

文章编号: 1002-1582(2017)02-0114-04

高阶涡旋光束生成技术研究^{*}

高衍, 付时尧, 张世坤, 王庆, 胡新奇

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要: 应用液晶空间光调制器加载螺旋相位片的方法可以高效地生成涡旋光束,但由于液晶空间光调制器分辨率有限,在加载高阶螺旋相位片时其中心会出现相位失真,造成涡旋光束质量不高。通过在螺线相位片中心区域引入闪耀光栅的方法,得到了光束质量较高的高阶单模涡旋光束和多模涡旋光束,为生成高阶涡旋光束提供了一种很好的方法。

关 键 词: 涡旋光束; 轨道角动量; 空间光调制器; 闪耀光栅

中图分类号: TN24; O43 文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2017.02.004

Research on generation of high-order vortex beams

GAO Yan, FU Shiyao, ZHANG Shikun, WANG Qing, HU Xinqi

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Loading a spiral phase plate on the liquid crystal spatial light modulator is a good method to generate high quality vortex beams. While due to the limited resolution of liquid crystal spatial light modulator, loading high order spiral phase plate contributes to phase distortion in the center, and results in lower beam quality. By the method of using blazed grating in the center of spiral phase plate, this limitation is overcome, and the high quality of high-order single-mode or multiplexed vortex beams are obtained, a good method is provided to generate high-order vortex beams.

Key words: vortex beams; orbit angular momentum; spatial light modulator; blazed grating

0 引 言

涡旋光束是一种具有螺旋波前结构的激光光束,其携带有轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)的特性引起了国内外学者的广泛关注。由于涡旋光束的相位呈螺旋分布,其光束中心处的相位无法确定,因此存在一个相位奇点,使其截面光强呈环状分布。Allen 等人已经证明了涡旋光束的相位可表示为 $\exp(il\varphi)$, 其中 φ 为幅角, l 为角量子数,也称为拓扑电荷数^[1]。涡旋光束中的每一个光子

携带的轨道角动量值为 $l\hbar$ (约化普朗克常量)。不同阶次的涡旋光束可构成一个无穷维希尔伯特空间,因此可用于光通信中的模式复用来拓展其信道容量^[2-4]。涡旋光束可偏振合成为矢量光束^[5,6], 同时也在光学扳手^[7,8]、量子通信^[9]等领域有广泛的应用。

常见的涡旋光束有拉盖尔-高斯光束、贝塞尔光束等,其中拉盖尔-高斯光束作为圆形镜共焦腔的行波场是实验室中最常使用的涡旋光束。本文所讨论的涡旋光束就是拉盖尔-高斯光束。国内外学者对

* 收稿日期: 2016-05-13; 收到修改稿日期: 2016-06-12

E-mail: gaoyan_victor@163.com

基金项目: 国家 973 资助项目(2014CB340004)

作者简介: 高衍(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光与光电子技术方面的研究。

通讯作者: 付时尧(1992—),男,博士研究生,主要从事新型结构光束的生成、检测及应用技术方面的研究。

E-mail: fushiyao@bit.edu.cn

涡旋光束的生成技术有着广泛的研究,主要有两种方法,即腔内选模法和腔外转化法。腔内选模法是通过在激光腔内引入低阶模式损耗,使激光腔内高阶模谐振,即生成了拉盖尔-高斯光束。但是这种方法腔内损耗巨大,不易获得高功率的输出,也不易获得高阶模式^[10,11]。腔外转化法就是在激光腔外将其他光束转化为涡旋光束,主要有模式转换器法^[12]、螺旋相位片法^[13,14]和复合光栅法等。

液晶空间光调制器(Liquid-Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)是一种可给光束引入相位调制的器件,通过给其加载不同的全息图可实现不同的相位调制功能^[15]。通过将螺旋相位片的全息光栅加载在液晶空间光调制器上,可实现基模高斯光束到涡旋光束的转化。然而,对于高阶涡旋光束来说,该方法效果不佳。本文系统地研究了该方

法无法获得光束质量较好的高阶涡旋光束的原因,并提出了解决方案,成功地生成了高阶涡旋光束及高阶复用涡旋光束。

1 LC-SLM 模拟螺旋相位片生成高阶涡旋光束的局限性

1.1 仿真研究

螺旋相位片的相位分布为

$$\phi = \arg[\exp(il\varphi)] \quad (1)$$

式中 \arg 表示取幅角; l 为角量子数。根据式(1),利用 Matlab 数字模拟并生成了不同阶次的螺旋相位片的全息光栅。同时,利用标量衍射理论^[16,17],得到了基模高斯光束通过所述全息光栅后的远场衍射光斑,即不同阶次的涡旋光束,如图 1 所示。

