

doi:10.3788/gzxb20174611.1114001

# 浸液式组合轴棱锥产生长距离无衍射贝塞尔光束

刘亮<sup>1,2,3</sup>, 黄秀军<sup>1</sup>, 徐红艳<sup>1</sup>, 宋镇江<sup>1</sup>, 石德乐<sup>1</sup>, 王姗姗<sup>4</sup>

(1 山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264670)

(2 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(3 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

(4 烟台工贸技师学院, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 设计了由负轴棱锥、折射率匹配液、正轴棱锥组成的浸液式组合轴棱锥, 理论分析表明: 浸液式组合轴棱锥系统与传统轴正棱锥等效, 同时可有效提高最大无衍射传输距离; 系统产生的最大无衍射距离与负轴棱锥的底角、折射率, 匹配液的折射率, 正轴棱锥的底角和折射率这五个量有关, 极大地增加了系统设计的灵活性, 拓展了光学材料的选择范围, 降低了光学元件的加工难度。

**关键词:** 激光光学; 光束传输; 轴棱锥; 贝塞尔光束; 无衍射光束

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1114001-5

## Generating Long-Distance Nondiffracting Bessel Beams with Liquid-immersion Composite-Axicon

LIU Liang<sup>1,2,3</sup>, HUANG Xiu-jun<sup>1</sup>, XU Hong-yan<sup>1</sup>, SONG Zhen-jiang<sup>1</sup>, SHI De-le<sup>1</sup>, WANG Shan-shan<sup>4</sup>

(1 Shandong Institute of Aerospace Electronics Technology, Yantai, Shandong 264670, China)

(2 College of Opto-electric Science and Engineering National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(3 Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

(4 Yantai Industry and Trade Technician College, Yantai, Shandong 264003, China)

**Abstract:** A composite axicon is presented, which consists of a positive axicon and a negative axicon immersed in index-matching liquid. Analysis results show that it is equivalent to conventional positive axicon, and can be used to generate long-distance nondiffracting Bessel beam. The maximum distance without diffraction depends on not only the refractive index of axicons and index-matching liquid, but also the cut angle of axicons. Therefore, it is a flexible method which not only increases the selection of element material, but also reduces the difficulties of element processing.

**Key words:** Laser optics; Beam propagation; Axicon; Bessel Beams; Nondiffracting Beam

**OCIS Codes:** 140.6810; 140.3280; 260.1440; 260.1960

## 0 引言

无衍射光束在超精密直测量、高精度三角测量、大深径比打孔、通讯和能量传输等场合具有很大的应用潜力。自 1987 年 Durnin 等<sup>[1]</sup>提出无衍射贝塞尔光束以来, 无衍射光束获得了广泛的关注。常用的无衍射光束的产生方法有环缝-透镜系统<sup>[1]</sup>、全息放大<sup>[3-4]</sup>、法布里-珀罗(F-P)干涉仪<sup>[5]</sup>、轴棱锥<sup>[6]</sup>等。其中, 轴棱锥是最为简单有效的近似无衍射光束产生方式。轴棱锥是一个圆锥形折射元件, 为了得到高质量的近似无衍射光束, 其加工精度、光束入射角度要求很高<sup>[7-10]</sup>。由于轴棱锥小的锥面底角加工存在困难, 传统轴棱锥存在无衍

基金项目: 国家自然科学基金(No.61205206), 航天科技集团第五研究院创新基金资助

第一作者: 刘亮(1981—), 男, 讲师, 博士后, 主要研究方向为固体激光器热管理技术、光电对抗技术等。Email: ll06b@126.com

导师(通讯作者): 石德乐(1971—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为航天光电产品设计。Email: sh\_dl@163.com

