

文章编号 1004-924X(2023)19-2809-09

空间光调制器模拟光栅产生高阶和分数阶 涡旋光束

杨启航, 李 盼, 杨 焱, 王润兵, 邢浩儒, 许 飞, 祁义红*

(华东理工大学 物理学院, 上海 200237)

摘要:用空间光调制器模拟叉形光栅的方式产生高阶和分数阶涡旋光束, 分离各阶涡旋光束并探究单级特性, 探测其拓扑荷数以验证实验方法的正确性。设计了涡旋光束生成光路, 编写了产生叉形光栅全息图的计算机程序, 利用透射式空间光调制器模拟叉形光栅, 以全息图的方式加载到空间光调制器上。调节参数改变全息光栅图样, 得到拓扑荷数从 1.0 到 100.0 的整数阶与间隔为 0.1 的分数阶涡旋光束。利用孔径光阑分离出一级衍射, 分析其特性并利用干涉法测量其拓扑荷数。实验发现, 整数与分数阶光场分布与拓扑荷数为单调关系, 拓扑荷数接近 100 时光束质量显著下降的特性, 利用干涉法测得的拓扑荷数与计算全息图设置的参数完全相同。干涉测量结果验证了计算全息方法的正确性。该方法装置简易、参数可调, 可为高阶和分数阶涡旋光的产生和应用提供一定的参考。

关键词: 涡旋光束; 空间光调制器; 衍射光栅; 轨道角动量

中图分类号: O43 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233119.2809

Generation of high-order and fractional vortex beams using gratings simulated by spatial light modulators

YANG Qihang, LI Pan, YANG Han, WANG Runbing, XING Haoru, XU Fei, QI Yihong*

(School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

* Corresponding author, E-mail: qiyihonggl@163.com

Abstract: To generate high-order and fractional-order vortex beams, a spatial light modulator was used to simulate a forked grating. This was performed to generate and isolate the desired vortex beams with the different orbital angular momentum (OAM) of 1, and investigated their characteristics. Measurement of their topological charges via the interference method validated the availability and the accuracy of the experimental method. An optical path for vortex beam generation was designed, and a computer program was developed to create a forked grating hologram. This grating was simulated using a transmissive spatial light modulator and uploaded on the modulator as a hologram. By adjusting the parameters, the holographic grating pattern could be modified to produce integer-order vortex beams with topological charges ranging from 1.00 to 100.0. In addition, fractional-order vortex beams were generated at intervals of 0.1. The first order diffraction was isolated using an aperture diaphragm. Subsequently, its characteristics were ana-

收稿日期: 2023-04-28; 修订日期: 2023-05-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12274123, No. 11874146); 上海市大学生创新项目 (No. S202210251104); 华东理工大学大学生创新项目 (No. X202210251297)

lyzed, and its topological charge was measured via interferometry. A consistent relationship was observed between the distributions of integer- and fractional-order light fields and their respective topological charge numbers. Notably, as the topological charge number neared 100, a marked reduction was observed in the beam quality. The topological charge number, determined via interferometry, matched the parameters set in the computer-generated hologram, validating the computer-generated holography method's accuracy. Given its straightforward setup and adjustable parameters, this method could serve as a reference for the creation and application of high-order and fractional-order vortex light.

Key words: optical vortex; spatial light modulator; diffraction grating; orbital angular momentum

1 引言

涡旋光束是近年来国内外光学研究的热点,在光通信、量子信息、微小粒子操纵和光学成像等领域有重要的应用^[1-7]。光子具有自旋角动量(Spin-Angular Momentum, SAM)和轨道角动量(Obital-Angular Momentum, OAM),分别与偏振和螺旋相位波前相关。涡旋光束是一种典型的OAM光束,其复振幅表达式中含有相位因子 $\exp(i l \theta)$,这表明涡旋光束具有螺旋形的波阵面,螺旋相位由方位角相位相关项 $\exp(i l \theta)$ 描述, l 为轨道角动量量子数或拓扑荷数(Topological Charge, TC), θ 为方位角,表示每个光子的轨道角动量为 $l\hbar$ 。由于光束中心为相位奇点,光场呈环形分布,中心光强为0。常见的涡旋光束包括拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束、贝塞尔光束和贝塞尔-高斯光束,以及这几种光束衍生的其他形式涡旋光束。1992年和1994年,Allen和Barnett等分别证明,在傍轴和非傍轴情况下LG光束的轨道角动量均为 $l\hbar$ ^[8-9]。当 l 为0时,涡旋光束退化为一般高斯光束。

