

## 计算全息法产生涡旋光束的实验

朱艳英,姚文颖,李云涛,魏 勇,王锁明

(燕山大学 理学院,河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 基于计算全息法,通过计算和模拟得到了涡旋光束与平面光束干涉所产生的位错条纹,用胶片记录位错条纹并制作成位错光栅,在自行设计搭建的光路中进行实验获得 1~4 阶的涡旋光束。实验结果表明,各阶涡旋光束的空心半径随着阶数的增大而逐渐增大,与理论分析相符合;实验进一步观察到各阶光栅的二级甚至三级衍射光束,当入射光束中心与光栅位错中心重合时,能够产生光强分布对称的涡旋光束,当光束中心和光栅中心不重合时,产生的涡旋光束的光强分布不对称。这为后续以涡旋光束为捕获光束的光镊实验的进一步拓展及应用提供了理论和技术支持。

**关键词:** 涡旋光束; 计算全息法; 干涉条纹; 位错光栅

**中图分类号:** TN249; O438 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-3907-05

## Experiment of vortex beam generated by method of computer generated holography

Zhu Yanying, Yao Wenying, Li Yuntao, Wei Yong, Wang Suoming

(Physics Department, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Based on the computer generated holography, the dislocation fringes caused by the interference between the vortex beam and the plane beam were obtained through simulation and experiment. The dislocation gratings were made by films which recorded these interference fringes. With our own designed optical path, 1-4 order vortex beam were obtained in the experiment. The experimental results show that radius of the vortex beam will increase gradually with the increasing the orders, which are consistent with the theoretical analysis. The second and third diffraction beams of the gratings are observed further in the experiment. The vortex beam of symmetrical intensity distribution can be produced when the center of incident beam overlaps with the center of dislocation grating, otherwise, the distribution of the vortex beam will be asymmetrical if the center of incident beam does not overlap with the center of dislocation grating. This work provides theoretical and technical support for further development of the optical tweezers based on vortex beam as the trapping beam.

**Key words:** vortex beam; computer generated holography; interference fringes; dislocation gratings

收稿日期: 2014-04-05; 修订日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(50875232)

作者简介: 朱艳英(1961-),女,教授,博士生导师,主要从事激光传输和光微操纵技术及应用研究。Email:yywlxzyy@163.com

## 0 引言

涡旋光束是具有螺旋状相位波前的光束,其相位是以  $2\pi$  整数倍的螺旋形式围绕光轴变化,且光束中心光强为零<sup>[1]</sup>,因此又称暗中空光束。涡旋光束的光学涡旋在传播过程中有类似流体涡旋绕中心旋转的现象<sup>[2]</sup>。

涡旋光束的产生有多种方法,常见的主要有几何光学法、模式变换法、横模选择法、螺旋相位片法、光学全息法、计算全息法等<sup>[3-8]</sup>,还有通过在光束中加入倾斜的相位波前来获得涡旋光束的方法<sup>[9]</sup>。其中计算全息法是研究最多的一种方法。这些方法又可以产生不同类型的涡旋光束,例如叉形光栅可以产生拉盖尔高斯光束,位相跃变的波带片法可以产生局域贝塞尔光束,旋转三棱镜型全息图可以产生高阶贝塞尔光束,全息法可以产生高阶马提厄光束等<sup>[3]</sup>。计算全息法的原理简单,所获取的光栅透过率高,因而光能损失较小,实验光路搭建简捷,还可根据实验需求获取不同阶数的涡旋光束。近年来,国内外很多学者对计算全息法获取涡旋光束进行了较深入的研究,对相位型和振幅型两种光栅进行了优化,并利用液晶显示技术(LCD)代替传统的光栅进行实验,获得了很好的效果<sup>[10-15]</sup>。最近,沈军锋等人基于计算全息技术和夫琅禾费衍射理论,设计了一种新的获取高阶类贝塞尔涡旋光束的计算全息法<sup>[6]</sup>。

