

## 圆周型光斑模式转换器

秦 华

(山东理工大学理学院, 山东 淄博 255049)

**摘 要:**提出了一种圆周型光斑模式转换器——透明玻璃圆锥体,根据光的全反射原理论证了光在该圆锥体中的传输规律和对光束光斑模式的转换原理。利用光线追迹方法模拟了光在光斑模式转换器中的传输过程和对光斑模式的转换效果。结果显示圆锥体的顶角等于一系列特定值时,垂直圆锥体底面入射的光束经过该圆锥体后光束沿着其母线方向出射,在垂直于圆锥体轴线的平面上形成一圆周型光斑,其光能量全部集中在圆周上。圆周型光斑模式转换器还可以与透镜结合使用,只改变光斑模式而不改变光束的传输方向。该圆周型光斑模式转换器具有结构简单、容易制造、能量损失小等优点。

**关键词:**几何光学;光斑模式转换器;光全反射原理;光线追迹

**中图分类号:** O435.1      **文献标识码:** A

## Light spot converter from circular face to circle

QIN Hua

(Department of Sciences, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** A light spot converter from a circular face to a circle—a transparent glass cone is presented. The light propagation characteristics and light spot converter principles inside a cone are studied based on the principle of total reflection of light. The light propagation characteristics and the effect of converting light spot from a circular face to a circle through a cone are simulated by using the ray tracing method. The results show that when the cone angles are equal to a series of special values incident beams normal to the bottom surface of a cone passing through this cone will exit along its generatrices, and form a circle-type spot on the plane perpendicular to the axis of cone, all its energies is concentrated in the circle. A light spot converter from circular face to circle can be used in conjunction with the lens so as to only convert light spot mode and not change the beam propagation direction. The light spot converter has the advantages of simple structure and low energy-loss, and easy fabrication.

**Key words:** geometrical optics; light spot converter; total reflection principle; ray-tracing method

### 1 引言

在激光耦合装置<sup>[1-2]</sup>、干涉计量<sup>[3]</sup>和激光雷达<sup>[4-6]</sup>中需要使用扩束器扩大或缩小激光光束直径,从而得到小光斑高能量密度的激光束。但是到目前为止,还没有这样的装置,在不损失能量的前提下将圆面形光斑转换成为一个圆周型光斑,将能量全部聚集在圆周上。本文提出了一种简单的器件,通过设计器件的参数可以达到上述目的。这种光斑模式转换器件仅有一个圆锥形光学元件构成,大大地简化了仪器的结构。它利用一次折射和多次的内

全反射来完成光线的传输,容易做成高倍率、低能量损失的光斑模式转换器。该转换器结构简单,可以有效用于改变激光光斑模式的相关应用中。例如激光打孔、在舞台上变换大的五环图案等。

### 2 圆周型光斑模式转换器简介

圆周型光斑模式转换器是一个透明的圆锥体,

---

作者简介:秦 华(1964-),男,博士,副教授,主要从事光学设计及全固态激光器的研究工作。E-mail: zfqinh@gmail.com

收稿日期:2009-06-06

材料是普通的光学玻璃,它靠锥体底面的一次折射和侧壁的多次全反射将垂直入射的圆面型光束变换为沿圆锥体母线出射的圆周型光束。光线经过圆锥体的底面照射在它的侧壁上,要求发生全反射,这样才能保证光束被限制在圆锥体内传输。相对于圆锥体内侧壁,发生全反射的临界角为  $\Omega = \arcsin(1/\xi)$ ,  $\xi$  为圆锥体的折射率,取  $\xi = 1.52$ ,则  $\Omega \approx 41.1395^\circ$ ,只有大于  $\Omega$  的入射角才能发生全反射。光束在传输过程中随着传输次数的增多其对侧壁的入射角逐渐变小,当不满足  $\Omega$  条件时,就会折射出圆锥体的

侧壁。

### 3 光束在圆锥体中的传输过程

建立如图 1 所示的坐标系,令锥体底面的中心和坐标原点重合, $L$  为圆锥体的长度, $2H$  为锥体底面的直径,假定  $(x_1, y_1)$  为发光点位置,光平行于  $x$  轴入射,  $(x_n, y_n)$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) 为传播光线和圆锥体内侧壁的交点坐标,  $\theta_n$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) 为传播光线相对于内侧壁的入射角。当这个入射角  $\theta_n$  大于临界角时产生全反射,否则光线就会从圆锥体的侧壁折射出来。

