

偏振态对涡旋光束拓扑荷识别的影响

邢昊¹, 罗清¹, 蔡和¹, 许凌飞², 安国斐¹, 杨蛟¹, 房瑞娜¹, 王卫江¹, 黄云³, 任天荣², 王激^{1,3*}¹西南技术物理研究所, 四川 成都 610041;²上海航天技术研究院, 上海 201109;³电子科技大学自动化工程学院, 四川 成都 611731

摘要 由于涡旋光具有内禀的拓扑荷(TC)属性,其作为空间光通信的载体会拥有更高维的希尔伯特空间,故基于涡旋光的光通信将明显提升信道容量和安全性。在光通信的信道接收端,需要准确且快速地识别TC以解码所传输的信息。将偏振态维度引入到TC的识别过程中,从数值模拟和实验验证两个方面研究了偏振态对TC识别的影响。通过分析马赫-曾德尔干涉仪中不同偏振态的信号光与参考光所形成的干涉图像发现,使用圆偏振态的高斯光(参考光)对圆偏振态的涡旋光(信号光)的TC识别最为有利,且在TC识别过程中具有圆偏振态的信号光与参考光对于干涉光路的角度敏感性也最低。理论模拟与实验数据的吻合程度较好表明,所提的偏振干涉TC识别方案对未来高速、大容量涡旋光数千米量级的光通信具有一定的实用参考意义。

关键词 物理光学; 偏振态; 拓扑荷; 涡旋光束; 干涉测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1726001

Influence of Polarization State on Identification for Topological Charges of Vortex Beam

Xing Hao¹, Luo Qing¹, Cai He¹, Xu Lingfei², An Guofei¹, Yang Jiao¹, Fang Ruina¹,
Wang Weijiang¹, Huang Yun³, Ren Tianrong², Wang You^{1,3*}¹Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, Sichuan, China;²Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;³School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

Abstract Because of its intrinsic topological charges (TCs), a vortex beam offers a Hilbert space with a higher dimension when it is utilized as a carrier of space optical communication. As a result, optical communication based on vortex beams enjoys significantly improved channel capacity and security. At the channel receiver in optical communication, TCs need to be identified accurately and rapidly to decode the transmitted information. In this paper, the dimension of polarization state is introduced into the process of TC identification, and the influence of polarization state on TC identification is studied from the perspectives of numerical simulation and experimental verification. Interference images of a signal beam and a reference beam with different polarization states in a Mach-Zehnder interferometer are analyzed. The results show that the Gaussian beam (reference beam) with the circular polarization state is the most favorable choice for identifying the TCs of the vortex beam (signal beam) with the same polarization state, and these signal beam and reference beam also appear to be least sensitive to the angle of the interference optical path during TC identification. The theoretical simulation is in good agreement with the experimental data, which indicates that the proposed polarization interference-based TC identification scheme provides a reference for future high-speed and high-capacity optical communication based on vortex beams over distances in the order of magnitude of several kilometers.

Key words physical optics; polarization state; topological charge; vortex beam; interferometry

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-07-21; 录用日期: 2022-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0718803)

通信作者: *youwang_2007@aliyun.com

1 引言

1992年,Allen等^[1]证明了涡旋光束螺旋状的相位面可用相位因子 $\exp(i\ell\theta)$ 来表示,其中: ℓ 为涡旋光束的拓扑荷(TC),即轨道角动量(OAM)的量子数,多被视为整数; θ 是极角或者旋转方位角。涡旋光束的复振幅可用拉盖尔-高斯模式来描述,对于拓扑荷为 ℓ 的涡旋光束,每个光子的轨道角动量为 $\ell\hbar$,其中 $\hbar = h/\pi$ (h 为普朗克常数)。在量子力学中,拓扑荷 ℓ 是角动量算符 \hat{L} 的本征值,拉盖尔-高斯模式为角动量算符 \hat{L} 的本征模式,其在希尔伯特空间中是完备的,可作为一组空间基底来使用。因此,拓扑荷被认为是涡旋光束固有的内禀属性。近年来,涡旋光束所具有的独特性质引起了研究人员的广泛关注,所催生的许多新技术在一些领域中开始得到广泛应用。涡旋光束的相位面呈螺旋状,其中心处存在着相位奇点,在相位奇点附近存在着光场的相干相消,即光束中心的光强为零,从而使得与光轴正交的垂直截面上光强呈环形分布。实际上,环形分布的光强在量子力学中相当于一个环形的势垒,如果把环形涡旋光束聚焦并套在一个目标粒子上,其势垒的高度就会随着能量密度的增加而升高,此时该粒子出现在势垒低的区域中的可能性就会变大,这样就可以很好地约束粒子,这就是广为人知的光镊技术^[2-6]。涡旋光束呈环形分布的光强也可以用来补偿点扩散函数周围的共焦场形变,压缩该点扩散函数就可以实现远场的超分辨成像^[7-9]。

最近,将涡旋光束作为空间光通信的载体成为研究热点之一^[10-15]。相比于传统的光通信,涡旋光作为通信载体具有更高维的希尔伯特空间。一般,传统的光通信通过调制光波的偏振态对所传递的信息进行编码。由于涡旋光比传统的光波多出了一个拓扑荷维度,故在理论上该拓扑荷可以无限取值,这就较大地提升了光通信的信道容量。在加入拓扑荷维度后,需要在信道接收端对涡旋光拓扑荷进行识别从而实现对所传递信息的解码。

