

多通螺旋相位板的涡旋光拓扑荷数 4 重加倍

王琛, 刘通, 邵琼玲, 任元, 苗继松

(中国人民解放军战略支援部队航天工程大学 宇航科学与技术系, 北京 101416)

摘要: 为了制备大拓扑荷数涡旋光, 对基于螺旋相位板多通的拓扑荷数 4 重加倍进行了理论分析、仿真模拟和实验验证。根据菲涅耳衍射积分定理, 推导了基于螺旋相位板多通的涡旋光拓扑荷数加倍原理。设计了 4 重加倍装置, 建立了相应模型并模拟了拓扑荷数 4 重加倍后的涡旋光强分布。绘制了相对强度、光束半径随距离变化曲线, 得到了加倍过程中半径和强度不会发生突变的结论。最后, 使用该装置成功制备了拓扑荷数为 4、8、12、16 的涡旋光束并对该实验中高阶涡旋光质量较差的原因进行了分析。

关键词: 涡旋光; 螺旋相位板; 拓扑荷数; 偏振; 菲涅耳衍射

中图分类号: O435; O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0918008

Quadrupling topological charges of vortex using multi-passed spiral phase plate

Wang Chen, Liu Tong, Shao Qiongling, Ren Yuan, Miao Jisong

(Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, PLA Strategic Support Force, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to generate optical vortex with high topological charges, theoretical analysis, simulations and experimental demonstration of quadrupling topological charges of vortex based on spiral phase plate were presented. According to Fresnel diffraction integral, theory of quadrupling topological charges was analyzed. Setup of quadrupling topological charges based on one spiral phase plate was designed, then mathematical model was built and relative intensity of vortex after quadrupling was simulated. Simulated graphs of relative intensity and optical radius were plotted, the radius and intensity were smoothly changed during the quadrupling. Finally, vortices with topological charges 4, 8, 12, 16 were generated and the reason why vortices with high topological charges generated by quadrupling were of poor quality was analyzed.

Key words: optical vortex; spiral phase plate; topological charge; polarization; Fresnel diffraction

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(11772001); 国家 863 计划(2015AA8018038C)

作者简介: 王琛(1993-), 男, 硕士生, 主要从事涡旋光制备方面的研究。Email: kraus_chen@foxmail.com

导师简介: 任元(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事航天器制导与控制、空间量子探测及其应用技术方面的研究。

Email: renyuan_823@aliyun.com

0 引言

涡旋光是一种具有中空暗核, 携带轨道角动量的特殊光场。涡旋光表达式中的角相位因子 $\exp(i l \theta)$ 表征了涡旋光的螺旋相位分布, 其中 l 为拓扑荷数, θ 为方位角。自 1992 年荷兰莱顿大学的 Allen 等人发现了涡旋光携带轨道角动量以来, 许多科学家围绕涡旋光展开了研究^[1-2]。如今, 涡旋光已在多个领域有重要应用, 如量子通信技术^[3]、光学粒子操控^[4]、光学测量^[5]、光学成像^[6]等。

螺旋相位板(SPP)是制备涡旋光的一种常用光学衍射元件。1994 年, Berjersbergen 等人采用 SPP 将一束 TM_{00} 高斯光束变为了一束具有螺旋相位分布的涡旋光束^[7]。1996 年, Turnbull 等人采用 SPP 实现了毫米波段的厄米特-高斯模式向拉盖尔-高斯模式的转变^[8]。近年来, 众多科学家围绕 SPP 展开了各项研究, 2017 年, 辛璟焘等人结合萨格纳克干涉仪与螺旋相位板制备了矢量光束^[9], 2018 年, C. L. Zhang 等人利用螺旋相位片-波带片制备了长焦深涡旋光束^[10]。此外, SPP 的制作方法和工艺也得到了长足的发展, 2011 年, 范长江等人利用激光直写技术制作了高阶螺旋相位板^[11], 2015 年, 中国科学院光电技术研究所成功制备了拓扑荷数为 1、3、10、20 的高连续型螺旋相位板^[12], 2016 年, Y. Chen 等人结合透镜与螺旋相位板制备了毫米段波长的涡旋光束^[13]。

