

文章编号: 0258-7025(2009)02-0379-04

# 利用无衍射贝塞耳光束多层面操控微粒

刘彬 吴逢铁 江新光

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 从理论上对无衍射贝塞耳(Bessel)光束的光强分布进行描述,模拟了贝塞耳光束经过障碍物后,不同传播距离的二维光强分布。进行了贝塞耳光束二次重建的实验,测定了相关的参量。实验所用障碍物的大小分别为 400  $\mu\text{m}$ , 520  $\mu\text{m}$  时,其最小重建距离分别为 44 mm, 60 mm。这说明障碍物的尺寸越小越容易重建。理论与实验证实,在一定的条件下,被障碍物阻碍的贝塞耳光束在自由空间里可以重建并且可以多层面地重建,研究结果可用于多层面微粒的操控。

**关键词** 激光物理;无衍射贝塞耳光束;重建;轴棱锥;测微尺

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0379

## Particles Manipulation in Multi-Plane Using Non-Diffracting Bessel Beam

Liu Bin Wu Fengtie Jiang Xinguang

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

**Abstract** The intensity profile of the non-diffracting Bessel beams disturbed by an opaque obstacle was studied. The two-dimensional optical intensities distribution in difference propagation distances was simulated numerically. Second time reconstruction of the Bessel beam was demonstrated, and the relative parameters were measured. The minimum reconstruction distances are 44 mm and 60 mm respectively when the obstacle dimensions are 400  $\mu\text{m}$  and 520  $\mu\text{m}$ . It shows that the smaller the dimension of the obstacle is, the easier the beam reconstruction. The simulation and experimental results show that the obstructed Bessel beam can reconstruct itself in free space, even achieve multi-plane. This result has an important practical significance in multi-plane micro-manipulation.

**Key words** laser physics; non-diffraction Bessel beams; self-reconstruction; axicon; mini-ruler

## 1 引言

无衍射贝塞耳(Bessel)光束<sup>[1]</sup>具有高斯光束等普通光束不曾有的重要特性——重建特性<sup>[2]</sup>,在生物工程和医学领域有着广泛的应用前景而引起了人们的极大关注<sup>[3]</sup>。MacDonald 等<sup>[4]</sup>发现无衍射光束中心光斑被阻碍后,在很短的距离内光斑可得到补偿;Bouchal 等<sup>[2]</sup>研究了无衍射光束的自再现;Garces-Chavez 等<sup>[3]</sup>将无衍射光束可重建的特性应用于多平面光学微操作;Marcelino 等<sup>[5]</sup>用汉克尔波理论解释了障碍物对贝塞耳光束的遮挡和重建。最近的研究表明,不只是整数阶的 Bessel 光束可以重

建,分数阶的 Bessel 光束也可以重建<sup>[6]</sup>,通过聚焦透镜获得局域空心光束后还可以得到另一种形式的重建<sup>[7]</sup>,此外无衍射光束的重建在非线性光学中也得到研究<sup>[8~11]</sup>。但这些研究都是单层面的重建,本文主要研究重建 Bessel 光束的二次重建现象。利用轴棱锥产生无衍射 Bessel 光束后,在光束的传播中心轴上放置障碍物,观察 Bessel 光束通过障碍物后的传播特性及光强分布的变化。从理论上对光强的分布进行描述,模拟了不同传播距离的二维光强分布。然后进行 Bessel 光束二次重建的实验,测定了相关的参量。理论与实验证实,在一定的条件下,

收稿日期:2008-03-14;收到修改稿日期:2008-05-13

基金项目:国家自然科学基金(60477041)和福建省自然科学基金计划(A0710011, A0410017)资助项目。

作者简介:刘彬(1984—),女,新疆人,硕士研究生,主要从事光束传输与变换的研究。E-mail:pretty84@126.com

导师简介:吴逢铁(1958—),男,福建人,教授,博士,主要从事光束传输与控制、超短光脉冲及其非线性效应的研究。  
E-mail:ftwu@public.qz.fj.cn(通信作者)

被障碍物阻碍的 Bessel 光束在自由空间里可以重建并且可以多层次地重建。

## 2 理论分析与模拟

### 2.1 理论分析

Bessel 光束可以看作是由一系列的平面波传播到一角锥上而得到的,由于传播相同的距离其相移相同,光束是无衍射的。自由空间中这样的光束是不存在的,需要无穷大的能量才能在自由空间中无限传播,所以称为“近似无衍射光束”。在各向同性介质的单色光场中,亥姆霍兹波方程可以写为

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)E(r,t) = 0 \quad (1)$$

式(1)在柱坐标下的标量方程解为

$$E_n(r,\varphi,z) = A \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \exp(in\varphi) \quad (2)$$

