

三主锤部分相干加速光束的产生及其光学特性研究

吴琼^{1,2} 任志君^{1,2*} 金洪震^{1,2}

(¹ 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004
² 浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004)

摘要 利用部分相干光源,通过空间光调制器加载相位图,产生了具有 3 个加速主锤的部分相干加速光束。数值模拟和实验结果表明,相位掩模板控制参数 β 和傅里叶变换透镜焦距 f 是影响主锤加速度的主要因素,并给出了二者对加速度影响的定量关系。研究结果为今后不同的科学研究需要整形出具有不同加速轨迹的三角主锤加速光束提供了依据。

关键词 物理光学;部分相干光;三角加速光束;加速度;光束整形

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1002005

Generation of Partially Coherent Optical Accelerating Regular Triple-Lobe Beams and Their Optical Properties

Wu Qiong^{1,2} Ren Zhijun^{1,2} Jin Hongzhen^{1,2}

[¹ Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China
² Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China]

Abstract Based on a partially coherent light source, partially coherent accelerating regular triple-lobe beams are generated by imposing phase grey-scale maps on the spatial light modulator. The numerical simulation and experimental results show that there are two key factors to decide the acceleration of the main lobes of partially coherent optical accelerating regular triple-lobe beams, which are respectively the controlling parameter β of designed phase maps and the focal length f of Fourier transform lens. The relationship between β , f and the main lobes' acceleration of partially coherent accelerating regular triple-lobe beams is also given. The results provide the mechanism of controlling ballistic trajectory of main lobes of partially coherent accelerating regular triple-cusp beams according to different research needs in the future.

Key words physical optics; partially coherent light; optical accelerating regular triple-lobe beams; acceleration; beam shaping

OCIS codes 260.1960; 140.3300; 070.7345

1 引言

在光学研究的很多领域,人们常常需要相干性很好的光源^[1]。但激光用在激光大气光通信、激光材料表面热处理等一些研究领域时,激光的高相干度却引发了一些新的问题^[2],如大气扰动和激光散斑等。为此,采取一些特殊的手段降低激光的相干

度,获得了部分相干光源^[3]。相对于相干光,人们发现部分相干光的光强分布更加均匀,传输过程中发散程度也比完全相干光更小,同时它还具有散斑低灵敏度等优点。因此,部分相干光已被广泛应用于大气激光通信、激光探测、非线性光学、光学成像、微粒捕获等很多领域^[3-9]。在不同的应用领域,人们

收稿日期: 2014-04-04; 收到修改稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11274278)

作者简介: 吴琼(1981—),女,硕士,工程师,主要从事光束的传输与变换等方面的研究。E-mail: wuqiong@zjnu.cn

* 通信联系人。E-mail: renzhijun@zjnu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

需要不同形态的部分相干光。因此,部分相干光的传输变换和光束整形是现代光学的一个研究热点^[8-12]。

在光束整形方面,近年来的一项重要工作是在 Airy 光束的产生^[13]。Airy 光束是一种新型无衍射光束。在传播过程中,它的能量相对集中的主锤能够横向加速,类似于弹丸在重力作用下的抛物弹道轨迹。因此 Airy 光束也被称作横向加速光束。Airy 光束独特的光学性质具有特殊的科学意义^[14-15]。利用 Airy 光束可沿着弯曲路径运输粒子(能绕过障碍物),因而能够在直射聚焦光束无法操控的区域进行微观操作^[16]。在光与物质相互作用的研究领域,Airy 光束也被用于曲线成丝、粒子的曲线加速和形成曲线表面等离子体波^[17-21]。

人们对 Airy 光束的研究,包括传输性质、产生方法以及实际中的应用等^[13-20],都集中在完全相干 Airy 光束。2013 年,国内外几个研究小组相继报道了部分相干 Airy 光束的产生,并详细研究了它的传输特性,首次实现了具有横向加速传输特性的部分相干光,但这类部分相干加速光束仅有一个加速主锤^[11,22-23]。

2010 年 12 月,基于衍射突变理论,Barwick^[24]发现,规则多角光束也是傍轴条件下赫姆霍兹方程的一个特解,具有奇数个(3、5 或 7 个)能量比较集中的突变点,从光学结构上看,它们的突变点和 Airy 光束主锤的一个共同之处在于能量相对集中在小的区域内。这种能量突出的突变点常常被称作光束主锤^[13,24-25]。主锤很像经典光学中能量集中的焦点,因此在光与物质相互作用的实验中,经常被当作焦点使用^[17-21]。数值模拟表明,规则多角光束的主锤类似于 Airy 光束的主锤,在传输过程中,每

