

# 环形障碍物后的无衍射光重建产生局域空心光束

马 亮 吴逢铁

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 利用 Hankel 波理论和几何光学原理对无衍射光经环形障碍物的重建过程进行分析, 结果表明轴棱锥产生的无衍射光是由从轴棱锥出射的两列 Hankel 波的叠加而形成的, 并用 Zemax 软件对无衍射光经环形障碍物的过程进行光线仿真, 模拟了环形障碍物后的轴上不同位置处的截面光强图, 研究了局域空心光尺寸与环形障碍物参数之间的关系。并通过实验进行验证, 实验中利用轴棱锥输出无衍射光, 且在最大无衍射距离内放置环形障碍物, 用 CCD 系统记录无衍射光经环形障碍物后的光强变化, 实验和仿真结果基本吻合。仿真和实验结果均表明无衍射光束经环形障碍物后会重建并能产生中心光强为零的局域空心光束(Bottle beam), 在光镊和光学微操作等方面具有潜在的应用价值。

**关键词** 物理光学; 无衍射光; 重建; 环形障碍物; 局域空心光

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0202011

## Bottle Beam Generated by Reconstruction of Bessel Beam with an Annular Obstacle

Ma Liang Wu Fengtie

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

**Abstract** Based on Hankel wave's theory and geometric optical theory, the reconstruction of Bessel beam through an annular obstacle is studied. The results showed those non-diffracting beams generated by axicon are the superposition of two outgoing Hankel waves. Non-diffracting beams through annular obstacle are simulated with Zemax software. The cross sections of intensity distribution at different places on axis behind annular obstacle are also stimulated. The relationship between Bottle beam size and annular obstacle diameter is investigated. In the experiment, we use axicon to generate non-diffracting beam, and an annular obstacle is kept within the maximum collimating distance of the non-diffracting beam. Optical intensity distribution behind the annular obstacle is captured with CCD camera. The result agrees with the simulation. The theoretical analysis and experimental results both showed that reconstruction of Bessel beam with an annular obstacle can generate Bottle beam with zero central optical intensity. There is a potential application in optical tweezers and optical micromanipulation.

**Key words** physical optics; non-diffracting beam; reconstruction; annular obstacle; Bottle beam

**OCIS codes** 080.2740; 140.3300; 140.7010; 140.3295

## 1 引 言

无衍射光具有中心光斑小, 准直距离长且不发散等优点<sup>[1]</sup>, 可作为理想的直线基准, 在直线度误差测量、精密机械加工和高速轨道铺设等领域都有广

泛的应用, 尤其是无衍射光束具有高斯光束等普通光束不具有的重建特性, 从而引起人们的广泛关注和研究<sup>[2~9]</sup>。无衍射光束的重建是指无衍射光经过障碍物后发生畸变, 但传输一段距离后, 光束恢复无

**收稿日期**: 2010-07-19; **收到修改稿日期**: 2010-09-27

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977068)、中国科学院瞬态光学和光子技术国家重点实验室基金(SKL ST200912)和泉州市科技重点项目(2009G4)资助课题。

**作者简介**: 马 亮(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光谐振腔产生无衍射光的理论和技术等方面的研究。

E-mail: maliang077@sina.com

**导师简介**: 吴逢铁(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光束传输与变换、短脉冲技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn(通信联系人)

衍射的特性。

Garces-Chavez 等<sup>[10]</sup>成功地将无衍射光束的可重建特性应用于多层面光学微操作,最近的研究表明整数阶和分数阶贝塞尔 (Bessel) 光束可以重建<sup>[11]</sup>,且无衍射光束通过轴上和离轴障碍物时都可以重建<sup>[12~14]</sup>。但上述的这些研究都只限于圆形或方形不透明障碍物后的重建,本研究用 Hankel 波理论<sup>[15]</sup>分析由轴棱锥产生的无衍射光束经环形障碍物后的光场变化及其传播过程,采用 Zemax 光学软件对其重建过程进行光线仿真,可以很直观地看到无衍射光束经环形障碍物后的光场分布,研究结果表明无衍射光束经环形障碍物后会发生重建,并在重建的无衍射光束之间出现局域空心光束 (Bottle beam),软件仿真结果很好地演绎了整个过程中。进行实验设计利用轴棱锥产生无衍射光束,并在其中心光轴上放置环形障碍物,利用 CCD 系统在障碍物后记录光强变化。仿真和实验证实,无衍射光经环形障碍物后可产生 Bottle beam,且 Bottle beam 四周包围着重建的无衍射光束。本文提出的产生局域空心光束的方法与其他方法(横模选择法、光学全息法等)相比具有结构简单、效率高等优点,且空心光束与周围高强度的无衍射光可形成较强的梯度力,在光镊、光扳手及生命科学和纳米科技中有一定的应用前景。

