

引用本文: 杨焱, 王润兵, 邢浩儒, 等. 基于相位全息法的高阶和分数阶涡旋光产生方法及性能研究[J]. 光通信技术, 2023, 47(6): 53–56.

基于相位全息法的高阶和分数阶涡旋光产生方法及性能研究

杨焱, 王润兵, 邢浩儒, 杨启航, 李盼, 许飞, 祁义红*

(华东理工大学 物理学院, 上海 200237)

摘要: 为了进一步探索高阶和分数阶涡旋光的高效产生方法, 利用相关计算程序模拟了涡旋光相位全息图, 搭建了相位全息法产生涡旋光的光路, 研究了整数和分数阶涡旋光的光场分布特点。实验结果表明: 当产生轨道角动量拓扑荷数 $l=1\sim 200$ 整数阶的涡旋光时, 涡旋光束的中心暗斑在一定范围内会随拓扑荷数的增大而增大, 超过一定数值范围后, 受限于仪器参数的涡旋光质量会降低; 当产生 $l=8.1$ 、 8.4 、 8.8 分数阶的涡旋光时, 涡旋光相位出现分数分布, 径向缺口随分数阶拓扑荷数增大而逐渐向整数阶演化。

关键词: 涡旋光束; 轨道角动量; 相位全息图; 螺旋相位; 空间光调制器

中图分类号: O43; TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-0053-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the generation method and performance of high order and fractional order vortex light based on phase holography

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

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

Abstract: In order to further explore the efficient generation methods of high order and fractional order vortex light, relevant computational programs are used to simulate the phase hologram of vortex light, and the optical path for generating vortex light using phase holography is constructed. The optical field distribution characteristics of integer and fractional order vortex light are studied. The experimental results show that when generating vortex light with orbital angular momentum topological charge $l=1\sim 200$ integer orders, the central dark spot of the vortex beam pattern will increase with the increase of topological charge within a certain range. After exceeding a certain numerical range, the quality of vortex light limited by instrument parameters will decrease. When generating fractional order vortex light with $l=8.1$, 8.4 and 8.8 , the phase of the vortex light exhibits a fractional distribution, and the radial gap gradually evolves towards integer order as the fractional order topological charge increases.

Key words: vortex beam, orbital angular momentum, phase hologram, spiral phase, spatial light modulator

0 引言

近年来, 光学涡旋相关研究快速发展, 在空间光

通信、光信息处理、微粒操控、量子信息处理等多领域均发挥重要作用^[1-7]。涡旋光束的轨道角动量(OAM)可用来编码数字信号, 实现 OAM 编码, 将 N 个 OAM 态表示为一个 N 进制数, 使一次编码具有 $\log_2 N$ 的比特信息量。由于 OAM 态具有多样的取值, 因此编码效率得到了显著提高^[8]。

目前, 比较成熟的涡旋光产生方法主要有: 腔内选模法、腔外转换法(包括叉形光栅法、螺旋相位板法、相位全息法等)^[9]。由于腔内选模法存在仪器昂贵、操作繁琐、涡旋光阶次不可调等缺点, 因此, 涡旋光的产生多采用腔外转换法^[9-18]。

腔外转换法中的相位全息法产生的涡旋光衍射效率高, 简单方便, 成本低, 其阶次可通过空间光调制

收稿日期: 2023-05-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11874146)资助; 上海市大学生创新项目(No.S202210251104)资助; 华东理工大学大学生创新创业训练计划项目(X202210251297)资助。

作者简介: 杨焱(2002—), 女, 陕西汉中, 本科生, 就读于华东理工大学物理学院光电信息科学与工程专业, 主要研究方向为涡旋光场的产生与探测方法, 负责主持了华东理工大学大学生创新创业计划项目 1 项。

* **通信作者:** 祁义红(1979—), 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工作, 主持了国家自然科学基金项目多项, 在《Physical Review A》、《光学学报》等国内外重要期刊发表论文 50 余篇。



