

同心矢量完美涡旋模式的特性

胡俊涛¹, 马海祥¹, 李新忠^{1,2,*}, 唐苗苗^{1,2}, 李贺贺^{1,2}, 台玉萍³, 王静鸽^{1,2}

¹河南科技大学物理工程学院, 河南 洛阳 471023;

²河南省光电储能材料与应用重点实验室, 河南 洛阳 471023;

³河南科技大学化工与制药学院, 河南 洛阳 471023

摘要 完美涡旋光场模式的单一性难以满足其在多种领域的应用需求。为解决该问题,提出了一种同心矢量完美涡旋模式,其光强分布为一族同心的矢量完美涡旋,各环矢量完美涡旋的性质得到了验证。研究发现,每个完美涡旋的光环大小、偏振阶数等特征参数相互独立。对同心矢量完美涡旋模式光环叠加的实验表明,与标量完美涡旋光束叠加不同,矢量叠加产生的子涡旋会在特定位置消失,原因是两光环在该位置偏振正交。该研究极大地丰富了完美涡旋的模式分布,拓宽了完美涡旋在微操纵、光通信等领域的潜在应用。

关键词 物理光学; 矢量光场; 涡旋光束; 完美涡旋光束

中图分类号 O436; O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0126015

Characteristics of Concentric Vectorial Perfect Vortex Mode

Hu Juntao¹, Ma Haixiang¹, Li Xinzhong^{1,2,*}, Tang Miaomiao^{1,2}, Li Hehe^{1,2},
Tai Yuping³, Wang Jingge^{1,2}

¹ School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;

² Henan Key Laboratory of Photoelectric Energy Storage Materials and Applications, Luoyang, Henan 471023, China;

³ School of Chemical Engineering and Pharmaceutics, Henan University of Science and Technology,
Luoyang, Henan 471023, China

Abstract A perfect vortex beam has only a single simple mode, which restricts its applications in many fields. To overcome this drawback, a concentric vectorial perfect vortex mode is proposed, whose intensity distribution presents a group of concentric vectorial perfect vortices. In addition, the property of each vectorial perfect vortex is tested. The research results show that the characteristic parameters of each vectorial perfect vortex, such as radius and polarization order, are independent on each other. Furthermore, the superposition property of intensity rings of concentric vectorial perfect vortex mode is studied. Different from the scalar superposition, the sub-vortices generated by the vectorial superposition vanish at some specific locations as a result of polarization orthogonality for these rings at these locations. This work vastly enriches the mode distributions of a perfect vortex and broadens its potential applications in the fields of micromanipulation, optical communication and so on.

Key words physical optics; vectorial optical field; vortex beam; perfect vortex beam

OCIS codes 260.6042; 090.2890

1 引 言

自 1992 年 Allen 等^[1]证明涡旋光束携带 lh (l 为拓扑荷值, h 为约化普朗克常量)的轨道角动量(OAM)以来,涡旋光束成为一个研究热点^[2-3],广泛应用于灵巧微操纵^[4-5]、超大容量光通信^[6]、超分辨显微成像^[7]、光学涡旋日冕观察仪^[8]及光学测量^[9]

等领域。然而,拓扑荷值与光环半径的依赖关系严重制约着涡旋光束的发展。例如:在微操纵领域,拓扑荷值代表力矩的大小,改变力矩的同时难以保证涡旋光束尺寸与被操纵微粒尺寸相同;在光纤通信领域,难以实现多个拓扑荷值的涡旋光束直接耦合到同一根光纤中。为了解决这些问题,2013 年, Ostrovsky 等^[10]提出了完美涡旋的概念,即光环半

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-10-28; 录用日期: 2018-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61775052,11704098)