个主锤都具有抛物弹道轨迹,这意味着规则多角光束也是一类加速光束^[24-25]。不同于 Airy 光束,它的多主锤结构意味着它有多多个加速样品点,有望在一些特定的科学实验中发挥作用。但文献^[24]仅理论引入了相干多角光束,文献^[25]实验产生了相干多角光束的一种——三主锤加速光束。

本文基于部分相干理论模型,通过设计特定的相位掩膜板整形入射的部分相干高斯光束,实验产生了具有 3 个加速主锤的部分相干光束。作为部分相干光束家族的一员,这类光束有望作为新的工具,在一些新的研究领域发挥作用。

2 实 验

高斯谢尔模(GSM)光束的振幅可写为

$$E(x, y, 0) = E_0 \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right], \quad (1)$$

式中 E_0 为振幅, ω 为高斯谢尔模光束的束腰宽度。

$$\gamma(x_1 - x_2, y_1 - y_2) = \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}{2\delta^2}\right], \quad (2)$$

式中 γ 为相位掩膜板表面上复空间的相干度, δ 为高斯谢尔模光束的相干长度。

根据衍射突变理论^[24,26],产生三主锤加速光束的相位分布表达式为

$$\phi(x, y) = \beta[(x^3/3 + y^3/3) - (x^2 y + x y^2)], \quad (3)$$

式中 β 为相位控制参数,可根据需要任意改变。(3)式是设计相位掩膜板灰度结构图的基础。

当部分相干高斯光束入射到相位掩膜板表面后,傅里叶变换透镜后的出射光束振幅分布表达式为

$$E(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x_{01}, y_{01}) \exp[ik\phi(x_{01}, y_{01})] E(x_{02}, y_{02}) \exp[ik\phi(x_{02}, y_{02})] \exp\left[-\frac{(x_{01} - x_{02})^2}{2\delta^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(y_{01} - y_{02})^2}{2\delta^2}\right] \exp[-ikz(x_{01}^2 + y_{01}^2 + x_{02}^2 + y_{02}^2) - i\frac{k}{f}(x_1 x_{01} + y_1 y_{01} - x_2 x_{02} - y_2 y_{02})] dx_{01} dy_{01} dx_{02} dy_{02}, \quad (4)$$

式中

$$E[x_{01(02)}, y_{01(02)}] = E_0 \exp\left\{\frac{-(x_{01(02)}^2 + y_{01(02)}^2)}{\omega^2}\right\}, \quad (5)$$

$$\phi[x_{01(02)}, y_{01(02)}] = \beta\left\{\frac{x_{01(02)}^3}{3} + \frac{y_{01(02)}^3}{3} - [x_{01(02)}^2 y_{01(02)} + x_{01(02)} y_{01(02)}^2]\right\}, \quad (6)$$

A 为常数,不影响光强分布, z 为光束纵向传输距离。 (x, y) 的第一个下标为 0 的代表入射光束,没

有 0 下标的代表出射光束。

产生三主锤部分相干加速光束的实验装置如图

1 所示。实验所用光源为 He-Ne 激光器,在激光扩束系统(L1、L2 组成)中加入粘贴在小电机上的随机相位板(RPM)。当激光照射旋转的毛玻璃时,再经过高斯滤光片调整,得到光强分布近似于高斯分布的光束,再通过透镜准直光束,形成性质接近理论模型的高斯谢尔模光束^[11]。当光束通过 RPM 发生散射时,通过改变小电机的转速改变光源的相干度。然后,将产生的部分相干光经分束棱镜分光后入射

至空间光调制器(SLM),通过在 SLM 上加载相位图来调制入射光束的相位分布。实验使用的相位调制元件是德国 Holoeyes 公司的 PLUTO 系列空间光调制器,像素数为 1080 pixel×1920 pixel,像素单元尺寸为 8.0 μm。从傅里叶变换透镜(L3)的焦平面处($z=0$ mm)开始,沿光轴滑动电荷耦合元件(CCD)接收出射光束。

