

doi: 10.3788/gzxb20174608.0826002

# 高质量光学涡旋阵列的实验研究

黄素娟, 张杰, 邵蔚, 朱福全, 王廷云

(上海大学 通信与信息工程学院, 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

**摘 要:** 将光学涡旋与计算全息技术相结合, 提出一种高质量光学涡旋阵列的产生方法. 从理论上研究了光学涡旋阵列的形成和分布特征, 并模拟仿真产生涡旋光束阵列. 基于面向目标的共轭对称延拓傅里叶计算全息方法编码生成光学涡旋阵列的全息图, 利用单个反射式空间光调制器光电再现了与理论一致的光学涡旋阵列, 并通过马赫-增德尔干涉法对生成的光学涡旋阵列进行验证. 产生的高质量光学涡旋阵列提供了更复杂的结构分布和更多的可控参量, 且实验光路易实现. 研究结果在光学微操控、光通信等领域具有潜在应用价值.

**关键词:** 物理光学; 光学涡旋; 空间光调制器; 光学涡旋阵列; 拓扑电荷; 计算全息图; 马赫-增德尔干涉

中图分类号: TN26

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0826002-7

## Experimental Study on Optical Vortex Array with High Quality

HUANG Su-juan, ZHANG Jie, SHAO Wei, ZHU Fu-quan, WANG Ting-yun

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks,

School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Combined the optical vortex with computer generated holography, an approach for producing optical vortex array with high quality was proposed. The formation and distribution characteristics of optical vortex array were theoretically discussed, and optical vortex array was produced by numerical simulation. The hologram of optical vortex array was generated by conjugate symmetric extension Fourier computer generated holography. Based on spatial light modulator loaded with holograms, the optical vortex arrays were reconstructed in the experiment. In order to evaluate the generated beams, Mach - Zehnder interference system was adopted. It is very simple and easy to produce the optical vortex array, which provides more complicated light distributions and controllable parameters. The research results may have a potential value in optical micromanipulation, optical communication and other fields.

**Key words:** Physical optics; Optical vortex; Spatial light modulator; Optical vortex array; Topological charge; Computer-generated hologram; Mach - Zehnder interference

**OCIS Codes:** 260.1960; 260.6042; 050.4865; 070.6120; 090.1760; 120.3180

## 0 引言

光学涡旋是一种具有螺旋型相位波前的特殊光束, 中心光强为零, 呈暗中空结构, 其相位因子可描述为  $\exp(i l \theta)$ , 其中  $\theta$  为方位角,  $l$  为拓扑电荷数<sup>[1-2]</sup>. 此类光束中每个光子均携带了  $l \hbar$  大小的轨道角动量<sup>[3]</sup>. 由于上述特性, 光学涡旋最近几年在自由空间及光纤光通信领域<sup>[4-5]</sup>和微操控领域<sup>[6-7]</sup>都得到了广泛的应用.

实验室中常见的涡旋光束有拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 涡旋光束<sup>[8]</sup>、高阶贝塞尔 (Bessel) 涡旋光束<sup>[9]</sup>、艾里涡旋光束等<sup>[9]</sup>. 涡旋光束的产生方法主要有模式转换法<sup>[10]</sup>、全息光栅法<sup>[11]</sup>、螺旋相位板法<sup>[12]</sup>和空间光调制器法<sup>[13]</sup>等, 其中空间光调制器法因其实时、灵活、可控等优点被广泛应用于实验研究.

随着对携带单一拓扑电荷数的涡旋光束研究的不断深入, 研究人员已将相关工作扩展到光学涡旋阵列

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61475098) 和上海市科委科研计划 (No. 14440500100) 资助

第一作者: 黄素娟 (1968-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光电信息及图象处理. Email: sjhuang@shu.edu.cn