* E-mail: xzli@haust.edu.cn

径不随拓扑荷值的增大而增大的涡旋光束。随后,关于完美涡旋的产生、调控、表征及应用引起了研究者们广泛的关注^[11]。2013年,Chen等^[12]使用完美涡旋进行微粒操纵,实现了微粒捕获时轨道角动量的定制。2014年,Brunet等^[13]实现了完美涡旋在光纤通信领域的应用,一定程度上克服了涡旋光束拓扑荷值与光环半径的依赖关系,实现了36个OAM态信息的加载。2016年,Zhang等^[14]使用完美涡旋作为结构照明光场,实现了表面等离子体激元结构照明显微成像,发现完美涡旋的使用可以提高等离子体激元激发效率,减小背景荧光噪声。

然而,完美涡旋的模式分布过于单一,无法满足特殊场合的应用需求。为了解决这个问题,2016年,Li等^[15]拓宽了完美涡旋的概念,提出了完美矢量涡旋的概念。2017年,Kovalev等^[16]提出了椭圆完美涡旋的概念,极大地丰富了完美涡旋的模式分布。同年,Xin等^[17]提出了同心完美涡旋的概念。关于该问题的解决,本课题组也开展了较为深入的研究,如:基于两同心完美涡旋干涉实现了可自由调控的环形^[18]及椭圆环形^[19]光学涡旋阵列,并且提出了一种完美涡旋模式自由变换技术^[20]。但是,完美涡旋作为一种新光束,对其模式的探索及其模式丰富性意义的研究还远不止于此。为此,本文提出了一种同心矢量完美涡旋(CVPV)模式,并进一步研究了同心完美涡旋丰富的模式分布及两种不同偏振态的同心完美涡旋的叠加性质。

2 理论基础

CVPV模式可以由多个半径不同的普通矢量完美涡旋光束共轴叠加组成,每个矢量完美涡旋均可以认为是两个正交的圆偏振完美涡旋的线性叠加^[15,21]。因此,结合完美涡旋的表达式^[21],将CVPV表示为

$$|\psi\rangle = \sum_{j=1}^J (\psi_j |R_j\rangle + \psi_j |L_j\rangle), \quad (1)$$

式中: J 为CVPV的光环数,为简单起见,主要针对 $J=2$ 的情况进行论述,且定义参数下标 $j=1$ 代表内环参数, $j=2$ 代表外环参数; $|R_j\rangle$ 、 $|L_j\rangle$ 分别为拓扑荷为 l_j 的右旋圆偏振涡旋光束与拓扑荷为 $-l_j$ 的左旋圆偏振涡旋光束, ψ_j 为其对应的系数,这三个参数分别可表示为

$$\begin{cases} |R_j\rangle = \exp(il_j\theta)(e_x + ie_y)/\sqrt{2} \\ |L_j\rangle = \exp(-il_j\theta)(e_x - ie_y)/\sqrt{2} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\psi_j = \exp\left[-\frac{(r-R_j)^2}{\omega^2}\right], \quad (3)$$

式中: (r, θ) 为极坐标; e_x 和 e_y 为笛卡尔坐标系中 x 轴和 y 轴上的单位向量; R_j 代表CVPV每个光环的光环半径; 2ω 为光环宽度。由(2)式可知,每个完美涡旋的偏振阶数 $[l_j - (-l_j)]/2 = l_j$ 。

3 实 验

为了验证上述理论的可行性,设计了图1所示的Sagnac干涉仪^[15]来产生CVPV模式。一束波长为632.8 nm的He-Ne激光器(型号25-LHR-151-230, Melles Griot公司,美国)发出的激光束垂直入射到扩束镜上,用一个小孔光阑对扩束后的光斑进行截止,之后光束平行射出。采用一个偏振镜P1对截止后的圆形光束进行起偏,使之转化为线偏振光。通过一个半波片调节线偏振光的偏振方向,使其偏振方向与水平方向的夹角为 45° 。调节后的线偏振光经过一个偏振光分光器后,会产生两束等光强且正交的线偏振光,即一束垂直纸面方向的偏振光(s分量)和一束平行纸面方向的偏振光(p分量)。相位空间光调制器(SLM, PLUTO-VISG-016型, Holoeye公司,德国)的像素尺寸为 $8\ \mu\text{m}$,填充因子为93%,分辨率为 $1920\ \text{pixel} \times 1080\ \text{pixel}$,其只对水平偏振光产生响应,因此要在SLM前面放置一个 $1/2$ 波片以调节偏振方向满足SLM的调制要求,并且使反射光束偏振方向与入射光束偏振方向互逆,以便两束反射光束在偏振分束立方体处等光强合束。随后,合束后的两束反射光通过 $1/4$ 波片分别形成左、右旋圆偏振光,且二者叠加可形成径向偏振光。

