

文章编号: 0253-2239(2010)s100214

# 涡旋光束通过角向分布狭缝的干涉特性

李阳月 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 提出一种新式的角向分布狭缝,并分别从理论和实验上研究了涡旋光束通过这种角向分布狭缝后的干涉特性。实验方法即为从 CCD 上观察涡旋光束通过角向分布狭缝的干涉图样。理论上从涡旋光束传输的远场光强表达式得到了干涉图形,并分析了狭缝的缝数  $N$  和涡旋光束的拓扑电荷数对干涉图形的影响。然后通过实验结果对理论图形进行了验证。研究表明,涡旋光束经过角向分布狭缝后的干涉图形将随着狭缝数目  $N$  以及涡旋光束的拓扑电荷数  $l$  的改变而变化。这是由于涡旋光束的相位是变化的这一特性引起。这一现象有望测量涡旋光束的拓扑电荷数。

**关键词** 物理光学;涡旋光束;狭缝干涉特性;拓扑电荷数

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100214

## Interference of Vortex Beam through Angular Slit

Li Yangyue Pu Jixiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

**Abstract** A novel slit with angular transmittance is proposed and the interference patterns of a vortex beam transformed through the angular slit are investigated theoretically and experimentally with the angular slit by CCD. The method is the observation of the interference pattern. The theoretical results are simulated based on the intensity expression in the far field, which are in consistent with the experimental results. The influence of the slit number and topological charge on the interference pattern are investigated. It is shown that, the interference pattern depends on the number of the angular slits and the topological charge of the vortex beam. It results from the change of the vortex beam phase. The result may have potential application in measuring the topological charge of a vortex beam.

**Key words** physical optics; vortex beam; angular slit interference; topological charge

**OCIS codes** 050.0050; 080.0080; 130.0130

## 1 引 言

涡旋光束是具有螺旋形相位分布的光束,表达式中带有相位因子  $\exp(i\ell\theta)$  (其中  $\ell$  为涡旋光束的拓扑电荷数 topological charge)<sup>[1]</sup>,每个光子带有固定的轨道角动量  $\ell\hbar$ 。由于涡旋光束具有轨道角动量  $\ell\hbar$ ,所携带的轨道角动量可以传递给微粒,以驱动微粒旋转。此外研究表明光束的拓扑电荷数作为信息的载体还可用于空间光通信传输。目前具有轨

道角动量的涡旋光束已经在光学微操纵、生物医学、量子信息编码、光学信息传输等领域得到了广泛的应用<sup>[2~6]</sup>。

涡旋光束自发现以来,其传输特性受到了人们的广泛关注<sup>[7~13]</sup>。2008年,Berkhout等<sup>[14]</sup>提出一种多孔的方法测量涡旋光束的轨道角动量。2009年,Cheng等<sup>[15]</sup>对涡旋光束通过缝隙的衍射现象进行了研究。他们分别通过不同的方法对涡旋光束的

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60977068),福建省科技计划重点项目(2007H0027),福建省自然科学基金(A0810012)和华侨大学科研基金(08HZR14)资助课题。

作者简介: 李阳月(1985—),女,硕士研究生,主要从事光束传输方面的研究。E-mail: liyangyue33@163.com

导师简介: 蒲继雄(1962—),男,教授,硕士生导师,主要从事基础光学、非线性光学、大气光学等方面的研究。

E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

传输进行了研究。本文提出一种新式的角向分布狭缝,分析了涡旋光束通过这种狭缝后的传输特性,通过理论模拟得出缝数不同的狭缝干涉图形,然后在实验上得到了利用螺旋相位板产生的涡旋光束通过角向分布狭缝后的干涉图形,对理论模拟进行了验证。

