

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201711081



焦散光束产生方法研究进展

杨艳飞^{1,2}, 吴逢铁^{1,2}

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 介绍近年来国内外对焦散光束的研究进展,分析基于光谱相位分类的两种基本焦散光束的自愈过程,以及唇状焦散光束和 Pearcey 焦散光束这两种典型光束的形成及传输特性,并对其应用前景进行展望. 研究表明:相对于 Bessel 无衍射光束,焦散光束作为一种特殊的自愈合光束,在显微操控、拓扑电荷数检测和“吹雪机”等特殊领域具有其独特的优势.

关键词: 焦散光束; Pearcey 光束; 光谱相位; 自愈性

中图分类号: O 436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)04-0473-06

Research Progress on Caustic Beam

YANG Yanfei^{1,2}, WU Fengtie^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper introduces the research progress of caustic beams at home and abroad. The self-healing process of two basic caustic beams based on spectral phase classification is analyzed. The formation and transmission properties of two typical beams of lip-shaped caustic beam and Pearcey caustic beam are summarized in detail, and the prospect of their application is prospected. The results of the articles show that compared with the Bessel non-diffracting beam, the caustic beam is a special self-healing beam and has its unique advantages in special fields such as micromanipulation, topological charge detection and snow blower.

Keywords: caustic beam; Pearcey beam; spectral phase; self-healing

近年来,以 Bessel 光束为主的无衍射光束因其在自由空间传播过程中横向光场分布不随传播距离发生变化,以及光束的自愈等特性而被广泛研究.直到今天,无衍射光束仍在很多研究领域发挥着重要作用,并根本上改变了这些领域的工作方式^[1-3].人们在 Bessel 光束进行研究时发现,轴棱锥的椭圆误差或光束斜入射理想轴棱锥时,都会对 Bessel 光束产生显著的影响^[4-6],导致 Bessel 光束中心向外环分裂成光点阵列,中心光强向外延展成唇状、星状等外轮廓,从而产生焦散光束.近年来,由于实际应用的需要,国内外学者对焦散光束的产生及应用进行了深入研究. Zhao 等^[7]通过光束斜入射轴棱锥的情况,讨论焦散光束随入射倾角的光强演化; Thaning 等^[8]通过对比斜入射圆锥轴棱锥与正入射椭圆轴棱锥的情况,发现两者均能产生等价的焦散光束; Anguiano-Marcelino 等^[9]通过汉克波理论和实验,证明了焦散光束具有自愈特性; Zeng 等^[10]利用惠更斯菲涅耳衍射积分理论,分析零阶贝塞尔光束在轴棱锥非

收稿日期: 2017-11-30
通信作者: 吴逢铁(1958-)男,教授,博士,主要从事光束传输与变换、短脉冲技术及非线性光学研究. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178015); 国家自然科学基金青年基金资助项目(61605049); 福建省科技重大项目(2016H6016)

圆对称加工误差情况下产生焦散光束的特性;江新光等^[11]发现由于像散的存在,光束入射轴棱锥后的衍射光场发生畸变,产生焦散光束;Mathis 等^[12]提出在二维和三维空间自加速的微米量级焦散光束;谢晓霞等^[13]基于广义惠更斯菲涅耳衍射理论,推导出 Bessel 光束通过双焦透镜产生焦散光束的一般表达式,并在实验上产生唇状焦散光束;Ren 等^[14]基于突变理论,指出 Pearcey 光束也是一种特殊的焦散光束;Boufalalah 等^[15]对 Pearcey 光束在大气湍流中的传输性能做了深入的研究,推导出光束在大气湍流中的强度表达式和湍流密度等因素对它的影响;Melamed 等^[16]对应于预定义的孔径场分布,提出一种定制焦散光束的实用算法;Wang 等^[17]提出可见光电介质面元产生 Airy 光束,该方法有望应用于生物医学的纳米手术和光子量子阱中;Zannotti 等^[18]提出一种 Y 型非线性 Pearcey 分路器,该结构在光子信号处理、显微镜和光子雕刻有很大的应用潜力. 本文主要概括近年来国内外对焦散光束的研究进展,详细介绍两种典型焦散光束,即唇状焦散光束和 Pearcey 焦散光束的产生及其传输特性,进一步概括总结焦散光束的两种形态和它们在自愈过程的不同表现形式,并基于焦散光束的特殊光学特性,展望其在微粒操控等领域的应用前景.

