

# 实现圆环光束的光学系统的研究

刘国彦<sup>1</sup>, 文大化<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 圆环光束与普通光束相比有着独特的性质, 它的产生和应用是光学研究中的一个重要课题, 本文主要研究内容是利用几何光学法实现圆环光束, 通过比较几种方案, 提出一种实现圆环光束的新方法。

关键词: 圆环光束; 几何光学法; 轴棱锥系统

中图分类号: TN241

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2011)02-0048-03

## Study on the Optical System of Achieving Annular Beam

LIU Guoyan<sup>1</sup>, WEN Dahua<sup>2</sup>

(1. Changchun University of Science and Technology, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun 130022;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033)

Abstract: Annular beam has particular properties compared to normal beam. The generations and applications of annular beams are one of the most important research subjects in optics. The research upon this paper is to use geometrical optics approach to achieve annular beam. Compared with several projects, we propose a new method to achieve annular beam.

Key words: annular beam; geometrical optics; axicon system

圆环光束(Annular beam), 是一种在传播方向上中心光强为零的环状光束。近年来, 有关圆环光束的产生和应用已经成为一个重要的课题, 在激光加工、微观粒子的准确、非接触控制等领域有着广泛的应用。目前为止, 已获得多种产生圆环光束的方法, 如横模选择法、几何光学法、光学全息法、计算机全息法、模式转换法等。本文采用几何光学法实现圆环激光束, 利用光学设计软件构建光路, 通过分析几种不同的设计方案, 比较优缺点, 提出一种实现圆环光束的新方法。

### 1 设计思路

几何光学法产生圆环光束的关键光学元件为轴棱锥, 轴棱锥为回转体形状, 一侧是平面, 另一面是圆锥面, 可以将它设计成折射式或者反射式。

图1为经过准直后的激光光束通过轴棱锥的几何光线示意图。半径为r的平行光束通过轴棱锥以相同角度偏离光轴, 所有折射光线与z轴相交, 焦

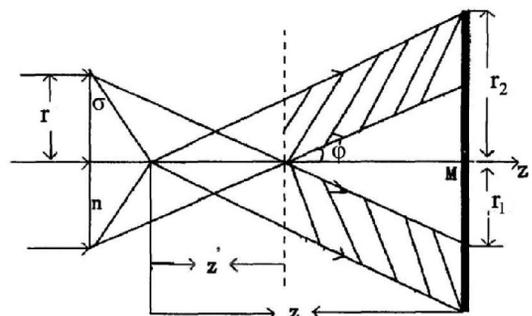


图1 轴棱锥产生圆环光束原理图

Fig.1 Principle diagrams of the generation of annular beam by using Axicon

线长度  $z'$  为:

$$z' = r[\cot(\varphi) - \tan(\sigma)] \quad (1)$$

式中  $\varphi$  是通过轴棱锥后光线与  $z$  轴的夹角,  $\sigma$  为锥角。

当  $z < z'$  时, 得到一实心光束, 半径为:

$$r_{\text{实}} = \max[(z' - z)\tan(\varphi), z\tan(\varphi)] \quad (2)$$

当  $z > z'$  时, 得到一个圆环光束。

圆环内径为:

收稿日期: 2010-11-29

作者简介: 刘国彦(1983-), 男, 硕士, 主要从事现代光学技术及工程应用的研究, E-mail: liugy83@hotmail.com。

$$r_1 = (z - z') \tan(\varphi) \quad (3)$$

圆环宽度为:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = r[1 - \tan(\varphi)\tan(\sigma)] \quad (4)$$

对于正轴棱锥, 其透过率函数为:

$$t(\rho) = \exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda}\sin(\varphi)\rho[1 - \tan(\sigma)\tan(\varphi)]\right\} \rho < r \quad (5)$$

$\varphi$  满足折射定律:

$$n\sin(\sigma) = \sin(\sigma + \varphi) \quad (6)$$

若  $\sigma$  非常小, 可简写成:

$$t(\rho) = \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho(n-1)\sigma\right] \rho < r \quad (7)$$

式中  $n$  为正轴棱锥介质的折射率,  $\rho$  为正轴棱锥的径向坐标,  $\sigma$  为锥角。

轴棱锥的成像特点是: 不同带高的光线具有不同的像点位置, 所以它能将轴上点光源发出的光线连续地会聚到沿轴线不同位置的点上, 而不像透镜那样只会聚到一点。平行光束通过正轴棱锥透镜后以等角  $\varphi$  偏离光轴。根据轴棱锥的成像特性, 利用光学设计软件构建光路, 实现圆环光束输出。