在完美涡旋光束的产生技术中,数字锥透镜法是最灵活的一种方法,可以在远场产生半径可自由调控的近似完美涡旋光束^[22]。因此,将写有螺旋相位与锥透镜透过率函数以及正弦光栅的掩模板输入SLM,并使用凸透镜L对光束进行傅里叶变换,在其后焦平面上使用CCD相机(acA1600-60gc型彩色相机,Basler公司,德国,像素尺寸为 $4.5\ \mu\text{m}$,分辨率为 $1600\ \text{pixel} \times 1200\ \text{pixel}$)记录所生成的CVPV。所使用的掩模板表达式为

$$t(\rho, \varphi) = \left| \sum_{j=1}^J \exp[ik(n-1)\alpha_j\rho + il_j\varphi] + \exp\left[\frac{i2\pi\rho \sin(\varphi)}{D}\right] \right|^2, \quad (4)$$

式中: (ρ, φ) 为SLM平面的极坐标; k 为波数; n 为折射率; α_j 为锥透镜的锥角大小,控制着相应完美涡

旋的光环半径; D 为正弦光栅的周期。由于在光路中每经过一个反射镜,光束截面上的横坐标将会反

演,纵坐标不变,最终使得左、右旋圆偏振光束的拓扑荷相反且满足(2)式。

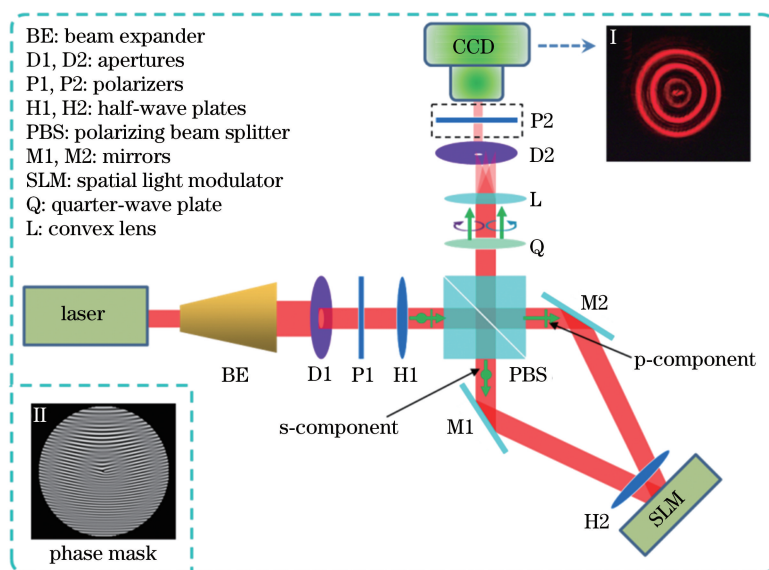


图 1 实验装置原理图(插图 I 为 CCD 相机记录的 CVPV 光强图,插图 II 为掩模板)

Fig. 1 Schematic of experimental setup (Inset I is intensity pattern of CVPV recorded by CCD camera, and inset II is mask)

