

# 蓝光LED产生局域空心光束

李攀 吴逢铁 何西 孙川

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

**摘要** 利用非相干蓝光LED和轴棱锥-透镜系统直接产生局域空心光束,证实了非相干光源通过轴棱锥-透镜系统可以得到局域空心光束。利用衍射理论和多波长叠加原理分析了具有一定频宽的部分相干光入射轴棱锥-透镜系统后的光场分布,并模拟了光束传输变换过程的三维光强分布及不同位置处的截面光强分布。实验采用蓝光LED结合轴棱锥-透镜系统产生局域空心光束,利用体视显微镜对不同位置处的光束截面光强分布进行记录。实验结果与理论分析相吻合,研究结果扩展了LED的应用,对粒子囚禁、原子冷却具有一定的指导和现实意义。

**关键词** 物理光学; LED光源; 局域空心光束; 轴棱锥; 透镜

**中图分类号** O435.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.042602

## Bottle Beam Generated by Blue LED

Li Pan Wu Fengtie He Xi Sun Chuan

*Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China*

**Abstract** A bottle beam is generated using an axicon-lens system and an incoherent blue LED source. It is demonstrated that the bottle beam can be obtained via an axicon-lens system illuminated by an incoherent source. According to diffraction theory and the superposition of multi-wavelength, the intensity distribution of light field which is generated by a certain frequency bandwidth of partially coherent light propagating through an axicon-lens system is analyzed. The three-dimensional intensity distribution of the beam evolution and the transverse intensity distributions at different propagating distances are simulated. In the experiment, a blue LED source combined with an axicon-lens system is used to generate the bottle beam. The transverse intensity distribution of the bottle beam is recorded by a stereomicroscope. The experimental results are consistent well with the theoretical analysis, and the result shows a guidance and practical significance for particle trapping and atom cooling.

**Key words** physical optics; LED source; bottle beam; axicon; lens

**OCIS codes** 260.1960; 230.3670; 220.4610; 080.4298

## 1 引言

Durnin<sup>[1]</sup>于1987年首次提出无衍射贝塞尔光束,它是自由空间标量波动方程的一组特殊解,其场分布具有第一类零阶贝塞尔函数 $J_0$ 的形式。近几十年来,贝塞尔光束因其在传输中具有中心光斑极小且不发散、遇到障碍物能够自重建<sup>[2]</sup>等独特性质引起了人们的广泛关注,被应用在光学微操作、生命科学和光学相干断层扫描<sup>[3-4]</sup>等领域。近年来国外已有学者开始用非相干光源来产生贝塞尔光束并取得一定成果<sup>[5-6]</sup>。本课题组已经利用非相干单色LED光源获得了近似零阶无衍射贝塞尔光束<sup>[7]</sup>和高阶贝塞尔光束<sup>[8]</sup>。本文在LED光源产生贝塞尔光束基础上利用透镜聚焦得到了局域空心光束。

局域空心光束是一道光束沿传输方向上存在三维封闭的空间暗域,暗域处的光强为零或接近于零且周围环绕的光具有较高的强度梯度<sup>[9]</sup>。目前,产生局域空心光束的方法有多种,轴棱锥产生贝塞尔光并用透镜

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-08; 网络出版日期: 2015-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(61178015)、福建省科技创新平台计划项目(2012H2002)、泉州市科技重点项目(2014Z127)

作者简介: 李攀(1987—),女,硕士研究生,主要从事光束传输与变化的理论和技术方面的研究。

E-mail: ahpanpanli@126.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: fengtie@hqu.edu.cn(通信联系人)

聚焦可形成单个局域空心光束<sup>[10]</sup>,两束同频率且具有不同径向波矢分量的贝塞尔光相干可形成周期性的局域空心光束<sup>[11]</sup>。Pu等<sup>[12]</sup>通过在激光光路中插入旋转的毛玻璃得到部分相干光进而产生尺寸可调节的局域空心光束, Lin等<sup>[13]</sup>利用激光作为光源在轴棱锥后聚焦产生超连续的局域空心光束,杜团结等<sup>[14]</sup>利用轴棱锥聚焦无衍射贝塞尔光束产生了周期性的局域空心光束, Ahluwalia等<sup>[15]</sup>利用双轴棱锥产生自成像局域空心光束, Chen等<sup>[16]</sup>利用光纤结构获得了尺寸可调的局域空心光束。上述的研究产生的局域空心光束都是采用激光作为光源,而非相干光聚焦产生局域空心光束具有光强分布比较均匀、波前相位不易发生畸变等特性,对于粒子囚禁、激光光镊等具有较高的应用价值。本文采用非相干LED光源获得局域空心光束,其主要技术原理是通过透镜对LED非相干光源产生的贝塞尔光束聚焦而产生局域空心光束。LED作为一种新型固态光源,具有节能、环保、寿命长、造价低廉、极易获得等诸多优点。此方法和用激光产生局域空心光束相比大幅度降低了实验成本,同时对部分相干光产生的贝塞尔光束聚焦特性的研究具有现实指导意义。

