

一种新型光学模式转换器*

董洪舟 石顺祥 李家立

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘 要 提出了一种梯度折射率分布介质为基质的单体光学模式转换器, 可以将两正交截面内瑞利长度相同、光腰重合的厄米-高斯光束转换为拉盖尔-高斯光束. 这种转换器具有一体化且只有两个反射面的特点, 因此易于调整、光能反射损耗小; 对于两正交截面内瑞利长度不同、光腰不重合的厄米-高斯光束, 提出了一种可调节其瑞利长度和光腰位置的光腰调节器, 将光腰调节器与单体光学模式转换器组合使用, 也可以将这种厄米-高斯光束转换为拉盖尔-高斯光束.

关键词 矩阵光学; 光学模式转换; 光腰调节器; 梯度折射率

中图分类号 TN241 **文献标识码** A

0 引言

厄米-高斯(HG)光束和拉盖尔-高斯(LG)光束分别是波动方程在直角坐标系和柱坐标系中的本征解, HG 光束对应着具有矩形孔径限制的振荡模式, 而 LG 光束对应着具有轴对称的振荡模式.

在一些实际应用中, 需要实现 HG 模式和 LG 模式间的转换. 基于矩阵光学原理, 本文针对二正交截面内瑞利长度相同、光腰重合的 HG 光束, 提出了一种能实现 HG 模式和 LG 模式间转换的新型单体光学模式转换器. 对于二正交截面内瑞利长度不同、光腰不重合的 HG 光束, 又提出了一种可调节正交截面内瑞利长度和光腰位置的光腰调节器, 当 HG 光束通过这种光腰调节器和单体光学模式转换器的组合系统后, 就可以实现模式转换.

1 HG 和 LG 模式的转换原理

1.1 模式转换原理

文献[1]根据 HG 和 LG 多项式间的关系[2,3]提出, 一个 LG 模式可以被分解为一组 HG 模式的组合

$$u_{mn}^{LG}(x, y, z) = \sum_{k=0}^N i^k b(m, n, k) u_{N-k, k}^{HG}(x, y, z) \quad (1)$$

式中, $N = m + n$, $b(m, n, k)$ 是关于 n, m, k 的多项式. 在式(1)中, 相邻的组合 HG 模式间存在 $\pi/2$ 的相位差; 一个主轴作 45° 旋转的 HG 模式, 也可以被分解为相同的一组 HG 模式的组合

$$u_{mn}^{HG}\left(\frac{x+y}{\sqrt{2}}, \frac{x-y}{\sqrt{2}}, z\right) = \sum_{k=0}^N b(m, n, k) u_{N-k, k}^{HG}(x, y, z) \quad (2)$$

但是各组合 HG 模式间是同相位的. 于是, 如果利

用像散光学系统引入一个像散区域, 将旋转 45° 后的 HG 光束在该区域内进行相位调整, 使得式(2)中各相邻因子间也存在 $\pi/2$ 的相位差, 就可以实现 HG 模式光束到同阶 LG 模式光束的转换.

1.2 模式转换的矩阵描述

基于光学的二阶矩原理, 文献[4]提出了一个由三个柱透镜组成的光学系统, 该系统能够实现 HG 光束光腰平面到 LG 光束光腰平面间的转换, 其变换特性可以用下面的矩阵描述

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & z_R & z_R \\ 1 & -1 & z_R & z_R \\ -1/z_R & -1/z_R & -1 & 1 \\ -1/z_R & -1/z_R & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 z_R 为 HG 光束的瑞利长度, 且二正交截面内的瑞利长度相等、光腰面重合. 进一步, 矩阵 B 可以表示为 $B = P^{-1}MP$, 其中

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & z_R & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1/z_R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

表示三柱透镜系统的变换特性

$$P = \begin{bmatrix} -\sin(p/4) \cos(p/4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(p/4) \sin(p/4) \\ 0 & 0 & -\sin(p/4) \cos(p/4) \end{bmatrix} \quad (5)$$

P^{-1} 是 P 的逆矩阵, P^{-1} 和 P 作用于 M 表示三柱透镜光学系统的横截面主轴相对 HG 光束主轴作 45° 旋转操作.

文献[4]提出的模式转换光学系统是由分离的三个柱透镜组成的, 存在六个反射面, 这将造成很大的光能量反射损耗, 且不易调整各元件间相对位置, 因此在实际应用中受到限制. 本文提出了一种以梯度折射率分布介质为基质的单体光学模式转换器,

* 国家自然科学基金(No. 60277006)资助项目
Tel: 029-88207311 Email: dhz2001@tom.com
收稿日期: 2005-03-23

结构简单, 容易调整, 反射损耗小, 利于实际的工程应用.