4 结果与讨论

基于上述实验装置生成的 CVPV 模式如图 2(a1)、(b1)所示,箭头表示偏振分布。同心完美涡旋为在外层分布的两个光环。然而,在同心完美涡旋内部仍然有较亮的环形杂散光分布^[23]。这是因为使用锥透镜生成的完美涡旋是一种近似的完美涡旋,该方法本身会在完美涡旋的中心产生环形的杂散光,当拓扑荷变大时杂散光环会变大且变暗。下文不考虑中心杂光,将两完美涡旋分别称为内环完美涡旋与外环完美涡旋。

图 2(a1)为内外两环偏振阶数相同($l_1=l_2=1$)时 CVPV 的光强分布图样,其偏振模式关于光轴中

心呈圆对称分布且垂直于径向坐标的等值线。图 2(a2)、(b2)中的黄色箭头表示通过检偏器后内外两环产生的缺口位置。随着检偏器的旋转,其内外两环的缺口位置也同步旋转,如图 2(a3)~(a5)和图 2(b3)~(b5)所示。图 2(b1)为内外两环偏振态独立调控($l_1=-1, l_2=2$)所生成的 CVPV。通过检偏器后外环产生 4 个缺口,如图 2(b2)所示,说明外环完美涡旋为 2 阶偏振,这与(2)式的理论分析相符合,验证了该光路及掩模板可以产生所提出的 CVPV 模式。值得注意的是,部分暗核处的光强会形成分叉,这是因为调节光路时左、右旋圆偏振光不完全叠加,在缺口处残留了左、右旋圆偏振光,未产生消光现象,因此形成了分叉。

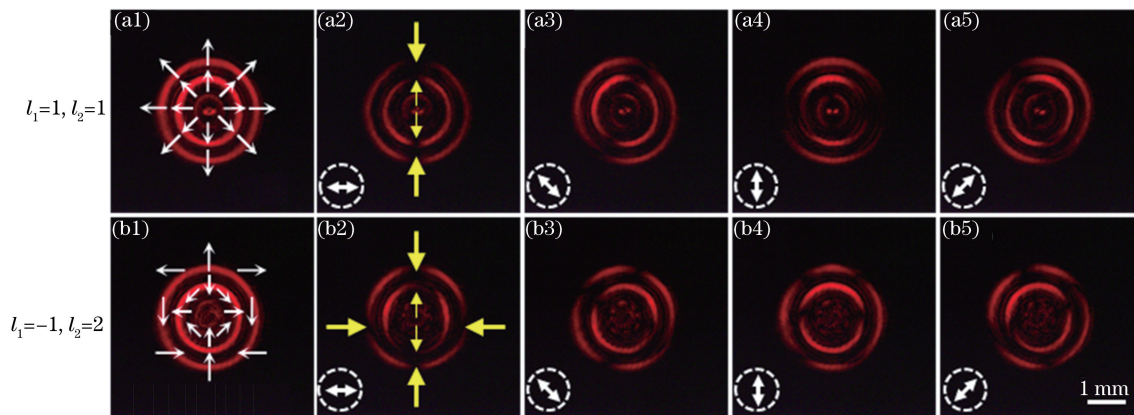


图 2 实验生成 CVPV 的光强分布

Fig. 2 Intensity distributions of CVPV generated in experiment

上述结论在实验上证明了 CVPV 两光环偏振态可以独立调控,下面证明两光环均为完美涡旋光束。不同拓扑荷生成的 CVPV 模式如图 3(a1)~(a5)所示。图中选择的拓扑荷分别为 $l_1=1,3,5,7,9$ (内环), $l_2=-9,-7,-5,-3,-1$ (外环)。由于 CVPV 的偏振阶数也等于 l_j ,因此选择使用一个检偏器来测量偏振阶数,进而得到拓扑荷的大小,如图 3(a6)~(a10)所示。CVPV 通过检偏器后变为分立的光瓣,其每环光瓣数 N_1, N_2 与每环偏振阶数分别满足 $N_1=2|l_1|, N_2=2|l_2|$ 。图 3(a6)~(a10)中外环光瓣数由 18 逐渐减小到 2,内环由 2 逐渐增大到 18。此外,旋转检偏器观察光瓣旋转方向即可确