拓扑荷数是涡旋光的重要参数之一, 制备大拓扑荷数涡旋光具有重要的现实意义。在量子通信中, 信息的编码程度受限于拓扑荷数的大小, 涡旋光拓扑荷数将直接决定光束携带信息量大小^[14-15]; 在光学粒子操控领域, 提高涡旋光拓扑荷数将增加中空暗核半径, 有利于打破操控粒子体积、面积的限制^[16-17]; 在光学测量和成像领域, 提高拓扑荷数有助于提高检测的精度和灵敏度^[18-20]。文中利用螺旋相位板的多通结构和对涡旋光束的偏振态控制, 仅使用一块螺旋相位板就实现了涡旋光拓扑荷数的 4 重加倍, 极大地提高了 SPP 的利用率, 同时也为制备大拓扑荷数涡旋光提供了一种新的思路。

1 理论分析

假设在 SPP 的出射平面 (x_0, y_0) 的涡旋光表达式

为^[21]:

$$E_0(x_0, y_0, +0) = (x_0 + iy_0)^{l_1} \times \exp[(-1/\omega_2)(x_0^2 + y_0^2)] \quad (1)$$

式中: ω 为涡旋光半径; l_1 为该 SPP 对应的拓扑荷数。根据菲涅耳衍射积分定理, 利用菲涅耳衍射积分算子, 即:

$$T(x, y, z; x_0, y_0, z_0=0) = \frac{ike^{-ikz}}{2\pi z} \int E_0 dx_0 \int dy_0 \times \exp[(-ik/2z) \times (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2] \quad (2)$$

可以得到该光束传播距离为 z_1 时, 在观察屏 (x_1, y_1) 处的表达式:

$$E_1(x_1, y_1, z_1) = \left(\frac{ik}{2z_1\gamma_1} \right)^{l_1+1} \exp(-ikz_1)(x_1 + iy_1)^{l_1} \times \exp[(-1/\omega_1^2)(x_1^2 + y_1^2)] \quad (3)$$

$$\text{式中: } \gamma_1 = \frac{1}{\omega_2} + \frac{ik}{2z_1}; \quad \frac{1}{\omega_1^2} = \frac{k^2}{4\gamma_1 z_1^2} + \frac{ik}{2z_1}。$$

当涡旋光经反射镜反射, 传播距离 z_2 后其表达式变为:

$$E_1(x_1, y_1, z_1) = T(x_1, y_1, z_1; x_0, y_0, z_0=0)E_0(x_0, y_0, 0) = \left(\frac{ik}{2(z_1+z_2)\gamma_1} \right)^{l_1+1} \exp(-ikz_1)(x_1 - iy_1)^{l_1} \times \exp[(-1/\omega_2)(x_1^2 + y_1^2)] \quad (4)$$

该光束反向透射 SPP, 获得螺旋相位板因子 $\exp(-il_1\theta)$ 。当其传播 z_3 距离后, 同样利用菲涅耳衍射积分公式可以得到该光束在观察屏 (x_2, y_2) 处的表达式为:

$$E_2(x_2, y_2, z_2) = \frac{ike^{-ik(z_1+z_2+z_3)}}{2\pi z_2} \left(\frac{ik}{2z_1\gamma_1} \right)^{l_1+1} \iint dx_1 dy_1 \times \exp\left\{-ik\left[\frac{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2}{2z_3}\right]\right\} (x_1 - iy_1)^{2l_1} \times \exp[(-1/\omega_1^2)(x_1^2 + y_1^2)] \quad (5)$$

化简后可得:

$$E_2(x_2, y_2, z_2) = \left(\frac{ik}{2(z_1+z_2)\gamma_1} \right)^{l_1+1} \left(\frac{ik}{2z_3\gamma_2} \right)^{l_2+1} \times \exp[-ik(z_1+z_2+z_3)] \times (x_2 - iy_2)^{2l_1} \times \exp[(-1/\omega_2^2)(x_2^2 + y_2^2)] \quad (6)$$

$$\text{式中: } \gamma_2 = \frac{1}{\omega_1} + \frac{ik}{z_3}; \quad \frac{1}{\omega_2^2} = \frac{k^2}{4\gamma_2 z_3^2} + \frac{ik}{2z_3}。$$

以上即为利用 SPP 多通结构对涡旋光拓扑荷数进行加倍的原理。

通过对比公式(1)中的 $(x_0+iy_0)^{|l_1|}$ 项和公式(6)中的 $(x_2-iy_2)^{2|l_1|}$ 项可知,加倍后的涡旋光旋向与第一次透射 SPP 的旋向相反,但拓扑荷数加倍。