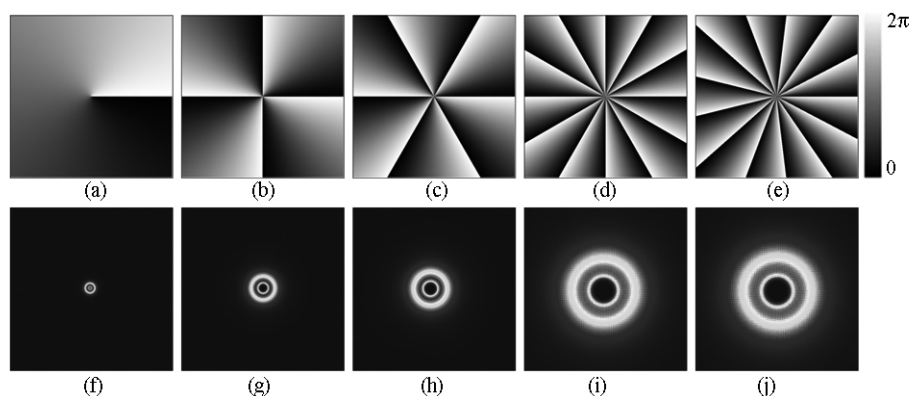


图 1 不同阶次的螺旋相位片的全息光栅及其对应的远场衍射光斑

(a)~(e)分别为+1阶、-4阶、-6阶、+12阶和-13阶螺旋相位片的全息图;(f)~(j)依次为高斯光束照射到(a)~(e)所示的光栅后得到的对应阶次的涡旋光束。

1.2 实验验证

实验装置如图 2 所示。

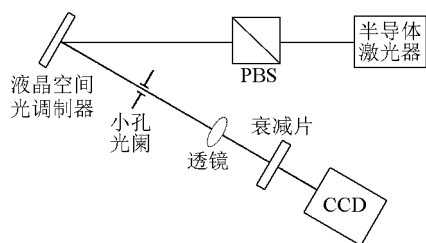


图 2 实验装置

图 2 中 LD 光源用于产生 1550nm 波段的基模高斯光束,其束腰半径 w_0 为 1.5mm。本实验所使用的液晶空间光调制器为德国 Holoeye 公司生产的纯相位型空间光调制器,其衍射效率为 80%,适用波段为 1400~1700nm,且该液晶空间光调制器只对水平线偏振光进行纯相位调制。为了满足液晶空间光调制器的工作特性,在光路中放置偏振分光棱镜(PBS)。基模高斯光束经过 PBS 后,透射光为水

平线偏振光。水平线偏光经液晶空间光调制器调制后,经过小孔光阑和正透镜入射到红外相机中。小孔光阑直径为 1.2cm,其作用是滤除杂散光,同时保证涡旋光束不发生小孔衍射。透镜的焦距 $f = 200\text{mm}$,其作用是对光场进行傅里叶变换,便于观察涡旋光束的远场衍射光斑。衰减片的作用是防止光束强度过大超过红外相机阈值。红外相机的像面置于正透镜的像方焦平面处,用于观察实验所生成的涡旋光束的光场分布。

我们在空间光调制器上分别加载了如图 1(a)~图 1(e)所示的螺旋相位片,通过红外相机观察到的远场衍射图案如图 3 所示。

通过图 3 与图 1 的对比可以看出,通过给空间光调制器加载螺旋相位片的全息光栅图可在腔外将基模高斯光束转化为任意阶涡旋光束。其中,对于较低阶螺旋相位片,实验结果与仿真结果高度吻合;对于较高阶涡旋光束(图 3(d)和图 3(e)所示的+12

阶和-13阶),可以发现在环状光场的中心存在亮斑,即获得的涡旋光束质量不高。这是因为螺旋相位片中心相位分布不确定,导致高阶螺旋相位片中

心处相位跳变较大。同时,由于 SLM 像素单元尺寸和分辨率的限制,无法真实的实现螺旋相位分布,进而影响了衍射的效果。

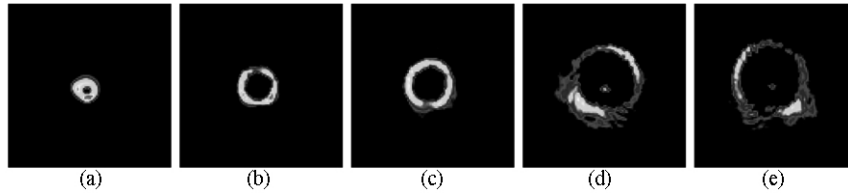


图 3 通过红外相机观察到的远场衍射图案

(a) +1 阶;(b)-4 阶;(c)-6 阶;(d)+12 阶;(e)-13 阶。

2 加载闪耀光栅得到高阶 OAM 光束

为了获得高纯度的高阶 OAM 光束,此处我们引入环带法^[18,19],即将螺旋相位片中心区域中的螺旋相位分布改为闪耀光栅。这样可将中心处无法调制的光场与环带外被调制的光场分离,未经调制的光场被小孔光阑滤除。此时小孔光阑透射的即为无中心亮斑的高阶涡旋光束,添加环带后的螺旋相位片如图 4 所示。