目前,识别拓扑荷的方法主要有干涉或衍射法^[16-20]、全息图法^[21-23]、相位板法^[24-26]、坐标变换法^[27-28]和量子弱探测^[29]等。在这些方法中,干涉法是通过观察涡旋光束与本征光束的干涉图样来提取拓扑荷信息的,其相关的技术比较成熟,故其应用也较为广泛。2012年,柯熙政等^[30]通过搭建双缝干涉实验对入射的涡旋光束进行了探测。通过实验发现,从干涉条纹的扭曲程度和扭曲的方向可以得到入射涡旋光束拓扑荷数的大小和正负。2014年,Zhou等^[31]提出了一种动态双缝干涉检测涡旋光束拓扑荷的方法,由于该方法采用了动态双缝的连续扫描,故可以检测到很高的拓扑荷数。近年来,研究人员常使用特殊的光栅器件来对涡旋光的拓扑荷进行识别。2017年,Zheng和Wang^[32]利用环形光栅对不同阶数的涡旋光束进行了检测,最高可检测的拓扑荷数可达到 ± 25 。2022年,Jiang等^[33]提出了一种利用叉形光栅(FSG)产生的远场衍射特征

条纹检测OAM光束的方法,通过增加叉数和设置适当的偏移量来提高条纹的检测可靠性,并且实验上实现了对 ± 50 拓扑荷的检测。除此之外,还可以用神经网络对涡旋光束的拓扑荷进行识别。2017年,Doster等^[34]提出了利用卷积神经网络和AlexNet框架对受大气湍流影响的涡旋光束的强度模式进行分类识别。2021年,Cao等^[35]采用卷积神经网络架构对两个分数阶涡旋光束的叠加进行了拓扑荷识别。同年,叶玉儿等^[36]采用卷积神经网络架构对强度拓扑荷为 $\pm \ell$ 的双模涡旋光束进行了拓扑荷的识别。

实际上,涡旋光作为空间光通信的载体,其偏振态的维度一直没有得到应有的重视,若将偏振态和拓扑荷两个维度结合在一起,则有望扩展涡旋光空间光通信的使用空间。迄今为止,极少发现在基于干涉法的拓扑荷识别中使用偏振态,故有必要研究不同偏振态的本征光和涡旋光发生干涉时其相关电磁场特性的变化,从而推导出一种探测和识别涡旋光拓扑荷的新方法。考虑到目前可调制的高功率激光光源的线宽一般不超过100 kHz,本文所提出的用于空间光通信的基于干涉法的拓扑荷识别方法的工作距离为数千米量级。

本文系统研究了本征光的偏振状态对涡旋光拓扑荷识别的影响。首先,在理论上分析非偏振态、线偏振态和圆偏振态的本征高斯光与线偏振态或圆偏振态的涡旋光发生干涉时的耦合电场强度,再通过数值模拟给出对应的干涉图像。然后,实验观察本征光与涡旋光的干涉条纹,对比不同偏振态组合时的数值模拟与实验结果,结果表明两者的吻合程度较好。通过本研究发现,采用圆偏振本征光对圆偏振涡旋光的拓扑荷进行识别时效果最佳,即使在两束干涉光存在一定夹角的情况下依然能够快速准确地检测出涡旋光的拓扑荷。本文将偏振维度加入到基于干涉法的涡旋光拓扑荷识别中,为未来数千米量级的复合涡旋光空间光通信提供了一种快速而简易的拓扑荷识别新方法,具有一定的实用价值。

2 理论分析

本文的数值模拟主要从琼斯矩阵计算的角度出发,描述利用拓扑阶数为 ℓ 的涡旋波片将基模高斯光束调制为涡旋光束的过程,并推导出用于拓扑荷检测的系列干涉公式。

首先,基模高斯光束空间中任意一点的复振幅可表示为

$$E_G(r, \theta, z) = \frac{A_G}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{r^2}{2R(z)}\right) - \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中: A_G 为高斯光束的振幅; r 为极径; θ 为极角; k 为波数; $\omega(z)$ 为位置 z 处的腰斑半径; z_R 为高斯光束的瑞利长度; $R(z)$ 为高斯光束等相位面的半径。

在特定传输距离($z = z_0$)处,高斯光束的振幅可以

表示为 $E_G(x, y)$ 。考虑几种特定偏振态的高斯光束, 即左旋圆偏振高斯光束 $E_{GL}(x, y)$ 、右旋圆偏振高斯光束 $E_{GR}(x, y)$ 和 p 偏振的线偏光 $E_{GP}(x, y)$, 三者的琼斯矢量可表示为

$$E_{GL}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_G(x, y) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$E_{GR}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_G(x, y) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$E_{GP}(x, y) = E_G(x, y) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用本文所采用的涡旋波片制备涡旋光束时, 入射高斯光束必须呈圆偏振态。首先考虑左旋圆偏振高斯光束 E_{GL} 经过拓扑荷为 l 的涡旋波片时的情况。涡旋波片的琼斯矩阵 $M_v(x, y)$ ^[37] 可表示为

$$M_v(x, y) = \begin{bmatrix} \cos[l\theta(x, y)] & \sin[l\theta(x, y)] \\ \sin[l\theta(x, y)] & -\cos[l\theta(x, y)] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则出射光 E_{vR} 可表示为

$$E_{vR}(x, y) = M_v(x, y) E_{GL}(x, y) = E_{GL}(x, y) \begin{bmatrix} \cos[l\theta(x, y)] & \sin[l\theta(x, y)] \\ \sin[l\theta(x, y)] & -\cos[l\theta(x, y)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = E_{GL}(x, y) \exp[i l \theta(x, y)] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

可见, 左旋圆偏振高斯光束经过涡旋波片后, 会被调制为拓扑荷为 l 的右旋圆偏振涡旋光束。

同理, 当入射光为右旋圆偏振高斯光束 E_{GR} 时, 经过涡旋波片后光束会变成拓扑荷为 $-l$ 的左旋圆偏振涡旋光束 E_{vL} , 相应的表达式为

$$E_{vL}(x, y) = M_v(x, y) E_{GR}(x, y) = E_{GR}(x, y) \begin{bmatrix} \cos[l\theta(x, y)] & \sin[l\theta(x, y)] \\ \sin[l\theta(x, y)] & -\cos[l\theta(x, y)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} = E_{GR}(x, y) \exp[-i l \theta(x, y)] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}. \quad (7)$$