收稿日期: 2017-01-23; 录用日期: 2017-03-07

<http://www.photon.ac.cn>

上. 郭等基于螺旋相衬空间滤波法, 在空间频域将相干涡旋光束进行叠加, 产生了光学涡旋“晶格”光场<sup>[14]</sup>. 多波干涉也可以产生涡旋阵列, Vyas 等基于改进的 Mach-Zehnder 干涉仪或 Michelson 干涉装置实现了光学涡旋阵列的产生<sup>[15-16]</sup>. 依据纯相位衍射理论, 利用分数 Talbot 效应方法, 郭等通过纯相位衍射元件产生了高压缩比的光学涡旋阵列<sup>[17]</sup>. 周等通过达曼涡旋光栅 DVG 产生了拓扑电荷可控的 3D 达曼光学涡旋阵列<sup>[18]</sup>. 柴等在光楔衍射法产生单涡旋的基础上, 基于长条形光楔阵列, 提出了利用光束阵列衍射产生涡旋阵列的方法<sup>[19]</sup>. 王等基于计算全息方法, 将光源分为 4 个部分, 分别照射在加载了不同涡旋光束全息图的空间光调制器的对应位置上, 产生了  $2 \times 2$  光学涡旋阵列<sup>[20]</sup>. 上述方法产生的光学涡旋阵列可控参量少, 结构较为单一, 有旁瓣, 其中干涉法实验装置较为复杂, 需要精密的调整并且稳定性不高.

本文研究的光学涡旋阵列的产生基于面向目标的共轭对称延拓傅里叶计算全息技术, 阵列分布特征、涡旋光束的数目、涡旋光之间的距离、每个位置处的涡旋光束拓扑电荷数及束腰半径均实时可控. 从理论上分析了光学涡旋阵列的形成和分布特征, 并模拟仿真产生了光学涡旋阵列. 用基于面向目标的共轭对称延拓 Fourier 计算全息方法编码生成光学涡旋阵列的全息图, 利用单个反射式空间光调制器光电再现了与理论一致的光学涡旋阵列. 最后, 通过马赫-增德尔干涉法对生成的光学涡旋阵列进行验证.

### 1 理论分析

拉盖尔涡旋光束(LG<sub>l</sub><sup>p</sup>)是一种典型的发散光学涡旋场, 呈圆对称分布. 一般情况下, 其振幅有  $p$  个径向节点, 表示光束传播截面上的光强分布具有  $(p + 1)$  个亮环. 为了研究方便, 我们选择单环模式的 LG 光束, 即  $p = 0$ . 该模式下拓扑电荷为  $l$  的 LG 涡旋光束光电场复振幅可描述为

$$E_{LG_0^l}(r, \theta) = \frac{1}{\omega(z)} \left( \frac{r\sqrt{2}}{\omega(z)} \right)^{|l|} \exp\left(\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right) \cdot \exp(-il\theta) \cdot \exp\left[i\left(kz - \frac{kr^2}{2R}\right)\right] \cdot \exp(i\varphi) \quad (1)$$

其中,  $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z}{z_R}}^2$ ,  $z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ ,  $\varphi = (l + 1) \tan^{-1}(z/z_R)$ ,  $R = z[1 + (z_R/z)^2]$ .  $r, \theta, z$  表示柱坐标参量,  $\omega(z)$  为传播距离  $z$  处的光斑大小,  $\omega_0$  为束腰半径,  $k$  为波数,  $Z_R$  为瑞利半径,  $R$  为光波前曲率半径,  $\varphi$  为涡旋光束的 Gouy 相位. 将式(1)转换为直角平面坐标的形式为

$$E_{LG_0^l}(x, y) = \frac{1}{\omega(z)} \left( \frac{\sqrt{2}\sqrt{x^2 + y^2}}{\omega(z)} \right)^{|l|} \exp\left(\frac{-x^2 - y^2}{\omega^2(z)}\right) \exp(-il\theta) \exp\left[i\left(kz - \frac{k(x^2 + y^2)}{2R}\right)\right] \exp(i\varphi) \quad (2)$$

若光学涡旋奇点坐标为  $(a_i, b_j)$ , 则其复振幅为  $E_{LG_0^l}(x - a_i, y - b_j)$ .

假定矩形光学涡旋阵列为  $M$  行  $N$  列, 拓扑电荷数分别为  $l_{i,j} (i = 1, 2, 3 \dots, M; j = 1, 2, 3 \dots, N)$  的光学涡旋等间距  $d$  分布, 这里以  $M$  为偶数  $N$  为奇数的矩形光学涡旋矩阵为例, 如图 1 所示.