## 2 理论分析

无衍射 Bessel 光可理解为无数波矢位于同一锥面上的平面波的叠加<sup>[12]</sup>,图 1 为轴棱锥产生无衍射光的示意图,平行光入射轴棱锥,在最大无衍射距离内产生无衍射光。图中 ICWs(Incoming Conical Waves)代表入射锥面波,OCWs(Outgoing Conical Waves)代表出射锥面波。

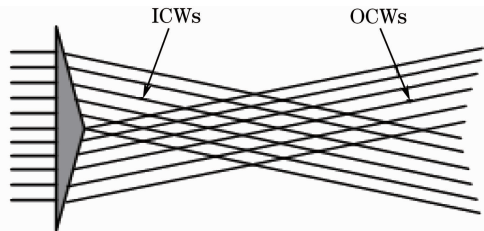


图 1 轴棱锥产生无衍射光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-diffracting beam generated by axicon

当轴棱锥出射的无衍射光入射到环形障碍物时,如图 2 所示,障碍物的形状见图 3, $R_1$  和  $R_2$  分别为其内外半径,无衍射光束被环形障碍物挡掉的

部分会发生畸变,其后一段距离内失去无衍射特性并变成空心光束(如虚线包围区域), $Z_1$  和  $Z_2$  为障碍物至空心光束前后端的距离,中间没有被环形障碍物挡掉的部分继续保持无衍射特性,而环形障碍物外侧的光线则在空心光束后继续叠加,实现无衍射光的重建,同样保持无衍射特性。

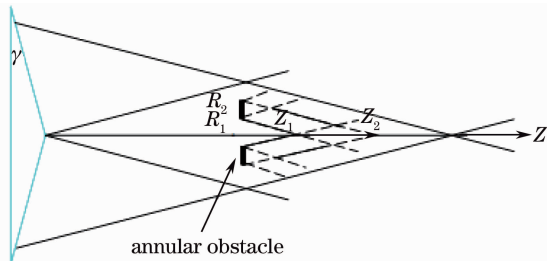


图 2 无衍射光束经环形障碍物示意图

Fig. 2 Schematic diagram of non-diffracting beam through annular obstacle

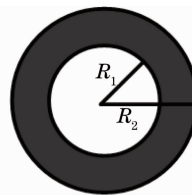


图 3 环形障碍物结构图

Fig. 3 Structure image of annular obstacle

从图 2 可知,由几何关系空心光束前后端至障碍物的距离  $Z_1$  和  $Z_2$  可表示为

$$Z_1 = \frac{R_1}{(n-1)\gamma}, \tag{1}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{(n-1)\gamma}, \tag{2}$$

因此空心光束的轴上长度  $L$  的表达式为

$$L = Z_2 - Z_1 = \frac{R_2 - R_1}{(n-1)\gamma}, \tag{3}$$

利用 Hankel 波理论可以很好地解释无衍射光束的重建现象,在线性介质中传播的平面波波动方程可用亥姆霍兹方程来表示

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k^2 E = 0, \tag{4}$$

(4)式的解为

$$E(x, y, z) = \begin{cases} E_0 H_0^{(1)}(\mathbf{k}, r) \exp(i\mathbf{k}_z z) \\ E_0 H_0^{(2)}(\mathbf{k}, r) \exp(i\mathbf{k}_z z) \end{cases}, \tag{5}$$

式中  $H_0^{(1)}(\mathbf{k}, r)$ ,  $H_0^{(2)}(\mathbf{k}, r)$  为 Hankel 函数,  $\mathbf{k}_r$ ,  $\mathbf{k}_z$  分别表示径向和纵向波矢。