由于OAM模式的存在,涡旋光束相比高斯光束信息存储和传输的维度大幅增加,可用于拓展通信信道容量^[4-5]。涡旋光束携带的轨道角动量还具有机械效应,能够产生扭矩使物体移动或偏转,起到“光镊”或“光学扳手”操控微粒的作用^[1]。除此之外,在与微粒的散射作用中,一般高斯光束仅仅能够利用散射梯度力捕获粒子,这会使粒子被束缚在光强最大的光束中心,可能会带来不可逆的热损伤。而涡旋光束受到梯度力和自旋-轨道相互作用力的共同影响,较大粒子会被束缚在中心的暗核上并围绕其自转,从而无损伤地捕获粒子,这个性质在材料加工和生物医学

领域具有广泛的应用^[5-6]。

理论上,涡旋光束的OAM模式提供了无限扩展的自由度,能够显著提高光通信中信号复用的数据容量。但实际上较大的拓扑荷通常意味着涡旋光束具有较大的横向尺寸,这在一定程度上限制了整数拓扑荷的涡旋光的进一步扩展。随着整数拓扑荷的增加,增长的相位奇点和衍射效应会极大地影响涡旋光束的强度分布,增大在自由空间中聚焦和耦合到光纤的难度。幸运的是,涡旋光束的一个重要的特点是拓扑荷不局限于整数。分数阶涡旋光束大大扩展了涡旋光束的轨道角动量量子态空间,同时利用分数阶涡旋光束的特点可以更精准地操控微小粒子,为材料科学和生物学上的应用提供更好的光学手段。近年来,国内外研究人员也开展了很多关于分数阶涡旋光束及其在通信、成像等方面应用的研究^[10-19]。

本文利用透射式空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)模拟叉形光栅,对基模高斯光束进行衍射生成LG光束,探讨了左旋和右旋涡旋光束的特点,并通过整数和分数阶叉形光栅的计算调制,产生了拓扑荷从1.0到100.0的整数阶和拓扑荷间隔为0.1的分数阶涡旋光束,最后利用干涉法初步验证了部分产生涡旋光的轨道角动量。

2 原理

2.1 拉盖尔-高斯光束的生成

LG光束是一种典型的相位涡旋光束。自由空间中,描述电场的亥姆霍兹方程为:

$$(\nabla^2 + k^2)\vec{E} = 0, \quad (1)$$

式中: $\vec{E}$ 为电场矢量, k 为波数。柱坐标系下,式(1)的通解为:

$$E(r, \theta, z) = u(r, \theta, z) \exp[i(kz - \omega t)], \quad (2)$$

式中 $u(r, \theta, z)$ 为光场的慢变振幅。傍轴近似下可得:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

考虑柱对称稳定腔内的解,对 r 和 θ 分离变量,沿 z 方向传导的 LG 光束的计算结果可表示为:

$$u_{pl}(r, \theta, z) = E_0 \left(\frac{\sqrt{2} r}{w(z)} \right)^l L_p^l \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \times \exp \left(\frac{-r^2}{w^2(z)} \right) \exp(i l \theta) \exp(i \phi), \quad (4)$$

式中: p 为径向量子数, l 为角量子数。 $w(z)$ 和 ϕ 满足:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f} \right)^2}, \quad (5)$$

$$\phi = (l + 2p + 1) \arctan \left(\frac{z}{f} \right) - k \left(z + \frac{r^2}{2R} \right), \quad (6)$$

其中: w_0 为基模的束腰半径, $R = z + \frac{f^2}{z}$, $f = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ 为瑞利长度。

从式(4)可以看出,当角量子数 $l \neq 0$ 时,相位不仅与空间位置 z 有关,还与方位角 θ 相关。这说明涡旋光束在空间中传播时,波阵面为螺旋状,具有轨道角动量 lh 。

涡旋光束一般可通过腔内产生法或腔外转化法生成。腔内产生法通过引入低模损耗使基模无法谐振而获得高阶横模光束,但它难以产生拓扑荷数较大的模式,功率也相对较低。常用的腔外转化法包括模式转换法、螺旋相位板、叉形光栅和相位全息等^[5-6]。螺旋相位板法产生涡旋光的原理如图 1 所示,通过螺旋相位板对不同方位角引入相位差,将高斯光束转化为相位涡旋光束。这种方法原理简单且理论效率接近 100%,但制作工艺要求很高。除此之外,无法调节输出、无法适配各种输入波长的缺陷也使它存在较大的局限性。叉形光栅法由基模高斯光束与 LG 光束干涉生成叉形光栅图样,使用激光刻蚀制作相应的光栅器件。高斯光束经叉形光栅衍射后转化为各阶涡旋光束的叠加,分离一级衍射可获得目标涡旋光束。虽然叉形光栅法的效率并不高(一级衍射光强不超过原光强的 10%),但由于