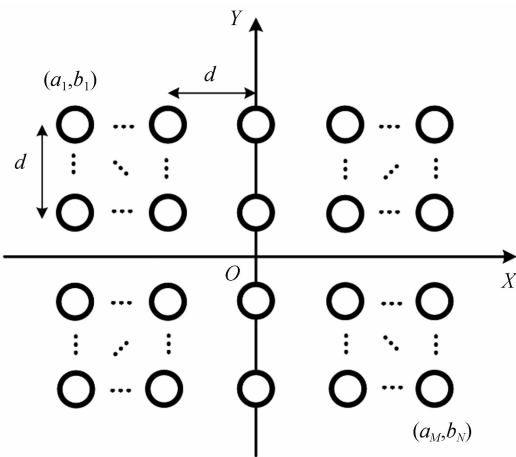


图 1  $M$  为偶数  $N$  为奇数的矩形光学涡旋阵列示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of a rectangular vortex beam array with an even number of even  $M$  and odd  $N$

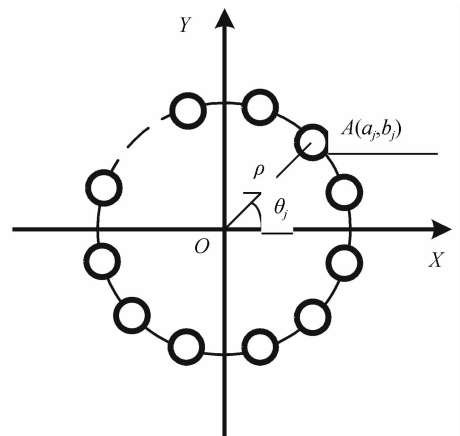


图 2 环形光学涡旋阵列示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of an annular vortex beam array

第  $i$  行第  $j$  列的涡旋光束奇点坐标  $(a_i, b_j)$  为  $\left(jd - \frac{N+1}{2}d, -id + \frac{M+1}{2}d\right)$ , 则该矩形涡旋光束阵列的复

振幅为

$$E_{\text{array}}(x, y) = E_{\text{LC}_0^{l_1,1}}(x-a_1, y-b_1) + E_{\text{LC}_0^{l_1,2}}(x-a_1, y-b_2) + \cdots + E_{\text{LC}_0^{l_1,j}}(x-a_1, y-b_j) + \cdots + E_{\text{LC}_0^{l_j,j}}(x-a_j, y-b_j) + \cdots + E_{\text{LC}_0^{l_M,N}}(x-a_M, y-b_N) \quad (3)$$

若干个均匀分布在半径可控的圆环上的光学涡旋组成环形光学涡旋阵列,其示意图如图 2 所示.

假设环形光学涡旋阵列有  $N$  个涡旋光束,则任一个涡旋光束的奇点与中心点  $O$  的连线( $OA$ )和水平坐标轴之间的夹角为  $\theta_j = \pi(2j-1)/N$ ,其中,  $j=1,2,3,4\cdots, N$ .若圆环半径为  $\rho$ ,则各位置涡旋光束对应奇点的坐标( $a_j, b_j$ )分别为  $(\rho \cos \theta_j, \rho \sin \theta_j)$ ,该涡旋光束阵列的复振幅可以表示为

$$E_{\text{array}}(x, y) = E_{\text{LC}_0^{l_1}}(x-a_1, y-b_1) + \cdots + E_{\text{LC}_0^{l_j}}(x-a_j, y-b_j) + \cdots + E_{\text{LC}_0^{l_N}}(x-a_N, y-b_N) \quad (4)$$

其中,  $l_j$  为对应的拓扑电荷数,  $j=1,2,3,\cdots, N$ .