收稿日期: 2017-05-11; 录用日期: 2017-07-25

<http://www.photon.ac.cn>

射距离短的问题.文献[11]将单个轴棱锥浸入折射率匹配液中,实现参数可调的无衍射光束,仿真结果表明该方法实现的无衍射光束质量得到很大提高,可以避免小角度轴棱锥的加工误差.文献[12]基于传统正、负轴棱锥系统产生长距离无衍射贝塞尔光束的方法,设计了同种材料不同锥面底角、同锥面底角不同材料两种组合轴棱锥.同种材料不同锥面底角方式要求正、负轴棱锥的底角差要小,这对轴棱锥加工精度提出了很高的要求,目前锥面底角的测量精度尚难以满足 $\leq 1'$ 要求.同锥面底角不同材料方式要求两种材料的折射率差值要小,这限制了轴棱锥光学材料的选择范围.文献[13]利用凹透镜的发散特性,将其分别放置在轴棱锥的前方与后方,使用 Math CAD 软件进行模拟并与传统轴棱锥法进行比较,发现在轴棱锥前方放置凹透镜使 Bessel 光的无衍射距离从 244 mm 增大至 638 mm,同时增大中心光斑半径.文献[14]以轴线为中心将传统轴棱锥的底面磨削成凹球面,选择合适凹球面曲率半径能够产生光束发散小、轴向光强分布均匀的长距离近似无衍射光束.

本文提出了一种浸液式组合轴棱锥系统,并进行了仿真验证,对无衍射距离达 100 米时轴棱锥的加工精度、匹配液折射率的选取区间进行了分析,该研究对长距离无衍射光束的工程化研究具有较高的实用价值.

## 1 理论模型

### 1.1 单个及组合轴棱锥的光传输特性

平面波经过正(负)轴棱锥转换为会聚(发散)的锥面波,锥面波相干叠加区域产生无衍射贝塞尔光.图 1 为模拟得到的平面波经正、负轴棱锥的光线追迹图.在平行光入射情况下,最大无衍射距离由式(1)决定.

$$Z_{\max} \approx R/\theta = R/[(n-1)\gamma] \quad (1)$$

式中  $R$  为光束半径,  $\theta$  为出射光线的会聚角或发散角,  $n$  为轴棱锥的折射率,  $\gamma$  为轴棱锥的底角.

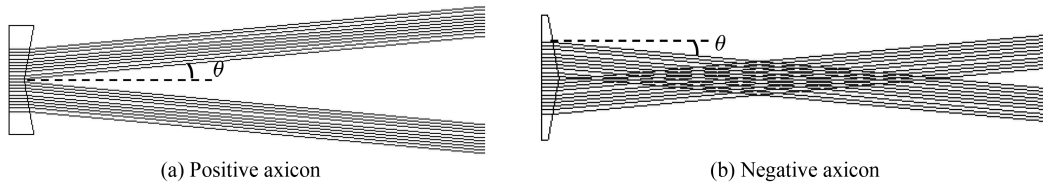


图 1 轴棱锥光线追迹图

Fig.1 Geometric ray tracing diagrams of axicons

图 2 为文献[12]提出的两种组合轴棱锥结构示意图.同种材料不同锥面底角组合轴棱锥、同锥面底角不同材料组合轴棱锥的最大无衍射距离分别由式(2)、(3)决定.

$$Z_{\max} \approx R/[(n-1)(\gamma_1 - \gamma_2)] \quad (2)$$

$$Z_{\max} \approx R/[(n_1 - n_2)\gamma] \quad (3)$$

式中  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  分别为负、正轴棱锥的底角,且  $\gamma_1 > \gamma_2$ ,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为负、正轴棱锥的折射率,且  $n_1 > n_2$ .

