

# 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究

柯熙政 胥俊宇\*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 分析了涡旋光与平面波的干涉现象, 利用涡旋光共轴叠加干涉生成携带双态轨道角动量的光, 并将其应用于轨道角动量拓扑荷数的检测。利用叉形错位光栅制备呈中心对称的涡旋光束, 并讨论了在不同拓扑荷数情况下, 利用两束涡旋光束干涉制备双态轨道角动量光束。数值模拟和实验结果表明, 随着拓扑荷数的数值及正负的变化, 两束涡旋光束干涉叠加后其干涉图像发生规律性的变化, 据此可检测涡旋光束。涡旋光束在信息传输及编码方面具有重要意义, 此研究为其在自由空间通信中的复用提供了实验依据, 也为光通信系统的性能改善提供了可能。

**关键词** 衍射; 轨道角动量; 干涉叠加; 涡旋光束; 叉形光栅

**中图分类号** TN919.12

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0905003

## Interference and Detection of Vortex Beams with Orbital Angular Momentum

Ke Xizheng Xu Junyu

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** The interference phenomenon of vortex beams and plane waves is analyzed. By using coaxial superposition interference of vortex beams, we can generate the light with binary orbital angular momentum, and apply it to the topological charge number detection of orbital angular momentum. We use fork dislocation grating to generate centrosymmetric vortex beams and then discuss the generation of light beams with binary orbital angular momentum by the interference of two vortex beams with different topological charge numbers. Numerical and experimental results show that with the change of the topological charge number value, either plus or minus, the interference image which is generated by the interference superposition of two vortex beams is also changing regularly. According to this, vortex beams can be detected. Moreover, vortex beam has important significance in information transmission and coding. Our study provides experiment basis for the reuse of vortex beams in free space communication, and provides potential for performance improvement of optical communication system.

**Key words** diffraction; orbital angular momentum; interference superposition; vortex beam; fork grating

**OCIS codes** 050.1950; 080.4865; 270.5570; 270.5585

## 1 引言

近年来, 涡旋光束引起研究者们越来越多的关注。Allen 等<sup>[1]</sup>发现涡旋光束具有连续螺旋状相位  $\exp(il\varphi)$  ( $l$  为拓扑荷数,  $\varphi$  为方位角), 存在相位奇点, 中心强度为零, 且每个光子携带  $lh$  的轨道角动量 ( $h$  为普朗克常数)。典型的涡旋光束为拉盖尔-高斯 (LG) 光束<sup>[2-4]</sup>, 其在量子信息处理、粒子囚禁和操纵等领域都具有潜在的应用价值<sup>[5-7]</sup>, 并且在光通信中的信息传输以及信息编码<sup>[8-10]</sup> 方面具有广阔的应用前景。涡旋光束具有轨道角动量, 传统的通信调制方式可用于轨道角动量 (OAM) 复用通信<sup>[11-12]</sup>, 使其具有大容量信道通信, 并且 OAM 已成为自由空间光通信 (FSO) 系统编码和解码的新方法<sup>[13-14]</sup>。轨道角动量在信息的传输及编码方面有很多优点, 如拓扑荷数的取值不同使其具有很强的编码能力, 相位的不确定性使其具有很高的信息保密性。

**收稿日期:** 2016-05-05; **收到修改稿日期:** 2016-05-31

**基金项目:** 国家自然科学基金 (61377080, 60977054)

**作者简介:** 柯熙政 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

\* **通信联系人.** E-mail: bjjy1992@163.com

目前对涡旋光束的研究主要集中在产生和检测两个方面。李丰等<sup>[15]</sup>利用振幅光栅生成 LG 光束; Jaime 等<sup>[16]</sup>利用涡旋光的干涉研究了相干叠加的 OAM 调制;李阳月等<sup>[17]</sup>研究了涡旋光束的产生与干涉,但未研究两束涡旋光的干涉叠加;刘辉等<sup>[18]</sup>利用涡旋光的干涉研究了涡旋光束的轨道角动量测量,但未探究异号、不等量拓扑荷数的涡旋光。在此基础上,本文推导了涡旋光干涉叠加的理论公式,通过数值模拟得到两个叉状错位光栅的叠加全息图,以准确得到干涉叠加涡旋光,并将模拟仿真与实验作对比,分析了各种情况的干涉叠加现象。最后,结合两束光的干涉叠加,提出一种对比检测涡旋光的方法,可以较为准确地得到未知光束的拓扑荷数。