利用线性偏振片可以得到线性偏振的涡旋光束。线性偏振片的琼斯矩阵 $M_p(x, y)$ 可以表示为

$$M_p(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: α 为线性偏振片的主方向与 x 轴之间的角度。p 偏振的涡旋光束可以表示为

$$E_{vp}(x, y) = M_p\left(\frac{\pi}{2}\right) E_{GR}(x, y). \quad (9)$$

本文考虑了几种偏振态的信号涡旋光束 E_v 与参考高斯光束 E'_G 的干涉组合, 所有的干涉强度可以总体表示为

$$I = |E_v(x, y) + E'_G(x, y)|^2, \quad (10)$$

式中: $E_v(x, y)$ 为涡旋光束的复振幅, 可为 $E_{vL}(x, y)$ (左旋圆偏振)、 $E_{vR}(x, y)$ (右旋圆偏振) 或 $E_{vp}(x, y)$ (线偏振); $E'_G(x, y)$ 为高斯光束的复振幅, 可为 $E_{GL}(x, y)$ (左旋圆偏振)、 $E_{GR}(x, y)$ (右旋圆偏振)、 $E_{GP}(x, y)$ (线偏振) 或 $E_G(x, y)$ (非偏振)。

3 实验结果和分析

3.1 干涉实验

本研究通过马赫-曾德尔干涉仪进行涡旋光束拓扑荷的识别, 其实验装置如图 1 所示。采用拓扑荷阶

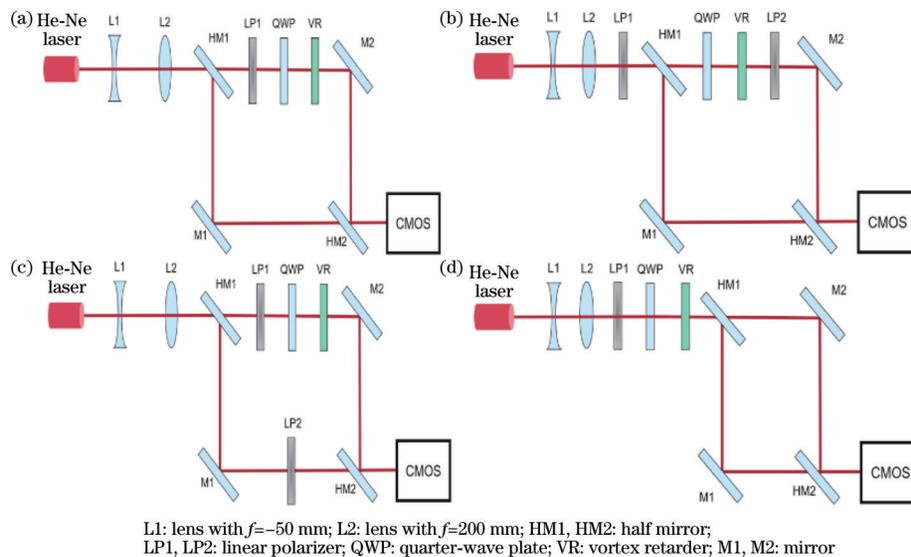


图 1 实验光路。(a)非偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉装置;(b)线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束的干涉装置;(c)线偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉装置;(d)圆偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉装置

Fig. 1 Experimental setup. (a) Interference device for non-polarized Gaussian beam and circularly polarized vortex beam; (b) interference device for linearly polarized Gaussian beam and linearly polarized vortex beam; (c) interference device for linearly polarized Gaussian beam and circularly polarized vortex beam; (d) interference device for circularly polarized Gaussian beam and circularly polarized vortex beam

数为 4 的涡旋波片 VR (深圳市麓邦技术有限公司, VR4-633-SP) 产生涡旋光束。在实验中,使用中心波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为光源,经过焦距分别为 -50 mm 和 +200 mm 的两个透镜(L1 和 L2)进行扩束,扩束后的激光被分束镜 1(HM1)分成两束,一束为参考光,另一束为信号光。在信号光路上使光束先后经过线偏振片、1/4 波片(QWP,当 1/4 波片的光轴与线偏振方向成 $\pm 45^\circ$ 时,将分别产生左旋圆偏振光和右旋圆偏振光)和涡旋波片,以产生涡旋光束。最后,利用互补金属氧化物半导体(CMOS)相机(美国, Coherent, Laser Cam-HR II)观察干涉图样。

通过改变线偏振片 LP1 和 1/4 波片在光路中的位

置和组合,可分别获得非偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束、线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束、线偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束,以及圆偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉图像。在实验中,改变全反镜 M2 的角度可使得参考光和信号光之间形成 0° 、 $\pm 0.02^\circ$ 、 $\pm 0.04^\circ$ 的夹角,得到 4 个偏振组合的干涉图像。

3.2 涡旋光束的模拟与实验结果

圆偏振高斯光束经过涡旋波片产生的涡旋光束的横向光强分布如图 2 所示。图 2(a)、(b)分别为数值模拟和实验中测得的涡旋光束的横向光强分布。左旋圆偏振光和右旋圆偏振光经过涡旋波片后产生拓扑荷为 $l = +4$ 和 $l = -4$ 的涡旋光束的横向强度分布形状一致。

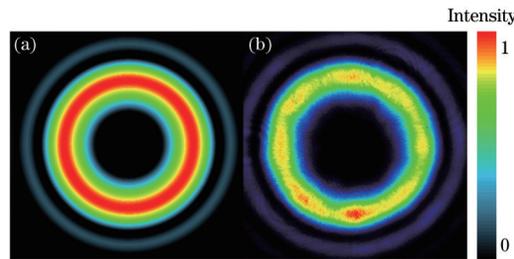


图 2 $l = 4$ 的涡旋光束的强度分布图。(a)模拟结果;(b)实验结果

Fig. 2 Intensity distribution of vortex beam with $l = 4$. (a) Simulation result; (b) experimental result