1 Bessel 光束经过柱面透镜产生唇状焦散光束

2007 年,Marcelino 小组从汉克波理论和实验上证明了焦散光束的自愈特性^[10]. 2009 年,Anguianomoraes 等^[19]从几何光学上解释并在实验上证明圆锥透镜柱面透镜系统产生的光斑图是不对称的,形成两个不同的焦点区域,从而获得了唇状焦散光束.

但上述证明缺少必要的理论推导,且未对焦散光束的衍射光场进行实验研究. 吴逢铁课题组^[20-21]对唇状焦散光束进行了进一步的研究. 谢晓霞等^[13]研究了在一般情况下,非轴对称像散光学元件双焦透镜对无衍射 Bessel 光束的聚焦特性,通过广义惠更斯菲涅耳衍射积分理论导出更为普遍的光强分布表达式,这一表达式涵盖了普通透镜、双焦透镜和柱面透镜的所有情形,并设计了相关实验加以验证.

空间域中的广义惠更斯菲涅耳衍射理论衍射积分为

$$E_2(x_2,y_2,z)=\left(-\frac{i}{z\lambda}\right)\exp(ikz)\exp\left(ik\frac{x_2^2+y_2^2}{2z}\right)\int_0^{2\pi}A(\phi)\int_{-a}^a\int_{-a}^a\exp\left[ik\left(\frac{1}{2z}-\frac{1}{2f_1}\right)x_2^2\right]\times$$
$$\exp\left[i\left(k\alpha\cos(\phi)-\frac{k}{z}x_2\right)x_1\right]\exp\left[ik\left(\frac{1}{2z}-\frac{1}{2f_2}\right)y_1^2\right]\times$$
$$\exp\left[i\left(k\alpha\sin(\phi)-\frac{k}{z}y_2\right)y_1\right]dx_1dy_1d\phi.$$

式(1)中: f_1,f_2 分别为双焦透镜在 x,y 方向的焦距; z 为轴向传播距离. 当 $f_1=f_2=f$ 时,双焦透镜变为普通无像散球面聚焦透镜;而当双焦透镜在 x,y 方向上的焦距中某一焦距趋于无穷大时,则双焦透镜变为柱透镜情形.

Bessel 光束通过焦距为 80 mm 的柱透镜后,在不同位置的截面光强分布,如图 1 所示. 由图 1 可知:随着观察距离的增大,光场能量开始集中在唇状焦散线的边缘上,出现类似椭圆形的光斑,在光斑中心呈现出交替相交叉的条纹,唇状焦散线向两边不断扩大. 这是由于像散导致输出光的波面斜率发生改变,使光通过透镜后干涉点也发生变化,Bessel 光束横截面光强原有的圆对称性被破坏,此时,在同轴唇状焦散线上形成两个光强度较大的光点,形成焦散光束. 谢晓霞等^[13]从理论推导并实验验证了唇状焦

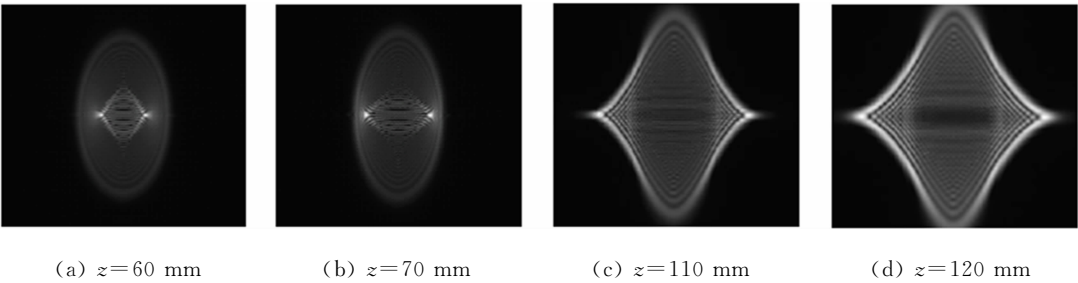


图 1 数值模拟截面光强分布

Fig. 1 Numerical simulation of cross-section light intensity distribution

散光束的形成,对进一步研究该光束的有着重要的指导和参考价值.

