

变形镜生成贝塞尔光束的质量影响因素分析

李文来, 彭泰然, 马剑强*

宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

摘要 为了提高变形镜生成的贝塞尔光束的质量, 探究其影响因素, 研究了变形镜致动器环数以及光束入射角对贝塞尔光束质量的影响。当致动器环数从 3 环增大到 5 环时, 变形镜重构的 $10\ \mu\text{m}$ 幅值锥形相位的残差方均根从 70 nm 降低到 26 nm, 降低了变形镜圆顶角对光束质量的影响, 所生成的贝塞尔光束轴向光强分布更接近理想分布, 证明提高变形镜致动器环数可有效提高贝塞尔光束的质量。另外, 采用入射角分别为 15° 、 30° 、 45° 的光束生成贝塞尔光束, 实验结果表明, 所生成的贝塞尔光束质量均较高, 且不受光束入射角影响。本研究可为变形镜生成高质量贝塞尔光束提供参考, 有利于其应用。

关键词 物理光学; 贝塞尔光束; 变形镜; 光束质量; 自适应光学

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0826003

Analysis of Influencing Factors on Quality of Bessel Beam Generated by Deformable Mirror

Li Wenlai, Peng Tairan, Ma Jianqiang*

Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract In order to improve the quality of the Bessel beam generated by a deformable mirror and explore the factors that influence its quality, the influences of the ring number of the deformable mirror actuator and the incident angle of the beam on the beam quality are studied. When generating a conical phase with $10\text{-}\mu\text{m}$ amplitude, the root mean square value of the residual error decreases from 70 nm to 26 nm while the ring number increases from 3 to 5. The distribution of axial light intensity of the generated Bessel beam is closer to the ideal distribution. This result indicates that the increasing ring number of the deformable mirror actuator can effectively improve Bessel beam quality. In addition, Bessel beams are generated by beams with incident angles of 15° , 30° , and 45° . The experimental results show that the Bessel beam quality is good and unaffected by the incident angle. This paper provides recommendations and references for generating high-quality Bessel beams by using deformable mirrors, and these recommendations are expected to be beneficial for the applications of Bessel beams.

Key words physical optics; Bessel beams; deformable mirror; beam quality; adaptive optics

OCIS codes 190.4360; 230.0230; 140.0140

1 引 言

贝塞尔光束因其具有无衍射和自修复特性, 在光镊^[1]、空间光通信^[2]、激光加工^[3-4]等领域有良好的应用前景。目前, 主要采用环缝-透镜系统^[5]、轴棱锥^[6-7]、空间光调制器(SLM)^[8-9]等产生贝塞尔光束。其中, 环缝-透镜法^[5]的光束利用率极低; 利用轴棱锥产生贝塞尔光束的方法最为简捷, 转换效率也最高, 但是高质量的轴棱锥透镜加工难度大, 透镜的离轴加工误差^[10]和椭圆加工误差^[11]易使激光发

生畸变; 利用 SLM 产生贝塞尔光束的方法^[8-9]具有像素高、灵活性强等优点, 但其损伤阈值低, 难以承受高功率激光。此外, 这些方法都存在激光斜入射的问题。激光斜入射轴棱锥、组合轴棱锥, 导致光束截面出现棋盘状光点^[11], 严重影响光束质量。SLM 的入射角会产生不同于计算值的相位差, 当相位差大于 10° 时, 光束的质量会受到显著影响^[12]。

近年来, 研究人员开始采用变形镜(DM)生成贝塞尔光束^[13-15], 变形镜作为自适应光学系统的核心部件, 不仅能够校正光学系统中的像差, 同时可以

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-04-02; 录用日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51805280)、浙江省公益技术研究(LGF18E050001)

* E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn

重构出高质量的锥形相位,输出无衍射距离和主斑等参数可控的贝塞尔光束。单压电变形镜^[13]、磁液变形镜^[14]和分立镜面变形镜^[15]已被用来生成主斑直径可控的贝塞尔光束或高阶贝塞尔光束。但目前变形镜重构贝塞尔光束的研究仍不充分,如变形镜的重要参数——致动器环数以及入射角度对其生成的贝塞尔光束质量的影响尚未明确。因此,本文搭建了基于单压电变形镜的贝塞尔光束生成系统,通过实验和仿真研究变形镜致动器环数和光束入射角对所生成的贝塞尔光束质量的影响。

