

轴棱锥光学系统对激光束的变换及应用*

冯国英¹ 吕百达² 蔡邦维³

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 本文对轴棱锥系统对激光束的变换特性作了详细分析。结果表明, 本文提出的新型轴棱锥光学系统具有某些实际应用价值。

关键词: 轴棱锥系统 光束变换 环聚焦

Transformation properties of laser beams passing through axicon system and their applications

Feng Guoying, Lu Baida, Cai Bangwei

(Institute of Laser Physics and Laser Chemistry, Sichuan University)

Abstract: In this paper, the transformation properties of the He-Ne and CO₂ laser beams passing through a axicon system has been experimentally investigated in detail. Based on the geometrical optics, the optical transformation properties of the axicon system are also analysed. For some practical applications, the schemes of the uniform line focusing and the annular beam are proposed and have high transformation efficiency. The system can be widely used in laser processing, beam alignment and focusing.

Key words: axicon system beam transformation annular beam

一、引言

随着激光加工、非稳腔激光器、高功率管状激光器和 X 光激光器的发展, 将激光束按一定的需要进行传输变换的要求变得迫切, 如将空心光束变为实心光束或径向细环聚焦等。显然, 采用一般的球面光束变换系统不能达到上述目的。轴棱锥最早由 J. I. McLeod 提出^[1], 我们曾用自制的轴棱锥光束变换器对 He-Ne, CO₂ 激光的变换特性进行了实验研究^[2]。在本文中, 基于几何光学详细分析了轴棱锥系统对光束的变换, 并针对 X 光激光均匀线聚焦和某些实际应用要求的环状光束照明提出了新型均匀线聚焦、环状光束照明的方案, 结果表明, 轴棱锥系统能实现多种形式的光束变换, 而且转换效率高, 在激光热处理、切割、光束准直、线聚焦、环聚焦等方面都具有非常诱人的应用前景。

二、轴棱锥及轴棱锥系统的光束变换特性

1. 单正、负锥透镜

正、负锥透镜因过轴线的横截面呈双棱镜型(如图 1a, 1, b 所示), 故也称为轴棱镜, 它们是锥形光学元件, 与普通的球面透镜的聚焦特性不同。可将它们看作位相型元件。对正锥透镜,

* 该项工作得到国家高技术 416-2-11-2 和中物院院外基金资助, 本文主要结果在国家高技术 ICF 光束传输研讨会'94 会议上(深圳)报告。

其透过率函数写为： $t(\rho) = \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\varphi_1) \rho [1 - \text{tg}(\sigma_1) \text{tg}(\varphi_1)]\right\} \quad \rho < r_1 \quad (1)$

φ_1 满足条件： $n_1 \sin(\sigma_1) = \sin(\sigma_1 + \varphi_1) \quad (2)$

若 σ_1 很小, 可简写为： $t(\rho) = \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho (n_1 - 1) \sigma_1\right] \quad \rho < r_1$

式中, n_1 为正锥透镜介质折射率, ρ 为正锥透镜的径向坐标, σ_1 为锥角。

在图 1a.1 中, 半径为 r 的平行光束通过正锥透镜后以等角 φ_1 偏离光轴, 所有折射光线均与 z 轴相交形成连续的焦线, 焦线长度为:

$$L' = r[\text{ctg}(\varphi_1) - \text{tg}(\sigma_1)] \quad (3)$$

当 $z < L'$ 时, 得到一实心光束, 半径为

$$r_{\text{实}} = \max[(L' - z)\text{tg}(\varphi_1), z\text{tg}(\varphi_1)] \quad (4)$$

当 $z > L'$ 时, 得到一空心光束, 环内径

$$r_{\text{in}} = (z - L')\text{tg}(\varphi_1) \quad (5)$$

环宽度为 $r[1 - \text{tg}(\varphi_1)\text{tg}(\sigma_1)] \quad (6)$

若设 $r = 30\text{mm}$, $n_1 = 1.51$, $\sigma_1 = 20^\circ$ 。用光线追迹法可得沿轴光线强分布如图 1a.2 所示, 随着 z 的增加光强线性增大。用衍射积分方法得到在轴线上场振幅分布如图 1a.3 所示。图 1a.2 与图 1a.3 中光强分布的趋势是一致的。

同样, 也可写出负锥透镜的透过率函数:

$$t(\rho) = \exp\left\{i \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\varphi_2) \rho [1 + \text{tg}(\sigma_2) \text{tg}(\varphi_2)]\right\} \quad (7)$$

