

# 菱形光阑衍射探测涡旋光束的轨道角动量

刘永欣<sup>1,2</sup> 陶 华<sup>1</sup> 蒲继雄<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 华侨大学信息科学与工程学院, 厦门 福建 361021; <sup>2</sup> 四川大学激光物理与化学研究所, 成都 四川 610064)

**摘要** 从理论和实验两方面研究了涡旋光束经菱形光阑后远场的衍射图样。结果发现, 夫琅禾费衍射图样中暗条纹的数目正好等于入射涡旋光束的拓扑电荷数的数值, 而每个暗条纹的中心都是一个相位奇点。基于这个衍射特性, 提供了一种测量光学涡旋轨道角动量的简易方法。

**关键词** 衍射; 轨道角动量; 涡旋光束; 菱形光阑

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s102010

## Measurement of Orbital Angular Momentum of an Optical Vortex Beam by Using a Rhombus Aperture

Liu Yongxin<sup>1,2</sup> Tao Hua<sup>1</sup> Pu Jixiong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Information Science and Engineering, Institute of Optics and Photonics, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China  
<sup>2</sup> Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

**Abstract** The far-field diffraction pattern of a vortex beam by a rhombus aperture is investigated theoretically and experimentally. It is found that the number of the dark stripes in the Fraunhofer diffraction intensity distribution is just equal to the topological charge value of the measured optical vortex, and the centre of each dark stripe is just a phase singularity point. Based on this property, it provides us a simple way to detect the orbital angular momentum (OAM) of an optical vortex beam.

**Key words** diffraction; orbital angular momentum; optical vortex beam; rhombus aperture

**OCIS codes** 050.4865; 050.1940; 050.1220

## 1 引言

涡旋光束是具有相位因子  $\exp(im\theta)$  的光束, 其相位呈螺旋型分布, 光束中的每个光子携带有  $mh$  轨道角动量, 其中  $m$  称为拓扑电荷数, 也称为轨道角动量。近年来, 由于涡旋光束在光学诱捕、操纵微小粒子及天文方面的应用<sup>[1~4]</sup>, 已倍受人们关注。拓扑电荷数是描述涡旋光束的重要参量, 对拓扑电荷数的测量也越来越引起人们的兴趣。一般利用干涉原理可以确定待测涡旋光束的拓扑电荷数, 例如利用马赫曾德尔加道威棱镜干涉、双缝干涉以及多孔干涉都可探测涡旋光束的拓扑电荷数<sup>[5~8]</sup>。如今, 衍射原理也常被人们用来探测涡旋光束的拓扑电荷数。2009 年, Moreno 等<sup>[9~11]</sup> 分别利用涡旋光束经叉形光栅、环形光阑衍射, 通过分析其衍射图样可确定入射光束的拓扑电荷数。2010 年, Hickmann 等<sup>[12]</sup> 利用等边三角形光阑的衍射得到截

断光束的衍射阵列分布, 其分布特点可反映出入射光束的轨道角动量信息。之后, 本课题组<sup>[13~15]</sup> 提出了利用六边形狭缝光阑、三角环形光阑以及三角形多孔片的衍射对涡旋光束的轨道角动量进行探测的方法, 并分别从理论和实验两方面进行了验证。

而除了叉形光阑、环形光阑、等边三角形光阑等上述形状的光阑外, 光束经过菱形光阑衍射后, 其衍射图样和入射光束的轨道角动量也有关联, 于是可根据衍射图样的特征确定涡旋光束的拓扑电荷数的大小。本文以涡旋光束经菱形光阑衍射为例, 分析其夫琅禾费衍射图样光斑的特点来确定拓扑电荷数的大小。

## 2 理论与实验分析

假设涡旋光束入射到菱形光阑平面, 其场分布可表示为

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(60977068, 10874125)和国务院侨办科研基金(10QZR03)资助课题。