其结构简单,制作成本低,仍然是一种常用的涡旋光束生成方法^[5]。

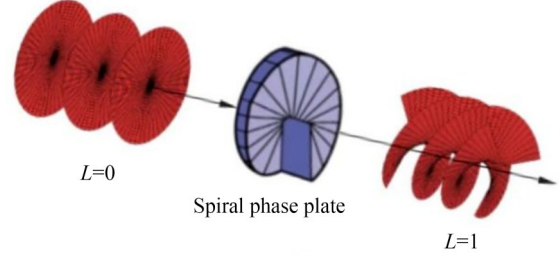


图 1 螺旋相位板法生成涡旋光束

Fig. 1 Generation of vortex beams by spiral phase plate

叉形光栅主要有两种制作方法^[5]:一种是利用平面波和 LG 光束干涉制作光栅器件,另一种利用计算机生成全息图的方法产生叉形光栅。本文采用计算全息法,通过计算平面波和 LG 光束干涉的光强分布生成全息图,在 SLM 上加载全息图模拟叉形光栅,如图 2 所示,通过叉形光栅衍射在远场分离出的一级衍射即为轨道角动量为 $\pm l$ 的涡旋光。

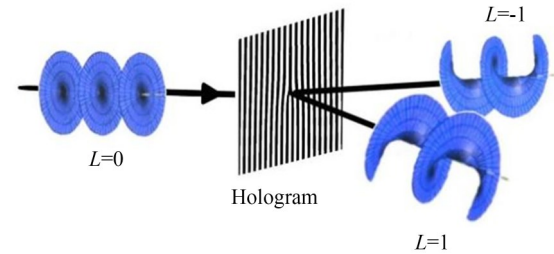


图 2 叉形光栅法生成涡旋光束

Fig. 2 Generation of vortex beams by fork grating

2.2 全息叉形光栅计算

光场函数为 $E_1 \exp(i\varphi_1)$ 的物光和 $E_2 \exp(i\varphi_2)$ 的参考光发生干涉时,干涉光场为:

$$E = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7)$$

式(7)说明,干涉光场的相位由物光和参考光共同调制,透过率由 $2E_1 E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ 决定。用光栅灰度表示透过率制作光栅,再用与参考光相同的再现光照射光栅,可实现物光的再现。

计算叉形光栅时,用基模高斯光束作为参考光,目标涡旋光束为物光。沿 z 轴传播的 LG 光束的相位函数为 $\exp(i l \theta)$,其中 l 为拓扑荷数。传

播方向与 z 轴夹角为 α 的高斯光束的相位函数为 $E \exp(ikx \sin \alpha + ikz \cos \alpha)$,其中 k 为波矢。涡旋光的束腰平面为 $z=0$,当两束光在束腰平面发生干涉时,光强分布为:

$$I = 2 + 2\cos(l\theta - kx \sin \alpha). \quad (8)$$

通过程序计算模拟干涉过程,用灰度表示光强(黑色为最小值,白色为最大值)。部分计算的叉形光栅全息图如图3所示。由图3可知,对于

拓扑荷数为 l 的叉形光栅,由于相位的叠加,上半部分比下半部分多 l 条明条纹与 l 条暗条纹,产生叉形图样。光强分布式(8)的非常数项表明,叉形光栅可看作在普通光栅上添加螺旋相位,如图4所示。计算得到叉形光栅后,将光栅全息图由计算机加载到SLM,通过SLM实现叉形光栅的振幅或相位调制,即可获得相应轨道角动量的涡旋光。