式中, φ_2 满足: $n_2 \sin(\sigma_2) = \sin(\sigma_2 + \varphi_2)$

若 σ_2 很小, 可简写为

$$t(\rho) = \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \rho (n_2 - 1) \sigma_2\right] \quad \rho < r_2$$

式中, n_2 为负锥透镜介质折射率, ρ 为负锥透镜的径向坐标, σ_2 为锥角。

在图 1b 中, 半径为 r 的平行光束通过负锥透镜后始终得到一空心圆环, 环内径为:

$$r_{\text{in}} = z \text{tg}(\varphi_2) \quad (8)$$

环宽度为 $r[1 + \text{tg}(\varphi_2)\text{tg}(\sigma_2)] \quad (9)$

2. 正、负锥透镜组合

若将两锥角相同的正、负锥透镜组合起来, 即令:

$$n = n_1 = n_2, \sigma = \sigma_1 = \sigma_2, \varphi = \varphi_1 = \varphi_2$$

(1) 负锥在前、正锥在后, 两锥顶间距 d , 入射半径为 r 的实心平行光束 (如图 2a 所示), 当 $d = 0$ 时, 出射

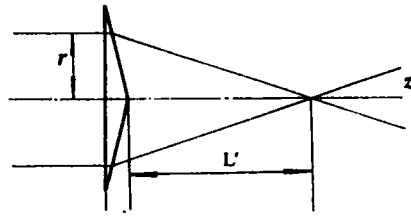


Fig. 1 a.1 A converging axicon

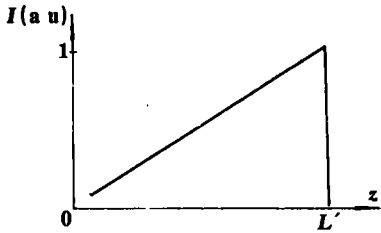


Fig. 1a.2 Calculated relative axial intensity distribution of a circular beam ($r = 30\text{mm}$) passing through the converging axicon by using ray tracing method

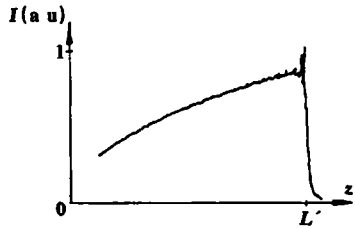


Fig. 1a.3 Calculated relative axial intensity distribution of a circular beam ($r = 30\text{mm}$) passing through the converging axicon by using diffraction integral method

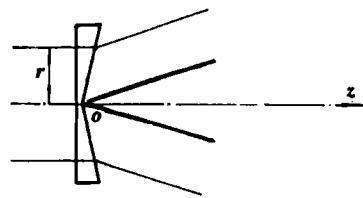


Fig. 1b A diverging axicon

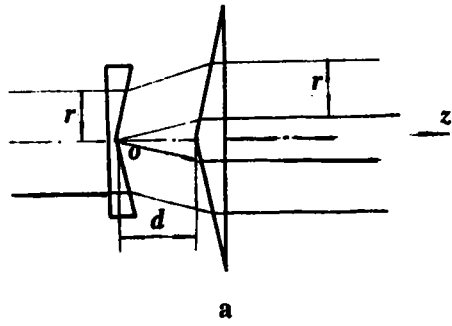


Fig. 2a A combination of two diverging and converging axicons

斜光束与光轴 z 的夹角 β 满足条件

$$\begin{aligned} \sin(\sigma - \varphi) &= n \sin(\sigma - \xi) \\ n \sin(\xi) &= \sin(\beta) \end{aligned} \quad (12)$$

当 $d > L'$ 时, 出射一旋转对称的与光轴夹角为 β 的环状斜光束。

3. 正、负锥透镜与聚焦透镜组合

将正、负锥透镜与聚焦透镜组合, 可实现环聚焦。图 3a 所示的系统由聚焦透镜和正锥透镜组成。设透镜焦距为 f , 正锥透镜锥顶距透镜焦面距离为 d , 则在透镜焦面得到半径为 $d \times \text{tg}(\varphi_1)$ 的聚焦环。

