

激光与光电子学进展

基于贝塞尔光束的复合光场调控超衍射聚焦

朱晓彤, 郑鹏程, 谢向生*

汕头大学理学院物理系, 广东 汕头 515063

摘要 新型光场调控技术已经在焦场调控、光学微加工、光学微操纵和光通信等领域取得了众多重要成果。提出了一种基于贝塞尔光束的复合光场调控方案,利用贝塞尔光束固有角谱和环形光阑的锐边衍射实现了远距离的超衍射极限聚焦。理论和实验结果表明,轴棱锥-透镜系统生成的局域空心光束经环形光阑产生锐边衍射,其高频成份得到增强,从而具有超衍射聚焦特性。该局域聚焦光场与周围旁瓣光场距离很远,有望应用于远场超分辨显微成像和光镊等领域。

关键词 衍射与光栅; 光场调控; 局域空心光束; 超分辨; 贝塞尔光束; 锐边衍射

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2105001

Super-Diffraction Focusing Based on Bessel Beam Controlled by Compositing Light Field

Zhu Xiaotong, Zheng Pengcheng, Xie Xiangsheng*

Department of Physics, College of Science, Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, China

Abstract In the disciplines of focal field modulation, optical micro-machining, optical micromanipulation, and optical communication, the new optical field modulation technology has made significant achievements. In this study, we propose a composite light field modulation scheme based on the Bessel beam that realizes a distant super-diffraction limiting focus using the Bessel beam's intrinsic angle spectrum and the annular aperture's sharp edge diffraction. The theoretical and experimental results reveal that the bottle beam formed using the axicon-lens system has a focusing property and that the high-frequency components can be enhanced using the annular aperture's sharp edge diffraction, resulting in super-diffraction properties bottle beam. The local focused light field is separated from the surrounding side lobe light field and is expected to be applied in far-field super-resolution microscopic imaging and optical tweezers.

Key words diffraction and grating; light field modulation; bottle beam; super-resolution; Bessel beam; sharp edge diffraction

1 引言

随着科学技术的不断发展,传统激光发射的厄米高斯光束和拉盖尔高斯光束难以满足多样化的科研需求。多参量空间光场调控技术,即光场的振幅、相位、偏振态空间分布调控,可以将传统的高斯光束转换为空间具有复杂结构分布的光场^[1]。结合紧聚焦,各种新颖的空间结构光场被生成^[2-3],为光场与结构物质的相互作用提供了一个新的自由度。例如,柱对称矢量光束在高数值孔径透镜下出现强的纵向偏振分量,形成横向超衍射极限、纵向超长的焦斑^[4-5]。矢量光束的紧聚焦特性被广泛应用于超分辨成像^[6-8]、光学操纵^[9]、光学锁链^[10]等领域。随着调控手段的多样化和应用研究的不断深入,许多新型矢量光束被应用于焦场调控,例如:Lerman等^[11]利用

辐射偏振光通过波片产生混合偏振光,在高数值孔径的透镜下观察到焦平面三维定向的偏振分布。Pan等^[12]从原理上提出椭圆对称的新型矢量光场,它打破了柱面对称,丰富了向量场族,并将该光束用于焦场调控。Xie等^[13]研究涡旋光束通过任意孔径的夫琅禾费衍射。Han等^[14]研究了具有多偏振奇点的矢量光束的紧聚焦行为,适当安排矢量光束中偏振奇点的分布,可以在保持光强不变的情况下改变聚焦场的偏振分布。Chen等^[15]利用逆设计获取期望焦场的输入场。Fu等^[16]提出了一种基于锐边孔径的锐边衍射聚焦光学新方法,将激发的高阶衍射波场在远场形成超振荡聚焦光场。使得超振荡光场的出现不再仅限于微纳制备的超构透镜^[17]等精密制备工艺,焦场调控也有望用宏观大尺寸的器件来实现。

