

# 平面光斜入射叉形光栅获取涡旋光束的特性

孟祥君<sup>1</sup> 朱艳英<sup>1</sup> 陈志婷<sup>1</sup> 魏 勇<sup>2</sup> 张 磊<sup>1</sup> 赵宝林<sup>1</sup> 郭西华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>燕山大学理学院, 河北 秦皇岛 066004)  
(<sup>2</sup>燕山大学里仁学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 基于由计算全息法制作的叉形光栅,研究了平面光束斜入射叉形光栅对涡旋光束特性的影响。从理论上分析平面光束斜入射叉形光栅时,两对称分布涡旋光束间距随平面光与光栅平面的夹角  $\alpha$  变化而增大;实验进一步验证了随  $\alpha$  角的增大,对称分布的衍射涡旋光束亮斑间距也增大。该研究结果对计算全息法产生高质量涡旋光束的实验有一定的指导意义。

**关键词** 全息;叉形光栅;光束斜入射;涡旋光束

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0202008

## Properties of Vortex Beams with Plane Beam Oblique Incidence of Fork-Shaped Grating

Meng Xiangjun<sup>1</sup> Zhu Yanying<sup>1</sup> Chen Zhiting<sup>1</sup> Wei Yong<sup>2</sup> Zhang Lei<sup>1</sup>  
Zhao Baolin<sup>1</sup> Guo Xihua<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)  
(<sup>2</sup>College of Liren, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** Based on the fork-shaped grating produced by the computer-generated hologram (CGH), the effect of the plane beam oblique incidence of fork-shaped grating on the vortex beams property is discussed. The theoretical study shows that when the plane beam tilts into the fork-shaped grating, the distance of each both symmetric distributed vortex beams is changed with the angle  $\alpha$  between the planar optical and the grating. The experiments show that the distance of the symmetric distributed diffractive vortex beams spots increases with  $\alpha$ . The research results show that the generation of high quality vortex beams is feasible with CGH in experiments.

**Key words** holography; fork-shaped grating; beam oblique incidence; vortex beams

**OCIS codes** 050.1940; 050.2770; 050.4865

## 1 引 言

涡旋光束是一种在传播方向上中心光强为零,存在零相位奇异点,螺旋形相位面的环状空心光束<sup>[1,2]</sup>。近年来,随着各类涡旋光束的出现,涡旋光束的产生和应用引起了人们的广泛关注<sup>[3~5]</sup>,出现了诸多产生涡旋光束的方法<sup>[6~9]</sup>。2011年 Chen 等<sup>[10]</sup>结合计算全息法和空间光调制器产生出环形的平顶涡旋光束,该光束有较强的梯度力,有利于捕获微粒。王金刚等<sup>[11]</sup>设计并制备了一种新型类贝

塞尔调制螺旋相位片,该相位结构由类贝塞尔函数表示的振幅信息加载到螺旋相位上构成,能够大幅度消除再现光学旋涡光束过程中产生的旁瓣,从而提高涡旋光束的质量。其中计算全息法产生涡旋光束的原理方法简单易行,在获取涡旋光束时光路搭建比较容易,可以根据需要产生不同阶数的涡旋光束,因此国内外诸多学者对计算全息法获取涡旋光束有较为深入的研究。黎芳等<sup>[12]</sup>研究了涡旋光束与全息光栅不对准时通过全息光栅后的衍射场中光

收稿日期: 2012-08-06; 收到修改稿日期: 2012-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(50875232)资助课题。

作者简介: 孟祥君(1987—),女,硕士研究生,主要从事涡旋光束方面的研究。E-mail: bananajiajia1987@163.com

导师简介: 朱艳英(1961—),女,教授,主要从事光学微操纵及涡旋光束等方面的研究。E-mail: yywlxzyy@163.com

束的衍射特性。Bekshaev 等<sup>[13]</sup>研究了通过叉形光栅进行高角度衍射后的高阶涡旋光束分解成一系列二次单荷的涡旋光束特性。李丰等<sup>[14]</sup>研究了实验中叉形光栅产生的涡旋光束的性质,以及横向偏移、角向偏移和入射光束的椭圆性对涡旋光束的影响,其中角向偏移研究了入射光束与叉形光栅始终保持正入射的情况下,入射光与探测系统间出现夹角时的涡旋光束特性。本文针对平面光束斜入射叉形光栅时所产生的涡旋光束进行理论分析和实验研究,结果表明随光束入射角增大,衍射场中对称分布的正负一级涡旋光束均远离中央主极大。该结论为精准地操控微粒提供一定的理论和实验依据。

