

文章编号: 1001-3806(2004)02-0144-03

# 平顶光束通过 $ABCD$ 光学系统的传输

曾庆刚, 张 彬, 楚晓亮

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 利用 LI 近期提出的平顶光束新模型, 推导出平顶光束通过傍轴  $ABCD$  光学系统传输后光场分布的解析公式。以透镜系统为例, 给出了平顶光束聚焦场分布的解析表达式, 对平顶光束的聚焦特性进行了详细分析。

关键词: 平顶光束;  $ABCD$  光学系统; 传输; 聚焦特性

中图分类号: O435 文献标识码: A

## Propagation of flat-topped light beams passing through $ABCD$ optical systems

ZENG Qing-gang, ZHANG Bin, CHU Xiao-liang

(College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** Making use of the new model of flat-topped light beams proposed by LI recently, the analytical expression of the field distribution of flat-topped light beams passing through a paraxial  $ABCD$  optical system has been derived. The lens system is taken as an example, the analytical expression of the focusing field distribution of flat-topped light beams is given. The focusing properties of flat-topped light beams have been analyzed in detail.

**Key words:** flat-topped light beams;  $ABCD$  optical system; propagation; focusing properties

### 引 言

在强激光的许多实际应用中, 例如, 激光材料加工和惯性约束聚变中, 常要求空间均匀分布的平顶光束。最早采用超高斯光束来描述平顶光束<sup>[1, 2]</sup>。然而, 超高斯光束的传输变换研究常常需要作繁冗的数值积分计算。为了克服这一困难, 近年来, 又提出了平顶高斯光束模型<sup>[3]</sup>。虽然, 平顶高斯光束可表示为有限数目拉盖尔-高斯模或厄米-高斯模的叠加<sup>[3, 4]</sup>, 可用熟知的高阶高斯光束变换公式进行研究, 但相应的计算公式还是相对复杂。近期, LI 提出了一类用于描述平顶光束的新模型<sup>[5]</sup>, 利用此模型, 可将平顶光束视为具有不同光斑尺寸的基模高斯光束的相干叠加的结果。因此, 其传输行为可利用熟知的基模高斯光束的传输规律进行研究, 从而带来不少方便。笔者利用 Collins 公式, 推导出该类

平顶光束通过傍轴  $ABCD$  光学系统传输后光场分布的解析计算公式。以透镜系统为例, 给出了相应的聚焦场分布公式, 通过数值计算, 对平顶光束的聚焦特性进行了研究。

### 1 平顶光束通过 $ABCD$ 光学系统的传输公式

与 LI 提出的平顶光束新模型类似, 在直角坐标系中, 平顶光束在  $z = 0$  处的场分布可以表示为:

$$E_1(x_1) = \sum_{m=1}^M \alpha_m \exp\left(-m\beta \frac{x_1^2}{w_0^2}\right) \quad (1)$$

式中,  $M$  为平顶光束的阶数,  $w_0$  为束腰,  $\alpha_m$  和  $\beta$  分别为二项式展开系数和比例系数, 当平顶光束的阶数  $M$  为正整数时, 可分别表示为:

$$\alpha_m = (-1)^{m+1} \frac{M(M-1)\dots(M-m-1)}{m!} \quad (2)$$

$$\beta = \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} \quad (3)$$

图 1 中给出了平顶光束阶数  $M$  取不同正整数时的光场分布。从图 1 可以看出, 随着阶数  $M$  值的增大, 光束的形状越来越接近矩形, 且阶数  $M$  越大, 平顶光束的场分布随着  $M$  的变化越小。当  $M = 1$  时, 平顶光束的场分布简化为熟悉的高斯光束。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60108004)

作者简介: 曾庆刚(1978), 男, 硕士研究生, 现从事激光传输变换方面的研究工作。

E-mail: zengqinggang@tom.com

收稿日期: 2003-04-22; 收到修改稿日期: 2003-06-12

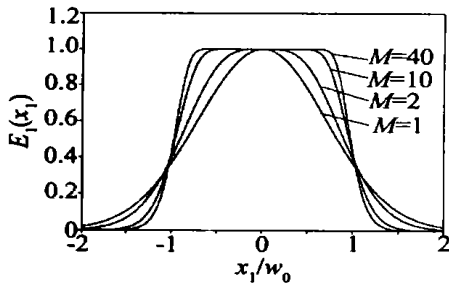


Fig. 1 The profiles of flat-topped beams for the different beam orders  $M$

激光束通过 ABCD 光学系统的传输可由 Collins 公式来描述<sup>[6]</sup>:

$$E_2(x_2) = \sqrt{\frac{i}{\lambda B}} \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1) \times \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ax_1^2 - 2x_1x_2 + Dx_2^2)\right] dx_1 \quad (4)$$