作者简介: 刘永欣(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事激光传输方面的研究。E-mail: niceyongxin@tom.com

$$E_0(x_0, y_0, z = 0) = \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{\omega_0^2}\right) \left(\frac{x_0^2 + y_0^2}{\omega_0^2}\right)^{|m|/2} \exp[i\text{marctan}(y_0/x_0)], \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  是光束宽度,  $m$  为拓扑电荷数。

将(1)式以及菱形光阑透射率函数  $\tau(x_0, y_0)$  代入夫琅禾费衍射积分公式得到观察平面  $z$  上的场分布

$$E(x, y, z) = \frac{-i}{\lambda z} \exp\left[ik\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)\right] \iint E_0(x_0, y_0, z = 0) \tau(x_0, y_0) \exp\left[-\frac{ik}{z}(xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0, \quad (2)$$

式中

$$\tau(x_0, y_0) = \begin{cases} 1, & -\frac{a}{2} \leq x_0 \leq +\frac{a}{2}, -\tan\beta\left(\frac{a}{2} - |x_0|\right) \leq y_0 \leq +\tan\beta\left(\frac{a}{2} - |x_0|\right), \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$

其中  $a, \beta$  参数如图 1 所示。

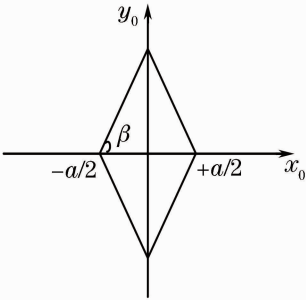


图 1 菱形光阑示意图

Fig. 1 Schematic of a rhombus aperture

由(2)式即可得到观察平面的光强分布为

$$I(x, y, z) = |E(x, y, z)|^2. \quad (3)$$

对(3)式进行数值计算可得到图 2, 即不同拓扑电荷数的涡旋光束经菱形光阑衍射的夫琅禾费图样及其对应的相位图, 其中图 2(a), (d) 中  $m=1$ , (b), (e) 中  $m=2$ , (c), (f)  $m=3$ , 图 2(a) 中内嵌的左下方小图即为菱形光阑的放置方位,  $a=0.6\omega_0, \beta=\pi/3$ . 由图 2(a)~(c) 可以看出, 随着拓扑电荷数的增多, 夫琅禾费图样中暗条纹的个数也增多, 并且暗条纹呈垂直方向分布, 其个数等于入射涡旋光束的拓扑电荷数。光强图与相位图对照比较可以看出, 每个暗条纹中心对应一个相位奇点。可见, 带有  $mh$  轨

