

doi:10.3788/gzxb20154401.0126003

非均匀螺旋相位调制下对称破缺角向偏振 光束的聚焦特性

谢高峰, 李鹏, 刘圣, 赵建林

(西北工业大学 理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 西安 710072)

摘 要:提出了一种多参量调控角向偏振光束焦场强度和横向能流的方法. 基于矢量衍射积分理论, 数值模拟了非均匀螺旋相位和旋转对称振幅挡板调制下角向偏振光束的聚焦特性, 讨论了螺旋相位结构和对称振幅挡板联合调制下, 角向偏振光束焦场横向能流和偏振态的分布. 结果表明: 非均匀螺旋相位的引入改变了光场的聚焦特性, 导致聚焦场重心产生了偏移; 在偶数重旋转对称振幅挡板的联合调制下, 焦场中出现了局部的椭圆偏振态和圆偏振态, 且焦平面上出现了横向能流; 通过调节螺旋相位, 不仅可以实现焦场重心的特殊控制, 还能进一步丰富焦场偏振态和横向能流分布. 这种基于多参量调控焦场强度和能流分布的方法为实现操控特定区域的粒子提供了新的思路.

关键词: 衍射理论; 相位; 偏振; 光操控

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0126003-6

Focusing Properties of Symmetric Broken Azimuthally Polarized Beams Modulated by Non-uniform Spiral Phases

XIE Gao-feng, LI Peng, LIU Sheng, ZHAO Jian-lin

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, The Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, Xi'an 710072, China)

Abstract: The controlling of the distributions of intensity and transversal energy flow in the focal field of azimuthally polarized beams by multiple parameters was presented. The modulations of non-uniform spiral phase and rotationally symmetric amplitude obstacle on the focusing properties of azimuthally polarized beams were numerically studied, as well as their combined modulation on transversal energy flow and polarization distributions in the focal plane were also analyzed, based on the vectorial diffraction theory. The results demonstrate that the non-uniform spiral phase has significant effects on the focusing properties, and give rise to the shift of gravity of the focused field. With the combined modulation of even-fold rotationally symmetric amplitude obstacle, local elliptical polarization and circular polarization, as well as transversal energy flow appear in the focused field. Additionally, adjusting the phase structure not only can control the gravity of the focused field, but also can further enrich the focal field polarization state and transverse energy flow. This method of controlling the intensity and energy flow of focused field provides a new way to realize the manipulation of particles in special area.

Key words: Diffraction theory; Phase; Polarization; Optical tweezers or optical manipulation

OCIS Codes: 260.5430; 260.1960; 350.5030; 350.4855

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(No. 2012CB921900)和国家自然科学基金青年项目(No. 61205001)资助

第一作者: 谢高峰(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为矢量光场的聚焦特性. Email: 492599307@qq.com

导师(通讯作者): 赵建林(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光场调控、数字光信息处理及数字全息术、光纤传感技术与应用等.
Email: jlzhao@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2014-04-02; 录用日期: 2014-05-20

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

柱矢量光束可以分为径向偏振 (Radially Polarized, RP)、角向偏振 (Azimuthally Polarized, AP), 以及广义柱对称矢量光束^[1]. 其独特的聚焦特性因在超分辨成像^[2]、表面等离子体激发^[3]、光学微操控^[4-5]、激光微加工^[6]等方面具有巨大的潜在应用价值而受到广泛的关注和研究. 与标量光束相比, RP 光束聚焦后, 可以产生更强的纵向分量以及更小的焦斑^[7], 结合高数值孔径透镜及衍射光学元件的调制^[8-9], 可以形成光针^[10]、光链^[11]、光笼^[12]等特殊强度分布^[13]. 与 RP 光束不同的是, AP 光束的焦场只存在横向分量, 并且经过特定挡板调制后, 其焦场能流、偏振态等会重新分布. 其中, 经扇形挡板振幅调制后, 由于轴对称系统的破缺使得聚焦场发生劈裂和旋转, 形成一对带有相反轨道角动量和相反自旋角动量的焦场^[14], 为各向同性微粒的操纵提供了新的途径. 而经过旋转对称振幅挡板调制后, AP 光束焦场处能流将产生显著变化, 并产生额外的偏振奇点^[15], 为实现多粒子操控的光学系统提供了新的思路.

