

环形渐变型光栅用于涡旋光束拓扑荷数测量的研究

邹文康^{1,2}, 杨春勇^{1,2*}, 侯金^{1,2}, 龙浩^{1,2}, 陈少平^{1,2}

¹中南民族大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

²中南民族大学智能无线通信湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 涡旋光的拓扑荷数测量是涡旋光应用不可或缺的关键技术。将周期渐变型光栅的渐变性与环形光栅的完全对称性相结合,对环形光栅的结构附加周期渐变性并进行优化,研制了一种用于涡旋光束高阶拓扑荷数测量的新型环形渐变型光栅。经过数值模拟与实验测试,涡旋光束准直投射至环形渐变光栅形成远场衍射图案,其变化规律精准地对应涡旋光束轨道角动量状态。实验测量拓扑荷数达 ± 30 。该研究为涡旋光束的测量应用提供了新方法。

关键词 光栅; 轨道角动量; 涡旋光束; 空间光调制器

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.140501

Measurement of Topological Charges for Vortex Beams using Gradually-Changing-Period Annular Gratings

Zou Wenkang^{1,2}, Yang Chunyong^{1,2*}, Hou Jin^{1,2}, Long Hao^{1,2}, Chen Shaoping^{1,2}

¹ College of Electronic and Information Engineering, South-Central University for Nationalities,

Wuhan, Hubei 430074, China;

² Hubei Provincial Key Laboratory of Intelligent Wireless Communications, South-Central University for Nationalities,

Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Measurement of topological charges (TC) for vortex beams is a key technology for the practical application of vortex beams. Herein, combining the gradual change of the gradually-changing-period grating with the complete symmetry of the annular grating, a new type of gradually-changing-period annular grating for measuring higher-order TC of vortex beams is developed by optimizing the structure of the ring grating with an additional periodic gradient. Numerical and experimental results demonstrate that a far-field diffraction pattern is formed by collimating the vortex beam onto the ring grating. The results demonstrate that the variation of the patterns accurately corresponds to the orbital angular momentum states of the vortex beams. Consequently, the number of TCs measured in the experiment is ± 30 . It provides a new measurement method for vortex beams.

Key words grating; orbital angular momentum; vortex beams; space light modulator

OCIS codes 050.1950; 080.4865; 270.5585

1 引言

轨道角动量(OAM)光束,也称为涡旋光束,具有螺旋相位波前和圆环状强度分布特点^[1],携带有相位因子 $\exp(il\theta)$,其中: θ 为方向角; l 为涡旋光束的拓扑荷数,也称为 OAM 模式状态^[2]。理论上,

OAM 模式可以任意改变,且其不同模式在空间上彼此正交,根据这个特点,人们提出了许多有关涡旋光束的潜在应用,如光学操纵^[3]、光学镊子^[4-5]、量子信息技术^[6-7] 和光通信^[8-9] 等。然而,OAM 模式测量是这些应用不可或缺的关键技术,因此关于涡旋光束的模式测量备受关注。

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-01-18; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAD29B01)、湖北省自然科学基金科技支撑计划项目(2015BCE048)、湖北省自然科学基金重点项目(2014CFA051)、中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(CZP17026)

* E-mail: cyyang@mail.scuec.edu.cn

近年来,关于涡旋光束模式测量的研究取得了较快进展。如三角孔测量^[10]、单缝测量^[11]、双缝干涉测量^[12]、动态干涉测量^[13-16]、周期渐变光栅测量^[17]等。这些方法大致可分为两类,即干涉测量法^[10-16]和衍射测量法^[17-23]。较常见的干涉测量法基于 Mach-Zehnder 干涉仪^[14-15]测量涡旋光束模式的状态,其原理是根据直接观察的双光束干涉图案获得涡旋光束模式,但其用于高阶模式测量时效果不佳。随后,有人提出一种改进的 Mach-Zehnder 干涉仪^[16],用于高阶 OAM 模式测量,虽然可测拓扑荷数为 90,但这种测量方法不能辨识涡旋光束拓扑荷数的正负。于是,研究人员又提出了能精准辨识且较为方便的衍射测量法,即使用倾斜凸透镜^[20],通过计数衍射斑点进行模式测量。然而该透镜结构特殊,不便于切换,无扩展性且存在测量像差。最近,文献^[17]中设计了一种周期渐变光栅,实现了 OAM 光束的模式测量,但由于受工艺制作及其线性结构等限制,高阶模式衍射图案较为模糊,难以辨识。而文献^[21]中用实验证明了一种用于产生贝塞尔高斯光束的环形结构光栅,在用