Hankel 函数可以表示成

$$H_m^{(1)}(x) \exp(i\mathbf{k}_z z) = [J_m(x) + iN_m(x)] \exp(i\mathbf{k}_z z), \tag{6}$$

$$H_m^{(2)}(x)\exp(ik_z z) = [J_m(x) - iN_m(x)]\exp(ik_z z), \quad (7)$$

当  $m=0$  时,将(6)和(7)式相加可得 Hankel 波产生零阶 Bessel 光束的表达式

$$[H_0^{(1)}(x) + H_0^{(2)}(x)]\exp(ik_z z) = 2J_0(x)\exp(ik_z z). \quad (8)$$

图 1 中 ICWs 和 OCWs 由(6)~(8)式以函数形式表示为 ICWs  $\sim H_0^{(1)}(x)\exp(ik_z z)$ , OCWs  $\sim H_0^{(2)}(x)\exp(ik_z z)$ 。轴棱锥产生无衍射光束可分成 3 个区域,第 1 个区域仅存在 ICWs,第 3 个区域仅存在 OCWs,且 1 和 3 区域为非无衍射光束区域;第 2 个区域 ICWs 和 OCWs 都存在,由(8)式可知第 2 个区域是无衍射光束存在的区域,即轴棱锥产生的无衍射 Bessel 光由从轴棱锥出射的两列 Hankel 波的叠加形成。

在无衍射光的中心光轴上放置环形障碍物,OCWs 遇障碍物会在中心光轴外侧形成阴影,并远离中心光轴,而 ICWs 遇到障碍物后会形成一小段几何阴影,且这些几何阴影在中心光轴处叠加形成 Bottle beam。由(8)式可知,空心光束后会继续形成无衍射光,其原因是障碍物没能阻挡住其他 ICWs 和 OCWs 的叠加而形成的。

### 3 无衍射光经环形障碍物的几何光学分析

利用 Zemax 光学设计软件对无衍射光经环形障碍物的物理过程进行模拟,采用序列模式对轴棱锥建模,锥面采用标准表面面型,设置入射光束半径

$R=15\text{ mm}$ ,锥面的曲率半径为  $-0.05\text{ mm}$ ,选择 BK7 玻璃材料,轴棱锥厚度为  $2\text{ mm}$ ,二次曲率常数  $C=-131.646$ 。

用 Zemax 软件进行光线仿真,其结果如图 4 所示,其棱形阴影部分为无衍射 Bessel 光,即轴棱锥出射的两列 Hankel 波的叠加,与 2 节分析结果一致。图 5 为图 4 棱形区域内 a,b 和 c 处的截面光强分布。

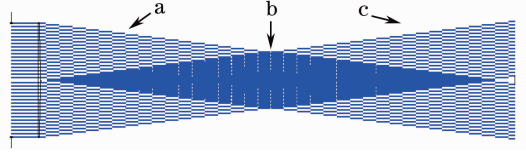


图 4 轴棱锥产生无衍射光的几何光学追迹图  
Fig. 4 Geometrical ray-tracing of non-diffracting beam generated by an axicon

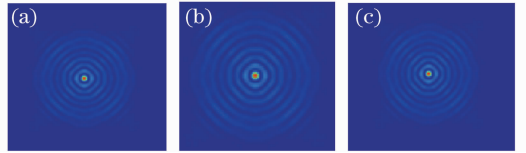


图 5 截面光强图

Fig. 5 Cross sections of intensity distribution

在最大无衍射距离的一半[图 5(b)处]位置添加一个新的曲面,选择标准面型,光圈设置为圆挡光片,最小半径为  $2\text{ mm}$ ,最大半径为  $4\text{ mm}$ ,其效果就相当于一个环形障碍物(图 3),当设置不同的最小和最大半径时就相当于不同尺寸的环形障碍物。软件仿真结果如图 6 所示。