## 2 理论基础

### 2.1 涡旋光与平面波的干涉

当两束光分别为 LG 光与平面波时,其电场强度分别为  $E_{LG} = u(r, z)\exp(i\ell\varphi)\exp(-ikz)$  和  $E_P = A_P\exp(ikx)$ ,其中  $r$  为传播的径向半径, $z$  为光传播的距离, $k$  为波数( $k = 2\pi/\lambda$ ), $\varphi$  为方位角, $u(r, z)$  为源场下的电场强度, $A_P$  为常数。在源场情况下,取  $z = 0$ ,则  $E_{LG} = A_{LG}\exp(i\ell\varphi)$ , $A_{LG}$  为常数。叠加后的电场强度为<sup>[19]</sup>

$$E = E_P + E_{LG} = A_P\exp(ikx) + A_{LG}\exp(i\ell\varphi). \quad (1)$$

设 LG 光与平面波的光强分别为  $I_{LG}$  和  $I_P$ ,叠加后的光强为

$$I = I_P + I_{LG} + 2\sqrt{I_P I_{LG}}\cos(i\ell\varphi + ikx). \quad (2)$$

也可根据  $I = EE^*$  计算光强,为了方便计算,令  $A_P = A_{LG} = A_0$ ,可得

$$I = EE^* = A_0^2 [2 + 2\cos(i\ell\varphi + ikx)]. \quad (3)$$

根据以上公式即可得到直条振幅型错位光栅(振幅型叉形光栅)的场强,如图 1 所示。叉形光栅衍射产生 LG 光束的方法结构简单,易于修改,仅通过改变  $\ell$  值即可实现。 $\ell$  值的改变使一个条纹错位产生多个条纹,产生条纹的个数即为拓扑荷数,且  $\ell$  值的正负决定 LG 光束的开口方向。

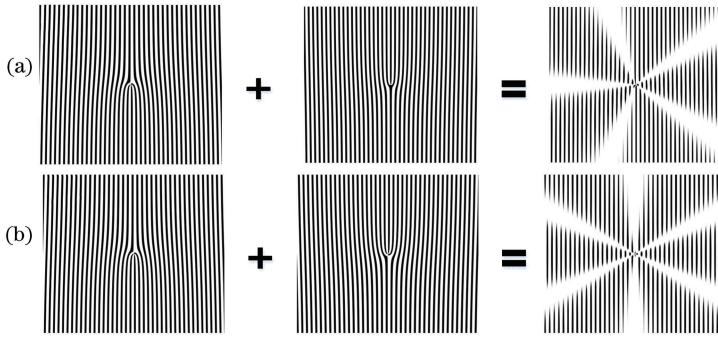


图 1 光栅叠加全息图的形成过程。(a)  $\ell = 3, -3$ ; (b)  $\ell = 2, -3$

Fig. 1 Formation process of superimposed grating hologram. (a)  $\ell = 3, -3$ ; (b)  $\ell = 2, -3$