2 实验系统

零阶贝塞尔光束被认为是具有锥形相位的光束(即光轴两侧的光线以相同角度朝光轴会聚)在传播中的发生叠加干涉,使光束截面形成符合贝塞尔函数的光强分布,且在较长的传播范围内保持不变^[16]。基于压电变形镜的贝塞尔光束实验系统如图1(a)所示。激光器(HNL635, Thorlabs, 美国)产生波长为635 nm的连续激光,由光纤耦合传输。光纤输出的点光源经过125 mm焦距的透镜准直后到达变形镜镜面,光束的入射角为 α 。光束的相位经过变形镜相位调制成锥形相位。调制后的光束经镜面反射后于镜面前方发生自干涉,生成贝塞尔光束,即图1(a)光路原理图中的虚线区域。将光束通过由两个透镜(焦距分别为200 mm和40 mm)组成的0.2倍望远镜系统进行缩束。之后光束被分束比为1:1的分光镜(BS)分束,一束光进入波前传感器(WFS150-7AR, Thorlabs, 美国),用波前传感器

采集光束的波前相位信息,波前相位用65项Zernike多项式来描述;另一束被置于移动平台上的CCD相机(MER-125-30UM-L, 大恒光电, 中国),用CCD相机记录贝塞尔光束在不同传播距离下的光强分布。本实验采用61单元(5环)单压电变形镜^[17],如图1(b)所示。该变形镜由硅弹性层和压电驱动层(PZT)组成。硅弹性层镀有高反射膜。PZT层两面均覆有电极,其中弹性层一侧为接地的公共电极层,另一侧为分立的电极阵列,形成致动器阵列。给单个致动器施加电压,由于PZT的逆压电效应,致动器带动镜面产生一个局部变形。给各个致动器分别施加恰当的电压,可实现变形镜镜面的整体变形控制和光束相位的控制。本研究中致动器采用扇形阵列分布,如图1(b)电极阵列中实线框所示,虚线表示在不同致动器环数下变形镜的有效口径,数字1到5代表致动器环数,变形镜的相关数据见表1。为了更好地分析致动器环数对生成贝塞尔光束的影响,在第5环致动器外拓展一圈形成第6环,用于仿真分析。

3 致动器环数影响分析

3.1 锥形相位重构误差分析

锥形相位的质量直接影响生成的贝塞尔光束的质量,在实验和仿真过程中,采用不同致动器环数的变形镜来重构锥形波前相位。实验中分别采用了3环、4环和5环致动器进行重构,入射角 α 约 7.5° ,变形镜采用最速下降法进行闭环控制^[18]。仿真中分别采用了3环、4环、5环和6环致动器进行重构。

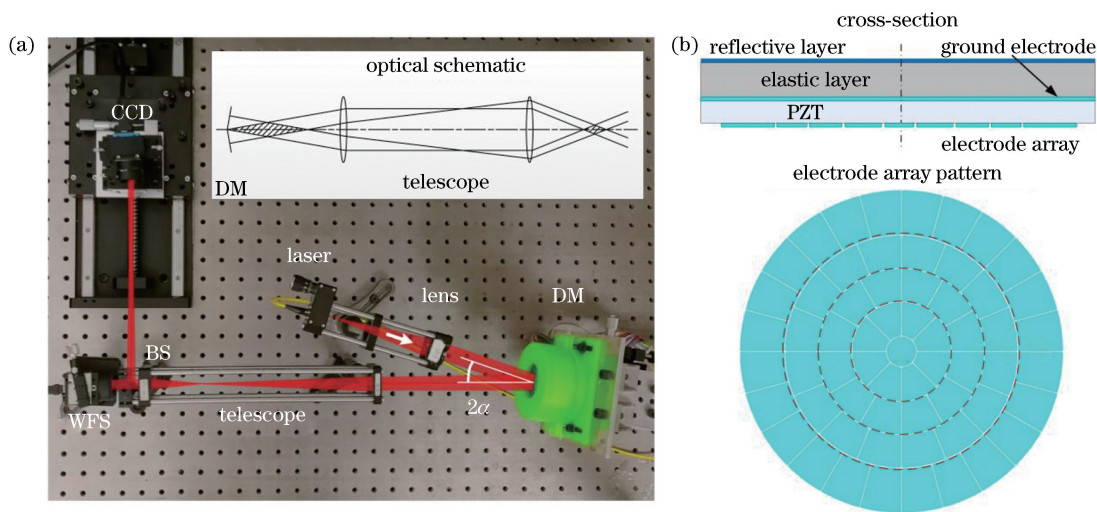


图1 基于变形镜的贝塞尔光束生成系统。(a)实验装置;(b)变形镜结构

Fig. 1 Generation system of Bessel beam based on deformable mirror. (a) Experimental setup; (b) structure of deformable mirror

