

# 基于变形镜的多波长艾里光束生成与传播特性

韩洪民, 范引鹏, 杨叶城, 钟贵明, 马剑强\*

宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

**摘要** 为了获得高质量无色差的多波长相干艾里光束, 提出了一种基于变形镜的多波长艾里光束生成方法, 并通过仿真与实验研究了多波长艾里光束的传播特性。实验结果表明, 变形镜可以有效消除色差对光束的影响, 生成高质量的多波长艾里光束; 且传播中主瓣不会发生色差分离和衍射。此外, 生成的多波长艾里光束主瓣被不透明障碍物遮挡后, 经过一段距离传播后可自行恢复。本研究为多波长艾里光束在多光谱成像和光学微操作等领域中的应用提供了一定的基础。

**关键词** 自适应光学; 艾里光束; 变形镜; 多波长; 光束传播

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1626001

## Generation and Propagation Characteristics of Multi-Wavelength Airy Beams Based on Deformable Mirrors

Han Hongmin, Fan Yinpeng, Yang Yecheng, Zhong Guiming, Ma Jianqiang\*

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

**Abstract** In order to obtain high-quality multi-wavelength coherent Airy beams without chromatic aberration, we propose a method for generating multi-wavelength Airy beams based on deformable mirrors, and through simulation and experiment, the generation and propagation characteristics of multi-wavelength Airy beams are studied. The experimental results show that the deformable mirrors can effectively eliminate the influence of chromatic aberration on the beam and generate a high-quality multi-wavelength Airy beam, and the main lobe does not undergo chromatic aberration separation and diffraction during propagation. In addition, the main lobe of the generated multi-wavelength Airy beam can heal itself after propagating for a certain distance when it is blocked by an opaque obstacle. This research provides a basis for the potential applications of multi-wavelength Airy beams in the fields of multispectral imaging and optical micromanipulation.

**Key words** adaptive optics; Airy beam; deformable mirrors; multi-wavelength; beam propagation

**OCIS codes** 220.1080; 070.7345; 350.5500

## 1 引言

艾里光束(Airy beam)具有独特的无衍射、自愈和弯曲传播特性<sup>[1-3]</sup>, 引起了人们的广泛关注, 在空间光通信<sup>[4]</sup>、光学微粒操作<sup>[5]</sup>、弯曲光波导<sup>[6]</sup>及高分辨生物显微成像<sup>[7-8]</sup>等领域有着重要应用。现有研究主要集中在单波长相干艾里光束, 多波长(宽带)

艾里光束在多光谱成像和光学微操作等领域中具有潜在的应用价值<sup>[9-10]</sup>, 近年来也得到了人们的广泛研究。Valdmann等<sup>[11-12]</sup>采用透射式立方相位片生成了多波长艾里光束, 但透射式元件存在的色差使生成艾里光束的偏转系数与波长有关, 导致艾里光束的主瓣发散。之后, Valdmann等<sup>[13]</sup>采用反射式立方相位片解决了色散问题, 保证了多波长艾里光

收稿日期: 2020-12-18; 修回日期: 2021-02-22; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51805280)、浙江省省属高校基本科研业务费(SJLY2020002)、浙江省航空发动机极端制造技术研究重点实验室开放基金

通信作者: \*majianqiang@nbu.edu.cn

束的主瓣在传播过程中不分散,但相位片生成的艾里光束无法调节,不利于实际应用。Morris 等<sup>[14]</sup>使用空间光调制器生成可调的多波长艾里光束,但无法解决色差问题。Mansour 等<sup>[15]</sup>通过组合柱面镜系统产生可调的多波长艾里光束,但柱面镜系统的调节能力有限,且装配精度要求高,限制了其应用。

变形镜(DM)作为自适应光学系统的波前校正器,是一种具有可控反射镜面的自适应光学元件,不仅可以校正光学系统中的像差,还可以生成高精度的立方曲面,且反射式元件在原理上可克服不同波长带来的色散问题,有望生成可调的多波长艾里光束<sup>[16]</sup>。因此,本文基于 DM 开展了多波长艾里光束的生成研究,搭建了基于相干光源叠加的多波长艾里光束生成系统,并通过仿真和实验研究了艾里光束的生成与传播特性。