## 2 理论分析与数值模拟

LED光源频谱较宽,且发出的光在频率、振动方向、相位上不一致,以至其相干度几乎为零,所以一直以来都被视为非相干光源。LED发出的光波不是单一波长的光场分布,可以用一定谱宽范围的连续谱来描述。本文通过衍射理论给出多波长入射轴棱锥-透镜系统后的光场分布。图1为用积分球测得的实验所用一颗功率为3W的蓝光LED频谱图,测得主波长 $\lambda = 460\text{ nm}$ ,频谱半峰全宽 $\Delta\lambda \approx 23\text{ nm}$ 。对图1中频谱进行分析,将非单色光分解成不同频率的近似单色光的组合,取波长间隔 $\Delta\lambda = 4\text{ nm}$ ,得到各波长对应的相对光强如表1所示。

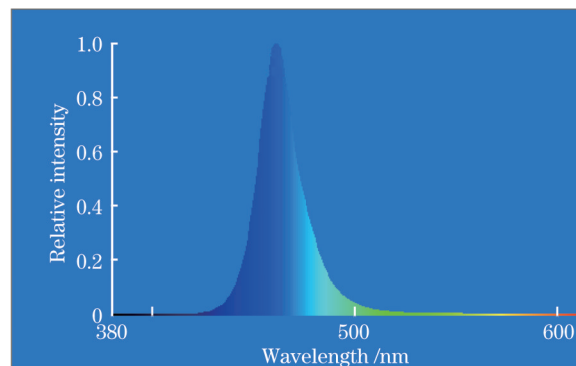


图1 蓝光LED频谱图

Fig.1 Spectral characteristics of blue LED

表1 蓝光LED光谱中不同波长对应的相对光强

Table 1 Relative intensity matched with different wavelengths in the light spectrum of blue LED

Wavelength $\lambda/\text{nm}$	436	440	444	448	452	456	460	464	468
Relative intensity	0.055	0.1	0.193	0.363	0.604	0.856	1	0.854	0.642
Wavelength $\lambda/\text{nm}$	472	476	480	484	488	492	496	500	504
Relative intensity	0.462	0.342	0.238	0.159	0.106	0.073	0.051	0.035	0.025

产生局域空心光束的光路示意图如图2所示,当入射轴棱锥的光束为多波长光波时,不同波长的光波在交叠区域将产生非相干叠加,而相同波长的光波可认为是相干的,将产生相干叠加,形成贝塞尔光束。由轴棱锥

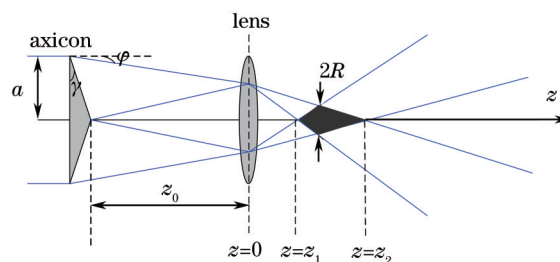


图2 产生局域空心光束的系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of bottle beam generation system

的透射率  $t(\gamma) = \exp[-ik(n-1)\gamma r]$  (其中  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  是波矢,  $n$  为轴棱锥的折射率,  $r$  和  $\gamma$  分别为轴棱锥的径向位置坐标和底角) 和柱坐标系下的菲涅耳衍射积分公式导出单波长平面波经轴棱锥变换传输  $z_0$  后的光场分布<sup>[17]</sup>

$$E(r_2, z_0) = -\frac{ik}{z_0} \exp(ikz_0) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z_0}\right) \int_0^R J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z_0}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z_0} - ik(n-1)\gamma r_1\right] r_1 dr_1, \quad (1)$$