定拓扑荷的方向(在检偏器顺时针旋转的条件下,光瓣顺时针旋转时拓扑荷为正,光瓣逆时针旋转时拓扑荷为负)^[24],图 3(a6)、(a11)中的白色虚线作为一条参考线,便于观察旋转方向。对比图 3(a6)~(a10)与图 3(a11)~(a15)中的光瓣位置,可得内环拓扑荷为正,外环拓扑荷为负。计算实验所生成的不同拓扑荷的 CVPV 内外光环半径,结果如图 4 所示,误差棒代表相对误差。由图 4 可得:随着拓扑荷绝对值的增加,内外两环光环半径略有增加,但内外两环光环半径的增加量均控制在 6.1% 以下,且平均相对误差仅为 0.014。这证明 CVPV 内外两光环均近似为完美涡旋。

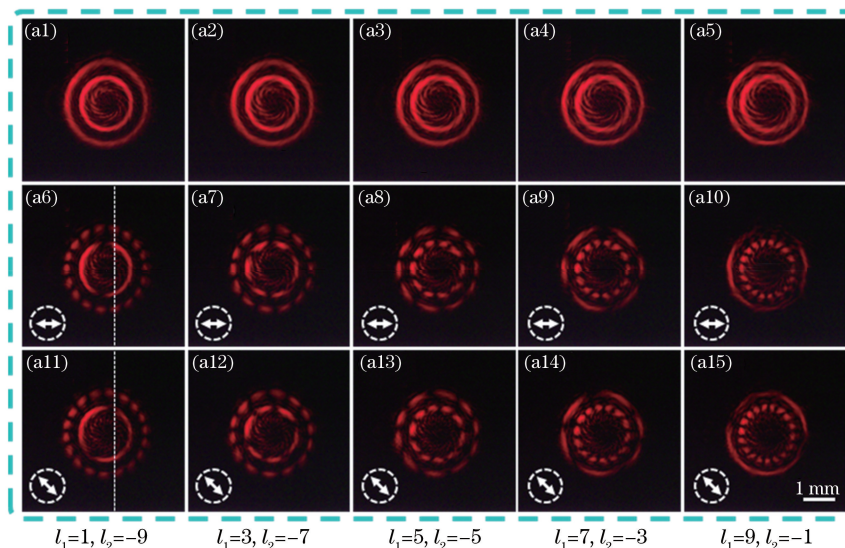


图 3 CVPV 各环矢量完美涡旋性质的验证

Fig. 3 Demonstration of perfect vectorial vortex properties of each ring in CVPV

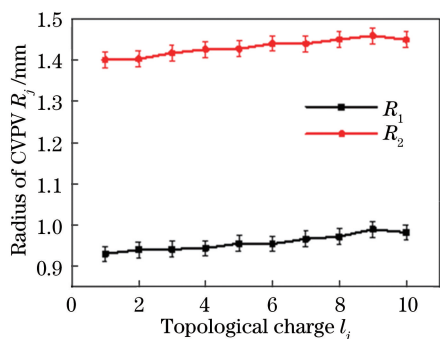


图 4 CVPV 光环半径与拓扑荷的关系

Fig. 4 Radius of each ring in CVPV versus topological charge

下面证明锥角对 CVPV 的调控特性,如图 5 所示。图 5(a1)~(a5)为 $l_1=1, l_2=-1$ 且锥角 α_1, α_2 等差值(差值为 0.006)同时增大时的光强分布。所生成的 CVPV 两光环等间隔[间隔为 (0.462 ± 0.010) mm]增大,由此可验证锥透镜锥