## 2 理论分析及计算

本文主要研究涡旋光束通过一种新式的角向分

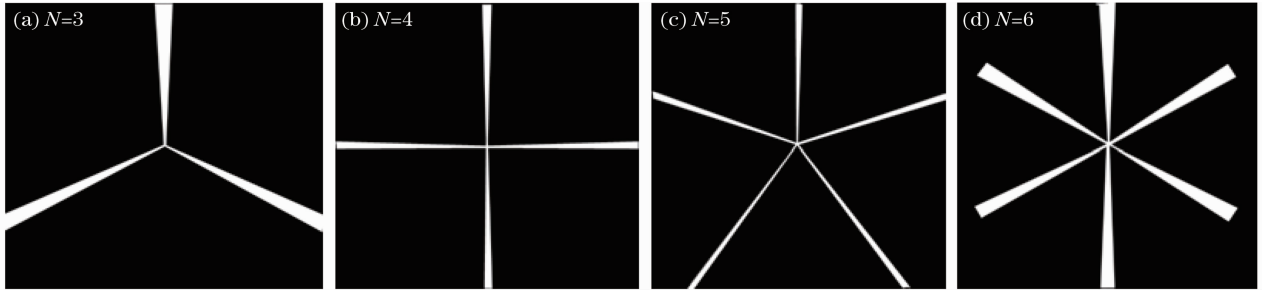


图 1 角向分布狭缝的示意图。(a)  $N=3$ , (b)  $N=4$ , (c)  $N=5$ , (d)  $N=6$

Fig. 1 Illustration for the novel slit with angular transmittance for (a)  $N=3$ , (b)  $N=4$ , (c)  $N=5$ , (d)  $N=6$

理论研究了涡旋光束在自由空间传输一段距离后穿过角向分布狭缝( $s_1$ 面)进行干涉,然后分析再传输一段距离后在观察面( $s_2$ 面)所得的干涉图形。涡旋光束通过图 1 所示狭缝时,在狭缝的每个缝上

布狭缝后的干涉特性。下面分别从理论上和实验上对涡旋光束通过这种新式的角向分布狭缝后的干涉方法进行了研究,以下将根据理论和实验干涉图形分析涡旋光束随着拓扑电荷数的变化的传输特性。

实验上用到几种角向分布狭缝如图 1 所示,其中  $N$  为狭缝的缝数。这种角向分布狭缝是中心交汇于一点的  $N$  个对称分布的小角度( $2^\circ \sim 3^\circ$ )狭缝。实验上利用涡旋光束通过图 1 所示的狭缝进行干涉。

的相位是不同的,这就使得干涉图形也不同。涡旋光束的电场表达式为  $E=A\exp(i\ell\theta)$ ,其中  $A$  为振幅。理论计算的入射光束为涡旋光束。

根据柯林斯公式<sup>[16]</sup>

$$E_2(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda B}\right) \exp(ikz) \iint_{s_1} E_1(x_1, y_1, z) \exp\left\{\frac{ik}{2B}[A(x_1^2 + y_1^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2)]\right\} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

式中积分对源点  $(x_1, y_1, 0)$  所在  $s_1$  面进行。其中  $k = 2\pi/\lambda$ , 在自由空间条件下  $A = 1, B = z = 1, C = 0, D = 1$ 。干涉后的光强分布为  $I = E_2 E_2^*$ 。

根据(1)式可以计算模拟出涡旋光束干涉图,例如狭缝的缝数  $N=4$  时的干涉电场表达式为

$$\begin{aligned} E_2(x, y) = & \left(-\frac{i}{\lambda}\right) \exp(ikz) \int_0^{\pi/180} \int_0^{0.009} \exp\left\{\frac{ik}{2}\left[2r\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(\phi - \arctan\frac{y}{x}\right)\right]\right\} \times \\ & \exp(i\ell\phi) \left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right)\left(\frac{r}{\omega}\right)^\ell\right] dr d\phi + \int_{\pi/2}^{91\pi/180} \int_0^{0.009} \exp\left\{\frac{ik}{2}\left[2r\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(\phi - \arctan\frac{y}{x}\right)\right]\right\} \times \\ & \exp(i\ell\phi) \left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right)\left(\frac{r}{\omega}\right)^\ell\right] dr d\phi + \int_{3\pi/2}^{271\pi/180} \int_0^{0.009} \exp\left\{\frac{ik}{2}\left[2r\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(\phi - \arctan\frac{y}{x}\right)\right]\right\} \times \\ & \exp(i\ell\phi) \left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right)\left(\frac{r}{\omega}\right)^\ell\right] dr d\phi + \int_{3\pi/2}^{271\pi/180} \int_0^{0.009} \exp\left\{\frac{ik}{2}\left[2r\sqrt{x^2+y^2}\cos\left(\phi - \arctan\frac{y}{x}\right)\right]\right\} \times \\ & \exp(i\ell\phi) \left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right)\left(\frac{r}{\omega}\right)^\ell\right] dr d\phi. \end{aligned} \quad (2)$$

