

基于圆锥镜组的空心光束整形器

赵媛媛, 叶一东*, 杨钧兰, 王锋

中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 采用一对圆锥镜作为整形器来产生准直平行的空心光束,并根据能量守恒定律得到了整形后空心光束的光强表达式,然后基于菲涅耳衍射积分公式仿真了该空心光束在自由空间不同传播距离处的衍射光斑及截面光强分布图,并计算得到了光束质量因子随截断直径与高斯光束半径的比值和遮拦比变化的关系曲线,为实际获得良好光束质量和整形器的设计提供依据。其次,对该系统进行了锥顶角一致性、偏心及倾斜误差对波面误差的影响分析,结果表明,对于同样大小的误差,设计锥顶角较大时得到的整形光束的波面误差较小,有利于增加加工和装调的容差范围,且装调中的偏心误差和倾斜误差具有一定的等效性,通过调整装调过程中的偏心方向和大小,可以在一定程度上抵消倾斜误差的影响,实现综合误差的互相抵消,为实际应用中的圆锥镜组整形器加工和装调提供有益参考。最后,对整形出的空心光束进行近、远场测量,结果表明实际所得到的光束质量因子符合理论计算结果。

关键词 光学设计; 高斯光束; 空心光束; 圆锥镜; 光束整形; 衍射传输; 误差分析

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231526

1 引言

1986年,美国科学家发明了光镊技术,使得光的力学效应走向实际应用,让研究者们许多研究中从被动观察转变为主动操控。光镊技术成为囚禁和操纵微小粒子的重要工具,以达到无损精确操控生物样品的目的。而在不断探索新型光镊技术的过程中,一类特殊的光场模式——局域空心光束被人们所发现。局域空心光束定义为在光束传播方向上存在着光强很小甚至为零的三维闭合空间,光强呈桶状分布且存在小范围的暗中空区域,这些特性使得该类光束在玻色-爱因斯坦凝聚^[1]、光学囚禁^[2-3]、光镊^[4-5]以及计算全息^[6]等领域中均有着良好的应用前景和重要的研究价值。目前国内外已有多项将高斯光束整形成空心光束的方法^[7-14],而在1999年,Monk等^[15]就发现在单个圆锥镜后方加入傅里叶透镜便可以使光束聚焦形成局域空心光束。圆锥镜的常用制备材料是熔石英,常温下其导热系数为 $1.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,热膨胀系数为 $5.5\times 10^{-7}\text{ K}^{-1}$,对于 1064 nm 波长折射率为 1.449631 。通过圆锥镜产生局域空心光束的方法不仅具有装置简单、转换效率高的优点,同时拥有较高的强度梯度,有利于捕获微小粒子。

本文采用一对圆锥镜作为整形器以获得准直平行的空心光束,如何平衡截断能量损耗与光束质量,以及对应用时的装调误差进行补偿是值得研究的问题。基

于丰富的圆锥镜组整形器设计和使用经验,本文系统性地对设计中的镜组构型选择、经过圆锥镜整形后的光束模型描述和光束质量分析,以及加工装调过程中一些基本误差等问题进行研究,最后采用所选择的镜组构型获得了空心光束并计算了实际的光束质量因子。

2 圆锥镜组激光整形器基本模型

2.1 圆锥镜面型数学描述

圆锥镜的面型表达式定义为

$$z(r) = r \tan \theta, \quad (1)$$

式中: r 为径向坐标; θ 为圆锥镜底角; $z(r)$ 为有关 r 的轴向坐标。

由于锥尖较尖锐,难以进行加工和使用,容易出现崩边、损伤和缺陷,因此提出一种改进的圆锥镜,仅在锥尖处小范围内设计加工为球面,其余部分仍为圆锥面,这种改进的圆锥镜可以有效地解决锥尖缺陷带来的问题。图1是两种锥尖为球面的圆锥镜面型示意图,在图中对球面曲率半径已作夸大处理。建立如图1所示的直角坐标系,以球面顶点作为坐标原点,光轴方向为 z 轴方向, C 为球心,曲率半径为 R ,圆锥镜最大半径为 R_{\max} ,球面部分在 xy 平面(垂直于 z 轴,图中未标出)上的投影半径为 h 。对应的面型表达式为

收稿日期: 2023-09-05; 修回日期: 2023-11-14; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发日期: 2023-12-12

通信作者: *yidongye@163.com

$$z(r) = \begin{cases} \pm(R - \sqrt{R^2 - r^2}) & , 0 \leq r \leq h \\ \pm[R - \sqrt{R^2 - h^2} + (r - h)\tan\theta] & , h < r < R_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

当球心在顶点右侧时,表达式取正;当球心在顶点左侧时,表达式取负。

考虑加工能力,锥尖处球面半径典型值为 0.1~1 mm 量级,远小于整形光束尺寸,在仿真中忽略锥尖附近球面部分所导致的能量损失和对输出光场的影响。

2.2 锥镜组构型

如图 2 所示,有以下 8 种锥镜组排布方式可获得平行光输出。

从图 2 可以看出,在相同材料以及圆锥镜参数条件下,对于给定的输出遮拦比空心光束,采用图 2(e)~(h)的凹凸组合的构型相比于图 2(a)~(d)的双凸组合,圆锥镜间距更小。同时需要尽可能减少回到激光器的反射光,每个面应避免光束入射角为 0°,而在图 2(e)~(g)的构型中,至少有一个表面的背向反射光会

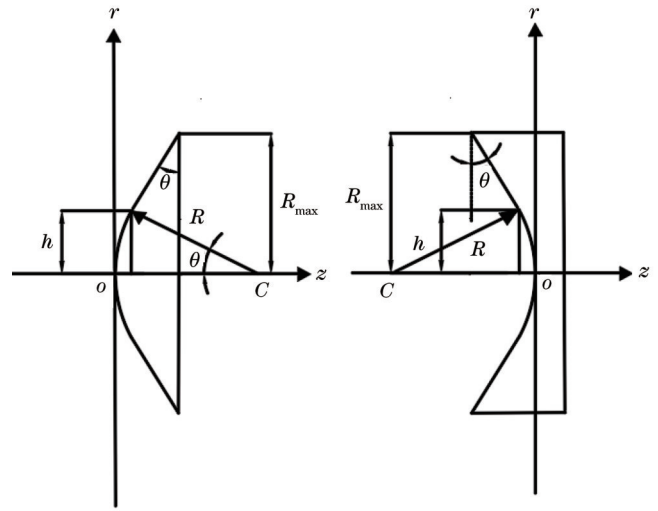


图 1 锥尖为球面的两种圆锥镜面型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of two axicon types with spherical cone tip