于测量高阶 OAM 模式时,其表现出较为明显的辨识效果,测量拓扑荷数达到 ± 25 ,但这种光栅的环形结构难以进行精细调节。

为了兼顾光栅的灵活调整与 OAM 高阶模式的测量,本文将周期渐变光栅与环形光栅的特点相结合,先推导出环形渐变型光栅的结构函数,再利用所设计的环形渐变光栅构建了涡旋光束模式的测量方法;最后,通过仿真和实验证实环形渐变光栅测量方法能有效且准确地获得涡旋光束的 OAM 模式。

2 理论基础

环形渐变光栅用于 OAM 模式测量的原理如图 1 所示,测量分两个步骤进行。第一步是利用叉形光栅(fork grating)产生涡旋光束。其中,叉形光栅图样由涡旋光束的相位与平面波函数复用产生。第二步是将涡旋光束准直射射至经特殊设计的环形渐变光栅。涡旋光束经过这种特殊光栅(special grating)后的远场衍射图案表现为条纹间隔,这一间隔特征与涡旋光束的模式数相对应。

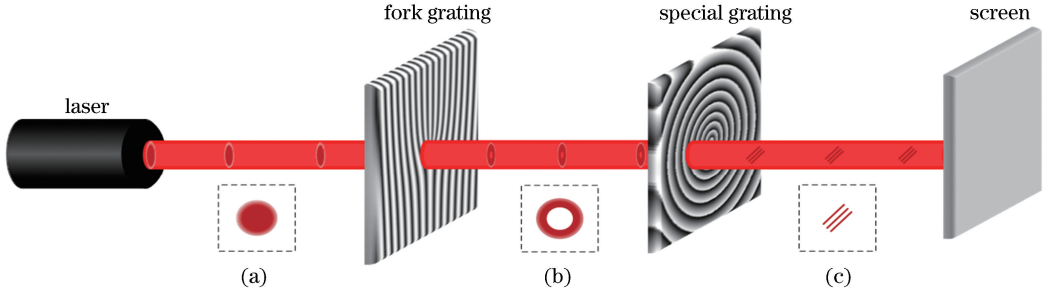


图 1 涡旋光束模式测量原理示意图。(a) 高斯光束;(b) 涡旋光束;(c) 衍射图样

Fig. 1 Principle diagram of mode measuring for vortex beam. (a) Gaussian beam; (b) vortex beam; (c) diffraction pattern

关于光栅的设计,一般需要设计光栅构造函数。下文所需的振幅型与相位型环形渐变型光栅的构造函数依次表示为

$$t_1(r) = \begin{cases} 1, & \cos[2\pi r/(T + nr)] \geq 0 \\ 0, & \cos[2\pi r/(T + nr)] < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$t_2(r) = \exp[i2\pi r/(T + nr)], \quad (2)$$

式中: T 为光栅周期;径向坐标 $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$, (ξ, η) 为光栅坐标; n 为光栅周期变化速度,即渐变因子。环形渐变型光栅结构如图 2 所示,其中: d 为光栅和涡旋光束之间的中心距离。

从(1)式和(2)式可以看出,光栅的结构取决于 r 、 T 和 n 这 3 个参数,它们的取值对测量涡旋光束模式较为关键。

涡旋光束作为入射光准直射到环形渐变型光栅后,其远场衍射图案的光强表达式^[24]为

$$U(x, y) = \left| \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \times \exp\left[i\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{F}[u(\xi, \eta) \times t(\xi, \eta)] \right|^2, \quad (3)$$