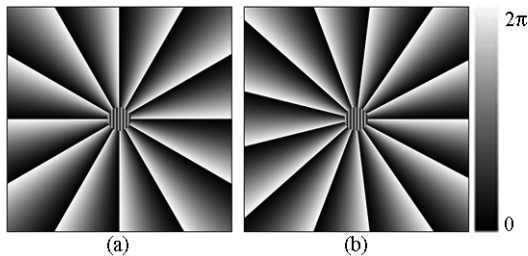


图 4 添加最佳环带的螺旋相位片

(a)+12 阶;(b)-13 阶。

本实验中我们在螺旋相位屏中心处引入的闪耀光栅半径为 0.8mm,周期为 0.2mm,实验获得的远场衍射光斑(高阶 OAM 光束)如图 5 所示。

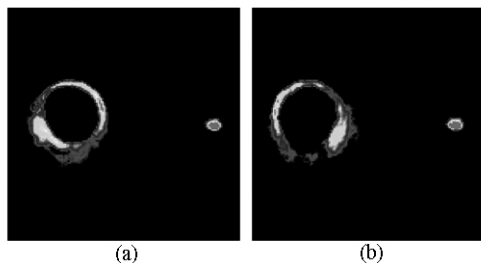


图 5 采用环带法生成的远场衍射光斑

(a) +12 阶;(b) -13 阶。

通过图 5 与图 3 的对比可以看出,+12 阶、-13 阶涡旋光束中心亮斑消失,光束质量较高,与仿真结果比较接近,这说明环带法能很好地解决上述问题。

为了定量地评价该方法对涡旋光束中心亮斑的影响,我们对比了采用该方法前后涡旋光束中心光

斑的强度。首先获取图 3(d)、图 3(e)和图 5(a)、图 5(b)的灰阶图,通过灰阶图可以获取对应点的归一化灰度值。选取图像中心 45×45 像素的区域进行分析,将该区域中每个像素点的归一化灰度值相加求和。由于灰度值与光强近似成正比,所以可以采用灰度值求和的方法得到中心亮斑的相对强度。具体实验结果如表 1 所示。

表 1 加载闪耀光栅前后涡旋光束中心区域灰度值和对

	初始光束中心区域灰度值和	优化光束中心区域灰度值和
+12 阶	566.0980	7.9059
-13 阶	584.4745	7.9059

从表 1 中可以看出,螺旋相位片加载闪耀光栅前,+12 阶和-13 阶涡旋光束中心区域存在强度较大的光斑,归一化灰度值的和分别为 566.0980 和 584.4745。经过闪耀光栅处理之后,+12 阶和-13 阶涡旋光束中心区域灰度值明显降低,即光强明显变弱。表 1 中+12 阶和-13 阶涡旋光束中心区域灰度值的和均为 7.9059,说明在中心处光强很弱。

3 高阶多模复用涡旋光束的生成

前面已经分析并实现了高阶单一模式涡旋光束的生成,但在大多数应用中,与单一模式涡旋光束相比,高阶多模复用涡旋光束具有更广阔的应用前景^[4]。对于高阶多模复用的螺旋相位片,其中心相位改变更复杂,因此引入环带法是十分必要的。

我们利用 Matlab 生成了一10 阶和+15 阶叠加的螺旋相位片,同时通过仿真,将基模高斯光束照射到螺旋相位片,得到了相应的仿真图。同时,采用上述实验系统,将经过环带方法处理的一10 阶和+15 阶叠加的螺旋相位片加载到液晶空间光调制器,通过红外相机观察得到了远场衍射图案,如图 6 所示。

通过图 6(c)与图 6(e)的对比可以看出,通过在液晶空间光调制器上加载环带法处理过的螺旋相位

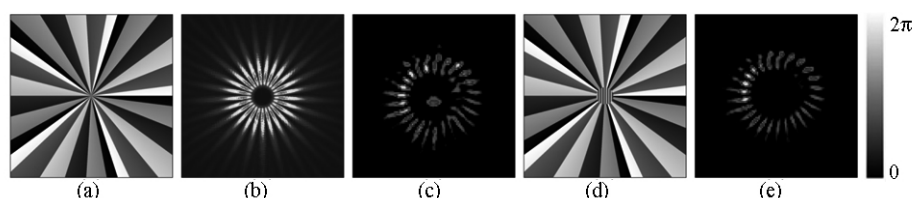


图 6 多模复用涡旋光束的生成

(a) -10 阶和 +15 阶螺旋相位片; (b) 高斯光束照射到 (a) 所示的光栅后得到的 -10 阶和 +15 阶涡旋光束的仿真结果;

