

不同编码方法生成圆对称艾里光束的实验研究 及其特性比较

刘正楠, 耿滔*, 邓攀

上海理工大学光电信息与计算机工程学院上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

摘要 研究了傅里叶空间不同纯相位编码方法对产生圆对称艾里光束的影响, 详细分析了目前常用的编码方法, 并引入了另一种已有的编码方法与常用方法进行比较, 研究发现这两种方法都能产生高质量的圆对称艾里光束。其中常用方法产生的光束理论上质量相对较高, 且受光束参数影响较小, 适应性广, 但衍射效率低; 另一种编码方法产生的光束质量理论上相对较差, 且对光束参数的选择有一定要求, 但优点是衍射效率高, 约为原方法的 2.4 倍, 对于激光加工、非线性激发等应用有较大的优势。使用两种方法实验产生了圆对称艾里光束, 发现常用的编码方法衍射效率低使得实际光束的质量受噪音影响较大, 而另一种编码方法产生的光束与理论结果吻合较好, 实验验证了此种编码方法的可用性。

关键词 全息; 圆对称艾里光束; 纯相位编码; 光束质量; 衍射效率

中图分类号 O438.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0209001

Generation and Proformance Comparison of Circular Airy Beams by Different Encoding Methods

Liu Zhengnan, Geng Tao*, Deng Pan

Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical Computer Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract The influence of phase-only encoding method on the generation of circular Airy beams is investigated and the commonly used coding method is discussed in detail, which is compared with the other introduced encoding method. The results show that both methods can be used to produce high quality circular Airy beams. The beam generated by the commonly used method has a good quality, little affected by beam parameters, and has a wide application. Although, the quality of the beam generated by the other method is relatively poor, which is also dependent on beam parameters, the diffraction efficiency is high, 2.4 times that by the original method, which indicating that there exist many advantages on the applications of laser processing, nonlinear excitation, and so on. The circular Airy beams are generated experimentally by both methods. The experimental results show that the quality of the beam generated by the commonly used method is affected seriously by the background noise due to its low diffraction efficiency, while the beam generated by the other coding method is well consistent with the theoretical result and its feasibility is experimentally confirmed.

Key words holography; circular Airy beam; phase-only encoding method; beam quality; diffraction efficiency

OCIS codes 090.1970; 070.6110; 070.7345

1 引言

艾里光束^[1-2]是一种具有无衍射、自加速及自修复等特性的特殊光束。自 2007 年被提出以来, 艾里

光束就受到了广泛关注^[3-6]。2010 年, 研究人员提出了一种基于径向对称性的圆对称艾里光束 (CAB), CAB 具有特殊的突然自聚焦特性, 在焦点前光束能保持很低的光强分布, 而到达焦点时光强

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-10-06; 录用日期: 2018-10-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB352001)、上海市自然科学基金(16ZR144600)

* E-mail: Tao_Geng@hotmail.com

会突然提升数十甚至数百倍^[7-8]。这种突然自聚焦特性使得 CAB 在生物医学、激光加工、光学微操作和非线性光学等领域有着广阔的应用前景,受到了越来越多的关注^[9-12]。

CAB 是一种特殊光束,因此需要采用特定的方法来产生,在可见光波段产生 CAB 的方法主要有两种。第一种方法是直接使用具有径向 3/2 次方分布的相位板或空间光调制器(SLM)^[13],该方法的优点是无需使用傅里叶透镜,实验光路更简单,且可获得具有涡旋相位的 CAB^[14]。但这种方法无法针对 CAB 的特定参数进行编码,因此无法得到所需特定参数的光束,使用者较少。第二种方法是在傅里叶空间使用经纯相位编码的相位板或 SLM^[7],这种方法可以通过对 CAB 的不同参数进行编码,以获得所需特定参数的光束,因此这种方法是目前最常用的产生 CAB 的研究方法^[15-16]。