表 1 用于仿真与实验的致动器参数

Table 1 Actuator parameters for simulation and experiment

Ring number	Actuator number	Aperture /mm
3	21	9
4	37	15
5	61	20
6 *	97	26

Note: The 6th ring actuators are obtained by expanding the 5th ring actuators outward, which are used for simulation.

采用不同致动器环数时,输入的光束直径与变形镜的有效口径一致。由于 3 环致动器变形镜的重构幅值有限,故目标锥形相位的峰谷(PV)值为 $5 \mu\text{m}$,3 环以上变形镜的目标锥形相位的 PV 值为 $10 \mu\text{m}$ 。

图 2 为变形镜重构的锥形相位及其与目标锥形相位的残差图,采用波前传感器测量变形镜重构的锥形相位。从图 2 可以看出,重构锥形相位的残差主要由中心部位的圆顶状和其余部位的波浪状残差组成。中心部分呈圆顶状,这主要是因为连续镜面

不能实现尖峰重构。此误差主要由中心致动器引起,但随着致动器环数从 3 环增加到 5 环,中心致动器在有效口径内的面积占比不断减小,分别为 11.1%、4.0%和 2.3%,使圆顶状误差得到改善。圆顶状误差是影响贝塞尔光束空间强度分布的主要原因,具体影响在 3.2 节描述。随着致动器环数增加,镜面拟合精度提高,波浪状残差减小。

仿真与实验中变形镜重构的锥形相位截面对比如图 3 所示,其中 E_{err} 表示重构的锥形相位与目标锥形相位之间的误差方均根(RMS)。实验与仿真结果基本一致,但由于实验中波前传感器测量能力有限,只测量了前 65 项 Zernike 多项式像差,过滤了高阶波前误差,所以实验中的残差 RMS 值略小于仿真值。对比图 3 中不同致动器环数下重构的锥形相位可以发现,仿真与实验得到的锥形相位顶端都呈圆弧状,且随着致动器环数的增加,所得到的锥形相位更贴近目标锥形相位,同时残差也呈降低趋势,由此表明重构的锥形相位质量不断提高。实验中 5 环致动器的残差 RMS 值仅为 26 nm,具有较好的重构性能。