另一方面,贝塞尔光束是最经典而重要的无衍射

收稿日期: 2021-09-20; 修回日期: 2021-10-26; 录用日期: 2021-10-29

通信作者: *xxts@stu.edu.cn

光束之一,它由同心环截面轮廓的贝塞尔函数描述。Vicente等^[18]从轨道角动量出发提出了一种以光束角谱锥的组成波的积分叠加为基础的方式来统一描述、联系和实现所有的贝塞尔光束。贝塞尔光束的显著特性是其超长焦深和自愈性,即遇到部分障碍后能够完全重建^[19-20]。因此,利用贝塞尔光束可以增加激光扫描显微镜的穿透深度、增强光片显微镜的能力^[21-22],甚至实现多通道共聚焦超景深显微成像^[23]。基于贝塞尔光场的光场调制以产生精细结构^[16, 24-26]具有广阔的应用前景。

本文提出了一种基于非平行入射光场(贝塞尔光束)和环形光阑的复合光场调控方案。在这种复合光场调控方案下,贝塞尔光束具有一定的入射角,能增加透镜的数值孔径。环形光阑能限制低频光场部分且产生强烈的锐边衍射。这样调控的效果突破了原有计算模

型和孔径频谱(数值孔径)的限制,产生具有超分辨的聚焦光斑,这对远距离光学显微成像有很大的应用价值。

2 理论和模拟

自1818年菲涅耳提出了衍射现象的基本理论并用菲涅耳衍射积分公式予以概括以后^[27],柯林斯为了计算更简洁,在菲涅耳衍射积分的基础下提出了用四矩阵元素 $ABCD$ 来描述光学系统的柯林斯公式^[28-29]。这些理论都能很好地解释衍射现象,但他们把光当作标量现象来处理,忽略了电磁场的矢量本性。所以,本文使用矢量角谱理论进行数值模拟。

当线偏振光束(沿 x 轴方向偏振)入射到光学元件时,出射面任意一点的光场分布可由矢量角谱理论唯一地确定:

$$\begin{cases} E_x(r, z) = \int_0^\infty A_{x,0}(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_0(2\pi lr) 2\pi dl \\ E_y(r, z) = 0 \\ E_z(r, z) = -j \int_0^\infty \frac{1}{q(l)} A_{x,0}(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_1(2\pi lr) 2\pi dl \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $q(l) = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - l^2}$, l 为横向和纵向的频谱之和, $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, λ_0 为入射光波长, n 为工作介质的折射率; J_0 和 J_1 为第一类零阶和一阶贝塞尔函数; $A(l) = \int_0^\infty t(r)g(r)J_1(2\pi rl)2\pi r dr$ 为投影面电场的角谱分布, $g(r)$ 为光学元件前表面的强度分布, $t(r)$ 为光学元件的标量近似透过率函数;投影面处的强度分布为

$$I = E_x^2(r, z) + E_z^2(r, z). \quad (2)$$

设计如图1所示的实验装置图,使用波长 $\lambda = 632.8$ nm的He-Ne激光器(HNL150LB, Thorlabs)为光源,光束通过滤波器和透镜L1扩束,入射到轴棱锥(#AX251-A, Thorlabs)后产生贝塞尔光束,在轴棱锥后 $h = 118$ mm处放置圆环形孔径,聚焦透镜L2尽量靠近在环形孔径后,用CMOS相机(CS2100M-USB, Thorlabs)记录光束在各个传播距离处的光强分布。环形孔径的外圈半径 $r_1 = 8$ mm,内圈半径 $r_2 = 7$ mm,两个透镜的焦距分别为 $f_1 = 200$ mm, $f_2 = 500$ mm,轴棱锥的折射率 $n_1 = 1.51$,底角 $\gamma = 2^\circ$ 。模拟的采样率

为 1001×1001 ,尺寸为 $8000 \mu\text{m} \times 8000 \mu\text{m}$,衍射屏幕的尺寸为 $10000 \mu\text{m} \times 10000 \mu\text{m}$ 。