## 2 多波长艾里光束生成系统

基于 DM 的多波长艾里光束生成系统如图 1 所示,采用 532 nm 的绿色激光(Thorlabs NJ07860)和 635 nm 的红色激光(Thorlabs HLS635)作为系统光源。准直后的两束激光经过分光棱镜 BS1 合束,通过两个自由度可调的反射镜 M 使绿色激光与红色激光平行,合束后的激光到达 DM 镜面进行立方相位调制。实验采用 32 单元单压电 DM,其有效孔径为 15 mm<sup>[17]</sup>。DM 产生的立方波前(光程差)为镜面物理变形量的 2 倍,可表示为<sup>[16]</sup>

$$G(x, y) = k(x^3 + y^3), \quad (1)$$

式中,  $k$  为与波长无关的幅值系数,  $(x, y)$  为归一化坐标。相应的立方相位则需乘以  $2\pi/\lambda$ , 其中,  $\lambda$  为波长。虽然 DM 的镜面变形不取决于入射光束的波长,但其相位与波长相关。Mansour 等<sup>[15]</sup>的研究表明,生成艾里光束传播过程中在  $x$  或  $y$  方向上的

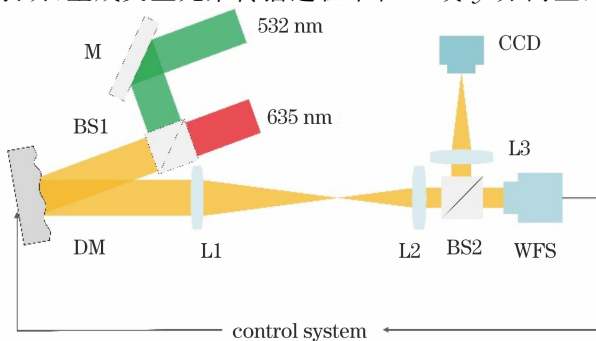


图 1 基于 DM 的多波长艾里光束生成系统

Fig. 1 Generation system of multi-wavelength Airy beams based on DM

偏转可表示为

$$D(z) = z^2 / (12f^3k), \quad (2)$$

式中,  $f$  为傅里叶透镜的焦距,  $z$  为艾里光束主瓣的传播距离。可以发现, (2) 式中不包含波长项, 这表明反射型器件生成的艾里光束偏转轨迹与波长无关。

为适配 DM 口径与波前传感器的探测口径, 先将调制后的光束通过由透镜 L1 和透镜 L2 组成的缩束系统进行缩束(缩束比为 0.2)。然后用分光镜 BS2 将光束分成两束, 其中一束激光由波前传感器 WFS(Thorlabs WFS150-7RS)探测, 所测波前形变是镜面机械形变的 2 倍, 以实时补偿光学系统的像差并生成目标调制相位; 另一束激光经过焦距为 100 mm 的透镜 L3 进行傅里叶变换, 生成艾里光束。定义焦距为艾里光束的零点位置( $z=0$  mm), 生成的艾里光束在不同位置处的光强分布由置于滑轨上的彩色 CCD 相机(Basler ace-1300gc30)采集, 相机的像素尺寸为  $3.75 \mu\text{m}$ 。为了避免光学系统中各元件的色散对多波长艾里光束产生的影响, 系统中的透镜均为消色差透镜。

## 3 多波长艾里光束的仿真

由于不同波长之间不相干, 仿真多波长艾里光束时可根据菲涅耳衍射公式仿真出不同波长激光经 DM 立方相位调制后生成的艾里光束, 进而将不同波长艾里光束 RGB(Red, Green, Blue)通道的强度进行累加。根据国际照明委员会(CIE)标准色度原则可知<sup>[18]</sup>, 不同波长艾里光束 RGB 通道的强度累加可表示为

$$\begin{aligned} R &= \int_{\lambda} I(\lambda) r(\lambda) d\lambda \\ G &= \int_{\lambda} I(\lambda) g(\lambda) d\lambda, \\ B &= \int_{\lambda} I(\lambda) b(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $R, G, B$  分别为红、绿、蓝通道的光强值,  $I(\lambda)$  为激光的光强值,  $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$  为归一化的光谱三刺激值。系统中红色和绿色光源的强度比约为 1:0.8。绿色激光(532 nm)光谱的三刺激值比例  $r(\lambda):g(\lambda):b(\lambda)$  为 0.05:0.95:0, 红色激光(635 nm)光谱的三刺激值比例  $r(\lambda):g(\lambda):b(\lambda)$  为 1.54:-0.23:-0.31。由(3)式可计算出多波长艾里光束 RGB 通道的光强值。