## 2 理论计算及分析

计算全息法,是利用涡旋光场与平面光场干涉后得到干涉图样,该干涉图样存储了涡旋光束的相位和振幅信息。利用该图样的计算全息函数即叉形光栅的透射率函数,通过计算机编程绘制出该函数对应的全息图,最后将其记录在某种介质上制成叉

形光栅,用平面光照射光栅获得预期的涡旋光束<sup>[15,16]</sup>。

设有一沿  $z$  轴传播的涡旋光束  $E_1 \exp(i l \theta)$ , 其中  $l$  为光束的阶数(即拓扑荷数),  $\theta$  为涡旋光束与  $z$  轴的夹角;另一束传播方向与  $z$  轴夹角为  $\varphi$  的平面波  $E_2 \exp(ikx \sin \varphi + ikz \cos \varphi)$ , 两光束束腰均在  $z = 0$  的平面上,使两束光在该平面发生干涉,干涉光强分布为

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(l\theta - kx \sin \varphi), \quad (1)$$

式中  $E_1, E_2$  分别为涡旋光束和平面光束的振幅,若取两光束的振幅均为单位振幅,则

$$I = 2 + 2\cos(l\theta - kx \sin \varphi). \quad (2)$$

由(2)式看出,  $(l\theta - kx \sin \varphi)$  的取值决定了干涉光场的强度分布,因此令

$$F = \cos(l\theta - kx \sin \varphi). \quad (3)$$

(3)式为光栅函数表达式,由该式看出,产生涡旋光束的叉形光栅可以看作是在涡旋光束的螺旋相位(第一项)上叠加一个正弦光栅(第二项)<sup>[17]</sup>。图 1 是拓扑荷为 5 的叉形光栅。

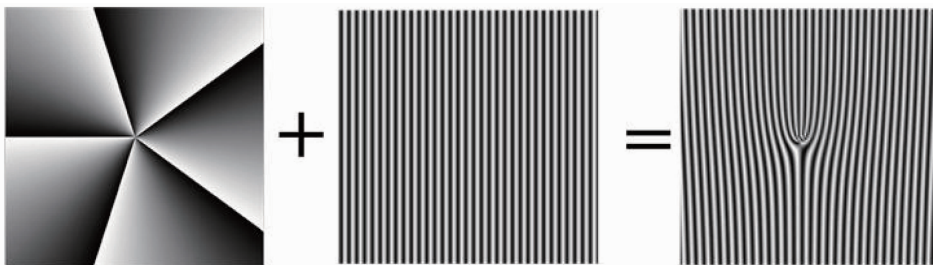


图 1 螺旋相位叠加一个正弦光栅得到拓扑荷为 5 的叉形光栅

Fig. 1 Spiral phase stacking a sinusoidal grating gets a fork-shape grating of topological charge of 5

平面光束正入射的叉形光栅在衍射场中可以获取预期的涡旋光束,而以偏离正入射方向的任意入射角  $\alpha$  (正入射时角  $\alpha$  为  $\pi/2$ ) 入射叉形光栅时,将改变正弦光栅的相位,由此所获取的涡旋光束在衍射场中的分布特性也与正入射时有所不同,因此,平面光斜入射叉形光栅的远场衍射光场分布为<sup>[14]</sup>

$$I_{\text{far}}(\rho', \theta') = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \mathcal{F}[u_{00}(\rho, \theta) \exp(inl\theta)] \times \mathcal{F}[\exp(-inkx \sin \beta) \exp(-inkx \sin \alpha)], \quad (4)$$

式中  $A_n$  为傅里叶展开系数,  $\beta$  为叉形光栅相位中正弦光栅入射角,  $\alpha$  为入射光与光栅平面的夹角,  $l$  为拓扑荷数,  $n$  为傅里叶展开阶数,  $k$  为波数,  $\mathcal{F}$  为进行二维傅里叶变换,  $(\rho, \theta)$  为傅里叶变换前的坐标,  $(\rho', \theta')$  为进行二维傅里叶变换后的坐标。

由(4)式可知,光束斜入射并未影响光束的螺旋相位,仅对正弦光栅相位有所影响。因此,由光束斜

入射正弦光栅即可得到斜入射叉形光栅对衍射场产生的影响。

光束斜入射时,入射光在光栅同一条狭缝上的光波相位是不相等的,由光栅方程  $d(\sin \beta + \sin \alpha) = m\lambda$  可以得到以下两个二次曲线<sup>[18]</sup>

$$x^2 + y^2 = (D \tan \alpha)^2, \quad (5)$$

$$\frac{(d^2 - n^2 \lambda^2) x^2}{n^2 \lambda^2 D^2} - \frac{y^2}{D^2} = 1, \quad (6)$$