虽然傅里叶空间的纯相位编码方法已广为使用,但现有的研究主要集中在 CAB 传输特性或 CAB 的应用上,关于编码方法对 CAB 质量的影响的研究却鲜有报道。光源质量对光束的实际应用至

关重要,因此如何高效高质地产生 CAB 是这种特殊光束能否走向实际应用的关键之一。基于此,本文研究了目前通用的纯相位编码方法对 CAB 产生性能的影响,并引入另一种编码方法与之比较,详细分析了这两种方法的优劣之处。然后使用这两种方法实验产生 CAB,并与理论结果进行比较、验证。

2 编码方法

CAB 初始光场分布可表示为^[8]

$$u(r, 0) = \text{Ai}\left(\frac{r_0 - r}{\omega}\right) \exp\left[\alpha \cdot \left(\frac{r_0 - r}{\omega}\right)\right], \quad (1)$$

式中, Ai(·) 为艾里函数, r_0 为主光环的半径, r 为光场的径向坐标, ω 为与光斑宽度相关的参数, α 为指数截断因子。使用傅里叶空间的纯相位编码方法产生 CAB 的实验光路如图 1 所示,其中 HWP 为半波片,用来调节光束的偏振方向,SLM 位于傅里叶透镜的前焦面上,用于加载经相位编码后的 CAB 的频谱信息,挡板为直径约 1 mm 的不透明圆斑,位于傅里叶透镜的后焦面上,用来遮挡光轴上的零级衍射光。

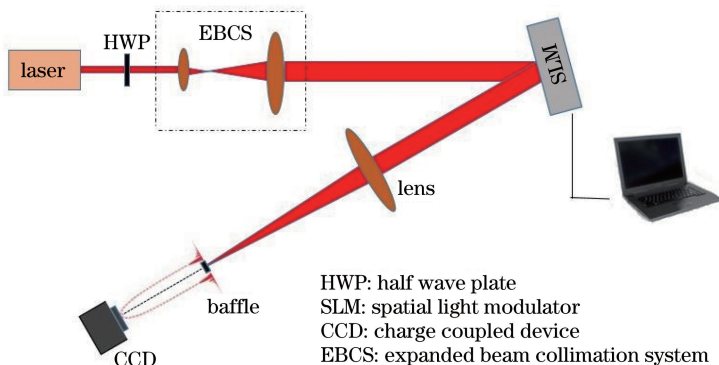


图 1 实验光路图

Fig. 1 Experimental optical path

目前用来产生 CAB 的纯相位编码方法由 Davis 等^[17]在 1999 年提出,为了便于说明比较,将此方法称为方法一,编码过程简述如下^[7,17]。首先,由圆对称性,CAB 的初始光场分布经傅里叶变换后得到频谱函数 $F_T(\rho) = A(\rho) \exp[i\varphi(\rho)]$,其中 $A(\rho)$ 为频谱的振幅分布函数, $\varphi(\rho)$ 为频谱的相位分布函数, ρ 为空间频率。然后,为了补偿编码过程的畸变,需要通过数值解方程 $A(\rho) = \frac{\sin\{\pi[1-M(\rho)]\}}{\pi[1-M(\rho)]}$,获得修正后的振幅分布函数 $M(\rho)$,最终纯相位分布函数可表示为

$$\Psi(\rho) = \exp[iM(\rho)\varphi(\rho)], \quad (2)$$

其变化范围设定在 $[0, \pi]$ 。

事实上 Davis 等^[18]在 2001 年提出了另一种纯相位编码方法,但据本课题组所知,目前还没有研究者将之用于 CAB 的产生实验,本研究称之为方法二。这种编码方法的最终纯相位分布函数可表示为 $\Psi'(\rho) = \exp\{iM(\rho)[\varphi(\rho) + 4\pi\rho/D]\}$, (3) 其变化范围设定在 $[-\pi, \pi]$,式中 D 为相位板或 SLM 的边长。