### 2.2 叠加干涉生成双 OAM 光

当两束 LG 光的拓扑荷数取不同的异号拓扑荷值时,其叠加后光强沿径向发生变化,两束异号的涡旋光束发生干涉。图 1 中干涉叠加光栅的相位为  $\text{mod}(\ell\theta + kx\sin\alpha, 2\pi)$ , $\theta$  为光波传播方向与  $z$  轴的夹角, $\alpha$  为光栅偏离  $x$  轴的角度。基模高斯光束通过单个叉形光栅后衍射光束的远场分布  $u_1(\rho, \theta)$ <sup>[15]</sup> 以及通过干涉叠加光栅的衍射场分布  $u_2(\rho, \theta)$  分别为

$$u_1(\rho, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n F_2 [u_0(\rho, \theta)\exp(in\ell\theta)] * F_2 [\exp(inkx_1\sin\varphi_1)], \quad (4)$$

$$u_2(\rho, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n F_2 [u_0(\rho, \theta)\exp(in\ell\theta)] * F_2 [\exp(inkx_1\sin\varphi_1)\exp(inkx_2\sin\varphi_2)], \quad (5)$$

式中  $u_0(\rho, \theta)$  为基模高斯光束, $(\rho, \theta)$  为傅里叶变换的坐标, $n$  为傅里叶展开阶数, $A_n$  为傅里叶变换系数, $F_2$  为二维傅里叶变换。

通过数值模拟得到光栅干涉叠加的全息图。利用计算机编程叠加两个叉状光栅,将高斯光束通过叠加的叉状光栅和空间光调制器(SLM)进行衍射实验,此方法容易实现,且拓扑荷数易改变。

图 1 为拓扑荷数取  $l=3, -3$  和  $l=2, -3$  时光栅叠加全息图的形成过程。从图中可以看出,叠加图出现了呈均匀等边分布的较亮区域。叉状叠加原本不会出现这种图形,但是叉状光栅的叠加产生了涡旋光,使光栅中包含了相位信息,因此光栅叠加全息图与光栅中的相位分布有关。

不难看出,图 2 中的叠加相位分布的界限形状与图 1 中的叠加图一致。由此说明,两个不同拓扑荷数的叉状光栅叠加,得到的叠加光栅具有叠加后的相位分布,对图 1 的叠加图进行衍射实验可以得到干涉叠加的双 OAM 光,其他拓扑荷数的光栅也具有同样的特性。

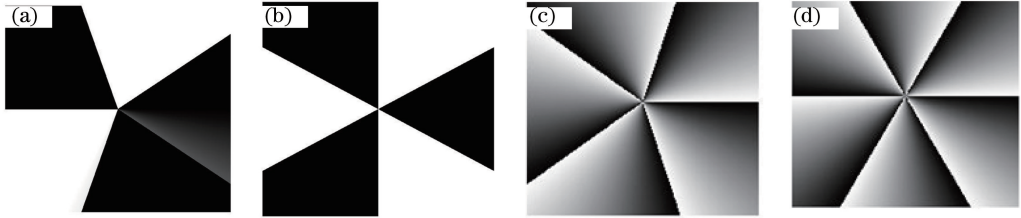


图 2 (a)(b) 拓扑荷数分别为  $l=2, -3$  和  $l=3, -3$  的光栅经过灰度处理的相位叠加图;  
(c)(d) 拓扑荷数分别为  $l=5$  和  $l=6$  的光栅对应的螺旋光束相位图

Fig. 2 (a)(b) Phase stacking diagram after grey processing when  $l=2, -3$  and  $l=3, -3$  respectively;  
(c)(d) phase diagram of vortex beams when  $l=5$  and  $l=6$  respectively