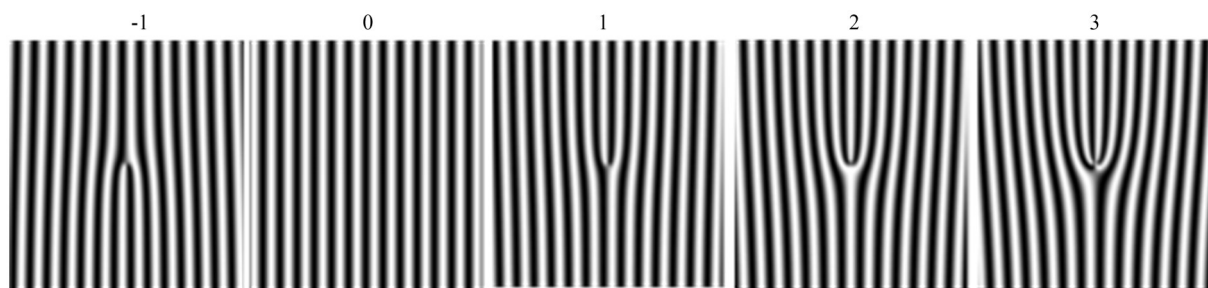


图3 拓扑荷数分别为-1,0,1,2,3时的叉形光栅图

Fig. 3 Fork grating holograms with topological charges of -1,0,1,2 and 3

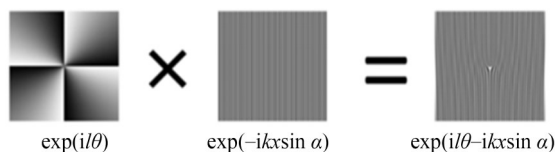


图4 叉形光栅相位合成示意图

Fig. 4 Schematic of fork grating phase synthesis

2.3 空间光调制器模拟叉形光栅

液晶SLM利用扭曲液晶盒中的向列相液晶偏转光束,可分为反射式和透射式两种。本实验室的SLM为透射型,因此根据透射型SLM设计和搭建涡旋光产生和干涉测量的光路。在液晶盒两玻璃基片间加一定电压,电场作用使液晶分子倾斜。如图5所示,当线偏振光的传播方向与液晶盒垂直且偏振方向与前表面的预定向方向平行时,其偏振方向将随液晶分子的倾斜方向发生旋转,倾斜角度的大小影响线偏振光旋转角的大小。在液晶盒前后放两个偏振片,可通过外加电压实现对光场振幅或相位的调制。若无外加电压,线偏振光偏振与检偏器透振方向平行,出射光强最大;加一定电压后,液晶分子倾斜一定角度,通过液晶盒后线偏振光发生偏转,通过检偏器的光强将减小;当外加电压使液晶分子倾斜 90° 时,出射光强几乎为零^[20]。通过控制各像素

点的电压,可以改变各点透射率,与光栅衍射作用相同。因此,通过叉形光栅的全息图控制液晶空间光调制器的透过率,可以实现模拟叉形光栅。

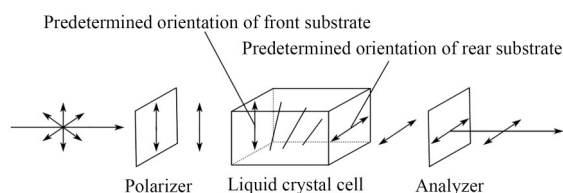


图5 线偏振光通过液晶盒时偏振方向发生旋转

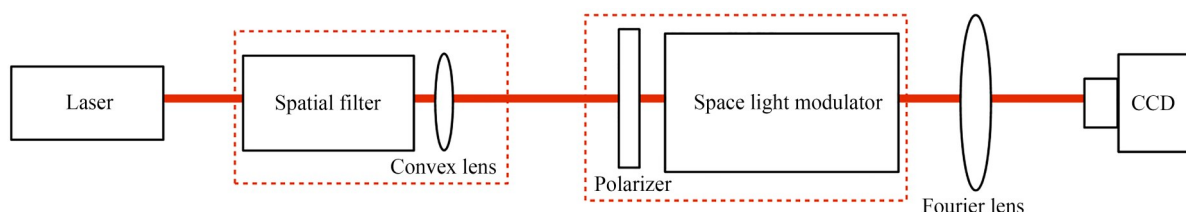
Fig. 5 Rotation of polarization direction of linearly polarized light as it passes through liquid crystal cell

2.4 实验光路搭建与调节

基于SLM的LG光束产生光路如图6所示。这里使用的氦氖激光器型号为GY-11,SLM型号为RL-SLM-T1,CCD型号为DH-HV1351UC。利用空间滤波器和凸透镜将氦氖激光器发出的激光转化为较为理想的基模高斯光束,束腰半径约为2.3 mm。通过偏振片起偏后,经SLM模拟的叉形光栅衍射,产生不同拓扑荷数的涡旋光。利用傅里叶透镜会聚各级衍射光束,用CCD观测整体的衍射图像。

利用孔径光阑代替傅里叶透镜,可分离出不同级次的衍射光,其一级衍射光的轨道角动量量子数恰好为 l 或 $-l$ 。为使分离出的涡旋光不受其他级次的影响,需使各级衍射光横向上分开。使一级衍射光通过孔径光阑,调整孔径