2 结果与分析

文中采用如图 1 所示的涡旋光制备装置进行拓扑荷数 4 重加倍。由氦氖激光器产生波长为 632.8 nm 的高斯光束,通过双透镜系统(L1、L2)对光束进行准直,而后使用偏振片(P)起偏。由于偏振分光棱镜透射 P-偏振光,反射 S-偏振光,所以需要调整偏振片角度使经过偏振片(P)、消偏振光分光棱镜(NPBS)的光束完全透射偏振光分光棱镜(PBS)。线偏振的高斯光束透射 SPP 后获得螺旋相位因子 $\exp(il\theta)$,此时拓扑荷数为 l 。经设置为 45° 的四分之一波片($\lambda/4$)和反射镜(M1)后,该涡旋光拓扑荷数变为 $-l$,此时偏振态正交于入射时的偏振方向。该光束反向透射 SPP 后获得螺旋相位因子 $\exp(-il\theta)$,此时拓扑荷数为 $-2l$ 。经 highPBS 全反射入反射镜(M2)后依照原光路第三次透射 SPP,拓扑荷数增加到 $3l$,经 $\lambda/4$ 、M1 后恢复最初的偏振方向,同时反向透射 SPP 后拓扑荷数变为 $-4l$,经 PBS 反向透射进入 NPBS 待 CCD 进行观察。

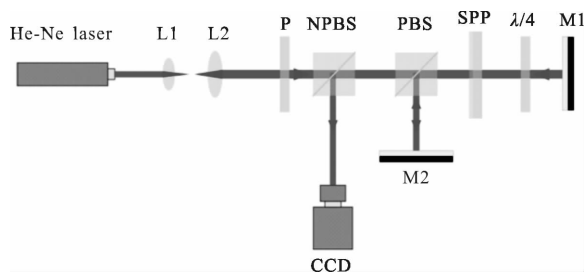


图 1 基于 SPP 的涡旋光拓扑荷数 4 重加倍装置示意图

Fig.1 Experiment setup of quadruple topological charges of vortex based on SPP

文中建立了基于 SPP 多通的涡旋光拓扑荷数 4 重加倍装置的仿真模型,并对拓扑荷数为 1~4 的 SPP 4 重加倍进行了仿真,设定传输距离为 2 m,图 2(a)~(d)为 4 重加倍后,拓扑荷数为 4、8、12、16 的涡旋光强度仿真分布。从中可以得出:在相同传播距离下,制备的涡旋光拓扑荷数越大其强度分布越分散、相对强度越低、中空暗核半径越大。

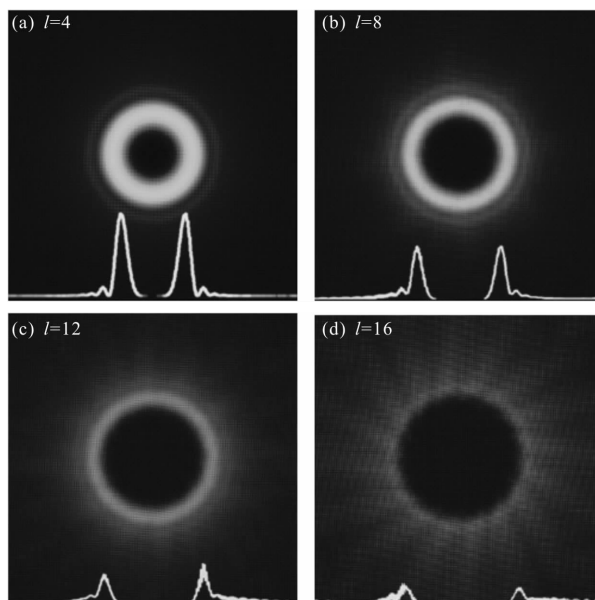


图 2 4 重加倍后拓扑荷数为 4、8、12、16 的涡旋光仿真光强分布图

Fig.2 Simulated intensity distribution of vortices of topological charges 4, 8, 12, 16 after quadrupling

假设在传播过程中,在该截面内涡旋光强度的最大值为该光束强度值,涡旋光强度最大值所在圆环为此时的涡旋光半径。设定传输距离为 0.1~2 m,加倍涡旋光初始拓扑荷数分别为 1、2、3、4,笔者模拟了这四束涡旋光在 4 重加倍过程中相对强度随传播距离的变化曲线,如图 3 所示。仿真结果表明:初始