3.3 非偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉结果

将图 1 中马赫-曾德尔干涉光路中的一束参考光设定为非偏振高斯光束、另一束信号光设定为圆偏振涡旋光束。当两束光完全重合(夹角为 0°)时,数值模拟和实验测得的干涉图样如图 3 所示。干涉图像的中心为整个图像的中心对称点,围绕着此中心分布着

数目等于涡旋光束拓扑荷数的 4 个强度次极大值,在 4 个次极大值周边的强度呈中心对称的螺旋式分布。对于拓扑荷为 +4 的右旋圆偏振涡旋光束和拓扑荷为 -4 的左旋圆偏振涡旋光束,其对应的干涉图像分别具有逆时针和顺时针的旋向特征。理论结果和实验测量结果的分布趋势基本吻合。

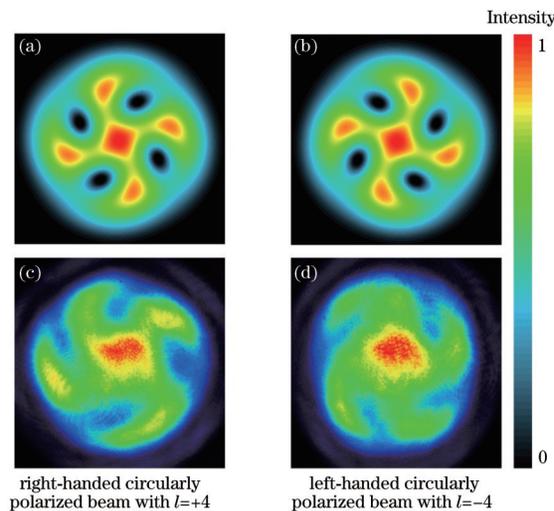


图 3 夹角为 0° 的非偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉图像。(a)(b)数值模拟的干涉图像;(c)(d)实验测得的干涉图像

Fig. 3 Interference patterns of non-polarized Gaussian beam and circularly polarized vortex beam with included angle of 0° .

(a)(b) Simulated interference patterns; (c)(d) measured interference patterns

图 4 和图 5 分别给出了非偏振高斯光束与右旋圆偏振涡旋光束和左旋圆偏振涡旋光束干涉光路之间存在一定夹角时的干涉图样。可以发现:当夹角为 $\pm 0.02^\circ$ 时,图 3 中中心对称的螺旋式分布就会出

现较大的形变,此时很难根据干涉图像强度的次极大数目来识别拓扑荷的具体信息;当夹角为 $\pm 0.04^\circ$ 时,图 3 中中心对称的螺旋分布特征基本丧失,无法得到拓扑荷的具体信息。因此,当非偏振的高斯光

束与圆偏振涡旋光束发生干涉时,拓扑荷的识别对参考光和信号光间的夹角比较敏感,即使两束光间

存在较小的夹角也会导致干涉图像所包含的拓扑荷特征丢失。

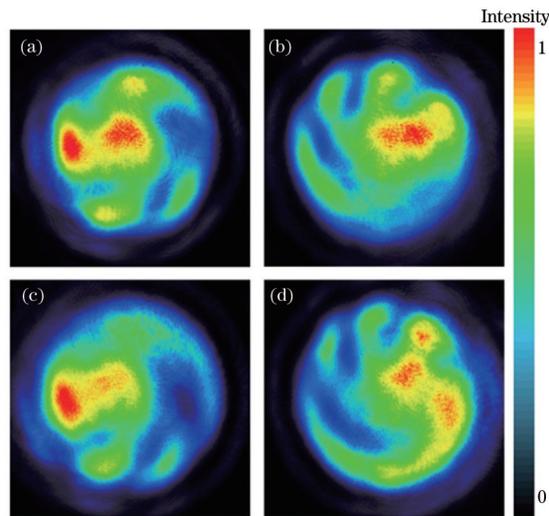


图 4 夹角不为 0° 的非偏振高斯光束与右旋圆偏振涡旋光束的实验干涉图像。(a) 夹角为 0.02° ; (b) 夹角为 -0.02° ; (c) 夹角为 0.04° ; (d) 夹角为 -0.04°

Fig. 4 Experimental interference patterns of non-polarized Gaussian beam and right-handed circularly polarized vortex beam with included angle not equal to 0° . (a) Included angle of 0.02° ; (b) included angle of -0.02° ; (c) included angle of 0.04° ; (d) included angle of -0.04°

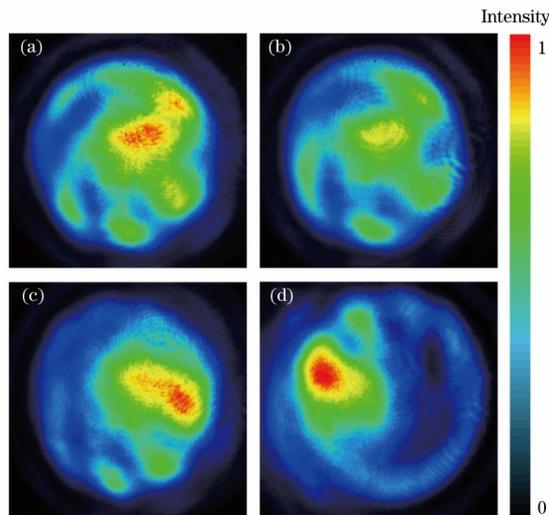


图 5 夹角不为 0° 的非偏振高斯光束与左旋圆偏振涡旋光束的实验干涉图像。(a) 夹角为 0.02° ; (b) 夹角为 -0.02° ; (c) 夹角为 0.04° ; (d) 夹角为 -0.04°

Fig. 5 Experimental interference patterns of non-polarized Gaussian beam and left-handed circularly polarized vortex beam with included angle not equal to 0° . (a) Included angle of 0.02° ; (b) included angle of -0.02° ; (c) included angle of 0.04° ; (d) included angle of -0.04°