平面波经过轴棱锥后产生了贝塞尔光束,该光束经过环形孔径和透镜传播至投影面, $g(r)$ 和 $t(r)$ 满足:

$$g(r) = J_0\left(\frac{k_r r r}{h}\right), \quad (3)$$

$$t(r) = \text{rect}\left(\frac{r - r_{\text{mid}}}{w}\right) \cdot \exp\left(-i \frac{k}{2f_2}\right) r^2, \quad (4)$$

式中: k_r 为径向波矢分量; r_{mid} 为环形孔径的半径; w 为环形孔径的宽度; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数; f_2 为聚焦透镜L2的焦距; $\text{rect}()$ 为矩形函数。

3 分析与讨论

吴逢铁等^[30-31]建立了轴棱锥-透镜系统的光场衍射模型。由于衍射效应等因素影响,该系统产生的局域空心光束(bottle beam)内部轴上出现光强不等于零的亮斑,如同2所示,本文模拟具有相同的结果。为了消除中心亮斑,吴逢铁等^[30]引入了涡旋相位成功予以消除。图1所示实验系统与文献[30]相近,在他们的系统上加入了环形光阑,以减少透镜L2收集的低频光场,同时利用环形的内外锐边,增加了锐边的衍射。由于圆形孔径的傅里叶变换为贝塞尔函数,如同透镜聚焦的孔径函数傅里叶变换也为贝塞尔函数,因此本系统产生的远场焦斑是3个不同参数的贝塞尔函数的调制。本文重点不在于该中心亮斑的消除,相反,本文发现该亮斑具有bottle beam的特性的同时,具有超衍射极限聚焦的特性,结合锐边衍射对高频衍射场的增强,中心衍射光场

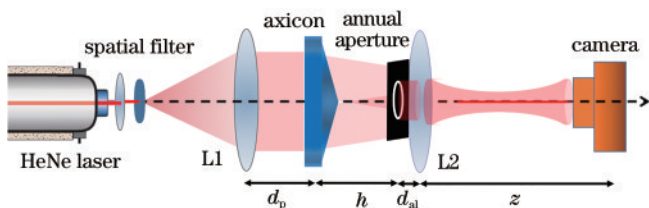


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram

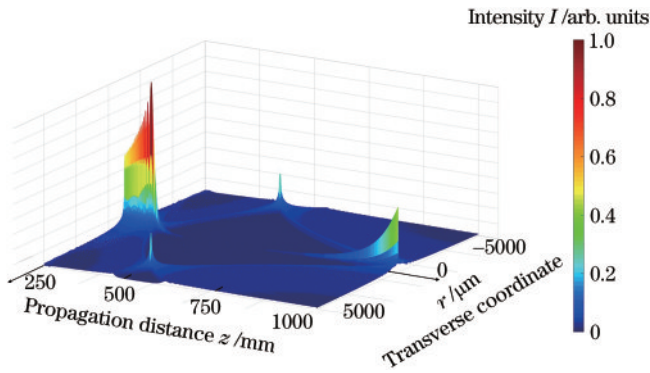


图 2 贝塞尔光束和聚焦透镜调制下的光强传播分布
Fig. 2 Optical intensity distribution of beam under modulation of Bessel beam and focusing lens

有望应用于显微成像^[32]和光镊^[33-34]等领域。

与传统光场调控紧聚焦不同,透镜L2所调制的光场并非平面波入射,而是有一定夹角的入射光场贝塞尔光束(第一重调制),同心圆环结构使得光束传播过程中会有两组以上的光场相干涉。其次,环形光阑起到振幅调制(第二重调控)的作用且紧贴近聚焦透镜L2,同心圆环的空间高频光场可以有效地通过透镜进行传播,从而出现一种复合的孔径调制结果。贝塞尔光束结合环形光阑的复合调制下光束的聚焦特性如图3所示。在图2中,单一圆孔径调制下聚焦光束中心光斑光强随着传播距离 z 的增大先逐渐增大,达到最