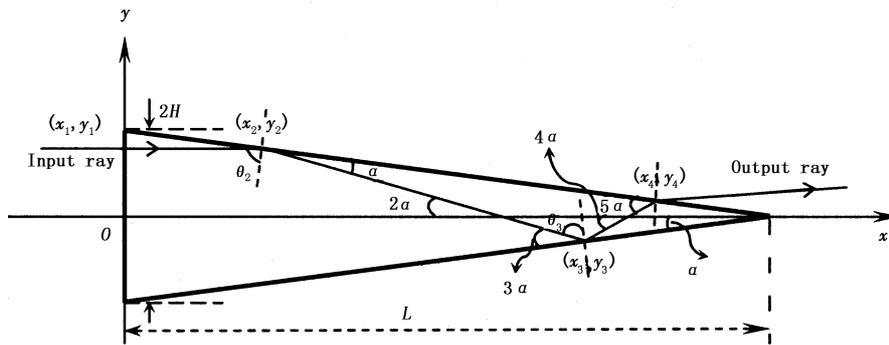


图 1 光线在光斑模式转换器中的传输过程与光线追迹示意图

Fig. 1 rays propagating in a light spot converter and the sketch of ray-tracing

从图 1 中可以看到,光线对于圆锥体内侧壁的入射角,  $\theta_2 = \pi/2 - \alpha$ ,  $\theta_3 = \pi/2 - 3\alpha$ ,  $\theta_4 = \pi/2 - 5\alpha$ ,  $\dots$ ,  $\theta_n = \pi/2 - (2n - 3)\alpha$ ,  $n = 2, 3, \dots$ 。  $(n - 1)$  为光线与侧壁相交的次数,  $(n - 2)$  为光线在圆锥体中发生全反射的次数。 $\alpha$  为圆锥体顶角的一半。从这个式子中可以看出,随着  $n$  增大,  $\theta_n$  逐渐变小,最终不符合全反射的条件,光从侧壁折射出。

在圆锥体中发生全反射的次数  $(n - 2)$  遵从以下条件:

①  $n - 2 = 0$ , 即  $n = 2$ , 没有发生全反射,此时  $\theta_n = \pi/2 - \alpha < \Omega$ 。

②  $n - 2 > 0$ , 即  $n > 2$ , 发生了一次以上的全反射,此时  $\theta_n < \Omega$  且  $\theta_{n-1} > \Omega$ , 亦即:

$$\begin{cases} \pi/2 - (2n - 3)\alpha \leq \Omega & (1) \\ \pi/2 - (2n - 5)\alpha > \Omega & (2) \end{cases}$$

$$\pi/2 - (2n - 5)\alpha > \Omega \quad (2)$$

从式(1)和式(2)中得到  $n$  和  $\alpha$  之间的关系:

$$\frac{\pi/2 - \Omega}{2n - 3} \leq \alpha < \frac{\pi/2 - \Omega}{2n - 5} \quad (3)$$

表 1 列出了不同  $n$  值的  $\alpha$  取值范围,表中  $\alpha_1 = \frac{\pi/2 - \Omega}{2n - 3}$ ,  $\alpha_2 = \frac{\pi/2 - \Omega}{2n - 5}$ 。也就是说,圆锥体的顶角给定了,光在圆锥体中发生全反射的次数就一定。

表 1 发生全反射次数  $(n - 2)$  所要求的圆锥体最小和最大半顶角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$

Tab. 1 the relation between numbers of total reflection  $(n - 2)$  inside a cone and semiapex angles of cone  $\alpha$

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha_1/(\circ)$	16.287	9.7721	6.9801	5.4289	4.4419	3.7585	3.2574	2.8741
$\alpha_2/(\circ)$	48.86	16.287	9.7721	6.9801	5.4289	4.4419	3.7585	3.2574

从表 1 中可以看到,当  $n = 10$ , 即全反射次数为 8 次时,所要求的圆锥体的顶角已经比较小,如果入射光束宽度一定,则对应的圆锥体的长度一定很长,所以全反射次数太多,要求仪器的尺寸必然增大,给使用带来了不便。

当光线在圆锥体侧壁的入射角小于临界角时,

光线从侧壁中折射出,光从侧壁中折射出圆锥体时遵从折射定律,假定折射角用  $\theta'_n$  表示,则有:

$$\begin{aligned} \xi \sin(\theta_n) &= \sin(\theta'_n) \\ \theta'_n &= \arcsin(\xi \sin(\theta_n)) \quad (n = 2, 3, 4, \dots) \quad (4) \end{aligned}$$