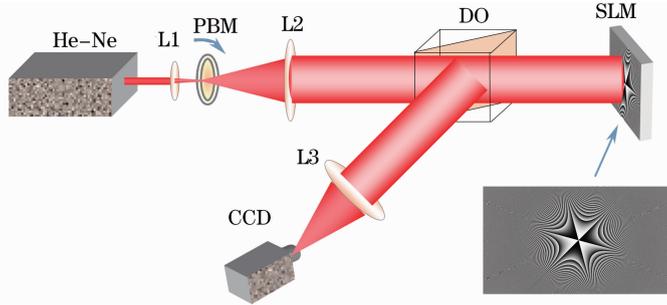


图 1 三主锤部分相干加速光束产生的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for generating partially coherent optical accelerating regular triple-lobe beams

3 结果与讨论

实验产生的部分相干三角光束如图 2 所示,图 2(a)~(d)分别为 $z=0, 15, 30, 45$ mm 处部分相干三角加速光束的实验光强分布图。为了进一步研

究部分相干三角光束的光学性质,依据实验光学参量,图 2(e)~(h)给出了相应的数值模拟结果。显然,实验结果与理论模拟结果吻合得很好,证明了实验结果的正确性。

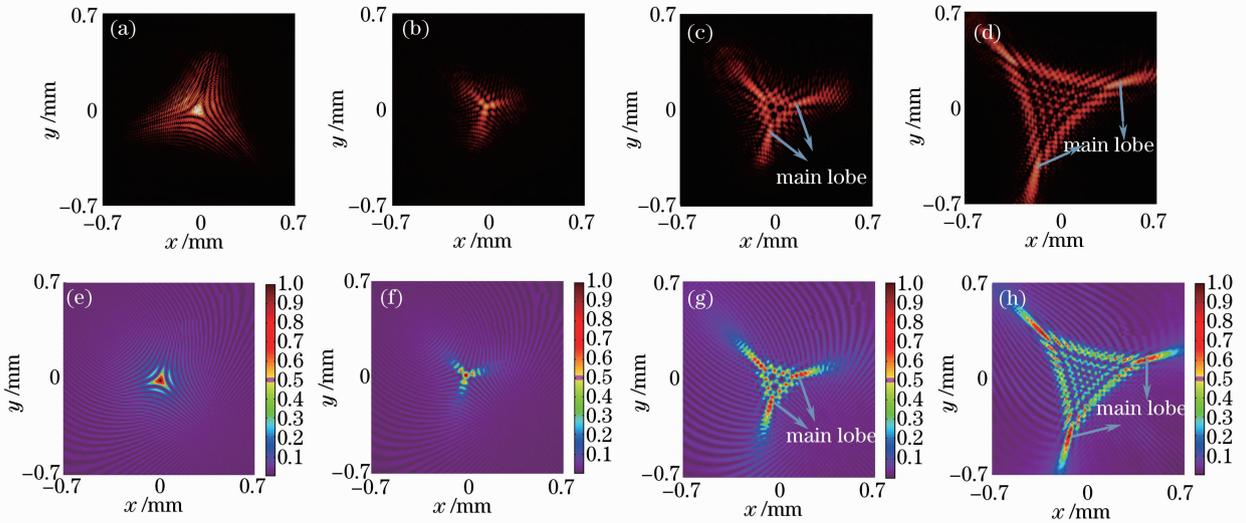


图 2 部分相干三角加速光束的传播($\delta=1$ cm, $\beta=1$, $f=1.2$ m)。(a) $z=0$, (b) $z=15$ mm, (c) $z=30$ mm 和 (d) $z=45$ mm 的实验结果; (e)~(h) 为图(a)~(d)相应的理论模拟结果

Fig. 2 Propagations of partially coherent optical accelerating regular triple-lobe beams ($\delta=1$ cm, $\beta=1$, $f=1.2$ m). Experimental results of (a) $z=0$, (b) $z=15$ mm, (c) $z=30$ mm and (d) $z=45$ mm; (e)~(h) theoretical simulation results corresponding to fig. (a)~(d)