式中  $R$  为入射在轴棱锥上的光束半径,  $r_1$  为轴棱锥入射面的径向坐标,  $r_2$  为轴棱锥后接收面的径向坐标。当入射光为多波长光场时折射率会随波长变化, (1) 式改写为

$$E(r_2, z_0, \lambda) = \frac{-ik(\lambda)}{z_0} \exp[ik(\lambda)z_0] \exp\left[\frac{ik(\lambda)r_2^2}{2z_0}\right] \times \int_0^R \left[\frac{k(\lambda)r_1 r_2}{z_0}\right] \exp\left\{\frac{ik(\lambda)r_1^2}{2z_0} - ik(\lambda)[n(\lambda)-1]\gamma r_1\right\} r_1 dr_1, \quad (2)$$

式中实验选用轴棱锥的材料为石英, 波矢  $k$  与折射率  $n$  均为波长的变化函数, 相应的色散公式为

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{0.6961633 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 4.67914826 \cdot 10^{-9}} + \frac{0.4079426 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 1.3512063 \cdot 10^{-8}} + \frac{0.89749 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 97.9340025 \cdot 10^{-6}}}. \quad (3)$$

同样利用柱坐标系下的菲涅耳衍射积分公式, 可计算出经过轴棱锥后的无衍射光束被透镜聚焦后的光场分布为

$$E(r, z, \lambda) = \frac{-ik}{z} \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \int_0^R E(r_2, z_0, \lambda) J_0\left(\frac{kr r_2}{z}\right) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z} - \frac{ik}{2f} r_2^2\right) r_2 dr_2. \quad (4)$$

将不同波长对应的光强分布进行叠加得到多波长入射轴棱锥-透镜系统后的光强分布为

$$I(r, z) = \sum_{l=1}^{18} C_l |E(r, z, \lambda_l)|^2, \quad (5)$$

式中  $C_l$  为不同波长  $\lambda_l$  对应的相对强度。根据(5)式对轴棱锥-透镜系统后光强分布进行模拟, 取参数  $\gamma = 1^\circ$ ,  $z_0 = 40$  mm,  $R = 1.8$  mm,  $f = 15$  mm, 结果如图3和图4所示。

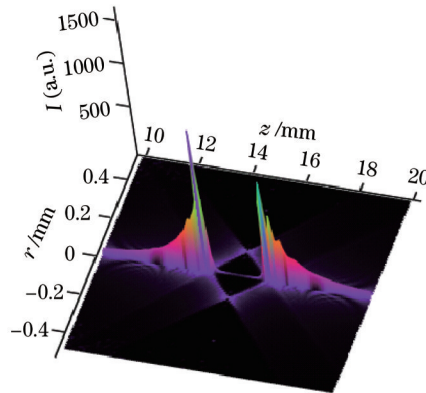


图3 局域空心光束的轴向三维光场分布

Fig.3 Three-dimensional axial intensity distribution of bottle beam

图3所示为非相干光经过轴棱锥-透镜系统后的演变情况及完整的局域空心光束的光场分布。贝塞尔光通过聚焦透镜后的一小段距离内光束仍然为贝塞尔光强分布, 对应图2中  $z$  轴上  $0 \sim z_1$  之间的圆锥形区域。随着传输距离的增加, 光束中心开始出现暗域, 并在聚焦透镜的焦平面处暗域达到最大。由图3可以看到焦平面处暗域直径最大且对应的外亮环最亮, 继续传播暗域变小并最后闭合, 然后又恢复了贝塞尔光束特性的分布。在前后两束贝塞尔光束之间形成一个局域分布的中空光束, 即局域空心光束。从图2中  $z_2$  以后的圆锥形相干叠加区域可以看出, 焦平面后出现了近似无衍射光束的重建现象。图4为对应于图3的局域空心光束在不同距离处截面光强分布, 选取透镜处为  $z$  轴原点。

### 3 实验验证及结果分析

实验装置如图5所示, 在光源与光阑之间放置一个锥形的聚光筒, 这样光源发出来的光在聚光筒中经过多次反射再通过光阑限孔后光强分布会变得更加均匀, 可以提高光场的空间相干性。图5中P为直径  $d=0.1$  mm 的