的大小和位置,可使 CCD 观测到完整的目标涡旋。对于拓扑荷数为 l 的涡旋光制作出相应的叉形光栅,其一级衍射的拓扑荷数即为 l 。改变计算全息图的输入参数,可得到任意拓扑荷数的涡旋光。



(a) 光路示意图

(a) Schematic of light path



(b) 实际光路

(b) Actual optical path

图 6 基于空间光调制器的拉盖尔-高斯光束产生装置

Fig. 6 Experimental setup for LG beam generated based on spatial light modulator

3 实验结果与讨论

3.1 整体衍射图样

实验中先观察整体衍射图样。用傅里叶透镜聚焦衍射的各级光束,在合适位置放置 CCD 可观测到衍射光场分布。调节偏振片方向和空间光调制器位置,可观测到清晰的各级衍射光场分布。图 7 为 CCD 探测的拓扑荷数为 18 的各级衍射场和涡旋光环形分布。光场中心为高斯光束,其光强沿半径方向呈指数衰减,中心光强最大。中心光束左右为一级衍射的 LG 光束,拓扑荷数分别为 ± 18 ,涡旋方向相反,具有近似于式(4)描述的空间光场。二、三级衍射接近“缺

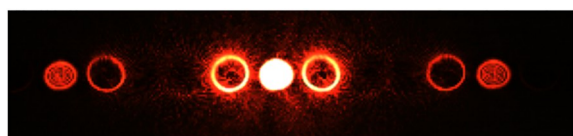


图 7 各级次衍射图样

Fig. 7 Beam diffraction of different orders

级”,光强较弱难以分辨。通过孔径光阑选取一级衍射,可研究其涡旋特性。

3.2 整数阶涡旋光

通过调节光路改变加载到计算机上不同拓扑荷数的叉形光栅,利用孔径光阑可在合适位置分离和观测一级衍射的涡旋光。图 8(a)所示为测量得到的部分整数阶涡旋光图像,相应的叉形光栅如图 8(b)所示。从图 8 可以看出,随着拓扑荷数的增大,中心暗斑逐渐增大,光场呈现环形分布,各环的宽度逐渐减小,环上相应强度增加。显然在极端情况下,当 l 趋于无穷时,涡旋光束会成为环宽趋向于零,能量密度趋于无穷的“完美涡旋光束”,但由于 SLM 的分辨率、入射光分布的偏差等限制, l 很大时光场的误差也不断放大,难以产生理想的涡旋光束。随着 SLM 分辨率的提升,涡旋光的产生效率也不断提高。