### 3 数值模拟及实验

依据两束涡旋光叠加干涉的理论,设计了如图 3 所示的实验方案,并且根据此实验系统提出了一种干涉比较检测涡旋光的方法。

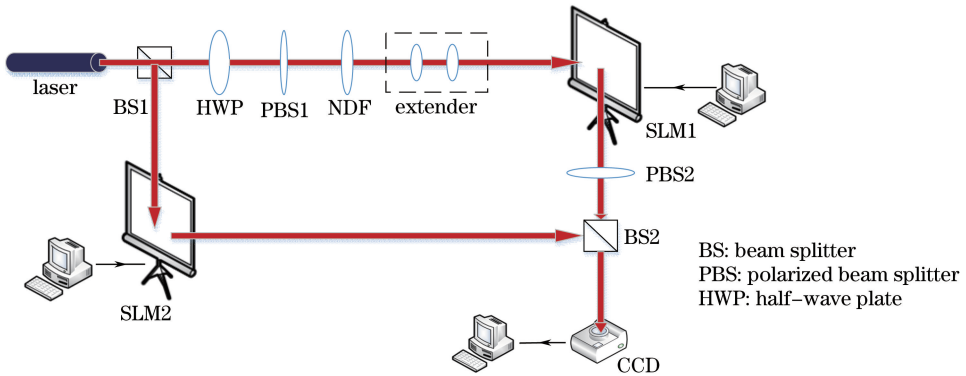


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

通过涡旋光的干涉检测光束的拓扑荷数时,需要使用两个 SLM,一路光束拓扑荷数未知,另一路假设光束的拓扑荷数已知。He-Ne 激光器发出的光通过 BS1 将光分为两束。一束光经过 SLM1,反射后经过 PBS2,另一束光经过 SLM2,反射后经过 BS2,与前一束光共轴叠加干涉,最后通过 CCD 观测图形。

为方便研究干涉现象,根据之前的理论分析以及仿真结果,只需使用 SLM1,将叠加光栅图在电脑上显示。He-Ne 激光器发出的光依次经过 HWP、PBS1、NDF、extender 和 SLM1,再经 SLM1 反射后经过 PBS2,最后通过 CCD 观测图形。

#### 3.1 等量异号 $l$ 值叠加干涉

根据已知理论进行衍射仿真,并按照实验方案进行实验。利用叉状光栅可以制备单个拓扑荷数的涡旋光束,在此基础上,将不同拓扑荷数的叉状光栅叠加,得到相干叠加结果。数值模拟结果及实验结果如图 4 所示。图 4(a1)为  $|l|=1$  时的衍射仿真图,其左(右)侧光斑有 2 个;图 4(b1)为  $|l|=2$  时的衍射仿真图,其左(右)侧光斑有 4 个;图 4(c1)为  $|l|=3$  时的衍射仿真图,其左(右)侧光斑有 6 个。以此类推,左(右)侧光

斑个数为  $2|l|$ 。由图 4 可以看出,等量异号拓扑荷数干涉叠加时,其衍射图像不是圆环状的光斑,而是花瓣状的光斑,其原因是两束涡旋光在理想情况下共轴叠加时,形成的全息图出现明亮的光斑裂纹,但仍是涡旋光束,且具有螺旋相位分布。左(右)侧光斑个数为叠加拓扑荷数绝对值之和,即左(右)侧光斑个数  $N=2|l|$ ,因此由左(右)侧光斑数即可得到等量异号的拓扑荷数。随着拓扑荷数的增大,衍射的光强随之减弱,且衍射光斑会发生重叠,影响衍射效果,最终影响检测和信息的传输。

