

液晶轴棱锥

刘志强, 胡轶瑶, 叶茂*

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

摘要 如何更加有效且简便地得到新型锥透镜及贝塞尔(Beasel)光束一直是研究人员关注的重点。提出了一种由液晶材料制作的锥度可由电压调整的轴棱锥。对所提出的液晶轴棱锥特性进行了介绍。此类液晶轴棱锥由两个电压控制, 其中一个电压固定, 通过改变另一个电压来改变轴棱锥锥度。对液晶轴棱锥特性进行了测试, 实验结果表明液晶轴棱锥能够对入射光进行与传统轴棱锥相似的调制, 并且实现锥度的连续变化。搭建了基于液晶轴棱锥的成像系统, 并通过此系统实现了扩展景深成像。液晶轴棱锥为产生贝塞尔光束及扩展景深成像提供了新的思路与方法。

关键词 光学器件; 轴棱锥; 液晶透镜; 贝塞尔光束; 扩展景深

中图分类号 O435.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0823001

Liquid Crystal Axicon

Liu Zhiqiang, Hu Yiyao, Ye Mao*

School of Optoelectronics Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract The ways to obtain new types of axicons and Bessel beams more effectively and easily have always been the focus of researchers. This paper proposes an axicon made of liquid crystal material with cone angle adjusted by voltage and introduces the characteristics of the proposed liquid crystal axicon. This type of liquid crystal axicon is controlled by two voltages, one of which is fixed, and the cone angle of the axicon is altered by changing the other voltage. The characteristics of the liquid crystal axicon are tested. The experimental results show that the liquid crystal axicon can modulate the incident light similar to the traditional axicon and realize the continuous change of the cone angle. Finally, an imaging system using a liquid crystal axicon is built, and the extended depth-of-field imaging is achieved by this system. The liquid crystal axicon provides new ideas and methods for generating Bessel beams and extending the depth of field.

Key words optical devices; axicon; liquid crystal lens; Bessel beam; extended depth of field

1 引言

无衍射贝塞尔光束具有中心主光斑尺寸小、准直距离长、不发散, 且通过障碍物进行光束重建的独特优点^[1]。近年来, 贝塞尔光束的特性及应用得到了深入研究, 例如贝塞尔光束在大气湍流中的螺旋相位谱^[2]、利用贝塞尔光束在散射介质中生成受激拉曼散射信号^[3]等。轴棱锥由于其良好的贝塞尔光

束特性^[4], 引起了人们的广泛关注。对于传统轴棱锥而言, 利用其产生的贝塞尔光束的光斑尺寸固定, 若要改变所产生的贝塞尔光束尺寸, 需要对其系统组件进行替换, 所以其在应用中的适应性差。同时, 一些有源光学器件, 例如空间光调制器(SLM)^[5]和可调谐声梯度透镜^[6], 可以产生具有可变光斑参数的贝塞尔光束。然而, SLM 价格昂贵, 可调谐声梯度透镜设计十分复杂, 这都给有源光学器件的使用

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-01-21; 录用日期: 2022-01-30

基金项目: 四川省科技计划(2021YJ0102)

通信作者: *mao_ye@uestc.edu.cn

带来了不便。因此,新型轴棱锥一直是近年来的研究热点。2008 年, Milne 等^[7]提出了一种新型可调流体轴棱锥;2014 年, Xie 等^[8]利用梯度折射率透镜实现了轴棱锥效果。而液晶分子的光学各向异性及其对焦能力^[9]为液晶轴棱锥的实现提供了可能。2021 年, Kawamura 等^[10]设计了一种液晶轴棱锥结构, 此类结构由圆形电极、环形电极、圆孔图案电极和高阻层构成, 虽然这类结构能够实现轴棱锥效果, 但较为复杂。因此, 结构简单、制作简便的液晶轴棱锥很有研究价值与意义。