角对两环完美涡旋的调控规律相同。在 $l_1=1, l_2=-1$ 条件下,进一步固定外环锥透镜锥角 α_2 的数值并增大内环锥角 α_1 ,如图 5(b1)~(b5)所示,可以发现内环半径逐渐增大,说明两光环半径可以独立调控。进一步探究锥透镜锥角对光环半径的调控规律,得到图 6 所示的关系曲线。由图 6 可以看出,数据点呈直线分布,对其进行线性拟合,得到如图中红线所示的拟合曲线,相关系数高达 0.9998,证明数据点线性非常好,锥透镜锥角对光环半径的调控为线性关系。此特性为 CVPV 在光纤耦合时提供了技术支持^[12]。

上述内容证实 CVPV 不同环半径可以独立调控,为证明其具有标量涡旋光束的性质,调控两环干涉形成环形涡旋阵列。下面研究不同初始相位差下 CVPV 两环叠加的情况。若对完美涡旋改变 $\exp(i\theta_j)$ 的初始相位,则(2)式可改为

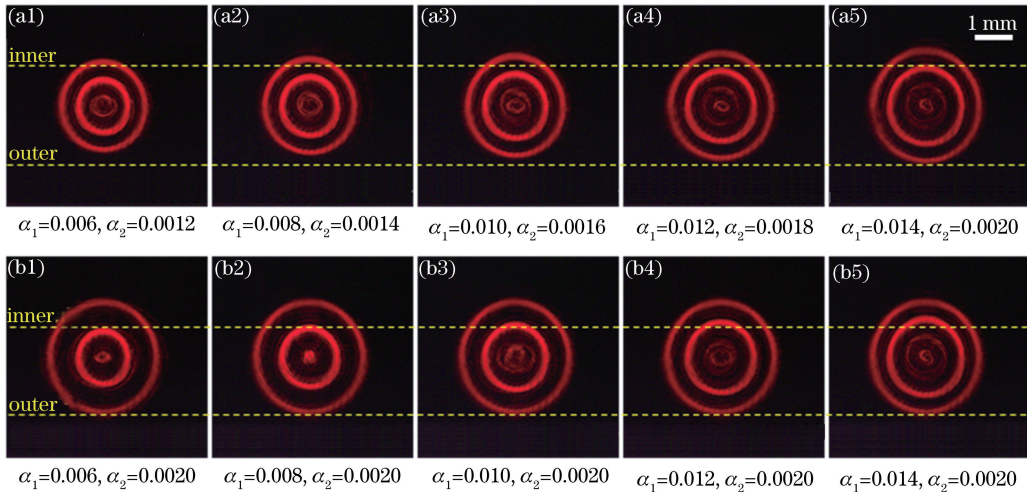


图 5 CVPV 内外环半径随锥透镜锥角的变化

Fig. 5 Radii of inner and outer rings in CVPV versus cone angle of axicon

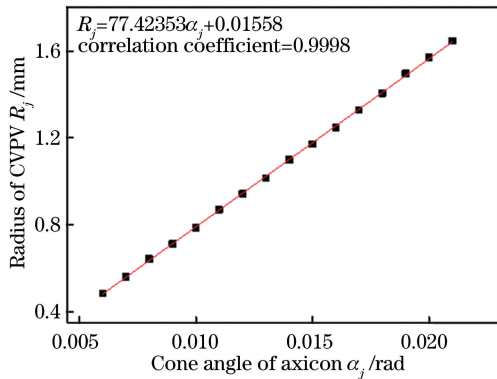


图 6 CVPV 内外环半径随锥透镜锥角的变化关系

Fig. 6 Radii of inner and outer rings in CVPV versus cone angle of axicon

$$\begin{cases} |R_j\rangle = \exp[i l_j \theta + i \theta_j](e_x + i e_y) / \sqrt{2} \\ |L_j\rangle = \exp[-i l_j \theta + i \theta_j](e_x - i e_y) / \sqrt{2} \end{cases}, \quad (5)$$