原路返回到激光器中,这可能对器件造成损害,因此不适用于整形。图 2(h)构型具有间隔短、无正入射表面等优点,是重点研究的构型。

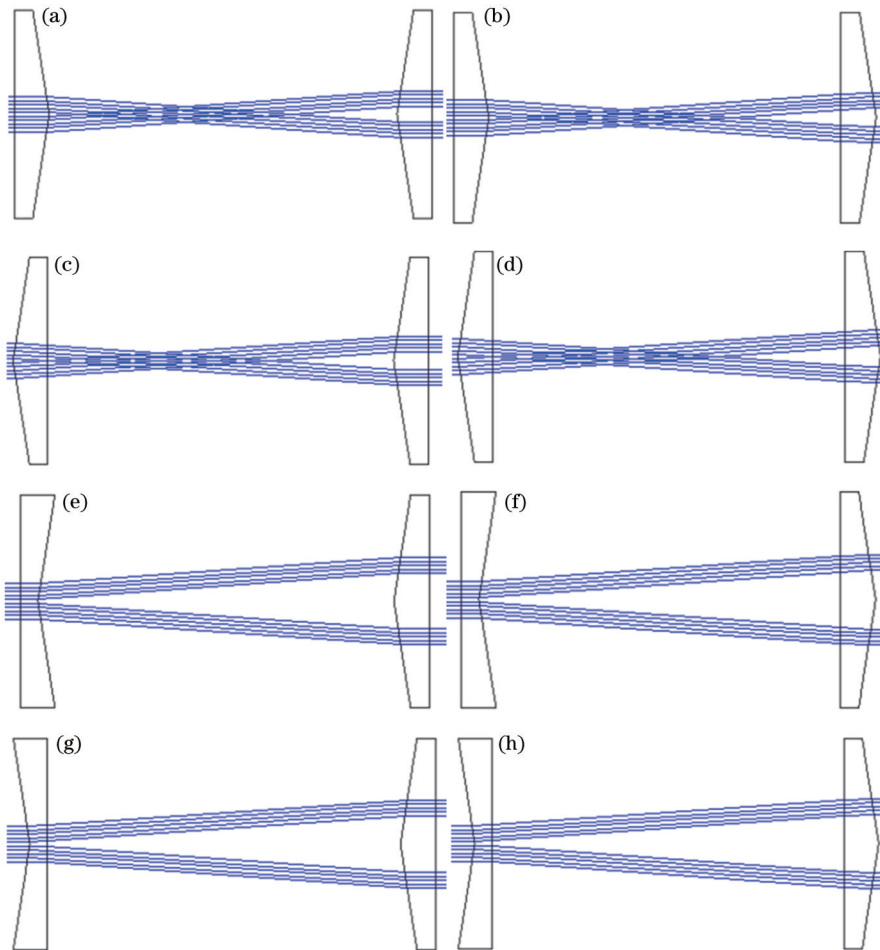


图 2 8 种圆锥镜组排布图。(a)~(d)双凸组合排布;(e)~(h)凹凸组合排布

Fig. 2 Eight kinds of axicon lens group arrangement diagram. (a)~(d) Double convex combination arrangement; (e)~(h) concave and convex combination arrangement

2.3 锥镜组各参数之间的关系

如图 3 所示整形模型,输入高斯光束的光阑截断半径为 r_0 ,两块圆锥镜厚度分别为 l_1 和 l_2 ,折射率为 n ,第一块圆锥镜后表面发生折射时的入射角和出射角为

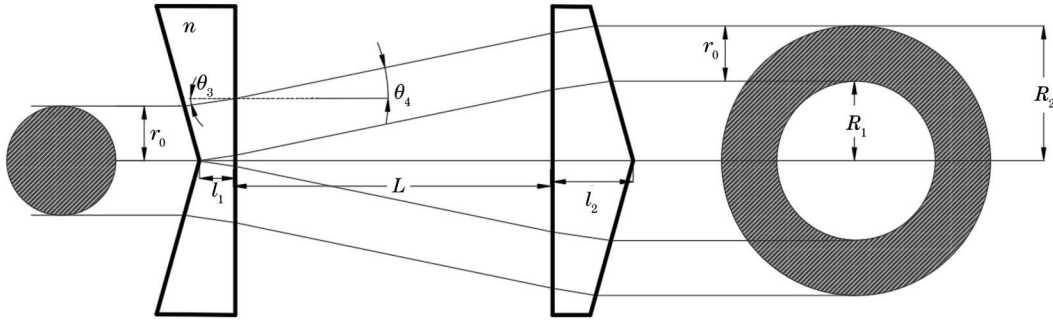


图 3 光束变换示意图

Fig. 3 Beam transformation diagram

根据图 3 可以求得圆锥镜组间距 L 与圆锥镜组相关参数的关系,具体表达式为

$$L = \frac{R_1 \left\{ 1 + \tan \theta \tan \left\{ \theta - \arcsin \left[\frac{\sin \theta}{n} \right] \right\} \right\} - (l_1 + l_2) \tan \left\{ \theta - \arcsin \left[\frac{\sin \theta}{n} \right] \right\}}{\tan \left\{ \arcsin \left\{ n \sin \left\{ \theta - \arcsin \left[\frac{\sin \theta}{n} \right] \right\} \right\} \right\}} \quad (4)$$