仿真经 DM 调制生成的绿光和红光艾里光束

在  $z=0$  mm 处的光强分布如图 2 所示,可以发现,两种波长艾里光束沿水平截面的光强曲线符合艾里函数。艾里光束的主瓣尺寸及瓣间距均随波长的增大而增大,绿光和红光艾里光束的主瓣半峰全宽 (FWHM) 分别约为  $63 \mu\text{m}$  和  $66 \mu\text{m}$ 。仿真得到双波长艾里光束在不同位置的横向光强分布如图 3(a) 所示,主瓣中心的传播轨迹如图 3(b) 所示。可以发现,不同波长艾里光束相互叠加,主瓣呈黄色,即绿光和红光的混合色。由于两种波长艾里光束的主瓣在传播过程中的偏转轨迹一致,因此,双波长艾里光束在传播过程中的主瓣尺寸和颜色均保持不变,未发生颜色分离。这表明基于 DM 生成的不同波长艾里光束的主瓣中心位置及弯曲轨迹是一致的,不受波长影响,可生成高质量的多波长艾里光束,而旁瓣则呈红绿相间的色散现象,原因是瓣间距随波长的增加而增大。

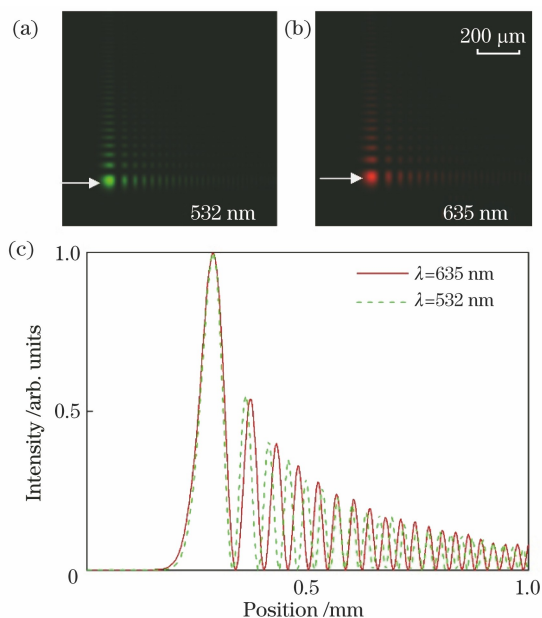


图 2 不同波长艾里光束的光强分布(仿真值)。

(a) 波长为 532 nm; (b) 波长为 635 nm;  
(c) 横截面的光强曲线

Fig. 2 Intensity distributions of the simulated Airy beams with different wavelengths (simulation value).

(a) Wavelength is 532 nm; (b) wavelength is 635 nm; (c) intensity curve of the cross section

## 4 实验结果

### 4.1 多波长艾里光束的生成

用图 1 中基于 DM 的多波长艾里光束生成系统进行实验。以波前形变作为反馈,先用 DM 校正系统中的光学像差,进而生成立方波前形变。实验生

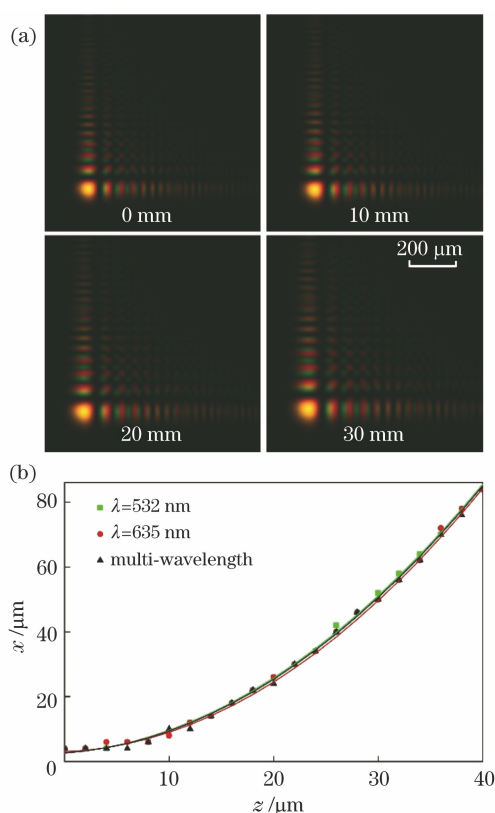


图 3 多波长艾里光束的传播过程。(a) 不同位置处的横向光强分布; (b) 传播轨迹

Fig. 3 Propagation process of the multi-wavelength Airy beams. (a) Intensity distributions at different propagation positions; (b) propagation trajectory