式中: $u(\xi, \eta)$ 为入射光束光场,即涡旋光束的复振幅函数; $t(\xi, \eta)$ 为光栅结构函数; (x, y) 为远场坐标; z 为传输距离; λ 为光波长; k 为波数; $\mathcal{F}(\cdot)$ 为傅里叶变换。

本文选定拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束为入射涡旋光,则(3)式中 $u(\xi, \eta)$ 在传播距离为 z 时的光场复振幅表达式为

$$u(r, \theta, z) = \left(\sqrt{2} \frac{r}{w}\right)^l L_p^l\left(2 \frac{r^2}{w^2}\right) \exp(il\theta) \times \exp\left(-\frac{r^2}{w^2} - ikz\right), \quad (4)$$

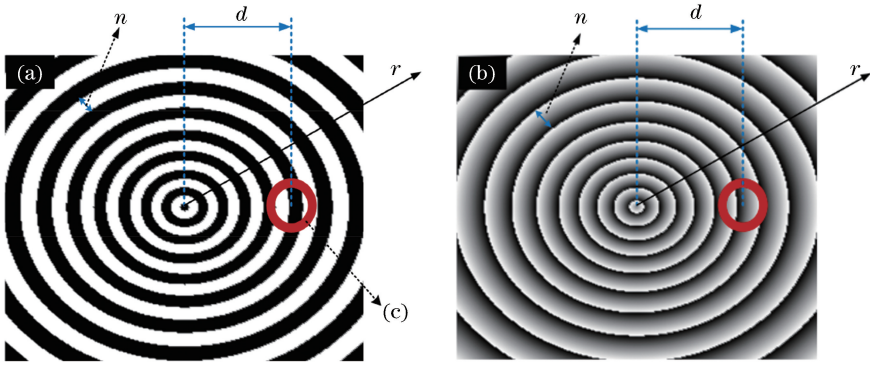


图2 环形渐变型光栅结构图样。(a)环形渐变型幅度光栅;(b)环形渐变型相位光栅;(c)涡旋光束

Fig. 2 Structural patterns of gradually-changing-period gratings. (a) Grating with gradually-changing-period amplitude; (b) grating with gradually-changing-period phase; (c) vortex beams

式中: w 为光束束腰半径; $L_p^l(\cdot)$ 为缔结拉盖尔多项式, p 为径向指数, l 为拓扑荷数。当 $p=0$ 时, $L_p^l(\cdot)=1$ 。

为了清晰直观地观察环形渐变型光栅对涡旋光束 OAM 模式测量的效果,关于涡旋光束与环形渐变型光栅之间的参数将在实验中设定。

3 数值模拟及实验

3.1 仿真结果

基于上述(3)式,使用快速傅里叶变换(FFT)实现涡旋光束的远场衍射。设定携带拓扑荷数 $l=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$ 的涡旋光束作为入射光束,将其准直投射至环形渐变型光栅。在数值仿真中,以高斯光束作为入射光束,其束腰半径被设置为 5 mm,基于文献[17,25],可知涡旋光束的束腰半径为 $5 \times \sqrt{|l+1|}$ 。参数 T 为光栅的周期数,值为 1.2 mm。光栅的渐变参数 n 体现对光栅结构的精细调控,为清晰地观察衍射图样,将 n 设置为 8 mm。值得注意的是,由于涡旋光束与环形渐变型光栅都有环形结构特点,为能达到较为理想的衍射效果,当光束在准直投射至环形渐变光栅时,不宜将光束对准光栅环心,一般设置准直参数 d 为 3 cm。基于以上给定的光栅结构参数值,涡旋光束模式测量的仿真结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,涡旋光束模式测量的衍射图样中包含 2 个重要的信息:一是涡旋光束的拓扑荷数;二是涡旋光束拓扑荷数的正负符号。通过观察图 3(a)可以发现,涡旋光束的一级衍射图样的偏角方向决定了涡旋光束拓扑荷数的正负符号,当负一级衍射图样与 x 轴偏角度数大于 90° 时,涡旋光束的拓扑荷数为正;当负一级衍射图样与 x 轴偏角度数小于 90° 时,涡旋光束的拓扑荷数为负。通过