杨焱,王润兵,邢浩儒,等: 基于相位全息法的高阶和分数阶涡旋光产生方法及性能研究

器及相位全息图灵活调节。因此,本文在透射式空间光调制器(SLM)上加载相位全息图(下文简称相位图),以实现入射的基模高斯光束的空间调制,从而产生具有相应 OAM 的涡旋光。

1 涡旋光相位图生成方法

涡旋光具有螺旋相位项 $\exp(il\theta)$, 与其传播方向垂直的某一截面的相位分布可用 $\phi(r, \theta) = l\theta$ 来表示, 其中 l 为涡旋光的 OAM 拓扑荷数, r 和 θ 分别为柱坐标系下的横向位置坐标和方位角。与螺旋相位板法类似, 通过液晶 SLM 直接在基模高斯光束上加上螺旋相位项 $\exp(il\theta)$ 便可生成涡旋光。

本文通过编写计算程序对涡旋光相位分布进行模拟, 得到如不同拓扑荷数的相位灰度图如图 1 所示, 每个周期相位变化为 $0 \sim 2\pi$; 再将得到的相位图加载到液晶 SLM 上即可生成涡旋光。

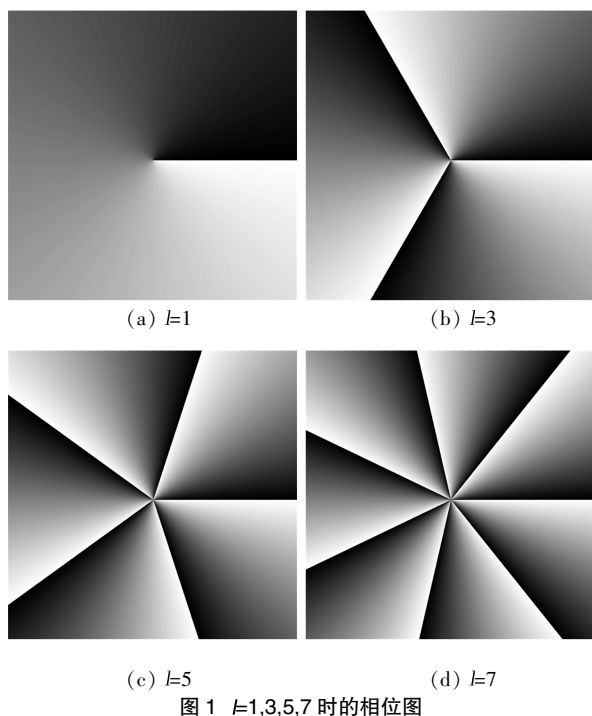


图 1 $l=1, 3, 5, 7$ 时的相位图

本文编写的 Matlab 程序如下:

```
clc
clear all
close all
Nx = 3700; Ny = 3700; %取样点数
x0 = linspace(-1.00e-2, 1.00e-2, Nx);
y0 = linspace(-1.00e-2, 1.00e-2, Ny);
[x, y] = meshgrid(x0, y0);
[theta, r] = cart2pol(x, y);
```

```
ma=9.0:0.1:9.0;
lma=length(ma);
for n=1:lma
    n;
    m=1*ma(n); %拓扑荷数
    g=mod(m*theta, 2*pi);
    set(h1, 'edgecolor', 'none', 'facecolor', 'interp');
    set(gcf, 'position', [200 100 682.8 512.2]);
    set(gca, 'Position', [0.00 0.00 1.0 1.0]);
    axis equal off
    colormap(gray);
    saveas(h1, ['D:\ \相位图分数阶\' , '
phase_l=' , num2str(ma(n), '%0.1f'), '.bmp' ]);
end
```

由于生成的相位图的精细度直接影响生成涡旋光的质量, 在使用程序计算生成相位图时可通过相应函数控制取样点数, 从而生成精细度可调的相位图。此外, 由于不同的 SLM 所需的图片分辨率不同, 因此需要通过调整分辨率和取样点数来匹配所需的 SLM 图片分辨率。在生成所需精细度的相位图后, 将其加载到 SLM 上。SLM 通过读取图片的灰度值, 控制施加在液晶分子上的电压大小, 从而在不同的位置引入相应的相位调制来生成涡旋光^[1]。