3 圆锥镜组输出空心光束的数学描述及传输

3.1 空心光束的光强分布表达式

由图 3 可知,在极坐标下,设输入高斯束光强径向分布为 $I_{in}(r)$,外光阑截断半径为 r_0 ,输出光强径向分布为 $I_{out}(r')$,对于圆锥镜组整形器存在 $R_2 - R_1 = r_0$ 的关系。忽略锥尖球面部分的影响,针对整形器圆锥面型部分,处于同一径向高度的一组输入光束对应的输出部分应满足能量守恒。按照入射处位置半径大小将输入划分为若干区域,那么认为半径 r 处每一组光线的相邻 Δr (无穷小) 区域的输入光功率与输出光功率相同,根据能量守恒有

$$\int_{r_1 - \Delta r}^{r_1 + \Delta r} I_{in}(r_1) r dr = \int_{r_2 - \Delta r}^{r_2 + \Delta r} I_{out}(r_2) r' dr', \quad (5)$$

$$\int_0^{r_0} I_{in}(r) r dr = \int_{R_1}^{R_2} I_{out}(r') r' dr'. \quad (6)$$

整形器径向光线位置由 r_1 到 $r_1 + R_1$, 即

$$r_2 = r_1 + R_1. \quad (7)$$

将式(7)代入到式(5)中,得出经圆锥镜组输出的空心光束的光强分布为

$$I_{out}(r') = \frac{r' - R_1}{r'} I_{in}(r' - R_1), R_1 \leq r' \leq R_2. \quad (8)$$

那么针对无附加相位且半径为 ω_0 的高斯光束,其场分布为

$$E_{in}(r) = \exp \left[- (r/\omega_0)^2 \right], \quad (9)$$

相应光强分布为

θ_3 和 θ_4 , 则圆锥镜整形出光束的遮拦比为

$$\varepsilon = R_1/R_2, \quad (3)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为空心部分内径和外径,主要由间距 L 确定,满足 $R_2 - R_1 = r_0$ 。

$$I_{in}(r) = \exp \left[- 2 (r/\omega_0)^2 \right]. \quad (10)$$

在不考虑像差的情况下,整形输出光强分布和相应场分布为

$$I_{out}(r') = \frac{r' - R_1}{r'} \exp \left\{ - 2 \left[(r' - R_1)/\omega_0 \right]^2 \right\}, \quad R_1 \leq r' \leq R_2, \quad (11)$$

$$E_{out}(r') = \sqrt{\frac{r' - R_1}{r'}} \exp \left\{ - \left[(r' - R_1)/\omega_0 \right]^2 \right\}, \quad R_1 \leq r' \leq R_2. \quad (12)$$

3.2 整形空心光束的传播特性

光线在空间自由传播,传播过程可用菲涅耳衍射积分公式^[16]表示,具体过程为

$$E(x, y) = \frac{1}{j\lambda z_0} \exp(jkz_0) \iint E_0(x_0, y_0) \times \exp \left\{ j \frac{k}{2z_0} \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] \right\} dx_0 dy_0, \quad (13)$$

式中: λ 是光波长; $k = 2\pi/\lambda$ 是波数; z_0 是传播距离; (x_0, y_0) 为原始光场的坐标; (x, y) 为传播后光场的坐标。由式(12)得到直角坐标系下的整形光场分布,具体表达式为

$$E_0(x_0, y_0) = \frac{\sqrt{\sqrt{x_0^2 + y_0^2} - R_1}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \exp \left\{ - \left[\frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2} - R_1}{\omega_0} \right]^2 \right\}. \quad (14)$$

将式(14)代入到式(13)中,设入射光束的截断光

阑直径为 60 mm, 高斯光束入射半径为 20 mm, 整形为内半径为 30 mm 且外半径为 60 mm 的空心光束。在距离整形器出口 $z_0=0, 10, 20, 30$ m 处的衍射光斑图及截面归一化光强分布 $I(r)$ 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 在上述典型参数情况下, 经圆锥镜整形的空心光束在几十米的传输距离内均能保

持良好的空心光束特性, 内外径大小基本不发生改变。但从光束轮廓图可以看出, 随着传输距离的增加, 中心(轴上)光强不为零且在逐渐增大, 这是衍射传输的结果。轴上光强随传输距离的变化如图 5 所示, 传输十几米之后, 随着传输距离增加, 轴上光强逐渐增大。

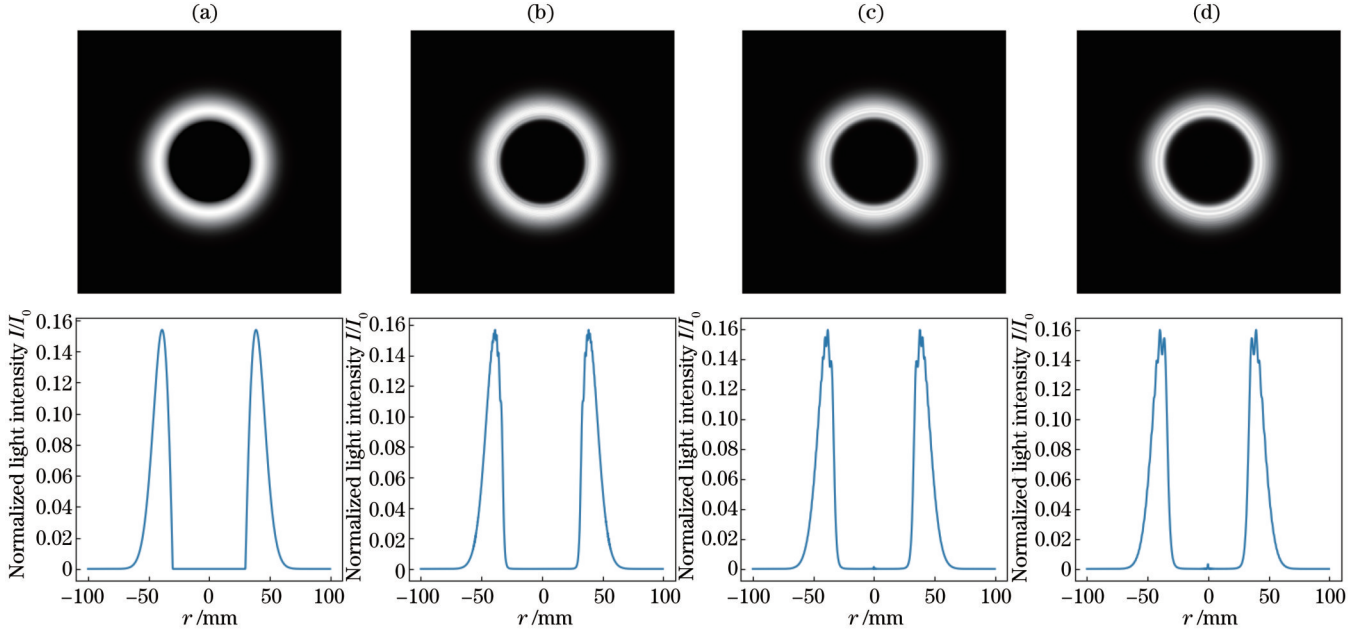


图 4 衍射光斑图及截面归一化光强分布图。(a) $z_0=0$ m; (b) $z_0=10$ m; (c) $z_0=20$ m; (d) $z_0=30$ m