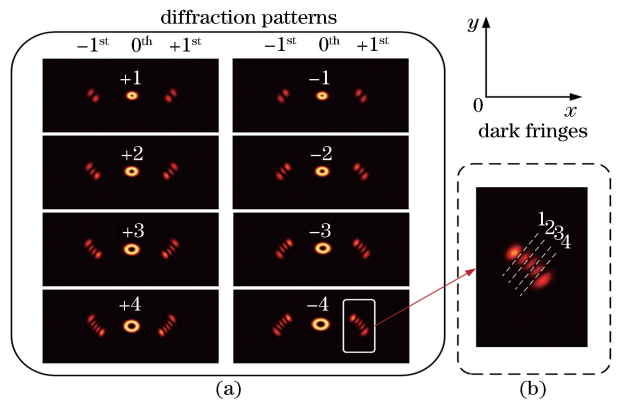


图3 涡旋光束模式测量的仿真图样。(a)振幅型光栅测量涡旋光束衍射结果,其中 $l=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$; (b)局部放大的衍射图案

Fig. 3 Simulation patterns of mode measuring for vortex beams. (a) Diffraction results of vortex beam measurement with amplitude grating when $l = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$; (b) partially magnified diffraction pattern

观察图 3(b)可以发现,涡旋光束的拓扑荷数与光斑条纹数存在一一对应关系,涡旋光束的拓扑荷数等于一级衍射图样中亮条纹数减一或是等于暗条纹的个数。因此,图 3 中(a)和(b)所呈现的规律关系可以证实使用环形渐变型光栅可以实现对涡旋光束的模式测量。文献[21]中已证实相位型光栅对涡旋光束的衍射效率高于幅度型光栅,为能更加清晰地观察这种特殊光栅对高阶涡旋光束的模式测量效果,选用相位型光栅对携带拓扑荷数 $l=\pm 10, \pm 20, \pm 30$ 的涡旋光束进行衍射仿真,其模式测量的衍射图样如图 4 所示,从中可以发现该光栅对高阶涡旋光束的模式测量也有着较为理想的效果。

3.2 实验方案与效果

依据涡旋光束远场衍射理论模型,设计实验方

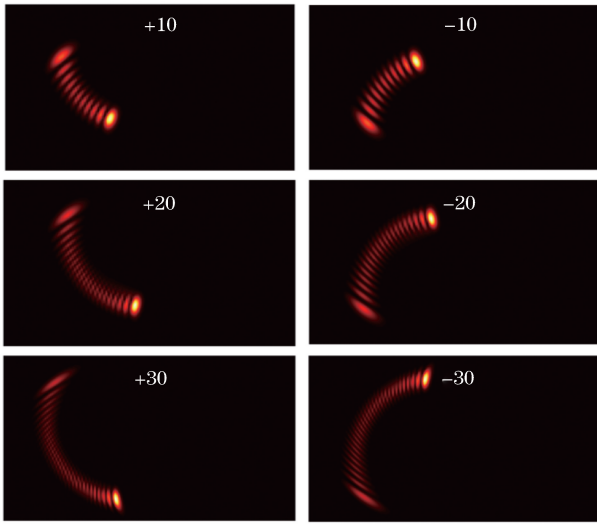


图 4 相位型光栅用于涡旋光束模式测量的仿真结果，其拓扑荷数 $l = \pm 10, \pm 20, \pm 30$

Fig. 4 Diffraction results of vortex beam measurement with phase grating when $l = \pm 10, \pm 20, \pm 30$

案如图 5 所示。实验中所用激光器输出光束波长为 1550 nm, 光束经过焦距为 30 mm 和 60 mm 的傅里叶透镜组所构成的准直扩束系统(BE), 再通过偏振片(P)后滤除垂直偏振光, 将获得的水平偏振光投射到加载了螺旋相位图的空间光调制器 SLM1 上, 对光束光场进行重构, 经过小孔(A)滤波得到涡旋光束; 分束器(BS)将涡旋光分为两路光束, 其中一路光束经过傅里叶透镜(L2)聚焦到 CCD1(CCD 相

