n$  阶厄米多项式。可得到平顶高斯光束通过扩束系统在  $RP_2$  处的光场分布为：

$$E_1(x, z) = \frac{\sqrt{\frac{ik}{2B} \exp\left(\frac{-ikD}{2B} x^2\right)}}{\sqrt{\frac{N+1}{w_0^2} + \frac{ikA}{2B}}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{kx}{B}\right)^2}{4\left(\frac{N+1}{w_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)}\right] \times \sum_{n=0}^N \left(-\frac{1}{4}\right)^n \frac{1}{n!} \left(\frac{N+1}{w_0^2}\right)^n \left(\frac{N+1}{w_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)^{-n} \times$$

$$H_{2n}\left[\frac{\frac{kx}{B}}{2\left(\frac{N+1}{w_0^2} + \frac{ikA}{2B}\right)}\right] \quad (6)$$

在接收面光强分布为：

$$I_1(x, z) = E_1(x, z) \times E_1^*(x, z) \quad (7)$$

## 2 数值计算及分析

数值计算中,  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ ,  $w_0 = 1\text{mm}$ ,  $N = 10$ ,  $l_1 = 20\text{mm}$ 。取放大倍数为 5 倍的扩束系统, 在此对同一个扩束系统分别选取两组不同焦距的扩束系统进行比较, 平顶高斯光束通过两种扩束系统后光强分布分别如图 2 和图 3 所示。下面分别讨论平顶高斯光束通过

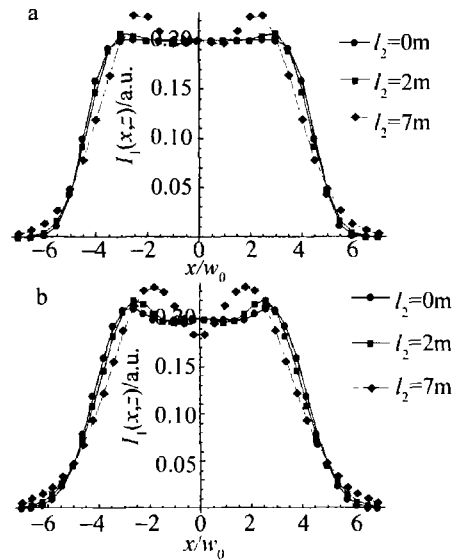


Fig. 2 Intensity distribution of flattened Gaussian beam passing through the Galileo beam expander on viewing screen

a— $f_1 = -40\text{mm}, f_2 = 200\text{mm}$  b— $f_1 = -200\text{mm}, f_2 = 1000\text{mm}$

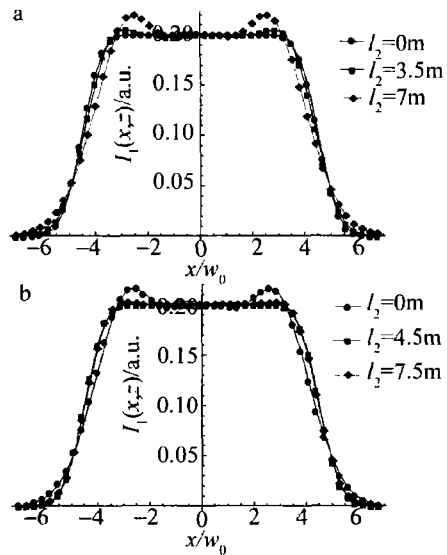


Fig. 3 Intensity distribution of flattened Gaussian beam passing through the Kepler beam expander on viewing screen

a— $f_1 = 40\text{mm}, f_2 = 200\text{mm}$  b— $f_1 = 200\text{mm}, f_2 = 1000\text{mm}$

这两种扩束系统的传输特性和不同焦距的扩束系统的传输特性。

### 2.1 不同焦距的扩束系统传输特性不同

从图1和图2中可以看出,对于不同焦距的扩束系统,平顶高斯光束扩束后光强分布有一定的区别:对于伽利略式扩束系统,在短焦距下,平顶高斯扩束后,输出光束光强在近场内保持了平顶分布,在远场发生畸变如图2a所示;而在长焦距下,输出光束光强在近场内只有中心部分保持平顶,边缘分布有畸变,如图2b所示。

对于开普勒式扩束系统,在短焦距下,平顶高斯光扩束后,在输出面  $l_2 = 0\text{m}$  是平顶分布的光束,如图3a所示;而在长焦距下,在输出面 ( $l_2 = 0\text{m}$ ) 不是平顶分布,而是边缘光强大,中心光强小,随着传输距离的增大,光束边缘光强极大处向外偏移,并且光强极大值也逐渐变小,直至到一定范围内,横截面光强分布又恢复到平顶分布,如图3b所示。在本文中选取焦距  $f_1 = 200\text{mm}$ ,  $f_2 = 1000\text{mm}$ ,在扩束系统后  $4\text{m} \sim 7\text{m}$  范围之内光强分布曲线几乎是重合的,都是保持平顶分布。当超过这个范围之后,光束传输特性就遵循平顶光束在自由空间传输特性。

