文章编号 1674-2915(2009)04-0289-07

被动方式产生近似无衍射贝塞尔光技术

黄启禄,吴逢铁,卢文和
(华侨大学 信息科学与工程学院,福建 泉州 362021)

摘要:介绍了以被动方式产生近似无衍射贝塞尔光的基本原理。给出了双透镜轴棱锥法、不透明障碍物法和可调流体轴棱锥法等3种被动式产生近似无衍射贝塞尔光束的最新技术,分析了这3种方法的优缺点。双透镜轴棱锥法主要基于透镜球面像差的运用,与衍射轴棱锥、折射轴棱锥和早期的非球面轴棱锥相比,具有加工简单、便宜,易于制作大尺寸的特点;不透明障碍物法得到的贝塞尔光束具有很长的无衍射距离,其直径可通过选择不同焦距的准直透镜来得到调节;可调流体轴棱锥是一种产生贝塞尔光束的新型器件,它可以很容易地通过改变注入器件的液体的折射率来得到不同参量的贝塞尔光束。文章最后提出无衍射贝塞尔光的研究将向着光束质量好,距离远,可调谐性好,制作工艺简单的方向发展。

关 键 词:无衍射光束;被动产生方式;主动产生方式
中图分类号:O436.1 **文献标识码**:A

Generating approximate non-diffracting Bessel beams by using passive method

HUANG Qi-lu, WU Feng-tie, LU Wen-he

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

Abstract: The fundamental principle of generating approximate non-diffracting beams by using passive methods was introduced. Then, three kind of methods, namely, lens axicon method, opaque disk method, and tunable fluidic conical lens method, were given, and advantages and disadvantages of the methods were analyzed. The lens axicon is based on the use of the spherical aberration of the mirror surfaces, which is inexpensive and easy to manufacture into a element with large apertures as compared with diffractive axicons, refractive cone axicons, and earlier lens axicons with aspheric surfaces; the opaque disk can offer the Bessel beams with long non-diffracting distances, and the diameter of the central peak is adjusted by choosing the focal length of the collimating lens; the tunable fluidic conical lens is a new device for generating Bessel beams, which can obtain the Bessel beams with different parameters by varying the refractive indexes of the solution which is filled in the device. Finally, this paper points out that the generating methods of the non-diffracting Bessel beams tend to have good quality, higher speeds, longer distances and simpler manufacture technologies.

Key words: non-diffracting beam; passive generating method; active generating method

收稿日期:2009-04-14;**修订日期**:2009-06-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60477041);福建省自然科学基金计划资助项目(No. A0710011)

1 引 言

美国 Rochester 大学的 J. Durnin[1] 于 1987 年首次提出了“无衍射光”的概念,这种光束一直以来,特别是近几年引起了人们的特别兴趣和关注。无衍射贝塞尔光束的特点是在垂直于传播方向任意平面内初始光场分布不变,即光束强度及尺寸不随传播距离变化。由于理想的无衍射贝塞尔光携带无穷大的能量,因此实际工作中只能获得近似无衍射光束。目前,已有多种实验方法能够获得近似无衍射光束,这些方法可分为两大类,即主动式和被动式。所谓主动式就是通过特定结构的谐振腔由激光器直接产生贝塞尔光,而被动式则是由其他的光束转换为贝塞尔光。被动式较为成熟的方法有:环缝 - 透镜法[1,2]、计算机全息图法[3,4]、球差透镜法[5,6]、轴棱锥法[7,8]等等,其中用轴棱锥来生成近似无衍射光束的方法因其实验装置简单、转换效率高、光损伤阈值大[9,10]、可直接成腔[11,12]等优点而得到广泛的研究和应用。近似无衍射光束具有线聚焦特性,即光束主光斑尺寸小(约为波长量级)、强度高、方向性好、传输距离远等特点,它可应用于高精度定向或准直光学系统;可作为光刀来探测大物体的性质,研究它与小尺寸物体的散射作用及非线性光学的应用[13]。利用无衍射光产生局域空心光束(Bottle Beam)[14~16]也引起了人们的广泛关注。由于它具有三维封闭的暗中空区域和极高的强度梯度,因此可作为光学扳手[17,18]、光镊[19]和激光导管[20]等的工具,还可用于激光囚禁微观粒子,如中性原子、分子等[21]。此外,无衍射光束在自由空间传输中还可以实现自再现[22,23],可用于对微粒的多层面操控[24]。光束中心尺寸传播不变的特性可应用于原子光学[25]、一维胶体结构的组成研究[26]和气溶胶雾滴的导向[27]。最近,贝塞尔光的光传输不变性和自重现性还被应用于两光子穿透和细胞转染[28],避免了对微小聚集区域的调节。由于无衍射光束具有很好的应用前景,人们对其实现方法进行了不断地完善并取得了一定的成果。本文主要介绍几种被动式产生近似无衍射光的最新技术。