## 2 设计方案及运行结果

### 2.1 由两个轴棱锥组合实现圆环光束

使用光学设计软件 ZEMAX 对轴棱锥建模, 轴棱锥材料为 K9, 锥角  $120^\circ$ , 两轴棱锥锥顶之间距离为 15mm, 入瞳直径为 5mm, He-Ne 激光波长  $0.6328\mu\text{m}$ 。对初始结构参数进行调试、分析及评价。光线追迹图可以追迹和显示任意面上叠加的光线的轨迹, 像面处能量分布图可以显示像面处能量分布。

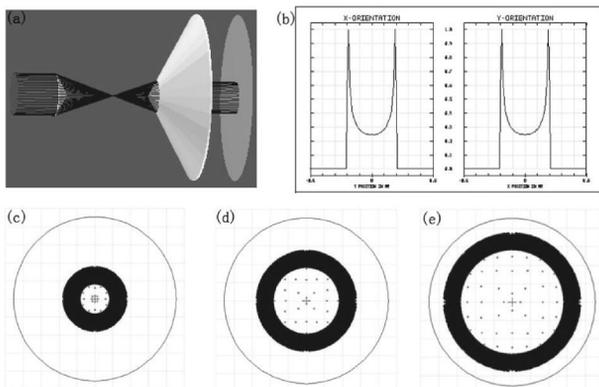


图 2 方案 1 原理图及输出结果

Fig.2 Principle diagrams of project 1 and output

图 2 (a) 为系统原理图, (b) 为像面处能量分布图, 可以看出像面处的能量到达峰值之后逐渐

下降到最低点, 然后再次到达峰值, 此时中心区域光强很弱, 能量分布类似于双高斯分布。(c)~(e) 分别是两轴棱锥锥顶之间距离为 10mm、15mm、20mm 时像面处的光线追迹图, 可近似看成圆环光束。

求得数据如下表:

锥顶间距	内环直径	外环直径	圆环宽度
10mm	3.2mm	8mm	4.8mm
15mm	8mm	12mm	4mm
20mm	12mm	16mm	4mm

### 2.2 单个轴棱锥实现圆环光束

经前面讨论可知, 由两个轴棱锥可以实现圆环光束输出, 但是由两个轴棱锥组成的光学系统在实际应用中对轴棱锥的加工精度和调节精度要求很高, 这就给应用带来很多不便。因此, 考虑能否由单个轴棱锥实现圆环光束输出。

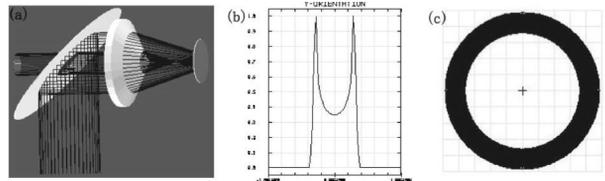


图 3 方案 2 原理图及输出结果

Fig.3 Principle diagrams of project 2 and output

图 3 (a) 为系统原理图, 沿光轴入射方向依次放置分束棱镜、轴棱锥、后置反射镜, 入射光束经分束棱镜、轴棱锥再由后置反射镜反射回来, 最后由分束棱镜的另一边射出, 形成圆环光束。(b) 为像面处能量分布图, 此时中心区域光强很弱, 呈双高斯分布。(c) 为像面处光线追迹图, 可以近似看成圆环光束。

### 2.3 单个轴棱锥实现圆环光束系统改进

实际应用中希望中心区域光强分布陡直, 同时空心区域的无光程度进一步降低的实用空心激光束, 采用轴棱锥和球面镜组合系统来实现圆环光束输出。

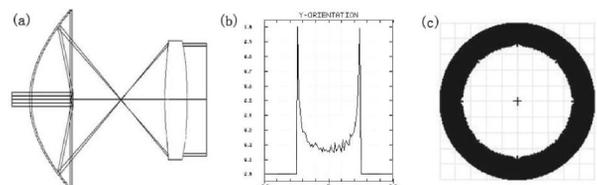


图 4 方案 3 原理图及输出结果

Fig.4 Principle diagrams of project 3 and output

图 4 (a) 为系统原理图。(b) 为像面处能量

分布图,和图 2 能量分布图相比,此时中心区域光强分布更陡直,无光程度进一步降低,呈双高斯分布。(c)为像面处光线追迹图,可以近似看成圆环光束。

#### 2.4 利用反射式 Schwarzschild 系统实现圆环光束

由于实际应用中轴棱锥的加工精度和调节精度要求很高,我们提出一种非球面实现圆环光束系统,采用 Schwarzschild 反射系统,它和卡塞格林系统的结构形式正好相反,所以有人称此系统为逆卡塞格林系统。入射光线先经过一个凸球反射镜,再经过一个凹非球面反射镜,最后到达像面。