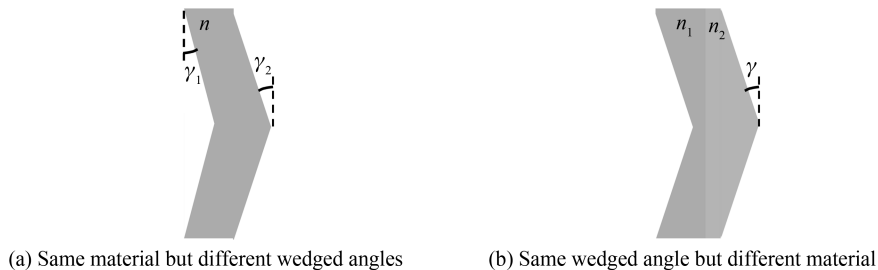


图 2 组合轴棱锥结构示意图<sup>[12]</sup>

Fig.2 Geometric diagrams of composite axicons

### 1.2 浸液式组合轴棱锥系统的光传输特性

图 3 是本文设计的浸液式组合轴棱锥系统结构及光线追迹示意图.图中  $A_1B_1C_1D_1E_1$  区域为负轴棱锥,折射率为  $n_1$ ,底角为  $\beta$ ;  $A_2B_2C_2D_2E_2$  区域为正轴棱锥,折射率为  $n_3$ ,底角为  $\alpha$ ;正负轴棱锥之间为折射率  $n_2$  的折射率匹配液;点虚线为入射光线轨迹.

根据几何光学原理易知,当轴棱锥的底角  $\alpha$ 、 $\beta$  很小时,自左侧负棱锥底面入射光线,经浸液式组合轴棱

锥系统,由右侧正棱锥底面出射光线的会聚角  $\theta$  计算公式为

$$\theta = (n_3 - n_2)\alpha - (n_1 - n_2)\beta \quad (4)$$

此时,最大无衍射距离计算公式可表示为

$$Z_{\max} \approx y_0 / [(n_3 - n_2)\alpha - (n_1 - n_2)\beta] \quad (5)$$

图4为折射率匹配液分别取  $n_2 = 1$ 、(b)  $n_2 = 1.45$  的光线追迹图,其中正负轴棱锥的折射率为  $n_1 = n_3 = 1.51680$  (即BK7玻璃),底角分别为  $18.4349^\circ$ 、 $26.5651^\circ$ 。从图4可以看出:增加折射率匹配液可有效延长最大无衍射距离。

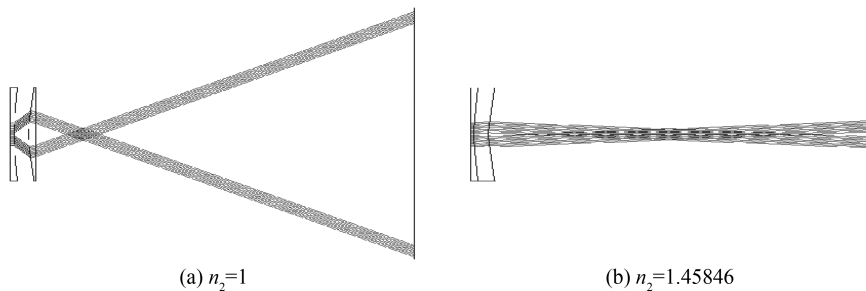


图4 浸液式组合轴棱锥结构及光线追迹示意图  
Fig.4 Ray tracing of composite axicons steeping in refractive index-matching liquid

与文献[12]中的组合轴棱锥相比,浸液式组合轴棱锥方案中,正、负轴棱锥为独立元件,两者之间填充有折射率匹配液.由式(5)可以看出,最大无衍射距离与正、负轴棱锥的底角、折射率,匹配液的折射率有关.因此,引入折射率匹配液可增加系统设计的维度.由式(2)、(3)、(5)可以看出:式(2)分别是  $n_1 = n_3 = n$ 、 $n_2 = 1$ 、 $\alpha = \gamma_1$ 、 $\beta = \gamma_2$  时的特例;式(3)分别是  $\alpha = \beta = \gamma$  时的特例。

## 2 仿真分析

为了便于比较,仿照文献[12]中同种材料不同锥面底角组合轴棱锥计算参数,取光束波长为  $1.064 \mu\text{m}$ ,光束半径为  $10 \text{ mm}$ ,正、负轴棱锥底角为  $5^\circ$ 、 $4.9^\circ$ ,材料为SCHOTT公司的N-BK7(折射率为  $1.51509$ ).当采用文献[12]中的组合轴棱锥方案时,最大无衍射距离约为  $11.12 \text{ m}$ ,图5(a)为依据衍射理论原理仿真得到的平行光通过组合轴棱锥后的光强分布.当采用本文提出的浸液式组合轴棱锥方案时,若匹配液折射率  $n_2 = 1.45$ ,最大无衍射距离为  $88.03 \text{ m}$ ,约为组合轴棱锥方案最大无衍射距离的8倍,图5(b)为依据衍射理论原理仿真得到的平行光通过浸液式组合轴棱锥后的光强分布.此时,若采用文献[12]中同种材料不同锥面底角组合轴棱锥方案,要到  $88.03 \text{ m}$  的无衍射距离,底角差值必须控制在  $1/80^\circ$ ,这对轴棱锥的加工提出了很高的要求.可见,文献[12]中的方案难以产生无衍射距离达  $100 \text{ m}$  以上的贝塞尔光束。