2 基础理论

无衍射贝塞尔光是自由空间标量波动方程的一组特殊解[1]。光波在无源的自由空间传播时满足波动方程:

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

该方程在柱坐标下通过分离变量可解得:

$$E(\rho,\varphi,z,t) = \mathrm{J}_m(\boldsymbol{\alpha}\rho)\exp(\mathrm{i}m\varphi)\exp[\mathrm{i}(\boldsymbol{\beta}z-\omega t)]$$

式中,$\boldsymbol{\alpha}^2+\boldsymbol{\beta}^2=(\omega/c)^2$($\omega$ 为角频率,c 为光速),$\boldsymbol{\alpha}$、$\boldsymbol{\beta}$ 分别是波传播方向平行和垂直的波矢量,$\rho^2=x^2+y^2$,x、y、z 为空间坐标,φ 为方位角,t 为时间,J_m 为 m 阶贝塞耳函数。若考虑的问题是关于 z 轴对称,$E(\rho,\varphi,z,t)$ 与 φ 无关,则 $m=0$。此时有:

$$E(\rho,\varphi,z,t) = \exp[\mathrm{i}(\boldsymbol{\beta}z-\omega t)]\mathrm{J}_0(\boldsymbol{\alpha}\rho), \qquad (2)$$

当 $0<\boldsymbol{\alpha}\leqslant\frac{\omega}{c}$,其相应的横平面上的光强为:

$$I(\rho,\varphi,z) = |\mathrm{J}_0(\boldsymbol{\alpha}\rho)|^2, \qquad (3)$$

由上式可以看出波动方程的解为一个无衍射光场,即对所有垂直于传播的平面波场,其光强分布 I 与距离 z 无关。J_0 是第一类零阶贝塞尔函数,因此,无衍射光束亦称为贝塞尔光束或无衍射贝塞尔光束,其分布如图 1 所示。中心光斑半径(即 J_0 的第一个零点对中心的距离 ρ)可以表示为 $\rho=\frac{2.405}{\boldsymbol{\alpha}}$,当 $\boldsymbol{\alpha}=\omega/c$ 时,中心光斑半径有最小值 $3\lambda/8$。

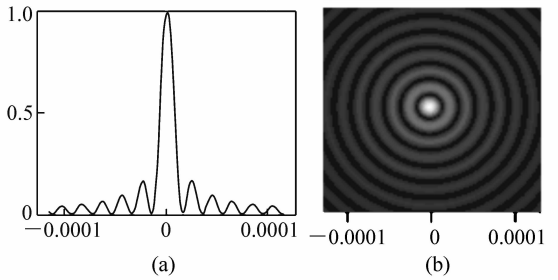


图 1 无衍射光束截面光强分布的理论模拟

Fig. 1 Theoretical simulation of optical intensity distribution of cross-section in Bessel beam

由于 Bessel 光束横截面光强分布呈贝塞尔函数分布且不随传播距离的变化而变化,在无限大的空间中必将占有无限大的能量,因此,Bessel 光只有理论意义而不能具体实现,实验中只能获得近似无衍射的贝塞尔光。