式中,  $x_1, x_2$  分别为入射和出射光场的横向坐标,  $\lambda$  为波长,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数。

将(1)式代入(4)式, 并利用积分公式<sup>[7]</sup>:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2) dx = \sqrt{\pi/a} \quad (5)$$

经过计算可得到平顶光束通过傍轴 ABCD 光学系统的场分布解析表达式:

$$E_2(x_2) = \sqrt{\frac{\pi i}{\lambda B}} \sum_{m=1}^M \alpha_m \sqrt{\frac{2Bw_0^2}{2mB\beta - ikAw_0^2}} \times \exp\left[\frac{k}{2B}\left[iD - \frac{k w_0^2}{2mB\beta - ikAw_0^2}\right] x_2^2\right] \quad (6)$$

分析(6)式可知, 平顶光束通过 ABCD 光学系统传输后, 其光场分布仍可视作数目有限的具有不同光斑尺寸的基模高斯光束相干叠加的结果。

## 2 平顶光束的聚焦特性

假设焦距为  $f$  的透镜置于  $z = 0$  处, 于是, 从透镜前表面到透镜后任意  $z$  处的传输矩阵可写为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta z & f(1 + \Delta z) \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $\Delta z = (z - f)/f$ ,  $\Delta z = 0$  对应于透镜焦面位置。

将(7)式代入(6)式, 经计算可得到平顶光束的聚焦场分布的解析公式为:

$$E_2(x_2) = \sqrt{\pi N i} \sum_{m=1}^M \alpha_m \sqrt{\frac{1}{m\beta(1 + \Delta z) + i\pi\Delta z N}} \times \exp\left\{\frac{\pi N}{1 + \Delta z}\left[i - \frac{\pi N}{m\beta(1 + \Delta z) + i\pi\Delta z N}\right]\left(\frac{x_2}{w_0}\right)^2\right\} \quad (8)$$

$$\text{式中, } N = w_0^2/\lambda \quad (9)$$

为透镜系统的菲涅耳数。

由(8)式进一步可得到聚焦场光强分布为:

$$I(x_2) = E_2(x_2) E_2^*(x_2) \quad (10)$$

利用(8)式和(10)式对平顶光束进行数值计算, 典型例示于图 2~ 图 4。图 2 中给出了不同阶数  $M$  时, 平顶光束的聚焦场焦面处的横向光强分布。图 3 中给出不同  $M$  时平顶光束的聚焦场轴上光强分布。

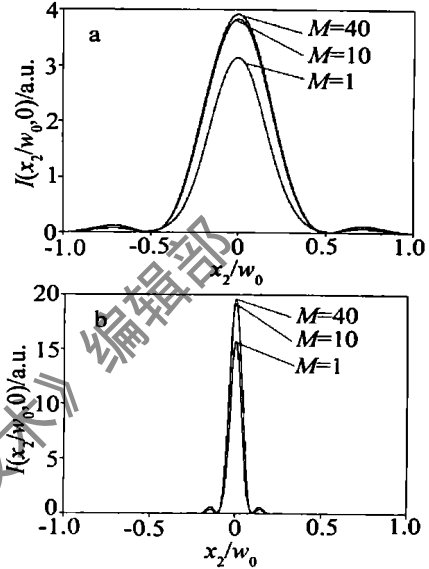


Fig. 2 The transverse intensity distributions  $I(x_2/w_0, 0)$  (arbitrary units) at the geometrical focal plane of the focused flat-topped beams a— $N = 1.0$  b— $N = 5.0$

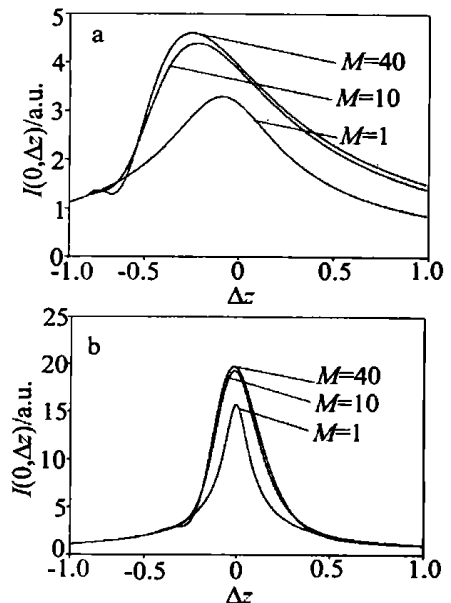


Fig. 3 The axial intensity distributions  $I(0, \Delta z)$  (arbitrary units) of flat-topped beams passing through a focusing lens a— $N = 1.0$  b— $N = 5.0$

图 4 中给出了在不同  $M$  情况下, 焦移量随菲涅耳数  $N$  的变化曲线。为了比较方便, 图 2~ 图 4 中还给出了直接利用数值积分计算方法得到的结果, 在图