图 2(a)表明,在傅里叶变换透镜的焦平面处,相对于周边区域,部分相干加速光束的中心是一个强度较大的曲边三角形(半峰全宽区域)。曲边三角形的

半峰全宽尺寸是一个很重要的物理量,它的大小直接决定了部分相干加速光束的主锤加速度。随着传输距离的增加,曲边三角形逐渐演化为 3 个光能量相

对集中的突变尖点(主锤)。在部分相干三角光束的整个传输过程中,纵然光束的重心不变始终沿着光轴,但3个高光强的主锤逐渐偏离光轴。依据实验结果,给出了部分相干三角光束3个主锤的传输轨迹,如图3所示。图3中,蓝线为光束轮廓,黑线为主锤传输弹道轨迹。正如文献[23]的理论预言,与Airy光束主锤的传输轨迹相似,部分相干三角光束的3个主锤传输轨迹也是二次抛物曲线。因此,这种光束也

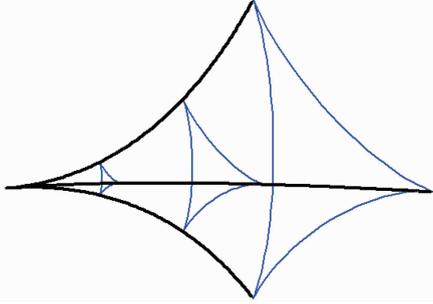


图3 不同传输距离处部分相干三角光束的轮廓及其3个主锤的传输轨迹

Fig. 3 Sketch configuration of partially coherent optical accelerating regular triple-lobe beams at different distances and propagation trajectories of three main lobes

是一种加速光束。本文在实验上产生了具有3个横向加速主锤的部分相干光束。

对于加速光束,加速度的大小决定了主锤绕过障碍物的能力。对于本文产生的三主锤部分相干加速光束,主锤的加速度是首要关注的物理量。由于三主锤部分相干加速光束的3个加速主锤来源于焦平面的曲边三角形,推测曲边三角形是影响主锤加速度的主要因素。为了更好地对部分相干加速光束的传输特性做精确的定量研究,本文主要利用数值模拟的结果,理论计算了三主锤部分相干光束的传输情况。需要指出的是数值计算虽然灵活方便,所得结果仍需要实验验证。

在确定入射光源的情况下($\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\delta = 1 \text{ cm}$),数值模拟结果表明有两种方法可以改变曲边三角形的尺寸,一是改变相位板,即改变相位控制参数 β ;二是改变傅里叶变换透镜焦距 f 。图4为两种不同相位板($\beta = 1, 2$)在两种不同焦距的傅里叶变换透镜($f = 1 \text{ m}, 1.2 \text{ m}$)情况下傅里叶变换透镜焦平面二维光强分布图,图中的紫线为半峰全宽线[图4(e)~(h)]。为了验证数值模拟结果的正确性,也给出了相应参数的实验结果图[图4(a)~(d)]。显然,实验结果与理论结果吻合得很好。