文中基于计算全息法,利用自行设计制作的光栅进行实验,产生了不同阶数的涡旋光束,得到的 2、4 阶涡旋光束具有较好的空心特性,利用所获得的各阶暗斑直径不同的空心光束可操控不同的粒子。该方法与传统光镊方法相比有以下优点:由于空心涡旋光束的轴向区域的零光强对囚禁粒子的光学热损伤减至最小,使其对生物粒子的囚禁更为重要;所囚禁粒子的相对折射率可以大于 1,也可以小于 1;由于空心涡旋光束所携带的轨道角动量可以使粒子旋转,可用于囚禁粒子的四维操控。

## 1 理论部分

### 1.1 计算全息原理

当两列波函数分别为  $E_1 \exp(i\varphi_1)$  和  $E_2 \exp(i\varphi_2)$  的光束发生干涉时,干涉光强为<sup>[16]</sup>:

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

式中:  $2E_1 E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$  项描述干涉光强的空间分布特性,选择这项作为光栅透过率函数来制作光栅,再将  $E_1 \exp(i\varphi_1)$  作为参考光束照射该光栅,在透射光束中能够再现光束  $E_2 \exp(i\varphi_2)$ ,此为全息术原理。计算全息法就是基于这种原理,即利用已有光束来获取所需的具有某种特性光束——涡旋光束。

假设一沿  $z$  轴传播的涡旋光束  $E_1 \exp(i l \theta)$ ,其中  $l$  表示该涡旋光束的阶数;另设一平面波传播方向与  $z$  轴夹角为  $\alpha$ ,则该平面波函数为:

$$E_2 \exp(ikx \sin \alpha + ikz \cos \alpha)$$

设两光束的束腰处于  $z=0$  平面上,则当两光束在该平面发生干涉时,干涉光强分布为:

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

若取两束光振幅为单位振幅时,则

$$I = 2 + 2 \cos(l\theta - kx \sin \alpha) \quad (3)$$

若取  $l\theta - kx \sin \alpha = 2n\pi$  ( $n=0,1,2,\dots$ ) 时,干涉强度为极大值;取  $l\theta - kx \sin \alpha = 2n\pi + \frac{\pi}{2}$  ( $n=0,1,2,\dots$ ) 时,干涉强度为极小值。

因此,  $l\theta - kx \sin \alpha$  的取值决定了干涉强度的大小分布,令

$$F = \cos(l\theta - kx \sin \alpha) \quad (4)$$

对该式进行模拟可以得到干涉条纹的分布图案,并用特殊介质记录这些图案即可制作成获取涡旋光束的光栅。

### 1.2 光束的产生

公式(4)中的光栅透射率函数按傅里叶展开可写为<sup>[15]</sup>:

$$t(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} t_n \exp(il\theta - ikx \sin \alpha) \quad (5)$$

当用高斯平面光束照射时,光栅后表面的光束为:

$$\exp(-r^2/\omega^2) t(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(-r^2/\omega^2) t_n \exp(il\theta - ikx \sin \alpha) \quad (6)$$

由衍射原理获知远场的衍射光束能够表示为近场的傅里叶变换,则远场的光强分布为:

$$I' = F[\exp(-r^2/\omega^2) t(r, \theta)] \quad (7)$$

对远场光束分布进行模拟,如图 1 所示。可以看出,一级衍射光束产生了涡旋光束。

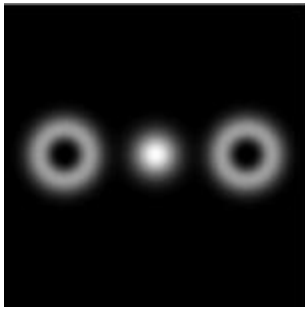


图 1 远场衍射光束  
Fig.1 Far field diffraction beam

## 2 实验设计

### 2.1 光栅制备

设光束波长为 632 nm, 螺旋波与平面波发生干涉时, 其夹角为  $\pi/2$ , 根据设定的条件对公式(4)进行编程, 得到阶数  $m=1, 2, 3, 4$  阶干涉条纹图案(见图 2)。将所得到的 1~4 阶干涉条纹按照一定比例缩小到胶片上, 并对胶片进行显定影处理, 所得到的含有干涉条纹的胶片可以看作是能够产生各阶涡旋光束的光栅。由图 2 可以看出, 各阶干涉条纹中含有位错结构, 因此常将这些条纹称为位错条纹, 据此所制作的光栅称为位错光栅。