3　产生近似无衍射 Bessel 光的新技术

如引言所述,无衍射贝塞尔光束的实现方法可分为两种,即主动式和被动式。本文主要介绍几种最新的被动式产生近似无衍射贝塞尔光的新技术。

3.1　双透镜轴棱锥法

2004 年 Anna Burvall[29] 等人通过对环形透镜的球面像差性质的理论分析和实验研究,提出一种能产生贝塞尔光的新型元件,即双透镜轴棱锥。由几何光学可知,由于锥面波的收敛角随着光轴位置的变化而变化,由此导致正球面像差产生相当大变化的线宽;而负球面像差则产生相对稳定的收敛角,从而导致沿焦线上形成一个恒定的截面线宽的可能性。另一方面,由于光线在近轴处的像差几乎忽略,因此引入一个不透明物来阻挡透镜中心的部分光线是必要的。最后设计的元件由两透镜胶合而成,这两种透镜(BK7 和 SF2)的折射率分别为 1.515 09 和 1.643 79,并且在外表面涂有增透膜,后表面中心加镀一层金属薄膜。其结构如图 2 所示,表 1 为它的设计参数。

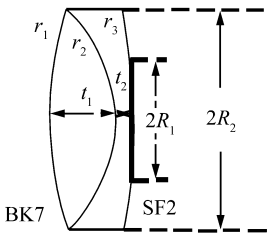


图 2　双透镜轴棱锥的结构示意图

Fig. 2　Structural diagram of lens axicon

表 1　设计参数

Tab. 1　Parameters of final design

曲率半径/mm	厚度/mm	孔半径/mm
$r_1 = 52.36$	$t_1 = 6.00$	$R_1 = 5.0$
$r_2 = -14.25$	$t_2 = 4.00$	$R_2 = 10.0$
$r_3 = -131.53$		

图 3 为双透镜轴棱锥产生近似无衍射光的实验装置。一束通过准直扩束后的光束通过轴棱锥后的轴上光强分布为:

$$I_{sp}(z) \propto \frac{\lambda \varphi'^2(\rho)}{|1/z - \varphi''(\rho)|}, \tag{4}$$

式中,λ 为入射光束的波长,$\rho = \rho(z)$ 为光线经过光轴 z 处在成像平面上的截面高度,相位方程 $\varphi(\rho) = \rho^2/2f + W(\rho)$,其中 $f = \dfrac{d_1 d_2 (R_2^2 - R_1^2)}{d_2 R_2^2 - d_1 R_1^2}$ 为双透镜轴棱锥的等效旁轴焦距(d_1, d_2 分别为焦线的起点和终点位置),$W(\rho)$ 为波前像差且由截面像差 $TA(\rho) = -f\dfrac{\partial W}{\partial \rho}$ 给出,最后设计取值为 $TA = 3.8 \times 10^{-3}\rho^3 + 1.6 \times 10^{-5}\rho^5 + \cdots$。

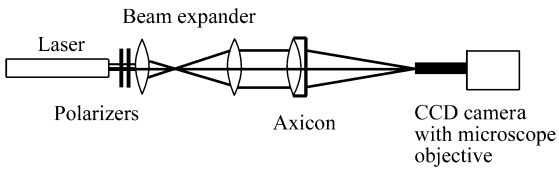


图 3　双透镜轴棱锥产生近似无衍射光的实验装置

Fig. 3　Experimental scheme of generating approximate non-diffracting beams by using lens axicon

图 4 所示为本实验室利用双透镜轴棱锥获得的近似无衍射光沿光轴的横向光强分布图,z 为距离轴棱锥后平面的距离(详细结果将另文报道)。

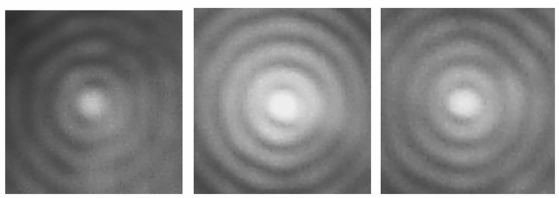


图 4　横向光强分布图

Fig. 4　Optical intensity distribution in cross section

3.2　不透明障碍物法

2007 年 Brunel 和 Coetmellec[30] 用一个不透

明的圆形障碍物来产生贝塞尔光束,其实验装置如图5所示。入射光为高斯光束,其电场表达式可写为:

$$E(\xi,\eta,z) = E_0(z)\exp(-\frac{\xi^2+\eta^2}{\omega(z)^2})\exp(-\frac{\mathrm{i}\pi}{\lambda}\frac{\xi^2+\eta^2}{R(z)}), \tag{5}$$