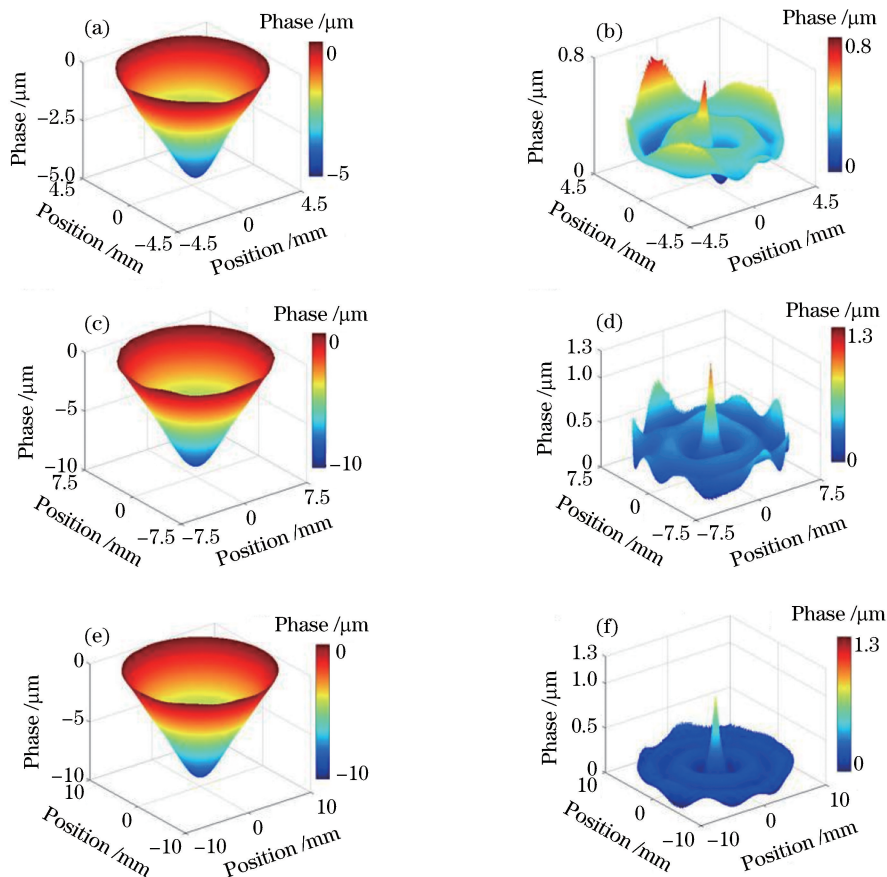


图 2 实验重构的锥形相位。(a)(c)(e) 3、4、5 环致动器变形镜的重构相位;(b)(d)(f) 3、4、5 环致动器变形镜的重构误差
Fig. 2 Experimental reconstruction of conical phases. (a)(c)(e) Conical phases generated by deformable mirrors with 3, 4, and 5 rings, respectively. (b)(d)(f) reconstruction errors of deformable mirrors with 3, 4, and 5 rings, respectively

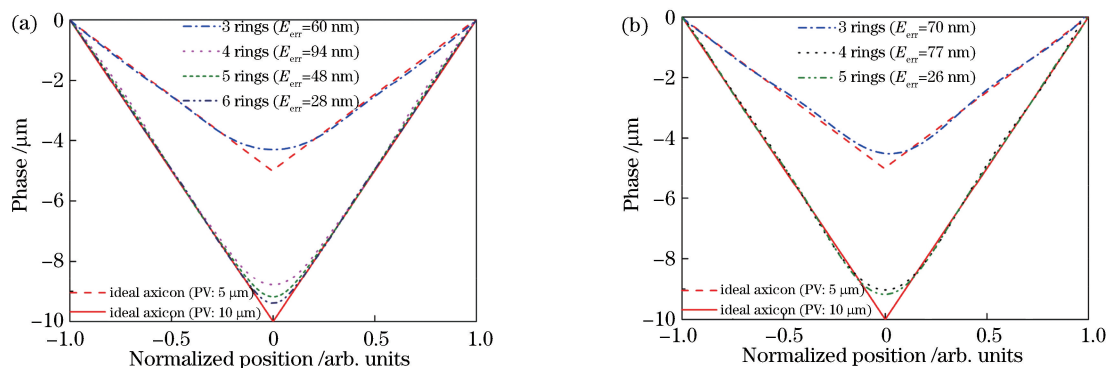


图 3 不同致动器环数的变形镜锥形相位重构能力比较。(a)仿真结果;(b)实验结果

Fig. 3 Comparison of conical phase reconstruction capabilities of deformable mirrors with different rings.

(a) Simulation results; (b) experimental results

3.2 贝塞尔光束质量分析

采用图 1 所示的实验系统生成贝塞尔光束,通过移动 CCD 相机来记录贝塞尔光束传播到不同位置的光强分布。光束传播过程中轴向光场分布如图 4 所示。从图 4 可以看到,在测量的起始位置附近出现类高斯光聚焦的现象,这主要是因为重构的锥形相位的圆顶状误差产生了球面光波聚焦。聚焦后的球面波继续向后扩散,导致之后的轴向光强出现振荡^[19]。随着变形镜致动器环数的增加,镜面圆顶状误差减小,圆锥顶附近的类高斯光聚焦的能量

减少。截取实验中轴上光强分布数据,并与标量衍射理论模拟的轴上光强进行对比,研究了贝塞尔光束主斑的轴向光强分布,如图 5 所示。可以看到,实验数据与理论模拟结果基本吻合,随着致动器环数的增加,轴向光强越来越接近理想分布,同时贝塞尔光束的无衍射范围扩大。计算得到的轴向光强分布的半峰全宽(FWHM)如表 2 所示。随着致动器环数的增加,无衍射光束质量提高,轴向半峰全宽从 32 mm 提高到 217 mm,当致动器环数为 5 时,可以获得质量较好的贝塞尔光束。

