

文章编号: 1001-3806(2003)02-0147-03

用于三维像散厄米-高斯光束对称化的新型光学系统*

张廷蓉^{1,2} 吕百达¹

(¹四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064) (²四川师范大学物理系, 成都, 610066)

摘要: 基于矩阵合成和分解理论, 提出了可将三维像散厄米-高斯光束变换为对称拉盖尔-高斯光束的两种新型光学系统, 并以数值计算例加以说明。

关键词: 矩阵合成与分解; 三维像散厄米-高斯光束; 对称化

中图分类号: O435 文献标识码: A

Novel types of optical system for symmetrizing three-dimensional astigmatic Hermite-Gaussian beams

Zhang Tingrong^{1,2}, Lü Baida¹

(¹Institute of Laser Physical and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(²Department of Physics, Sichuan Normal University, Chengdu, 610066)

Abstract: Based on the theory of matrix synthesis and decomposition, two novel types of optical system for transforming three-dimensional astigmatic Hermite-Gaussian beams into symmetrical Laguerre-Gaussian beams are proposed and illustrated with numerical examples.

Key words: matrix synthesis and decomposition; three-dimensional astigmatic Hermite-Gaussian beam; symmetrization

引 言

在激光的实际应用中, 常常要求将像散光束变为对称的光束。Tamm 和 Weiss^[1] 提出并由 Allen 等人^[2] 推广的由两个柱透镜组成的模转换器可用于将像散光束变换为扭曲无像散光束^[3]。Laabs, Gao 和 Weber 的研究表明^[3] 在模转换器基础上增加 2 个球透镜可实现光束从 1 个腰平面到另 1 个腰平面的变换, 且该系统的变换作用与 Eppich 等人^[4] 提出的三柱透镜对称化光学系统等效。最后, Laabs 等人使用厚透镜简化模转换系统^[5], 使之进一步集成化为 1 个整体。实验表明^[2, 3, 6], 模转换器可用于将三维像散厄米-高斯光束变换为对称的拉盖尔-高斯光束, 并且在自由空间传输中, 保持旋转对称性不变。文中采用矩阵光学中光学系统的合成与分散方法, 提出了两种新型对称化光学系统。其一由 2 个

柱面薄透镜和 1 个球面透镜组成, 另一系统由 2 个平凸柱面厚透镜和 1 个球面薄透镜组成。

1 光束变换矩阵

由矩阵光学理论^[7], 任意 1 个非对称光学系统对光束的变换可用 1 个 4×4 的变换矩阵来描述。

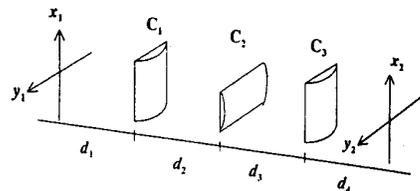


Fig. 1 The system of three cylindrical lenses

Eppich 等人的研究表明^[4], 一个适当放置的三柱透镜组成的光学系统可用于实现像散高斯光束的对称化, 其构型如图 1 所示。图中, 柱透镜 C_1, C_2, C_3 的焦距分别为 $f/2, f$ 及 $f/2$, 且 f 与像散高斯光束在 x, y 方向瑞利长度相等, 即 $f = z_{Rx} = z_{Ry}$ 。各柱透镜之间的距离为 $f/2$, 中间柱透镜与两侧柱透镜的轴垂直。使用矩阵光学方法可以求出位于两个参考 $RP_1(x_1y_1$ 平面)、 $RP_2(x_2y_2$ 平面) 间的系统的变换矩阵为:

* 华中科技大学激光技术国家重点实验室及国家高技术激光技术主题资助项目。

作者简介: 张廷蓉, 女, 1962 年 5 月出生。副教授。现从事激光与现代光学的科研及教学工作。

收稿日期: 2002-03-01; 收到修改稿日期: 2002-04-23

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & f & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1/f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