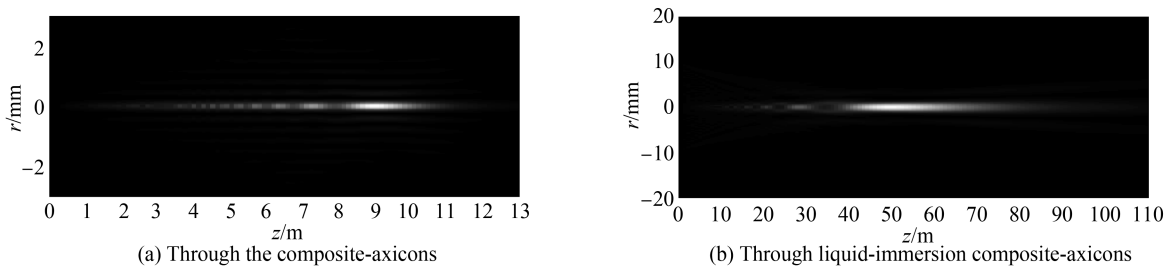


图5 平行光通过组合轴棱锥与浸液式组合轴棱锥后的光强分布

Fig.5 Intensity distributions of plane wave passing through the composite-axicons and liquid-immersion composite-axicons

图6为平行光通过浸液式组合轴棱锥后距离  $15 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m}$ 、 $60 \text{ m}$  处截面上的光强二维分布图((a)、(b)、(c))和径向分布图((d)、(e)、(f)).从图中可以看出,平行光通过浸液式组合轴棱锥后具有明显的无衍射和近

似贝塞尔光束特征.