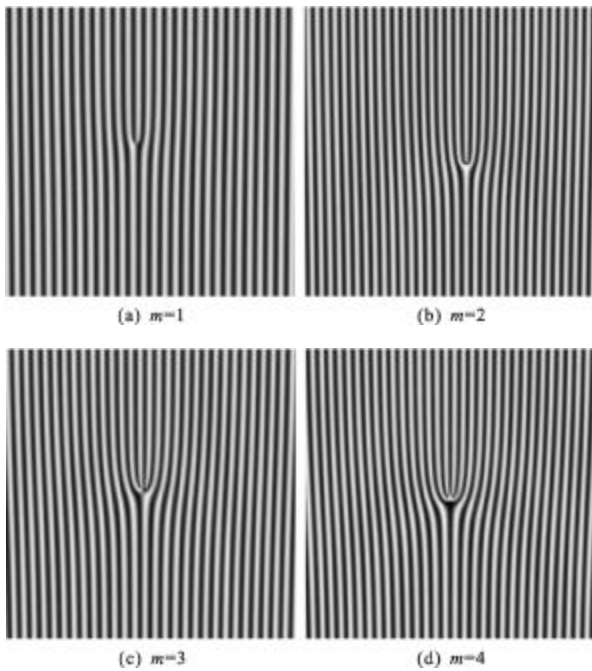


图 2 不同阶数的位错条纹图案  
Fig.2 Fringes pattern of dislocation of different orders

当  $m=0$  时, 光束不具有螺旋相位, 此时光波为

平面波, 将  $m=0$  带入公式(3)中则表示两个平面波的干涉, 其干涉条纹为一系列直条纹(见图 3)。利用该图案制作 0 阶光栅, 可以用来对 1~4 阶高位错光栅的实验结果进行对比。

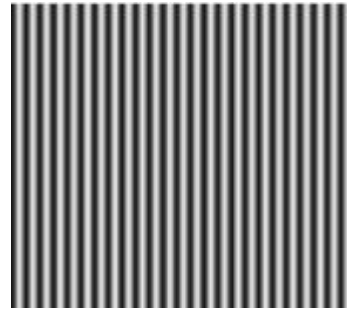


图 3 零阶干涉条纹  
Fig.3 Zero order interference fringes

### 2.2 光路设计及搭建

图 4 是设计的光路, 由激光器出射的光束照射在光栅上, 光栅透射光束经过透镜聚焦后再由 CCD 接收, 最后在计算机显示器上观察光栅衍射的实验结果。

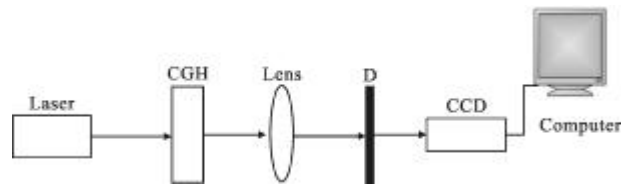


图 4 实验光路图  
Fig.4 Optical path diagram of the experiment

实验过程中, 在图 4 D 处加了一个滤光器件, 以防止照射到 CCD 上的光功率过大而影响实验结果。实验使用的激光器波长为 632nm, CCD 的像素为 756x568。

将阶数为 0~4 阶的光栅分别放在图 4 光路 CGH 处进行实验, 通过 CCD 得到的衍射光场分布如图 5 所示。

## 3 实验结果及分析

由图 5(a)可以看出, 0 阶干涉条纹的光栅透射光束的衍射光为平面光, 不具有空心性质; 图 5(b)~(e)为 1~4 阶位错光栅的一级和二级衍射光, 是具有空心特性的涡旋光束; 比较 1~4 阶一级涡旋光束可以看出, 空心部分的半径大小随着阶数的增大而逐渐增大, 这与理论分析相符合; 在操纵粒子的实验中, 可根据所操纵的粒子大小选取相应暗斑直径的