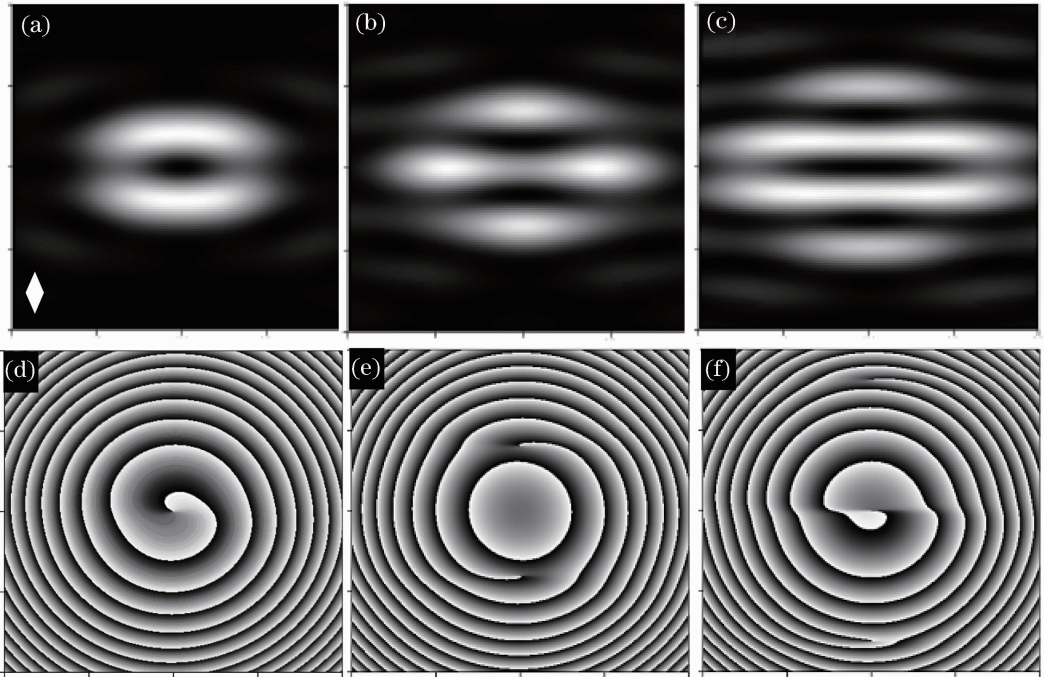


图 2 菱形光阑垂直放置时[图 2(a)左下方所示], 不同拓扑电荷数的涡旋光束经菱形光阑衍射的夫琅禾费图样及其对应的相位图。(a), (d)  $m=1$ ; (b), (e)  $m=2$ ; (c), (f)  $m=3$

Fig. 2 Fraunhofer diffraction patterns for vortex beams with different topological charges diffracted by a rhombus aperture and the phase distributions accordingly, when the rhombus aperture is set vertically [as shown in the inset of Fig. 2(a)]. (a), (d)  $m=1$ ; (b), (e)  $m=2$ ; (c), (f)  $m=3$

道角动量的涡旋光束经菱形光阑衍射后,一个拓扑电荷数为 $+m$ 的相位奇点分解为竖直分布的 $m$ 个独立的拓扑电荷数为 $+1$ 的相位奇点。

改变菱形光阑的放置方位,得到图 3,由图 3 中衍射图样的光强图和对应的相位图可以看出,当菱

形光阑由竖直方位放置改为水平方位后,其衍射图样的形状也发生改变,暗条纹的分布随之变为水平分布,拓扑电荷数为 $+m$ 的相位奇点也呈水平方向分裂成 $m$ 个独立的拓扑电荷数为 $+1$ 的相位奇点。

