

doi: 10.3788/gzxb20164505.0511002

无衍射光束提高成像系统分辨率

陈姿言, 胡威旺, 吴逢铁, 朱清智, 何艳林

(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:设计了一种在非相干光源下利用轴棱锥产生的无衍射光束成像系统. 基于衍射积分理论与点扩散函数推导出成像系统分辨率的表达式, 利用光学软件对无衍射光束成像系统的初始结构模型进行仿真, 并以蓝光 LED 作为光源, 将条纹状物体、透镜组以及轴棱锥等光学元件组合为成像系统进行实验. 结果表明: 实验结果与理论分析相符, 即非相干光源无衍射 Bessel 光束成像系统利用无衍射光束的特性能够提高成像分辨率.

关键词:无衍射 Bessel 光束; 轴棱锥; 非相干光源; 成像系统; 分辨率

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0511002-5

Non-diffraction Beam Improves the Resolution Ratio of Imaging System

CHEN Zi-yan, HU Wei-wang, WU Feng-tie, ZHU Qing-zhi, HE Yan-lin

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: An incoherent source non-diffraction beam imaging system was designed under incoherent source by using the axicon. The formula of the resolution of the imaging system was derived based on the the diffraction integral theory and the point spread function of the system. The optical software was used to simulate the initial structure model of the non-diffraction beam imaging system. With a blue light LED as the light source, combining with the optical components such as the striped object, lens and axicon, the experimental verification was conducted. According to the experimental results, the incoherent source non-diffraction Bessel beam imaging system can enhance the image resolution by applying the non-diffraction beam properties, which is consistent with theoretical derivation.

Key words: Non-diffraction Bessel beam; Axicon; Incoherent source; Imaging system; Resolution

OCIS Codes: 110.0110; 050.1970; 120.4820

0 引言

美国 Rochester 大学的 J. Durnin 于 1987 年提出了“无衍射光束”这一概念^[1], 它是一种在传播方向上不发散的光束, 且在遇到障碍物后, 能够自重建^[2]. 由于该光束具有这两种性质, 因此它在精密光学检测^[3]、光学微操作和光学囚禁^[4]、带电粒子和中性原子引导^[5]、光学相干断层扫描^[6]等方面有着重要的应用. 随着对无衍射光束应用的深入研究, 研究者们发现将无衍射光束引入成像系统可以提高成像质量, 如在 2013 年 Craig Snoeyink 等提出了无衍射贝塞尔(Bessel)光束显微镜(Bessel Beam Microscopy, BBM)系统^[7].

轴棱锥是用于产生无衍射贝塞尔(Bessel)光束最常见的光学元件之一, 它是 1954 年由 Mcleod 提出的一种非球面线聚焦透镜^[8]; 其相对于其它产生无衍射光束的元件, 具有能量利用率高、制造容易和成本低的特点, 因此被广泛应用于无衍射光学系统中.

本课题组多年从事无衍射 Bessel 光束的研究, 在无衍射光束的自重建特性^[9]、无衍射光束聚焦产生局域空心光束^[10]、非相干 LED 光源产生高阶 Bessel 光束^[11]等方面做了相关理论和实验研究工作. 本文设计了一种非相干光源无衍射 Bessel 光束成像系统: 计算出平行光入射轴棱锥后的光强分布, 再根据瑞利判据得出该成像系统的分辨率; 利用 ZEMAX 光学设计软

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61178015)、福建省科技创新平台计划项目(No. 2012H2002)和泉州市科技重点项目(No. 2014Z127)资助

第一作者: 陈姿言(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为特殊光束的传输与变换, Email: 522437223@qq.com

导师(通讯作者): 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学, Email: fengtie@hqu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-30; 录用日期: 2016-01-26

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

件对无衍射光束成像系统的初始结构模型进行仿真模拟,模拟出成像截面图、径向光强分布图以及调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线;最后进行实验验证.理论分析、仿真模拟、实验结果均吻合.无衍射光束成像系统利用轴棱锥的线聚焦特性,使成像在最大无衍射距离内的图像有更高的分辨率,为光学高分辨率成像技术提供了技术支持.