衍射空心光束。

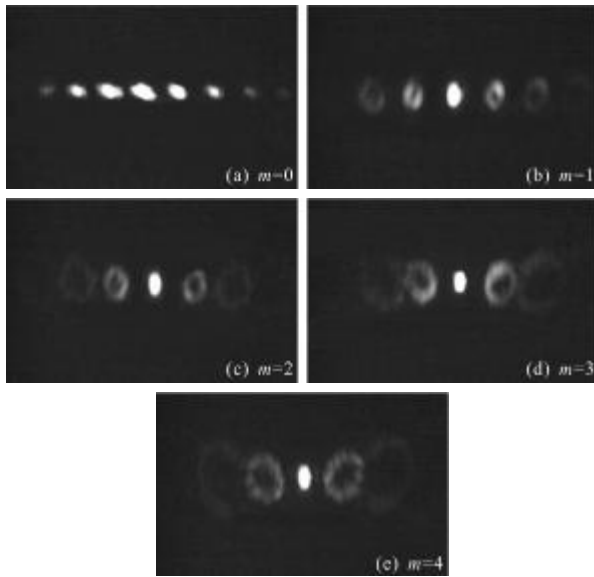


图 5 各阶透射光束

Fig.5 Transmitted beams of different orders

从图 5(a)和(b)中还可以观察到三级衍射光束;图 5(d)和(e)中 3 阶和 4 阶光栅的二级衍射光斑与一级衍射光斑有部分重叠,这主要是受到胶片上干涉条纹间距大小的影响。胶片干涉条纹间距相对较大时,高阶光栅就无法达到分离各级衍射光束的要求,所以在操纵粒子实验中,可以只取一级衍射空心光束。

利用具有位错条纹的光栅产生涡旋光束,其原理是:当光束照射光栅位错部分时(图 6(a)中所圈中心即为 1 阶光栅的位错),其透射光束的衍射光可得涡旋光束,如图 6(b)的一级、二级衍射图样,此时

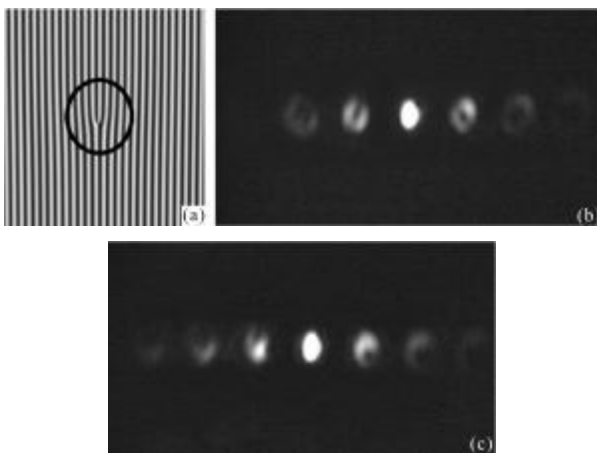


图 6 光栅位错部分及中心不重合时透射光的光强分布

Fig.6 Transmitted light intensity distribution when dislocation part of grating and center do not coincide

入射光束中心与位错中心重合,能够产生很好的涡旋光束。当入射光束中心与位错中心不重合且偏离不太大时,透射光的一级衍射光也能够产生涡旋光束的环状特性,但此时衍射环状光束的光强分布发生偏移且不对称,如图 6(c)所示,此时涡旋光束的轨道角动量的分布发生明显变化。利用这一点也可实现对粒子的进一步操纵。

实验结果表明,利用计算全息法获取涡旋光束,其原理设计简单,光路搭建简捷,能够较好地用在光镊系统中,但在将透射光束的一级衍射光耦合进入光镊系统时需对透射光束进行分离,该实验用胶片制作光栅,胶片的分辨率影响光栅条纹间距的分布,而光栅条纹间距决定了透射光束各级衍射光的分离,这是该实验三级与四级衍射光部分重叠的原因之一。CCD 像素较低也是影响实验效果的原因之一。

## 4 结论

文中利用计算全息法计算和模拟了涡旋光束与平面光束的干涉条纹,并获得了位错条纹,进一步用胶片制作了 1~4 阶位错光栅,在自行设计搭建的光路中进行实验,得到 1~4 阶的涡旋光束,通过对所获得的各阶涡旋光束进行分析比较,可选取相应暗斑直径的衍射空心光束进行微粒子的操控。实验进一步验证了当入射光束中心与光栅位错中心不重合时也能够产生涡旋光束,但其环状光束光强分布明显不对称。