式中  $\lambda$  为入射光波长,  $d$  为光栅刻痕宽度,  $D$  为观察平面与入射点的距离,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

根据(5)式和(6)式,分别设定  $D = 300 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,  $d = 0.01 \text{ mm}$ ,  $\alpha = \frac{1}{4} \pi, \frac{1}{3} \pi$ , 通过理论模拟得到衍射亮斑横向分布如图 2 所示,曲线 1, 2 与曲线族 3 的两组交点分别为  $\alpha = \frac{1}{4} \pi$  和  $\alpha = \frac{1}{3} \pi$  时衍射亮斑的位置,由图 2 看出,当光束入射角  $\alpha$  不同时,半

径不同的两个同心圆分别与一族曲线相交于不同的点；圆半径增大，交点间隔随之增大，即当入射角  $\alpha$  增大时，各衍射亮点的位置发生变化，均向着远离中心亮斑的方向移动。

### 3 实验及分析

#### 3.1 叉形光栅设计制作及光路搭建

利用计算全息法通过对(3)式进行编程设计出叉形光栅,图3中(a)~(c)分别为用胶片记录下来的拓扑荷  $l=1, 2, 4$  的叉形光栅,胶片上的条纹密度为每毫米10条亮条纹。对胶片进行显定影处理就可制作出各阶叉形光栅。图3(d)~(f)分别为利用

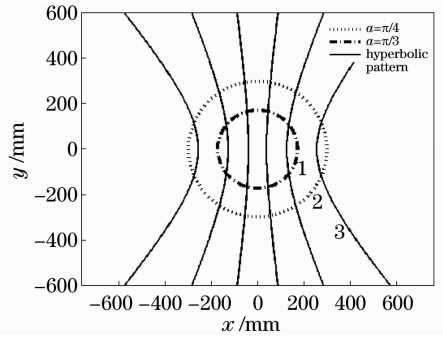


图2 二次曲线交点示意图

Fig. 2 Schematic of secondary curve intersection  
这些叉形光栅获取的  $l=1, 2, 4$  的涡旋光束。

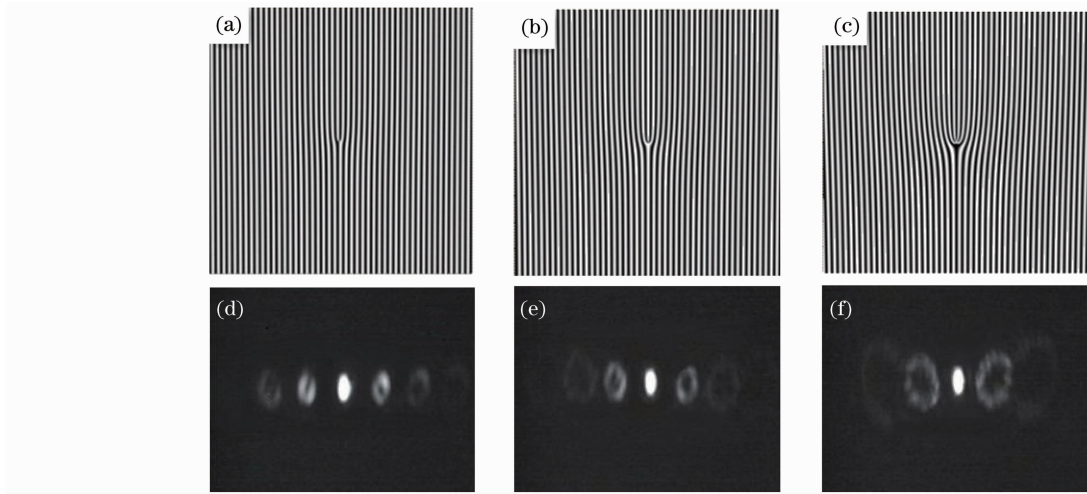


图3 叉形光栅(a)  $l=1$ ; (b)  $l=2$ ; (c)  $l=4$ ; 涡旋光束(d)  $l=1$ ; (e)  $l=2$ ; (f)  $l=4$

Fig. 3 Fork-shaped gratings of (a)  $l=1$ ; (b)  $l=2$ ; (c)  $l=4$ ; vortex beams of (d)  $l=1$ ; (e)  $l=2$ ; (f)  $l=4$