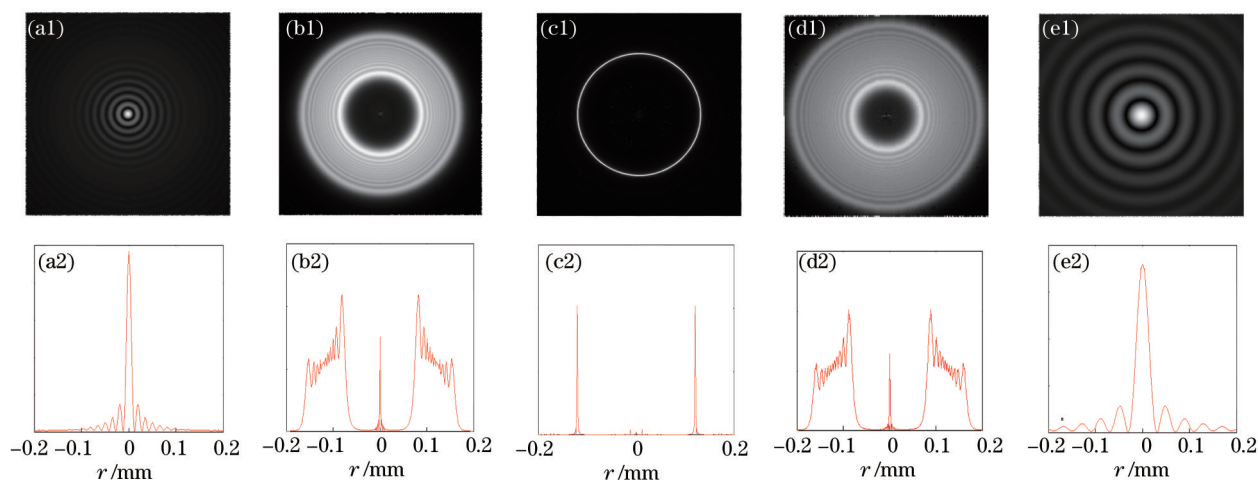


图4 模拟所得不同位置处的光强截面图。(a)  $z=8$  mm; (b)  $z=14$  mm; (c)  $z=15$  mm; (d)  $z=18$  mm; (e)  $z=33$  mm

Fig.4 Intensity distribution of cross section at different propagation distances in simulation. (a)  $z=8$  mm; (b)  $z=14$  mm; (c)  $z=15$  mm; (d)  $z=18$  mm; (e)  $z=33$  mm

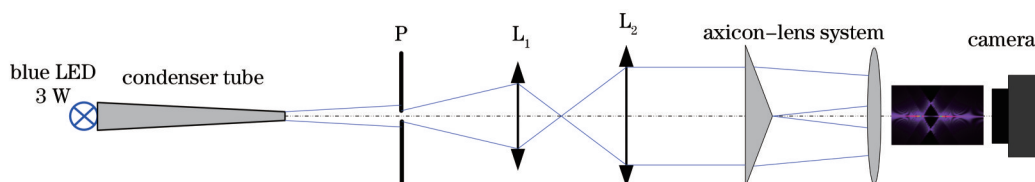


图5 实验装置图

Fig.5 Device of experiment

光阑,光源与光阑之间距离  $D=350$  mm,焦距  $f_1=15$  mm、 $f_2=190$  mm 的透镜  $L_1$ 、 $L_2$  在光路中作为准直扩束系统,实验采用的轴棱锥角度  $\gamma=1^\circ$ ,材料为石英。LED光源发出的光经聚光筒聚焦在经过光阑P进入由  $L_1$ 、 $L_2$  构成的准直扩束系统,得到光强分布均匀的平行光,再将焦距  $f_3=15$  mm 的聚焦透镜放在距轴棱锥后 100 mm 处,聚焦后的光束投影到接收屏上,用体视显微镜(可连续放大,最大放大倍率为 50)和数码照相机(可连续放大,最大倍率为 5, 2560 pixel  $\times$  1920 pixel)组成的光学系统观察并记录光强分布。实验中测得入射轴棱锥的光束半径  $a \approx 1.8$  mm,  $z_0=100$  mm。实验中测得局域空心光束起点位置  $z_1=14$  mm, 终点位置  $z_2=24.5$  mm, 局域空心光束的中心暗域长度  $\Delta z=10$  mm。将长为 1 mm 的微尺放在实验装置中的立体显微镜下放大与实验拍摄光斑图的相同倍数进行拍摄,然后与所拍摄的聚焦透镜的焦平面处暗域的光强分布图进行比较,如图 6 所示,可以测出实验拍摄的聚焦透镜的焦平面处暗域的大小约为 0.28 mm。由几何光学计算<sup>[18]</sup>得到局域空心光束起点位置  $z_1=13.876$  mm, 终点位置  $z_2=24$  mm, 局域空心光束的中心暗域长度  $\Delta z=10.124$  mm, 焦平面处最大暗域直径为 0.24 mm。可以看出,理论计算与实验结果基本吻合。