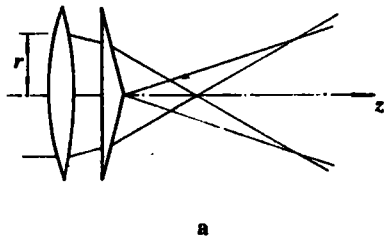


Fig. 3a An annular focusing system formed by a lens and a converging axicon

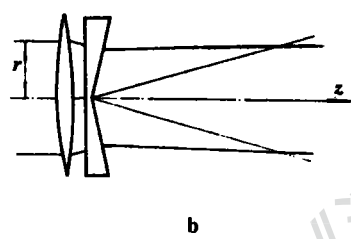


Fig. 3b An annular focusing system formed by a lens and a diverging axicon

正锥透镜后在轴截面上可看作插入楔板引入了相差从而使聚焦环不是很细, 因此, 必须对该系统进行象差校正才可得到线宽很细的聚焦环。

图 3b 所示的由聚焦透镜和负锥透镜组成的系统同样可以实现环聚焦。设负锥透镜顶点距透镜焦面距离为 d , 则聚焦环半径为: $d \times \text{tg}(\varphi_2)$, 与图 3a 所示系统类似, 必须进行相差校正才能得到质量好的聚焦线。

由一个正锥透镜、一个负锥透镜和聚焦透镜组成的系统(如图 3c 所示)同样也可实现环径可调的聚焦环。设负锥透镜顶点距正锥透镜顶点距离为 d , 则聚焦环半径为: $r_{in} = d / [\text{ctg}(\varphi) + \text{tg}(\sigma)]$, 当 σ 较小时简化为 $r_{in} = [d\sigma(n$

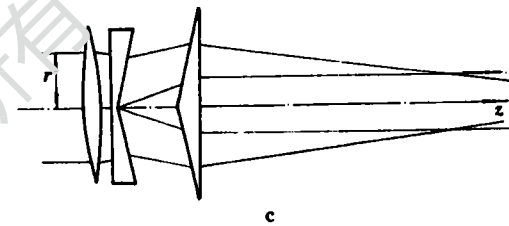


Fig. 3c An annular focusing system formed by a lens and two axicons

一与入射光束相同的实心光束; 当 $d \geq 0$ 时, 出射一平行的环状光束, 环宽度为 r , 内环半径为:

$$r_{in} = d / [\text{ctg}(\varphi) + \text{tg}(\sigma)] \quad (10)$$

(2) 正锥在前, 负锥在后, 两锥顶间距 d , 入射半径为 r 的实心光束(如图 2b), 则情形要复杂些, 当 $d = 0$ 时, 出射一束与入射光束相同的实心光束; 当 $0 < d < L'$ 时, 出射一束与光轴平行的实心光束和一束旋转对称斜光束, 实心光束半径为

$$r_{实} = \frac{d \times \text{tg}(\varphi)}{1 - \text{tg}(\varphi)\text{tg}(\sigma)} \quad (11)$$

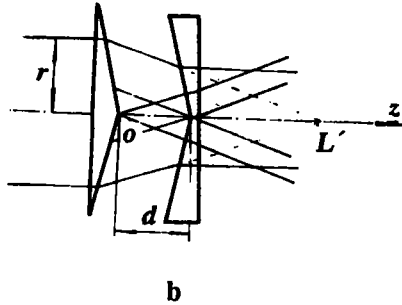


Fig. 2b A combination of two converging and diverging axicons

当 d 满足条件 $0 < d < f$ 时, d 越大, 在透镜焦面处聚焦环半径越大。通过象差分析可知, 当聚焦透镜能将入射的平行光束聚焦为一个焦点时, 插入

$-1)/(1-\sigma)$ 。改变正负锥锥顶间的距离,可改变聚焦环半径而聚焦环始终位于透镜焦面上。由于正、负锥象差相互校正,只需对聚焦透镜进行象差校正就可获得线宽很细的聚焦环。

三、应用例

由于轴棱锥对光束独特的变换特性,对某些仅用传统光学元件很难满足要求的应用极具吸引力。现举出在强激光技术中可能的应用例加以说明。

1. 均匀线聚焦

Table Geometrical size of the axicon array

order of the annular axicon	start point (Z, r)(mm)	end point (Z, r)(mm)	length (mm)	angle with the z axis(°)
1	(0, 200)	(4.39, 210.61)	11.48	67.5
2	(4.39, 210.61)	(9.18, 221.60)	11.99	66.44
3	(9.18, 221.60)	(14.39, 232.96)	12.50	65.37
4	(14.39, 232.96)	(20.04, 244.69)	13.02	64.27
5	(20.04, 244.69)	(26.15, 256.77)	13.54	63.17
6	(26.15, 256.77)	(32.74, 269.19)	14.06	62.05
7	(32.74, 269.19)	(39.82, 281.93)	14.58	60.93
8	(39.82, 281.93)	(47.41, 294.97)	15.09	59.80
9	(47.41, 294.97)	(55.52, 308.30)	15.60	58.68
10	(55.52, 308.30)	(64.15, 321.87)	16.09	57.55
11	(64.15, 321.87)	(73.32, 335.69)	16.58	56.44