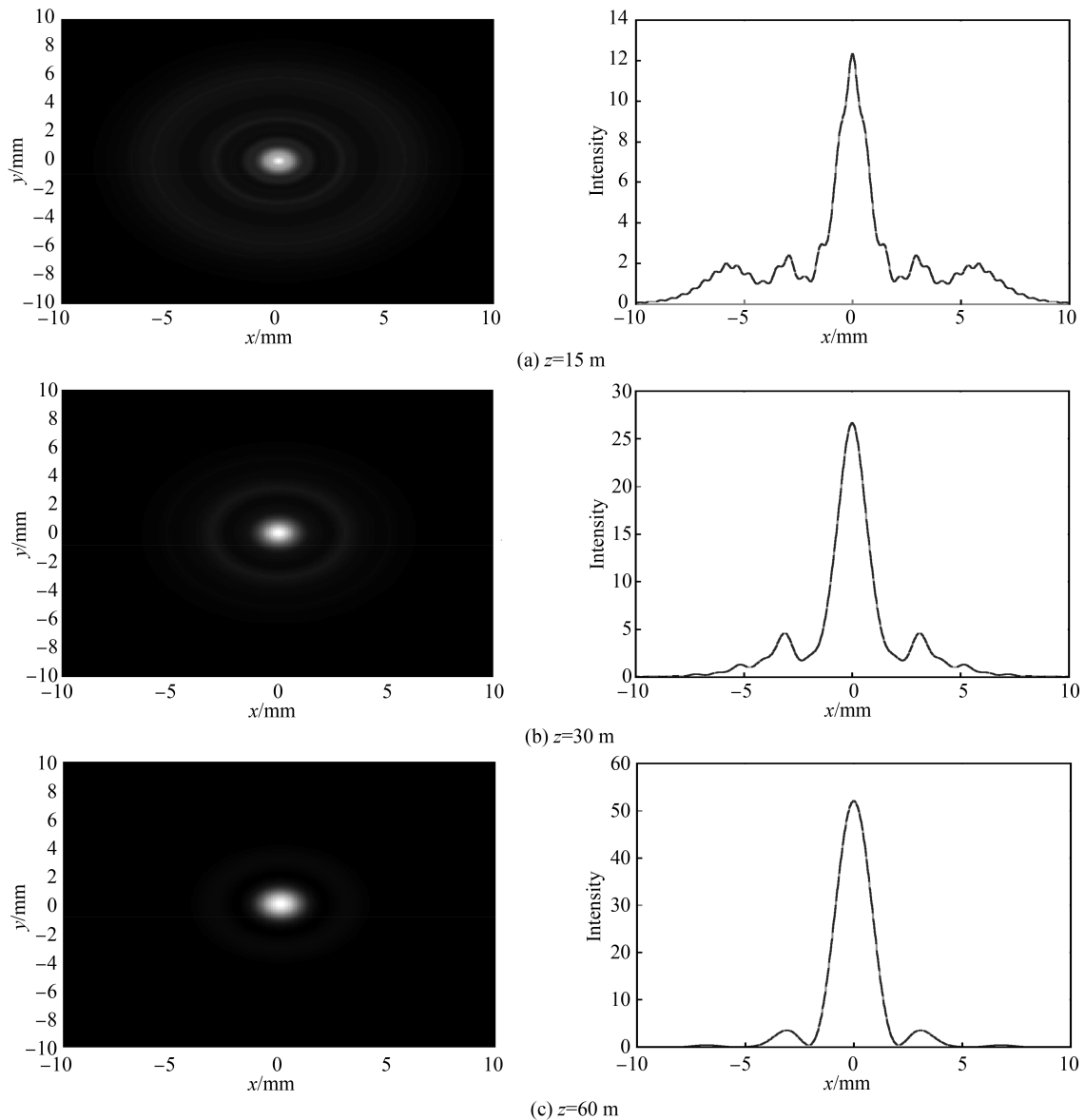


图6 光束通过轴棱锥后不同距离处横截面光强分布  
Fig.6 Intensity distributions of the Bessel beam at diffidence locations

图7为光束半径为10 mm,正、负轴棱锥材料均为N-BK7,负棱锥底角 $\beta$ 为 $5^\circ$ 时,最大无衍射距离随匹配液折射率 $n_2$ 及正负棱锥底角差 $\alpha-\beta$ 变化情况.考虑到加工误差,计算中底角差取值区间为 $0.1^\circ$ 至 $1.0^\circ$ ,匹配液折射率取值区间为1至1.5.从图中可以看出,当底角差 $\alpha-\beta$ 一定时,随着折射率匹配液折射率 $n_2$ 的增大,式(5)中的分母逐渐减小,最大无衍射距离逐渐增大;当匹配液折射率 $n_2$ 一定时,随着底角差 $\alpha-\beta$ 的增大,式(5)中的分母逐渐增大,最大无衍射距离逐渐减小;当匹配液折射率 $n_2$ 满足 $1.458 \leq n_2 < 1.5$ 、底角差 $0.1^\circ < \alpha - \beta \leq 0.37^\circ$ 时,最大无衍射距离可达100米以上.这里需要说明的是,材料的折射率通常与波长、温度、偏振态等因素

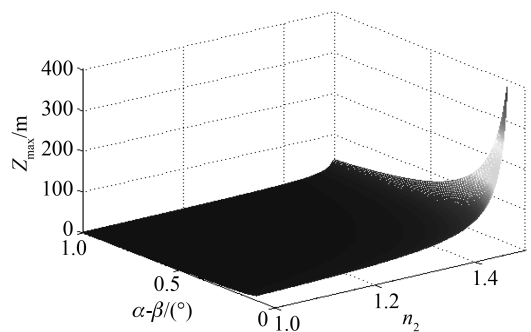


图7 最大无衍射距离随正负轴棱锥锥角差及匹配液折射率变化曲线  
Fig.7 Maximum distance with diffraction distribution of index-matching liquid's refractive index and cone angle difference of positive and negative axicons

相关,激光器输出光束也有一定线宽.因此,通过使 $(n_3 - n_2)\alpha - (n_1 - n_2)\beta = 0$  获得极大的无衍射距离,在工程上是无法实现的.