3.4 线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束干涉

将图 1 中马赫-曾德尔干涉光路中的一束参考光设定为线偏振高斯光束、另一束信号光设定为线偏振涡旋光束。当两束光完全重合(夹角为 0°)时,数值模拟和实验测得的干涉图样如图 6 所示。干涉图像的形状类似于螺旋叶片状,光强的最大值并不在干涉条纹的中心位置,而是被分成了相对于图像中心呈中心对称的 4 个强度相等的极大值,其极大值的数量等于拓扑荷数。

图 7 给出了线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束干涉光路之间存在一定夹角时的干涉图样。可以发现:当夹角为 $\pm 0.02^\circ$ 时,干涉条纹虽然有所变形,但是还可以大体分辨出拓扑荷数量的特征;当夹角为 $\pm 0.04^\circ$ 时,干涉条纹会发生较为严重的变形,此时很难识别出拓扑荷的相关信息。因此,相比于 3.3 节中非偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉,线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束干涉的结果对光路角度的敏感性有所降低,这说明偏振态组合的优化能够减弱光路的某些

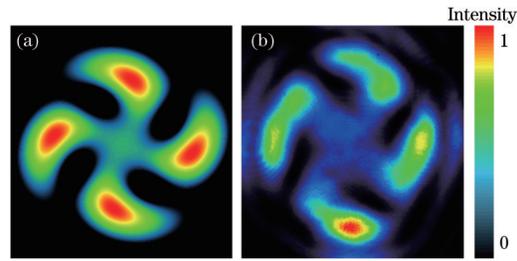


图 6 夹角为 0° 的线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束 ($l=-4$) 的干涉图像。(a) 数值模拟的干涉图像; (b) 实验测得的干涉图像
Fig. 6 Interference patterns of linearly polarized Gaussian beam and linearly polarized vortex beam polarized beam ($l=-4$) with included angle of 0° . (a) Simulated interference pattern; (b) measured interference pattern

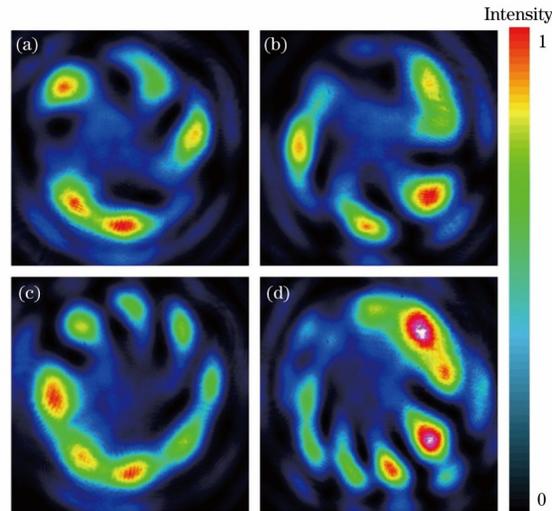


图 7 夹角不为 0° 的线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束的实验干涉图像。(a) 夹角为 0.02° ; (b) 夹角为 -0.02° ; (c) 夹角为 0.04° ; (d) 夹角为 -0.04°
Fig. 7 Experimental interference patterns of linearly polarized Gaussian beam and linearly polarized vortex beam with included angle not equal to 0° . (a) Included angle of 0.02° ; (b) included angle of -0.02° ; (c) included angle of 0.04° ; (d) included angle of -0.04°

非人为偏移对拓扑荷识别的影响。

3.5 线偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束干涉

将图 1 中马赫-曾德尔干涉光路中的一束参考光

设定为线偏振高斯光束、另一束信号光设定为圆偏振涡旋光束。当两束光完全重合(夹角为 0°)时,数值模拟和实验测得的干涉图样如图 8 所示。相关的干涉图

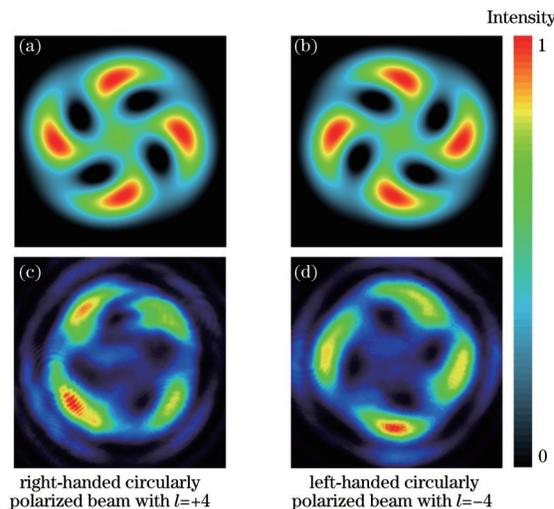


图 8 夹角为 0° 的线偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉图像。(a)(b) 数值模拟的干涉图像; (c)(d) 实验测得的干涉图像
Fig. 8 Interference patterns of linearly polarized Gaussian beam and circularly polarized vortex beam with included angle of 0° . (a)(b) Simulated interference patterns; (c)(d) measured interference patterns

像和线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束的干涉图像特征有些类似,但其螺旋叶片长度较大,且叶片间的开口较小。此时,光强极大值的个数等于拓扑荷数,干涉图像的逆时针和顺时针的旋向特征分别对应拓扑荷为+4的右旋圆偏振涡旋光束和拓扑荷为-4的左旋圆偏振涡旋光束。

图 9 和图 10 分别给出了线偏振高斯光束与右旋圆偏振涡旋光束和左旋圆偏振涡旋光束之间存在一定夹角时的干涉图样。相比于图 7 中两束线偏振光的干涉图像:当夹角为 $\pm 0.02^\circ$ 时,这种偏振组合的中心对称干涉图像的变形程度较小,即在这个角度下,可以通过

干涉图像对拓扑荷进行识别;当夹角增大为 $\pm 0.04^\circ$ 时,其干涉图像的形状变得难以分辨,虽然此时很难识别出拓扑荷的相关信息,但是仍可以发现其规则性比 3.3 节中的干涉图像有所改善。