2 新型模式转换系统结构

2.1 单体光学模式转换器

根据矩阵光学原理, 同一个变换矩阵可以描述不同的光学系统. 本文提出了一种如图 1 的新型单体光学模式转换器, 它是由两端面为柱面的圆柱形体构成, 其介质径向折射率为抛物线型分布, $n(r) = n_0(1 - \beta r^2/2)$, 其中 n_0 为轴上的折射率, β 为折射率分布常数, r 为径向长度. 图 1 中, H_1 面表示 HG 光束的光腰面, H_2 面为转换后的 LG 光束的光腰面. H_1 面到 H_2 面的光束传输特性可以用变换矩阵 M' 表示, 且 M' 为

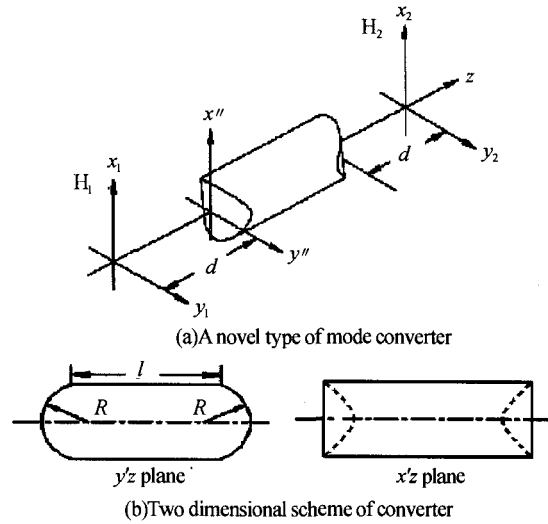


图 1 单体光学模式转换器
Fig. 1 Monomer optical mode converter

$$M' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_0 & 0 \\ 0 & \frac{1-n_0}{R_2} & 0 & n_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \sqrt{\beta}l & 0 & \frac{\sin \sqrt{\beta}l}{\sqrt{\beta}} & 0 \\ 0 & \cos \sqrt{\beta}l & 0 & \frac{\sin \sqrt{\beta}l}{\sqrt{\beta}} \\ -\sqrt{\beta} \sin \sqrt{\beta}l & 0 & \cos \sqrt{\beta}l & 0 \\ 0 & -\sqrt{\beta} \sin \sqrt{\beta}l & 0 & \cos \sqrt{\beta}l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_0} & 0 \\ 0 & \frac{n_0-1}{n_0 R_1} & 0 & \frac{1}{n_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, 第 1 和第 5 个矩阵表示长度为 d 的自由空间的变换矩阵; 第 2 和第 4 个矩阵表示转换器两个柱端面的变换矩阵, 其中 $R_1 < 0, R_2 > 0$, 并且考虑到近轴近似下 $n(r)$ 与中心折射率 n_0 相差很小, 可近似取 $n(r) = n_0$; 第 3 个矩阵是长度为 l 、折射率分布常数为 β 的圆柱体的变换矩阵^[5]. 将上述 5 个矩阵相乘可知, 当式中各参数满足下面条件时, $M = M'$.

$$d = \frac{z_R}{(\sqrt{2}+1)} \quad (7)$$

$$|R_1| = R_2 = R = \frac{\sqrt{2}z_R(n_0-1)}{(\sqrt{2}+1)} \quad (8)$$

$$\beta = \left[\frac{1}{n_0 z_R} \times \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}+1})^2}} \right]^2 \quad (9)$$

$$l = \frac{\arccos(1 - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}+1})}{\sqrt{\beta}} \quad (10)$$

也即是说, 在满足上述参数条件时, 图 1 的单体光学器件对于 HG 光束的变换作用与文献[4]所提出的由三个分离柱透镜组成的光学系统是等效的. 如果图 1 中 (x_1, y_1) 方向为 HG 光束的主轴方向, 实用中需将模式转换器的主轴 (x'', y'') 相对于 (x_1, y_1) 作 45° 的旋转, 旋转后, H_1 面到 H_2 面的变换矩阵即为式(3)所示的 B .

2.2 光腰调节器

当 HG 光束在两个正交截面内的瑞利长度不同、且光腰不重合时, 为了实现模式转换, 还必须对输入 HG 光束进行调节, 使其在 H_1 面上两正交截面内的瑞利长度相同、光腰重合.