1 理论分析

无衍射 Bessel 光是自由空间标量波动方程的一组特殊解,其电场分布 E 满足标量亥姆霍兹波动方程,利用分离变量法将时间和空间分开求解,解得

$$E(\rho, \phi, z, t) = \exp[i(\rho z - \omega t)] J_0(\alpha \rho) \quad (1)$$

式中, ρ, ϕ, z 分别为柱坐标的径向距离、方位角及轴向距离; α 和 β 分别为径向和横向的波矢分量; ω 为光波的频率; J_0 为零阶 Bessel 函数.从式(1)可知,传播距离 z 只出现在相位部分,而光场的横向分布与 z 无关,则横向平面上的光强为

$$I(\rho, \phi, z) = |J_0(\alpha \rho)|^2 \quad (2)$$

由式(2)可知, Bessel 光束与传输距离无关,因此具有“无衍射”特性.

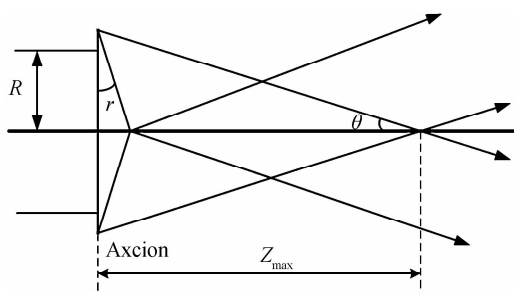


图 1 轴棱锥产生无衍射光束的原理

Fig. 1 The Schematic diagram of Bessel beam by axicon

从图 1 中可以看出,在轴棱锥后菱形区域中,由波矢位于同一锥面上的平面波叠加产生 Bessel 光束, Z_{\max} 为 Bessel 光束的最大无衍射距离.

轴棱锥的振幅透过率函数为

$$t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r] \quad (3)$$

式中, γ 为轴棱锥底角, n 为折射率, r 为径向距离.

平面波垂直照射到轴棱锥时,将式(3)代入衍射积分公式,则轴棱锥后的光场分布为

$$E(\rho, z) = -\frac{ikE_0}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) \times \int_0^a J_0\left(\frac{k\rho\rho'}{z}\right) t(r) \exp\left[\frac{ikr^2}{2z}\right] r dr \quad (4)$$

式中, E_0 为入射平面波光场,当入射光为平行光时 $E_0 = 1$,为入射光波长,取轴棱锥透镜的顶点为坐标原点,由式(4)可得到光强分布为

$$I(\rho, z) = \frac{k^2}{z^2} \left| \int_0^a J_0\left(\frac{k\rho\rho'}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr^2}{2z} - ik(n-1)\gamma r\right] r dr \right|^2 \quad (5)$$

轴棱锥后产生的无衍射 Bessel 光束在其最大无衍射距离内光强分布几乎不变,具有明显的 Bessel 光束特性,中心光斑极小且不发散,具有很高的相对亮度.因此,本文将无衍射 Bessel 光束应用在成像系统中,使物体在最大无衍射距离内成清晰像.

光学系统对点物的响应可用点扩散函数(Point Spread Function, PSF)来描述^[12],它是评价光学成像系统质量的重要函数.根据式(4)、(5)可进行点扩散函数的计算.将轴棱锥加入到圆形光瞳的成像系统,可将轴棱锥的透过函数看成广义光瞳函数的一部分^[13],则离焦下的成像系统光瞳函数为

$$P(x, y) = Q(x, y)t(r) \exp[i(x^2 + y^2)\phi] \quad (6)$$

式中, $Q(x, y)$ 为成像系统的原光瞳函数; ϕ 为离焦量.将式(6)与 Bessel 函数 J_0 代入点扩散函数公式并将平面坐标转化成极坐标,可得到轴上点的点扩散函数为

$$h(\rho_1, \phi) \approx 2\pi \sqrt{\frac{\pi}{|\phi|}} \rho_s J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z i} \rho_s \rho_1\right) \times \exp\left[\frac{-ik(n-1)\theta D}{2} \rho_s + i\phi \rho_s^2\right] \quad (7)$$