上式的 ξ 和 η 表示光束的横向坐标,λ 为入射光的波长,$E_0(z)$为初始光场大小,$\omega(z)$和$R(z)$分别为沿光轴 z 方向传播光束的光斑大小和曲率半径,其表达式如下:

$$\omega(z) = \sqrt{\omega_0^2[1+(\frac{z}{z_0})^2]},$$
$$R(z) = -z[1+(\frac{z_0}{z})^2], \tag{6}$$

其中 $z_0=\pi\omega_0^2/\lambda$ 为光束的瑞利长度,ω_0 为光腰半径。若在距离光腰前方 z_q 处放置一个不透明圆盘(见图5),圆盘的透过率为:

$$T(\xi,\eta) = \begin{cases} 1, \sqrt{\xi^2+\eta^2} < D/2 \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

(D 为不透明圆盘的直径),

则通过圆盘且离圆盘 z_c 处的光场表达式可写为:

$$E(x,y,z_c,-z_q) = \frac{\exp(\mathrm{i}2\pi z_c/\lambda)}{\mathrm{i}\lambda z_c}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}E(\xi,\eta,-z_q)[1-T(\xi,\eta)]$$
$$\exp\{\frac{\mathrm{i}\pi}{\lambda z_c}[(\xi-x)^2+(\eta-y)^2]\}\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta, \tag{8}$$

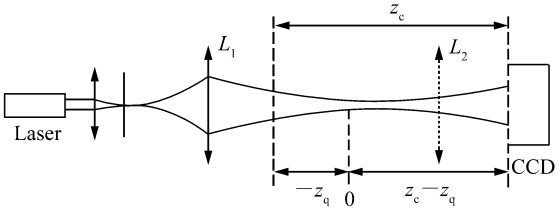


图5 障碍物法产生近似无衍射光的实验装置

Fig. 5 Experimental scheme of generating approximate non-diffracting beams through an opaque disk

图5为利用障碍物法产生近似无衍射光的实验装置图。图中准直入射光束 $\lambda=632.8$ nm,聚集透镜 L_1 的直径 $R=2$ cm,焦距 $f=10$ cm,准直透镜 L_2 焦距 $f=25$ cm。通常圆盘(直径 $r=300$ μm)放置在 L_2 的焦点处。图6是CCD摄像机上观察到的距离 L_2 后方不同位置的光强分布图。由图可知,中心光斑大小随着光线的传播而保持不变,3个图样的中心光斑有效直径都为(800±22) μm。值得注意的是,中心光斑的尺寸可以很容易地通过准直透镜的选择而改变。为了降低中心光斑的大小,选择焦距为6 cm的准直透镜,并放置在离障碍物6 cm处,可以得到中心光斑直径为200 μm,长度超过5 m的无衍射光。

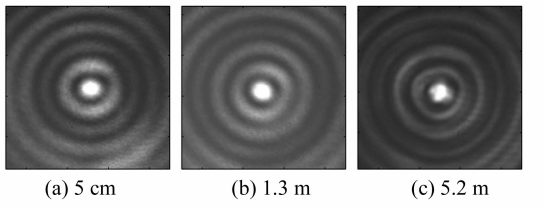
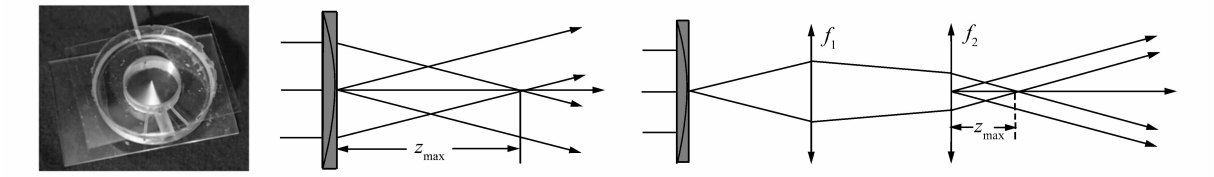