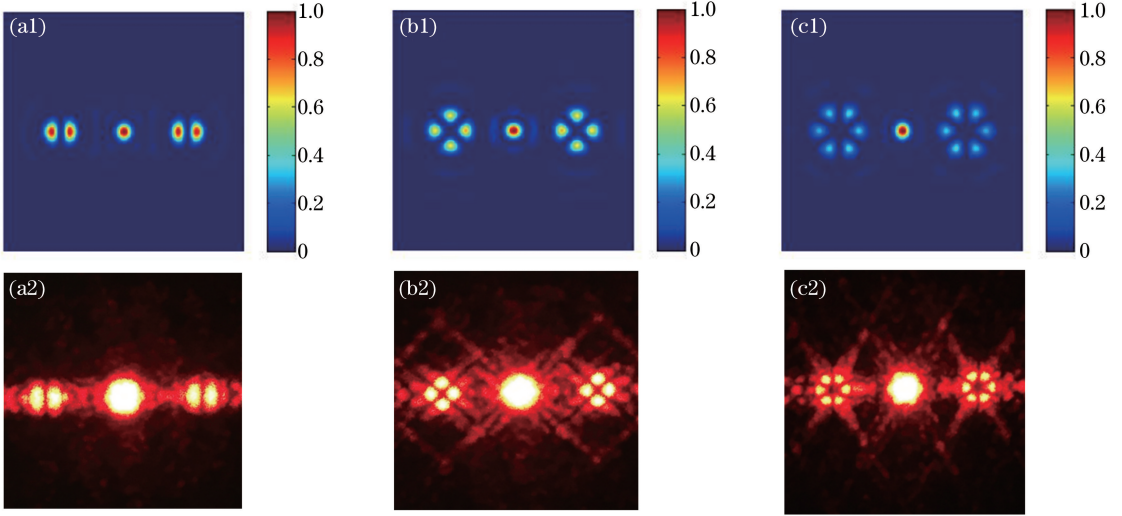


图 4 等量异号  $l$  值干涉叠加的(a1)~(c1)数值模拟图和(a2)~(c2)实验图。

(a1)(a2)  $l=1, -1$ ; (b1)(b2)  $l=2, -2$ ; (c1)(c2)  $l=3, -3$

Fig. 4 (a1)-(c1) Numerical simulation pattern and (a2)-(c2) experiment pattern of interference superposition when the topological charge numbers are with equal value and opposite symbol. (a1)(a2)  $l=1, -1$ ;

(b1)(b2)  $l=2, -2$ ; (c1)(c2)  $l=3, -3$

### 3.2 不等量异号 $l$ 值叠加干涉

图 5 为不等量异号拓扑荷数的模拟和实验干涉图,与图 4 不同,图 5 为非中心对称图形。不同拓扑荷数干涉叠加时,与之前结果类似,也产生分裂的光斑,并且光强随着拓扑荷数的增大逐渐减弱。图 5(a1)、(a2)

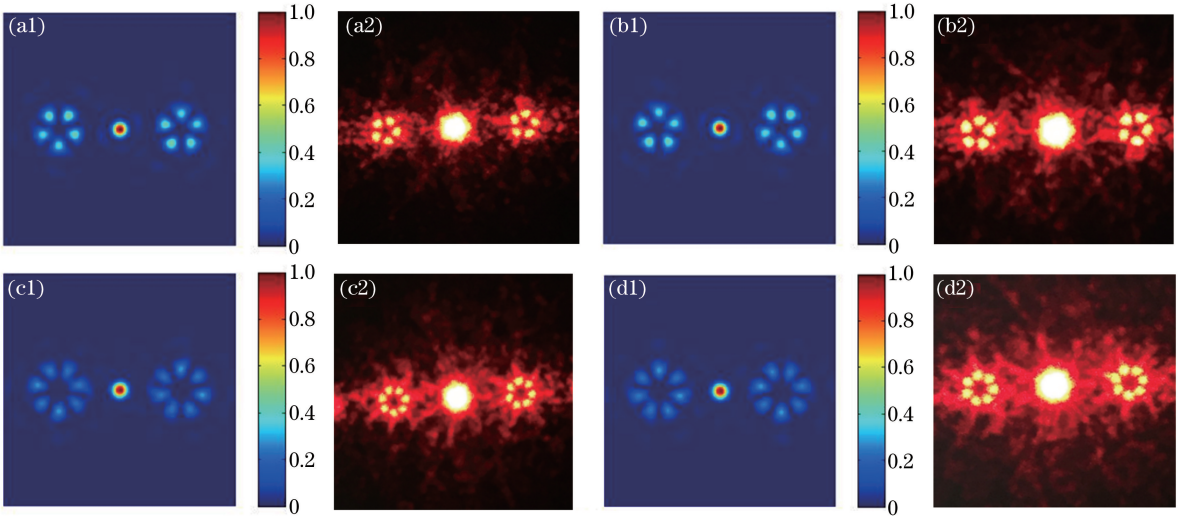


图 5 不等量异号  $l$  值干涉叠加的(a1)~(d1)数值模拟图和(a2)~(d2)实验图。

(a1)(a2)  $l=2, -3$ ; (b1)(b2)  $l=3, -2$ ; (c1)(c2)  $l=4, -3$ ; (d1)(d2)  $l=3, -4$