机, 即电荷耦合器件), 实现涡旋光的动态观测, 另一路光束投射至加载了环形渐变光栅图样的 SLM2, 经傅里叶透镜将衍射光图样聚焦成像至 CCD2, 最终实现对涡旋光的模式测量。

图 6 展示了仿真产生涡旋光束图样与实验产生涡旋光束图样的结果对比。仿真和实验均选用拓扑荷数 $l = +1, -2, -3, +8$ 的涡旋光束。可以看出, 实验结果与仿真结果相吻合, 两者的图样都服从普通涡旋光束的特性规律, 光场强度分布均呈环形, 且随着拓扑荷数值的增大, 涡旋光束的束腰半径增大。为了进一步验证该环形光束为涡旋光, 继续测量该光束的 OAM 模式状态, 观察其衍射图样的规律是否与仿真中所呈现的规律相吻合。图 7 为测量所得拓扑荷数 $l = +1, -2, -3, +8$ 的涡旋光束模式衍射图样。可以看出: 仿真与实验得到的涡旋光束衍射图样规律仍然相吻合, 规律如下: 其拓扑荷数的数值为衍射图样中暗条纹的数目, 或是等于亮条纹数目减一; 若其衍射图样与 x 轴偏角度数大于 90° 时, 其拓扑荷数取正, 若衍射图样与 x 轴偏角度数小于 90° 时, 其拓扑荷数取负。为验证环形渐变型光栅对高阶涡旋光束的模式测量效果, 图 8 展示了拓扑荷数 $l = +16, +20, +30$ 的涡旋光束的模式测量实验结果。可以看出, 环形渐变型光栅测量高阶涡旋光束模式的效果较理想。

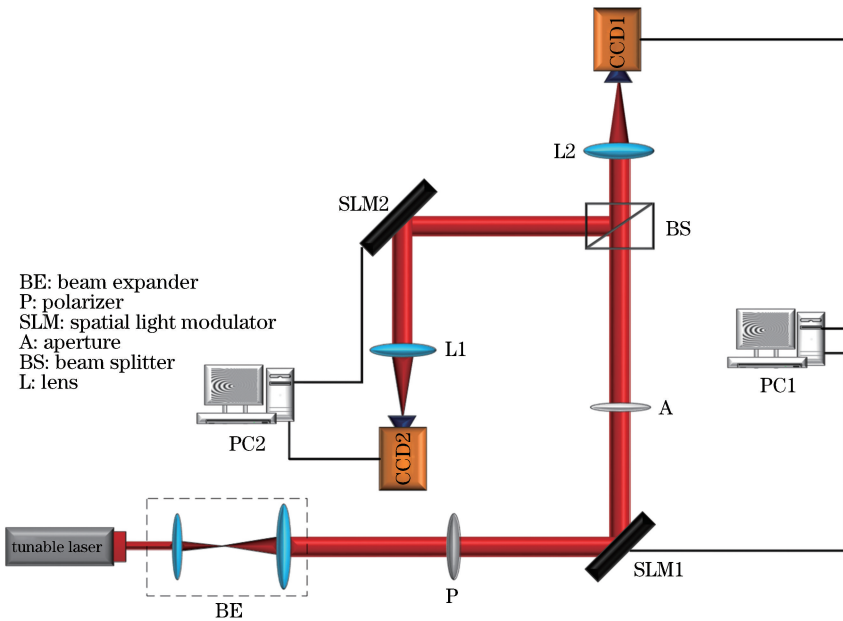


图 5 涡旋光束的产生与模式测量实验链路图

Fig. 5 Experimental link diagram of generation and mode measurement of vortex beam