如图 1 所示,折射出的光线有两种情况比较特殊;第一,当  $\theta'_n = \pi/2$  时,出射光线沿着圆锥的母线

射出;第二,当 $\theta'_n + \alpha = \pi/2$ ,出射光线与入射光线平行,沿  $x$  轴方向射出。在这里我们主要感兴趣的是第一种情况。将 $\theta'_n = \pi/2, \theta_n = \pi/2 - (2n - 3)\alpha$  代入式(4),得到  $\theta_n = \pi/2 - (2n - 3)\alpha = \arcsin(1/\xi)$ , 所以:

$$\alpha = \frac{\pi/2 - \arcsin(1/\xi)}{2n - 3} \quad (5)$$

对比式(5)和式(3)知道,表1中的  $\alpha_1$  就是式(5)的解。满足式(5)的  $\alpha$  值和  $n$  值就是发生全反射次数 $(n - 2)$ 同时沿着圆锥体母线出射的所要求的  $\alpha$  值,可以看出,这样的  $\alpha$  值有无限多个。使用时,我们可以根据具体情况选择一个合适的  $\alpha$  值。

为了更清楚地看出光束在圆锥体中的传输效果,我们利用光线追迹模拟光束在圆锥体中的传输过程。光线追迹是基于光的折射反射原理,依靠自始至终递进的追踪光的路径完成对光传输的模拟。由于光线追迹原理简单、易于实现,被认为是解决光学问题有效的方法之一<sup>[1,7]</sup>,并在另外一些领域有广泛应用,如计算机图形学<sup>[8]</sup>。本文也利用光线追迹模拟光在圆锥体中的传输过程。

传输过程示意图如图1所示,  $(x_n, y_n) (n = 2, 3, \dots)$  的数值由  $(x_{n-1}, y_{n-1})$  和  $\alpha$  导出:

①当  $y_1 > 0$  时,有:

$$\begin{cases} \frac{(y_n - y_{n-1}) \times (-1)^n}{x_n - x_{n-1}} = \tan[2(n - 2)\alpha] & (6) \\ \frac{H - y_n \times (-1)^n}{x_n} = \tan\alpha, n = 2, 3, 4, \dots & (7) \end{cases}$$

得到:

$$x_n = \frac{H - (-1)^n y_{n-1} + x_{n-1} \tan[2(n - 2)\alpha]}{\tan[2(n - 2)\alpha] + \tan\alpha} \quad (8)$$

$$y_n = (-1)^n (H - x_n \tan\alpha) \quad (9)$$

②当  $y_1 < 0$  时,有:

$$\frac{(y_n - y_{n-1}) \times (-1)^{n-1}}{x_n - x_{n-1}} = \tan[2(n - 2)\alpha] \quad (10)$$

$$\frac{H - y_n \times (-1)^{n-1}}{x_n} = \tan\alpha, n = 2, 3, 4, \dots \quad (11)$$

得到:

$$x_n = \frac{H - (-1)^{n-1} y_{n-1} + x_{n-1} \tan[2(n - 2)\alpha]}{\tan[2(n - 2)\alpha] + \tan\alpha} \quad (12)$$

$$y_n = (-1)^{n-1} (H - x_n \tan\alpha) \quad (13)$$

以上公式中  $\tan\alpha = H/L$ 。

由式(6)~式(13),只要给定入射光线的起始坐标  $(x_1, y_1)$  和圆锥体的尺寸(由  $\alpha$  决定其形状,底面直径决定其大小),就能递推出光线在圆锥体中的传输轨迹。当光线对于内侧壁的入射角  $\theta_n$  小于全反角  $\Omega$  时,光线就会从圆锥体的侧壁折射出来。

图2是光束在圆锥体传输过程中光斑模式变换的模拟效果图,从图中可以看出,选择合适的  $\alpha$  角,垂直于圆锥底面入射的光束就会沿着圆锥的母线出射。图2表示的是圆锥体的一个截面,由于对称性,圆锥的每一个截面的传输特性相同,因此图2说明