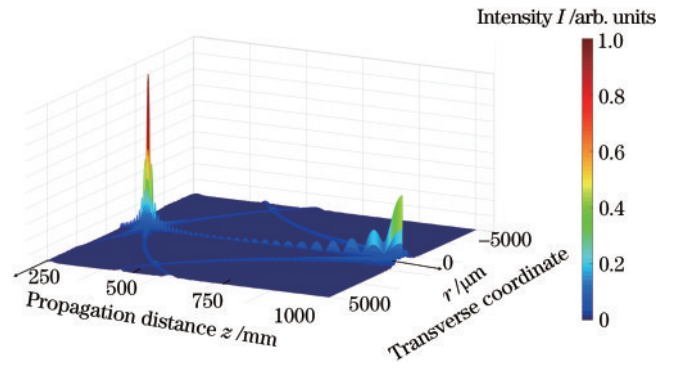


图 3 贝塞尔光束和环形光阑双重调制下的聚焦光束的光强传播分布
Fig. 3 Optical intensity distribution of focused beam under dual modulation of Bessel beam and annular aperture

大后迅速减小至几乎为0,直到 z 很远后再次出现并逐渐增大。而在图3环形孔径和聚焦透镜复合调制下的光束中心光斑光强随着传播距离 z 的增大先逐渐增大,达到最大后逐渐减小,接着在 $z=500$ mm处光强又逐渐增大。基于贝塞尔光束下的环形孔径和聚焦透镜联合调制的光束中心光斑在整个传播过程中都存在,并且其光强明显强于图2的中心光斑。

图4是光场通过聚焦透镜后第一次汇聚区(简称近区)焦斑的横向光强分布图。从实验图4(a)~4(c)可知,贝塞尔光束经过联合孔径后生成了bottle beam,光束在 $z=245$ mm处聚焦成一个光斑,随着传播距离