图 7 为图 6 轴上不同位置处的截面光强图,完整演绎了环形障碍物后 Bottle beam 的产生和无衍射

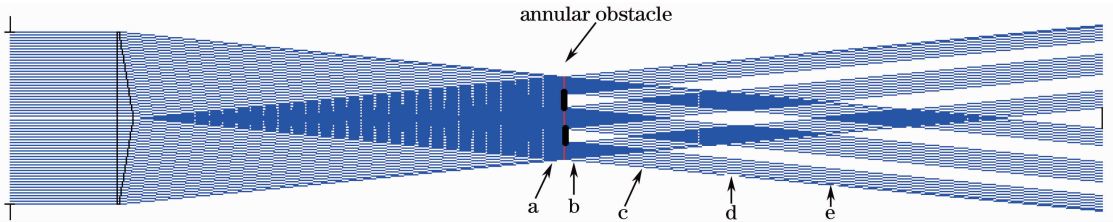


图 6 无衍射光经环形障碍物后的几何光学追迹图

Fig. 6 Geometrical ray-tracing of non-diffracting beam through annular obstacle

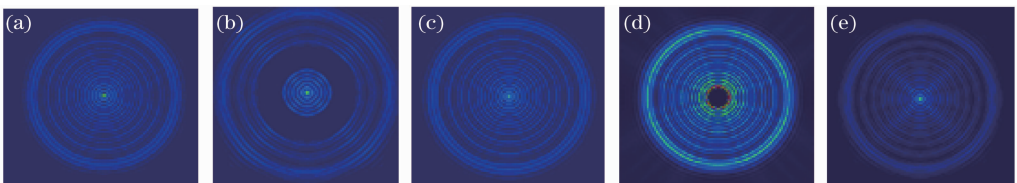


图 7 不同位置处的截面光强图

Fig. 7 Cross sections of intensity distribution in different places

射光重建的过程。

从图 6,7 可以直观地看出,由轴棱锥产生的无衍射光经过一个环形障碍物后会产生中空的 Bottle beam, Bottle beam 的前面为环形障碍物没有阻挡掉的一部分无衍射光,后面为经环形障碍物重建后形成的无衍射光,且 Bottle beam 上下部分也是重建后形成的无衍射光。Bottle beam 四周围绕着高强度的无衍射光,当选择不同内外半径的环形障碍物时,可产生不同尺寸类型的 Bottle beam,丰富了光镊和光操控的应用范围。

## 4 实 验

选择障碍物为一个内半径  $R_1 = 0.25 \text{ mm}$ , 外半径  $R_2 = 0.5 \text{ mm}$  的菲林片,形状如图 3 所示。当  $R_1 < R < R_2$  时,障碍物完全不透明;当  $R < R_1$  或  $R > R_2$  时,障碍物完全透明。

利用准直扩束的 He-Ne 激光束垂直入射轴棱锥产生无衍射光,并在最大无衍射距离内放置上述障碍物,并保证障碍物中心与无衍射中心在同一光

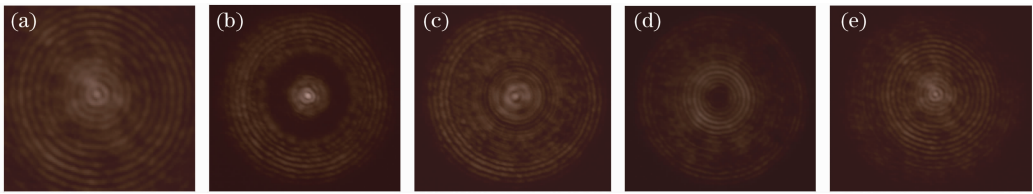


图 9 实验拍摄的不同位置处的截面光强分布图

Fig. 9 Cross sections of intensity distribution at different positions in experiment

图 9 分别为  $Z = 0, 2.5, 5.8, 9.6$  和  $11.6 \text{ cm}$  处的截面光强图,与图 7 仿真模拟图基本吻合,从图 9(a)~(c)可以看出随着距离的增加,环形障碍物对无衍射光的影响越来越大,再随着距离的增加,出现中空的 Bottle beam[图 9(d)],且周围为环形的无衍射光所包围,Bottle beam 后又出现重建的无衍射光[图 9(e)],且光强分布又出现图 9(a)的环状结构。图 9(a)~(e)完整演绎了环形障碍物对无衍射光的影响和 Bottle beam 的形成,以及 Bottle beam 后无衍射光束的重建。

## 5 结 论

描述了无衍射 Bessel 光束经环形障碍物后的重建过程,并利用 Hankel 波理论解释了重建现象,从几何光学角度通过 Zemax 软件对传输光线进行仿真,可以很直观地发现无衍射光经环形障碍物后会产生 Bottle beam,且周围包围着高强度的重建无衍射光束,利用轴棱锥和加工的菲林片进行实验设