冯聪等^[22]对高阶 Bessel 光束经过柱面透镜后产生唇状焦散光束进行了研究,丰富了非轴对称光学系统产生焦散光束研究的内涵,对高阶 Bessel 光束在非对称光学系统的传输提供了一定的参考;还指出焦散光束在光束的传输、大景深成像等方面都具有潜在的应用.

胡润等^[23]分析了涡旋光产生的焦散光束的特性,并基于此提出了一种用于检测拓扑电荷数的简单可行方案.在 $z=500\text{ mm}$ 处,中心暗核分裂的衍射光斑模拟图,如图 2 所示.由图 2 可知:随着轴棱锥偏转角 η 的增加,中心环椭圆率增大,光斑发生了由内至外的逐环破裂现象,最终形成了具有点阵列结构的焦散光束,并且伴随着中心暗核分裂的现象,分裂出的暗核数等于光束的拓扑电荷数.相比于文献[24]的方案,该方案更具灵活性与普适性,极大地方便了拓扑电荷数的检测工作.

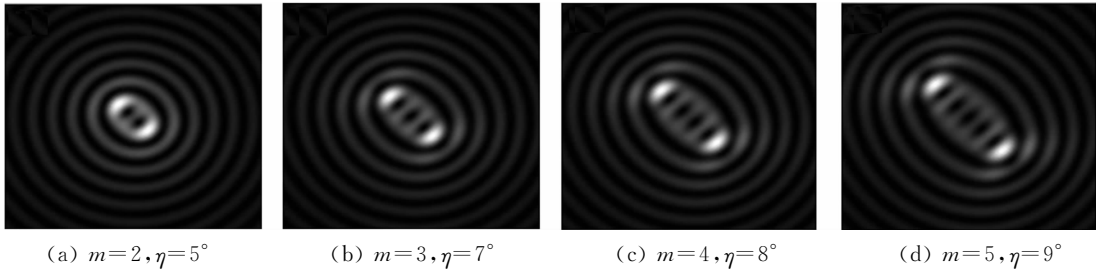


图 2 数值模拟暗核分裂光斑

Fig. 2 Simulation results for diffraction pattern of divided dark cores

2 Pearcey 焦散光束的特性研究及应用

2012 年, Ring 等^[25]从理论上证实了傍轴近似条件下, Pearcey 函数也是波动方程的一组特解,并利用相位调制产生了 Pearcey 光束. 杨小波^[26]研究发现 Pearcey 光束在空间传输过程中会发生横向平移,具有自聚焦和自愈合的性质,有助于将其应用于显微成像、光学陷阱和粒子操纵等领域.

Ren 等^[27]基于解析几何理论,在推导了一般抛物函数分歧点集的基础上,构造并实验产生了光学拓扑结构更为灵活可控的一簇 Pearcey 光束,其实验光路图如图 3 所示. 通过调节空间光调制器 (SLM),实验产生了 Pearcey 光束,如图 4 所示. 由图 4 可知:随着抛物线系数 p 的增大, Pearcey 光束扇角减小,这是 Pearcey 光束不同于 Airy 光束的一个重要光学性质.