轴棱锥可应用于成像^[11-13]、光镊^[14]、光学加速^[15-16]和光刻技术^[17]等领域。在这些应用之中, 研究人员特别关注轴棱锥大景深成像特性的应用。Ding^[18]和 Lee^[19]等先后利用轴棱锥实现了大景深、高分辨率的光学相干断层扫描, 该技术在医疗方面有着很好的应用前景。而利用液晶轴棱锥实现的无机械结构的扩展景深成像系统为轴棱锥的应用提供

了新的思路。

本文提出一种驱动方式与电可调液晶透镜相似的新型结构液晶轴棱锥。液晶轴棱锥的优势在于能够通过电控的方式简单有效地实现对于焦点区域的控制, 且在不改变系统任何元件位置的情况下, 实现焦点沿光轴的移动。最后对于利用液晶轴棱锥实现的大景深成像进行了说明与实验。

2 液晶轴棱锥结构与测试

本文所提出的液晶轴棱锥结构如图 1 所示。可以看出, 此透镜由上下玻璃基板、基板间间隔子和液晶层所构成。对上基板外侧的氧化铟锡(ITO)电极进行刻蚀, 刻蚀图案如图 1 所示, 黑色部分为有 ITO 区域, 空白部分为无 ITO 区域。将下基板 ITO 电极接地, 使上基板四周 ITO 区域与下基板电极之间形成电压 V_1 , 中心 ITO 区域与下基板电极之间形成电压 V_2 , 并用 V_1 和 V_2 两个电压来驱动此器件。

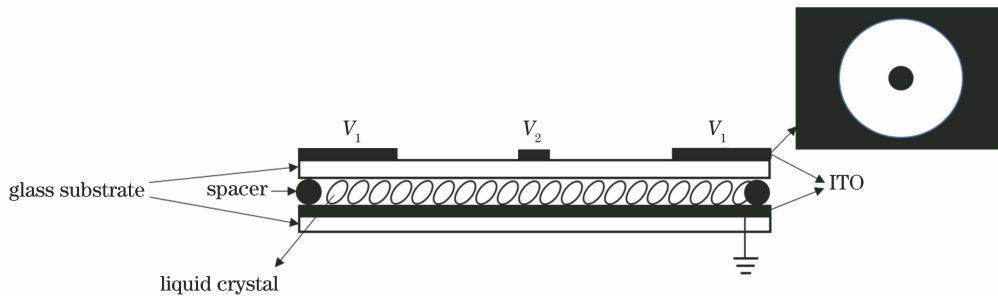


图 1 液晶轴棱锥结构

Fig. 1 Liquid crystal axicon structure

对此器件驱动后的电场进行了仿真。在电压 $V_2=10\text{ V}$ 不变的条件下连续改变 V_1 , 发现 V_1 在 $30\sim 60\text{ V}$ 区间变化时, 其液晶层各处的电压与位置近似呈线性变化, 说明在此区间内此器件具有轴棱锥作用。因此选择区间上下限值及区间中任一电压值, 即选择 $V_1=30\text{ V}$, $V_1=40\text{ V}$ 和 $V_1=60\text{ V}$ 三种情况来具体讨论其电场分布, 电场仿真结果如图 2 所示。图 2 显示了不同驱动电压下此器件液晶层各处电压随位置的变化情况。可以看出, 虽然 V_1 不同, 但孔径区域内液晶层电压随位置的变化趋势都相同, 即孔径中心电压值最小, 从孔径中心到孔径边缘电压值逐渐增加, 在孔径边缘处电压值最大, 且此变化曲线近似为线性。同时可以看出, 从孔径中心到孔径边缘的电压变化曲线的梯度随 V_1 的增大而增大。孔径同一位置的电压值也随 V_1 的增大而增大。可知, 此透镜的电场仿真结果都与传统轴棱锥的波前情况相符合。