在光学系统中,具有短焦距的光学系统比长焦距的光学系统有更佳聚集光的能力,并且在扩束系统中,当透镜焦距越大,扩束系统中两透镜之间的距离  $L = f_1 + f_2$  也随之增加,导致平顶光束在两透镜之间自由传输过程中畸变越明显,从而导致平顶高斯扩束后,在近场内很难获得平顶分布的光束,而只有在一定的接收面距离之内才能获得平顶分布的光束;而短焦距下,平顶高斯光束的畸变几乎可以忽略,使得在近场范围之内获得的光束几乎都保持了平顶分布。

### 2.2 不同扩束系统的传输特性不同

从图2和图3可知,平顶高斯光束通过这两种扩束系统后的光强分布是不同的。可从两个方面分析:一方面,根据目前对平顶高斯光束的研究,已知其传输特性和普通的高斯光束传输性质是不同的,平顶高斯光束扩束后并不像普通高斯基模光束那样保持与输入场分布形式一致的光束,而是与所选扩束系统形式及其焦距有非常大的关系,可参考第2.1节中的分析。另一方面,伽利略式扩束系统和开普勒式扩束系统的组成镜片性质不一样,伽利略式扩束系统是由一凹透镜和一凸透镜组成,开普勒式扩束系统是由两个凸透镜组成。当选取同等焦距的扩束系统时,伽利略式扩束系统中两透镜之间的距离,即  $L = f_1 + f_2$  比开普勒式扩束系统中的距离要小,当平顶高斯光束通过这两种扩束系统时,其传输距离就有相应的差别,在接收面得

到的光强分布不同。

### 2.3 通过开普勒式扩束系统后,获得平顶光束范围分析

在很多实际应用中,横截面内光强分布均匀的平顶光束是所希望的理想情况,但是由于平顶光束在传输过程中会发生波形畸变,由图2和图3可见,平顶高斯光束通过扩束系统后也存在这个问题。但是经过研究,发现平顶高斯光束通过开普勒式扩束系统后,不仅是在成像面可获得平顶光束,而且在一定轴向范围之内仍保持平顶分布,如图3所示,此距离范围可以作为实际应用中靶材或者光学元器件放置的理想范围。

当光学系统变换矩阵  $ABCD$  中的  $B = 0$ , 此时系统就是成像系统,在成像面可获得与输入场分布形式一致的光束。在本文中令  $B = 0$  时的  $l_2$  值为成像理想距离记为  $l_0$ ,  $l_0 = M_l(f_1 + f_2 - M_l l_1)$ , 令实际传输距离  $l_2$  与  $l_0$  之差  $|l_2 - l_0| = \Delta l$ 。当  $f_1 = 200\text{mm}$ ,  $f_2 = 1000\text{mm}$ ,  $l_1 = 20\text{mm}$  时,可得到  $l_0 = 5.5\text{m}$ ,  $\Delta l = 1\text{m}$ 。另取一组焦距参量计算:  $f_1 = 100\text{mm}$ ,  $f_2 = 300\text{mm}$ ,  $l_1 = 20\text{mm}$ , 放大倍数为3,此时  $l_0 = 1.02\text{m}$ , 数值计算光强分布如图4所示,从图4可知,在  $0.6\text{m}$  到  $1.5\text{m}$  范围之内光强分布都是平顶分布,此时  $\Delta l = 0.5\text{m}$ 。

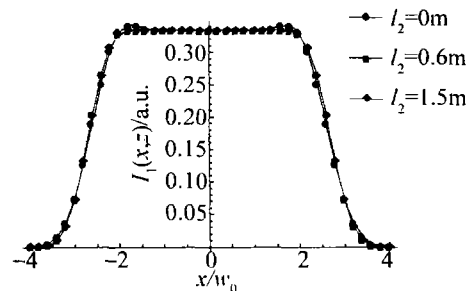


Fig. 4 Intensity distribution of flattened Gaussian beam passing through the Kepler beam expander on viewing screen ( $f_1 = 100\text{mm}$ ,  $f_2 = 300\text{mm}$ )

从以上分析可知,保持平顶分布这段范围与扩束系统所选焦距有非常大联系。经过一系列数值计算,保持平顶轴向范围与所选扩束系统的放大倍数关系大致如图5所示。

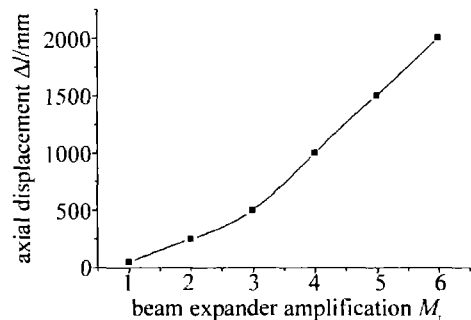


Fig. 5 Relation diagram between the beam expander amplification with the axial displacement  $\Delta l$