Fig. 4 Diffraction pattern and cross-section normalized light intensity distribution diagram. (a) $z_0=0$ m; (b) $z_0=10$ m; (c) $z_0=20$ m; (d) $z_0=30$ m

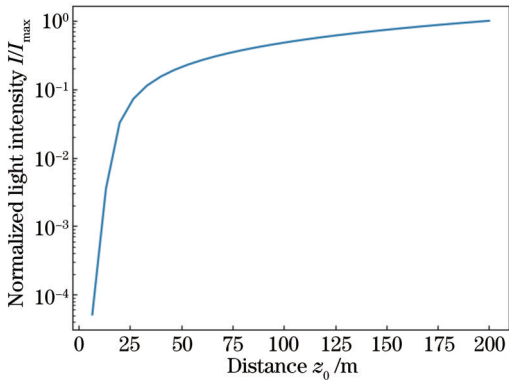


图 5 轴上点归一化光强随传输距离的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of normalized light intensity of point on axis with transmission distance

3.3 整形空心光束的光束质量

为了研究整形后光束的光束质量 β , 在 $z_0=0$ m 处放置一焦距为 10 m 的无像差透镜, 计算该整形空心光束聚焦光场焦面处 83.8% 环围能量对应的光斑半径与平面波实心光束的艾里斑半径之比, 得到空心光束相对于实心光束的光束质量 $\beta_{83.8}$ 。针对焦斑中心部分光强, 采用整形空心光束聚焦光场焦面处 63.2% 环围能量对应的光斑半径与平面波实心光束的艾里斑

63.2% 环围能量对应半径之比来表征空心光束相对于实心光束的光束质量 $\beta_{63.2}$ 。

在遮拦比为 1/3 且相同的截断光阑直径 $D=60$ mm 的情况下, 计算不同高斯光束半径 ω_0 (即截断直径与高斯光束半径的比值 D/ω_0 不同) 整形光的光束质量, 结果如图 6 所示。两种环围能量下的光束质量因子均是随 D/ω_0 的增加而增加, 83.8% 环围能量表征下的关系曲线增长比较稳定, 而 63.2% 环围能量表征下的关系曲线增长有个陡增, 使得两条增长曲线在 $D/\omega_0 \approx 3.7$ 处有个交点。因此在这个交点之前, 用 63.2% 环围能量表征的光束质量更好, 在此交点之后, 用 83.8% 环围能量表得到到的光束质量更好。

光束截断通常都伴随着能量截断损失, 图 7 为能量截断损失与 D/ω_0 的关系曲线图, D/ω_0 值越大, 能量截断损失越小。 $D/\omega_0=4$ 时的环围能量是 99.97%, 一般设定 $D/\omega_0=3$, 就能拥有高达 98.89% 的环围能量。在具体应用中, 可选择适当大小的截断光阑直径以达到光束质量和能量截断损失之间的平衡。

保持入射高斯光束半径 $\omega_0=20$ mm 和截断光阑直径 $D=60$ mm 不变, 计算出两种环围能量表征下不

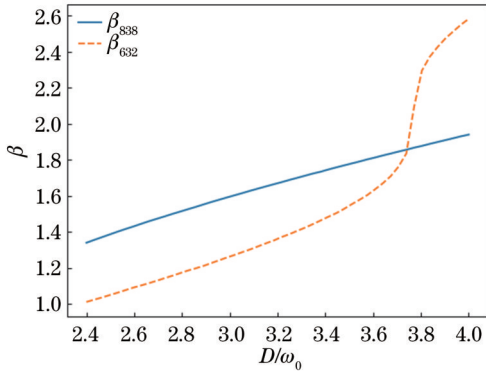


图 6 两种环围能量表征下 β 随 D/ω_0 的变化曲线图

Fig. 6 Variation curves of β with D/ω_0 under two kinds of encircled energy characterization

同遮拦比 ϵ 的整形空心光束和平面波空心光束的光束质量因子,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,遮拦比越大,两类空心光束的光束质量因子也越大,但光束质

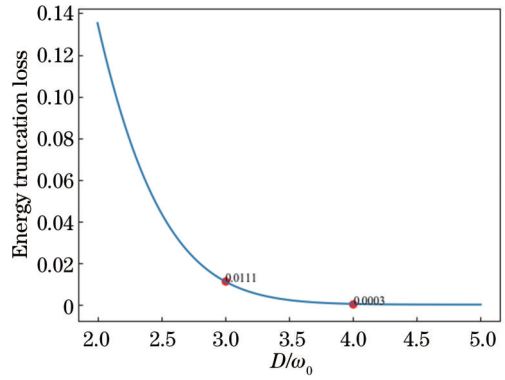


图 7 能量截断损失与 D/ω_0 的关系

Fig. 7 Relationship between energy truncation loss and D/ω_0

量越差。在 83.8% 环围能量计算下的整形空心光束的光束质量因子稍大于平面波空心光束,而 63.2% 环围能量计算下的整形空心光束的光束质量因子比平面波空心光束稍小。

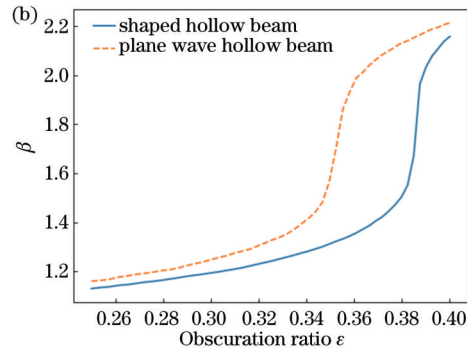
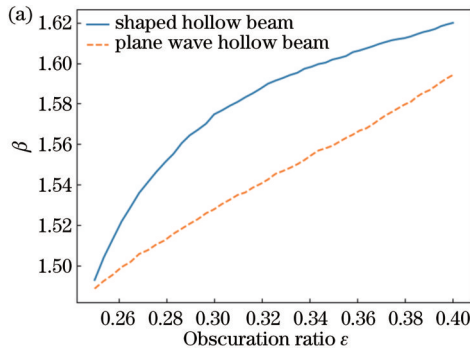