现有的焦场调控研究中, 调控手段多为单一参量调制, 如相位调制或振幅调制, 而相对复杂的调制以及多参量联合调制往往易被忽略. 文献^[16]提出, AP 光束经振幅、相位两参量联合调制后, 可以在焦场中实现

偏振奇点的转化及控制. 本文提出利用非均匀螺旋相位的调制作用, 实现 AP 光束焦场重心的调控, 并结合旋转对称振幅挡板实现焦场强度及横向能流向特定区域的集中转移, 从而有助于增大局部光势阱. 这可为实现特定区域粒子的操控提供理论依据.

1 多参量调制下 AP 光束的聚焦行为

经螺旋相位和旋转对称振幅挡板调制后的矢量光束, 其光场可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{vector}} = \exp(in\varphi^q) P(\varphi) \begin{bmatrix} \cos(m\varphi + \varphi_0) \\ \sin(m\varphi + \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, m 为矢量光束的偏振拓扑荷, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 为方位角, φ_0 为常数, 表示偏振方向与径向间的夹角, $\exp(in\varphi^q)$ 为相位调制函数, 指数因子 $q \geq 0$, $P(\varphi)$ 为挡板透过率函数, N 重旋转对称振幅挡板的透过率函数表示为

$$P(\varphi) = \begin{cases} 1 & \varphi \in \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2N} + \Delta_j, \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2N} + \Delta_j \right] \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

式中, $\Delta_j = 2j\pi/N$, 为透过率等于 1 的扇形区域中心方位角.

根据理查德-沃尔夫矢量衍射积分理论^[17], 经调制后, 矢量光束的焦场可以表示为^[12]

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = i \frac{kf}{2\pi} \int_0^{\theta_{\max}} \int_0^{2\pi} \sin\theta \sqrt{\cos\theta} \exp(in\varphi^q) P(\varphi) \times \begin{bmatrix} a[1 + (\cos\theta - 1)\cos^2\varphi] + b[(\cos\theta - 1)\cos\varphi\sin\varphi] \\ a[(\cos\theta - 1)\cos\varphi\sin\varphi] + b[1 + (\cos\theta - 1)\sin^2\varphi] \\ a(\sin\theta\cos\varphi) + b(\sin\theta\sin\varphi) \end{bmatrix} \times e^{ik(z\cos\theta + r\sin\theta\cos(\varphi - \varphi_0))} d\varphi d\theta \quad (3)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为真空中的波长, f 为透镜焦距, $\theta_{\max} = \arcsin(\text{NA})$, NA 为聚焦透镜的数值孔径, θ 为极角, (r, φ, z) 为像空间点的柱坐标, 焦点为原点. 本文讨论的入射光均为 1 阶 AP 光束, 此时 $m = 1$, $\varphi_0 = \pi/2$, 对应式(3)中 $a = -\sin\varphi$, $b = \cos\varphi$.

利用式(3), 获得焦场的三个电场分量后, 进一步利用波印廷矢量可获得焦场的能流分布为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}] = \frac{c^2}{2\omega} \epsilon_0 \left\{ \text{Im}[\mathbf{E}^* \cdot (\nabla) \mathbf{E}] + \frac{1}{2} \nabla \times \text{Im}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{E}) \right\} \quad (4)$$

式中, c 为真空中的光速, ω 为圆频率, ϵ_0 为真空中的介电常数. 等式右边第一项对应着波印廷矢量的轨道流分量, 第二项对应着自旋流分量. 焦平面上偏振椭圆的椭圆率可以通过计算斯托克斯参量^[12]获得.

2 非均匀螺旋相位的影响

2.1 非均匀螺旋相位的调制

首先, 基于式(3)中的矢量聚焦模型, 对比不同指数因子的螺旋相位对无振幅挡板调制的 AP 光束聚焦特性的影响. 当 $q = 1$ 时, 相位调制函数表示为 $\exp(in\varphi)$, 即通常讨论的经典涡旋相位, 其相位角变化与方位角成线性关系; 当 $q \neq 1$ 时, 相位角的变化与方位角成指数关系, 光波前中具有非均匀螺旋相位结构. 图 1 给出了几种不同螺旋相位调制下角向偏振光束的焦场特性, 计算过程中令挡板透过率函数 $P(\varphi) = 1$. (a) 为焦场强度, (b) 为焦平面上偏振椭圆的椭圆率, (c) 为焦平面上归一化的波印廷矢量横向分量和横向能流(箭头).