3.6 圆偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束干涉

将图 1 中马赫-曾德尔干涉光路中的一束参考光设定为圆偏高斯光束、另一束信号光也设定为圆偏振涡旋光束。当两束光完全重合(夹角为 0°)时,数值模拟和实验测得的干涉图样如图 11 所示。干涉图像和线偏振高斯光束与线偏振涡旋光束的干涉图像特征相似,呈现较规则的螺旋叶片状,光强极大值的个数等于

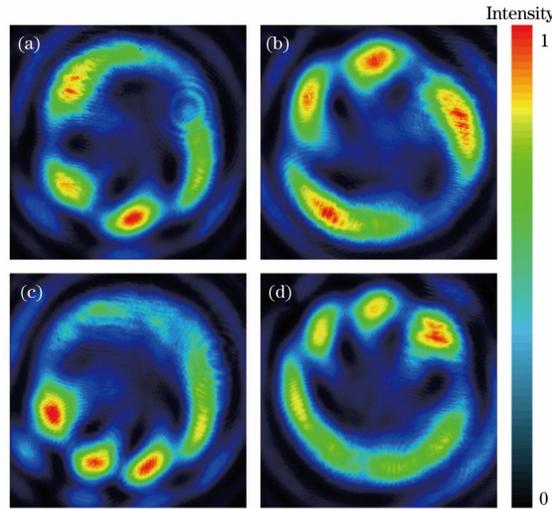


图 9 夹角不为 0° 的线偏振高斯光束与右旋圆偏振涡旋光束的实验干涉图像。(a)夹角为 0.02° ; (b)夹角为 -0.02° ; (c)夹角为 0.04° ; (d)夹角为 -0.04°

Fig. 9 Experimental interference patterns of linearly polarized Gaussian beam and right-handed circularly polarized vortex beam with included angle not equal to 0° . (a) Included angle of 0.02° ; (b) included angle of -0.02° ; (c) included angle of 0.04° ; (d) included angle of -0.04°

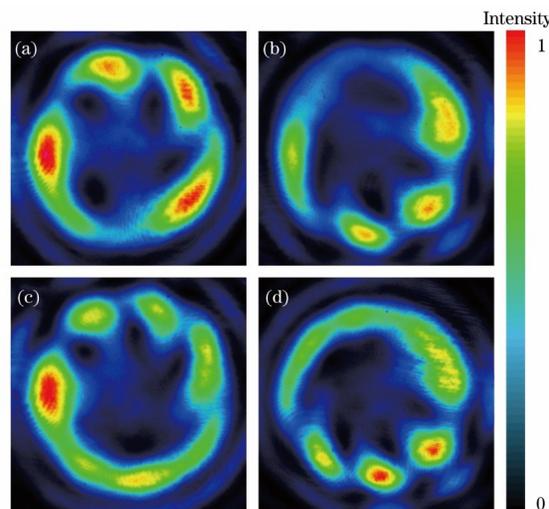


图 10 夹角不为 0° 的线偏振高斯光束与左旋圆偏振涡旋光束的实验干涉图像。(a)夹角为 0.02° ; (b)夹角为 -0.02° ; (c)夹角为 0.04° ; (d)夹角为 -0.04°

Fig. 10 Experimental interference patterns of linearly polarized Gaussian beam and left-handed circularly polarized vortex beam with included angle not equal to 0° . (a) Included angle of 0.02° ; (b) included angle of -0.02° ; (c) included angle of 0.04° ; (d) included angle of -0.04°

拓扑荷数,干涉图像的逆时针和顺时针的旋向特征分别对应拓扑荷为+4的右旋圆偏振涡旋光束和拓扑荷为-4的左旋圆偏振涡旋光束。

图 12 为右旋圆偏振高斯光束与右旋圆偏振涡旋光束之间存在一定夹角时的干涉图样。图 13 给出了左旋圆偏振高斯光束与左旋圆偏振涡旋光束之间存在

一定夹角时的干涉图样。可以发现:当夹角为 $\pm 0.02^\circ$ 时,相比于 3.4 节中的干涉图像,干涉图像的光强极大值个数和旋向特征更加明显;当夹角为 $\pm 0.04^\circ$ 时,干涉图像呈现的中心对称的螺旋强度分布特征并没有完全丧失,依然可以大体识别出光强极大值的个数或拓扑荷的相关信息。

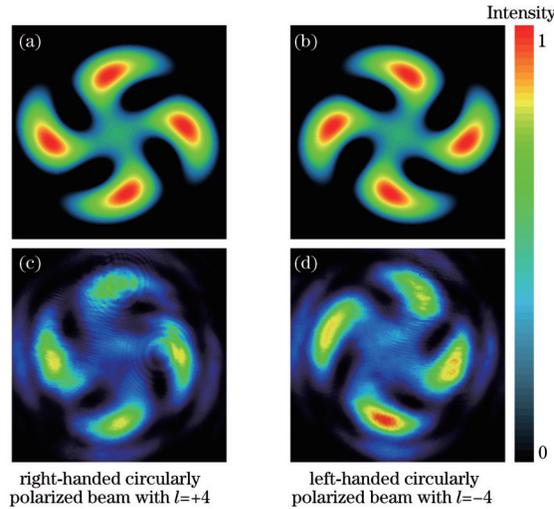


图 11 夹角为 0° 的圆偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉图像。(a)(b)数值模拟的干涉图像;(c)(d)实验测得的干涉图像
Fig. 11 Interference patterns of circularly polarized Gaussian beam and circularly polarized vortex beam with included angle of 0° .