2 产生涡旋光的实验光路

本文采用的实验装置和光路示意图如图 2 所示。实验中使用的氦氖激光器型号为 GY-11, 输出波长为 632.8 nm, 功率大于 1.5 mW; 透射型液晶 SLM 型号为 RL-SLM-T1, 分辨率为 1024×768 , 靶面尺寸(靶面对角线长度)为 2.08 cm, 像素点的长、宽均为 $26 \mu\text{m}$, 工作波长为 400~700 nm; 电荷耦合器件(CCD)型号为 DH-HV1351UC, 分辨率为 1280×1024 , 其传感器帧率

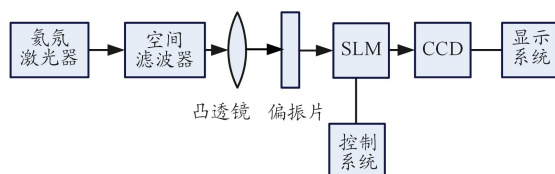


图 2 相位全息法产生涡旋光的实验光路示意图

为 $15 \text{ f/s} @ 1280 \times 1024$ 。

本文采用在透射式 SLM 上加载涡旋光相位图的方法产生涡旋光。首先, 波长为 623.8 nm 的激光束经

过空间滤波器和凸透镜后被准直,此时激光束近似为理想基模高斯光束。随后,光束通过偏振片以线偏振光入射至 SLM,通过改变加载到 SLM 的不同拓扑荷数 OAM 光的相位图,实现对高斯光束的空间相位调制,使出射光束为相应 OAM 的涡旋光。CCD 记录的涡旋光场信息可直接通过计算机控制软件观测和分析。

3 实验结果与讨论

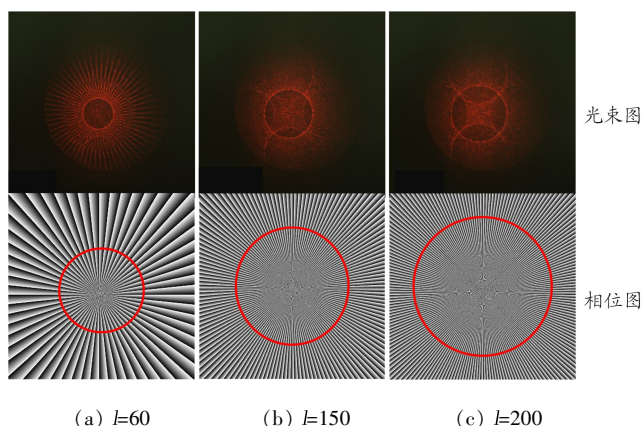
在实验中,本文分别计算并产生了 l 为 1、3、5、7、9、10、20、30、40、50、60、150、200 的整数阶和 l 为 8.1、8.4、8.8 的分数阶涡旋光的相位图。同时,通过实验光路观测了相应涡旋光光场的分布情况。

3.1 整数阶涡旋光

不同拓扑荷数下的整数阶涡旋光图和对应的涡旋光栅相位图如图 3 所示。

当拓扑荷数 $l=1\sim 50$ 时,通过 CCD 拍摄的涡旋光斑图像显示,其中心部位具有暗斑特征,且随着拓扑荷数的增加,中心暗斑的半径也在逐渐扩大;同时,以暗斑为中心的周边区域,出现均匀分布的缺口,这些缺口的数量与涡旋光斑的拓扑荷数相对应。