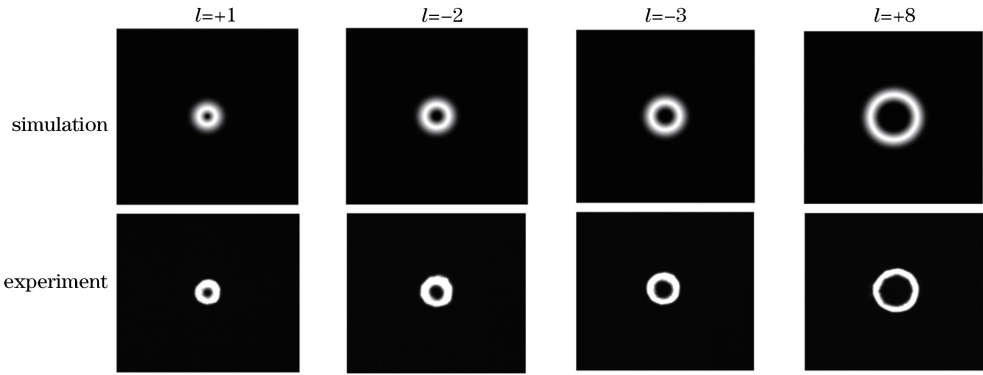


图 6 涡旋光束产生的仿真与实验结果,其拓扑荷数 $l = +1, -2, -3, +8$

Fig. 6 Simulation and experimental results of vortex beam generation when $l = +1, -2, -3, +8$

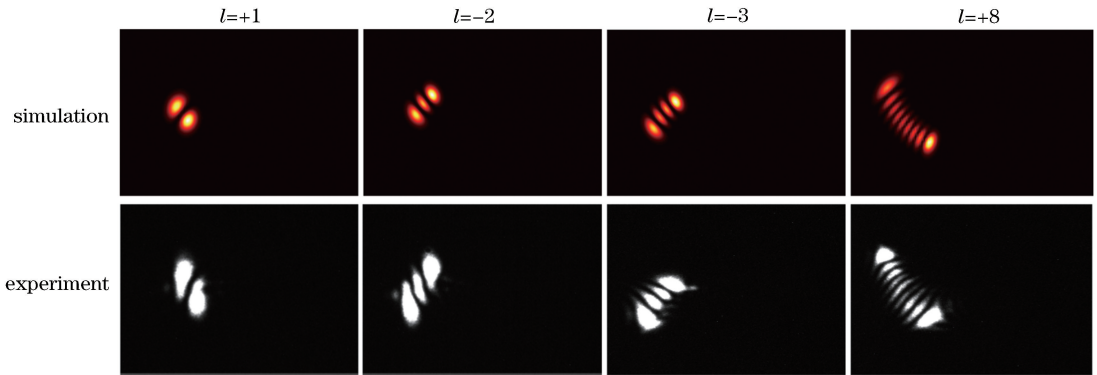


图 7 相位型光栅对涡旋光束模式测量的衍射仿真与实验结果,其拓扑荷数 $l = +1, -2, -3, +8$

Fig. 7 Simulation and experimental results of mode measurement for vortex beams using phase grating when $l = +1, -2, -3, +8$

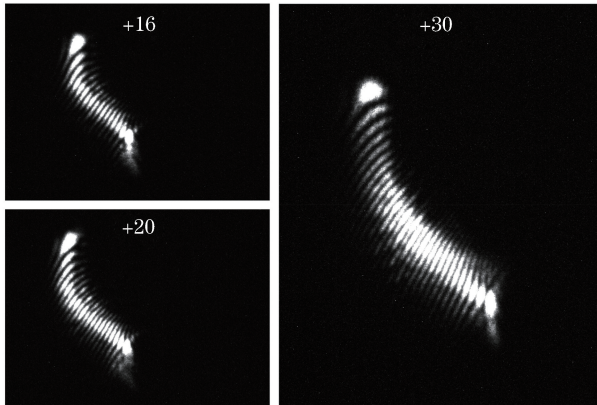


图 8 相位型光栅对高阶涡旋光束模式测量的衍射实验结果,其拓扑荷数 $l = +16, +20, +30$

Fig. 8 Diffraction experimental results of mode measurement for vortex beam using phase grating when $l = +16, +20, +30$