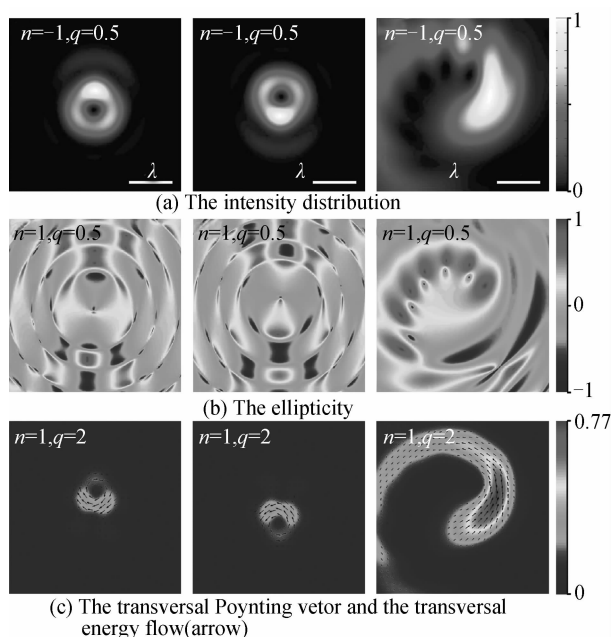


图1 非均匀螺旋相位调制后 AP 光束的焦场特性
Fig. 1 Focusing properties of AP beams modulated by non-uniform spiral phase

从图1中可以看出,引入非均匀螺旋相位后,AP光束焦场原有的轴对称性被破坏,不仅焦场强度重心产生了显著偏移,而且焦场的偏振态和能流分布也明显改变.特别是当 $q=2$ 时,焦场强度分布与均匀相位条件下的分布情况明显不同,焦斑尺寸远大于原有尺

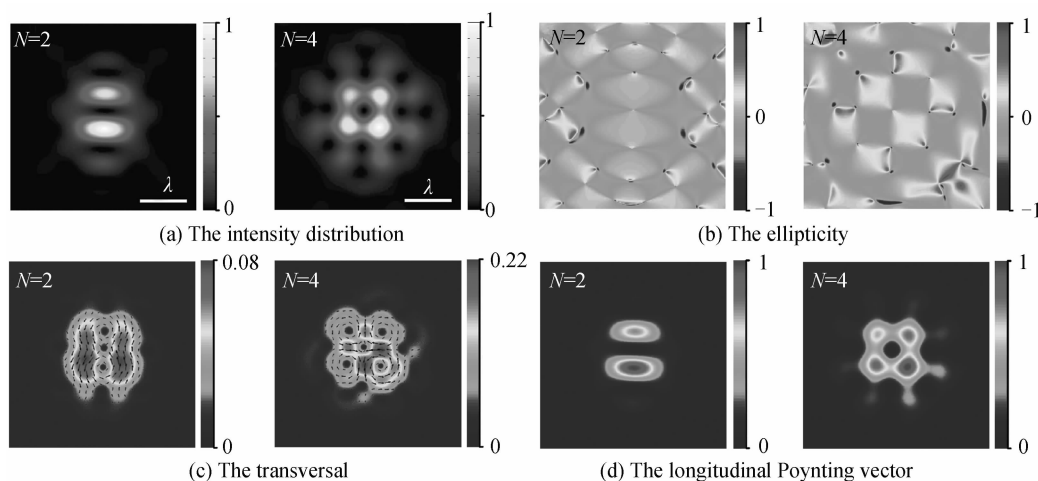


图2 非均匀螺旋相位和偶数重旋转对称振幅挡板联合调制下 AP 光束的焦场特性
Fig. 2 Focusing properties of an AP beam under the combined modulation of non-uniform spiral phase and even-fold rotationally symmetric amplitude obstacles

从图2中可以看出,非均匀螺旋相位的引入,不仅使 N 重对称的焦场产生了重心偏移,而且极大地改变了焦场的偏振特性.焦场中出现了局部的椭圆偏振态和圆偏振态,光场中心奇点具有类角向偏振特性,而在聚焦光场旁瓣顶端引入了 N 个圆偏振奇点.此外,由于非均匀螺旋相位所携带的横向能流,在聚焦过程中不会因为偶数重挡板的叠加效果而消失,因此产生了不同于振幅挡板这一单一参量调制的现象,在焦平面