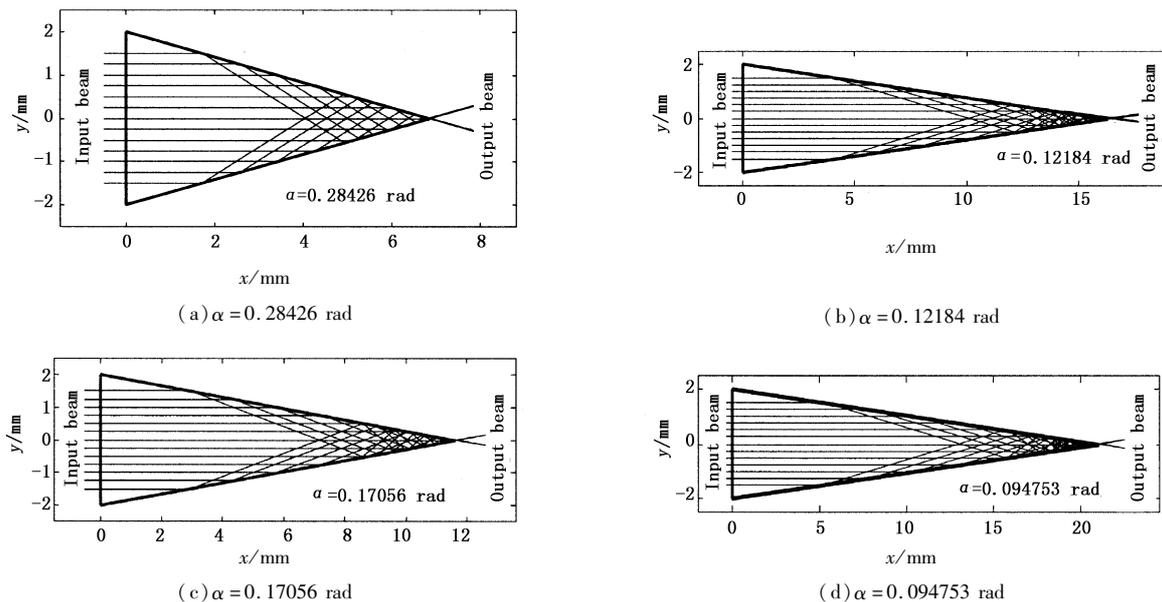


图2 光束经过圆锥体后光斑模式变换的模拟效果图

Fig. 2 the computer simulation of the parallel beam passing through a light spot converter

圆锥体的传输效果就是平行入射的一圆面光束(光斑为圆面),经过圆锥后变为沿圆锥母线出射的光束,在圆锥后某一垂直圆锥轴线平面上的光斑为一圆周,圆周的大小由这个垂直平面到圆锥顶点的距离决定,其光能量全部集中在圆周上。同样,半圆面的入射光束经过变换器后可以转换为半圆周型的光束,扇面光束经过变换器后转换为一个圆弧。

圆锥体的光斑模式变换功能是靠一次折射和多次全反射完成,由于全反射过程没有能量损失,所以传输过程中能量损耗只发生在一次折射中,与传统的全靠折射完成光束模式转换相比,能量损失显然较小。

沿圆锥体上半部入射的光束如果其全反射次数为奇数次则出射时沿其上半部母线出射,否则沿下半部母线出射,如图3所示。

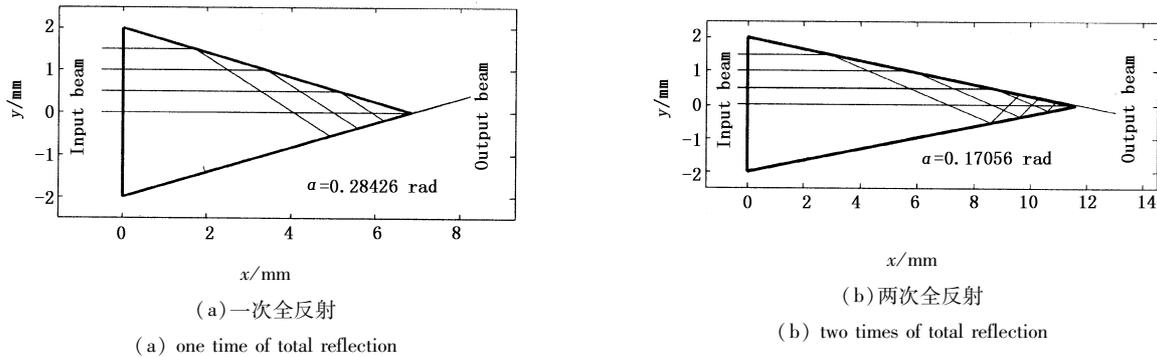


图3 从圆锥体的上半部入射的光束出射时沿圆锥体的上半部母线还是下半部母线由全反射的次数决定,若奇数次则沿上半部母线出射,否则沿下半部母线出射

Fig.3 the beam incident on the upper bottom surface of a light spot converter exits along its upper or lower generatrices, which depends on numbers of total reflection, if these numbers are odd the beam exits along the lower generatrices, otherwise along the upper generatrices