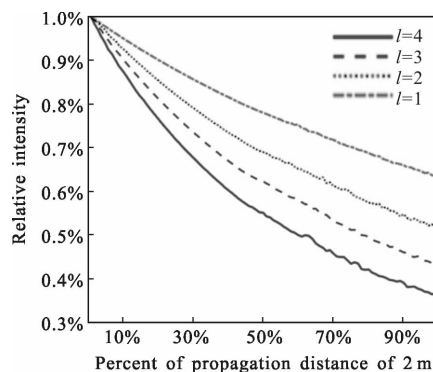


图 3 拓扑荷数分别为 1、2、3、4 的涡旋光在 4 重加倍中相对强度随距离的模拟曲线图

Fig.3 Simulated diagram of optical vortices of relative intensity with propagation distance vortices with topological charges 1, 2, 3, 4 in process of quadrupling

的拓扑荷数越小,其相对强度下降的速率越慢。这是因为涡旋光拓扑荷数越大,其涡旋光束越不稳定,向低阶涡旋光转化的趋势越强^[22]。另外,4 束涡旋光在

加倍过程中其相对强度变化速率并未因透射 SPP 而发生突变,保持了较为平滑的趋势。光束半径随传播距离的变化曲线如图 4 所示。仿真结果表明:初始的拓扑荷数越大,其光束半径的发散速度就越大。这也是因为涡旋光裂解程度随拓扑荷数增加而增加,理论上当涡旋光传播至无穷远时高阶涡旋光会退化为若干个拓扑荷数为 1 的非同心光束。同样的,4 束涡旋光在加倍过程中其光束半径变化速率并未因透射 SPP 而发生突变,保持了较为平滑的趋势。

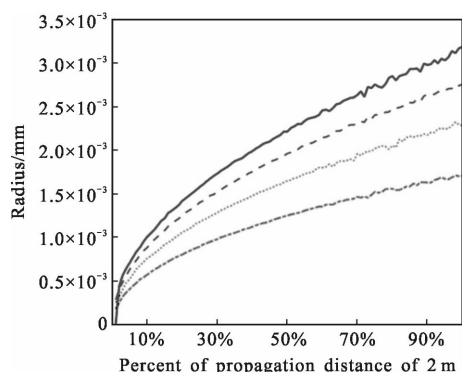


图 4 拓扑荷数分别为 1、2、3、4 的涡旋光在 4 重加倍中光束半径随距离的模拟曲线图

Fig.4 Simulated diagram of optical vortices of optical radius with propagation distance vortices with topological charges 1, 2, 3, 4 in process of quadrupling

使用基于 SPP 多通的涡旋光拓扑荷数 4 重加倍装置,文中在拓扑荷数为 1~4 的 SPP 上进行了加倍实验,制备的涡旋光强度分布如图 5(a)~(d)所示,随

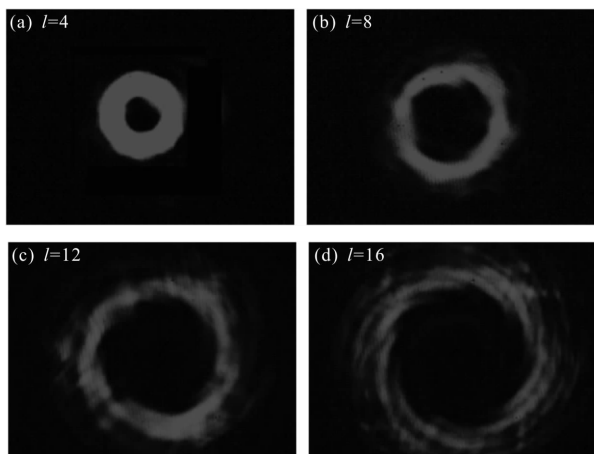


图 5 4 重加倍后拓扑荷数为 4、8、12、16 的涡旋光强度分布图
Fig.5 Experimental intensity distribution of vortices of topological charges 4, 8, 12, 16 after quadruple