式中： θ_1, θ_2 分别为内外两环的初始相位。将(3)、(5)式代入(1)式，则可以得到具有不同初始相位差的 CVPV。图 7 为内外拓扑荷分别为 1 和 -1 的实验光强图。由图 7(a1)可以看出，两环叠加后形成了暗核分布，暗核数与标量完美涡旋的叠加规律相同。然而，随着初始相位差的增加，暗核逐渐消失后又逐渐出现，初始相位差为 π 时得到与初始场垂直分布的两个暗核，如图 7(a5) 所示。出现该现象的原因在于两环叠加处偏振互相垂直时不再形成干涉条纹。具体来说：由(5)式可知，初始相位 θ_j 没有给左、右旋圆偏振分量提供额外的相位差，添加初始相位无法改变偏振态，故内外两环偏振完全正交位置恒定不变，即图中 Q1~Q4 4 点。然而，随着初始相位 θ_1 的增加，由内外两环偏振的平行分量干涉产生的暗核位置发生旋转，

在旋转过程中，当两环偏振正交的分量逐渐增多时，暗核逐渐消失，暗核离开 Q1~Q4 时因两环偏振平行的分量增加而逐渐出现，如图 7(a1)、(a5)、(a9) 所示。该现象表明 CVPV 光环叠加会展现与标量情况不同的叠加规律。

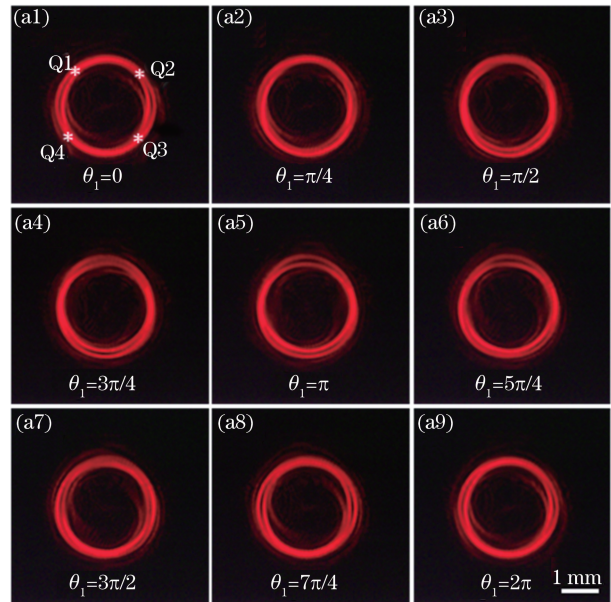


图 7 CVPV 内外环叠加光强分布

Fig. 7 Intensity distributions after superposition of inner and outer rings in CVPV

图 8 以 $J = 4$ 为例展示了多环情况下的 CVPV。图 8(a) 为分立的 CVPV 光强分布图，图 8(b) 验证了每个光环的偏振阶，图 8(c) 为两两叠加的 CVPV 光强分布图。结果表明，多环情况下的 CVPV 展现了与双环 CVPV 类似的性质，即每环独立调控偏振阶、光环半径及叠加生成阵列。