例如, 某半导体激光器^[6]输出为 $TEM_{m,0}$ 模式的 HG 光束, 在垂直于结平面方向上是基横模, 其光腰位于出射端面上; 在平行于结平面方向上为高阶模, 光腰在芯内距出射端面一定距离 L 处, 且两个方向上光束的瑞利长度不相同. 若 H_0 面是半导

体激光器出射端面, H_1 面是调节后的输出面, 可以通过在 H_0 面和 H_1 面之间放置两个正交的、间距为 T 、焦距分别为 f_1 和 f_2 的柱透镜, 使得垂直、平行于结平面方向上的光腰均在 H_1 面上, 且瑞利长度相等. 从 H_0 面到 H_1 面的光束变换矩阵可以用 $U=DFG$ 描述, 其中

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 - T/f_1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ -1/f_1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f_2 & 0 & 1 - T/f_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

矩阵中 s_1 和 s_2 分别是柱透镜 1 到 H_0 面的距离和柱透镜 2 到 H_1 面的距离, D 和 G 分别是长度为 s_1 和 s_2 的自由空间的 4×4 扩展矩阵, F 为正交柱透镜系统的变换矩阵. f_1 、 f_2 和 T , 以及 s_1 和 s_2 可根据高斯光束的成像公式及光腰距离 L 计算确定

$$\begin{cases} w_{02} = w_{01} \frac{f}{\sqrt{z_{R1}^2 + (z_{01} - f)^2}} \\ \frac{1}{z_{02}} = \frac{1}{f} + \frac{z_{R1}^2}{z_{01}(z_{01}^2 + z_{R1}^2 - z_{01}f)} - \frac{1}{z_{01}} \end{cases} \quad (13)$$

式中 w_{01} 、 z_{01} 和 z_{R1} 分别为垂直、平行于结平面上成像变换前光束的光腰半径、光腰位置及瑞利长度, w_{02} 和 z_{02} 对应于成像变换后光束的光腰半径和位置, f 可分别为 f_1 、 f_2 .

为了减小光学系统的反射损耗和便于调整, 本文提出了一种替代上述正交柱透镜系统的光腰调节器, 如图 2. 这种光腰调节器具有两个正交的柱端

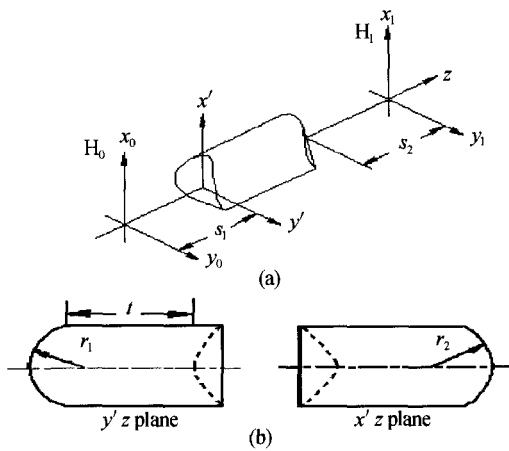


图 2 (a) 两端面为正交柱面的光腰调节器, (b) 光腰调节器二维示意图
Fig. 2 (a) Waist adjuster with two vertical cylinder end faces, (b) Two dimensional scheme of waist adjuster 面, 其曲率半径及长度分别为

$$r_1 = (1 - n) f_1 \quad (14)$$

$$r_2 = (n - 1) f_2 \quad (15)$$

$$t = nT \quad (16)$$

它的变换矩阵也是 F , 也可以使输出的 HG 光束在两个正交面上的光腰重合于 H_1 面, 且瑞利长度相同.

3 应用示例

实际应用中, 若 HG 光束两正交截面内瑞利长度不同、光腰不重合, 整个转换系统如图 3, 模式转换器主轴 (x'' , y'') 应相对于入射 HG 光束主轴 (x_0 , y_0) 旋转 45° . 如果输入的 HG 光束两正交截面内瑞利长度相同且光腰面重合, 图 3 所示的转换系统的光腰调节器可以省去. 下面以半导体激光作光源为例, 说明第一种情况下图 3 中单体模式转换器和光腰调节器的设计. 假设光源输出为 $TEM_{5,0}$ 模式的 HG 光束, 二正交截面内光腰间距为 $6 \mu\text{m}$, 光腰半径分别为 $0.4 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$, 波长 λ 为 $0.8 \mu\text{m}$. 若取 $s_1 = 200 \mu\text{m}$ (等效于设定 w_{02} , z_{02}), 则由式 (13) ~ (15) 可计算得到光腰调节器的尺寸为: $r_1 = -166 \mu\text{m}$, $r_2 = 1571 \mu\text{m}$, $t = 4682 \mu\text{m}$, $s_2 = 5460 \mu\text{m}$, 计算中折射率取为 $n = 1.85$. 该光源输出光束通过光腰调节器后, 其二正交截面内光腰重合于 H_1 面, 瑞利长度为 $z_R = 1047 \mu\text{m}$.