3 分析讨论

图 2(a)和 2(b)分别给出了根据(2)式和(3)式得到的相位分布函数,其中初始 CAB 光场的参数为 $r_0 = 1 \text{ mm}$, $\omega = 0.08 \text{ mm}$, $\alpha = 0.1$ 。为了与实际

SLM 的尺寸相对应,将相位板尺寸设为 $8.64 \text{ mm} \times 8.64 \text{ mm}$ 。考虑将一束最大光强为单位 1,光斑半径为 1.8 mm 的高斯光束入射到相位板上,使用傅里叶变换可计算得到透镜后焦面上的光场分布。图 3 所示为使用方法一和方法二编码后计算得到的透镜后焦面上的光强分布图,其中 I_0 为 CAB 主光环的峰值,傅里叶透镜的焦距 $f = 300 \text{ mm}$ 。为了便于比较,图 3 同时给出了由(1)式直接计算得到的理想

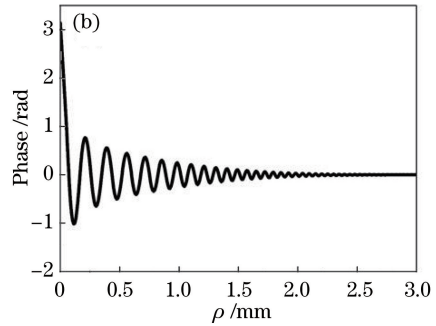
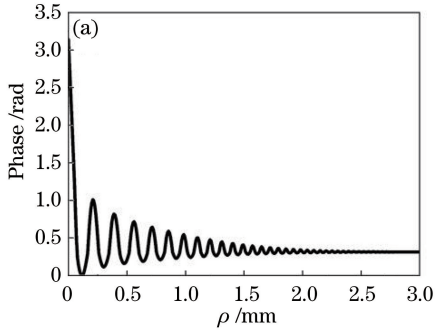


图 2 使用不同编码方法计算得到的相位分布图。(a)方法一;(b)方法二

Fig. 2 Phase distributions calculated by different encoding methods. (a) Method 1; (b) method 2

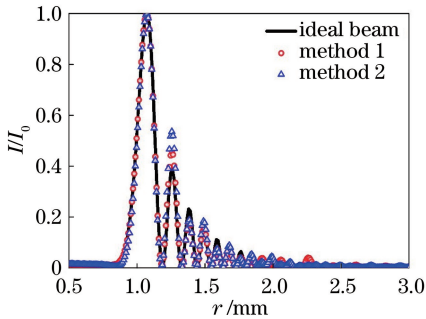


图 3 使用不同方法计算得到的透镜后焦面上的光强分布图
Fig. 3 Intensity distributions at back focal plane obtained by different methods

为了直观地比较两种方法产生 CAB 的质量高低,引入结构相似性指数作为评判标准。结构相似性理论是一种常用的图像质量测量的理论,可以用来评估失真图像与参考图像的相似程度。结构相似性指数可以表示为^[19]

$$S_{A,B} = \frac{\sigma_{A,B}}{\sigma_A \sigma_B}, \quad (4)$$

式中,A、B 分别表示参考图像和失真图像, σ_A 和 σ_B 分别表示参考图像和失真图像的标准差, $\sigma_{A,B}$ 为参考图像和失真图像的相关系数。 $S_{A,B}$ 的最大值为 1,其值越接近 1 说明失真图像越接近参考图像。

图 4 所示为使用两种编码方法计算获得的衍射图像与理想 CAB 之间的结构相似性指数 S 与参数 w, r_0 和 α 的关系曲线。其中,图 4(a)保持 $r_0 =$

CAB 初始光强分布。由图 3 可知,使用这两种编码方法得到的光束光强分布与理想的 CAB 光强分布基本都能吻合,其中次光环的峰值明显大于理想光束次光环的峰值,方法二产生的光束尤为明显。这是由于方法二中增加了 $4\pi\rho/D$ 的线性相位位移项,使得高级次衍射项中产生一个线性位移,从而产生横向分离,可能干扰到一级衍射项,使光束质量降低^[18]。