在非相干照射方式下,点扩散函数为

$$h_I(x, y, z) = |h(x, y, z)|^2 = |F\{Q(\rho, \phi)\}|^2 \quad (8)$$

根据式(7)、(8)可得,非相干照明下加入轴棱锥后成像系统的点扩散函数为

$$h_I(\rho_1, \phi) \approx \frac{4\pi^2}{|\phi|^2} \rho_s^2 J_0^2\left(\frac{2\pi}{\lambda z i} \rho_s \rho_1\right) = \frac{4\pi^3}{|k W_{20}|} \rho_s^2 J_0^2\left[\frac{k(n-1)\theta D}{z_i W_{20}} \rho_1\right] \quad (9)$$

式中, W_{20} 称为 Hopkins 离焦因素,是衡量离焦程度的一个重要指标.

当两个相邻像点之间的间隔等于艾里斑的半径时,根据瑞利判据,恰巧能够分辨出这两个物点,设艾里斑的半径为 δ ,则成像系统分辨率为

$$\delta = 1.22(\lambda/D) f \quad (10)$$

式中, f 表示系统焦距, D/f 为相对孔径.

对不同光学系统,成像分辨率的表达形式不同.在显微镜成像系统中一般用数值孔径($NA = n \sin \alpha$)表示,式(10)重新记为^[14]

$$\delta = 0.61(\lambda/NA) \quad (11)$$

式中, λ_0 表示光在真空中的波长,式(11)将分辨极限定义为点源间距,点源图像的最大值落在另一个最小值上面^[15].运用几何学, C_{\max} 为此光学系统中轴棱锥和体式显微镜之间的距离,即

$$C_{\max} = \frac{r_a D}{\gamma(n-1)} \quad (12)$$

式中, r_a 是光束入射轴棱锥的半径.如果显微镜的角放大率是不变的,那么体式显微镜成像平面(入瞳处)与测量平面(目镜处)的距离为

$$\frac{d_m}{f_{\text{obj}}} = \frac{d_i}{C_{\max}} \quad (13)$$

式中, d_m 是最小分辨距离, d_i 是成像平面与测量平面之间的距离, f_{obj} 是体式显微镜物镜的焦距. 要确定两个点光源测量平面之间的最小分辨距离(d_m), 将成像平面与测量平面的距离设置为用于瑞利判据的距离, 代入式(13)得

$$d_m = 0.38 \frac{\lambda}{r_a / f_{obj}} \quad (14)$$

式(14)可以通过显微镜的数值孔径来表达, 由于 $NA = r_a / f_{obj}$ [16], 这样就得出这个衍射极限分辨率的表达式为

$$d_m = 0.38 \frac{\lambda}{NA} \quad (15)$$

式(15)与式(11)相似, 但是式(15)的系数是 0.38, 因此可以说明成像系统的分辨率提高了.

2 仿真模拟

利用光学设计软件 ZEMAX 非序列模式建立成像系统初始结构模型, 如图 2. 光源采用 LED 模型, 并设置光束为平行光; 成像物体采用间隔为 0.1 mm 的明暗相间的条纹状光栅; 轴棱锥设置为 H-K9L 玻璃, 底角为 1° 的非球面线聚焦透镜, 利用公式计算出轴棱锥产生无衍射光束的最大无衍射距离 $Z_{max} = \frac{R}{(n-1)\gamma} =$

26.2 cm, 将成像平面放在这个距离内. 则分别得到未加入轴棱锥和加入轴棱锥时的成像接收面截面图和径向光强分布图, 如图 3.