(a)(b) Simulated interference patterns; (c)(d) measured interference patterns

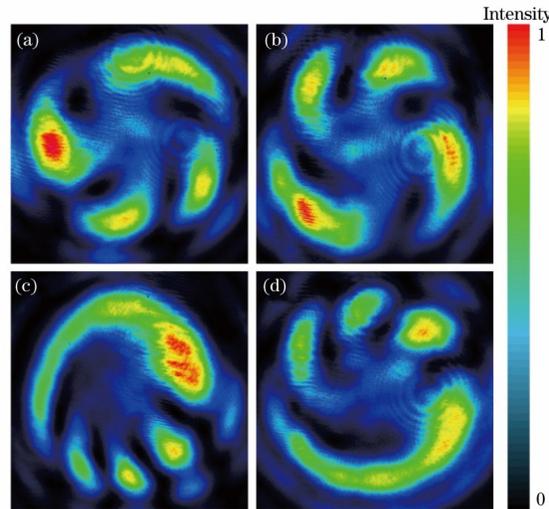


图 12 夹角不为 0° 的右旋圆偏振高斯光束与右旋圆偏振涡旋光束的实验干涉图像。(a)夹角为 0.02° ;(b)夹角为 -0.02° ;(c)夹角为 0.04° ;(d)夹角为 -0.04°

Fig. 12 Experimental interference patterns of right-handed circularly polarized Gaussian beam and right-handed circularly polarized vortex beam with included angle not equal to 0° . (a) Included angle of 0.02° ; (b) included angle of -0.02° ; (c) included angle of 0.04° ; (d) included angle of -0.04°

3.7 分析和讨论

理论和实验的结果表明:圆偏振态使得信号光和参考光之间的干涉结果对两束光之间的夹角具有最低的敏感性;使用圆偏振态的高斯光束与圆偏振态的涡旋光束干涉法能够最为直观且高效地识别涡旋光束中的拓扑荷。这意味着在实际应用中,干涉光路之间不需要严格对齐就可以对拓扑荷的信息进行简易且快速

的识别,进而可以提升识别过程的鲁棒性。此外,当使用传统干涉法识别拓扑荷时,需要根据干涉图样中叉形条纹的分叉数量和分叉方向来判明拓扑荷,在拓扑荷数较大的情况下,过密的条纹和测试中的扰动因素极易造成拓扑荷判断错误。相比而言,本文通过观察干涉条纹中的螺旋状叶片的个数与总体旋向来识别拓扑荷,具有直观、准确和高效的显著优点。

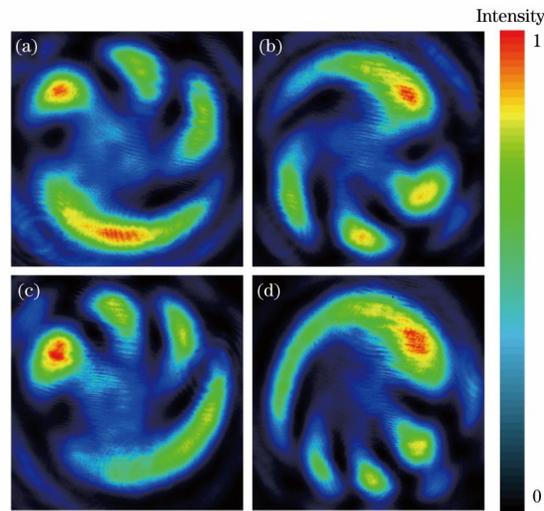


图 13 夹角不为 0° 的左旋圆偏振高斯光束与左旋圆偏振涡旋光束的实验干涉图像。(a) 夹角为 0.02° ; (b) 夹角为 -0.02° ; (c) 夹角为 0.04° ; (d) 夹角为 -0.04°

Fig. 13 Experimental interference patterns of left-handed circularly polarized Gaussian beam and left-handed circularly polarized vortex beam with included angle not equal to 0° . (a) Included angle of 0.02° ; (b) included angle of -0.02° ; (c) included angle of 0.04° ; (d) included angle of -0.04°

由于论文篇幅的限制,文中没有给出非偏振高斯光束与线偏振涡旋光束、圆偏振高斯光束与线偏振涡旋光束的干涉结果。实际上,两者均与 3.3 节中非偏振高斯光束与圆偏振涡旋光束的干涉结果相似,并不影响文章的结论。

4 结 论

将偏振态维度引入到拓扑荷的识别过程中,从数值模拟和实验验证两个方面探究了不同偏振态的组合对识别结果的影响。可以发现:在这些干涉图样中,拓扑荷数目确认的难易程度均不相同;不同偏振态的组合对干涉光路夹角的敏感性也不相同。在所选定的 4 个偏振态组合中,使用圆偏振高斯光对圆偏振涡旋光的拓扑荷识别最为直接、简易,且对马赫-曾德尔干涉仪中反射镜角度变化的敏感性也最低。理论模拟结果与实验数据较为吻合说明,在未来千米量级、高速、高容量的涡旋光通信中,所提的基于偏振干涉的拓扑荷识别法相比于常用的方法更加快速准确,从而可降低光通信系统的误码率,具有一定的实用价值和参考意义。

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] Simpson N B, Allen L, Padgett M J. Optical tweezers and optical spanners with Laguerre-Gaussian modes[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(12): 2485-2491.
- [3] Simpson N B, Dholakia K, Allen L, et al. Mechanical equivalence of spin and optical spanner[J]. *Physical Review Letter*, 2014, 113(26): 263901.
- [4] Jesacher A, Fürhapter S, Bernet S, et al. Size selective trapping with optical "cogwheel" tweezers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(17): 4129-4135.
- [5] Simpson N B, McGloin D, Dholakia K, et al. Optical tweezers with increased axial trapping efficiency[J]. *Journal of Modern Optics*, 1998, 45(9): 1943-1949.
- [6] Tao S H, Yuan X C, Lin J, et al. Influence of geometric shape of optically trapped particles on the optical rotation induced by vortex beams[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(4): 043105.
- [7] Xie X S, Chen Y Z, Yang K, et al. Harnessing the point-spread function for high-resolution far-field optical microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(26): 263901.
- [8] Tong Z S, Korotkova O. Beyond the classical Rayleigh limit with twisted light[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2595-2597.
- [9] Li L L, Li F. Beating the Rayleigh limit: orbital-angular-momentum-based super-resolution diffraction tomography [J]. *Physical Review E*, 2013, 88(3): 033205.
- [10] Lin J, Yuan X C, Tao S H, et al. Multiplexing free-space optical signals using superimposed collinear orbital angular momentum states[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(21): 4680-4685.
- [11] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [12] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [13] Yue Y, Huang H, Ahmed N, et al. Reconfigurable switching of orbital-angular-momentum-based free-space data channels[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5118-5121.