根据光学涡旋阵列复振幅表达式,即可得到光强分布和相位分布分别为

$$I = E_{\text{array}}(x, y) \times E_{\text{array}}^*(x, y) \quad (5)$$

$$\varphi = \arg[E_{\text{array}}(x, y)] \quad (6)$$

## 2 光学涡旋阵列的模拟仿真

根据式(3)和(4),模拟仿真出光学涡旋阵列,如图 3 所示.图 3(a)是在源平面取  $M=N=3, d=1.5 \text{ cm}$ ,  $l=2, \omega_0=0.35 \text{ mm}$  模拟产生的  $3 \times 3$  光学涡旋阵列理论光强分布.从图中可以看出,在涡旋阵列的横截面上,均匀分布拓扑电荷为 2、束腰半径为  $0.35 \text{ mm}$  的涡旋光束,相邻涡旋光束之间间隔为  $1.5 \text{ cm}$ .图 3(b)是在源平面取  $\rho=1.5 \text{ cm}, N=8, l=1, \omega_0=0.3 \text{ mm}$  得到的环形光学涡旋阵列理论光强分布,即距离中心

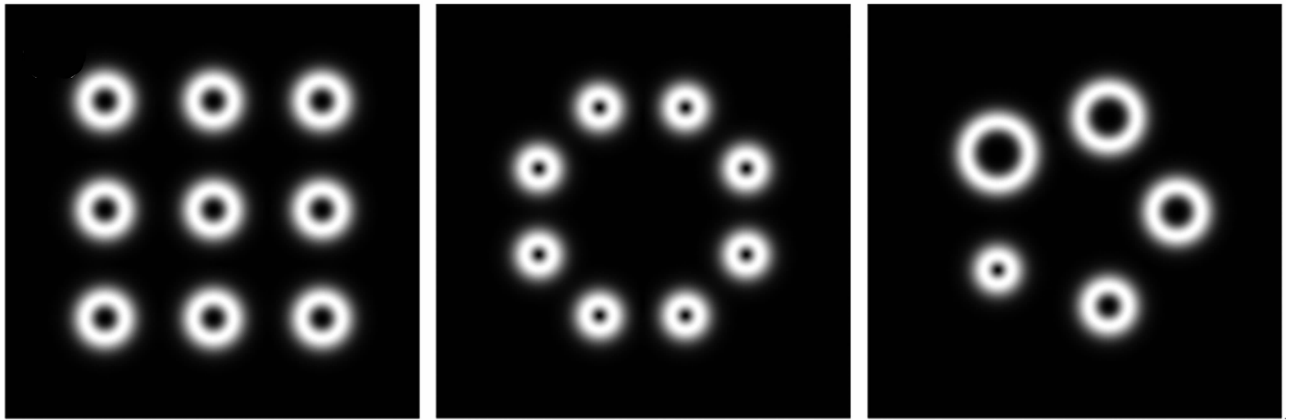


图 3 光学涡旋阵列理论光强分布

Fig. 3 Theoretical intensity distributions of vortex beam arrays

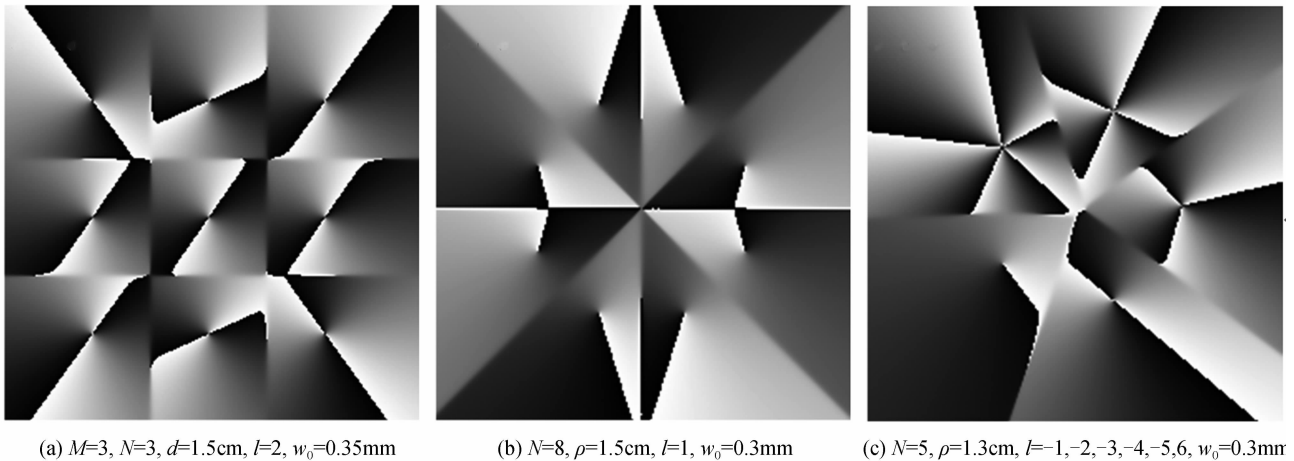


图 4 光学涡旋阵列理论相位分布

Fig. 4 Theoretical phase distributions of vortex beam arrays

1.5 cm处等间隔分布着8个拓扑电荷数为1、束腰半径为0.3 mm的涡旋光束. 图3(c)是在 $z = 0$ 处取 $\rho = 1.3$  cm,  $N=5$ ,  $w_0=0.3$  mm,  $l = -1, -2, -3, -4, -5$ 产生的环形光学涡旋阵列理论光强分布, 即距离中心1.3 cm处等间隔分布着5个束腰半径均为0.3 mm的涡旋光束, 其拓扑电荷分别为 $-1, -2, -3, -4, -5$ .

图4(a)~(c)分别给出了与图3(a)~(c)相对应的光学涡旋阵列的相位分布图. 可以看出各个位置的光学涡旋的相位分布与其拓扑电荷有关, 根据绕光束中心旋转一周, 光束螺旋相位分布由0到 $2\pi$ 变化次数即可知道各位置处涡旋光束的拓扑电荷数.

由图3和图4光学涡旋阵列的光强与相位分布可知, 各个位置上的光学涡旋相互独立, 此特性可实现同时对不同位置上的微粒的实时操控, 这对提高微粒捕获效率方面具有重要的研究意义.

### 3 光学涡旋阵列的计算全息图生成

本文采用共轭对称延拓 Fourier 计算全息方法<sup>[21]</sup>生成光学涡旋阵列的计算全息图(Computer Generated Hologram, CGH). 利用共轭对称复函数的傅里叶变换是实函数这一特性, 直接将物光波作共轭对称延拓、傅里叶变换并进行适当的编码生成所需的计算全息图. 这种面向目标的计算全息方法直接对物光波进行计算全息的编码, 不需要模拟物光波与参考光波的干涉过程, 因此产生的光学涡旋阵列无旁瓣、质量高. 其原理为