### 3 结论

设计了一种浸液式组合轴棱锥系统,该系统由负轴棱锥、折射率匹配液、正轴棱锥三部分组成.基于光线追迹理论推导了最大无衍射距离计算公式,结果表明该系统产生的最大无衍射距离与负轴棱锥的底角、折射率,匹配液的折射率,正轴棱锥的底角和折射率这五个量有关.基于衍射理论对光传输特性进行了分析,结果表明浸液式组合轴棱锥系统与传统轴正棱锥等效,通过合理选择正负轴棱锥的材料、底角角度及匹配液折射率可以提高最大无衍射距离.基于轴棱锥进行长距离无衍射光学系统设计时,该设计方法可有效降低光学元件的加工难度,增加元件材料选择的灵活性,具有较好的应用前景.

### 参考文献

- [1] DURIN J, MICELI J J, EBERLY J J H. Diffractive-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(15): 1499-1501.
- [2] DURIN J. Exact solutions of nondiffracting beams I: The scalar theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, **4**(4): 651-654.
- [3] JARITURUNE N, ANTTIVASAR A, FRIBERG A T. Holographic generation of diffraction-free beams[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(19): 3959-3962.
- [4] ANTTIVASAR A, JARITURUNE N, FRIBERG A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1989, **6**(11): 1748-1754.
- [5] COX A J, DIBBLE D C. Nondiffracting beam from a spatially filtered Fabry-Perot resonator[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, **9**(2): 282-286.
- [6] PÉREZ M V, GÓMEZ-REINO C, CUADRADO J M. Diffraction patterns and zone plates produced by thin linear axicons[J]. *Optica Acta*, 1986, **33**(9): 1161-1176.
- [7] ZHAO Bin, LI Zhu. Diffraction property of an axicon in oblique illumination[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(13): 2563-2568.
- [8] TAKUO T, SADAHIKO Y. Comparison of aberration between axicon and lens[J]. *Optics Communications*, 2000, **184**: 113-118.
- [9] ZENG Xia-hui, WU Feng-tie, XING Xiao-xue, et al. Influence of the manufacture error with non-circular symmetry in an axicon on the Bessel beams quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(6): 809-813.  
曾夏辉,吴逢铁,邢笑雪,等.轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞尔光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 809-813.
- [10] HU Run, WU Feng-tie. Influence of axicon vertex off axis machining error on Bessel beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(12): 1205002.  
胡润,吴逢铁.轴棱锥顶点离轴加工误差对贝塞尔光束的影响[J]. *中国激光*, 2016, **43**(12): 1205002.
- [11] GAO Fu-hai, ZHANG Guo-wen, WU Feng-tie, et al. Tunable non-diffracting beams generated by liquid-immersion axicon[J]. *Applied Laser*, 2011, **31**(4): 342-345.  
高福海,张国文,吴逢铁,等.浸液轴棱锥法实现参数可调的无衍射光束[J]. *应用激光*, 2011, **31**(4): 342-345.
- [12] WU Feng-tie, ZHANG Qian-an, ZHENG Wei-tao. Generating long-distance nondiffracting Bessel beams with equivalent axicon[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(12): 1202004.  
吴逢铁,张前安,郑维涛,等.等效轴棱锥产生长距离无衍射贝塞尔光束[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1202004.
- [13] HE Yan-lin, SHEN Dong-hui, SUN Chuan, et al. Concave lens system of increasing Bessel beam non-diffracting distance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(5): 0518003.  
何艳林,沈栋辉,孙川,等.增大 Bessel 光束无衍射距离的凹透镜系统[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(5): 0518003.
- [14] FANG Xiang, CHEN Jing, WU Feng-tie, et al. Generation of long-distance quasi-non-diffracting beams using a concave axicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(5): 0508002.  
方翔,陈婧,吴逢铁,等.产生长距离近似无衍射光束的凹锥透镜[J]. *光学学报*, 2013, **33**(5): 0508002.