Fig. 5 (a1)-(d1) Numerical simulation pattern and (a2)-(d2) experiment pattern of interference superposition when the topological charge numbers are with different value and opposite symbol. (a1)(a2)  $l=2, -3$ ;

(b1)(b2)  $l=3, -2$ ; (c1)(c2)  $l=4, -3$ ; (d1)(d2)  $l=3, -4$

为  $l=2, -3$  的干涉叠加图,其左(右)侧光斑个数为 5;图 5(b1)、(b2)为  $l=3, -2$  的干涉叠加图,其左(右)侧光斑个数也为 5。可以得到,左(右)侧光斑个数  $N = |l_1| + |l_2|$  ( $l_1, l_2$  为两束 LG 光的拓扑荷数)。图 5(c1)、(c2)为  $l=4, -3$  的干涉叠加图,图 5(d1)、(d2)为  $l=3, -4$  的干涉叠加图,它们都符合叠加的规律,即两束光的拓扑荷数决定了叠加后的光斑分裂个数。此外,正数拓扑荷数的数值即为各图中左侧光斑中心轴开口向上的数值。利用叉形光栅叠加的方法准确模拟了两束涡旋光的干涉,且实验简便高效,易于观察和修改。当拓扑荷数数值相反时,其衍射图光斑呈现轴对称,且当总拓扑荷数为奇数时,产生的光斑图形为奇数边图形,图中左侧上半部分光斑的个数即为正数拓扑荷数的数值。图 6(a)为  $l=2, -3$  的干涉叠加,左侧光斑呈倒五边形,从图中可以得到,其拓扑荷数的正值为 2,左侧 2 个光斑朝上。拓扑荷数为  $-2, 3$  时,衍射图像与  $l=2, -3$  的衍射图像呈轴对称,其拓扑荷数的正值为 3,左侧 3 个光斑朝上。这种判断方法只适用于拓扑荷数为奇数的情况,当拓扑荷数为偶数时,产生的光斑呈中心对称,不方便作具体判断。如图 6(b)所示,当拓扑荷数  $l = -1, 4$  时,其光强明显下降,光斑模糊,因此两个叠加拓扑荷数差值较大大会使光强变弱。

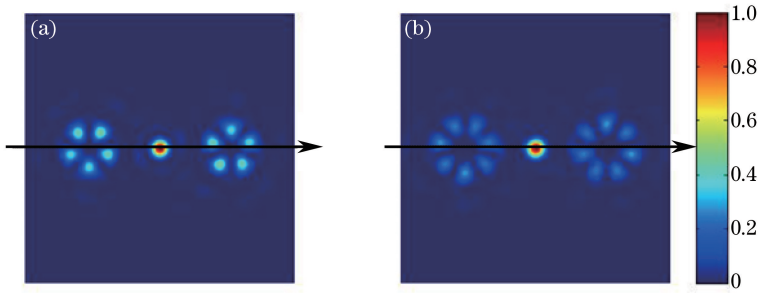


图 6 干涉图形。(a)  $l=2, -3$ ; (b)  $l=-1, 4$

Fig. 6 Interference pattern. (a)  $l=2, -3$ ; (b)  $l=-1, 4$

## 4 结 论

理论分析了涡旋光与平面波的干涉结果,数值模拟了不同拓扑荷数的两束 LG 光干涉的光强分布,并比较了不同拓扑荷数的干涉图像。在直条纹错位光栅的基础上,理论分析叠加干涉,并进行模拟仿真,得到双 OAM 光的图像。通过研究发现,当两束不同拓扑荷数的涡旋光叠加时,产生干涉,得到圆环或者花瓣状的图像。拓扑荷数不同的两束 LG 光干涉,得到的图像具有一定的规律:当两束 LG 光的拓扑荷数取等量异号时,干涉产生的左(右)侧光斑裂纹为拓扑荷数绝对值的两倍;当两束 LG 光的拓扑荷数取不等量异号时,干涉产生的左(右)侧光斑裂纹为两个拓扑荷数的绝对值之和。涡旋光的检测可以对圆环的大小作定性的判断,但无法直接得出拓扑荷数的大小。涡旋光束叠加特性的研究将对涡旋光的复用、检测具有重要的意义,且涡旋光叠加干涉产生的图像在信息检测和传输方面具有广阔的应用前景