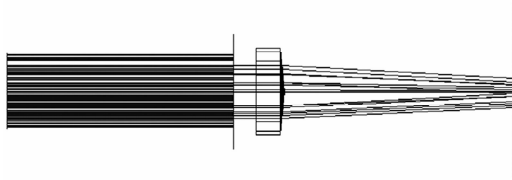
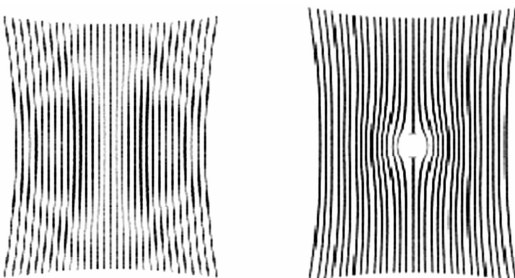


图 2 无衍射 Bessel 光束成像系统

Fig. 2 The imaging system of the non-diffracting Bessel beam

在图 3 中, 加入轴棱锥时条纹状物体虽然受到底角影响, 但是所成的像明显比未加入轴棱锥时要清晰, 并且物体的条纹状图形没有发生明显的扭曲. 然后利用 ZEMAX 软件序列形式模拟此系统的调制传递函数曲线, 如图 4.



(a) Cross section of imaging's receiving surface

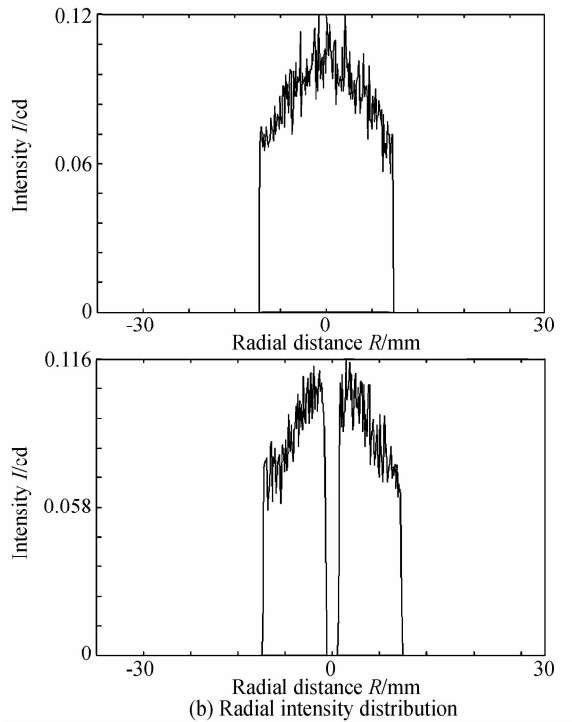
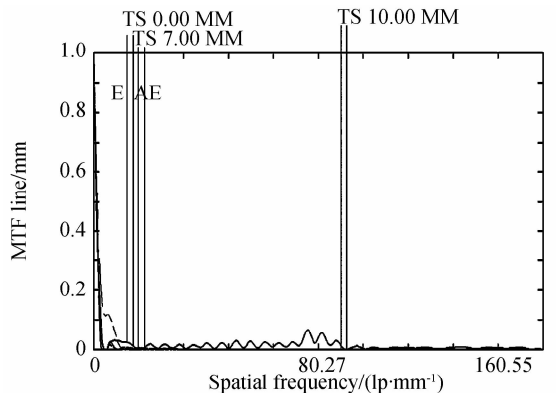
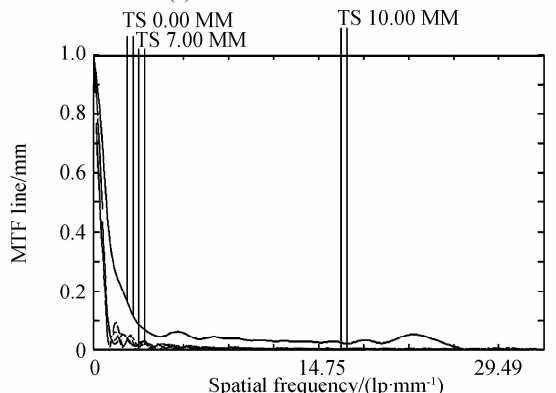