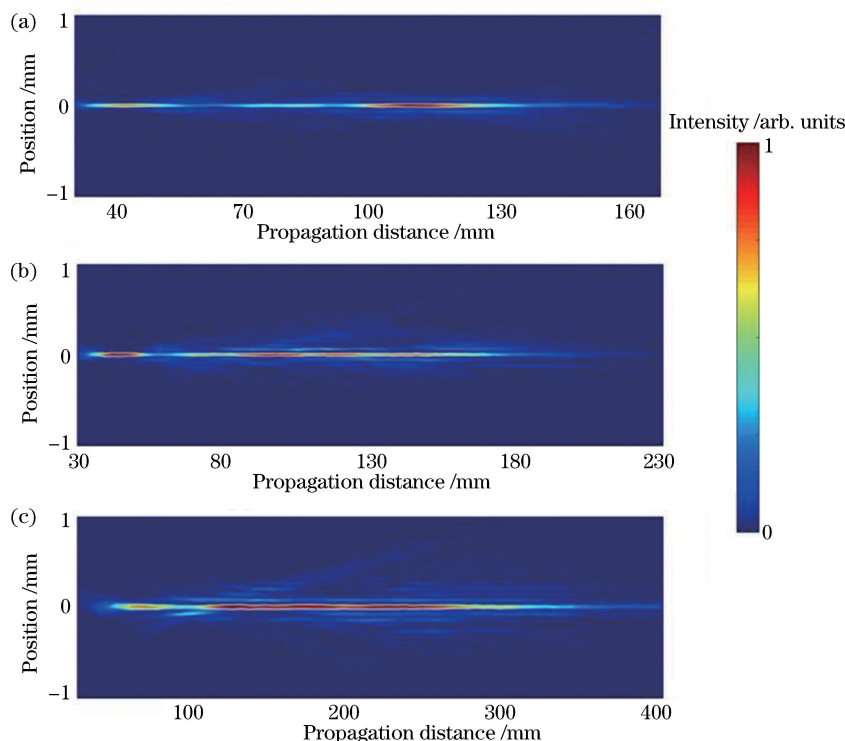


图 4 实测的不同致动器环数变形镜生成的贝塞尔光束的轴向传播图。(a) 3 环;(b) 4 环;(c) 5 环

Fig. 4 Measured axial propagations of Bessel beams generated by deformable mirrors with different actuator rings.