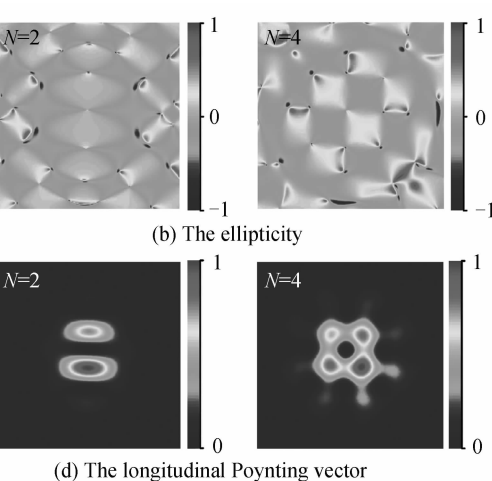
上出现了横向能流,特别是对于 $N=4$ 的旋转对称挡板,如图2(c)所示,焦平面上存在4个明显的横向能流环,且能流环的中心位置与焦场强度分布的旁瓣位置相对应.

2.2 非均匀螺旋相位与旋转对称挡板的联合调制

在 AP 光束中引入非均匀的螺旋相位能够实现焦场的特殊调制,当利用非均匀螺旋相位与旋转对称振幅挡板的联合调制时,AP 光束将展现出更加新颖的焦场特性.

2.2.1 偶数重挡板

文献[12]提出,偶数重旋转对称振幅挡板调制下,AP 光束焦平面上每一点由于场叠加效果而呈线偏振态,且不存在横向能流^[12].图2(a)~(d)分别给出了 AP 光束经非均匀螺旋相位 $\exp(i\varphi^{0.5})$ 与偶数重旋转对称振幅挡板联合调制后的焦场强度、椭圆率、归一化坡印廷矢量的横向分量(箭头为横向能流)和纵向分量分布.



上出现了横向能流,特别是对于 $N=4$ 的旋转对称挡板,如图2(c)所示,焦平面上存在4个明显的横向能流环,且能流环的中心位置与焦场强度分布的旁瓣位置相对应.

2.2.2 奇数重挡板

奇数重旋转对称挡板调制下,AP 光束焦场的横向能流和偏振态会发生重新分布,焦平面上偏振态沿角向呈左右旋交替分布,并且产生 $2N$ 个顺逆时针相间

的横向能流环^[12]. 图 3(a)~(d)分别给出了 AP 光束经非均匀螺旋相位 $\exp(i\varphi^{0.5})$ 与奇数重旋转对称振幅挡

板联合调制后的焦场强度、椭圆率、归一化坡印廷矢量的横向分量(箭头为横向能流)和纵向分量.

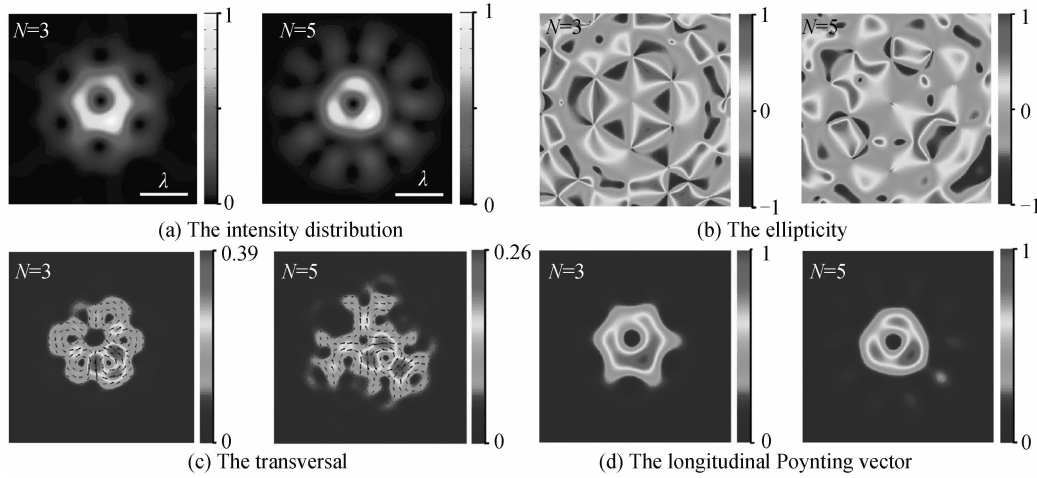


图 3 非均匀螺旋相位和奇数重旋转对称振幅挡板联合调制下 AP 光束的焦场特性

Fig. 3 Focusing properties of an AP beam under the combined modulation of non-uniform spiral phase and odd-fold rotationally symmetric amplitude obstacles