图 3 未加入轴棱锥与加轴棱锥时的成像接收面截面图与径向光强分布

Fig. 3 The imaging section and radial intensity distribution without and with axicon



(a) The MTF curve without axicon



(b) The MTF curve with axicon

图 4 MTF 曲线

Fig. 4 The MTF curve

图 4 中的实线表示的是 MTF 截止频率,当系统的截止频率接近为 0 时,就会达到分辨极限,图中加入轴棱锥时,成像系统的截止频率得到了达到 27 lp/mm,进一步说明了加入轴棱锥后,系统拥有较好的 PSF 分布,则成像质量就更好.

3 实验与分析

实验装置如图 5,在光路中,光源采用蓝光 LED,并加入光衰片,目的是获得合适的光强,更有利于观

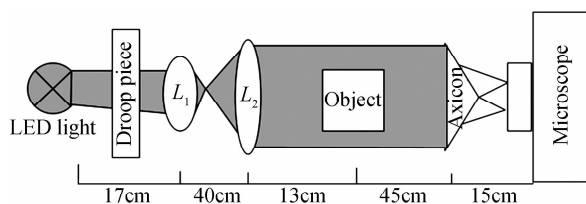


图 5 无衍射 Bessel 光束成像实验装置

Fig. 5 The imaging experimental device of the non-diffracting Bessel beam

察;由于 LED 是非相干光源,且光束是发散的,而要使轴棱锥产生无衍射光束需将光源变成平行光入射,因此加入了准直扩束系统,透镜组 L_1 和 L_2 的焦距分别为 $f_1 = 15 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 190 \text{ mm}$;光束经过透镜后入射到成像物体,选用宽度为 0.1 mm 的明暗相间竖条纹;光束经过成像物体后,入射到放在系统出瞳处且底角为 1° 的轴棱锥上,这是一种非球面线聚焦透镜,能使不同距离处的光线具有不同的像点位置,并将轴上点光源发出的光线连续地会聚到沿轴线不同的位置上;最后将体式显微镜放在最大衍射距离 ($0 \sim 26.2 \text{ cm}$) 内,实验中取 z 为 12 cm 处,并将像面放大 $300\times$ 、 $400\times$ 、 $500\times$ (目镜放大倍数为 $10\times$,物镜放大倍数分别为 $30\times$ 、 $40\times$ 、 $50\times$),并利用自带数码相机分别拍摄截面光强分布图,将图片导入 Mathcad 中,绘制出相对应的径向光强分布图,如图 6 和图 7.