利用制作好的拓扑荷为2的叉形光栅搭建实验光路,如图4所示。采用波长为650 nm的半导体激

光器作为入射光源,激光束照射在叉形光栅上,透射光束经过透镜聚焦后进入显微系统,经显微系统反

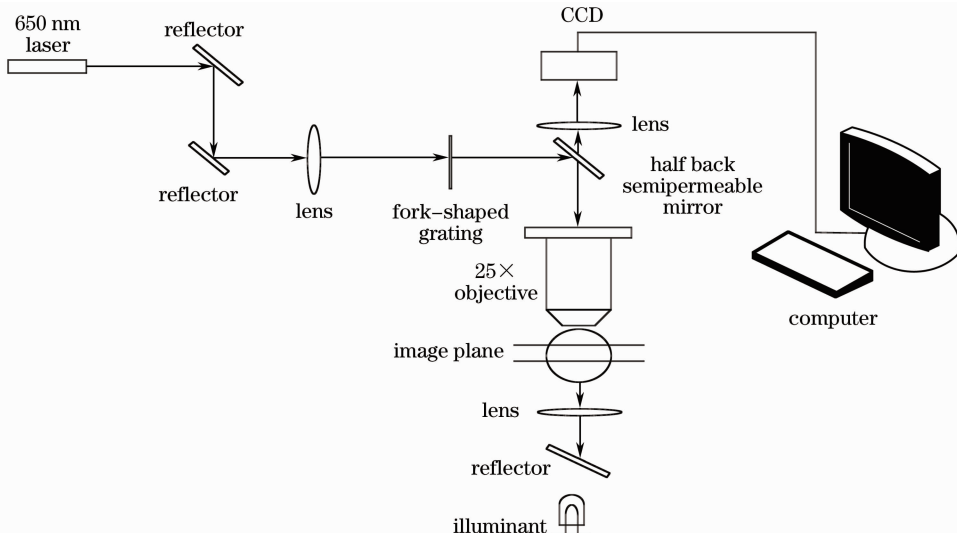


图4 实验光路图

Fig. 4 Experimental optical setup

射后由 CCD 接收,在连接 CCD 的计算机显示器上就可以观察到透射光束。进一步改变入射光与叉形光栅平面的角度,对光束斜入射叉形光栅的情况进行实验研究,并观察 CCD 拍摄的衍射场。

### 3.2 结果与讨论

图 5 为实验中当入射光与拓扑荷为 2 的叉形光栅夹角  $\alpha$  增大时,衍射光场中的光强分布图,图 5(a)和(b)为  $\alpha$  分别为  $\frac{\pi}{6}$ ,  $\frac{\pi}{3}$  时衍射光场中的光强分布图,图 5(c)为  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  即正入射时衍射光场的光强

分布图。由图 5 可以看出,衍射场中两束涡旋光束对称的分布在中央主极大的左右两侧,随入射光与叉形光栅平面夹角增大,各衍射场中中央主极大位置不变,正负一级空心光束间隔增大,逐渐偏离中央主极大,而涡旋光束半径和光束宽度等均无变化。该实验结果与理论分析相符合,斜入射时叉形光栅相位仅正弦光栅相位受入射角  $\alpha$  的影响,使得  $\pm 1$  级涡旋光束的位置发生改变,入射角  $\alpha$  逐渐增大时,以中央主极大为中心不变,  $+1$  级和  $-1$  级衍射涡旋光束同时向远离中央主极大的方向移动,两级间距增大。

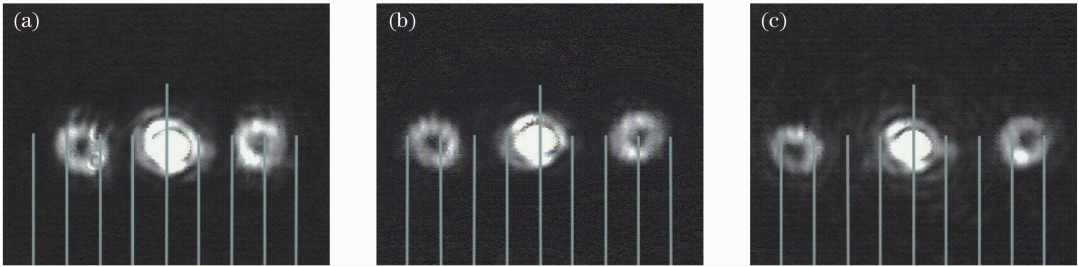


图 5 衍射光场的光强分布。(a)  $\alpha = \pi/6$ ; (b)  $\alpha = \pi/3$ ; (c)  $\alpha = \pi/2$