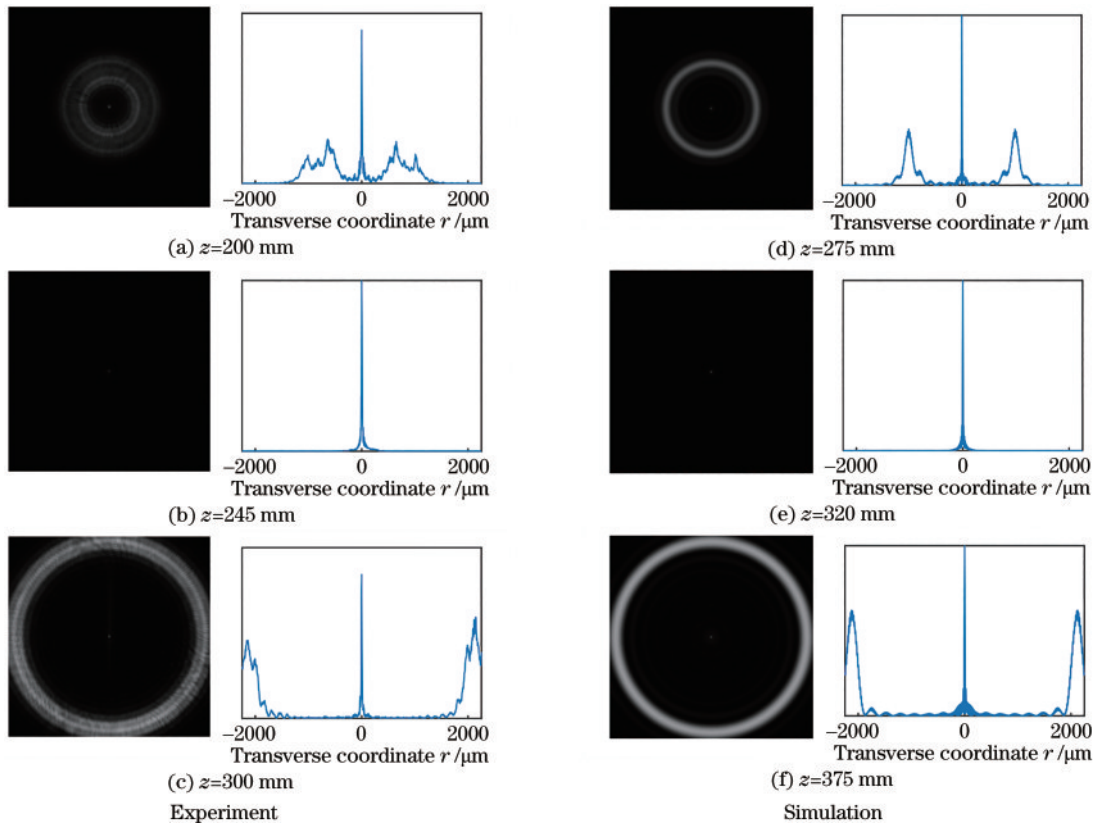


图 4 Bottle beam 在前焦场的横向光强分布。(a)~(c)实验图;(d)~(f)数值模拟图。

Fig. 4 Optical intensity distributions of bottle beams in anterior focal field. (a)-(c) Experimental diagram; (d)-(f) simulation diagram

z 的增大,出现了 bottle beam 的重建,且重建后的光束视场变得更大。随后在计算 $z=245$ mm 处聚焦光斑的大小时发现其半峰全宽 (FWHM) 很小约为 $0.3925\lambda/\text{NA}$ (NA 为数值孔径) 具有超分辨的特性,并且没有旁瓣。所产生的超分辨聚焦斑得益于汇聚光场具有类似于突然自聚焦的抛物路径,相当增加光干涉的夹角(具有更大的 NA)。图 4(d)~4(f) 为对应的数值模拟图,光束的聚焦和重建过程与实验基本相符,且聚焦光斑也具有超分辨 (FWHM 为 $0.3826\lambda/\text{NA}$),但数值模拟的光束在 $z=320$ mm 处聚焦成光斑。实验和模拟过程现象一致:在近区外圈环形逐渐缩小至焦点处完全消失;过了焦点后环形重新出现且不断增大,在环和中心局域亮斑之间存在完全暗的过渡区。对比实

验和模拟结果,在相似光强分布情况下,模拟比实验的轴向值 z 大 75 mm 左右,这个数值略微大过透镜的厚度加上光阑与透镜的距离。从结果可以看出,当前衍射理论无法严格描述锐边的衍射增强,环形光阑对光场的锐边衍射导致焦场的及早出现,另外贝塞尔光束是在光场重叠后才出现,利用直接贝塞尔函数来描述轴棱锥的作用可能不太准确。

焦场在远距离处(远区)所形成的是 bottle beam,光强随 z 的改变而波动。实验测量时采取寻找临近区域最亮的焦场位置,而理论模拟也是寻找相关参数前后的位置。如图 5 所示是相关位置处的光强分布图,其中图 5(a)~5(e) 是实验图,图 5(f)~5(j) 是模拟图,模拟的 z 值比实验大 75 mm 左右。随着传播距离 z 的