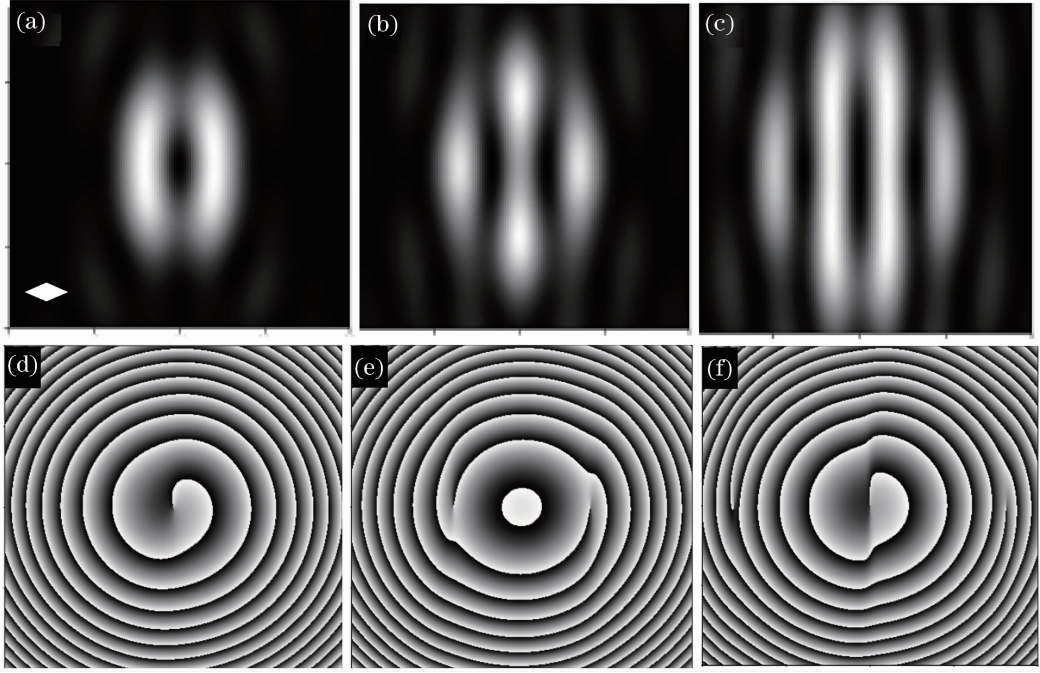


图 3 菱形光阑平行放置时[图 3(a)左下方所示],不同拓扑电荷数的涡旋光束经菱形光阑衍射的夫琅禾费图样及其对应的相位图。(a),(d)  $m=1$ , (b),(e)  $m=2$ , (c),(f)  $m=3$

Fig. 3 Fraunhofer diffraction patterns for vortex beams with different topological charges diffracted by a rhombus aperture and the phase distributions accordingly, when the rhombus aperture is set horizontally [as shown in the inset of Fig. 3(a)]. (a),(d)  $m=1$ , (b),(e)  $m=2$ , (c),(f)  $m=3$

接下来用实验来验证上述理论结果。实验装置如图 4 所示,氦氖激光器发出波长为 632.8 nm 的光束,经过扩束系统后变成准平面波。准平面光波照射到空间光调制器上,再通过圆孔光阑选择一级衍射光斑即拓扑电荷数为 $m$ 的涡旋光束照射到菱形光阑上,经透镜后,在焦点平面用 CCD 记录衍射图样。图 5 为不同拓扑电荷数的涡旋光束经竖直放置

的菱形光阑衍射后得到的实验结果。可以看出,其衍射图样的暗条纹呈竖直分布,且暗条纹的个数和入射涡旋光束的拓扑电荷数相等。与图 2(a)~(c)比较发现,实验结果和理论结果非常吻合。因此,可以根据菱形光阑衍射图样中暗条纹的个数对入射涡旋光束的拓扑电荷数进行测量。

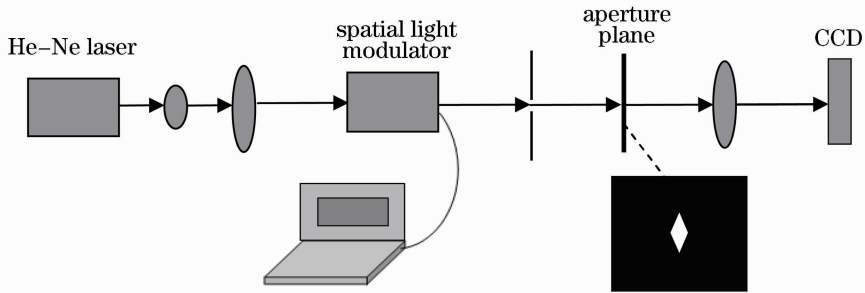


图 4 利用菱形光阑探测涡旋光束拓扑电荷数实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of the experimental setup for measuring the orbital angular momentum of vortex beams by using a rhombus aperture