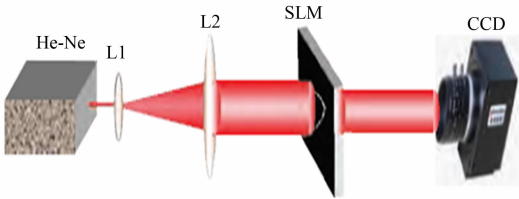


图 3 产生 Pearcey 光束的实验示意图

Fig. 3 Experimental setup diagram for generating Pearcey beams

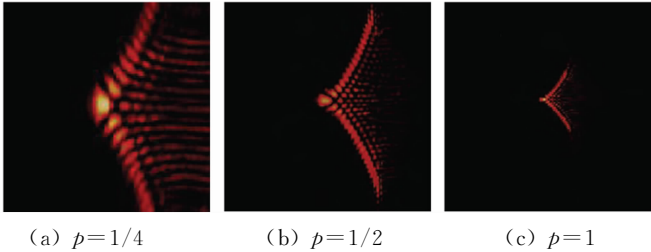


图 4 Pearcey 光束截面图

Fig. 4 Section maps of Pearcey beams

对比文献[28]可以看出, Pearcey 光束的空间分布比 Airy 光束更广,表现为:通过改变产生 Pearcey 光束的抛物线系数 p ,其整体结构和朝向,主锤大小、形状和位置,以及光束扇角分布范围均可改变. 因此, Pearcey 光束有望取代 Airy 光束成为下一代清扫范围可控的激光“吹雪机”.

Ren 等^[29-30]基于几何光学焦散理论,通过研究 Airy 光束沿曲线轨迹运动的物理机制,产生了一种对称的加速双模态焦散光束. 在传播过程中,加速焦散光束的两个局部主裂片(强度最大)逐渐偏离光轴向相反方向的现象,如图 5 所示.

这种加速光束可以作为一种新型的激光辐照源应用于一些研究领域. 加速焦散光束在某些物理研究领域中具有独特的作用,因为它们在光束中具有独特的力学特性,同时,具有两个准恒定强度加速峰值的光学特性. 与经典的 Airy 光束相比,加速焦散光束可能更适合加速电子. 此外,作为一种新的加速

光束,加速焦散光束也可以作为一种激光微米级的“水泵”.在实验和理论方案中,加速焦散光束的其他潜在应用也在逐渐被挖掘和研究.

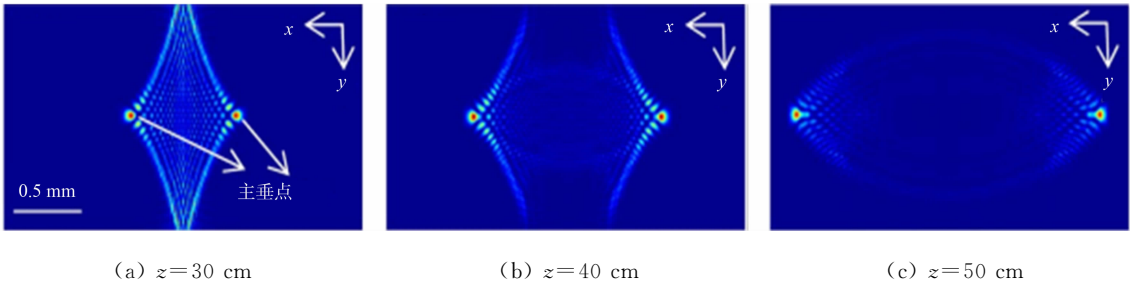


图 5 加速焦散光束的数值模拟

Fig. 5 Numerical simulation for accelerating caustic beam

3 两种不同形态的焦散光束

自提出加速 Airy 光束以来,有关焦散光束的研究迅速发展^[31].最近,有研究依据光谱相位的对称性将焦散光束分为两类^[32]:折叠型焦散光束(如 Airy 光束)和尖端型焦散光束(如 Pearcey 光束).而这些研究分析仅限于相位功率值大于 2 的情况.2017 年,Vaveliuk 等^[33]分析了在光谱相位取值小于 2 的范围内,产生的焦散光束的性质.将焦散光束的光谱相位取值扩展至全实数范围.