Fig. 5 Optical field distributions of diffraction light field. (a)  $\alpha = \pi/6$ ; (b)  $\alpha = \pi/3$ ; (c)  $\alpha = \pi/2$

## 4 结 论

从理论上可知,叉形光栅相位是由螺旋相位叠加一个正弦光栅得到,光束斜入射时衍射亮斑位置由两个二次曲线的交点决定,两曲线交点即为斜入射衍射亮斑的位置。当平面光与叉形光栅平面的夹角  $\alpha$  增大时,各衍射亮斑的位置发生变化,均向着远离中心亮斑的方向移动。实验进一步验证了理论分析的结果,即当入射角  $\alpha$  变大时,对称分布的两级衍射涡旋光束间距变大,并远离中央主极大;反之其间距变小,且靠近中央主极大。该研究结果为准确高效地捕获和操纵微粒提供了理论和实验依据,同时可以根据实验需要,适当调节两衍射涡旋光束的间距,捕获处于调制范围内的所需粒子,达到预期的实验目标。

### 参 考 文 献

- 1 Ding Panfeng, Pu Jixiong. Propagation of Laguerre-Gaussian vortex beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 338~342  
丁攀峰, 蒲继雄. 拉盖尔高斯涡旋光束的传输[J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 338~342
- 2 Yangjian Cai, Xuanhui Lu, Qiang Lin. Hollow Gaussian beams and their propagation properties[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(13): 1084~1086
- 3 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
- 4 A. Jesacher, S. Fürhapter, C. Maurer *et al.*. Reverse orbiting of microparticles in optical vortices [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(19): 2824~2826
- 5 M. Dienerowitz, M. Mazilu, P. J. Reece *et al.*. Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 4991~4999
- 6 R. Kumar, D. S. Mehta, A. Sachdeva *et al.*. Generation and detection of optical vortices using all fiber-optic system [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(13): 3414~3420
- 7 Zhu Yanying, Shen Junfeng, Dou Hongxing *et al.*. A new design of computer generated holography to obtain high order Bessel-like beam [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(8): 1263~1267  
朱艳英, 沈军峰, 窦红星等. 计算全息法获取高阶类贝塞尔光束的新设计 [J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(8): 1263~1267
- 8 Q. S. Xie, D. M. Zhao. Optical vortices generated by multi-level achromatic spiral phase plates for broadband [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(1): 7~11
- 9 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Zhang Qian'an *et al.*. Liquid axicon for generating single bottle beam with size adjustable [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1008002  
程治明, 吴逢铁, 张前安等. 液体轴棱锥产生尺寸可调的单个局域空心光束 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1008002
- 10 J. N. Chen, Y. J. Yu, F. F. Wang. Production of annular flat-topped vortex beams [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(1): 011402
- 11 Wang Jin'gang, Bu Jing, Wang Mingwei *et al.*. New type of Bessel-like amplitude modulation spiral phase plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622001  
王金刚, 步敬, 王明伟等. 新型类贝塞尔振幅调制螺旋相位片 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622001
- 12 Li Fang, Jiang Yuesong, Ou Jun *et al.*. Diffraction characteristic of a misaligned vortex beam through a phase-hologram grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(8): 229~236  
黎芳, 江月松, 欧军等. 涡旋光束与相位全息光栅不对准时的衍射特性研究 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(8): 229~236

- 13 A. Bekshaev, O. Orlinska. Optical vortex generation with a "fork" hologram under conditions of high-angle diffraction[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(10): 2006~2016
- 14 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
- 15 Z. Y. Guo, S. L. Qu, S. T. Liu. Generating optical vortex with computer-generated hologram fabricated inside glass by femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(1): 286~289
- 16 Cai Tian. Generation and Application of Hollow Beams[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005  
蔡田. 空心光束的产生和应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005
- 17 Chen Jun. The Study on Modulation and Application of the Modified Optical Vortices[D]. Tianjin: Nankai University, 2010  
陈君. 新型光学涡旋的调控与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2010
- 18 Cai Fuzhong, Ma Baomin. The one demention and orthogonal grating diffraction design of thin beam inclined incidence[J]. *Physics Experimentation*, 1993, **13**(3): 100~102  
蔡履中, 马宝民. 细光束斜入射时一维及正交光栅的衍射图样[J]. *物理实验*, 1993, **13**(3): 100~102

栏目编辑:李文喆