## 参 考 文 献

- 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]. Phys Rev A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, *et al.* Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. Opt Lett, 1992, 17(3): 221-223.
- Wei Gongxiang, Liu Xiaojuan, Liu Yunyan, *et al.* Spin and orbital angular momentum of light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 100004.  
魏功祥, 刘晓娟, 刘云燕, 等. 光的自旋和轨道角动量[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 100004.
- Singh B K, Singh G, Senthilkumaran P, *et al.* Generation of optical vortex arrays using single-element reversed-wavefront folding interferometer[J]. International Journal of Optics, 2011, 2012(2012): 689612.
- Gori F, Santarsiero M, Borghi R, *et al.* The irradiance of partially polarized beams in a scalar treatment [J]. Opt Commun, 1999, 163(4-6): 159-163.
- Gori F, Santarsiero M, Borghi R, *et al.* Use of the van Cittert-Zernike theorem for partially polarized sources[J]. Opt Lett, 2000, 25(17): 1291-1293.

- 7 Vickers J, Burch M, Vyas R, *et al.* Phase and interference properties of optical vortex beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(3): 823-827.
- 8 Lü Hong, Ke Xizheng. Research on the beam with orbital angular momentum used in encoding and decoding of optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 331-335.  
吕 宏, 柯熙政. 具轨道角动量光束用于光通信编码及解码研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 331-335.
- 9 Ke Xizheng, Guo Xinlong. Realization of optical phase information encode by using orbital angular momentum of light beam[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2015, 32(1): 69-76.  
柯熙政, 郭新龙. 用光束轨道角动量实现相位信息编码[J]. *量子电子学报*, 2015, 32(1): 69-76.
- 10 Liu Y D, Gao C Q, Gao M W. Superposition and detection of two helical beams for optical orbital angular momentum communication[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(14): 3636-3639.
- 11 Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Twisted photons[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(5): 305-310.
- 12 Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Management of the angular momentum of light: preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 88(1): 013601.
- 13 Gibson G, Courtial J, Padgett M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Opt Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- 14 Gibson G, Courtial J, Vasnetsov M, *et al.* Increasing the data density of free-space optical communications using orbital angular momentum[C]. *SPIE*, 2004, 5550: 367-373.
- 15 Li Feng, Gao Chunqing, Liu Yidong, *et al.* Experimental study of the generation of Laguerre-Gaussian beam using a computer-generated amplitude grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(2): 860-866.  
李 丰, 高春清, 刘义东, 等. 利用振幅光栅生成拉盖尔高斯光束的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(2): 860-866.
- 16 Anguita J A, Herreros J, Djordjevic I B. Coherent multimode OAM superpositions for multidimensional modulation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(2): 875-894.
- 17 Li Yangyue, Chen Ziyang, Liu Hui, *et al.* Generation and interference of vortex beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1740-1748.  
李阳月, 陈子阳, 刘 辉, 等. 涡旋光束的产生与干涉[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1740-1748.
- 18 Liu Hui, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Detection of the orbital angular momentum of fractional optical vortex beams[J]. *Journal of Optoelectronics•Laser*, 2009, 20(11): 1478-1482.  
刘 辉, 陈子阳, 蒲继雄. 分数阶涡旋光束的轨道角动量的测量[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(11): 1478-1482.
- 19 Arlt J, Kuhn R, Dholakia K. Spatial transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Journal of Modern Optics*, 2001, 48(5): 783-787.