干涉后的光强分布为  $I = E_2 E_2^*$ , 如图 2 所示。图 2(a)为涡旋光束通过缝数  $N=3$  的角向分布狭

缝,涡旋光束的拓扑电荷数取值分别  $0, 1, 2, 3$ 。图 2 (b)为涡旋光束通过缝数  $N=4$  的角向分布狭缝,涡

旋光束的拓扑电荷数取值分别 0,1,2,3。图 2(c)为涡旋光束通过缝数  $N=5$  的角向分布狭缝,涡旋光束的拓扑电荷数取值分别 0,1,2,3。图 2(d)为涡旋光束通过缝数  $N=6$  的角向分布狭缝,涡旋光束的拓扑电荷数取值分别 0,1,2,3。

由图 2 可知,干涉光强图的变化不仅和角向分布狭缝的缝数有关而且和涡旋光束的拓扑电荷数有关。涡旋光束通过狭缝时,每个缝上的相位是不同的,这就使得干涉结果的不同。例如,狭缝的缝数

$N=3$  时,拓扑电荷数  $l=0$  的涡旋光束即为平面波,在狭缝的平面上其相位不发生变化,即 3 个狭缝上的相位变化为 0,则中心光强加强为亮光斑;狭缝的缝数  $N=3$  时,拓扑电荷数  $l=1$  的涡旋光束在狭缝的平面上一周相位的变化为  $2\pi$ ,那么 3 个狭缝上的相位分别为 0,  $2\pi/3$ ,  $4\pi/3$ ,其相位差为  $2\pi/3$ ,干涉减弱,则中心光强为暗光斑,而其他地方的亮光斑则为不同程度的干涉加强区。根据上述理论以此类推,便可得到图 2 所示干涉光强图。