从图 3 中可以看出,非均匀螺旋相位和奇数重旋转对称挡板联合调制后的聚焦场依然具有丰富的偏振特性和独特的能流环分布. 其中,在非均匀螺旋相位和 3 重旋转对称振幅挡板联合调制下,实现了聚焦场中特定能流环,即坡印廷矢量横向分量的增大. 这种光场重心偏移,解决了奇数重振幅挡板调制时能流环外围光强弱的缺点,通过实现局部能流增强,为多粒子操控特别是特定区域粒子操控提供了新的思路. 此外,非均匀螺旋相位的引入,使得 5 重旋转对称振幅挡板调制后的聚焦场坡印廷矢量横向分量显著增大,但严重影响了横向能流和偏振态分布.

3 焦场重心和横向能流调控

为了丰富非均匀螺旋相位和旋转对称振幅挡板联合调制下,AP 光束聚焦场独特的横向能流分布及其在光学操控中的应用,进而提出一种针对这种非均匀的焦场强度及横向能流环的调控方法.

对于偶数重振幅挡板,在引入非均匀螺旋相位调制前,焦平面上不存在横向能流,而在相位和振幅两个参量联合调制下,坡印廷矢量的横向分量远小于其纵向分量,如图 2(c)所示,不利于进行光操控;对于奇数重振幅挡板,根据文献^[12]可知,随着 N 的增加,横向分量所占比重逐渐减小,也不利于进行光操控. 因此,主要考虑利用非均匀螺旋相位与 3 重旋转对称振幅挡板联合调制 AP 光束焦场.

从图 1 可知,采用相位调制时,改变螺旋相位拓扑荷 n 的符号,焦场强度峰值位置和横向能流会相应地发生反转. 图 4 对比了联合调制下,螺旋相位拓扑荷符号对 AP 光束聚焦的影响. 图 4(a)~(d)分别表示经相位 $\exp(-i\varphi^{0.5})$ 和 $N=3$ 的挡板联合调制后 AP 光束

的焦场强度、椭圆率、归一化坡印廷矢量的横向分量(箭头为横向能流)和纵向分量.

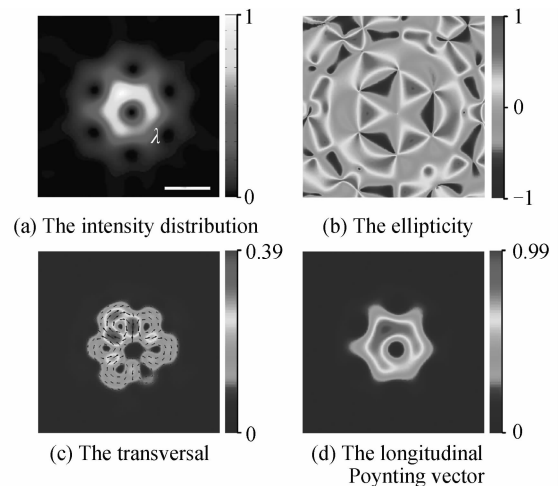


图 4 非均匀螺旋相位 $\exp(-i\varphi^{0.5})$ 和 $N=3$ 振幅挡板联合调制下 AP 光束的焦场特性

Fig. 4 Focusing properties of an AP beam under the combined modulation of phase $\exp(-i\varphi^{0.5})$ and $N=3$ amplitude obstacle

此外,当角向偏振光束仅受 3 重旋转对称振幅挡板调制时,其焦平面上存在 6 个横向能流环. 而图 4 结果显示,非均匀螺旋相位的引入导致焦场重心偏移,使得横向能流产生局部增强,即单个横向能流环增强. 但是,被增强的能流环的位置与指数因子 q 无关,并且不受螺旋相位拓扑荷符号的精确调控. 因此,在相位角 $\Delta = n\varphi^{0.5}$ 中引入附加相位,讨论其对焦场重心偏移的影响,以及利用其调制增强能流环位置的可行性. 此时,附加的非均匀螺旋相位函数为 $\exp[in(\varphi + 2M_p\pi)^{0.5}]$. 其中, M_p 为 φ 的函数,表示为

$$M_p = \begin{cases} 1 & \varphi \in [0, P] \\ 0 & \varphi \in (P, 2\pi] \end{cases} \quad P \in [0, 2\pi] \quad (5)$$