该实验所获得的各级半径不同的涡旋光束,可以在光镊实验平台上捕获、操纵、旋转和囚禁各种不同尺寸和种类微纳米粒子,拓展了光镊操控范围,为光镊、光旋转、光囚禁及纳米技术的进一步发展提供了理论和技术支持。

## 参考文献:

- [1] Lu Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang, et al. Optical vortex beams and optical vortices [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(1): 50-56. (in Chinese) 陆璇辉, 黄慧琴, 赵承良, 等. 涡旋光束和光学涡旋[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(1): 50-56.
- [2] Rozas D, Sacks Z S, Swartzlander G A, et al. Experimental observation of fluid-like motion of optical vortices [J]. Phys Rev Lett, 1997, 79(18): 3399-3402.



- [3] Yin Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong, et al. Generation of hollow laser beams and their application in modern optics[J]. *Progress in Physics*, 2004, 24(3): 336-380. (in Chinese)  
印建平, 刘南春, 夏勇, 等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. *物理学进展*, 2004, 24(3): 336-380.
- [4] Ma Liang, Wu Fengtie. New combined positive axicon for generating bottle beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1988-1991. (in Chinese)  
马亮, 吴逢铁. 新型组合正轴棱锥产生局域空心光束[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1988-1991.
- [5] Wang Kuilong. Focal shift in focused anomalous hollow beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 869-874. (in Chinese)  
王奎龙. 聚焦异常空心光束的焦移 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 869-874.
- [6] Gao Weijian, Wang Wenbao, Zhu Shiqun. Obtaining hollow beam using dislocation grating [J]. *Acta Optical Sinica*, 1998, 18(10): 1467-1469. (in Chinese)  
高伟建, 王文宝, 朱士群. 利用位错光栅实现中空光束[J]. *光学学报*, 1998, 18(10): 1467-1469.
- [7] Xu Bijun. Propagation properties of elliptical symmetry anomalous hollow beams through a circular aperture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1985-1987. (in Chinese)  
徐弼军. 椭圆对称奇异空心光束通过硬边光阑的传输特性 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1985-1987.
- [8] Zhu Yanying, Shen Junfeng, Dou Hongxing, et al. A new design of computer generated holography to obtain high order Bessel-like beam [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(8): 1263-1268. (in Chinese)  
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): 1263-1268.
- [9] Vyas Sunil, Senthilkumaran P. Vortices from wavefront tilts [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48: 834-840.
- [10] Zhao Chongyang, Feng Xiuzhou, Fang Jianxing. Production of hollow beam by dislocation grating with LCD [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(2): 116-118. (in Chinese)  
赵重阳, 冯秀舟, 方建兴. 用 LCD 产生位错光栅生成空心光束[J]. *应用激光*, 2006, 26(2): 116-118.
- [11] Bekshaev A Ya, Karamoch A I. Spatial characteristics of vortex light beams produced by diffraction gratings with embedded phase singularity [J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 1366-1374.
- [12] Bekshaev A Ya, Sviridova S V. Effects of misalignments in the optical vortex transformation performed by holograms with embedded phase singularity[J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 4866-4876.
- [13] Ashok Kumar, Pravin Vaity, Yedhu Krishna, et al. Engineering the size of dark core of an optical vortex [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48: 276-281.
- [14] Qi Xiaoqing, Gao Chunqing, Liu Yidong. Generation of helical beams with pre-determined energy distribution based on phase modulation grating [J]. *Acta Physics Sinica*, 2010, 59(1): 264-270. (in Chinese)  
齐晓庆, 高春清, 刘义东. 利用相位型衍射光栅生成能量按比例分布的多个螺旋光束的研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 264-270.
- [15] Li Feng, Gao Chunqing, Liu Yidong, et al. Experimental study of the generation of Laguerre-Gaussian beam using a computer-generated amplitude gratin[J]. *Acta Physics Sinica*, 2008, 57(2): 860-866. (in Chinese)  
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] Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jingsong. *Applied Optics and Optical Physics* [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2005: 56-57. (in Chinese)  
石顺祥, 张海兴, 刘劲松. *物理光学与应用光学*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 56-57.