(2)式是  $n$  阶贝塞耳方程的表达式,其光场分布包含 Bessel 函数。式中,  $J_n$  为第一类  $n$  阶贝塞耳函数,  $k_z$  和  $k_r$  分别表示自由空间中波矢的轴向和径向分量,  $k = 2\pi/\lambda = (k_z^2 + k_r^2)^{1/2}$ ,  $\varphi$  为角相位。

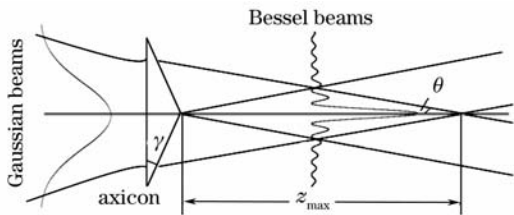


图 1 轴棱锥产生零阶 Bessel 光的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Bessel beam generated by an axicon

利用轴棱锥产生 Bessel 光束,如图 1 所示。其中,  $\gamma$  表示轴棱锥的底角,  $z_{\max}$  为最大无衍射距离。在自由空间中传播的理想 Bessel 光束具有无衍射特性,其中心光斑不会发散。若拥有无限的能量,它将永远保持光场不变性。在光束的传播轴上放置一不透明的障碍物,光束不会因此而停止传播,反而绕过障碍物继续传播,并在障碍物后方投下一片阴影区。但很快 Bessel 光束会恢复到原来的光强分布而实现重建。由简单的几何关系可以得到重建的最小距离<sup>[10]</sup>为

$$z_{\min} = \frac{ak}{2k_r} \quad (3)$$

式中,  $a$  为障碍物的横向尺寸,  $k$  为波矢。

### 2.2 数值模拟

理想无衍射光束的光场可以表示为

$$U(x,y,z) = J_0(k_r r) \exp(i\beta z) \quad (4)$$

式中,  $\beta$  表示传播常数。假设入射光的光场为  $U_1$ , 将障碍物放置在传播轴上,  $U_D$  表示被障碍物干扰的场,利用巴比涅原理,经过计算可以得到被障碍物干扰后的远场光强分布<sup>[3]</sup>

$$\lim_{z \rightarrow \infty} |U_D|^2 = \lim_{z \rightarrow \infty} (|U_1|^2 + |U_C|^2 - U_1 U_C^* - U_1^* U_C) \quad (5)$$

式中  $U_C$  表示与障碍物互补的孔径的衍射场。当知道障碍物的尺寸  $a$  时,可以算出由轴棱锥产生的 Bessel 光束被障碍物阻碍后重建的最小距离为

$$z_{\min} = \frac{a}{2(n-1)\gamma} \quad (6)$$

其中,  $n$  为轴棱锥材料的折射率。假定障碍物的尺寸为  $400 \mu\text{m}$ ,轴棱锥的底角和折射率分别为  $\gamma = 0.5^\circ$ ,  $n = 1.516$ ,由公式(6)可以算出重建的最小距离为  $44 \text{ mm}$ ,分别在  $z = 0$ ,  $z = z_{\min}/2$ ,  $z = z_{\min}$  以及  $z = 4z_{\min}$  处对光强进行模拟,图 2 为 Bessel 光束重建过程中的光强分布。

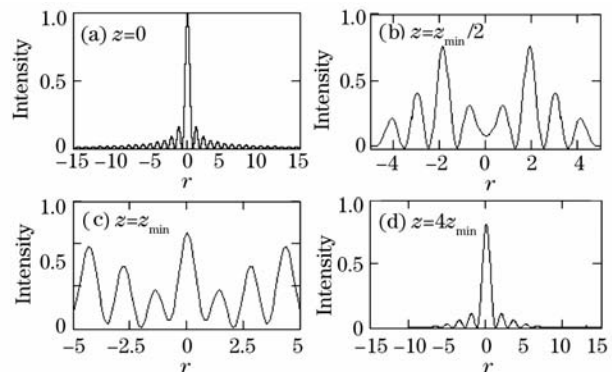


图 2 Bessel 光束重建过程中的光强分布图

Fig. 2 Intensity distribution of the reconstructed Bessel beam

图中横坐标为柱坐标下的径向坐标,已归一化,纵坐标表示光强。从图中可以看出,在  $z = 0$  处时是完整的 Bessel 光光强分布,当放上障碍物后光束发生了畸变,中心光强变小。随着距离的增大, Bessel 光束畸变会慢慢变小并最终消失,最后发生 Bessel 光束的重建现象。重建后 Bessel 光束的光强比之前的光强弱。当 Bessel 光束完全重建后,放上第二个障碍物, Bessel 光束第二次的重建过程与第一次的重建过程完全类似。

## 3 实验

利用不同尺寸的障碍物进行实验,采用测微尺的方法对障碍物的尺寸进行测量,测微尺的精度为  $20 \mu\text{m}/\text{格}$ <sup>[11]</sup>。实验中,准直扩束的 He-Ne 激光入