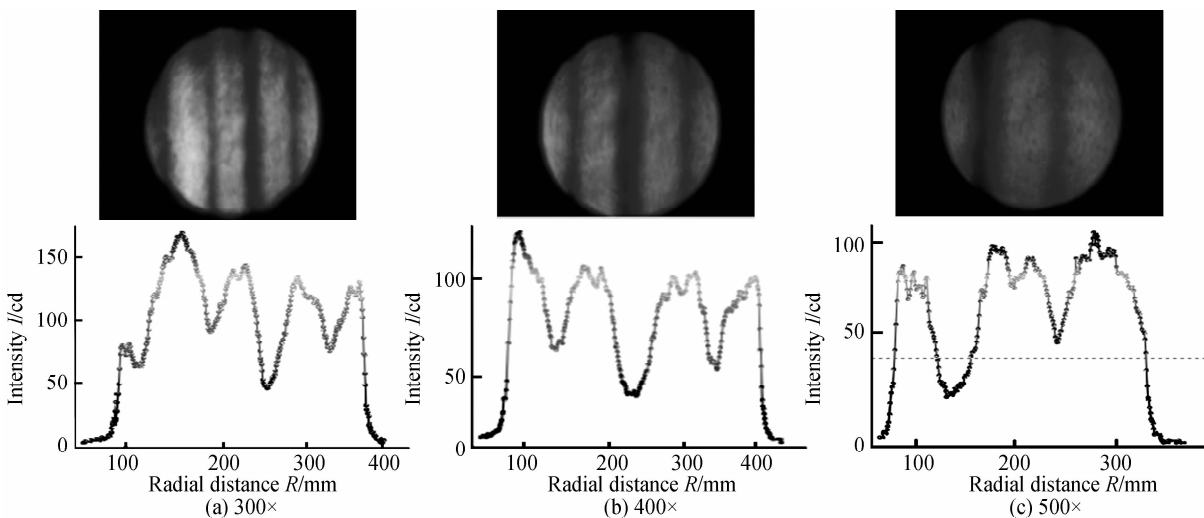


图 6 体式显微镜(含数码相机)拍摄不加轴棱锥光路的截面光强分布图与扫描的径向光强分布
Fig. 6 The intensity distribution and radial intensity distribution captured by asana microscope (with digital cameras) without axicon in optical path

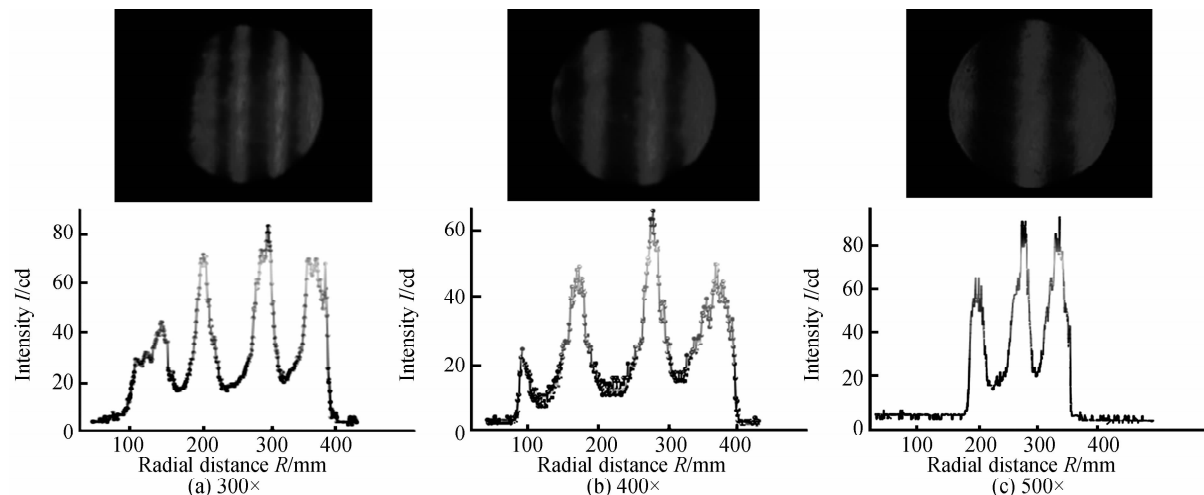


图 7 体式显微镜(含数码相机)拍摄加轴棱锥光路的截面光强分布图与扫描的径向光强分布
Fig. 7 The intensity distribution and radial intensity distribution captured by asana microscope (with digital cameras) with axicon in optical path

实验中,首先将显微镜放大至 $300\times$ 观察,从图 6(a)中与图 7(a)中的截面光强分布图与径向光强分布图中可以看出,没有加入轴棱锥时成像亮条纹之间粘连较多,而加入轴棱锥后的图像中两个波之间的重合部分减少到波的半高位置以下;接着再将显微镜放大到 $400\times$ 进行观察,图 6(b)中的条纹已经难以分辨,但是加入轴棱锥后的图像中依然能够清晰的分辨出明暗条纹,从径向光强分布图中同样可以看出,加入轴棱锥后的图像的两个波之间的重合部分也保持在波的半高位置以下;最后,将显微镜放大到 $500\times$ 进行观察,图 6(c)中条纹已经不能分辨,而图 7(c)中的图像依然可以分辨出明暗,从径向光强分布图中的两个相邻波之间的重合程度也充分说明:加入轴棱锥后的成像系统不需要利用特殊的照明就能够实现成像分辨率的提高。