(a) 3 rings; (b) 4 rings; (c) 5 rings

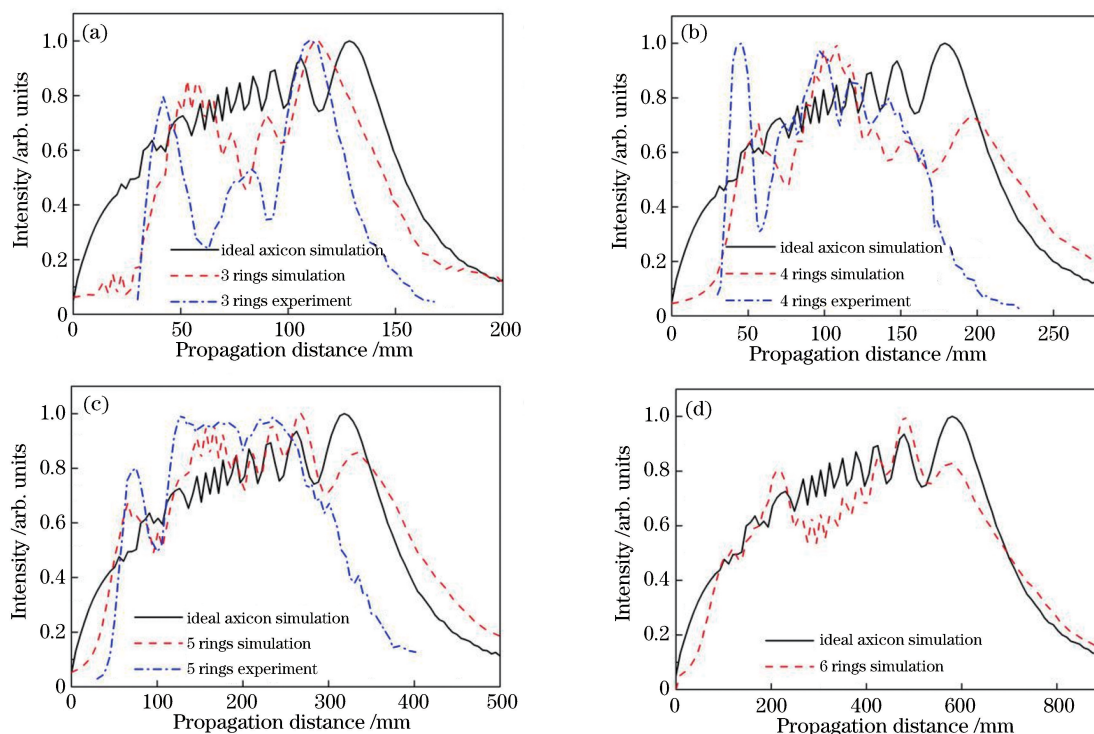


图 5 不同致动器环数变形镜重构的轴向光强分布。(a) 3 环;(b) 4 环;(c) 5 环;(d) 6 环

Fig. 5 Axial light intensity distributions of Bessel beams generated by deformable mirrors with different actuator rings.

(a) 3 rings; (b) 4 rings; (c) 5 rings; (d) 6 rings

表 2 贝塞尔光束的轴向光强半峰全宽

Table 2 FWHM of axial light intensity of Bessel beams

Ring number	Experiment result /mm	Simulation result /mm	
		Deformable mirror	Ideal axicon
3	32	61	121
4	101	143	169
5	217	295	300
6	—	538	547

4 入射角影响分析

为了验证光束入射角对贝塞尔光束质量的影响,采用 5 环 61 个致动器进行实验,激光入射角 α 分别设置为 15° 、 30° 、 45° 。当光束斜入射到镜面时,光束照射的区域为椭圆形,令照射面的椭圆长轴保持为 20 mm,镜面照射区域如图 6(a)所示,随着入射角的变化,短轴长度从 19.3 mm 减小到 14.1 mm。由于变形镜工作面积变化影响其重构相位的幅值,当入射角为 45° 时,采用 PV 值为 $5 \mu\text{m}$ 的目标锥形相位;当入射角为 15° 和 30° 时,采用 PV 值为 $10 \mu\text{m}$ 的目标锥形相位。光束入射角为 15° 、 30° 、 45° 时产生的锥形相位残差 RMS 值分别为 46 nm、44 nm、28 nm,相同重构幅值下三者的残差基本一致,且残差均很小,表明锥形相位重构不受入射角的影响。图 6(b)~(d)为通

过 CCD 相机拍摄到的不同入射角下产生的贝塞尔光束光强分布,实验中生成的贝塞尔光束质量较好,无棋盘状光点分布现象^[10]。入射角 α 从 15° 增大到 45° 时主斑半径的实验测量值分别为 $46.9 \mu\text{m}$ 、 $41.3 \mu\text{m}$ 、 $67.5 \mu\text{m}$,理论主斑半径分别为 $46.9 \mu\text{m}$ 、 $42.1 \mu\text{m}$ 、 $68.7 \mu\text{m}$,实验结果和理论结果基本一致。上述实验结果表明变形镜生成的贝塞尔光束质量不受斜入射影响,这是采用变形镜生成贝塞尔光束的又一优势。

5 结 论

通过实验和仿真分析了压电变形镜致动器环数及光束入射角对生成的贝塞尔光束质量的影响。结果表明,随着变形镜致动器环数的增加,镜面圆顶状误差和波浪状镜面残差减小,贝塞尔光束质量显著提高。当环数不低于 5 环时,贝塞尔光束质量较好,重构相位的 PV 值为 $10 \mu\text{m}$ 的锥形相位残差 RMS 值仅为 26 nm。为了减少由圆顶状误差引起的镜面聚焦能量,可以采用增加致动器环数的方法来减小第一环致动器面积占比。另外,通过改变光束入射角,验证了反射式变形镜产生的贝塞尔光束质量不受入射角的影响。本研究为变形镜生成高质量贝塞尔光束提供了建议和依据,有利于推动基于变形镜的贝塞尔光束的生成与应用。