1 mm 和 $\alpha = 0.1$ 不变,图 4(b)保持 $w = 0.08 \text{ mm}$ 和 $\alpha = 0.1$ 不变,图 4(c)保持 $r_0 = 1 \text{ mm}$ 和 $w = 0.08 \text{ mm}$ 不变。由图 4(a)可知,参数 w 对方法一产生的光束质量影响较小,其曲线变化相对平缓,当 w 增至 0.2 mm 时, S 的值仍然能保持在 0.985 以上。而方法二产生的光束质量受参数 w 的影响较大, S 随 w 的增大明显减小,当 w 增至 0.2 mm 时, S 的值已降至 0.95,为了保证产生光束具有较高的质量,建议 w 的取值应小于 0.2 mm 。图 4(b)和 4(c)中的曲线变化都很平缓,说明参数 r_0 和 α 对两种方法产生的光束质量的影响都较小, S 的值都能保持在 0.985 以上。从上述分析可以看出,方法二增加了 $4\pi\rho/D$ 的线性相位位移项,导致产生光束的质量下降,且其对参数选择的依赖性要大于方法一。

产生方法优劣的另一个重要的评价指标是衍射效率 η ,即衍射成像的光通量与再现时照明光源的总光通量之比。这一指标衡量了产生方法对照明光源的使用效率、对激光加工及非线性光学等领域的应用至关重要。图 5 所示为使用两种编码方法计算获得的衍射效率 η 与参数 w, r_0 和 α 的关系曲线,其计算参数与图 4 相同。由图 5 可知,这三个参数对两种编码方法的衍射效率都有较大的影响,随着这些参数的增大,两种编码方法的衍射效率 η 都呈单调递减的趋势,且递减速度相近。与方法一相比,方法二具有较高的衍射效率,随着

参数的变化,两种方法的衍射效率的比值的取值范围为 2.4~2.5。方法二的衍射效率显著大于方法一的衍射效率的原因主要有两个:一是一级衍射光和零级衍射光的能量分配依赖于相位调制深度^[17],相位调制深度增大,一级衍射光会随之增强,而方法二的相位变化范围为 $[-\pi, \pi]$,最大相

位调制深度为方法一(范围为 $[0, \pi]$)的两倍,这使得方法二的一级衍射光在与零级衍射光的竞争中能获得更多的能量;二是方法二中增加了 $4\pi\rho/D$ 的线性相位位移项,使得一级衍射中的有用信息在其他高级衍射项被复制,并被叠加到了一级衍射中,增强了一级衍射光^[18]。