进一步研究高阶轨道角动量的涡旋光产生。通过计算模拟 $l=30\sim 100$ 的叉形光栅,利用

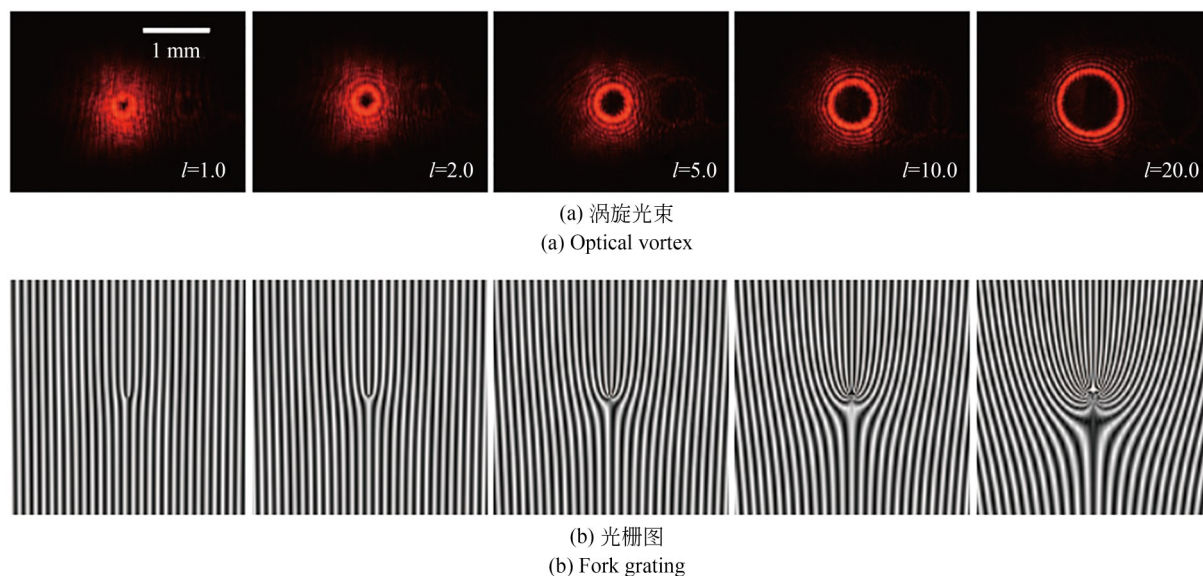


图 8 拓扑荷数分别为 1, 2, 5, 10 和 20 时产生的涡旋光束和相应的光栅图

Fig. 8 Optical vortex and corresponding fork gratings with topological charges of 1, 2, 5, 10 and 20

CCD 实验探测了产生的高阶涡旋光。由图 9 的实验结果可以看出,对于一级衍射生成的轨道角动量为 $\pm l$ 的涡旋光,随着 l 的增大,光斑形成的环形半径进一步增大,环的宽度逐渐减小。

随着环形半径的增大,一级衍射产生的涡旋光与 0 级的中心光斑发生重叠而干涉,破坏了涡旋光的形态,难以获得完美的涡旋光。由图 9 可知, $l < 80$ 时可以获得较好质量的涡旋光。

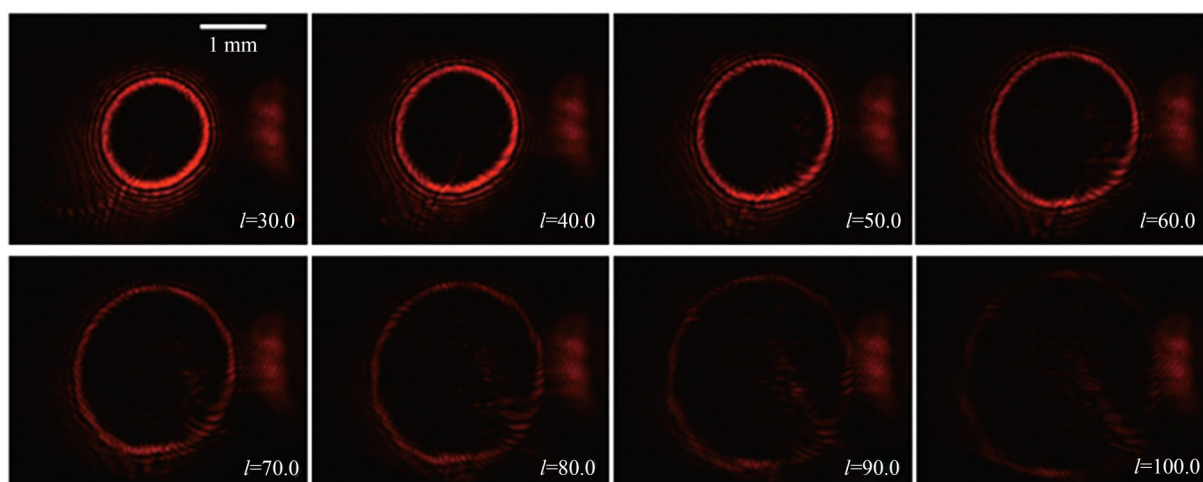


图 9 拓扑荷数为 30~100 时产生的涡旋光束

Fig. 9 Optical vortex with topological charges from 30 to 100

3.3 分数阶涡旋光

分数阶涡旋光可极大地扩展轨道角动量光的量子态空间,对信号传输和编码具有重要意义。同时,分数阶涡旋光具有不同于整数阶涡旋光的光场分布和螺旋性,在微小粒子的光操纵上有独特的作用。为观察和分析分数阶涡旋光特

性,这里设计了用于产生分数阶涡旋光的叉形光栅,如图 10 所示。由图 10 可知,分数阶涡旋光的叉形光栅不仅与整数阶涡旋光类似在中心产生了依赖于轨道角动量 l 的叉形结构,还在光栅上形成了位错(依赖于 l 的符号)。