图 8 两种环围能量表征下光束质量随 ϵ 的变化曲线图。(a)83.8% 环围能量;(b)63.2% 环围能量

Fig. 8 Variation of beam quality with ϵ under two kinds of encircled energy characterization. (a) 83.8% encircled energy; (b) 63.2% encircled energy

4 误差的影响

在实际生产加工中会存在锥顶角一致性误差,以及装调过程中两个圆锥镜之间的相对偏心和倾斜误差。下面研究加工和装调的容差问题,研究锥顶角一致性误差、偏心和倾斜误差对波面误差的影响,并研究补偿圆锥镜组的装调偏心、倾斜误差的方法。

4.1 锥顶角一致性误差对波面误差的影响

实际加工时两块锥镜锥顶角很难做到完全一致,这使得后一块圆锥镜的锥顶角相对于第一块圆锥镜锥顶角存在角度偏差。这需要锥顶角设计有一定的容差范围,使其满足系统输出光束波面误差要求。图 9 为锥顶角不一致时中心与边缘光线光路图,设第一块锥镜锥顶角为 2γ ,第二块圆锥镜锥顶角为 2α ,两块锥镜锥顶角之间的关系式为 $\Delta\gamma = 2\gamma - 2\alpha$,其中 $\Delta\gamma$ 为锥顶角偏差。根据折射定律、几何关系和模型的圆对称特性,输出光线与光轴的夹角 β_0 与锥顶角偏差 $\Delta\gamma$ 的关系式为

$$\beta_0 = \arcsin \left\{ n \sin \left[\arcsin \left(\frac{\cos \gamma}{n} \right) + \frac{1}{2} \Delta\gamma \right] \right\} - \left(\frac{\pi}{2} - \gamma + \frac{1}{2} \Delta\gamma \right). \quad (15)$$

经计算,当 $\Delta\gamma > 0$ 即第二块锥镜锥顶角偏小时,出射光线将向内倾斜;当 $\Delta\gamma < 0$ 即第二块锥镜锥顶角偏大时,出射光线将向外倾斜。

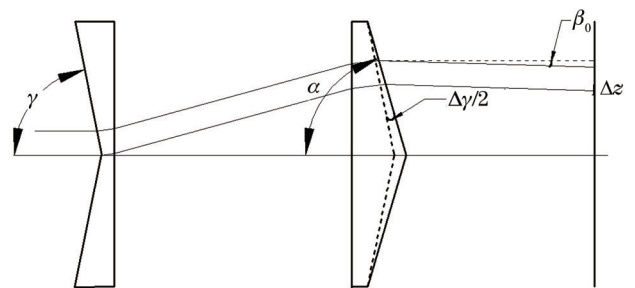


图 9 锥顶角不一致时的中心与边缘光线光路图

Fig. 9 Light path diagram of center and edge rays when cone-top angles are inconsistent

那么系统最大光程差 Δz 关于偏角 $\Delta\gamma$ 的表达式为

$$\Delta z = \frac{\cos\left[\arcsin\left(\frac{\cos\gamma}{n}\right)\right] \cos\left[\beta - \left(\frac{\pi}{2} - \gamma + \frac{1}{2}\Delta\gamma\right)\right]}{\sin\gamma \cos\left[\arcsin\left(\frac{\cos\gamma}{n}\right) + \frac{1}{2}\Delta\gamma\right]} \times r \tan\beta. \quad (16)$$

Δz 随锥镜标准锥顶角 2γ 改变, 但不受锥镜厚度、间距影响。

圆锥镜折射率为 1.449631, 设入射高斯光束截断光阑直径为 40 mm, 图 10 为系统最大光程差 Δz 随锥顶角偏差 $\Delta\gamma$ 变化的曲线图, 从图中可以看出, $\Delta\gamma$ 越大, Δz 也越大; 而对于不同的系统波面, 锥顶角越大的系统能容许的锥顶角偏差范围也越大, 所以在实际设计应用中选择锥顶角较大的圆锥镜。

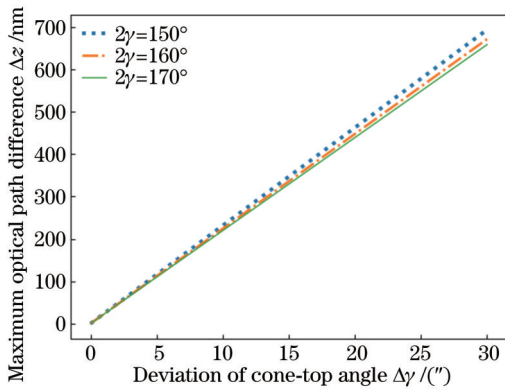


图 10 最大光程差随锥顶角偏差的变化

Fig. 10 Maximum optical path difference varying with deviation of cone-top angle

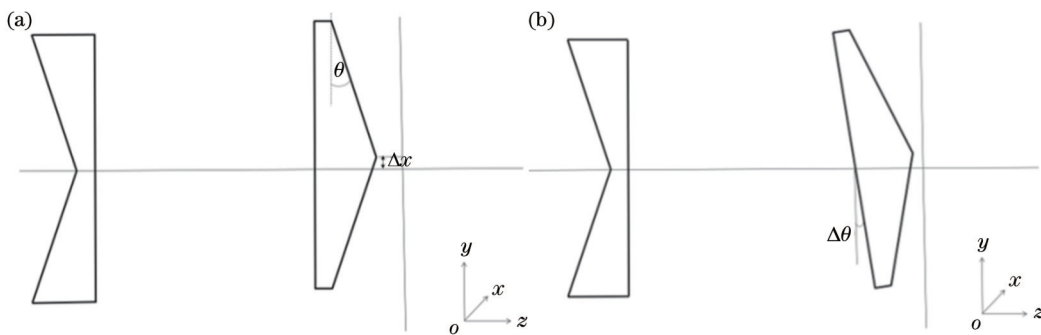


图 11 存在相对误差时圆锥镜组示意图。(a)相对偏心;(b)相对倾斜

Fig. 11 Schematic diagram of axicon group when relative error exists. (a) Relative eccentricity; (b) relative tilt