基于前面的分析,我们设计了反射式锥楔线聚焦系统,该系统由11个同轴反射式锥环组成,设入射激光束直径 $D=135\text{mm}$,以 $h=267.5\text{mm}$ 的高度平行于光轴入射于光楔列阵, (z 为光轴方向),光锥列阵关于 x 轴旋转对称,在过 z

轴的截面上各锥环的尺寸列于附表。入射光束波面被各锥环分割后在距 O 点 $200\text{mm} \sim 215\text{mm}$ 处重叠形成一长度为 15mm 的聚焦线,通过三维光线追迹我们发现焦线宽度为 0 , 线长为 15mm ,沿焦线长度方向光强分布均匀。

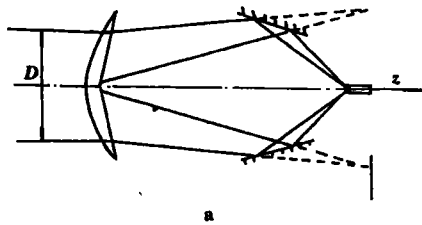


Fig. 4a An annular focusing system consisting of an aspherical-diverging axicon and a conical mirror

锥楔线聚焦系统有如下特点:

- (1) 结构简单,仅用一个锥楔列阵就可以实现线聚焦。
- (2) 采用反射式,避免了色差校正,可用于短脉冲,宽频带激光。
- (3) 由于采用了列阵进行波前分割,即使在入射光场不均匀的情况下也能得到沿线长方向光强分布均匀的焦线。

- (4) 当入射光束严格平行于光轴时,线宽仅受衍射影响,可得到理想线宽焦线。
- (5) 也可将锥楔列阵设计为透射式,则单色平行光入射也可得到线宽为零的聚焦线。

2. 环状光束均匀照明

在惯性约束聚变的某些物理实验中,要求用环状光束来实现均匀照明。环状光束均匀照明系统的难点在于:实际中要求光束以较大的入射角进洞(约 45° 左右才能保证对洞壁的照明),若用透镜聚焦使光束进洞,就要求透镜的 $D/f \approx 2$,在此情形下,象差较大,用传统的透镜类光学元件是难以实现的。

我们设计的均匀环状光束照明系统由特殊的聚焦透镜和锥面反射镜组成。如图 4a 所示,聚焦透镜一面为负锥(锥角为 σ),另一面为非球面,在图 4a 所示坐标下图形可表示如下:

$$\begin{aligned}
 & (f-x)^2 + [\sqrt{y^2+z^2} - f \times \text{tg}\varphi]^2 \\
 & = \left[\frac{f}{\cos\varphi} - \frac{n_1}{n_2} \cos(\varphi) \right. \\
 & \quad \left. \times (\sqrt{y^2+z^2} \text{tg}(\varphi) + x) \right] \quad (13)
 \end{aligned}$$

式中, n_1 为透镜介质折射率, n_2 为空气介质折射率, f 为入射的平行光束形成聚焦环的位置距原点 O 距离, φ 满足(2)式。在我们的系统中, 入射的平行光束口径 $D=60\text{mm}$, $\sigma_1=20^\circ$, $\varphi=6.9^\circ$, $n_1=1.51$, $n_2=1$, $f=350\text{mm}$, 聚焦环半径 $r=42.41\text{mm}$, 负反射锥锥角 $\sigma_2=48.455^\circ$ 。由于采用了非球面和锥面组成的特殊透镜, 移去锥面反射镜时, 可在 $z=350\text{mm}$ 处得到一理想线宽聚焦环, 如图

4b所示, 由衍射积分得到该环径向光强分布如图4c所示, 调整负反射锥到适当位置, 即可将光束在轴上得到一聚焦点, 若不考虑衍射效应。则为一几何点。若靶洞

位于聚焦点处, 则光束能很好进洞, 在离靶洞 0.4mm 处可得到如图4d所示的环状光束, 环宽为 $75\mu\text{m}$, 该环径向光强分布为一边高、另一边低的斜线型分布; 若靶洞为 $\varnothing 1\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的圆洞, 则可在洞壁得到一旋转对称环状光束, 环宽为 $79\mu\text{m}$, 环径向光强分布仍为一边高、另一边低的斜线型分布。这一环状光束均匀照明系统有如下特点:

- (1) 保证特殊聚焦透镜的加工即可实现线宽达到衍射极限的聚焦环。
- (2) 适当移动负反射锥, 可实现点聚焦或不同环径小环聚焦。
- (3) 只要保证光学元件的同轴和光束光场的旋转对称, 即可保证环状光束绕光轴旋转对称。

(4) 图4e所示光学系统同样也可实现均匀环状光束照明, 即由非球面聚焦透镜, 正锥透镜和负锥透镜组成, 光学元件数增多, 同轴调整较难, 但元件加工相对容易些。

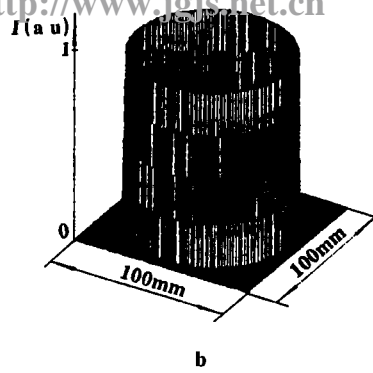


Fig. 4b Calculated relative intensity distribution of the focused annular beam, if the focusing system shown in Fig. 4a (but without the conical mirror) is used

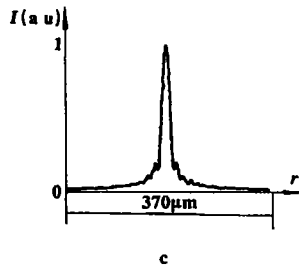


Fig. 4c Calculated relative intensity distribution at the target hole by using diffraction integral method

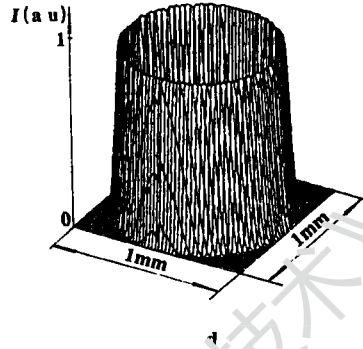


Fig. 4d Calculated relative intensity distribution of the annular beam at the plane of $z=0.4\text{mm}$ far away from the target hole

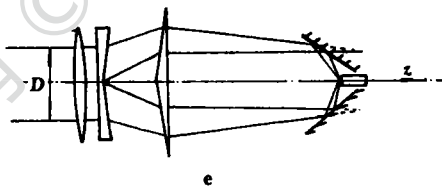


Fig. 4e An annular focusing system consisting of an aspherical lens, two axicons and a conical mirror

利用 F-P 标准具实时测量激光波长的研究

陆 宏 姜铃珍 耿完楨 洪 晶

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 本文详尽分析了利用 F-P 标准具实时测量激光波长的理论依据和误差, 初步实现了利用 F-P 标准具实时测量激光波长, 并探讨了该方法的发展前景及潜在的困难。

关键词: F-P 标准具 实时测量

Real-time measurement of laser wavelength using F-P

Lu Hong, Jiang Lingzhen, Geng Wanzhen, Hong Jing

(Department of Applied Physics, HIT)

Abstract: The purpose of this paper is to introduce the theoretical basis and the error for laser wavelength measurement, and point out that using a F-P and CCD sensor to measure the laser wavelength is a better method because the method has higher resolution of wavelength and can be used in real-time.

Key words: F-P measurement in real-time

四、小 结

由本文分析可得如下结论:

1. 正负轴棱锥组合可进行实心光束变换为空心光束, 空心光束换为实心光束, 旋转对称的斜光束及其逆过程。
2. 利用正锥透镜、负锥透镜与聚焦透镜的组合可实现由实心光束变为半径可调的聚焦环及其逆过程。
3. 所设计的轴棱锥均匀线聚焦系统即使在入射光场不均匀的情况下也能得到沿焦线方向光强分布均匀的具有理想线宽的聚焦焦线, 且光传输效率高。
4. 所设计的均匀环状光束照明光学系统可实现大入射角度小聚焦点进洞从而实现靶洞内壁环状光束的均匀照明。

参 考 文 献

- 1 McLeod J H. J O S A, 1954; 44: 592 ~ 598
- 2 蔡邦维, 吕百达, 张 彬 *et al.* 中国激光, 1994; A21(1): 21 ~ 25.



作者简介: 冯国英, 女, 1970年出生。硕士, 博士研究生。主要研究方向为新型和高功率固体激光器, 光束传输变换和光学设计等。

收稿日期: 1995-05-02