图6 Bessel光束的截面光强分布图

Fig. 6 Optical intensity distribution of Bessel beams

3.3 可调流体轴棱锥

为了便于获得不同空间特性的近似无衍射贝塞尔光,2008年Graham Milne等人设计了一种叫作液体轴棱锥新型器件[31]。液体轴棱锥的制作工艺相当简单,用一个很易购得的玻璃锥镜(EKSPLA,$\gamma=5°$)作为样品浸入到聚二甲基硅氧烷(PDMS,$n_{\mathrm{PDMA}}\approx1.43$)液体中,锥镜被硫化后并在PDMS嵌段层中留下锥形空穴。为了保证光学表面的平整度,嵌段层可嵌在两玻璃镜片中。微小的进出通道穿过PDMS被嵌入,使得液体可注入到锥形空穴中。图7(a)为流体轴棱锥。当注入液体的折射率大于PDMS时,光束通过轴棱锥可直接产生Bessel光,如图7(b)。当注入空腔的液体折射率小于PDMS时,则必须在轴棱锥后放置一个望远镜来产生Bessel光,如图7(c)。



(a) 流体轴棱锥的实拍照片　(b) $n_{ax}>n_{PDMS}$时的液体轴棱锥　(c) $n_{ax}<n_{PDMA}$时的液体轴棱锥

(a) Photograph of fluidic axicon prototype　(b) Fluidic axicon with $n_{ax}>n_{PDMS}$　(c) Fluidic axicon with $n_{ax}<n_{PDMS}$

图 7　流体轴棱锥的实拍照片和不同液体折射率的光路图

Fig. 7　Photograph of fluidic axicon prototype and optical paths with different liquid refractive indexes

简单的几何分析表明,虚锥由下式来描述:

$$\alpha_1 = \sin^{-1}\left(\frac{n_{PDMS}}{n_{air}}\sin\left(\sin^{-1}\left(\frac{n_{ax}}{n_{PDMS}}\sin\gamma\right)-\gamma\right)\right), \tag{9}$$

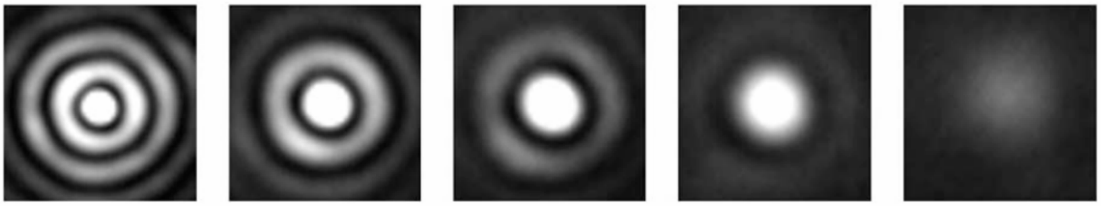
式中的 n_{PDMS}、n_{air}、n_{ax}分别为 PDMS、空气和注入液体的折射率。为了使上式简化,令 $n_{air}\approx 1$,$\sin\gamma\approx\gamma$,则式(9)可写为:

$$\alpha_1 = (n_{ax}-n_{PDMS})\gamma, \tag{10}$$

与合成的贝塞尔光相关的有效锥角为:

$$\alpha_2 = -(f_1/f_2)\alpha_1, \tag{11}$$

由式(11)可知,改变注入液体的折射率,就可以很容易地改变有效锥角,从而得到不同参量的贝塞尔光束。图 8 为注入液体(蔗糖)的折射率取不同值时的截面光强分布图。由图 8 所示,所得到的光束是明暗相间的同心圆环,中心光斑大小随着折射率的增加而增加,当蔗糖为 55% 时$n_{ax}\approx n_{PDMS}$,锥镜的作用消失而得到一高斯光束分布图。