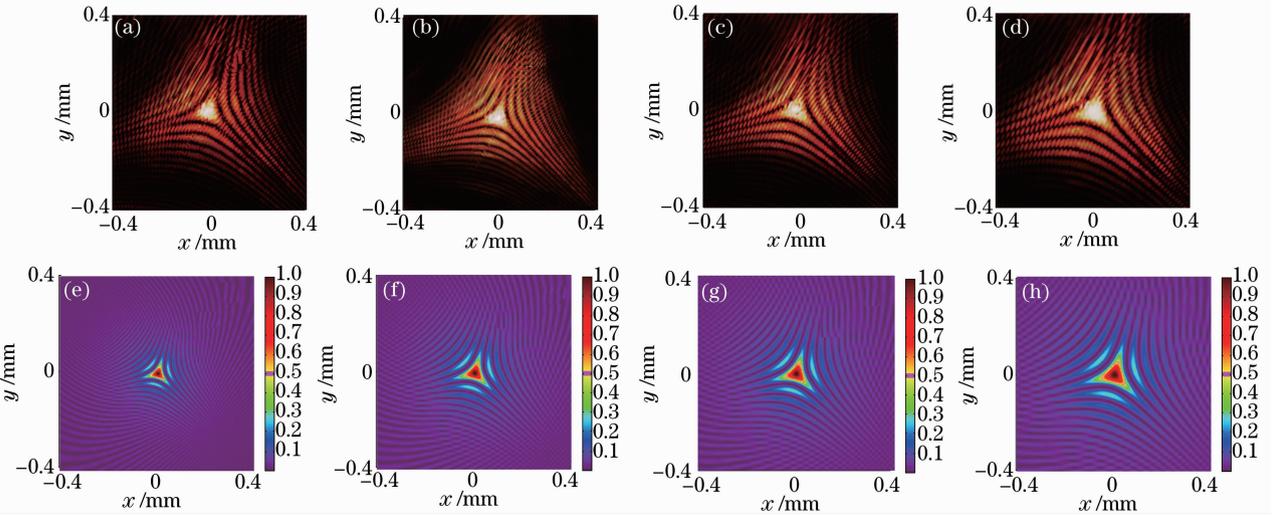


图4 焦平面二维光强分布图。(a) $\beta = 1, f = 1 \text{ m}$, (b) $\beta = 1, f = 1.2 \text{ m}$, (c) $\beta = 2, f = 1 \text{ m}$ 和 (d) $\beta = 2, f = 1.2 \text{ m}$ 的实验结果; (e)~(h) 为图(a)~(d)相应的理论模拟结果

Fig. 4 Intensity distributions at the focal plane. Experimental results of (a) $\beta = 1, f = 1 \text{ m}$, (b) $\beta = 1, f = 1.2 \text{ m}$, (c) $\beta = 2, f = 1 \text{ m}$ and (d) $\beta = 2, f = 1.2 \text{ m}$; (e)~(h) theoretical simulation results corresponding to fig. (a)~(d)

类似于图4(e)~(h),采用光束传输理论,采用不同物理参量(不同参量 β 的相位板、不同焦距 f 的傅里叶变换透镜),通过数值模拟,计算了不同参量下三主锤部分相干加速光束在焦平面的曲边三角形尺寸,通过对大量的计算结果进行拟合,发现曲边三

角形两顶点的间距 ΔL 可以表示为

$$\Delta L \propto \beta^{1/3} f. \quad (7)$$

(7)式定量给出了决定曲边三角形半峰全宽 ΔL 的经验关系式。

对此经验公式,做了相应的实验验证,实验过程

中不可避免地存在测量误差,但实验结果和数值模拟结果与经验关系式都吻合得很好,实验结果证实了经验关系式的正确性。

对不同大小曲边三角形在传输过程中所分化出的主锤加速度传输特性进行了数值研究。在入射波长确定的情况下,曲边三角形大小是决定主锤加速度的唯一因素。数值模拟和实验验证结果表明,在傅里叶变换透镜焦平面处,不同大小曲边三角形所形成的三主锤部分相干加速光束,3个主锤加速度与曲边三角形之间的关系可表示为

$$a \propto \Delta L^{-3}. \quad (8)$$

(8)式表明,焦平面曲边三角形的尺寸越小,所生成的3个主锤加速度越大。

将(7)式代入(8)式得

$$a \propto \beta^{-1} f^{-3}. \quad (9)$$

通过(9)式得到如下结论:1)相位板控制参数 β 和傅里叶变换透镜焦距 f 是决定三主锤部分相干加速光束的主锤加速度的两个因素。改变相位板和傅里叶变换透镜,都会导致主锤加速度的变化。2)加速度 a 与 β 的一次方成反比,与 f 的三次方成反比。相对于 β , f 对加速度 a 的影响更大。从控制加速度的角度,改变透镜焦距 f 比改变相位板控制参数 β 有效得多。提升加速度 a ,可选用短焦的傅里叶变换透镜。但当透镜焦距 f 太小时,由于短焦透镜加工和使用上有一定的难度,在傅里叶变换透镜焦距 f 不宜太小的情况下,需要通过减小相位板控制参数 β 来进一步提升加速度 a 。在实验中可以通过协调匹配 β 和 f 来达到灵活控制主锤加速度的目的。

4 结 论

基于衍射突变理论设计相位掩模板,通过对部分相干光源整形,产生了具有3个加速主锤的部分相干加速光束。用数值模拟和实验验证相结合的方法,对光束的传输特性以及主锤的加速特性做了详细研究。研究表明在入射波长确定的情况下,傅里叶变换透镜焦距 f 和相位掩模板控制参数 β 是决定主锤加速度的两个因素,加速度 a 与 β 的一次方成反比,与 f 的三次方成反比。另外,主锤加速度的拟合关系式为实验灵活控制部分相干加速光束的3个主锤加速度奠定了基础。

参 考 文 献

1 Lim Y, Lee S Y, Lee B. Transflective digital holographic microscopy and its use for probing plasmonic light beaming[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5202–5212.