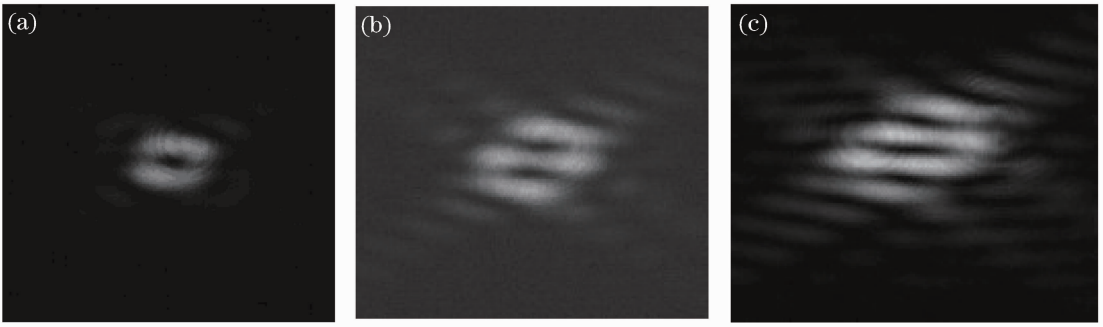


图 5 不同拓扑电荷数的涡旋光束经菱形光阑衍射的夫琅禾费图样(实验结果)。(a)  $m=1$ ; (b)  $m=2$ ; (c)  $m=3$

Fig. 5 Fraunhofer diffraction patterns for vortex beams with different topological charges diffracted by a rhombus aperture (experimental results). (a)  $m=1$ , (b)  $m=2$ , (c)  $m=3$

### 3 结 论

从理论和实验两方面验证了涡旋光束经菱形光阑后远场的衍射图样可以反映入射光束的轨道角动量信息,即夫琅禾费衍射图样中暗条纹的数目正好等于入射涡旋光束的拓扑电荷数的数值,并且每个暗条纹的中心都是一个相位奇点。基于这个衍射特性,提供了一种测量光学涡旋轨道角动量的简易方法。

#### 参 考 文 献

- 1 J. Ng, Zh. Lin, C. T. Chan. Theory of optical trapping by an optical vortex beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **104**(10): 103601
- 2 J. E. Curtis, B. A. Koss, D. G. Grier. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**(1-6): 169~175
- 3 Gregory Foo, David M. Palacios, Grover A. Swartzlander. Optical vortex coronagraph[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3308~3310
- 4 Jae Hoon Lee, Gregory Foo, Eric G. Johnson *et al.*. Experimental verification of an optical vortex coronagraph[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(5): 053901
- 5 J. Leach, J. Courtial, K. Skeldon *et al.*. Interferometric methods to measure orbital and spin, or the total angular momentum of a single photon[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(1): 013601
- 6 H. I. Sztul, R. R. Alfano. Double-slit interference with Laguerre-Gaussian beams [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 999~1001

- 7 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
- 8 Yang-yue Li, Hui Liu, Zi-yang Chen *et al.*. Measuring the topological charge of integer and fraction vortices by using multipoint plates[J]. *Opt. Rev.*, 2011, **18**(1): 7~12
- 9 I. Moreno, J. A. Davis, B. M. L. Pascoguin *et al.*. Vortex sensing diffraction gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2927~2929
- 10 C. S. Guo, L. L. Lu, H. T. Wang. Characterizing topological charge of optical vortices by using an annular aperture[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3686~3688
- 11 Liu Yongxin, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Diffraction characteristics of vortex beams by a fork-shaped grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302012
- 刘永欣, 陈子阳, 蒲继雄. 涡旋光束经叉形光栅的衍射特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302012
- 12 J. M. Hickmann, E. J. S. Fonseca, W. C. Soares *et al.*. Unveiling a truncated optical lattice associated with a triangular aperture using light's orbital angular momentum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**(5): 053904
- 13 Yongxin Liu, Jixiong Pu. Measuring the orbital angular momentum of elliptical vortex beams by using a slit hexagon aperture[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(10-11): 2424~2429
- 14 Liu Yongxin, Tao Hua, Pu Jixiong *et al.*. Detecting the topological charge of vortex beams by using an annular triangle aperture[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2011, **43**(7): 1233~1236
- 15 Yongxin Liu, Pu Jixiong, Lü Baida. Method for exploring the orbital angular momentum of an optical vortex beam with a triangular multipoint plate[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(24): 4844~4847

栏目编辑: 宋梅梅