当拓扑荷数 l 分别为 60、150、200 时产生的涡旋



(a) $l=60$ (b) $l=150$ (c) $l=200$

图 4 拓扑荷数分别为 60、150、200 时产生的涡旋光图和对应的涡旋光栅相位图

光图如图 4 所示。可以看出,随着 l 的增大,涡旋光质量变差,中心圆环周围逐渐出现 4 个相同大小的圆环,且中心圆环与 4 个圆环的半径同步扩大,导致它们与 4 个圆环相交的区域不断增加(这一现象与加载在 SLM 上的全息相位图密切相关);随着 l 的增大,有限的像素点无法满足高阶涡旋光的需求,从而出现了图中用红圈标注的特殊结构。此外,在后续拓扑荷数继续增大的过程中,这种特殊结构的范围也在不断扩大。当 $l \geq 60$ 时,涡旋光的质量逐渐变差。

3.2 分数阶涡旋光

当 l 为 8.1、8.4、8.8 时,分数阶涡旋光图和对应的涡旋光栅相位图如图 5 所示。可以看出,整数部分的 8 个缺口呈现均匀分布,而其中 1 个缺口附近出现 1 个新的缺口,该缺口随着分数阶拓扑荷数的增大而变大,直至增加 1 个新的缺口围绕中心圆环均匀分布。与整数阶涡旋光不同的是,分数阶涡旋光的相位不再是完整的 $0\sim 2\pi$ 的周期性分布,而是出现了分数部分。由于相位图的不均匀分布,使分数阶涡旋光存在不同于整数涡旋光的径向缺口,不仅能够携带更多的 OAM 量子态