4 结论

本文基于无衍射 Bessel 光束的线聚焦特性,将其应用于成像中用来提高系统的分辨率.利用衍射积分理论与点扩散函数推导出成像系统分辨率的表达式,并用 ZEMAX 光学设计软件模拟仿真初始结构光路图,并给出相应的设计参数,初步实现了无衍射 Bessel 光束成像系统能提高系统分辨率的可能性.最后搭建了一套成像系统并进行实验,以非相干蓝光 LED 作为光源,将透镜组、轴棱锥等光学元件加入系统.结果证明了轴棱锥产生的无衍射 Bessel 光束加入成像系统可以提高成像分辨率.理论分析、仿真模拟和实验结果相吻合.研究结果为光学高分辨率成像提供了理论和实验依据,在今后的研究中希望能将仿真模拟运用到实践当中,将光学高分辨率提高到一个新的高度.

参考文献

- [1] DUMIN J, MICELI J, EBERLY J H. Diffraction-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(15): 1499-1501.
- [2] SUN Chuan, HE Xi, LIN Bing-fu, et al. Effect of the light source coherence on the maximum diffraction free distance of the Bessel beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0208001.
孙川,何西,林炳福,等.光源相干度对 Bessel 光最大无衍射距离的影响[J]. *光子学报*, 2015, **44**(2): 0208001.
- [3] MATHIEU F, MICHEL P, ERMANNO B. Optical tests with Bessel beam interferometry [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(03): 5887.
- [4] GARCES-CHAVEZ V, MCGLOIN D, MELVILLE H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-

- reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 145-147.
- [5] CHEN J, NG J, LIN Z, et al. Optical pulling force [J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(9): 531-534.
- [6] MURALI S, LEE K S, ROLLAND J P. Invariant resolution dynamic focus OCM based on liquid crystal lens [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(5): 15854-15862.
- [7] CRAIG S, STEVE W. Single-image far-field subdiffraction limit imaging with axicon [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(5): 625-627.
- [8] MCLEOD J H. The axicon: a new type of optical element [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, **44**(6): 592-597.
- [9] FAN Dan-dan, WU Feng-tie, CHENG Zhi-ming, et al. Reconstruction of incoherent source Bessel beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 104219.
范丹丹,吴逢铁,程治明,等.非相干光源无衍射光的自重建 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(10): 104219.
- [10] DU Tuan-jie, WANG Tao, WU Feng-tie. Description of interference theory on generated period Bessel beam by focus non-diffracting beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **33**(9): 103-107.
杜团结,吴逢铁,王涛.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): 103-107.
- [11] HE Xi, WU Feng-tie, LI Pan, et al. Self-reconstruction of high-order Bessel beams generated by green LED light source [J]. *Science China*, 2015, **45**(01): 014202.
何西,吴逢铁,李攀,等.绿光 LED 产生高阶 Bessel 光的自再现 [J]. *中国科学*, 2015, **45**(01): 014202.
- [12] WANG Hua-ying, WANG Guang-jun, ZHAO Jie. Resolution analysis of imaging system with pre-magnification digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 730-733.
王华英,王广俊,赵洁.预放大数字全息系统的成像分辨率分析 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 730-733.
- [13] ZHAI Zhong-sheng, LU Qing-hua, XU Zhong-bao. Extended depth of field technology and applications [M]. Bei Jing: Science Press, 2014.
翟中生,吕清华,许忠保.景深严拓技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [14] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics based tutorial [M]. China Machine Press, 2011.
郁道银,谈恒英.工程光学基础教程 [M]. 机械工业出版社, 2011.
- [15] YAO Bao-li, LEI Ming, XUE Bin. Progress and application of high-resolution and super-resolution optical imaging in space and biology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1608-1614.
姚保利,雷铭,薛彬,等.高分辨率和超分辨率成像技术在空间和生物中的应用 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1608-1614.
- [16] SNOEYINK C, WERELEY S. Three-dimensional locating of paraxial point source with axicon [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2058-2060.