此外, 通过图 12 所展现出小误差范围内波前 RMS 值与两种误差均呈线性增长关系, 合理推测这两种误差之间存在一种等效关系, 通过调整这一等效关系可进一步减小像差, 为实际工作提供有用参考。规定偏心数据为正表示向上偏心, 倾斜数据为正表示绕顺时针方向倾斜, 并对波前 RMS 值保留 4 位小数, 偏心/倾斜误差保留 5 位小数。当波前 RMS 值分别为 1、

4.2 圆锥镜偏心和倾斜对波面误差的影响

装调或外界扰动造成的偏心误差 Δx 和倾斜误差 $\Delta\theta$ 对光束波面造成的影响较大, 下面讨论两种误差对波前 RMS (Root mean square) 的影响, 计算条件如表 1 所示。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

Parameter	Value
Truncation radius r_0 /mm	30
Gaussian beam radius ω_0 /mm	20
Wavelength λ /nm	1064
Refractive index n	1.449631
Thickness of first axicon l_1 /mm	10
Thickness of second axicon l_2 /mm	20
Distance between two axicons L /mm	100
Cone-top angle 2γ / (°)	160

图 11 为存在相对误差时的圆锥镜组示意图, 在图 11 规定的坐标系中, 沿 y 方向偏心, 绕 x 轴倾斜, 可以通过对不同偏心和倾斜模型进行光线追迹, 得到若干光线经历的光程数据, 从而计算出波面误差 RMS 值。

分别计算比较圆锥镜锥顶角不同时的偏心量以及倾斜量与 RMS 的关系, 得到锥顶角不同时两种误差与波前 RMS 的关系曲线, 如图 12 所示。由图 12 可知, 当偏心量或者倾斜量相同时, 随着圆锥镜锥顶角减小, 波前 RMS 逐渐增大, 波面均匀性逐渐变差, 所以在设计过程中, 在满足系统长度要求的情况下, 应该选用锥顶角较大的圆锥镜, 使得系统具有较小的波前 RMS 值和较大的容差。

2、3 个 λ 时, 对应的偏心或倾斜误差大小见表 2, 从表中数据可以看出, 相同波前 RMS 值对应下的两种误差大小比值几乎不变。

为了验证这种推测, 分别计算在正偏心与正、负两个方向倾斜量同时存在的情况下的波前 RMS 值, 结果如表 3 和表 4 所示。

由表 3 数据可知, 当正偏心量与负倾斜量共存

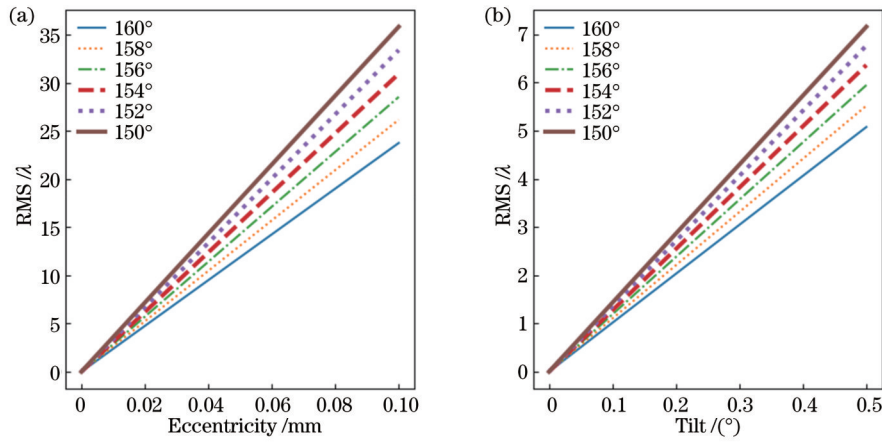


图 12 不同锥顶角时波前 RMS 关于圆锥镜组相对误差量的变化曲线。(a) 相对偏心 (b) 相对倾斜

Fig. 12 Variation curves of wavefront RMS with respect to relative error of conical mirror set at different cone-top angles. (a) Relative eccentricity; (b) relative tilt

表 2 波前 RMS 值及对应偏心和倾斜误差大小

Table 2 Wavefront RMS value and corresponding eccentricity and tilt errors

RMS /λ	Eccentricity /mm	Tilt /(°)
1.0002	0.02107	0.09848
2.0005	0.04214	0.19696
2.9996	0.06321	0.29535

时,相较于某一误差单独存在时,波前 RMS 值几乎增

加一倍。所以对波前 RMS 值而言这种等效关系是存在且成立的。在实际应用中,由于元件偏心或者倾斜造成的波面不均匀性便可视作其中一种误差的影响结果,然后做相应的偏心或倾斜调整,由表 4 可知,相应的调整可以抵消约 96.2% 的像差,像差不能够完全被抵消是因为存在计算精度误差且倾斜操作使得输出光线无法平行,以及偏心操作导致的圆锥镜径向高度不对称问题。

表 3 正偏心率与负倾斜量共存时的波前 RMS 值

Table 3 Wavefront RMS value when positive eccentricity and negative tilt coexist

Eccentricity /mm	Tilt /(°)	RMS /λ	Percentage increase in wavefront error /%
0.02107	-0.09848	2.0000	99.96
0.04214	-0.19696	4.0002	99.96
0.06321	-0.29535	5.9992	100.00

表 4 正偏心率与正倾斜量共存时的波前 RMS 值

Table 4 Wavefront RMS value when positive eccentricity and positive tilt coexist

Eccentricity /mm	Tilt /(°)	RMS /λ	Percentage reduction in wavefront error /%
0.02107	0.09848	0.0376	96.24
0.04214	0.19696	0.0747	96.27
0.06321	0.29535	0.1121	96.26