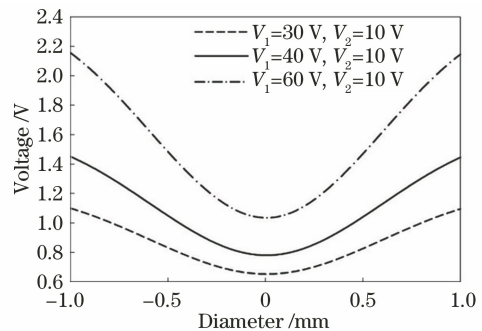


图 2 液晶轴棱锥电场仿真结果

Fig. 2 Simulation results of electric field of liquid crystal axicon

图 3 为实际测量得到的液晶对电场的响应曲线, 表明了液晶分子上所加电压与光束通过液晶分子所产生的相位差间的关系。可以看出, 液晶分子上所加电压从 2 V 增至 4 V 的过程中, 其响应基本随电压呈线性变化, 这使得液晶轴棱锥的实现成为了可能。

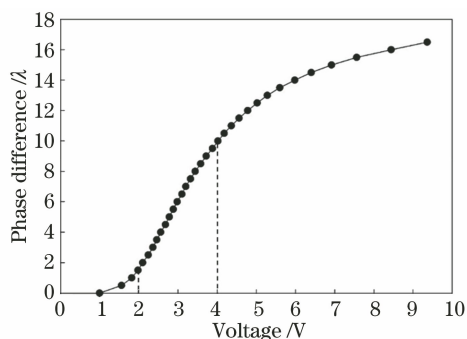


图 3 液晶对电场的响应曲线
Fig. 3 Response curve of liquid crystal to electric field

选择马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 干涉装置来记录光束经过液晶轴棱锥的波前情况, 此干涉仪所用的激光波长为 532 nm。图 4(a)~(c) 为在不同驱动电压下得到的液晶轴棱锥波前干涉图。可以看出, 当液晶层电场处于图 3 所示的线性区域时, 液晶轴棱锥的波前变化趋势及规律都与图 2 中仿真结果一致, 这说明在合适的驱动条件下, 液晶透镜与传统轴棱锥对入射光波进行相似的调制。

对图 4 中不同驱动条件下孔径区域内不同位置的相位进行测试, 再对所测多组数据进行拟合, 可得到不同驱动条件下轴棱锥波前的拟合情况, 如图 5 所示。液晶轴棱锥锥角 α 可表示为

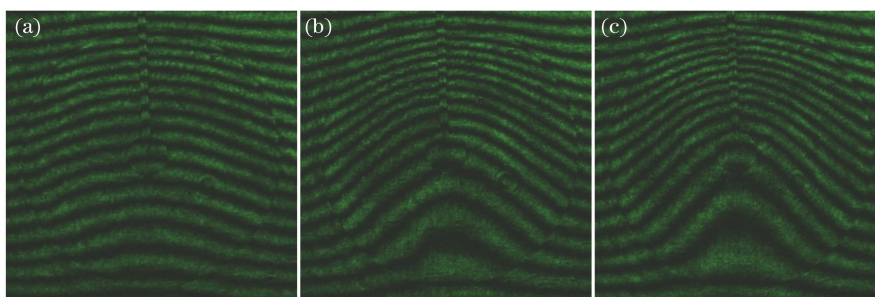


图 4 液晶轴棱锥波前干涉图。(a) $V_1=30\text{ V}, V_2=10\text{ V}$; (b) $V_1=40\text{ V}, V_2=10\text{ V}$; (c) $V_1=60\text{ V}, V_2=10\text{ V}$

Fig. 4 Wavefront interferograms of liquid crystal axicon. (a) $V_1=30\text{ V}, V_2=10\text{ V}$; (b) $V_1=40\text{ V}, V_2=10\text{ V}$; (c) $V_1=60\text{ V}, V_2=10\text{ V}$