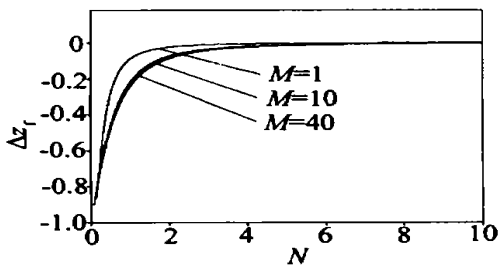


Fig.4 The focal shifts as a function of  $N$  of focused flat-topped beams for different beam orders  $M$

中用虚线表示。由图2~图4可以看出,图中的实线与虚线几乎完全重合,从而说明了笔者给出的传输公式的正确性。

从图2可以看出,当菲涅耳数  $N$  不变时,随着平顶光束阶数  $M$  的减小,焦面的横向光强分布变平滑,旁瓣光强变小,并且轴上光强最大值变小。对于相同的阶数  $M$ ,随着菲涅耳数  $N$  的减小,焦斑尺寸变大,轴上光强最大值变小。分析图3可知,一般来说,轴上光强极大值位置与透镜焦面并不重合,而是更靠近透镜出射面,即文献中所谓的“焦移”。轴上光强分布以焦面  $\Delta z = 0$  和焦移面  $\Delta z_f$  为非对称分布。进一步分析图4可知,焦移量  $|\Delta z_f| = |(z_{\max} - f)/f|$  随着平顶光束阶数  $M$  的增大和菲涅耳数  $N$  的减小而增大。然而,随着  $M$  的进一步增大,阶数  $M$  对焦移量的影响将明显减小。

### 3 结束语

利用Collins公式,推导出平顶光束通过傍轴

$ABCD$  光学系统传输后光场分布的解析公式。以透镜系统作为  $ABCD$  光学系统的典型例,给出了相应的聚焦场分布公式。通过数值计算,对平顶光束的聚焦特性进行了详细研究。研究表明,这类新型平顶光束的聚焦特性与阶数  $M$  以及系统的菲涅耳数  $N$  等有关,有关结论与平顶高斯光束和超高斯光束的有关结论是一致的。这是由于笔者所用的平顶光束新模型、平顶高斯光束以及超高斯光束均是针对具有平顶分布光束的不同描述模型。笔者所用模型的优点在于该模型能将平顶光束的场分布表示为有限数目的具有不同光斑尺寸的基模高斯光束相干叠加的结果,从而可得到传输公式的解析表达式,使问题简化。值得指出的是,笔者中所用方法和传输公式可推广用于研究该新型平顶光束通过更为复杂的光学系统的传输变换。

### 参考文献

- [1] MAGNI V, VALENTINI G, de SILVESTRI S. *Opt & Quant Electron*, 1991, 23(9~12): 1105~1134.
- [2] PARÉNF A, MORIN M, LAVIGNE P. *Opt & Quant Electron*, 1992, 24(9~12): 1071~1079.
- [3] GORI F. *Opt Commun*, 1994, 107(5/6): 335~341.
- [4] AMARANDE S A. *Opt Commun*, 1996, 129(5/6): 311~317.
- [5] LI Y. *Opt Commun*, 2002, 206(3/6): 225~234.
- [6] 吕百达. 激光光学-激光束的传输变换和质量控制. 2版, 成都: 四川大学出版社, 1992: 53~55.
- [7] ERDELYI A, MAGNUS W, OBERHETTINGER F *et al*. *Tables of integral transforms*. New York: McGraw-Hill, 1954: 15.

· 简 讯 ·

### 敬告作者

根据“美国工程信息公司(EI)数据库”的要求,请作者在投稿时注意:

1. 为了方便联系,请提供确切的通信地址、单位名称、部门、电话、E-mail 等信息。

2. 应加强对摘要的撰写! 摘要是文章的真正概要,应该全面、简要;减少背景类的知识介绍;不要用修饰语;不要有实验数据;不要出现方程、图、表、参考文献、特殊字符等。作者应组织好文章的主要概念并清楚、简要地表达出来,才能实现摘要应有的作用,传达重要的可检索信息。

一般的研究性论文其摘要必须包括被报道的研究项目的目的、使用方法、结果和结论,不应太短;也不要重复标题中已给出的内容;不要使用多余的词语,如“据报道……”,或“大量的研究表明”;摘要中不要写作者将来的打算。

对于文献综述,只需简要说明文章的内容,而不报道文章中使用的方法及得出的结果。

对于发展现状综述,除了陈述文章的主题范围外,还要给出文章得出的结论。

3. 英文摘要相当重要! 最好是中英文一致。原则是平铺直叙。

4. 英文版稿件中应有中文题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、中图分类号。

投稿时请注明“投稿”字样! 谢谢合作!