轴上。图 8 为设计的实验装置图。

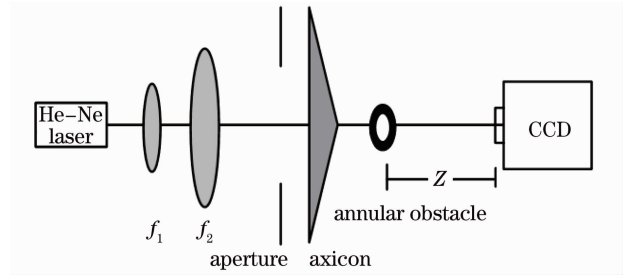


图 8 实验装置图

Fig. 8 Figure of experimental device

实验中激光源的波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,轴棱锥的底角  $\gamma = 0.5^\circ$ ,透镜  $f_1$  和  $f_2$  组成准直扩束系统,在最大无衍射距离内放置障碍物,并在障碍物后放置旋转屏,通过旋转屏接收成像,再利用体视显微镜(可连续放大,最大放大倍数为 50 倍)和 CCD 照相机(可连续放大 5 倍,分辨率为  $2560 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$ )组成的系统对环形障碍物后的截面光斑进行拍摄。图 9 为记录的距环形障碍物不同距离  $Z$  位置的二维光强分布图。

计和实验验证。无衍射光经环形障碍物后的重建在光镊、光操控、材料科学和生物医学等方面具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 J. Durnin, J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffractive-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 2 Z. Bouchal, J. Wagner, M. Chlup. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **151**(4-6): 207~211
- 3 V. Pyreagaite, K. Regelskis, V. Smilgevicius *et al.*. Self-action of Bessel light beams in medium with large nonlinearity[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **257**(1): 139~145
- 4 Wu Fengtie, Liu Bin, Lu Wenhe *et al.*. Experiment study on bottle beam generated by interfering Bessel beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2899~2901  
吴逢铁,刘彬,卢文和等.贝塞尔光束相干产生局域空心光束的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2899~2901
- 5 P. Fischer, H. Little. Wavelength dependent propagation and reconstruction of white light Bessel beams[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(5): 477~482
- 6 Wu Fengtie, Lu Wenhe, Ma Baotian. The beam propagation and transformation in axicon-lens system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2557~2560

- 吴逢铁, 卢文和, 马宝田. 轴棱锥——透镜系统的光束传输与变换[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2557~2560
- 7 R. Butkus, R. Gadonas, J. Janusonis *et al.*. Nonlinear self-reconstruction of truncated Bessel beam [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**(1-3): 201~209
- 8 R. P. MacDonald, S. A. Boothroyd, T. Okamoto. Interboard optical data distribution by Bessel beam shadowing [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **122**(4-6): 169~177
- 9 Ma Liang, Wu Fengtie, Huang Qilu. A new type of combined axicon for generating non-diffracting Bessel beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2417~2420  
马亮, 吴逢铁, 黄启禄. 一种产生无衍射贝塞尔光束的新型组合锥透镜[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2417~2420
- 10 V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419** (6903): 145~147
- 11 Tao Shaohua, Yuan Xiacong. Self-construction property of fractional Bessel beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(7): 1192~1197
- 12 Wu Fengtie, Liu Bin, Lu Wenhe *et al.*. Reconstruction of Bessel beams with an obstacle set off the axial [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(3): 414~417  
吴逢铁, 刘彬, 卢文和等. 离轴障碍物 Bessel 光束的重建 [J]. 光电子·激光, 2009, **20**(3): 414~417
- 13 Liu Bin, Wu Fengtie, Jiang Xinguang. Particles manipulation in multi-plane using non-diffracting Bessel beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 379~382  
刘彬, 吴逢铁, 江新光. 利用无衍射贝塞尔光束多层面操控微粒 [J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 379~382
- 14 Wu Fengtie, Jiang Xinguang, Liu Bin *et al.*. Geometric optics analysis on self-reconstruction of the nondiffracting beam generated from an axicon [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3125~3128  
吴逢铁, 江新光, 刘彬等. 轴棱锥产生无衍射光束自再现特性的几何光学分析 [J]. 物理学报, 2009, **58**(5): 3125~3128
- 15 S. Chavez-Cerda, G. H. C. New. Evolution of focused Hankel waves and Bessel beams [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **181**(4-6): 369~377