由矢量衍射积分公式可知,3重旋转对称振幅挡板的调制作用,实际上等效于将矢量衍射积分公式中方位角 φ 的积分区间分立为三个独立的积分区域,即 $[\pi/3, 2\pi/3] \cup [\pi, 4\pi/3] \cup [5\pi/3, 2\pi]$.因此,计算过程中,分别选取 $P=0, 2\pi/3, 4\pi/3$,使其等于每个分立区域的最大方位角.图5和6分别给出了 $n=1$ 和 $n=-1$ 的情况下,经附加初始相位的螺旋相位和3重旋转对称振幅挡板联合调制后,AP光束的焦场强度和归一化坡印廷矢量的横向分量(箭头为横向能流).

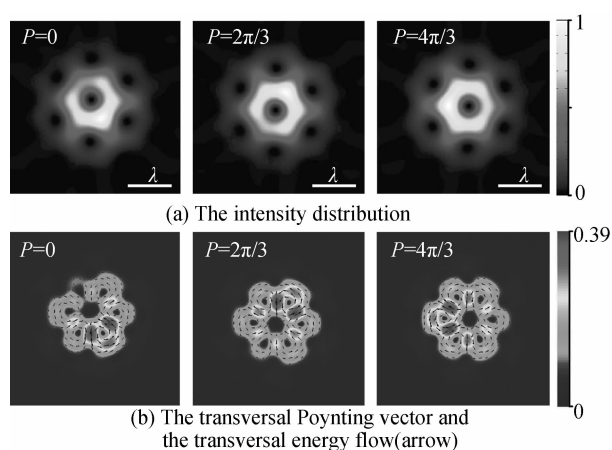


图5 非均匀螺旋相位 $\exp [i(\varphi + 2M_p\pi)^{0.5}]$ 和 $N=3$ 振幅挡板联合调制下 AP 光束的聚焦特性
Fig. 5 Focusing properties of an AP beam under the combined modulation of phase $\exp [i(\varphi + 2M_p\pi)^{0.5}]$ and $N=3$ amplitude obstacle

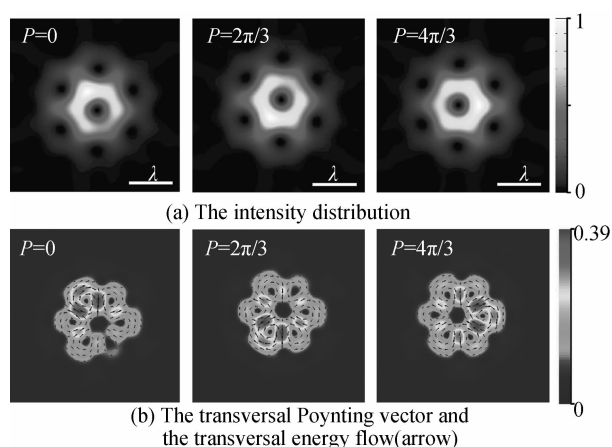


图6 非均匀螺旋相位 $\exp [-i(\varphi + 2M_p\pi)^{0.5}]$ 和 $N=3$ 振幅挡板联合调制下 AP 光束的聚焦特性
Fig. 6 Focusing properties of an AP beam under the combined modulation of phase $\exp [-i(\varphi + 2M_p\pi)^{0.5}]$ and $N=3$ amplitude obstacle

对比图5和6中的聚焦场分布可以看出,在非均匀螺旋相位中增加不同的附加相位,对焦场重心偏移量以及波印廷矢量横向分量的大小几乎没有影响.而通过调节附加相位值,改变螺旋相位所携带的横向能

流方向,实现对振幅挡板遮挡后光场能量转移方向的控制,不仅实现了对焦场重心偏移位置的控制,使其汇聚于类六角形的焦场的某一特定角,还能够实现该方向上横向能流环的增强.这种调控聚焦场重心和横向能流的方法,为利用光势阱实现特定区域粒子捕获,及利用焦场横向能流沿特定方向驱动粒子提供了新的实现途径.