着拓扑荷数的增加,涡旋光相对强度、半径随之下降,实验与仿真结果基本一致。相应的与平面波干涉图样如图 6(a)~(d)所示,根据叉形干涉图样可知,制备的涡旋光拓扑荷数分别为 4、8、12、16。由于拓扑荷数较大时存在杂散光,所以,为了保证干涉图样质量,文中选用了参考光与涡旋光夹角较大时的细密干涉条纹。由于未见叉型干涉条纹,所以对于拓扑荷数的计数可采用以下方法:从涡旋光干涉图样中空暗核两侧选两条干涉条纹为基准,从暗核上侧计数两基准间的条纹数;而后,再从暗核下方计数两基准间的条纹数;两条纹数差的绝对值则为涡旋光的拓扑荷数。

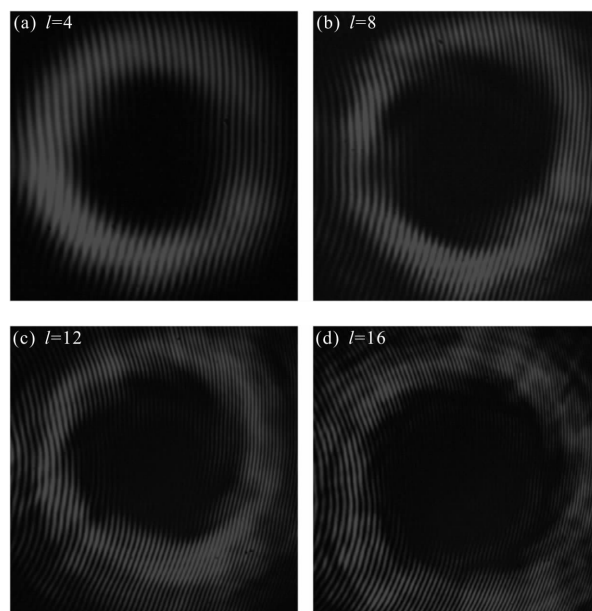


图 6 4 重加倍后拓扑荷数为 4、8、12、16 的涡旋光与平面波干涉图
Fig.6 Experimental interferograms of plane wave and vortices of topological charges 4, 8, 12, 16 after quadruple

由图 5(a)~(d)得出:低阶 SPP 的加倍光束质量较好,但从图 6(d)中明显可见:除了参考光和拓扑荷数为 16 的涡旋光外,还有其他成分参与了干涉,使得在叉形干涉条纹的基础上同时出现了干涉条纹数为 8 的环状干涉条纹,影响了加倍质量。

其中主要存在三方面因素。其一,由于第一次反向穿过 SPP 到达 PBS 时,PBS 不能从严格意义上做到完全反射,所以有一部分拓扑荷数为-8 的涡旋光透射了 PBS,与拓扑荷数为-16 的涡旋光形成了干涉条纹数为 8 的环形干涉图样,如图 7 所示。

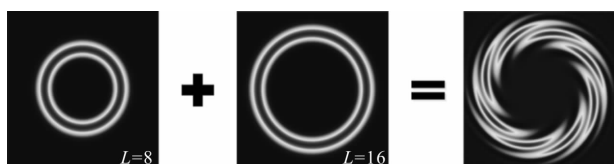


图 7 拓扑荷数为-8 和-16 的涡旋光干涉示意图

Fig.7 Interferogram of vortices with topological charges -8 and -16

其次, 此处选用的参考光并非严格意义上的平面波, 而是高斯光束, 非光腰处的高斯光束由于波面存在曲率也使得在与拓扑荷数为-8 的涡旋光干涉时产生了环形干涉条纹。最后, 在继续进行拓扑荷数为-16 的涡旋光的加倍过程中, 不仅拓扑荷数的成倍增加使得其强度分布更为分散, 而且由于传输过程中的一定损失, 使得拓扑荷数为-8 的涡旋光成分不能忽略, 造成了拓扑荷数为-8 的涡旋光与参考高斯光进行干涉的环形干涉图样较为明显。

3 结 论

文中首先对基于 SPP 多通的涡旋光拓扑荷数加倍原理进行了分析。其次, 在涡旋光加倍原理的基础上, 利用偏振控制涡旋光旋向, 设计了基于 SPP 多通的涡旋光拓扑荷数 4 重加倍装置, 并建立了数学模型, 模拟了涡旋光加倍后传播 0~2 m 时的光强分布图, 得出涡旋光随拓扑荷数增加其相对强度逐渐减小、中空暗核半径逐渐增加的结论; 绘制了 0.1~2 m 间的相对强度和半径曲线, 得出了在传播中涡旋光相对强度和半径不会因通过 SPP 加倍而发生突变的结论。最后, 通过该装置, 利用拓扑荷数为 1、2、3、4 的 SPPs 成功制备了拓扑荷数为 4、8、12、16 的涡旋光束, 与仿真结果基本一致。此外, 文中还对 4 重加倍下高阶涡旋光制备质量较差的原因进行了分析, 为下一步实验装置优化, 使用 SPP 的多通结构制备大拓扑荷数、高质量的涡旋光奠定了基础。