5 实验结果

针对所讨论的圆锥镜组构型,开展了实验验证工作。先进行了一个平面波实心光的整形实验,经平行光管出射的平行光入射至整形器的截断直径为 40 mm,图 13 为实验得到的实心光束和空心光束的远场光斑图,在 63.2% 环能量表征下实心光束的远场光束质量为 1.06,而经整形后的空心光束远场光束质量为 1.43。

再进行高斯光束的整形实验,由高斯光源出射高

斯光准直后入射至整形器的截断直径也为 40 mm,入射光束的半径为 13.33 mm。图 14 给出了高斯光束和整形得到的空心光束(遮拦比约为 0.23)的近远场光斑探测图,根据光斑同样用 63.2% 环能量表征得到未经过整形器整形的高斯光束远场光束质量为 1.10,经空心光束整形器整形后的空心光束远场光束质量为 1.44,比图 8 中采用 63.2% 环能量表征得到的理论计算结果稍大些,这是因为实验受到了光束经过准直和整形系统后加载的各种像差、圆锥镜加工误差、空气灰尘介质等因素的影响。

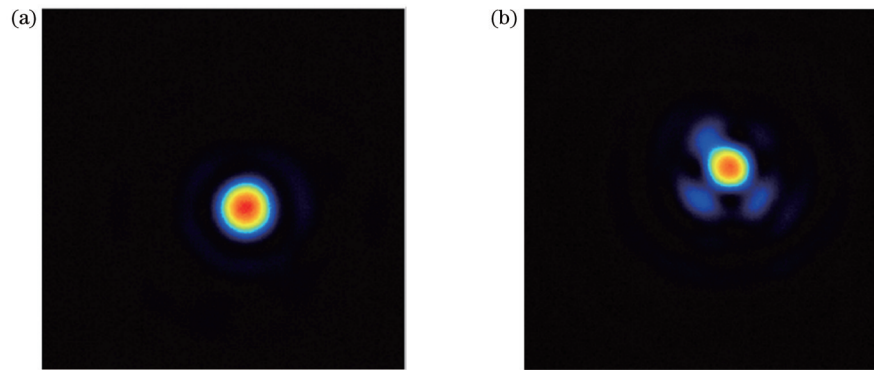


图 13 光束远场光斑图。(a)实心光束;(b)空心光束

Fig. 13 Beam far-field pattern. (a) Solid beam; (b) hollow beam

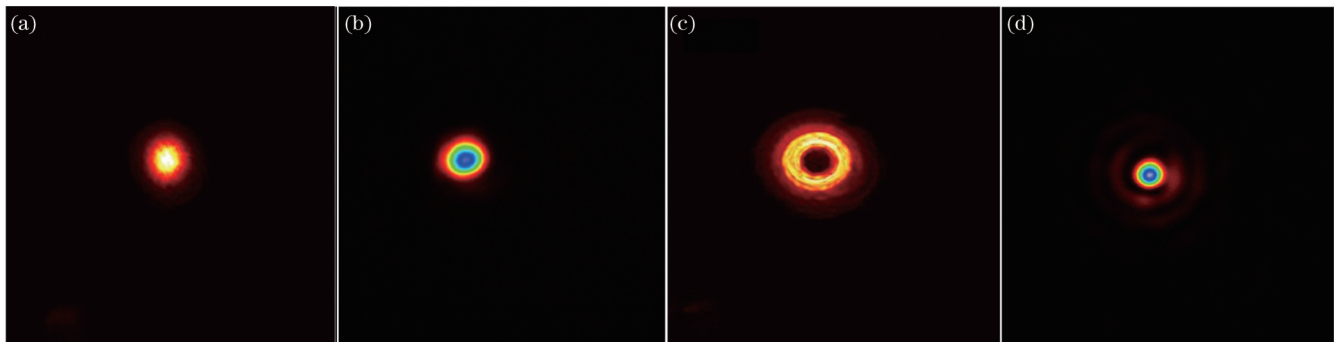


图 14 整形前后的近远场光斑对比。(a)高斯光束近场;(b)高斯光束远场;(c)空心光束近场;(d)空心光束远场

Fig. 14 Comparison of near and far field light spots before and after shaping. (a) Gaussian beam near field; (b) Gaussian beam far field; (c) hollow beam near field; (d) hollow beam far field

6 结 论

主要针对圆锥镜组空心光束整形器的设计、加工、装调过程中的一些基本问题开展研究。分析了镜组构型,研究了输出空心光束光强表达式,基于菲涅耳衍射公式,分析了整形空心光束的传输特性,在几十米的传输距离内均能保持良好的空心光束特性,计算了光束质量因子,结果表明截断直径与高斯光束半径的比值越大,光束质量因子越大,同时光束质量因子还随遮拦比的增大而增大。在加工和装调过程中存在的圆锥镜组相对偏心和倾斜量都会对光束波面误差产生影响,研究结果表明,设计具有较大锥顶角的圆锥镜能够容许更大的误差容差,且两种误差造成的影响具有一定的等效性,在实际应用中可利用该等效关系抵消大部分像差,为装调工作中实现偏心、倾斜像差抵消提供了理论基础。最后基于所提圆锥镜组结构进行实验并对其结果进行分析,结果表明,整形后的空心光束的光束质量因子在一定误差范围内符合理论计算结果。

参 考 文 献

- [1] Yukalov V I, Yukalova E P. Bose-Einstein condensation temperature of weakly interacting atoms[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(7): 073001.
- [2] Isenhower L, Williams W, Dally A, et al. Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1159-1161.
- [3] Xu P, He X D, Wang J, et al. Trapping a single atom in a blue detuned optical bottle beam trap[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2164-2166.
- [4] 付文升, 张希纯, 朱尚典, 等. 局域空心光束的光场缺陷调控及粒子捕获研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(13): 1305002. Fu W S, Zhang X C, Zhu S D, et al. Optical field defect regulation and particle capture of localized hollow beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(13): 1305002.
- [5] 钟航, 陈钧, 陈骏, 等. 悬浮微粒的光学捕获与光谱技术研究进展[J/OL]. *中国激光*: 1-35[2023-11-13]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20230808.1147.093.html>. Zhong H, Chen J, Chen J, et al. Progress in optical trapping and spectroscopic measurements of airborne particles[J/OL]. *Chinese Journal of Lasers*: 1-35[2023-11-13]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20230808.1147.093.html>.
- [6] Samoylenko S R, Lisitsin A V, Schepanovich D, et al. Single atom movement with dynamic holographic optical tweezers[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(2): 025203.
- [7] Ito H, Sakaki K, Jhe W, et al. Atomic funnel with evanescent light[J]. *Physical Review A*, 1997, 56(1): 712-718.
- [8] Manek I, Ovchinnikov Y B, Grimm R. Generation of a hollow laser beam for atom trapping using an axicon[J]. *Optics Communications*, 1998, 147(1/2/3): 67-70.
- [9] Kaplan A, Friedman N, Davidson N. Optimized single-beam dark optical trap[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2002, 19(6): 1233-1238.
- [10] Paterson C, Smith R. Higher-order Bessel waves produced by axicon-type computer-generated holograms[J]. *Optics Communications*, 1996, 124(1/2): 121-130.
- [11] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Generation of

- optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(3): 221-223.
- [12] Weiss C O, Tamm C, Couillet P. Temporal and spatial laser instabilities[J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(11): 1825-1837.
- [13] Yin J P, Noh H R, Lee K I, et al. Generation of a dark hollow beam by a small hollow fiber[J]. *Optics Communications*, 1997, 138(4/5/6): 287-292.
- [14] 朱晓彤, 郑鹏程, 谢向生. 基于贝塞尔光束的复合光场调控超衍射聚焦[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(21): 2105001.
- Zhu X T, Zheng P C, Xie X S. Super-diffraction focusing based on Bessel beam controlled by composited light field[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(21): 2105001.
- [15] Monk S, Arlt J, Robertson D A, et al. The generation of Bessel beams at millimetre-wave frequencies by use of an axicon[J]. *Optics Communications*, 1999, 170(4/5/6): 213-215.
- [16] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 89.
- Lü N G. *Fourier optics*[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 89.

Hollow Beam Shaper Based on Axicon Lens Group

Zhao Yuanyuan, Ye Yidong*, Yang Junlan, Wang Feng

Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

Abstract

Objective Optical tweezer technology makes the mechanical effect of light used in practice, and it can accurately control microscopic particles. Localized hollow beam has important applications in optical captivity and optical tweezers with its physical characteristics such as barrel light intensity distribution and small dark spot size. The method of producing hollow beams by axicon lens is simple and practicable, and it has high conversion efficiency, which is beneficial for the capture of small particles. In the design of optical systems based on an axicon lens, how to balance the energy loss, beam mass, and adjustment error is worth studying, which will make the research more valuable for engineering applications.

Methods In this paper, a pair of axicon lenses was used as a shaper to produce collimated parallel hollow beams. First, the mathematical description of the conical mirror type was given, and then the appropriate configuration of the mirror group was selected according to the requirement of practical application. The expression of light intensity of the hollow beam was obtained according to the law of conservation of energy, and then the diffraction spot and cross-section light intensity distribution of the hollow beam at different propagation distances in free space were simulated based on the Fresnel diffraction integral formula. In addition, the relationship curve of beam quality factor with the ratio of truncation diameter to Gaussian beam radius and the blocking ratio was calculated, so as to obtain good beam quality in practice. The influence of cone-top angle consistency, eccentricity, and tilt error on the wavefront error was analyzed. Finally, near- and far- field measurements of the shaped hollow beam was made.

Results and Discussions The axicon lens configuration featuring front concave, rear convex, and adjacent planes can either avoid damage caused by backreflected light back to the laser or meet the same design requirements with shorter air spacing (Fig. 2). The hollow beam shaped by the axicon lens can maintain good hollow beam characteristics within the transmission distance of tens of meters, and the inner and outer diameters basically do not change (Fig. 4). However, with the increase in the transmission distance, the light intensity of the center (on the axis) is not zero and gradually increases, which is the result of the diffraction transmission (Fig. 5). The beam quality factor increases with an increase in the ratio of the truncation diameter to the Gaussian beam radius while the energy truncation loss decreases with an increase in the ratio of truncation diameter to the Gaussian beam radius (Figs. 6 and 7). Besides, a larger shielding ratio indicates a larger beam quality factor for both shaped hollow beams and plane wave hollow beams of the same size (Fig. 8). Whether it is consistency error, tilt error, or eccentric error of the cone angle, choosing axicon lens with larger cone-top angle can allow larger processing error (Figs. 10 and 12). The ratio of the two error sizes under the same root mean square (RMS) value is almost constant (Table 2). When the eccentricity and tilt corresponding to the same RMS value coexist, the wavefront error is almost doubled, and when one of the errors is reversed, about 96.2% of the aberrations can be offset. Therefore, there is a certain equivalent relationship between eccentricity and tilt error on the influence of the wavefront RMS value (Tables 3 and 4). In the Gaussian beam shaping experiment, the far-field beam mass of the Gaussian beam without shaping is 1.10, and that of the hollow beam after shaping is 1.44, which is slightly larger than the theoretical calculation result. This is because the experiment is affected by various aberrations loaded after the beam passes through the collimation and shaping system, processing errors of the axicon lens, air, and dust media (Fig. 14).

Conclusions In this paper, some basic problems in the process of designing, machining, and assembling the hollow beam

shaper of axicon lens groups are studied. Based on the Fresnel diffraction formula, the transmission characteristics of the shaped hollow beam are analyzed, and the hollow beam characteristics can be maintained within a transmission distance of tens of metres. The beam quality factor is calculated. The results show that a greater ratio of truncated diameter to the Gaussian beam radius indicates a greater beam quality factor. The beam quality factor also increases with the increase in the shielding ratio. The relative eccentricity and tilt of the conical mirror group in machining and setting will affect the wavefront error of the beam. The research results show that the design of an axicon lens with a larger cone-top angle allows a larger error tolerance, and the effects caused by the two errors have a certain equivalence, which can be used to offset most of the aberrations in practical applications. It provides a theoretical basis for offsetting eccentric and tilted aberrations in setting work. Finally, the axicon lens group structure based on the study is tested, and the results show that the beam quality factor of the hollow beam after shaping is consistent with the theory.

Key words optical design; Gaussian beam; hollow beam; axicon lens; beam shaping; diffraction transmission; error analysis