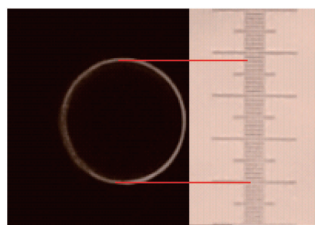


图6 局域空心光束最大暗域直径的测量( $z=15$  mm)

Fig.6 Measurement of biggest dark field diameter in bottle beam ( $z=15$  mm)

图 7 给出了非相干 LED 光源产生无衍射贝塞尔光经透镜聚焦后形成的局域空心光束及无衍射贝塞尔光束进一步重建过程的光强分布演绎过程。在光轴上随着  $z$  的增大,首先形成了类似无衍射光束,逐渐演变成有着强度为零的暗中空区域,且到达焦平面处暗域半径与外围亮环的亮度最大;随着  $z$  的继续增大,相应的暗域半径和外环亮度逐渐变小直至焦平面后暗域消失,出现了类似无衍射光束的重建现象,进而构成了

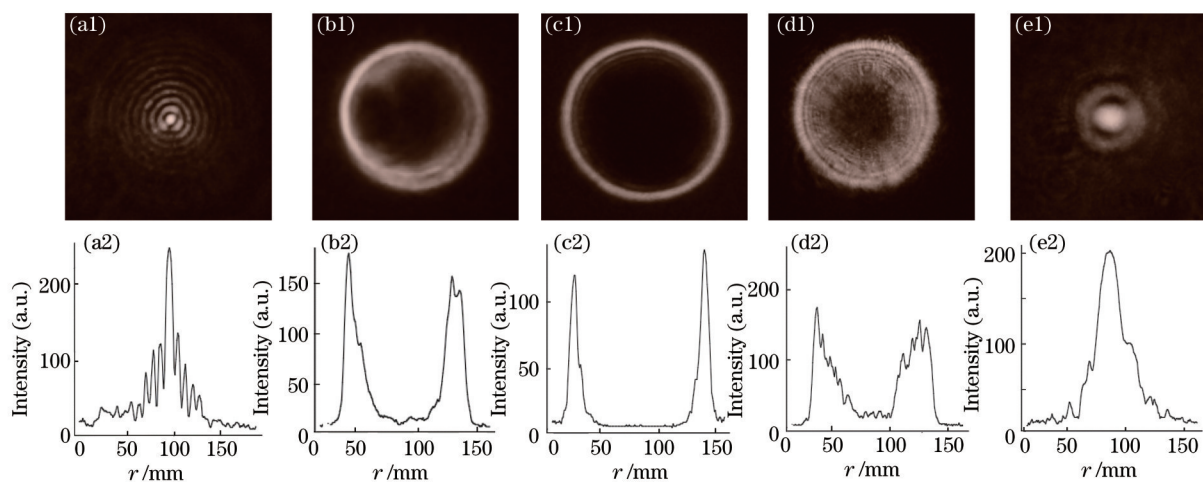


图7 实验所得在不同位置处截面光强分布实验图。(a)  $z=8$  mm;(b)  $z=14$  mm;(c)  $z=15$  mm;(d)  $z=18$  mm;(e)  $z=33$  mm  
 Fig.7 Intensity distribution of cross section distribution at different distances in experiment. (a)  $z=8$  mm;(b)  $z=14$  mm;(c)  $z=15$  mm;(d)  $z=18$  mm;(e)  $z=33$  mm

完整的局域空心光束。对比图4和图7,可以看到实验与理论分析较为符合。由几何关系,根据文献[7],在实验过程中可以看到重建后的无衍射光束外围亮环的环数比刚开始形成无衍射光束外围亮环稀疏且半径较大,并且由于LED光源相干性差重建后的无衍射光束外围亮环的环数随着传播距离 $z$ 的增大变得模糊,中心亮斑半径随着光的传播明显增大。