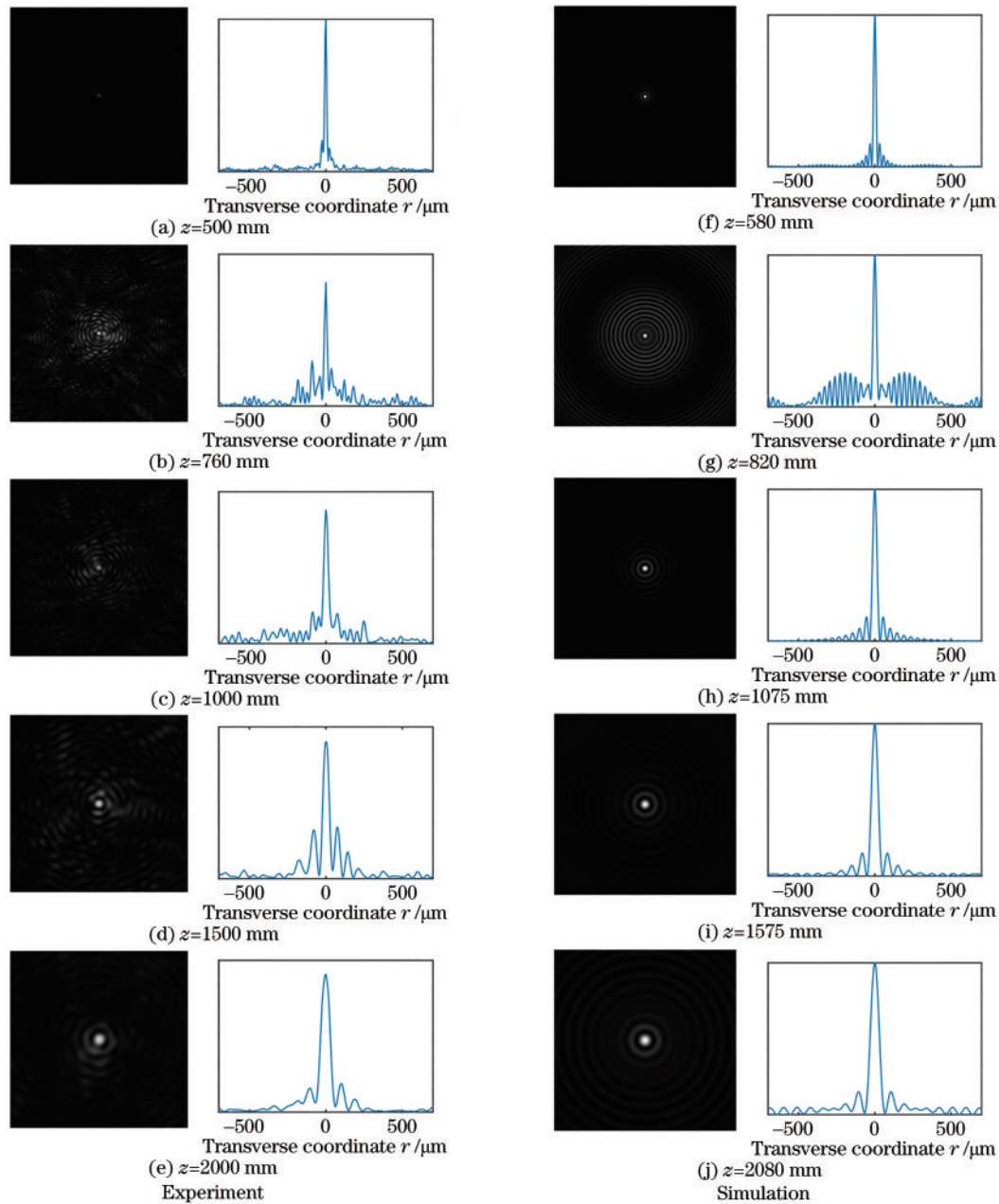


图 5 Bottle beam 在远距离的光强分布。(a)~(e) 实验图;(f)~(j) 数值模拟图

Fig. 5 Optical intensity distributions of bottle beams at long distances. (a)~(e) Experimental diagram; (f)~(j) simulation diagram

增大,中心光斑的视场也变大(超强旁瓣在很远的地方,暗区保持),同时中心光斑的亮度和大小也发生了变化。如表 1 所示是实验所得焦场中心光斑在 x 轴、 y 轴和 \sqrt{xy} (\sqrt{xy} 代表的是焦场的面积特性,同时消除 x 轴和 y 轴的不对称性)的 FWHM 及数值模拟焦斑的 FWHM。从表中的数据可知,光斑面积 \sqrt{xy} 与数值模拟的 FWHM 误差最小,都在 12% 以内,并且其先变大后减少的变化趋向与数值模拟的一样,所以光斑面积 \sqrt{xy} 的 FWHM 更能代表实验所得光斑的 FWHM。同时,在远区 500~2000 m 传播位置处焦场中心光斑的在 $0.35\lambda/\text{NA}\sim 0.45\lambda/\text{NA}$ 均小于瑞利判据的 $0.61\lambda/\text{NA}$ 和阿贝判据 $0.51\lambda/\text{NA}$,突破了衍射极限,在传播距离 $z=760$ mm 左右的中心光斑更是突破了超振荡判据(超振荡判据 $(0.38\lambda/\text{NA})$ 是 Huang 等^[35]在 2014 年提出的,但现有的很多超振荡光场具有极大