容易证明,文献[3]、[5]中给出的其它对称化系统的变换矩阵也和(1)式相同。

因此,将上述 M 矩阵分散为与实际光学元件对应的基本矩阵的乘积,是寻求新的对称化光学系统的一种方法。

2 两类新型对称化光学系统

Casperson^[8]首先研究了 2×2 矩阵所描述的对称光学系统的合成与分解问题,指出任何对称光学系统可以用自由空间和球面透镜按一定规律进行合成。Arsenault^[9]采用 4×4 矩阵的 UAU 分解法将两个任意旋转柱透镜组成的非对称光学系统等效为一个双轴透镜。事实上,一般非对称光学系统都可由柱面透镜、球面透镜以及自由空间组合而成。

(1)式表示的 M 矩阵可以分解为:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & d_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f_{y_2} & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & d_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/f & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f_{y_1} & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & d_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中,第1,3,5及第7个矩阵分别表示长度为 d_4, d_3, d_2, d_1 的自由空间的变换矩阵,第2和第6个矩阵分别表示光焦度在 y 方向焦距分别为 f_{y_2}, f_{y_1} 的柱面薄透镜的变换矩阵,第4个矩阵表示一个焦距为 f 的球面透镜的变换矩阵。

将(2)式中的7个 4×4 矩阵作乘积运算,可知:参考面 RP_1 (输入光束腰所在平面)到第1个柱透镜之距与参考面 RP_2 (输出光束腰所在平面)到第2个

柱透镜之距相等: $d_1 = d_4 = (\sqrt{2} - 1)f$ (3)

两柱透镜与球面透镜之距相等:

$$d_2 = d_3 = (2 - \sqrt{2})f \quad (4)$$

并且,两柱透镜焦距相等:

$$f_{y_1} = f_{y_2} = (2 - \sqrt{2})f \quad (5)$$

由此可见,按上述分解,可得到一个新的对称化光学系统,该系统由两个焦距均为 $(2 - \sqrt{2})f$ 的柱面薄透镜以及位于其中焦距为 f 的球面薄透镜构成。如图2所示,其总的变换矩阵(从 RP_1 至 RP_2)为(1)式,因此可用于像散光束的对称化。

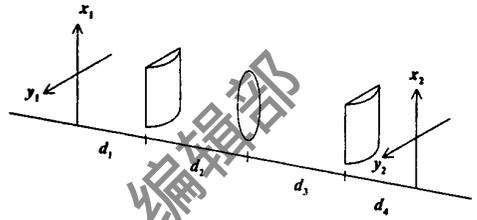


Fig. 2 The system of two cylindrical lenses and one spherical lens

进一步的计算表明,(2)式并非 M 矩阵分解的唯一形式, M 矩阵还可按其它方式分解。由文献[9],柱面厚透镜的变换矩阵为:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & t/n & 0 \\ 0 & 1 + t(1-n)/nr_1 & 0 & t/n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & (1-n) \left\{ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{t(1-n)}{nr_1 r_2} \right\} & 0 & 1 + \frac{t(1-n)}{nr_2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, r_1, r_2 为柱面透镜的曲率半径, n 为折射率, t 为柱透镜的厚度。

以自由空间、柱面厚透镜及球面透镜的变换矩阵为基本矩阵,将(1)式所表示的 M 矩阵进行分解,得到:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & t/n & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t/n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{1-n}{r} & 0 & 1 + \frac{t(1-n)}{nr} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/f & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{t}{n} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{t(1-n)}{nr} & 0 & \frac{t}{n} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{1-n}{r} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中,第1,5两个矩阵代表长度为 d 的自由空间,第3个矩阵代表焦距为 f 的球面薄透镜,第2,第4个矩阵分别代表平面朝向球面薄透镜的两个折射率为 n 、厚度为 t 、曲率半径为 r 的平凸柱面厚透镜。将5个矩阵相乘得知:参考面 RP_1 (输入光束腰所在平面)到第1个平凸柱面厚透镜之距与参考面 RP_2 (输出光束腰所在平面)到第2个平凸柱面厚透镜之距均为:

$$d = f/(\sqrt{2} + 1) \quad (8)$$

两柱透镜的厚度均为 $t = \sqrt{2}nf/(\sqrt{2} + 1)$ (9)

曲率半径为: $r = \sqrt{2}(n-1)f/(\sqrt{2} + 1)$ (10)