- [14] 马志远, 陈康, 张明明, 等. 拉盖尔-高斯幂指数相位涡旋光束传输特性[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0526001.
Ma Z Y, Chen K, Zhang M M, et al. Propagation characteristics of Laguerre-Gaussian power-exponent-phase-vortex beams[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0526001.
- [15] Chen K, Ma Z Y, Zhang M M, et al. The tight-focusing properties of radially polarized symmetrical power-exponent-phase vortex beam[J]. Journal of Optics, 2022, 24(5): 055602.
- [16] Berkhout G C G, Beijersbergen M W. Method for probing the orbital angular momentum of optical vortices in electromagnetic waves from astronomical objects[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(10): 100801.
- [17] Mazilu M, Mourka A, Vettenburg T, et al. Simultaneous determination of the constituent azimuthal and radial mode indices for light fields possessing orbital angular momentum[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(23): 231115.
- [18] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(25): 257901.
- [19] Ferreira Q S, Jesus-Silva A J, Fonseca E J S, et al. Fraunhofer diffraction of light with orbital angular momentum by a slit[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3106-3108.
- [20] D'Errico A, D'Amelio R, Piccirillo B, et al. Measuring the complex orbital angular momentum spectrum and spatial mode decomposition of structured light beams[J]. Optica, 2017, 4(11): 1350-1357.
- [21] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. Nature, 2001, 412(6844): 313-316.
- [22] Kaiser T, Flamm D, Schröter S, et al. Complete modal decomposition for optical fibers using CGH-based correlation filters[J]. Optics Express, 2009, 17(11): 9347-9356.
- [23] Malik M, Mirhosseini M, Lavery M P J, et al. Direct measurement of a 27-dimensional orbital-angular-momentum state vector[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3115.
- [24] Vasnetsov M V, Torres J P, Petrov D V, et al. Observation of the orbital angular momentum spectrum of a light beam[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2285-2287.
- [25] Courtial J, Robertson D A, Dholakia K, et al. Rotational frequency shift of a light beam[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(22): 4828-4830.
- [26] Lavery M P J, Dudley A, Forbes A, et al. Robust interferometer for the routing of light beams carrying orbital angular momentum[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(9): 093014.
- [27] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z M, et al. Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2781.
- [28] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, et al. Efficient sorting of orbital angular momentum states of light[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(15): 153601.
- [29] Gruneisen M T, Dymale R C, Stoltenberg K E, et al. Optical vortex discrimination with a transmission volume hologram[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(8): 083030.
- [30] 柯熙政, 谌娟, 吕宏. 涡旋光束的轨道角动量双缝干涉实验研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42(10): 996-1002.
Ke X Z, Chen J, Lü H. Study of double-slit interference experiment on the orbital angular momentum of LG beam [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2012, 42(10): 996-1002.
- [31] Zhou H L, Shi L, Zhang X L, et al. Dynamic interferometry measurement of orbital angular momentum of light[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 6058-6061.
- [32] Zheng S, Wang J. Measuring orbital angular momentum (OAM) states of vortex beams with annular gratings[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40781.
- [33] Jiang X H, Wang A T, Yao J N, et al. Measuring high-order multiple vortex beams with fork-shaped grating[J]. Optik, 2022, 257: 168742.
- [34] Doster T, Watnik A T. Machine learning approach to OAM beam demultiplexing via convolutional neural networks[J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3386-3396.
- [35] Cao F L, Pu T C, Xie C Q. Superposition of two fractional optical vortices and the orbital angular momentum measurement by a deep-learning method[J]. Applied Optics, 2021, 60(36): 11134-11143.
- [36] 叶玉儿, 李军依, 曹萌, 等. 双模式涡旋光束的轨道角动量的精确识别[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811021.
Ye Y E, Li J Y, Cao M, et al. Accuracy recognition of orbital angular momentum of dual-mode vortex beams[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811021.
- [37] 步敬, 张莉超, 豆秀婕, 等. 任意拓扑荷光学旋涡的产生及应用[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0634001.
Bu J, Zhang L C, Dou X J, et al. Generation and application of optical vortices with arbitrary topological charges[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 0634001.

约稿专家简介:



王澍(1966—), 博士, 教授/博士生导师, 研究员。1986年毕业于浙江大学光学仪器工程学系并获工学学士学位, 1991年毕业于合肥工业大学并获理学硕士学位, 1997年于日本东北大学毕业并获工学博士学位。毕业后, 留校担任助理教授(日本国文部省教官)。随后, 加盟理光集团的若干主干研究所、在HPK中央研究所中担任研究员, 并担任日本最大的自然科学研究机构—日本国立研究开发法人理化研究所的兼职研究员。目前在西南技术物理研究所任职。担任中国仪器仪表学会光机电技术与系统集成分会理事, 中国光学学会激光加工专业委员会、中国光学学会光电技术专业委员会和中国光学工程学会激光技术及应用专业委员会委员。担任《激光技术》主编、*International Journal of Optics and Applications* 和 *Scientific & Academic Publishing (SAP)* 编委, 以及《激光制造商情》常务编委。研究领域涉及多种新型激光器和工业应用的理论和实践, 包括激光动力学、分子与原子物理、固体激光、半导体激光、气体激光、图像处理、精细激光加工、特殊波导技术与光电技术, 以及激光生物医学等。在核心学术期刊和重要国际学术会议上发表论文超过 200 余篇, 在中美欧日举办的重要学术会议上作特邀报告和主旨演讲约 120 次。共申请中国、美国、日本与欧洲联盟专利 40 余项。E-mail: youwang_2007@aliyun.com。