参考文献:

[1] Gao Chunqing, Zhang Shikun, Fu Shiyao, et al. Adaptive optics wavefront correction techniques of vortex beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (2): 0201001. (in Chinese)
高春清, 张世坤, 付时尧, 等. 涡旋光束的自适应光学波前校正技术[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0201001.

[2] Wang Chen, Liu Tong, Shao Qiongling, et al. Method research of optical vortex generation based on sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47 (3): 0326002. (in Chinese)
王琛, 刘通, 邵琼玲, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的涡旋光制备方法[J]. 光子学报, 2018, 47(3): 0326002.

[3] Zhang Guangyu, Liu Linjing, Zhang Chenglong. Study on single-photon acquisition probability based on laguerre-gaussian beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46 (1): 0101001. (in Chinese)
张光宇, 刘琳婧, 张成龙. 基于拉盖尔-高斯光束的单光子捕获概率研究[J]. 光子学报, 2017, 46(1): 0101001.

[4] Huang Sujuan, Zhang Jie, Shao Wei, et al. Experimental study on optical vortex array with high quality [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(8): 0826002. (in Chinese)
黄素娟, 张杰, 邵蔚, 等. 高质量光学涡旋阵列的实验研究[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 0826002.

[5] Sun Haibin, Sun Ping. Out-of-plane displacement measurement using optical vortex phase shifting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11): 1112001. (in Chinese)
孙海滨, 孙平. 基于光学涡旋相移技术的离面位移测量[J]. 光子学报, 2016, 45(11): 1112001.

[6] Zhou Z Y, Li Y, Ding D S, et al. Optical vortex beam based optical fan for high-precision optical measurements and optical switching[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5098.

[7] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112(5): 321-327.

[8] Turnbull G A, Robertson D A, Smith G M, et al. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1996, 127(S4-6): 183-188.

[9] Xin Jingtao, Li Kai, Zhang Wen, et al. Generation of vector beams by Sagnac interferometer and spiral phase plates[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (2): 0217001. (in Chinese)
辛璟焘, 李凯, 张雯, 等. 采用萨格纳克干涉仪与螺旋相位片生成矢量光束 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217001.

[10] Zheng C, Zang H, Du Y, et al. Realization of arbitrarily long focus-depth optical vortices with spiral area-varying zone plates[J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 128-133.

[11] Fan Changjiang, Xu Jiancheng, Ren Zhijun, et al. Performance of high-order spiral phase plate made by direct

- laser writing lithography [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2011, 23(12): 3283–3286. (in Chinese)
- 范长江, 徐建程, 任志君, 等. 激光直写制作高阶螺旋相位板及其性能[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3283–3286.
- [12] Cao A, Shi L, Deng Q, et al. One exposure processing to fabricate spiral phase plate with continuous surface[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8620–8629.
- [13] Chen Y, Zheng S, Li Y, et al. A flat-lensed spiral phase plate based on phase-shifting surface for generation of millimeter-wave OAM beam[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1156–1158.
- [14] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545–1548.
- [15] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Twisted photons[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(5): 305–310.
- [16] Yang C H, Chen Y D, Wu S T, et al. Independent manipulation of topological charges and polarization patterns of optical vortices[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31546.
- [17] Lamstein J, Bezryadina A, Preece D, et al. Optical tug-of-war tweezers: shaping light for dynamic control of bacterial cells(Invited Paper)[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 113.
- [18] Li X, Tai Y, Zhang L, et al. Characterization of dynamic random process using optical vortex metrology [J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(4): 901–909.
- [19] Chmyrov A, Keller J, Grotjohann T, et al. Nanoscopy with more than 100,000 ‘doughnuts’ [J]. *Nature Methods*, 2013, 10(8): 737–740.
- [20] 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.
- [21] Panthong P, Srisuphaphon S, Chiangga S, et al. High-contrast optical vortex detection using the Talbot effect[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7):1657.
- [22] Gbur G. *Singular Optics*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.