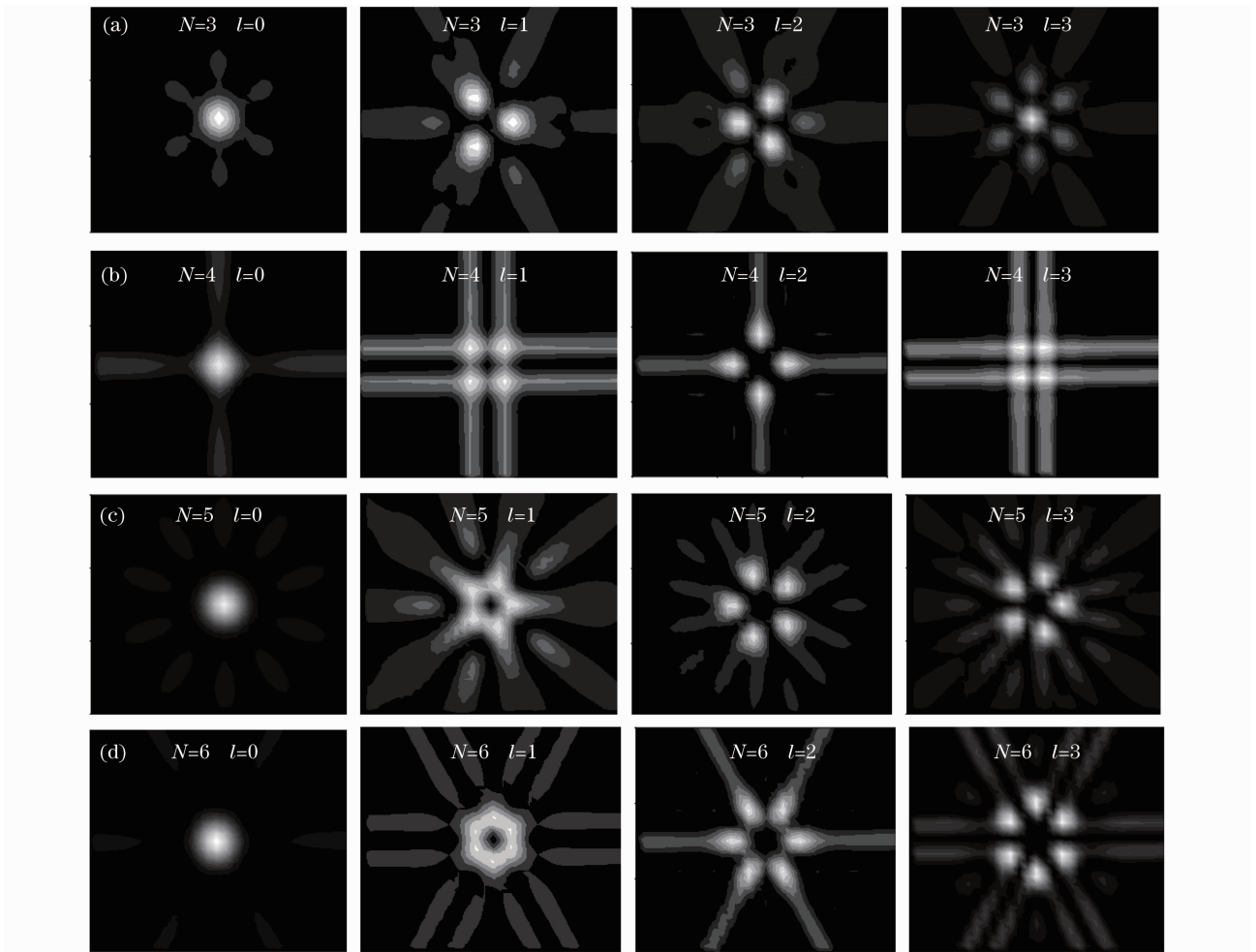


图 2 涡旋光束通过角向分布狭缝的理论模拟图。(a)  $N = 3, l = 0, 1, 2, 3$ , (b)  $N = 4, l = 0, 1, 2, 3$ , (c)  $N = 5, l = 0, 1, 2, 3$ , (d)  $N = 6, l = 0, 1, 2, 3$

Fig. 2 Interference intensity patterns (the numerical results) of vortex beam through the novel slits with angular transmittance for (a)  $N = 3, l = 0, 1, 2, 3$ , (b)  $N = 4, l = 0, 1, 2, 3$ , (c)  $N = 5, l = 0, 1, 2, 3$ , (d)  $N = 6, l = 0, 1, 2, 3$

### 3 实验设计

#### 3.1 实验装置及分析

实验装置如图 3 所示,实验过程中用到的主要器件为螺旋相位板(SPP)和角向分布狭缝。首先激光器发出的光(近似为平面波)通过螺旋相位板(实

验中分别用到拓扑电荷数为 1,2,3 的 3 块螺旋相位板)后获得涡旋光束,然后将得到的涡旋光束通过角向分布狭缝进行干涉,最后在 CCD 上观察干涉图形。

实验中用到的螺旋相位板,其厚度是逐渐变化的,高度差  $s = (n-1)\lambda l$ ,其中  $n$  为折射率,不同的高

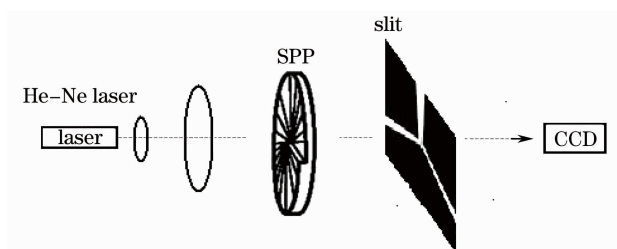


图 3 涡旋光束通过角向分布狭缝的干涉装置图

Fig. 3 Interference equipment diagram of a vortex beam through the novel slit with angular transmittance 度差  $s$  对应不同的拓扑电荷数  $l$ 。实验过程中调整光