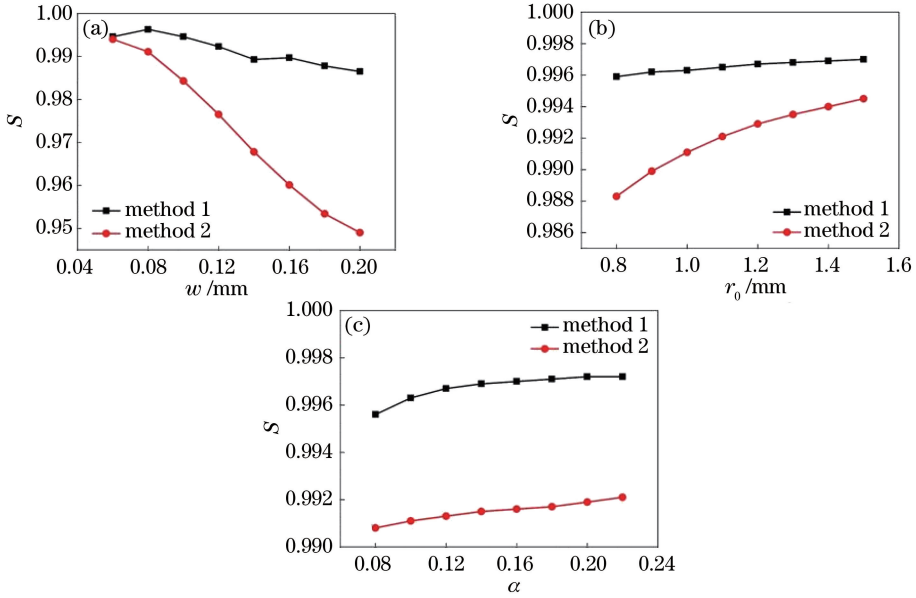


图 4 结构相似性指数 S 与不同参数的关系曲线。(a) w ;(b) r_0 ;(c) α

Fig. 4 Structural similarity index S versus different parameters. (a) w ; (b) r_0 ; (c) α

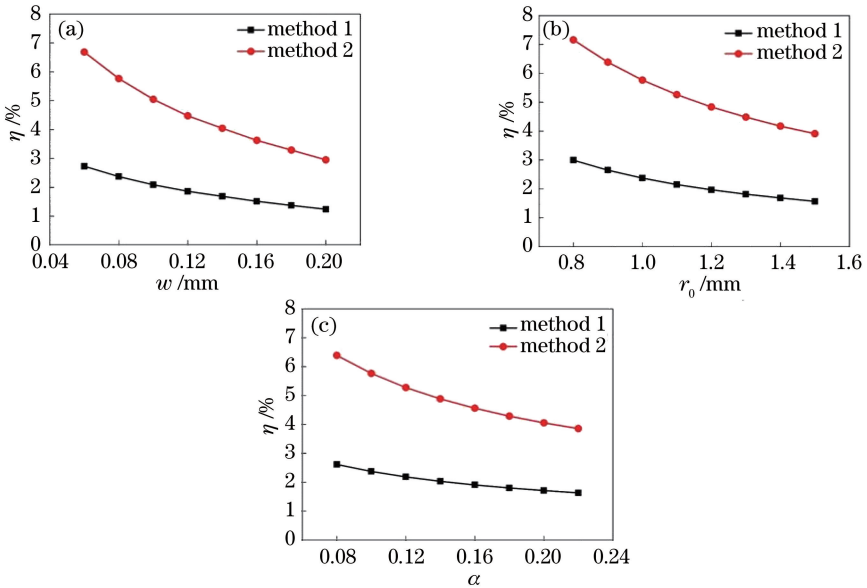


图 5 衍射效率 η 与不同参数的关系曲线。(a) w ;(b) r_0 ;(c) α

Fig. 5 Diffraction efficiency η versus different parameters. (a) w ; (b) r_0 ; (c) α

4 实验验证

由于目前还没有使用方法二产生 CAB 的实验报道,为了验证方法二的可用性,本研究使用方法二

进行实验产生 CAB,并与方法一的实验结果进行比较。实验光路示意图如图 1 所示,使用线偏振 He-Ne 激光器作为照明光源,SLM 使用的是德国 Holoeye 公司生产的 PLUTO-2 型纯相位型 SLM,