4 结论

利用非均匀螺旋相位和旋转对称振幅挡板,实现了对 AP 光束焦场强度和横向能流分布的调控.基于理查德-沃尔夫矢量衍射积分理论,研究了非均匀螺旋相位调制下角向偏振光束的聚焦特性,重点讨论了非均匀螺旋相位对对称破缺 AP 光束聚焦的影响,实现了对 AP 光束聚焦场强度分布和横向能流分布的特殊调控.结果表明:非均匀螺旋相位所对应的横向能流,在聚焦过程中能够显著影响焦场强度分布,导致焦场重心产生明显偏移.当指数因子 $q > 1$ 时,螺旋相位导致焦场中产生了多个圆偏振奇点;在非均匀螺旋相位和旋转对称振幅挡板联合调制下,偶数重旋转对称破缺 AP 光束的焦场中,产生了局部的椭圆偏振和圆偏振态,并且产生了明显的横向能流;通过非均匀螺旋相位中引入不同的附加相位值,不仅能够实现焦场重心的调节,还能实现对横向能流环向特定区域集中的有效控制.这种利用相位和振幅两参量联合调控焦场重心及横向能流的方法,为特定区域粒子捕获及特定方向粒子驱动提供了新的实现途径.

参考文献

- [1] ZHAN Qi-wen. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**(1): 1-57.
- [2] WANG Hai-feng, SHI Lu-ping, YUAN Gao-qiang, et al. Subwavelength and super-resolution nondiffraction beam[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(17): 171102.
- [3] ZHAN Qi-wen. Evanescent Bessel beam generation via surface plasmon resonance excitation by a radially polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(11): 1726-1728.
- [4] NIEMINEN T A, HECKENBERG N R, RUBINSZTEIN-DUNLOP H. Forces in optical tweezers with radially and azimuthally polarized trapping beams[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(2): 122-124.
- [5] WANG Xi-lin, CHEN Jing, LI Yong-nan, et al. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**(25): 253602.
- [6] MEIER M, ROMANO V, FEURER T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation [J]. *Applied Physics A*, 2007, **86**(3): 329-334.
- [7] YOUNGWORTH K S, BROWN T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Optics Express*, 2000, **7**(2): 77-87.
- [8] WANG Hai-yan, CHEN Chuan-lin, DU Jia-lei, et al. Propagation of Bessel-Gaussian beam with optical vortices in turbulent atmosphere[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5):

- 505-510.
王海燕,陈川琳,杜家磊,等. 贝塞尔高斯涡旋光束在大气湍流中的传输特性[J]. 光子学报,2013,**42**(5):505-510.
- [9] FANG Liang, GAN Xue-tao, ZHAO Jian-lin. Topological transformation of vortex beams using cylindrical lens[J]. *Acta Photonics Sinica*,2014,**43**(3):0326001.
方亮,甘雪涛,赵建林. 利用柱透镜调控涡旋光束的拓扑结构[J]. 光子学报,2014,**43**(3):0326001.
- [10] WANG Hai-feng, SHI Lu-ping, LUKYANCHUK B, *et al.* Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(8): 501-505.
- [11] KOZAWA Y, SATO S. Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(6):820-822.
- [12] ZHAO Yi-qiong, ZHAN Qi-wen, ZHANG Yan-li, *et al.* Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(8):848-850.
- [13] WENG Xiao-yu, GUO Han-ming, DONG Xiang-mei, *et al.* Focusing characteristics of Laguerre-Gaussian radially polarized beam through high numerical aperture [J], *Acta Photonics Sinica*, 2011, **40**(5):798-802.
- 翁晓羽,郭汉明,董祥美,等. 拉盖尔高斯径向偏振光高数值孔径聚焦特性[J]. 光子学报,2011,**40**(5):798-802.
- [14] WANG Xi-lin, LOU Kai, CHEN Jing, *et al.* Unveiling locally linearly polarized vector fields with broken axial symmetry [J]. *Physical Review A*, 2011, **83**(6):063813.
- [15] JIAO Xiang-yang, LIU Sheng, WANG Qian, *et al.* Redistributing energy flow and polarization of a focused azimuthally polarized beam with rotationally symmetric sector-shaped obstacles[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(6):1041-1043.
- [16] ZHANG Wei, LIU Sheng, LI Peng, *et al.* Controlling the polarization singularities of the focused azimuthally polarized beams[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(1):974-983.
- [17] RICHARDS B, WOLF E. Electromagnetic diffraction in optical systems; structure of the image field in an aplanatic system[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1959, **253**(1274):358 - 379.