## 4 结 论

采用LED非相干光源产生局域空心光束,与以往产生局域空心光束的激光光源相比具有结构简单、可以大幅度降低光源成本,扩展了LED光源在生命科学学科的应用。所产生的局域空心光束可以用于粒子囚禁和原子冷却,为获取局域空心光束提供了一种简洁、有效的新途径,理论分析和数值模拟与实验结果很好地吻合。

## 参 考 文 献

- 1 Durnin J. Diffraction-free beam[J]. J Phys Rev Lett, 1987, 58 (15): 1499-1501.
- 2 Florian O F, Alexander R. Propagation stability of self-reconstructing Bessel beams enables contrast-enhanced imaging in thick media [J]. Nat Commun, 2012, 3: 632.
- 3 Gao L, Shao L, Chen B C, *et al.*. 3D live fluorescence imaging of cellular dynamics using Bessel beam plane illumination microscopy [J]. Nature Protocols, 2014, 9(5): 1083-1101.
- 4 Lorensen D, Singe C C, Curatolo A, *et al.*. Energy-efficient low-Fresnel-number Bessel beams and their application in optical coherence tomography [J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 548-551.
- 5 Zhu X, Schülzgen A, Wei H, *et al.*. White light Bessel-like beams generated by miniature all-fiber device [J]. Opt Express, 2011, 19(12): 11365-11374.
- 6 Basanoa L, Ottonello P. Demonstration experiments on nondiffracting beams generated by thermal light [J]. Journal Association of Physics, 2005, 73(9): 826-830.
- 7 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Fan Dandan, *et al.*. Non-diffraction Bessel-like beam generated by green LED source [J]. SCINTIA SINICA Physica Mechanica & Astronomica, 2012, 42(8): 805-811.  
程志明, 吴逢铁, 范丹丹, 等. 绿光LED产生无衍射贝塞尔光束[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2012, 42(8): 805-811.
- 8 He Xi, Wu Fengtie, Li Pan, *et al.*. High order Bessel beams generated by using incoherent LED light source [J]. SCINTIA SINICA Physica Mechanica & Astronomica, 2014, 44(7): 705-711.  
何西, 吴逢铁, 李攀, 等. 非相干LED光源产生高阶贝塞尔光束[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44(7): 705-711.
- 9 Arlt J, Padgett M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam [J]. Opt Lett, 2000, 25(4): 191-193.
- 10 Chávez C S, New G H C. Evolution of focused Hankel waves and Bessel beams [J]. Opt Commun, 2000, 181(4-6): 369 -

377.

- 11 Wu Fengtie, Liu Bin, Lu Wenhe, *et al.*. The experiment study on of bottle beam generated by interfering [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.
- 12 Pu J X, Dong M M, Wang T. Generation of adjustable partially coherent bottle beams by use of axicon–lens system [J]. Appl Opt, 2006, 45(29): 7553–7556.
- 13 Lin J H, Wei M D, Liang H H, *et al.*. Generation of supercontinuum bottle beam using an axicon [J]. Opt Express, 2007, 15(6): 2940–2946.
- 14 Du Tuanjie, Wu Fengtie, Wang Tao, *et al.*. Description of interference theory on generated period Bottle beam by focus non–diffracting beams [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0908001.  
杜团结, 吴逢铁, 王涛, 等. 干涉理论对聚焦无衍射光产生周期局域空心光束的描述[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0908001.
- 15 Ahluwalia B P S, Cheong W C, Yuan X C, *et al.*. Design and fabrication of a double–axicon for generation of tailorable self–imaged three–dimensional intensity voids [J]. Opt Lett, 2006, 31(7): 987–989.
- 16 Chen Y H, Yan L, Rishøj L, *et al.*. Dynamically tunable optical bottles from an optical fiber [J]. Opt Lett, 2012, 37(16): 3327–3329.
- 17 Lu Wenhe, Wu Fengtie, Ma Baotian. A bottle beam generated by a ring obstacle–axicon [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(9): 6101–6105.  
卢文和, 吴逢铁, 马宝田. 环形障碍物–轴棱锥产生局域空心光束[J]. 物理学报, 2010, 59(9): 6101–6105.
- 18 M D Wei, W L Shiao, Y T Lin. Adjustable generation of bottle beam and hollow beams using an axicon [J]. Opt Commun, 2005, 248(1–3): 7–14.

栏目编辑: 史敏