像素尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 图 6 所示为实验装置图。

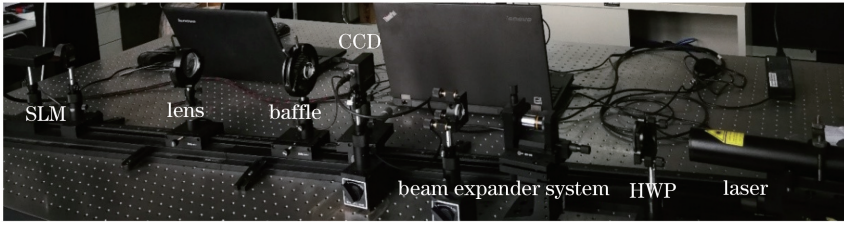


图 6 实验装置图

Fig. 6 Schematic of experimental device

图 7(a)和 7(b)分别为使用方法一和方法二后, 在透镜后焦面测得的光强分布图, 编码参数与图 2 的参数相同, 取 $r_0 = 1 \text{ mm}$, $w = 0.08 \text{ mm}$, $\alpha = 0.1$ 。由图 7 可知, 使用这两种方法产生的光斑都体现出 CAB 的中空环状分布结构。两种方法实际测量的衍射效率分别为 0.79% 和 1.98% , 其各自的理论衍射效率分别为 2.4% 和 5.8% (见图 5)。实验测量值约为理论值的 $1/3$, 方法二的实际衍射效率约为方法

一的 2.5 倍, 与理论比值保持一致。方法一的衍射效率较低, 因此图 7(a)的光斑光强较弱, 使得背景噪声明显。计算使用方法一和方法二产生的实验光束的结构相似性指数, 结果分别为 0.958 和 0.976 , 相较于对应的理论值 0.996 和 0.991 , 均有所下降。但方法一的实验结果受背景噪声影响较大, 实际结构相似性指数与理论值相差较大, 使得方法一产生的实验光束的结构相似性指数反而小于方法二的。

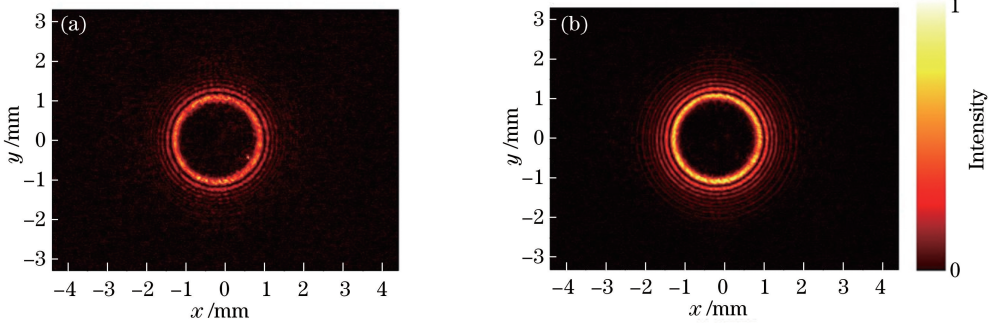


图 7 在透镜后焦面测量的光强分布图。(a)方法一;(b)方法二

Fig. 7 Intensity distributions at back focal plane. (a) Method 1; (b) method 2

为了更直观地对两种方法的实验结果进行比较, 对沿 y 轴正方向的实验光强分布进行测量, 光强分布曲线如图 8 所示, 并同时给出了理想 CAB 的光强分布以便比较。由图 8 可知, 方法一的实验结果与理想 CAB 的主光环和次光环的光强分布吻合较好, 从第

三光环开始噪音的影响使得高阶光环的分布细节有所缺失, 光束质量受到影响。方法二的较高的衍射效率使得噪音的影响较小, 可以明显看到高阶光环的分布细节, 但受到编码方法的影响, 次光环的峰值与图 3 理论计算的结果一致, 明显高于理想值。

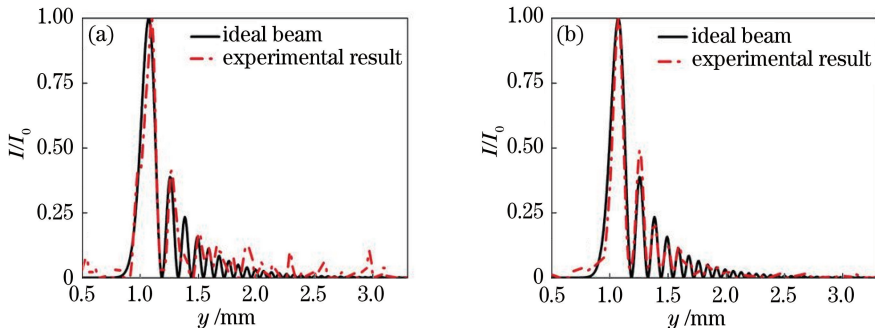


图 8 在透镜后焦面测量的沿 y 轴正方向的实验光强分布曲线。(a)方法一;(b)方法二

Fig. 8 Experimental intensity distributions at back focal plane along y direction. (a) Method 1; (b) method 2