4 结 论

依据涡旋光束远场衍射理论模型分析涡旋光束与环渐变型光栅的衍射结果,比较不同模式涡旋光束的衍射图样,研究发现涡旋光束的拓扑荷数与

衍射图样中的暗条纹数相同,且衍射图样中条纹的方向决定了涡旋光束拓扑荷数的正负。利用创新设计的环形渐变型光栅,基于空间光调制器搭建了一个涡旋光束轨道角动量模式测量实验平台,实现了对高阶涡旋光束的模式测量。实验结果表明本文设计的环形渐变型光栅对涡旋光束模式的检测效果较优,而且体现出多样性、精确性、可控性和易操作性等优点。该项研究对涡旋光的检测、复用等技术的发展具有重要意义,在涡旋光通信领域有着较为广阔的应用前景。

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] Yang C Y, Xu C, Ni W J, *et al.* Turbulence heterodyne coherent mitigation of orbital angular momentum multiplexing in a free space optical link by auxiliary light[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25612-25624.

- [3] Ruffato G, Massari M, Romanato F. Diffractive optics for combined spatial- and mode- division demultiplexing of optical vortices: design, fabrication and optical characterization [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24760.
- [4] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, *et al.* Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(23): 231110.
- [5] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [6] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, *et al.* Quantum storage of orbital angular momentum entanglement in an atomic ensemble [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(5): 050502.
- [7] Liu J P, Min C J, Lei T, *et al.* Generation and detection of broadband multi-channel orbital angular momentum by micrometer-scale meta-reflectarray [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 212-218.
- [8] Huang H, Ren Y X, Yan Y, *et al.* Performance analysis of spectrally efficient free-space data link using spatially multiplexed orbital angular momentum beams [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8647: 864706.
- [9] 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.
- [10] Hickmann J M, Fonseca E J S, Soares W C, *et al.* Unveiling a truncated optical lattice associated with a triangular aperture using light's orbital angular momentum [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(5): 053904.
- [11] Wang T, Pu J X. Theoretical and experimental study on vortex beam transmitted through a single-slit [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2902-2907.
王涛, 蒲继雄. 涡旋光束单缝衍射的理论和实验研究 [J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2902-2907.
- [12] Chen Z Y, Zhang G W, Rao L Z, *et al.* Determining the orbital angular momentum of vortex beam by Young's double-slit interference experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1063-1067.
陈子阳, 张国文, 饶连周, 等. 杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束的轨道角动量 [J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1063-1067.
- [13] Fu D Z, Chen D X, Liu R F, *et al.* Probing the topological charge of a vortex beam with dynamic angular double slits [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 788-791.
- [14] Li X Z, Tai Y P, Lü F, *et al.* Measuring the fractional topological charge of LG beams by using interference intensity analysis [J]. *Optics Communications*, 2015, 334: 235-239.
- [15] Ke X Z, Xu J Y. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0905003.
柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0905003.
- [16] Lü F, Li X Z, Tai Y P, *et al.* High-order topological charges measurement of LG vortex beams with a modified Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4378-4381.
- [17] Dai K J, Gao C Q, Zhong L, *et al.* Measuring OAM states of light beams with gradually-changing-period gratings [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 562-565.
- [18] Guo C S, Lu L L, Wang H T. Characterizing topological charge of optical vortices by using an annular aperture [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3686-3688.
- [19] Guo C S, Yue S J, Wei G X. Measuring the orbital angular momentum of optical vortices using a multipinhole plate [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23): 231104.
- [20] Vaity 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.
- [21] Zheng S, Wang J. Measuring orbital angular momentum (OAM) states of vortex beams with annular gratings [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40781.
- [22] Gao H, Han Y H, Li Y, *et al.* Topological charge measurement of concentric OAM states using the phase-shift method [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(1): A40-A44.
- [23] Ke X Z, Xie Y C, Zhang Y. Orbital angular momentum measurement of vortex beam and its performance improvement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126017.
柯熙政, 谢炎辰, 张颖. 涡旋光束轨道角动量检测及其性能改善 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126017.
- [24] Zhou J, Zhang W H, Chen L X. Experimental detection of high-order or fractional orbital angular momentum of light based on a robust mode converter [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(11): 111108.
- [25] Padgett M J, Miatto F M, Lavery M P J, *et al.* Divergence of an orbital-angular-momentum-carrying beam upon propagation [J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(2): 023011.