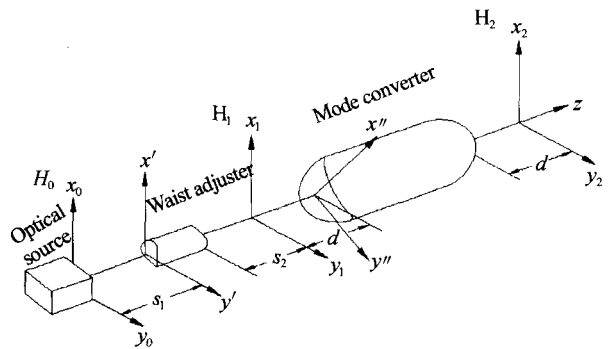


图 3 模式转换系统应用
Fig. 3 Schematic diagram of mode converter system application

设 $n_0 = 1.63$, 进一步根据式 (7) ~ (10) 可计算得到单体光学模式转换器的尺寸为: $d = 434 \mu\text{m}$, $R = 386 \mu\text{m}$, $l = 1.78 \text{ mm}$, $\beta = 0.41 \text{ mm}^{-2}$. 并且根据 H_1 面上光束瑞利长度 z_R 与 H_2 面上输出光腰半径 w 的关系^[7]

$$w = \sqrt{\frac{4\lambda(m+n+1)z_R}{p}} \quad (17)$$

可以计算出 H_2 面上 LG 光束的光腰半径为 $w = 80 \mu\text{m}$.

最后应当指出, 根据式 (7), 腰平面 H_1 到转换器的距离 d 恒小于光束的瑞利长度, 因此入射到转换器上的光束可以近似看作是平行光入射, 不受转换器数值孔径的限制.

4 结论

本文提出了一种新型的 HG 光束到 LG 光束的单体模式转换器,因其为单一元件,易于调整,只有两个反射面,使光能反射损耗大大降低. 又针对二正交截面内瑞利长度不同、且光腰面不重合的 HG 光束,提出了一种单体光腰调节器,利用该光腰调节器和单体光学模式转换器组合系统,可以实现 HG 光束与同阶 LG 光束的转换.

参考文献

- 1 Beijersbergen M W, Allen L. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum. *Optics Communications*, 1993, **96**(3): 123~132
- 2 Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes. *Phys Rev*, 1990, **A45**(11): 8185
- 3 Abramochki E, Volosnikov V. Beam transformations and nontransformed beams. *Optics Comm*, 1991, **83**(2): 123~135
- 4 Eppich B, Fiberg A T. Twist of coherent fields and beam quality. *SPIE*, 1996, **2870**: 260~267
- 5 卢亚雄, 杨亚培, 陈淑芬. 激光束传输与变换技术. 成都: 电子科技大学出版社, 1999. 188~189
Lu Y X, Yang Y P, Chen S F. *Laser Transmission and Transform Technology*. Chendu: Publishing House of Electronic Science and Technology University, 1999. 188~189
- 6 郭长志. 半导体激光模式理论. 北京: 人民邮电出版社, 1989. 247~250
Guo C Z. *Mode Theory of Semiconductor Lasers*. Beijing: Posts and Telecom Press, 1989. 247~250
- 7 吴平, 吕百达. 三维厄米-高斯光束经对称化系统的传输特性. *激光技术*, 2003, **27**(2): 126~129
Wu P, Lü B D. *Laser Technology*, 2003, **27**(2): 126~129

A Novel Optical Mode Converter

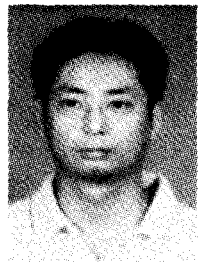
Dong Hongzhou, Shi Shunxiang, Li Jiali

School of Technical Physics, Xidian Univ., Xi'an 710071

Received date: 2005-03-23

Abstract A novel unitary optical mode converter was proposed, which can transform Hermite-Gaussian beams with the same Rayleigh range and waist position into Laguerre-Gaussian beams. Being unitary and having only two reflecting faces, the mode converter was easily adjusted and had very small reflecting loss. In view of the Hermite-Gaussian beams with different Rayleigh range and waist position, a waist adjuster was proposed. Such Hermite-Gaussian beams can also be transformed into Laguerre-Gaussian beams by combining the adjuster and the converter.

Keywords Matrix optics; Optical mode converter; Waist adjuster; Gradient index



Dong Hongzhou was born in 1978. He received his B. S. degree and M. S. degree from Changchun University of Science and Technology in 2000 and 2003 respectively. Now, he is a Ph. D candidate in School of Technical Physics, Xidian University. His current research interests are transmission and transform of laser beams.