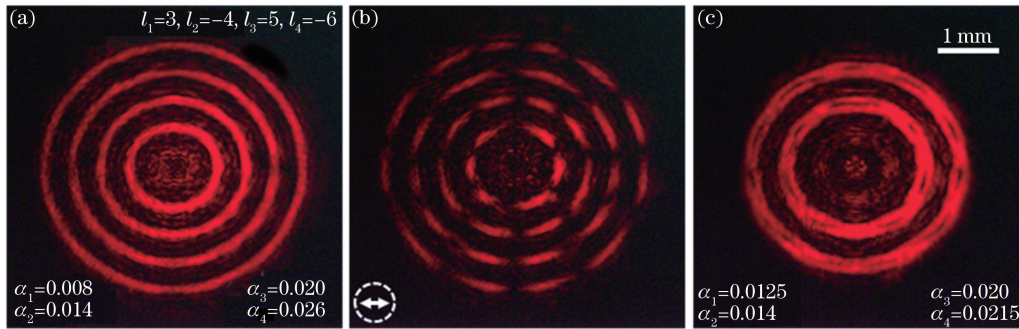


图 8 多环 CVPV 光强分布

Fig. 8 Intensity distributions of multiple rings in CVPV

5 结 论

提出了一种同心矢量完美涡旋(CVPV)模式,该模式各环均为矢量完美涡旋,且各环可独立调控。每环完美涡旋的拓扑荷值控制着其偏振阶数。完美涡旋光环半径与锥角参数呈线性函数关系,相关系数高达 0.9998。调控 CVPV 相邻两环干涉叠加可生成环形涡旋阵列,调节两环初始相位可控制暗核的产生与消失,该性质有望应用于光学开关等领域。该研究极大地丰富了完美涡旋光场的模式分布,提供了一种解决完美涡旋模式单一问题的途径,为完美涡旋在微粒操控、光信息等领域的应用提供了更为丰富的模式分布。

参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Li X Z, Meng Y, Li H H, *et al.* Generation of perfect vortex beams and space free-control technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026018.
李新忠, 孟莹, 李贺贺, 等. 完美涡旋光束的产生及其空间自由调控技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026018.
- [3] Ma H X, Li X Z, Li H H, *et al.* Spatial mode distributions of Ince-Gaussian beams modulated by phase difference factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0626002.
马海祥, 李新忠, 李贺贺, 等. 相位差因子调控的 Ince-Gaussian 光束空间模式分布[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0626002.
- [4] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424: 810-816.
- [5] Tao S H, Yuan X C, Lin J W, *et al.* Fractional optical vortex beam induced rotation of particles[J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 7726-7731.
- [6] Lei T, Zhang M, Li Y R, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4: e257.
- [7] Yu W T, Ji Z H, Dong D S, *et al.* Super-resolution deep imaging with hollow Bessel beam STED microscopy[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(1): 147-152.
- [8] Aleksanyan A, Kravets N, Brasselet E. Multiple-star system adaptive vortex coronagraphy using a liquid crystal light valve [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(20): 203902.
- [9] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, *et al.* Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- [10] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 534-536.
- [11] Wang Y J, Li X Z, Li H H, *et al.* Research progress of perfect vortex field[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090007.
王亚军, 李新忠, 李贺贺, 等. 完美涡旋光场的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090007.
- [12] Chen M Z, Mazilu M, Arita Y, *et al.* Dynamics of microparticles trapped in a perfect vortex beam[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4919-4922.
- [13] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, *et al.* Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [14] Zhang C L, Min C J, Du L P, *et al.* Perfect optical vortex enhanced surface plasmon excitation for plasmonic structured illumination microscopy imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(20):

- 201601.
- [15] Li P, Zhang Y, Liu S, *et al.* Generation of perfect vectorial vortex beams[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2205-2208.
- [16] Kovalev A A, Kotlyar V V, Porfirev A P. A highly efficient element for generating elliptic perfect optical vortices [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(26): 261102.
- [17] Xin Z Q, Zhang C L, Yuan X C. Concentric perfect optical vortex beam generated by a digital micromirrors device [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 7903107.
- [18] Ma H X, Li X Z, Tai Y P, *et al.* Generation of circular optical vortex array[J]. Annalen Der Physik, 2017, 529(12): 1700285.
- [19] Ma H X, Li X Z, Zhang H, *et al.* Adjustable elliptic annular optical vortex array [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(9): 813-816.
- [20] Li X Z, Ma H X, Yin C L, *et al.* Controllable mode transformation in perfect optical vortices[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 651-662.
- [21] Milione G, Sztul H I, Nolan D A, *et al.* Higher-order Poincaré sphere, Stokes parameters, and the angular momentum of light [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(5): 053601.
- [22] Vaity P, Rusch L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 597-600.
- [23] Kotlyar V V, Kovalev A A, Porfirev A P. Optimal phase element for generating a perfect optical vortex [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2016, 33(12): 2376-2384.
- [24] Liu S, Li P, Peng T, *et al.* Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 21715-21721.