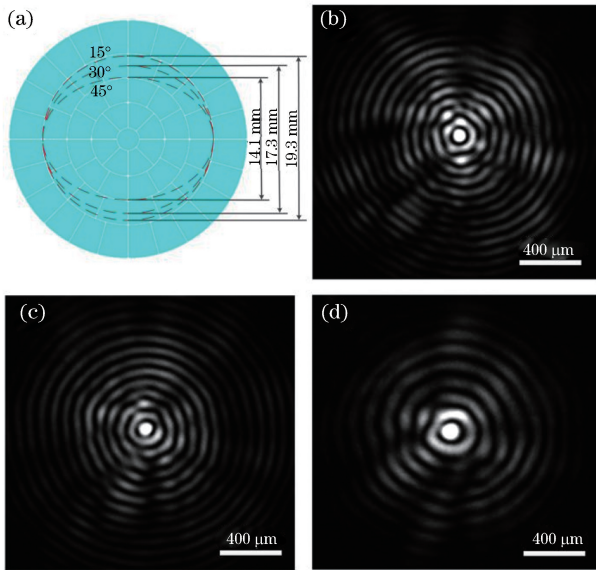


图 6 不同光束入射角下贝塞尔光束的截面光强分布。

(a) 镜面照射区域的设计图; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°

Fig. 6 Cross-section intensity distributions of Bessel beams with different incident angles. (a) Design of specular illumination area; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°

参 考 文 献

- [1] Dholakia K, Čižmár T. Shaping the future of manipulation[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 335-342.
- [2] Li S H, Wang J. Adaptive free-space optical communications through turbulence using self-healing Bessel beams [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43233.
- [3] Luo Z, Wang C, Duan J A, *et al.* One-step fabrication of annular microstructures based on improved femtosecond laser Bessel-Gaussian beam shaping [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 3943-3947.
- [4] Wang Z, Jiang L, Li X W, *et al.* High-throughput microchannel fabrication in fused silica by temporally shaped femtosecond laser Bessel-beam-assisted chemical etching[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 98-101.
- [5] Durnin J, Miceli J, Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [6] Scott G. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(12): 2640-2643.
- [7] Ma L, Wu F T, Huang Q L. A new type of combined axicon for generating non-diffracting Bessel beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2417-2420.
- [8] Yang L, Qian D D, Xin C, *et al.* Two-photon polymerization of microstructures by a non-diffraction multifoci pattern generated from a superposed Bessel beam[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 743-746.
- [9] Ni D D, Xie C, Zhao Z Y, *et al.* Bessel-like beams with the precisely controllable central lobe size [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0714001.
倪丹丹, 谢辰, 赵振宇, 等. 中心主瓣尺寸可精细调控的类贝塞尔光束 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0714001.
- [10] Hu R, Wu F T. Influence of axicon vertex off axis machining error on Bessel beams [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1205002.
胡润, 吴逢铁. 轴棱锥顶点离轴加工误差对贝塞尔光束的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1205002.
- [11] Thaning A, Jaroszewicz Z, Friberg A T. Diffractive axicons in oblique illumination: analysis and experiments and comparison with elliptical axicons [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(1): 9-17.
- [12] Ye B Q, Chen J, Fukuchi N, *et al.* Characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(3): 374-378.
叶必卿, 陈军, 福智昇央, 等. 液晶空间光调制器的斜入射特性 [J]. *中国激光*, 2007, 34(3): 374-378.
- [13] Li Y, Yu Q Z, Yang Z F, *et al.* Tunable Bessel and annular beams generated by a unimorph deformable mirror [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(10): 106107.
- [14] Brousseau D, Drapeau J, Piché M, *et al.* Generation of Bessel beams using a magnetic liquid deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 4005-4010.
- [15] Yu X M, Todi A, Tang H M. Bessel beam generation using a segmented deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4677-4682.
- [16] Gori F, Guattari G, Padovani C. Bessel-Gauss beams [J]. *Optics Communications*, 1987, 64(6): 491-495.
- [17] Ma J Q, Chen K, Chen J J, *et al.* Closed-loop correction and ocular wavefronts compensation of a 62-element silicon unimorph deformable mirror [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 042201.
- [18] Zhu L J, Sun P C, Bartsch D U, *et al.* Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(28): 6019-6026.
- [19] Brzobohatý O, Čižmár T, Zemánek P. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12688-12700.