成的立方波前形变的峰谷值为  $11.56 \mu\text{m}$ , 对应的均方根值为  $2.38 \mu\text{m}$ , 均方根残余误差约为  $78 \text{ nm}$ , 这表明 DM 可以产生高精度的立方相位。实验生成的绿光和红光艾里光束在  $z=0$  mm 处的光强分布如图 4 所示, 可以发现, 绿光和红光艾里光束均能很好地符合二维艾里函数分布, 主瓣的 FWHM 分别约为  $64 \mu\text{m}$  和  $68 \mu\text{m}$ 。实测双波长艾里光束在不同传播位置的横向光强分布及其在  $0 \sim 40$  mm 传播范围内的主瓣传播轨迹如图 5 所示, 可以发现, 艾里光束的主瓣颜色均匀, 且传播过程中主瓣未发生分离, 尺寸变化范围为  $64 \sim 75 \mu\text{m}$ , 具有较好的无衍射传播和横向自加速能力。实验结果与仿真结果一致, 这表明基于 DM 可生成高质量的多波长艾里光束。

### 4.2 多波长艾里光束的自愈性

为了表征生成多波长艾里光束的自愈性, 用一个不透明的障碍物遮挡主瓣, 并沿光轴方向移动 CCD 相机测量不同传播距离处的光强分布, 结果如图 6 所示。可以发现, 随着传播距离的增加, 旁瓣部分能量逐渐重新会聚到主瓣。在传播 18 mm 后, 主

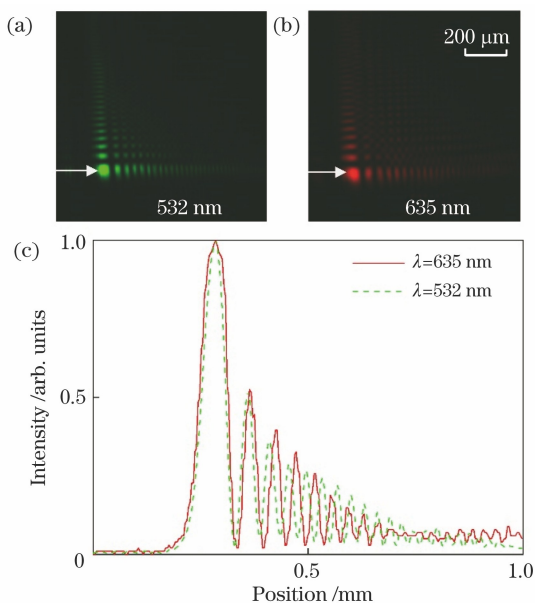


图 4 不同波长艾里光束的光强分布(测量值)。(a)波长为 532 nm;(b)波长为 635 nm;(c)横截面的光强曲线  
Fig. 4 Intensity distributions of the Airy beams with different wavelengths (measured value). (a) Wavelength is 532 nm; (b) wavelength is 635 nm; (c) intensity curve of the cross section

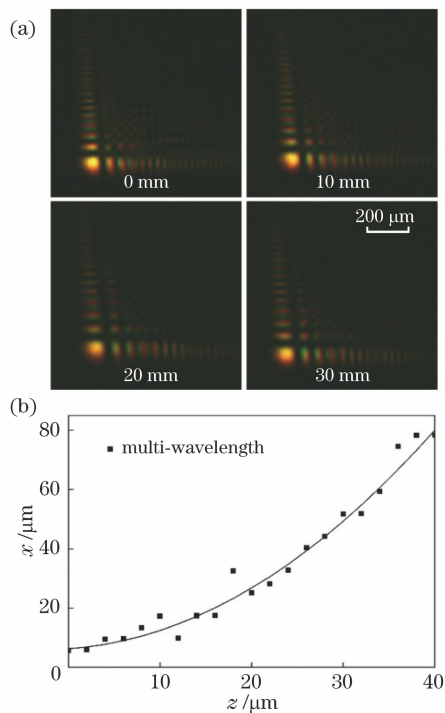


图 5 多波长艾里光束的传播过程(测量值)。(a)不同传播位置处的横向光强分布;(b)传播轨迹  
Fig. 5 Propagation process of the multi-wavelength Airy beams (measured value). (a) Intensity distributions at different propagation positions; (b) propagation trajectory

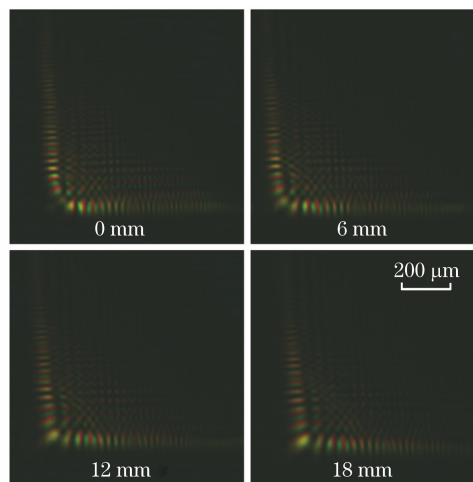


图 6 不同传播距离时多波长艾里光束的自愈过程  
Fig. 6 Self-healing process of multi-wavelength Airy beams at different propagation positions