射到轴棱锥上,将障碍物置于轴棱锥出射光束的传播轴上,利用体视显微镜和 CCD 相机组成的系统记录截面光强分布,并利用测微尺对该光斑的大小进行测量。图中测量光斑所用的体视显微镜和 CCD 照相机组成的系统的放大倍数为  $50 \times 5$ ,在同样的放大倍数下拍摄测微尺的量程光斑,利用 Photoshop 软件综合两个光斑,通过精细的对比得到实验中所用障碍物的大小,图 3 为障碍物尺寸的测量图。

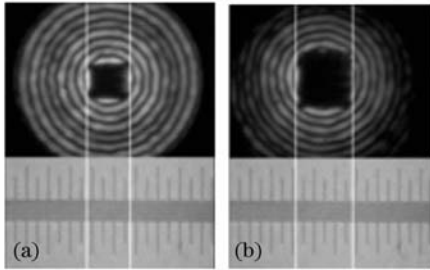


图 3 测微尺测定障碍物尺寸

(a) 第一个障碍物; (b) 第二个障碍物

Fig. 3 Obstacle dimension measured by mini-ruler

(a) first obstacle; (b) second obstacle

实验测得第一个障碍物的宽度为  $400 \mu\text{m}$ ,第二个障碍物的宽度为  $520 \mu\text{m}$ 。被障碍物阻碍的 Bessel 光束能够重建,从理论上讲,重建后的光束仍然能够再次重建。对 Bessel 光束进行二次重建实验。用准直扩束的激光光束  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  入射轴棱锥,光阑的半径为  $\varphi = 5 \text{ mm}$ ,轴棱锥底角  $\gamma = 0.5^\circ$ ,折射率  $n = 1.516$ 。在轴棱锥后产生无衍射 Bessel 光束,最大无衍射的距离为  $111 \text{ cm}$ ,在距离轴棱锥  $73 \text{ cm}$  处的光轴中心位置放上第一个障碍物  $O_1$ ,由体视显微镜(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)组成的系统,分别在不同的轴上距离处拍摄被障碍物阻碍的 Bessel 光束的截面光强分布。当 Bessel 光束完全重建后,将第二个障碍物  $O_2$  放在重建后的 Bessel 光束传输的中心轴上,利用上面的拍摄系统再次对不同距离处的截面光强分布进行记录。图 4 为实验原理图。

图 4 中, A 点表示从轴棱锥出射的 Bessel 光束,在其传输轴上 B 点处放置一障碍物  $O_1$ ,被障碍物遮住的图像如图中 C 点所示,经过一段距离后, Bessel 光束实现重建,如图中 D 点所示。在重建后的 Bessel 光束的传输轴 E 点处放置第二个障碍物  $O_2$ ,被遮挡的光斑如图 F 点所示,类似第一次重建。经过一段距离后, Bessel 光束又可以重建。具体实

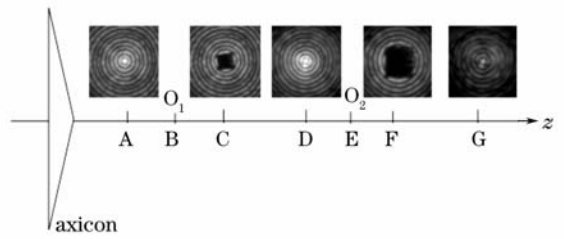


图 4 重建的实验结构图

Fig. 4 Reconstructed experimental scheme

验拍摄的光斑图如图 5 所示。轴棱锥顶角处  $z = 0$ 。

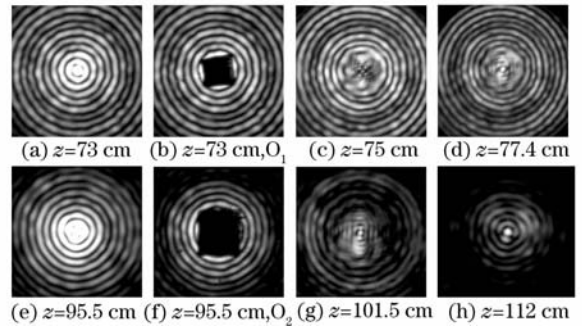


图 5 传输光束的截面光强分布实验拍摄图

Fig. 5 Cross sections intensity distribution of propagation beam

重建实验的障碍物的形状为方形,实际上一定尺寸任意形状的障碍物均能使 Bessel 光束实现重建。利用圆形障碍物进行了重建实验,图 6 为圆形障碍物重建的实验拍摄图。(轴棱锥顶角为  $z = 0$ )