同年,Vaveliuk 等^[34]对两种不同形态的焦散光束进行了深入的研究,发现这两种形态的焦散光束在通过不同位置的障碍物时,表现出的自愈过程各不相同,并通过实验验证了理论的分析.

障碍物位于光轴上($\xi=0$)时的焦散光束强度(S)分布图,如图 6 所示.由图 6 可知:折叠型焦散光束在经过障碍物时,主瓣强度基本不受影响,而光轴上的其他次瓣光强则因为焦散线被障碍物阻挡而被明显的削弱;尖端型焦散光束在经过障碍物时,在障碍物后面的主瓣中心周围会产生明显的干涉现象,而并没有出现主瓣或其他次瓣被遮挡的现象.

障碍物位于光轴左侧时的焦散光束强度分布图,如图 7 所示.由图 7 可知:折叠型焦散光束由于焦散线被障碍物的阻挡而在相反方向的主瓣上产生一个明显的断裂缺口;尖端型焦散光束会在右侧的主瓣上产生一个断裂缺口,而左侧的主瓣却不受影响.反之,若在尖端型右侧放置障碍物,则右侧主瓣将不会产生变化,而左侧主瓣会有一个断裂缺口.

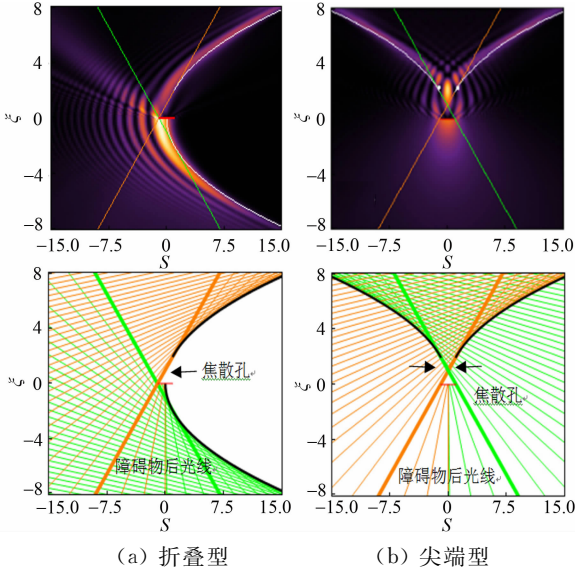


图 6 障碍物位于光轴时的焦散光束强度分布

Fig. 6 Intensity distribution of caustic beam when obstacle is located on optical axis

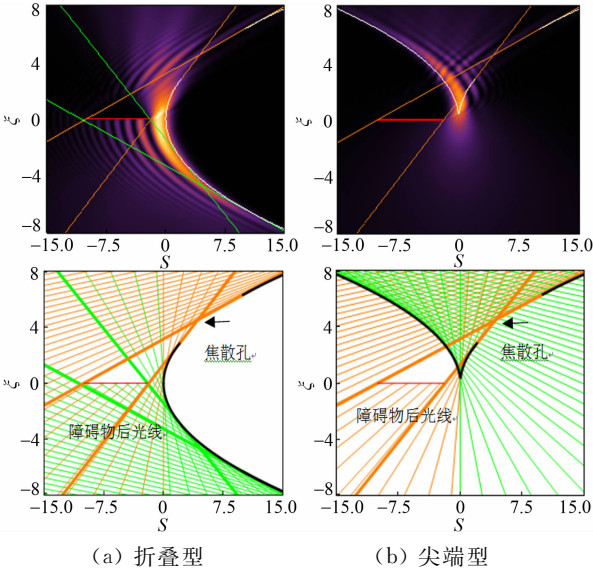


图 7 障碍物位于光轴左侧时的焦散光束强度分布

Fig. 7 Intensity distribution of caustic beam when obstacle is on left side of optical axis

上述研究表明:由于折叠型和尖端型焦散光束的焦散线分布各不相同,因此,在遇到障碍物时,表现

出不同的自愈形成过程。Vaveliuk 等^[34]采用焦散线的方法研究光束的传输特性,为研究光束的自愈特性开辟了新的研究思路和视角。该结果对通过任意复杂轨道的焦散光束和其他具有自愈性的光束,如 Mathieu 等光束的研究提供了重要的参考价值。