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta\phi}{r} = \arctan \frac{m\lambda}{r}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi$ 为光线通过液晶轴棱锥孔径边缘与通过孔径中心的相位差; m 为光线通过液晶轴棱锥孔径边缘与通过孔径中心的波数之差; r 为液晶器件的孔径的 1/2。表 1 为通过马赫-曾德尔干涉仪对不同电压下的液晶轴棱锥进行测试后, 利用(1)式计算得到的锥角 α , 由此可知液晶轴棱锥锥角会根据其所加电压的变化而变化, 并且在 V_2 不变的情况下, 锥角会随着 V_1 的增大而增大。

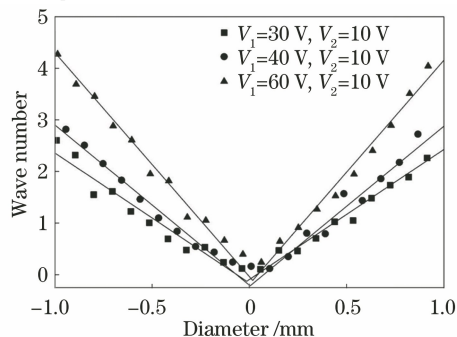


图 5 不同电压下的透镜波前拟合图
Fig. 5 Wavefront fitting diagram of lens under different voltages

表 1 液晶轴棱锥锥角的计算结果

Table 1 Calculation results of cone angle of liquid crystal axicon

V_1/V	V_2/V	Cone angle $\alpha /(^{\circ})$
30	10	0.073
40	10	0.088
60	10	0.128

图 6 说明了利用液晶轴棱锥及玻璃镜头产生局域空心光束的原理。在平行光束依次入射到锥角为 α 的液晶轴棱锥及焦距为 f 的玻璃镜头后, 此系统会对平行光束进行会聚, 在一定范围内形成暗中空

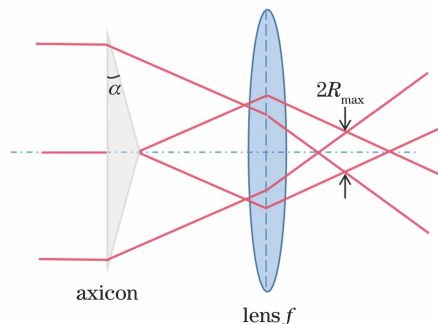


图 6 产生局域空心光束的原理图
Fig. 6 Schematic diagram of generating local hollow beam

区域,即产生了局域空心光束。中心光线与边缘光线交点处所产生的局域空心光束半径 R 最大。当轴棱锥介质折射率为 n 时,最大局域空心光束半径 R_{\max} 可表示为

$$R_{\max} = f(n-1)\alpha。 \quad (2)$$

图 7 是在其他条件不变的情况下,波长为

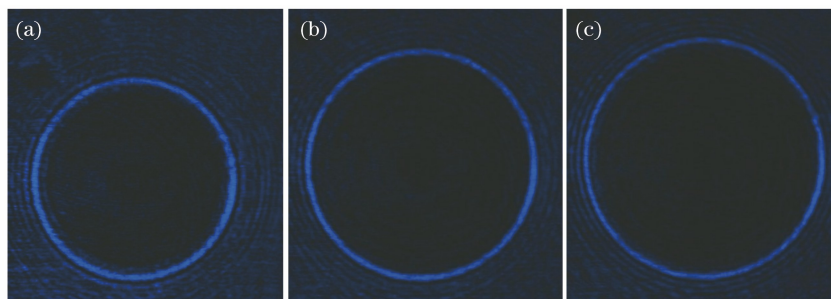


图 7 激光通过系统对焦后所成图像。(a) $V_1=30\text{ V}$, $V_2=10\text{ V}$; (b) $V_1=40\text{ V}$, $V_2=10\text{ V}$; (c) $V_1=60\text{ V}$, $V_2=10\text{ V}$

Fig. 7 Focus images of laser by system. (a) $V_1=30\text{ V}$, $V_2=10\text{ V}$; (b) $V_1=40\text{ V}$, $V_2=10\text{ V}$;