由上述分解可知,若用柱面厚透镜替换柱面薄透镜,便得到一个新的对称化光学系统。该系统由两个平凸柱面厚透镜及一个球透镜构成,如图3所示,厚透镜的参数由(9)式,(10)两式确定,系统总的变换矩阵(从 RP_1 至 RP_2)仍为(1)式。

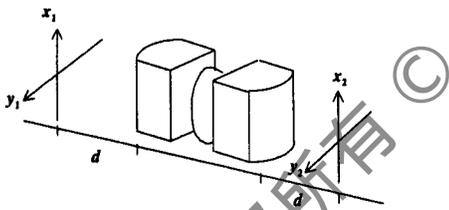


Fig. 3 The system of two thick cylindrical lenses and one spherical lens

3 设计例

设输入光束的瑞利长度 $z_{Rx} = z_{Ry} = 30\text{cm}$,由(3)式~(5)式,可以得到图2所示对称化光学系统的计算设计例为:参考面 RP_1 与第1个柱透镜、参考面 RP_2 与第2个柱透镜的距离相等且 $d_1 = d_4$

(上接第144页)

和扫描间隔有关;(2)扫描激光能量的分布主要与扫描间隔与光束直径的比值有关,当这个比值增大时,能量分布的不均匀性将增加,所以,在确定扫描参数时,必须按照光束直径的大小来确定;(3)当扫描线的数量超过一定数量以后,扫描激光能量的大小与

$= 12.426\text{cm}$,两柱透镜与球面透镜的距离相等 $d_2 = d_3 = 17.574\text{cm}$,两柱透镜焦距 $f_{y_1} = f_{y_2} = 17.574\text{cm}$ 。

由(8)式~(10)式,图3所示系统的有关计算设计参数为:参考面 RP_1 到第1个平凸柱面厚透镜之距与参考面 RP_2 到第2个平凸柱面厚透镜之距均为 $d = 12.426\text{cm}$,两柱透镜的厚度、曲率半径分别为 $t = 26.36\text{cm}$, $r = 8.786\text{cm}$ 。

4 结论

在系统总的变换矩阵保持不变的条件下,使用矩阵光学方法,可设计出多种光学系统以实现像散厄米-高斯光束的对称化。系统既可使用柱透镜(非对称光学元件)和自由空间构成,也可以使用球透镜(对称光学元件)、柱透镜和自由空间构成。文中将变换矩阵按一定规律进行分解后,提出了两个与文献[3~5]中不同的新型对称化光学系统:(1)柱面薄透镜1—球面薄透镜—柱面薄透镜2(分离系统);(2)柱面厚透镜1—球面薄透镜—柱面厚透镜2(集成化系统)。文中有关结果不仅对非对称光学系统的 4×4 矩阵合成与分解有理论价值,而且对于对称化光学系统的设计有实际应用意义。

参考文献

- [1] Tamm C, Weiss C O, J O S A, 1990, B7: 1034~ 1038.
- [2] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C *et al.* Phys Rev, 1992, A45: 8185~ 8189.
- [3] Laabs H, Gao C, Weber H. J Mod Opt, 1999, 46: 709~ 719.
- [4] Eppich B, Fliberg A T, Gao C *et al.* Proc SPIE, 1996, 2870: 260~ 267.
- [5] Laabs H, Gao C, Weber H *et al.* Proc SPIE, 1999, 3611: 258~ 268.
- [6] Beijersbergen M W, Allen L, Van der Veen H E L O *et al.* Opt Commun, 1993, 96: 123~ 132.
- [7] 吕百达. 激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制. 2版, 成都: 四川大学出版社, 1992.
- [8] Casperson L W. Appl Opt, 1983, 20: 2243~ 2249.
- [9] Macukow B, Arsenaault H H. J Opt, 1984, 15: 141~ 151.

扫描线的数量是几乎无关。

参考文献

- [1] Jacobs F P. Rapid prototyping & manufacturing a fundam ental of sterolithography. CAD/CAM Publishing Co. Dearborn MI (USA), 1992: 12~ 25.
- [2] 王家金. 激光加工技术. 1版, 北京: 中国计量出版社, 1992.
- [3] 李湘生. 激光选区烧结的若干关键技术研究. 华中科技大学博士学位论文, 2001: 90.