4 结论和展望

基于惠更斯菲涅耳衍射理论和角谱理论,概括不同形式焦散光束的特性。同时,介绍了产生焦散光束的方法及光束存在的多种形式,即从外轮廓分为唇状焦散光束和 Pearcey 光束(对称焦散光束)等;从光谱相位可分为折叠型焦散光束和尖端型焦散光束。综述了近年来国内外对焦散光束研究的最新进展,且对焦散光束在拓扑电荷数检测、多层面粒子囚禁和“吹雪机”等潜在应用方面有了更加深入的了解。

但是,目前国内外关于焦散光束的研究还较少,对各类焦散光束的传输特性和应用前景还有待进一步的研究和挖掘。如新兴的 Pearcey 焦散光束因其具有自聚焦和自愈合等特性,在显微成像、生物医学检测和“光镊”操纵上将有巨大的应用潜力;Pearcey 焦散光束还存在自发横向平移性质,在粒子平移运输、激光微加工等方面具有一定的研究价值。由于焦散光束的广泛应用前景和独特的传输特性,有望将其拓展到部分相干光和 LED 等领域,使其具有更广的应用范围和普适性。

参考文献:

- [1] LORENSER D, CHRISTIAN S C, CURATOLO A, *et al.* Energy-efficient low-Fresnel-number Bessel beams and their application in optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 548-551. DOI:10.1364/OL.39.000548.
- [2] YAN Zijie, JURELLER J E, SWEET J, *et al.* Three-dimensional optical trapping and manipulation of single silver nanowires[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(10): 5155-5161. DOI:10.1021/nl302100n.
- [3] TAN P S, YUAN Xiaocong, LIN Jiawei, *et al.* Surface plasmon polaritons generated by optical vortex beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(11): 171. DOI:10.1063/1.2890058.
- [4] 江新光, 吴逢铁, 刘彬轴. 棱锥椭圆加工误差产生畸变无衍射光束的修正[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1538-1542. DOI:10.3321/j.issn:0258-7025.2007.11.016.
- [5] 何西, 吴逢铁, 李攀, 等. 非相干 LED 光源产生高阶 Bessel 光束[J]. *中国科学(物理学力学天文学)*, 2014(7): 705-711. DOI:10.1360/SSPMA2014-00013.
- [6] 李冬, 吴逢铁, 李攀, 等. 像散对周期性局域空心光束的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(13): 414-419. DOI:10.3788/aos201434.s126002.
- [7] ZHAO Bin, LI Zhu. Diffraction property of an axicon in oblique illumination[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2563-2568. DOI:10.1364/AO.37.002563.
- [8] 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. DOI:10.1364/AO.42.000009.
- [9] ANGUIANO-MORALES M, MARTÍNEZ A, ITURBE-CASTILLO M D, *et al.* Self-healing property of a caustic optical beam[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(34): 8284-8290. DOI:10.1364/AO.46.008284.
- [10] ZENG Xiahui, WU Fengtie. Effect of elliptical manufacture error of an axicon on the diffraction-free beam patterns[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(8): 083401(1-6). DOI:10.1117/1.2967867.
- [11] 江新光, 吴逢铁. 像散对轴棱锥衍射特性的影响与修正[J]. *物理学报*, 2008, 57(7): 4202-4207.
- [12] MATHIS A, COURVOISIER F, DUDLEY J M, *et al.* Arbitrary accelerating micron-scale caustic beams in two and three dimensions[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16455-16465. DOI:10.1364/OE.19.016455.
- [13] 谢晓霞, 吴逢铁, 李冬. 双焦透镜对 Bessel 光束传输的影响[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 180201(1-7). DOI:10.7498/aps.63.180201.
- [14] REN Zhijun, FAN Changjiang, SHI Yile, *et al.* Symmetric form-invariant dual Pearcey beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(8): 1523-1530. DOI:10.1364/JOSAA.33.001523.
- [15] BOUFALAH F, DALIL-ESSAKALI, NEBDI H, *et al.* Effect of turbulent atmosphere on the on-axis average intensity of Pearcey-Gaussian beam[J]. *中国物理 B: 英文版*, 2016, 25(6): 264-269. DOI:10.1088/1674-1056/25/6/064208.