0%　15%　25%　40%　55%

$n_{ax}=1.33$　$n_{ax}=1.35$　$n_{ax}=1.36$　$n_{ax}=1.39$　$n_{ax}=1.42$

图 8　不同蔗糖浓度的 Bessel 光束截面光强分布图,测量在距透镜 $f_2=5$ cm 处

Fig. 8　Bessel beam cross sections with different sucrose concentrations taken in 5 cm from lens f_2

4　结束语

通过对最新的几种被动方式产生近似无衍射光束技术的分析,总结了各种方法的优缺点。第一种方法中的双透镜轴棱锥产生的 Bessel 光束虽然不是很理想,但是却具有 Bessel 光束的主要特性,并且其加工简单,便宜,易于制作成大尺寸。第二种方法中的不透明障碍物法通过准直透镜的选择可以很容易对中心光斑大小进行改变,不过由于入射光的中心光强被阻档,所以能量利用率较低。第三种方法中的可调流体轴棱锥加工相当简单,并且可以很容易获得不同参数的 Bessel 光,但是在两种液体交换过程中,有一定的延迟时间,限制了其在高速运转中应用。由于无衍射贝塞尔光具有普通光源所不具备的优良特性,所以对该光束的研究很有意义。可以预测,无衍射贝塞尔光的研究将会向着光束质量好,距离远,可调谐性,制作工艺简单方向发展。随着研究的深入发展,其应用前景将更加的广阔。

参考文献:

[1] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffractive-free beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 1499-1501.

[2] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams(I): The scalar theory[J]. *J. Opt. Soc. Am(A)*, 1987, 4: 651-654.

[3] TURUENEN J, VASARA A, FRIBERG A T. Holographic generation of diffraction-free beams[J]. *Appl Opt.*, 1988, 27(19): 3959-3962.

[4] VASARA A, TUTUNEN J, FRIBERG A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1989, (A6): 1748-1754.

[5] HERMAN R M, WIGGINS T A. Production and uses of diffractionless beams[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1991, (A8): 932-942.

[6] HERMAN R M, WIGGINS T A. Apodization of diffraction – lessbeams[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31: 5913-5925.

[7] SCOTT G, MCARDLE N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon[J]. *Opt. Eng.*, 1992, 31(12): 2640-2643

[8] 江新光, 吴逢铁. 像散对轴棱锥衍射特性的影响与修正[J]. 物理学报, 2008, 57(7): 4202-4207.
JIANG X G, WU F T. Influence of astigmatism on the diffraction property of the axicon and its correction[J]. Acta Phys. Sinica, 2008, 57(7): 4202-4207. (in Chinese)

[9] 吴逢铁, 陈云彬, 郭东栋, 等. 纳秒无衍射 Bessel 光脉冲参量的分析与测定[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1073-1076.
WU F T, CHEN Y B, GUO D D, *et al.*. Parameter analysis and measurement of nanosecond diffraction – free Bessel laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(8): 1073-1076. (in Chinese)

[10] 吴逢铁, 郭东栋, 陈云彬, 等. 基于轴棱锥的主被动方式产生短脉冲高功率近似无衍射光[J] 光学 精密工程, 2007, 15(11): 1692-1697.
WU F T, GUO D D, CHEN Y B, *et al.*. Generation of short pulse and high power non-diffracting beam by active and passive schemes based on axicon[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1692-1697. (in Chinese)

[11] WU F T, CHEN Y B, GUO D D. Nanosecond pulsed Bessel-Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(22): 4943-4947.

[12] 郭东栋, 吴逢铁, 陈云彬, 等. 贝塞尔-高斯谐振腔的设计、模拟和实验[J]. 强激光与粒子束, 2008, (1): 26-30.
GUO D D, WU F T, CHEN Y B, *et al.*. Bessel-Gauss resonator based on an axicon with a plane output mirror[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2008, (1): 26-30. (in Chinese)

[13] MANZ T, SCHWARZ U T, MAIER M. Stimulated Stokes and anti-Stokes Raman scattering in liquid acetone with a Bessel beam[J]. *Opt. Commun.*, 2004, 235: 201-217.