基于产生的分数阶 l 的叉形光栅,测得

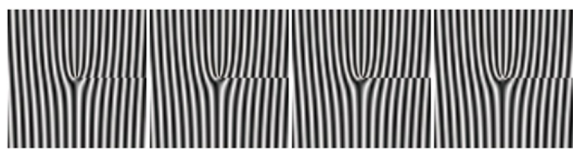


图 10 拓扑荷数为 3.2, 3.4, 3.6, 3.8 时的光栅图

Fig. 10 Fork grating holograms with topological charges of 3.2, 3.4, 3.6 and 3.8

$l=3.1\sim 3.9$ 的涡旋光,如图 11 所示。分数阶涡旋光束绕中心一周的相位变化不再是 2π 的整数倍,相位起始处将发生突变,依赖分数部分与邻近整数差值的大小出现不同的开口形状。图 11 为随着拓扑荷数的增大涡旋光束的演化过程。在 $l<3.5$ 时,光环在相位突变处的缺口不断增大;在 $l=3.5$ 时,光环缺口达到最大,随后开始减小;直到 $l=4.0$ 时开口消失,光环半径相比于 $l=3.0$ 明显增大。

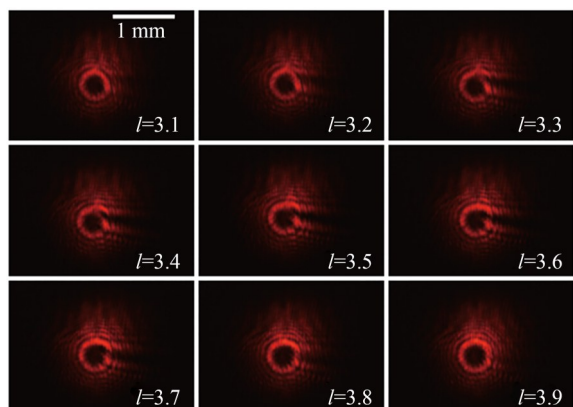


图 11 拓扑荷数为分数时产生的涡旋光束

Fig. 11 Optical vortex with fractional topological charges

3.4 拓扑荷测量与涡旋光产生效率讨论

为验证全息计算产生的叉形光栅程序的有效性,实验还搭建了干涉法测量涡旋光拓扑荷的

光路,分别测量了 $l=1.0, 2.0, 3.0, 1.2, 1.5, 1.8$ 的涡旋光,结果如图 12 所示。干涉法测量拓扑荷的实际光路如图 13 所示。从图 12 来看,干涉的叉形部分条纹瓣数可以明显分辨出整数阶的 OAM 数值;分数阶涡旋光的叉形干涉条纹瓣数介于邻近整数之间,从叉形部分相邻条纹分离的状态可以初步判断拓扑荷的大小。干涉测量结果验证了实验中用于产生涡旋光的叉形光栅全息图的准确性和有效性。实际上,干涉测量法对于拓扑荷不大的涡旋光轨道角动量的测量是方便、高效的,但拓扑荷很大时,受探测装置和光束尺寸的限制,难以通过干涉条纹准确分辨出 OAM 数值。最近的研究提出了利用机器学习和神经网络测量涡旋光拓扑荷数的方法^[14,16],该方法可高精度地识别分数阶拓扑荷数,从原理上同样可用于高阶拓扑荷的识别。

在涡旋光的应用方面,产生效率(目标涡旋光与入射光束的光强或功率之比)是一个重要因素。由于涡旋光通过叉形光栅衍射产生,而一般情况下总体级次较多,故分离出的目标涡旋光

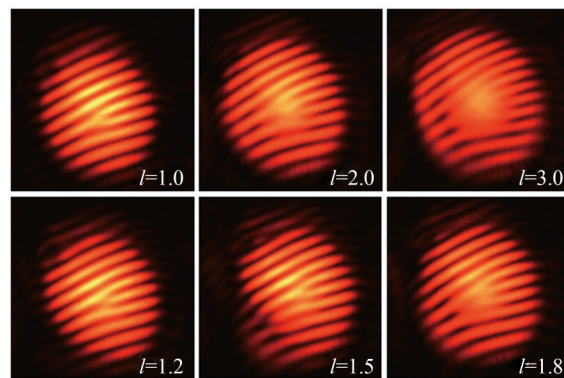


图 12 干涉法测量不同轨道角动量涡旋光的拓扑荷

Fig. 12 Measurement of topological charge of optical vortex with different OAM by interferometry



图 13 干涉法测量拓扑荷光路

Fig. 13 Optical path for interferometry measurement of topological charge

(一级衍射)效率并不高。利用光功率计测量拓扑荷为 20 和 3.5 时,涡旋光的产生效率分别为 6.8% 和 6.6%。已有研究表明,采用数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)制作叉形光栅,可通过调节电压和偏振片角度,将绝大部分光强集中于+1 或-1 的一级衍射涡旋光中,实现高达 98.5% 的转换效率^[21]。