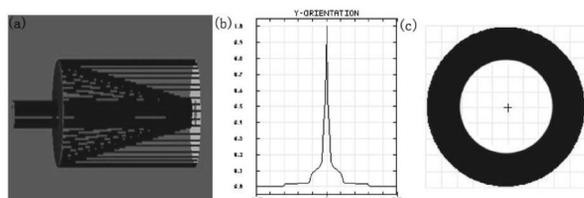


图 5 方案 4 原理图及输出结果

Fig.5 Principle diagrams of project 4 and output

图 5 (a) 为系统原理图。(b) 为像面处能量分布图,呈高斯分布。(c) 为像面处光线追迹图,可以近似看成圆环光束。

### 3 结论

由以上分析可知,利用几何光学法产生圆环光束的关键光学元件为轴棱锥,采用两个轴棱锥的方案简便易行,然而在实际应用中轴棱锥加工精度的

要求和光路调节的准确度都会影响系统的效果。注意到方案 1 光束通过锥棱锥后有光线重叠区,会产生干涉现象,必然会影响圆环的质量。采用单个轴棱锥可以降低对轴棱锥加工精度的要求和光路调节难度,选择合理的系统结构是关键,方案 2 输出光束为双高斯空心激光束,可以看到空心区域并非完全无光,空心激光束内壁光强分布并非陡直。方案 3 采用轴棱锥和球面镜组合系统,在这些方面有一些改进。以上方案都是采用透射式系统,对于单波长输入系统可行,如果需要多波长输入,在折射过程中必然产生色差,影响系统效果。方案 4 提出一种采用反射式 Schwarzschild 系统的新方法,不产生色差的同时实现了圆环光束输出,同时注意到像面处能量分布为高斯分布。

#### 参考文献

- [1] 安连生.应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2003:226-240.
- [2] 王之江.实用光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,2007:416-464.
- [3] 黄慧琴,赵承良,陆璇辉.空心光束的研究进展[J].激光与红外,2007,37(4):300-303.
- [4] 印建平,刘南春,夏勇,等.空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J].物理学进展,2004,24(3):336-380.
- [5] 于化东.准双半高斯空心激光束形成装置[P].中国专利:CN200810051203.8,2009.
- [6] Brzobohaty O, Cizmar T, Zemanek. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon[J]. Opt Exp, 2008, 16(17):12688-12700.

(上接第 29 页)

准直光学系统的场曲,像散和畸变。从图 6 中可以看出光学系统的场曲和像散都已矫正。通过评价函数 DIMX 找到最大的畸变值,结果表明最大畸变为 0.175%,小于规定的最大畸变 0.2%,都符合设计指标。

### 6 结论

本文设计了基于 TFT-LCD 显示器的动态星模拟器的光学系统,根据星敏感器的各项技术指标,确定了该动态星模拟器光学系统的参数。该光学系统采用了八片透镜其中一片是双胶合透镜,视场角为  $28^\circ$ ,焦距  $f'=60.636\text{mm}$ ,通过像质评价得出各项

指标均符合要求。

#### 参考文献

- [1] 刘亚平,李娟,张宏.星模拟器的设计与标定[J].红外与激光工程,2006,10(35):24-28.
- [2] 赵晨光,谭久彬,刘俭,等.用于天文导航设备检测的星模拟装置[J].光学精密工程,2010,18(6):1326-1332.
- [3] 李杰. APS 星敏感器关键技术的研究[D].北京:中国科学院,2005.
- [4] 郝允慧,张国玉.小型静态星模拟器光学系统设计[J].长春理工大学学报:自然科学版,2009,32(4):545-546.
- [5] 马菊,曹维国,李明,等.基于光学性能参数测试的 CCD 摄像系统设计[J].长春理工大学学报:自然科学版,2009,32(3):370-372.