- [16] MELAMED T, SHLIVINSKI A. Practical algorithm for custom-made caustic beams[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2499-2502. DOI: 10.1364/OL.42.002499.
- [17] WANG Daopeng, HUO Pengcheng, FAN Qingbin, *et al.* Autofocusing Airy beams generated by all-dielectric meta-surface for visible light[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9285-9294. DOI: 10.1364/OE.25.009285.
- [18] ZANNOTTI A, RÜSCHENBAUM M, DENZ C. Pearcey solitons in curved nonlinear photonic caustic lattices[J]. *Journal of Optics*, 2017, 22(5): 1703-1716. DOI: 10.1088/2040-8986/aa77d9.
- [19] ANGUIANOMORALES M. Transformation of Bessel beams by means of a cylindrical lens[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(25): 4826-4831. DOI: 10.1364/AO.48.004826.
- [20] 谢晓霞, 王硕琛, 吴逢铁. Bessel 光束经椭圆环形孔径后的衍射光场[J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 166-170. DOI: 10.7498/aps.64.124201.
- [21] 谢晓霞, 吴逢铁, 纪佳位. Bessel 光束经柱透镜的衍射光场[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 291-294. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2016.03.0291.
- [22] 冯聪, 吴逢铁, 谢晓霞. 柱透镜聚焦高阶 Bessel 光束产生焦散光束[J]. *光子学报*, 2016, 45(12): 111-115. DOI: 10.3788/gzxb20164512.1226002.
- [23] 胡润, 吴逢铁, 朱清智, 等. 离轴像散对高阶贝塞尔光束的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 294-301. DOI: 10.3788/aos201737.0826002.
- [24] VAUTY P, BANERJI J, SINGH R P. Measuring the topological charge of an optical vortex by using a tilted convex lens[J]. *Physics Letters A*, 2013, 377(15): 1154-1156. DOI: 10.1016/j.physleta.2013.02.030.
- [25] RING J D, LINDBERG J, MOURKA A, *et al.* Auto-focusing and self-healing of Pearcey beams[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18955-18966. DOI: 10.1364/OE.20.018955.
- [26] 杨小波. Pearcey 光束的传输特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [27] REN Zhijun, LI Xiaodong, JIN Hongzhen. Generation of a family of Pearcey beams and their optical structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23): 0234205. DOI: 10.7498/aps.64.234205.
- [28] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.213901.
- [29] REN Zhijun, JIN Hongzhen, PENG Baojin, *et al.* Intensity-symmetric accelerating caustic beams[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7694-7699. DOI: 10.1364/AO.55.007694.
- [30] 任志君, 李晓东, 金洪震, 等. 双 Pearcey 光束的构建及数学机理研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(21): 181-186. DOI: 10.7498/aps.65.214208.
- [31] SIVILOGLOU G A, CHRISTODOULIDES D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 979-981. DOI: 10.1364/OL.32.000979.
- [32] VAVELIUK P, LENCINA A, RODRIGO J A, *et al.* Caustics, catastrophes, and symmetries in curved beams[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(3): 033850(1-6). DOI: 10.1103/PhysRevA.92.033850.
- [33] VAVELIUK P, LENCINA A, MARTÍNEZ-MATOS Ò. Caustic beams from unusual powers of the spectral phase[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 4008-4011. DOI: 10.1364/OL.42.004008.
- [34] VAVELIUK P, MARTÍNEZ-MATOS Ò, REN Yuxuan, *et al.* Dual behavior of caustic optical beams facing obstacles[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(6): 063838(1-6). DOI: 10.1103/PhysRevA.95.063838.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)