4 结 论

本文研究了基于 SLM 加载叉形光栅全息图的整数高阶和分数阶涡旋光的产生。进行基于

SLM 模拟叉形光栅的相关计算,编写计算机程序计算干涉过程,获得了精确且各参数可调的全息图。设计优化了涡旋光束生成光路,阐述了光路调节方法,搭建光路并产生了符合理论模型的涡旋光束。利用 CCD 拍摄精确的涡旋光场图样,分析了整体远场衍射、单个整数阶和分数阶涡旋光束的光场特性。通过干涉法测量部分产生的涡旋光的轨道角动量,初步验证了本方法计算产生的叉形光栅程序的有效性。本文结果可为高阶和分数阶涡旋光的产生和应用提供一定的参考。后续工作将进一步研究和探讨提高涡旋光产生效率的方法。

参考文献:

- [1] PATERSON L, MACDONALD M P, ARLT J, *et al.* Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. *Science*, 2001, 292(5518): 912-914.
- [2] JACK B, LEACH J, ROMERO J, *et al.* Holographic ghost imaging and the violation of a bell inequality[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(8): 083602.
- [3] PATERSON C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 153901.
- [4] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [5] 高春清, 付时尧. 涡旋光束[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 1-9.
GAO CH Q, FU SH Y. *Vortex Beams*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019: 1-9.(in Chinese)
- [6] BAI Y H, LV H R, FU X, *et al.* Vortex beam: generation and detection of orbital angular momentum[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 012601.
- [7] 朱向阳, 邱松, 丁友, 等. 多径向节次拉盖尔-高斯光束旋转多普勒效应分析[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0726003.
ZHU X Y, QIU S, DING Y, *et al.* Rotational Doppler effect analysis of multi-radial index Laguerre-Gaussian beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0726003. (in Chinese)
- [8] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M, SPREEUW R, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [9] STEPHEN M, BARNETT, . Orbital angular momentum and nonparaxial light beams[J]. *Optics Communications*, 1994, 110(5/6): 670-678.
- [10] LEACH J, YAO E, PADGETT M J. Observation of the vortex structure of a non-integer vortex beam[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 71.
- [11] TAO S H, LEE W M, YUAN X C. Experimental study of holographic generation of fractional Bessel beams[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(1): 122.
- [12] ZHANG N, DAVIS J A, MORENO I, *et al.* Analysis of fractional vortex beams using a vortex grating spectrum analyzer[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(13): 2456.
- [13] ZHOU J, ZHANG W H, CHEN L X. Experimental detection of high-order or fractional orbital angular momentum of light based on a robust mode converter[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(11): 111108.
- [14] LIU Z W, YAN S, LIU H G, *et al.* Superhigh-resolution recognition of optical vortex modes assisted by a deep-learning method[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(18): 183902.
- [15] DENG D, LIN M C, LI Y, *et al.* Precision measurement of fractional orbital angular momentum[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12: 014048.
- [16] MAO Z X, YU H Y, XIA M, *et al.* Broad bandwidth and highly efficient recognition of optical vortex modes achieved by the neural-network approach[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(3): 034063.
- [17] ZHANG H, ZENG J, LU X Y, *et al.* Review on

- fractional vortex beam[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(2): 241-273.
- [18] 李晨昊, MAIER S A, 任浩然. 纳米光子学中的光学涡旋[J]. 中国光学(中英文), 2021, 14(4): 792-811.
- LI CH H, MAIER S A, REN H R. Optical vortices in nanophotonics[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 792-811. (in Chinese)
- [19] 庄京秋, 熊晗, 虞天成, 等. 基于软边小孔的涡旋光轨道角动量检测研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(12): 1394-1405.
- ZHUANG J Q, XIONG H, YU T CH, *et al.* Orbital angular momentum detection of vortex beam based on soft-edge aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(12): 1394-1405. (in Chinese)
- [20] 徐鹏. 液晶空间光调制器光调制特性测量及其在光学图像处理中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2005: 10-13.
- XU P. *Measurement of Light Modulation Characteristics of Liquid Crystal Spatial Light Modulator and Its Application In Optical Image Processing*[D]. Jinan: Shandong University, 2005: 10-13. (in Chinese)
- [21] CHEN P, WEI B Y, JI W, *et al.* Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: a high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 133.

作者简介:



杨启航(2002—),男,主要从事涡旋光场产生与探测的研究。E-mail: Froice_Young@foxmail.com

通讯作者:



祁义红(1979—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事量子光学和非线性光学方面的研究。E-mail: qiyihonggl@163.com