(c) 在液晶空间光调制器上加载 (a) 后通过红外相机观察得到的结果; (d) 采用环带法处理的螺旋相位片;

(e) 在液晶空间光调制器上加载 (d) 后通过红外相机观察到的结果。

片,可以很好地解决空间光调制器分辨率不足的问题,光束中心不存在亮斑,得到了与仿真结果比较接近的远场衍射图案。

表 2 为采用该方法处理前后光束中心 45×45 像素区域归一化灰度值和的变化情况。

表 2 加载闪耀光栅前后涡旋光束
中心区域灰度值和的对比

	初始光束中心 区域灰度值和	优化光束中心 区域灰度值和
-10 阶和 +15 阶叠加	613.2078	7.9059

从表 2 中可以看出,螺旋相位片加载闪耀光栅前,-10 阶和 +15 阶叠加的涡旋光束中心区域存在强度较大的光斑,归一化灰度值的和为 613.2078。经过闪耀光栅处理之后,涡旋光束中心区域灰度值明显降低,即光强明显变弱。表 2 中 -10 阶和 +15 阶叠加涡旋光束中心区域灰度值的和为 7.9059,说明中心光斑明显变弱。

4 总 论

应用液晶空间光调制器可以高效地生成涡旋光束。但是,由于液晶空间光调制器无法模拟大相位越变,加载在空间光调制器上的高阶螺旋相位片中心处相位失真,获得的涡旋光束质量不高。为了解决这个问题,我们采用了环带的方法,将螺旋相位片中心区域处的螺旋相位分布改为闪耀光栅,进而可将中心处无法调制的光场与环带外被调制的光场分离。经过实验验证,消除了光束中心亮斑,得到了光束质量较高的高阶单模 OAM 光束和高阶多模复用 OAM 光束。本文所报道的技术可用于光学通信技术、量子光学、光学扳手、矢量光束生成等诸多领域。

参考文献:

[1] ALLEN L, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, (11): 1—5.
[2] WANG Jian, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Pho-

tonics, 2012, (6): 2—4.

[3] NENAD, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013, 340(6): 3—4.
[4] WILLNER A E, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, (3): 5—35.
[5] FU Shiyao, et al. Generating polarization vortices by using helical beams and a Twyman Green interferometer[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 1—3.
[6] XIN Jingtiao, et al. Generation and detection of linearly polarized axially symmetric beam by an amplitude computer-generated hologram[J]. Optics Communications 2012, 285: 3688—3691.
[7] POWER W L, et al. Laguerre-Gaussian laser beams and ion traps[J]. Optics Communications, 1996, 132(3-4): 371—378.
[8] BABIKER M, et al. Light-induced rotational effects in atom guides[J]. Optics Communications, 1999, 168(1-4): 145—150.
[9] JONATHAN, et al. Quantum correlations in optical angle-orbital angular momentum variables[J]. Science, 2010, 329(8): 2—4.
[10] TAMM C. Frequency locking of two transverse optical modes of a laser[J]. Physics Review A, 1988, 38(11): 5960—5963.
[11] TAMM C, et al. Bistability and optical switching of spatial patterns in a laser[J]. Journal of Optics Society Am B, 1990, 7(6): 1034—1038.
[12] GAO Chunqing, et al. Generation of the stigmatic beam with orbital angular momentum[J]. Chinese Physics Letters, 2001, 18(6): 771—773.
[13] BEIJERSBERGEN M W, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. Optics Communications, 1994, 112: 321—327.
[14] HECKENBERG N R, et al. Laser beams with phase singularities[J]. Optics Quant Electron, 1992, 24(9): 951—962.
[15] 付时尧,等. 基于液晶空间光调制器的光束变换研究[J]. 光学技术, 2015, 41(1): 1—3.
FU Shiyao, et al. Light beam transformation based on liquid-crystal spatial light modulators[J]. Optical Technique, 2015, 41(1): 1—3.
[16] LI Junchang, et al. Diffraction transfer function and its calculation of classic diffraction formula[J]. Optics Communications, 2007, 280: 243—248.
[17] 谢敬辉,等. 物理光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012: 153—224.
XIE Jinghui, et al. Physics optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012: 153—224.
[18] CHENG Shan, et al. Optimal annular computer-generated holograms for the generation of optical vortices[J]. Journal of Optics Society Am A, 2005, 22(2): 2—5.
[19] GUO Chengshan, et al. Optimal annulus structures of optical vortices[J]. Optics Express, 2004, 12(9): 2—8.