的旁瓣,视场会很小)。这是因为贝塞尔光束入射到环形孔径具有锐边特性,光束产生了锐边衍射,其次是聚焦透镜使中心光斑会聚,从而提高了中心光斑的亮度。同时,聚焦透镜紧靠在圆环形孔径后,使系统具有超高的联合数值孔径,携带了光束信息本来被滤掉的高频分量,伴随着波场传播到远场,从而对远场衍射造成影响,在 $z=760$ mm 传输距离处出现了局域超振荡现象。

从理论和实验的对比中,实验的远区聚焦光场强度要比理论大不少,得到的焦场也要比理论小一些。反复的多组实验(如改变透镜和环形光阑的距离),均能找到突破超振荡条件的聚焦焦场。目前基于柯林斯公式的衍射理论描述的锐边衍射,衍射光场的强度远比实际的要弱,同时,模拟过程中高频光场可能丢失,导致焦场尺寸比实验大一些。可见,如果要更严格地描述这种轴对称复合调制的光场,还需要发展更准确的模拟工具。

表 1 不同传播距离处中心光斑的 FWHM

Table 1 FWHM of central spot with different propagation distances

		Distance z /mm	500	760	1000	1500	2000
Experiment	FWHM (λ/NA)	x	0.3392	0.3148	0.4164	0.4125	0.4529
		y	0.3747	0.3851	0.4817	0.4489	0.3997
		\sqrt{xy}	0.3568	0.3481	0.4478	0.4303	0.4244
Simulation	Distance z /mm	580	820	1075	1575	2080	
	FWHM (λ/NA)	0.4093	0.3794	0.4192	0.4130	0.3967	

4 结 论

提出了一种基于贝塞尔光束的复合光场调控方案,利用贝塞尔光束固有角谱和环形光阑的锐边衍射实现了远距离的超衍射极限聚焦。理论和实验结果表明,轴棱锥-透镜系统生成的 bottle beam 经环形光阑产生锐边衍射,bottle beam 的高频成分得到增强,从而具有超衍射聚焦特性。聚焦光场在 $z=245$ mm 处汇聚成具有超分辨的光斑,并且在 $z=760$ mm 左右处突破了超振荡判据。该局域聚焦光场与周围旁瓣光场距离很远,有望应用于远场超分辨显微成像和光镊等领域。

参 考 文 献

- [1] Betancur R, Castañeda R. Spatial coherence modulation [J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2009, 26(1): 147-155.
- [2] Wang X L, Ding J P, Ni W J, et al. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement[J]. Optics Letters, 2007, 32(24): 3549-3551.
- [3] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2009, 1(1): 1-57.
- [4] Quabis S, Dorn R, Eberler M, et al. Focusing light to a tighter spot[J]. Optics Communications, 2000, 179(1/2/3/4/5/6): 1-7.
- [5] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(23): 233901.
- [6] Hnatovsky C, Shvedov V, Krolikowski W, et al. Revealing local field structure of focused ultrashort pulses [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(12): 123901.
- [7] Xie X S, Chen Y Z, Yang K, et al. Harnessing the point-spread function for high-resolution far-field optical microscopy[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(26): 263901.
- [8] Hao X, Kuang C F, Wang T T, et al. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam[J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 3928-3930.
- [9] Zhan Q W. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3377-3382.
- [10] Zhao Y Q, Zhan Q W, Zhang Y L, et al. Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery[J]. Optics Letters, 2005, 30(8): 848-850.
- [11] Lerman G M, Stern L, Levy U. Generation and tight focusing of hybridly polarized vector beams[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27650-27657.
- [12] Pan Y, Li Y N, Li S M, et al. Elliptic-symmetry vector optical fields[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19302-19313.
- [13] Xie K R, Huo J N, Su Z K. Fraunhofer diffraction