圆锥体与透镜结合使用,使透镜的焦点位置与圆锥体的顶点重合,可以把出射光束的传输方向转换为沿x轴方向,但不改变光斑的模式,如图4所示。

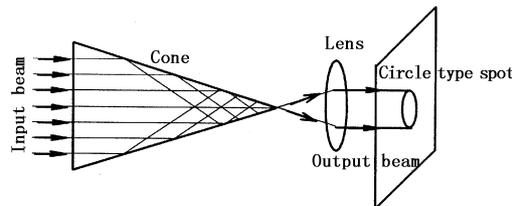


图4 当透镜的物方焦点与圆锥体的顶点重合时,圆锥体与透镜结合使用可以使光束的光斑模式改变但光的传输方向不变,图中圆锥体的半顶角为  $\alpha = 0.28426$  rad

Fig.4 when the lens's object focus coincidences with the apex of this light spot converter, a light spot converter from circular face to circle can be used in conjunction with the lens so as to only convert a light spot mode and not change the beam propagation direction

#### 4 结 论

该圆周型光斑模式转换器只有一个光学器件组成,经过一次折射和多次全反射完成光斑模式的转换,因此具有结构简单,能量损失较小等优点。该圆周型光斑模式转换器不但具有光斑模式转换的功能,而且还能把光能量聚焦在圆周上,在圆周上形成高能量聚集,可以用于激光打孔。通过控制输入光束的光斑形状可以形成任意长的圆弧型光束,即光弧。

光在该光斑模式转换器中要经过一次垂直入射折射和多次全反射,因此需要考虑全反射的临界角,存在色差,所以设计缩束器时要考虑所使用的波长。该光斑模式转换器的顶角也不能太小,顶角小了,缩束器要做的很长,这既不方便又没有必要。由于光的可逆性,该光斑模式转换器还可以反过来使用,一个沿圆锥体母线入射的光环经过这个圆锥体后变为一束均匀的园面型光束。

## 参考文献:

- [1] Gao Run-mei, Chang Sheng-jiang, Hu Zhi-yong, et al. Study of output peculiar ity of LDA pulse end-pumping electro-optics  $Q$ -switch [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38 (11):1083 - 1086. (in Chinese)  
高润梅,常胜江,胡智勇,等. LDA 端泵浦电光调  $Q$  脉冲输出特性研究 [J]. *激光与红外*, 2008, 38 (11): 1083 - 1086.
- [2] Kong Yuan-yuan, Zeng Xiao-dong, Aa Yu-ying. Study on the beam-shaping of high-power LD bar arrays [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17 (4):406 - 409. (in Chinese)  
孔媛媛,曾晓东,安毓英. 大功率 LD 阵列光束整形技术研究 [J]. *光电子·激光*, 2006, 17(4):406 - 409.
- [3] C J Walsh, A J Leistner, J Seckold, et al. Fabrication and measurement of optics for the laser interferometer gravitational wave observatory [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (13):2870 - 2879.
- [4] Hu Ming-yong, Chi Ru-li, Sun Dong-song, et al. Design and testing of beam expander of 1.064 $\mu\text{m}$  wind lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23 (4): 467 - 470. (in Chinese)  
胡明勇,迟如利,孙东松,等. 1.064 $\mu\text{m}$  测风激光雷达扩束系统的设计 [J]. *量子电子学报*, 2006, 23 (4): 467 - 470.
- [5] B V Kaul, I V Samokhvalov, S N Volkov. Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring back-scattering phase matrices with Lidar [J]. *Applied Optics*, 2004, 43 (36):6620 - 6628.
- [6] P Weibring, H Edner, S Svanberg. Versatile mobile Lidar system for environmental monitoring [J]. *Applied Optics*, 2003, 42 (18):3583 - 3594.
- [7] Hua Qin, Rulian Fu, Zhaoqi Wang, et al. Extraordinary variation of pump light intensity inside a four-level solid-state laser medium [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46 (8):628 - 634.
- [8] Aaron M Knoll, Ingo Wald, Charles D Hansen. Coherent multiresolution isosurface ray tracing [J]. *The Visual Computer; International Journal of Computer Graphics*, 2009, 25 (3):209 - 225.