瓣基本恢复,自愈后两个波长的艾里光束中心依然重合无色散,主瓣的 FWHM 约为  $64 \mu\text{m}$ 。这表明基于 DM 生成的多波长相干艾里光束与单波长艾里光束同样具有较强的自愈性。

## 5 结 论

提出了一种基于 DM 的多波长艾里光束产生方法,搭建了以两种波长激光(532 nm 和 635 nm)为光源的多波长艾里光束生成系统,通过仿真和实验对多波长艾里光束的生成与传播特性进行了研究。结果表明,DM 可以有效消除色差,生成高质量的多波长艾里光束。在传播过程中主瓣不会发生色差分离和衍射,而旁瓣则呈现出红绿相间的色差。此外,生成多波长艾里光束的主瓣被不透明障碍物遮挡后,经一段距离传播后可以自恢复且主瓣未发生色差分离,与单波长艾里光束具有相同的自愈性。这表明本方法能克服透射式立方相位片和空间光调制器的色散问题,保证多波长艾里光束的主瓣在传播过程中不发散,且基于 DM 生成的艾里光束具有可调节性,为其在多光谱成像和光学微操作等领域中的潜在应用提供了一定的基础。

## 参 考 文 献

- [1] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901.
- [2] Dai C Y, Han H M, Fan Y P, et al. Generation of tunable Airy beams using deformable lens [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805002. 代超宜, 韩洪民, 范引鹏, 等. 基于可变形透镜的可

- 调艾里光束生成[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0805002.
- [3] Li H T, Wang X K, Zhang Y. Study and applications of terahertz special beams[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614007.  
李鹤婷, 王新柯, 张岩. 太赫兹特殊光束的研究与应用[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614007.
- [4] Wang M H, Yuan X H, Li J, et al. Propagation of radial partially coherent beams in anisotropic non-Kolmogorov turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0306003.  
王铭湔, 元秀华, 李军, 等. 径向部分相干光束在各向异性非 Kolmogorov 湍流中的传输[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0306003.
- [5] Zhang P, Prakash J, Zhang Z, et al. Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams[J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2883-2885.
- [6] Liang X L, Zhang Z. Curved volume waveguide induced by Airy beams in nanosuspensions with negative polarizability[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101901.  
梁欣丽, 张泽. Airy 光束在负极化纳米悬浊液中诱导弯曲体波导[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101901.
- [7] Yang Z Y, Prokopas M, Nylk J, et al. A compact Airy beam light sheet microscope with a tilted cylindrical lens [J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(10): 3434-3442.
- [8] Piksarv P, Marti D, Le T, et al. Integrated single-and two-photon light sheet microscopy using accelerating beams[J]. Science Report, 2017, 7(1): 1435.
- [9] Li Y X, Wang C, Zhao X N, et al. Multispectral and large bandwidth achromatic imaging with a single diffractive photon sieve[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 21141-21152.
- [10] Huang L, Guo H, Li J, et al. Optical trapping of gold nanoparticles by cylindrical vector beam [J]. Optics Letters, 2012, 37(10): 1694-1696.
- [11] Valdmann A, Piksarv P, Valtna-Lukner H, et al. Realization of laterally nondispersing ultrabroadband Airy pulses[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1877-1880.
- [12] Cai Z, Liu Y, Hu Y L, et al. Generation of colorful Airy beams and Airy imaging of letters via two-photon processed cubic phase plates[J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 1151-1154.
- [13] Valdmann A, Piksarv P, Valtna-Lukner H, et al. White-light hyperbolic Airy beams [J]. Journal of Optics, 2018, 20(9): 095605.
- [14] Morris J E, Mazilu M, Baumgartl J, et al. Propagation characteristics of Airy beams: dependence upon spatial coherence and wavelength[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 13236-13245.
- [15] Mansour D, Papazoglou D G. Ultra-broadband tunable continuous phase masks using optical aberrations: publisher's note[J]. Optics Letters, 2018, 43(22): 5668.
- [16] Ma J Q, Li Y, Yu Q Z, et al. Generation of high-quality tunable Airy beams with an adaptive deformable mirror[J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3634-3637.
- [17] Zhu Z X, Li Y, Chen J J, et al. Development of a unimorph deformable mirror with water cooling[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 29916-29926.
- [18] Xue C H. Color science and computer color measurement and color matching practical technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 17-21.  
薛朝华. 颜色科学与计算机测色配色实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 17-21.