路使角向分布狭缝的中心与涡旋光束的中心重合, 这样便可观察干涉图形。

### 3.2 实验干涉图形及分析

图 4 为实验拍摄到的干涉光强图。涡旋光束通过角向分布狭缝后的实验图如下所示: 图 4(a) 为涡旋光束的拓扑电荷数取值为 1, 通过角向分布狭缝的缝数  $N$  分别为 3, 4, 5, 6。图 4(b) 拓扑电荷数为 2, 缝数  $N$  分别为 3, 4, 5, 6。图 4(c) 拓扑电荷数为 3, 缝数  $N$  分别为 3, 4, 5, 6。由图 4 可知, 与理论原理相同, 实验干涉光强图的变化不仅和角向分布狭缝的缝数有关而且和涡旋光束的拓扑电荷数有关。

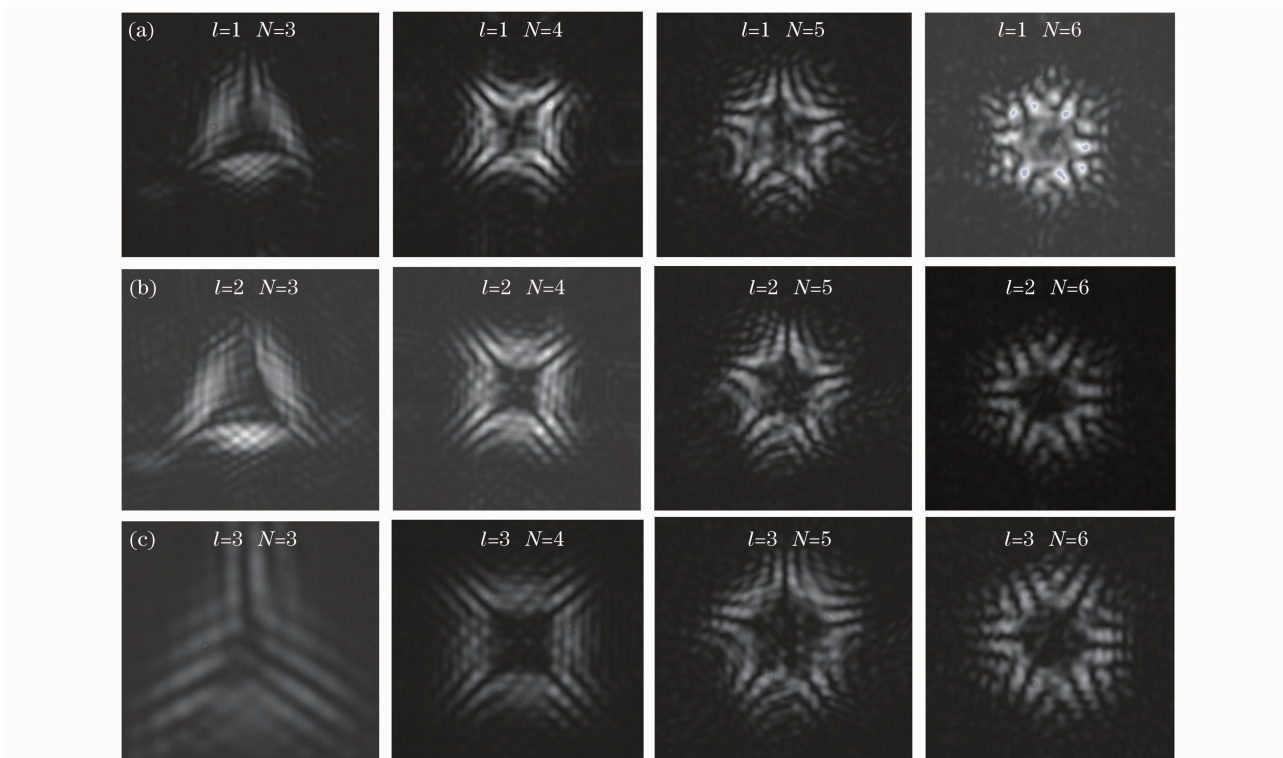


图 4 涡旋光束通过角向分布的狭缝的实验干涉光强图。(a)  $l=1, N=3, 4, 5, 6$ , (b)  $l=2, N=3, 4, 5, 6$ , (c)  $l=3, N=3, 4, 5, 6$