这也正解释了为何平顶高斯光束通过同等放大倍数而不同焦距透镜的扩束系统的输出面光强分布不同,在短焦距扩束系统的  $l_0$  比长焦距扩束系统的小,

而  $\Delta l$  一样时,导致平顶光束通过短焦距扩束系统后在输出面就保持了平顶分布,而长焦距扩束系统只有达到一定传输距离时才获得平顶分布光束。

因此,在实际应用过程中,可根据扩束系统焦距参量计算满足  $B=0$  时的理想传输距离  $l_0$ ,再根据选用扩束系统放大倍数其可调节范围选取合适的接收面距离就可以获得均匀分布的光束,这是在实际应用中非常重要的。

### 3 小结

以柯林斯公式为理论工具,推导了平顶高斯光束通过扩束系统的传输解析式,并利用解析式研究了平顶高斯光束通过伽利略式和开普勒式这两种常见扩束系统的传输特性,得到如下结论:平顶高斯光束通过不同的扩束系统的传输特性不同,并且不同焦距的扩束系统,平顶高斯光束扩束后的传输特性也不同。对于短焦距的扩束系统,只有在近场内可得到与输入场分布一致的平顶光束,而远场光强分布发生畸变。而在长焦距下,伽利略式扩束系统在近场内光强分布只有中心部分保持平顶,边缘分布有畸变;对于开普勒式扩束系统,在近场内光束不是平顶分布,而是边缘光强大中心光强小,直至传输到一定范围内,横截面光强分布又恢复到平顶分布,并且这个范围和所选扩束系统的放大倍数相关,放大倍数越大,轴向范围就越大。

### 参考文献

- [1] GORI F. Flattened Gaussian beams [J]. Optics Communication, 1994,107(5):335-341.
- [2] LÜ B D, LUO Sh R. General propagation equation of flattened Gaussian beams[J]. Journal of the Optical Society of America, 2000, A17(11):2001-2004.
- [3] LUO Sh R, LÜ B D. Propagation of flattened-Gaussian beams in uniaxial crystals[J]. Acta Phycica Sinica, 2004, 53(9):2947-2952(in Chinese).
- [4] GE D, CAI Y J, LIN Q. Partially coherent flat-topped beam and its propagation[J]. Applied Optics, 2004, 43(24):4732-4738.
- [5] LUO Sh R, LÜ B D, ZHANG B. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(9):1213-1217(in Chinese).
- [6] WU P, ZHUANG J, LÜ B D. A new method for producing flat-topped beams: Hermite-Gaussian beam combination [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 31(1):48-52(in Chinese).
- [7] JIA X M, XIE X L. Propagation property of Gaussian beams passing through spatial filter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(9):1220-1224(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] HU L, CAI Y J. Analytical formula for a circular flattened Gaussian beam propagating through a misaligned paraxial ABCD optical system [J]. Physics Letters, 2006, A360(2):394-399.
- [10] LÜ B D. Laser optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 40-44(in Chinese).
- [11] COLLINS S A. Lens-system diffraction integral written terms of matrix optics[J]. Journal of the Optical Society of America, 1970, 60(7):1168-1177.

(上接第 860 页)

### 参考文献

- [1] JIN W, ZHANG H T, GONG M L, *et al.* Nonimaging concentrators in optical wireless communications[J]. Laser Technology, 2003, 27(4):311-316(in Chinese).
- [2] WINSTON R, WOOD F S. Nonimaging reflectors as functionals of the desired irradiance [J]. Journal of the Optical Society of America, 1993, A10(9):1902-1908.
- [3] ELMER W B. The optical design of reflectors[M]. New York: Wiley, 1980:27-30.
- [4] SUN C C, LEE T X, MA S H, *et al.* Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region[J]. Optics Letters, 2006, 31(14):2193-2195.
- [5] MORENO I, SUN C C. Modeling the radiation pattern of LEDs[J]. Optics Express, 2008, 16(3):1808-1819.
- [6] RABEL A. Edge-ray method for analysis of radiation transfer among specular reflectors[J]. Applied Optics, 1994, 33(7):1248-1259.
- [7] RABEL A, GORDON J M. Reflector design for illumination with extended sources; the basic solutions [J]. Applied Optics, 1994, 33(25):6021-6021.
- [8] LIU J. Design and study of the LED illumination system[D]. Yan'an University, 2009:35-37(in Chinese).
- [9] RIES H, WINSTON R. Tailored edge-ray reflectors for illumination [J]. Journal of the Optical Society of America, 1994, A11(4):1260-1264.
- [10] ONG P T, GORDON J M. Tailored lighting reflectors to prescribed illuminance distributions: compact partial-involute designs[J]. Applied Optics, 1995, 34(34):7877-7887.
- [11] ONG P T, GORDON J M, RABEL A. Tailored edge-ray designs for illumination with tubular sources [J]. Applied Optics, 1996, 35(22):4361-4371.