(c) $V_1=60\text{ V}$, $V_2=10\text{ V}$

从上述仿真、推导及实验测试结果可得,若对图 1 所示的液晶器件施加合适的驱动电压,可以使其产生与传统轴棱锥相似的对入射光的调制效果,即可以使其成为液晶轴棱锥。

3 实验与讨论

液晶轴棱锥的应用范围非常广泛,其中之一就是用液晶轴棱锥进行大景深成像。本文对利用液晶

457 nm 的激光经所加电压不同的液晶轴棱锥-玻璃镜头系统对焦后所成的图像。可以看出,不同电压驱动下成像圆的直径发生了改变,即轴棱锥锥角发生了改变。在电压 V_2 保持不变的情况下,液晶轴棱锥的锥角和成像圆直径随 V_1 的增大而增大。

轴棱锥的扩展景深成像进行了实验,成像系统如图 8 所示。此成像系统由不同物距的物体、液晶轴棱锥、玻璃镜头和图像传感器(CMOS)组成。

图 9 为在对液晶轴棱锥施加合适的电压时系统的成像效果图,此时所加电压为 $V_1=30\text{ V}$, $V_2=10\text{ V}$ 。可以看出,系统在此电压状态下实现了对不同物距的兔子、马和斑马在系统像面上的清晰像。

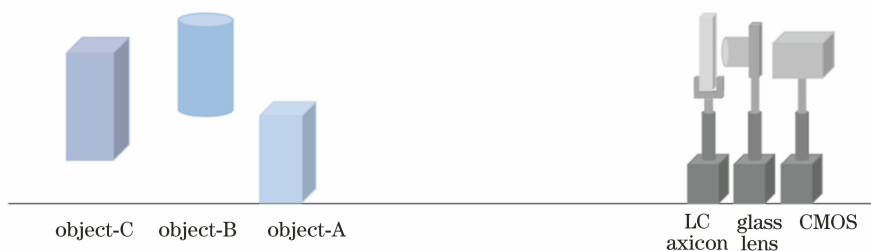


图 8 利用轴棱锥实现扩展景深成像的实验装置图

Fig. 8 Experimental device for imaging with extended depth of field realized by using liquid crystal axicon

对液晶轴棱锥施加电压前后的系统成像效果如图 10 所示。图 10(a)为液晶轴棱锥不工作时的系统成像效果,可以看出此时只能对斑马清晰对焦,而无法对兔子与马清晰对焦。图 10(b)为对液晶轴棱锥施加合适电压下的系统成像效果图,通过与图 10(a)的对比可以看出,此时系统对兔子、马和斑马都有清晰的对焦效果。

利用 MTF 测试卡 ISO12233 在液晶轴棱锥工作和不工作两种状态下对不同物距的 MTF30 进行了测试,结果如图 11 所示。根据先验知识,在

MTF30 大于 0.07 时,认为此系统清晰对焦。在液晶轴棱锥工作时,系统的景深范围约为 15~50 cm。在液晶轴棱锥不工作时,系统的景深范围为 27~50 cm。这说明虽然液晶轴棱锥工作时对比其不工作时系统 MTF30 有一定程度的降低,但是液晶轴棱锥工作时 MTF30 大于等于 0.07 所对应的物距范围大于其不工作时所对应的物距范围。这说明此成像系统利用液晶锥透镜实现了扩展景深成像。

此实验结果说明,通过液晶轴棱锥可以实现扩展景深成像,液晶轴棱锥为扩展景深提供了更加简



图 9 扩展景深成像效果图

Fig. 9 Effect of extended depth of field imaging

单有效的方法,有广泛的应用前景。

4 结 论

对液晶轴棱锥结构、电场仿真结果、实际测试情况进行了说明,可以看出:对液晶透镜进行合适驱动可使其对光波进行与传统轴棱锥相似的调制。对液晶轴棱锥的成像情况进行了实验,从实验中可以看出,利用液晶轴棱锥可以实现扩展景深成像。液晶轴棱锥的实现不仅为无机械移动的扩展景深成像提供了新的思路,还为产生无衍射贝塞尔光束提供了操作更加简便、系统更加简单、价格更加低廉的方法。