5 结 论

分析比较了两种纯相位编码方法对 CAB 性能的影响,阐述了两种方法各自的优点和缺点。理论研究发现,方法一产生的光束质量整体略好于方法二,但在适当的光束参数范围内,两种方法都能得到质量较好的 CAB,两种方法产生的光束与理想 CAB 的相似性结构指数差别并不大。而方法二的衍射效率约为方法一的 2.4 倍。实验结果显示,方法一的衍射效率较低,因此实验光束受到背景噪音的影响较大,使得实验光束的质量反而差于方法二产生的实验光束。虽然方法二的衍射效率相对较高,但实际效率仍然低于 5%。光场的主要能量集中在零级衍射光,因此如何将更多的能量从零级衍射光转移到一级衍射光,从而进一步提高衍射效率将是下一步研究的重点。

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] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 979-981.
- [3] Minovich A E, Klein A E, Neshev D N, *et al.* Airy plasmons: non-diffracting optical surface waves[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(2): 221-232.
- [4] Qian J, Liu B Y, Sun H X, *et al.* Broadband acoustic focusing by symmetric Airy beams with phased arrays comprised of different numbers of cavity structures[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(11): 114304.
- [5] Li S Z, Shen X J, Wang L. Generation and control of self-accelerating Airy beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0505003.
李绍祖, 沈学举, 王龙. 自加速艾里光束的生成及控制[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0505003.
- [6] Wang Y Q, Ren Z J, Li X D. Poynting vector and angular momentum of accelerating quad Airy beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1226001.
王雅倩, 任志君, 李晓东. 加速四艾里光束的坡印亭矢量及角动量研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1226001.
- [7] Papazoglou D G, Efremidis N K, Christodoulides D N, *et al.* Observation of abruptly autofocusing waves[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1842-1844.
- [8] Efremidis N K, Christodoulides D N. Abruptly autofocusing waves[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4045-4047.
- [9] Koulouklidis A D, Papazoglou D G, Fedorov V Y, *et al.* Phase memory preserving harmonics from abruptly autofocusing beams[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(22): 223901.
- [10] Liu K, Koulouklidis A D, Papazoglou D G, *et al.* Enhanced terahertz wave emission from air-plasma tailored by abruptly autofocusing laser beams[J]. *Optica*, 2016, 3(6): 605-608.
- [11] Panagiotopoulos P, Papazoglou D G, Couairon A, *et al.* Sharply autofocused ring-Airy beams transforming into non-linear intense light bullets[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2622.
- [12] Huang L, Guo H L, Li J F, *et al.* Optical trapping of gold nanoparticles by cylindrical vector beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1694-1696.
- [13] Davis J A, Cottrell D M, Zinn J M. Direct generation of abruptly focusing vortex beams using a 3/2 radial phase-only pattern[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(9): 1888-1891.
- [14] Davis J A, Cottrell D M, Sand D. Abruptly autofocusing vortex beams[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13302-13310.
- [15] Li N, Jiang Y F, Huang K K, *et al.* Abruptly autofocusing property of blocked circular Airy beams[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22847-22853.
- [16] Manousidaki M, Papazoglou D G, Farsari M, *et al.* Abruptly autofocusing beams enable advanced multiscale photo-polymerization[J]. *Optica*, 2016, 3(5): 525-530.
- [17] Davis J A, Cottrell D M, Campos J, *et al.* Encoding amplitude information onto phase-only filters[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(23): 5004-5013.
- [18] Davis J A, Smith D A, McNamara D E, *et al.* Fractional derivatives: analysis and experimental implementation[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(32): 5943-5948.
- [19] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.