- simulation of a vortex beam through any apertures[J]. *European Journal of Physics*, 2021, 42(5): 055303.
- [14] Han L, Liu S, Li P, et al. Managing focal fields of vector beams with multiple polarization singularities[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9049-9053.
- [15] Chen Z Z, Zeng T T, Ding J P. Reverse engineering approach to focus shaping[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1929-1932.
- [16] Hu Y W, Fu S H, Li Z, et al. Focusing optical waves with a rotationally symmetric sharp-edge aperture[J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 136-140.
- [17] 何韬, 刘涛, 刘康, 等. 制造误差对大尺度超振荡平面透镜聚焦性能的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2005001.
He T, Liu T, Liu K, et al. Effect of manufacturing errors on focusing performance of large-scale superoscillatory lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2005001.
- [18] Vicente O C, Caloz C. Bessel beams: a unified and extended perspective[J]. *Optica*, 2021, 8(4): 451-457.
- [19] Fahrback F O, Simon P, Rohrbach A. Microscopy with self-reconstructing beams[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(11): 780-785.
- [20] Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [21] Vettenburg T, Dalgarno H I C, Nyk J, et al. Light-sheet microscopy using an Airy beam[J]. *Nature Methods*, 2014, 11(5): 541-544.
- [22] Arlt J, Garces-Chavez V, Sibbett W, et al. Optical micromanipulation using a Bessel light beam[J]. *Optics Communications*, 2001, 197(4-6): 239-245.
- [23] Xiao C, Zeng P C, Hu L X, et al. Generation of arbitrary partially coherent Bessel beam array with a LED for confocal imaging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 29510-29520.
- [24] 林兴磊, 吕金光, 陈东林, 等. 基于特殊形貌光源的衍射效应对空心光场的调控研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1305001.
Lin X L, Lü J G, Chen D L, et al. Modulation of hollow light field by diffraction effect based on special shape light source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1305001.
- [25] Anguiano-Morales M. Transformation of Bessel beams by means of a cylindrical lens[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(25): 4826-4831.
- [26] Belyi V N, Kramoreva L I, Al-Muhanna M K, et al. Focusing Bessel beams by a lens with strong spherical aberrations[J]. *International Journal of Optics*, 2012, 2012: 739413.
- [27] Kelley J D, Stuff M I, Hovis F E, et al. Removal of small particles from surfaces by pulsed laser irradiation: observations and a mechanism[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1415: 211-219.
- [28] Southwell W H. Validity of the Fresnel approximation in the near field[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(1): 7-14.
- [29] 凌铭, 董渊, 陈良, 等. 空心锥状双高斯光束传输特性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2920.
Ling M, Dong Y, Cheng L, et al. Propagation properties of hollow cone double gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2920.
- [30] 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.
Wu F T, Lu W H, Ma B T. The beam propagation and transformation in axicon-lens system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2557-2560.
- [31] 张前安, 吴逢铁, 郑维涛. 轴棱锥-透镜系统产生局域空心光束中心亮斑的消除[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 034205.
Zhang Q A, Wu F T, Zheng W T. Eliminating the center spot of bottle beam generated by axicon-lens system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 034205.
- [32] 宋祥磊, 李舒, 顾梦涛, 等. 光场显微成像微尺度流场三维重建方法研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1011002.
Song X L, Li S, Gu M T, et al. Three-dimensional reconstruction of micro-scale flow field based on light field microscopic imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1011002.
- [33] 梁言生, 姚保利, 雷铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026003.
Liang Y S, Yao B L, Lei M, et al. Optical micromanipulation based on spatial modulation of optical fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026003.
- [34] 豆秀婕, 闵长俊, 张聿全, 等. 表面等离子激元光镊技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026004.
Dou X J, Min C J, Zhang Y Q, et al. Surface plasmon polaritons optical tweezers technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026004.
- [35] Huang K, Ye H, Teng J, et al. Optimization-free superoscillatory lens using phase and amplitude masks[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 152-157.