图 10 对液晶轴棱锥施加电压前后的系统成像效果。(a)液晶轴棱锥不工作时的成像效果;(b)液晶轴棱锥工作时的成像效果

Fig. 10 System imaging effects with and without voltage applied to liquid crystal axicon. (a) Imaging effects when liquid crystal axicon is not working; (b) imaging effects when liquid crystal axicon is working

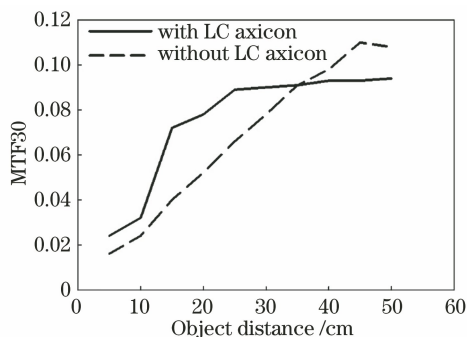


图 11 MTF30 随物距的变化

Fig. 11 Change of MTF30 with object distance

参 考 文 献

- [1] Durnin J, Miceli J, Jr., Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [2] Wei H Y, Yan J L, Jia P, et al. Spiral phase spectrum of focused Bessel beams in atmospheric turbulence channel[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2401001.
韦宏艳, 闫玠霖, 贾鹏, 等. 聚焦贝塞尔光束在大气湍流中的螺旋相位谱[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2401001.
- [3] Chen X L, Wang X Y, Wang L, et al. Stimulated Raman scattering signal generation in a scattering medium using self-reconstructing Bessel beams[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 929-939.
- [4] Pu J X, Zhang H H, Nemoto S. Lens axicons illuminated by Gaussian beams for generation of uniform-axial intensity Bessel fields [J]. Optical Engineering, 2000, 39(2): 803-807.
- [5] Chattapiban N, Rogers E A, Cofield D, et al.

- Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22): 2183-2185.
- [6] McLeod E, Hopkins A B, Arnold C B. Multiscale Bessel beams generated by a tunable acoustic gradient index of refraction lens[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(21): 3155-3157.
- [7] Milne G, Jeffries G D M, Chiu D T. Tunable generation of Bessel beams with a fluidic axicon[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(26): 261101.
- [8] Xie Z, Armbruster V, Grosjean T. Axicon on a gradient index lens (AXIGRIN): integrated optical bench for Bessel beam generation from a point-like source[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(26): 6103-6107.
- [9] Lan T C, Lan R H, Chen X X, et al. Research on liquid crystal lens hill climbing autofocus algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1411003.
兰天成, 兰荣华, 陈晓西, 等. 液晶透镜爬山自动对焦算法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1411003.
- [10] Kawamura M, Ichimura Y, Sugawara T. Liquid crystal lens with tunable conical lens properties[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(4): 042001.
- [11] Saikaley A, Chebbi B, Golub I. Imaging properties of three refractive axicons[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(28): 6910-6918.
- [12] Khonina S N, Volotovskiy S G. Application axicons in a large-aperture focusing system [J]. *Optical Memory and Neural Networks*, 2014, 23(4): 201-217.
- [13] Arimoto R, Saloma C, Tanaka T, et al. Imaging properties of axicon in a scanning optical system[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(31): 6653-6657.
- [14] Garcés-Chávez 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.
- [15] Hafizi B, Esarey E, Sprangle P. Laser-driven acceleration with Bessel beams [J]. *Physical Review E*, 1997, 55(3): 3539-3545.
- [16] Tidwell S C, Ford D H, Kimura W D. Transporting and focusing radially polarized laser beams [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(7): 1527-1531.
- [17] Erde'lyi M. Generation of diffraction-free beams for applications in optical microlithography [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1997, 15(2): 287.
- [18] Ding Z, Ren H, Zhao Y, et al. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(4): 243-245.
- [19] Lee K S, Rolland J P. Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1696-1698.