Fig. 4 Experimental interference intensity patterns of a vortex beam through the novel slit with angular transmittance for (a)  $l=1, N=3, 4, 5, 6$ , (b)  $l=2, N=3, 4, 5, 6$ , (c)  $l=3, N=3, 4, 5, 6$

实验的结果和理论基本相符, 其差别在于: 1) 实验中 He-Ne 激光器发出的光入射到螺旋相位板上时, 对光路的调整不能达到如理论模拟中光强完全均匀的涡旋光束, 这样使得实验所获得的干涉光强图光强分布不均匀。2) 实验中需要对光路进行调整使得角向分布狭缝的中心与涡旋光束的中心重合, 但实验中不可能做到理论模拟中的完全重合, 将使得干涉效果变差。3) 实验效果误差的重要一点是角向分布狭缝的制作不够精细, 产生的误差使得实验中的角向分布狭缝与理论模拟中的不同, 因此将导

致实验结果与理论结果有差别。

## 4 结 论

对涡旋光束传输特性的研究有重要意义, 提出一种新式的角向分布狭缝, 主要研究了涡旋光束通过角向分布狭缝后的传输特性。首先从理论上根据衍射积分公式模拟计算出涡旋光束通过角向分布狭缝的干涉图形, 并分析了狭缝的缝数  $N$  和涡旋光束的拓扑电荷数对干涉图形的影响。然后进行了相关实验对理论结果进行了验证。研究结果表明涡旋光

束经过角向分布狭缝后的干涉图形与狭缝数目  $N$  以及涡旋光束的拓扑电荷数  $l$  有关。这是由于涡旋光束变化相位的特性使得其通过狭缝时, 每个缝上的相位是不同的, 这就使干涉结果不同, 而涡旋光束拓扑电荷数的不同以及狭缝数  $N$  的不同都将导致每个缝上的相位的变化, 因此最终影响干涉光强图的变化。

### 参 考 文 献

- 1 Allen L., Beijersbergen M., Spreeuw R. *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Phys. Rev. A.*, 1992, **45**(11): 8185~8189
- 2 Wang Hao, Yang Dexing, Gan Xuetao *et al.*. Analysis of interference of planar vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 517~522  
王 浩, 杨德兴, 甘雪涛等. 平面涡旋光干涉的分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 517~522
- 3 Fu Wenyu, Li Gaoqing, Liu Xiaojun. Propagation of partially coherent vortex beams in the turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2958~2962  
付文羽, 李高清, 刘小军. 部分相干涡旋光束在大气湍流中的远场传输特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 2958~2962
- 4 Bouchal Z., Celechovsky R.. Mixed vortex states of light as information carriers[J]. *New J. Phys.*, 2004, **6**(1): 131~133
- 5 Simpson N., Dholakia K., Allen L. *et al.*. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1): 52~54
- 6 Liu Yidong, Gao Chunqing, Gao Mingwei *et al.*. Realizing high density optical data storage by using orbital angular momentum of light beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 854~858  
刘义东, 高春清, 高明伟等. 利用光束的轨道角动量实现高密度数据存储的机理研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 854~858
- 7 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
- 8 V. Garcés-Chávez, K. Dholakia, W. M. Lee. Interference from multiple trapped colloids in an optical vortex beam [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16): 7436~7446
- 9 L. E. Helseth. Optical vortices in focal regions [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1~6): 85~91
- 10 G. Gbur, T. D. Visser. Phase singularities and coherence vortices in linear optical systems [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 428~435
- 11 L. Rao, J. Pu. Focusing of partially coherent vortex beams by an aperture lens [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(5): 1252~1255
- 12 G. Gbur, R. K. Tyson. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(1): 225~230
- 13 Q. Xie, D. Zhao. Optical vortices generated by multi-level achromatic spiral phase plates for broadband beams [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(1): 7~11
- 14 G. C. G. Berkhout, M. W. Beijersbergen. Method for probing the orbital angular momentum of optical vortices in electromagnetic waves from astronomical objects [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(10): 100801
- 15 Cheng K, Lu B. D.. Spatial correlation properties and correlation vortices of partially coherent vortex beams diffracted by an aperture [J]. *J. Mod. Opt.*, 2009, **56**(9): 1119~1127
- 16 Collins J. R., Stuart A.. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(9): 1168~1177