2 Alieva T, Rodrigo J A, Cámara A, *et al.*. Partially coherent stable and spiral beams[J]. JOSA A, 2013, 30(11): 2237–2243.

3 Wang Fei. Theoretical and Experimental Studies on Partially Coherent Beams[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 1–2.
王 飞. 部分相干光的相干理论和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 1–2.

4 Popov S Y, Friberg A T. Design of diffractive axicons for partially coherent light [J]. Optics Letters, 1998, 23 (21): 1639–1641.

5 Cai Y, Wang F. Lensless imaging with partially coherent light [J]. Optics Letters, 2007, 32(3): 205–207.

6 Zhao C, Cai Y. Trapping two types of particles using a focused partially coherent elegant Laguerre-Gaussian beam [J]. Optics Letters, 2011, 36(12): 2251–2253.

7 Liu Jun, Wu Pengli, Gao Ming. Wander and spreading of polarized and partially coherent laser propagation on slant path in turbulence atmospheric [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (10): 1013001.
刘 钧, 吴鹏利, 高 明. 偏振部分相干激光斜程湍流大气传输的漂移扩展[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1013001.

8 Liu Fei, Ji Xiaoling. Turbulence distance of partially coherent cosh-Gaussian array beams [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0713001.
刘 飞, 季小玲. 部分相干双曲余弦高斯阵列光束的湍流距离 [J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0713001.

9 Hu K, Chen Z, Pu J. Investigation on partially coherent vector beams and their propagation and focusing properties [J]. JOSA A, 2012, 29(11): 2300–2306.

10 Singh M, Tervo J, Turunen J. Elementary-field analysis of partially coherent beam shaping [J]. JOSA A, 2013, 30(12): 2611–2617.

11 Cui Shengwei, Chen Ziyang, Hu Kelei, *et al.*. Investigation on partially coherent Airy beams and their propagation [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 094205.
崔省伟, 陈子阳, 胡克磊, 等. 部分相干 Airy 光束及其传输的研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(9): 094205.

12 Chen Feinan, Chen Yanru, Zhao Qi, *et al.*. Change of propagation quality factor of partially coherence Hermite-Gaussian beams traveling through oceanic turbulence [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0413002.
陈斐楠, 陈延如, 赵 琦, 等. 部分相干厄米高斯光束在海洋湍流中光束传输质量的变化 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0413002.

13 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.*. Observation of accelerating Airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99 (21): 213901.

14 Pasiskevicius V. Nonlinear optics: Engineering Airy beams [J]. Nature Photonics, 2009, 3(7): 374–375.

15 Dai H T, Liu Y J, Luo D, *et al.*. Propagation dynamics of an optical vortex imposed on an Airy beam [J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 4075–4077.

16 J Baumgartl, M Mazilu, K Dholakia. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets [J]. Nature Photonics, 2008, 2 (11): 675–678.

17 Ren Zhijun, Fan Changjiang, Zhou Weidong. Spatially induced group velocity dispersion of ultrashort pulsed airy beams [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202005.
任志君, 范长江, 周卫东. 超短脉冲艾里光束的空间诱导群速度色散效应研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202005.

18 Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.*. Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams [J]. Science, 2009, 324(5924): 229–232.

19 Polynkin P, Kolesik M, Wright E M, *et al.*. Experimental tests

- of the new paradigm for laser filamentation in gases[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(15): 153902.
- 20 Li L, Li T, Wang S M, *et al.*. Plasmonic Airy beam generated by in-plane diffraction[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(12): 126804.
- 21 Li J X, Zang W P, Tian J G. Vacuum laser-driven acceleration by Airy beams[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7300–7306.
- 22 Dong Y, Zhang L, Luo J, *et al.*. Degree of paraxiality of coherent and partially coherent Airy beams[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 1–5.
- 23 Eyyuboglu H T, Sermtulu E. Partially coherent Airy beam and its propagation in turbulent media[J]. Applied Physics B, 2013, 110(4): 451–457.
- 24 Barwick S. Accelerating regular polygon beams [J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4118–4120.
- 25 Ren Z, Dong L, Ying C, *et al.*. Generation of optical accelerating regular triple-cusp beams and their topological structures[J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29276–29283.
- 26 Barwick S. Catastrophes in wavefront-coding spatial-domain design[J]. Applied Optics, 2010, 49(36): 6893–6902.

栏目编辑:史 敏