[14] ARLT J, PADGETT M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: he optical bottle beams[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25: 191-193.

[15] 吴逢铁, 江新光, 刘彬, 等. 梯度棱锥产生单个 Bottle beam[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2410-2414.
WU F T, JIANG X G, LIU B, *et al.*. Single bottle beam generated by a gradient axicon[J]. *Acta Phys. Sinica*, 2009, 58(4): 2410-2414. (in Chinese)

[16] 吴逢铁, 曾夏辉. 相干贝塞尔光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 174-178.
WU F T, ZENG X H. Bottle beam with Talbot effect generated by interfering Bessel beams[J]. *Acta Opt. Sinica*, 2008, 28(1): 174-178. (in Chinese)

[17] PATERSON L, MACDONALD M P, ARLT J, *et al.*. Controlled rotation of optically trapped microscopic particle[J]. *Science*, 2001, 292: 912-914.

[18] MACDONALD M P, PATERSON L, VOLKE-SEPULVEDA K, *et al.*. Creation and manipulation of three – dimensional optically trapped structures[J]. *Science*, 2002, 296: 1101-1103.

[19] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, MELVILLE H, *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. *Nature*, 2002, 419: 145-147.

[20] TATARKOVA S A, SIBBETT W, DHOLAKIA K. Brownian particle in an optical potential of the Washboard type[J].

Phys. Rev. Lett.,2003,91:038101.

[21] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*,2003,424:810-816.

[22] 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.
LIU L,WU F T. Description of bottle beam and reconstruction of Bessel beam based on diffraction integral theory[J]. *Acta Opt. Sinica*,2008,28(2):370-374. (in Chinese)

[23] 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.
WU F T,JIANG X G,LIU B,*et al.*. Geometric optics analysis on self-reconstruction of the nondiffracting beam generated from an axicon[J]. *Acta Phys. Sinica*,2009,58(5):3125-3128. (in Chinese)

[24] 刘彬,吴逢铁,江新光. 利用无衍射 Bessel 光束多层面操控微粒[J]. 中国激光,2009,36(2):379-382.
LIU B,WU F T,JIANG X G. Particles manipulation in multi-plane using non-diffracting Bessel beam[J]. *Chinese J. Lasers*,2009,36(2):379-382. (in Chinese)

[25] ARLT J,HITOMI T,DHOLAKIA K. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams[J]. *Appl. Phys. B.*,2000,71(4):549-554.

[26] GARC S-CH VEZ V,MCGLOIN D,SUMMERS M D,*et al.*. The reconstruction of optical angular momentum after distortion in amplitude, phase and polarization[J]. *J. Opt. A:Pure. Appl. Opt.*,2004,6,S235-S238.

[27] SUMMERS M D,REID J P,MCGLOIN D. Optical guiding of aerosol droplets[J]. *Opt. Express.*,2006,14:6373-6380.

[28] TSAMPOULA X,GARCES-CHAVEZ V,COMRIE M,*et al.*. Femtosecond cellular transfection using a nondiffracting light beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2007,91:053902.

[29] BURVALL A,KOLACZ K,JAROSZEWICZ Z,*et al.*. Simple lens axicon[J]. *Appl. Opt.*,2004,43:4838-4844.

[30] MARC BRUNEL,COETMELLEC S. Generation of nondiffracting beams through an opaque disk[J]. *Opt. Soc. Am. A.*,2007,24:3753-3761.

[31] MILNE G,JEFFRIES G D M,CHIU D T. Tunable generation of Bessel beams with a fluidic axicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2008,92:261101.

作者简介:黄启禄(1985—),男,福建三明人,硕士研究生,主要从事被动式产生近似无衍射光的理论和实验研究。
E-mail:huangqilu@hqu.edu.cn
吴逢铁(1958—),男,福建泉州人,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