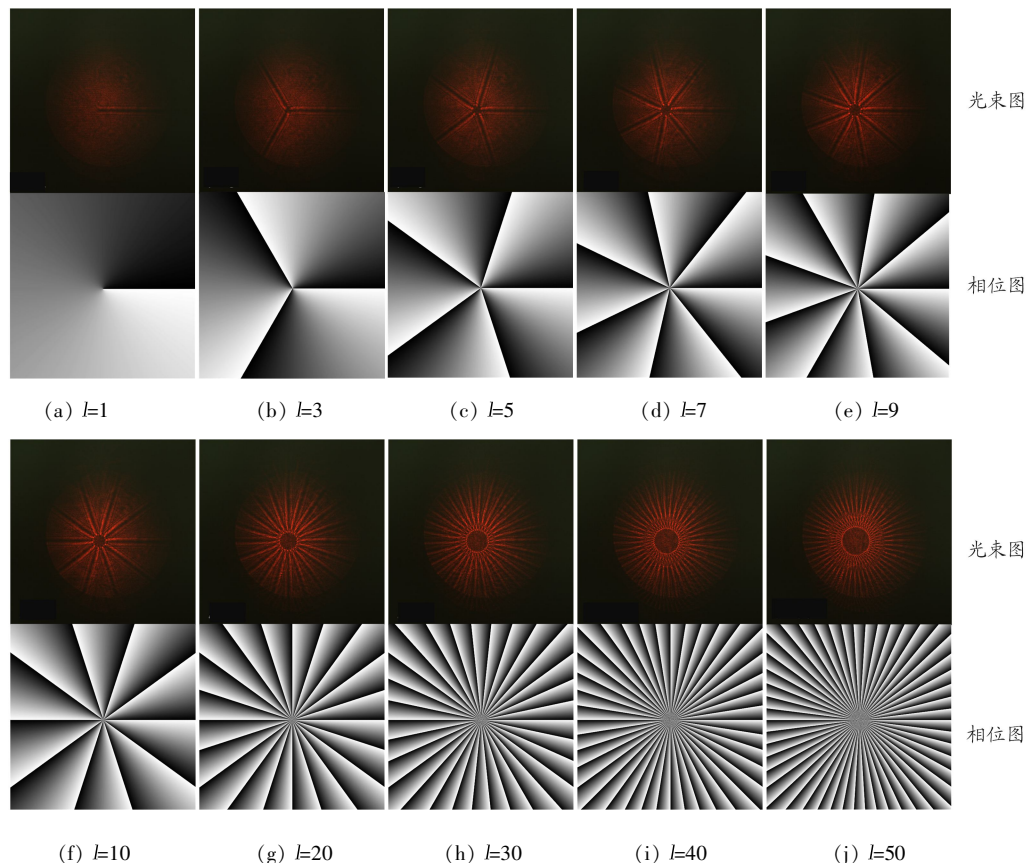


图 3 拓扑荷数为 1~50 时的整数阶涡旋光图和对应的涡旋光栅相位图

杨焱,王润兵,邢浩儒,等: 基于相位全息法的高阶和分数阶涡旋光产生方法及性能研究

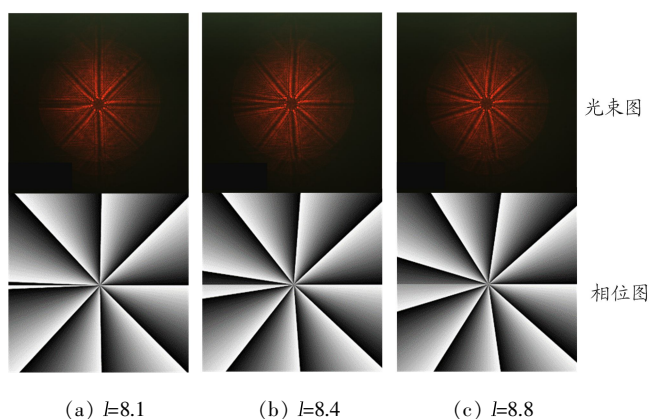


图5 分数阶拓扑荷数的涡旋光图和对应的涡旋光栅相位图

信息,而且能提供更精细化的多维度控制^[4]。

理想情况下,该方法产生的整数阶涡旋光应为完美的圆环形状,但由于实验中使用的SLM在实现 2π 相位调制时的波长(532 nm)与激光器波长(632.8 nm)不同,即使是整数阶涡旋光也出现了相应数量的缺口,通过缺口数量可判断涡旋光所对应的OAM拓扑荷数。

4 结束语

本文主要采用相位全息法研究了整数阶和分数阶涡旋光的产生方法,分别研究了 l 为1、3、5、7、9、10、20、30、40、50、60、150、200整数阶的涡旋光, l 为8.1、8.4、8.8时分数阶的涡旋光。研究结果表明:整数阶涡旋光的中心暗斑在一定范围内会随拓扑荷数的增大而增大;分数阶涡旋光的相位出现分数分布,径向缺口随分数阶拓扑荷数增大而逐渐向整数阶演化。本文的研究结果可为高阶和分数阶涡旋光的研究和应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 高春清,付时尧. 涡旋光[M]. 北京:清华大学出版社,2019.
- [2] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185–8189.

- [3] PATERSON L, MACDONALD M P, ARLT J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. Science, 2001, 292: 912–914.
- [4] 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): 083602-1–083602-4.
- [5] PATERSON C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 153901-1–153901-4.
- [6] 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.
- [7] 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): 012601-1–012601-15.
- [8] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. Optics Express, 2004 12(22): 5448–5456.
- [9] 程珊,陈建飞,金兆祥,等. 复合涡旋光的光强与相位特性[J]. 光通信技术,2022,46(1):57–61.
- [10] 梁言生,姚保利,马百恒,等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵[J]. 光学学报,2016,36(3):76–82.
- [11] 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): 71–71.
- [12] 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 Physical Letters, 2016, 108(11): 111108-1–111108-6.
- [13] 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): 183902-1–183902-6.
- [14] DENG D, LIN M, LI Y, et al. Precision measurement of fractional orbital angular momentum[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(1): 014048-1–014048-7.
- [15] ZHANG H, ZENG J, LU X Y, et al. Review on fractional vortex beam [J]. Nanophotonics, 2022, 11(2): 241–273.
- [16] 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.
- [17] 陈思宇, 黄铭. 用于产生 OAM 涡旋光的圆极化正把边环形贴片天线[J]. 光通信技术,2019,43(5):19–21.
- [18] LI S, WANG J, ZHANG Z. Experimental demonstration of optical interconnects exploiting orbital angular momentum array [J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21537–21547.