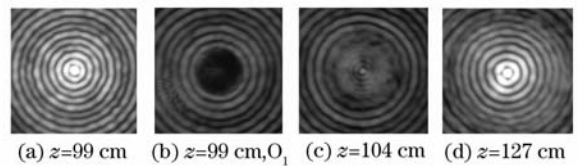


图 6 利用圆形障碍物实现 Bessel 光束重建的截面光强分布图

Fig. 6 Cross sections intensity distribution of reconstructed Bessel beam used a circular obstacle

## 4 结果讨论

从图 5 可以看出,当传输的 Bessel 光束被障碍物阻碍后,开始时中心光斑被遮挡住,随着距离的增大,中心光斑发生畸变。当到达一定的距离时, Bessel 光束会克服畸变并发生重建现象。图 5(a) 是 He-Ne 激光经过轴棱锥后出射的 Bessel 光束,放上障碍物后如图 5(b) 所示,经过一段距离后,图 5(d) 的光斑中心已经出现一个亮点,说明已经出现了重建现象。这里重建是指重建的中心光斑刚出现亮

点时的重建<sup>[12]</sup>。此时重建的最小距离为 44 mm。当 Bessel 光束完全重建时如图 5(e)所示,在传输轴上放置第二个障碍物如图 5(f)所示,经过重建后,第二次重建的光斑如图 5(h)所示。整体来看,比较第一次重建后的 Bessel 光斑和第二次重建后的 Bessel 光斑发现,第二次重建的 Bessel 光束的光斑亮度比第一次重建的 Bessel 光斑亮度低,这与图 2 中的模拟吻合。

上面的理论描述和实验相吻合。理论模拟时使用的障碍物大小为 400  $\mu\text{m}$ ,应用公式(6)所算出的最小的重建距离为 44 mm。实验中分别使用了 400  $\mu\text{m}$  以及 520  $\mu\text{m}$  的障碍物,其重建的最小距离理论计算分别为 44 mm 和 58 mm。这说明障碍物的尺寸越小,被挡住的光就越少就越容易重建。同样在实验中,如图 5(b)所示的第一个障碍物,在重建距离为 44 mm 处开始重建,而第二个障碍物理论上算出的最小重建距离为 58 mm,而实际的实验拍摄距离为 60 mm。理论与实验的误差可能是由于障碍物边缘的判定存在误差,不能精确地测定其尺寸大小。当然这并不影响 Bessel 光束重建的演义过程。

## 5 结 论

描述了 Bessel 光束经过障碍物阻碍后的重建过程,数值模拟了不同传输距离时被干扰的 Bessel 光束的二维光强分布图,对 Bessel 光束的二次重建以及实验中的相关参量进行了测定。所用障碍物的大小分别为 400  $\mu\text{m}$ ,520  $\mu\text{m}$ ,其最小重建距离分别为 44 mm,60 mm。理论和实验证实,在一定的条件下,被障碍物阻碍的 Bessel 光束在自由空间里可以重建并且可以多层面地重建,使无衍射光束能同时操作多个粒子成为可能,为多层面的操控粒子提供

了条件,研究结果拓宽了无衍射光束的应用。

## 参 考 文 献

- 1 J. Durnin. Diffraction-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**: 207~211
- 3 V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419**(4905): 145~147
- 4 R. P. MacDonald, S. A. Boothroyd, T. Okamoto *et al.*. Interboard optical data distribution by Bessel beam shadowing [J] *Opt. Commun.*, 1996, **122**: 169~177
- 5 Marcelino Anguiano-Morales, M. Maribel Méndez-Otero, M. David Itabe-Castillo *et al.*. Conical dynamics of Bessel beams [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(7): 078001~ 078009
- 6 Shaohua Tao, Xiacong Yuan. Self-construction property of fractional Bessel beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(7): 1192~1197
- 7 Liu Lan, Wu Fengtie. Description of bottle beam and reconstruction of Bessel beam based on diffraction integral theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):370~374  
刘 岚,吴逢铁. 衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J] *光学学报*, 2008, **28**(2)370~374
- 8 R. Gadonas, V. Jarutis, R. Paskauskas *et al.*. self-action of Bessel beam in nonlinear medium [J] *Opt. Commun.*, 2001, **196**:309~316
- 9 R. Butkus, R. Gadonas, J. Janusonis *et al.*. Nonlinear self-reconstruction of truncated Bessel beam [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**: 201~209
- 10 D. McGloin, K. Dholakia. Bessel beams: diffraction in a new light [J]. *Contemporary Physics*, 2005, **46**(1):15~28
- 11 Liu Bin, Wu Fengtie, Liu Lan. Influence of focal length of lens on sizes of bottle beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 406~409  
刘 彬,吴逢铁,刘 岚. 透镜焦距对局域空心光束尺寸的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):406~409
- 12 P. Fischer, H. Little, R. L. Smith *et al.*. Wavelength dependent propagation and reconstruction of white light Bessel beams [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**:477~482