设定一个物光波  $f_0(m, n)$  的复振幅分布为

$$f_0(m, n) = A(m, n) \exp [i\varphi(m, n)] \quad m=1, 2, \dots, M/2-1; n=1, 2, \dots, N-1 \quad (7)$$

将物光波进行共轭对称延拓得到复振幅分布为

$$f(m, n) = \begin{cases} f_0(m, n) & m=1, 2, \dots, M/2-1; n=1, 2, \dots, N-1 \\ f_0^*(M-m, N-n) & m=M/2+1, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N-1 \\ 0 & m=0 \text{ or } n=0 \text{ or } m=M/2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, 上标“\*”表示复共轭. 令列数  $M$  和行数  $N$  均为偶数, 且对称中心位于  $(M/2, N/2)$ ,  $f(0, n) = f(m, 0) = f(M/2, 0) = 0$ .  $f(m, n)$  的二维离散 FT 为

$$F(\mu, \nu) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \exp \left[ -i2\pi \left( \frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N} \right) \right] \quad \mu = 0, 1, \dots, M-1; \nu = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

式中,  $\mu$  和  $\nu$  分别为水平和垂直方向的频域样本序号. 将式(7)、(8)代入式(9)中化简整理可得

$$F(\mu, \nu) = \frac{2}{MN} \sum_{m=1}^{(M/2)-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ A(m, n) \cos \left[ 2\pi \left( \frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N} \right) - \varphi(m, n) \right] \right\} \quad \mu = 0, 1, \dots, M-1; \nu = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

从式(10)可以看出物光波复振幅  $f_0(m, n)$  经过共轭对称延拓傅里叶变换后, 得到二维离散实值函数  $F(\mu, \nu)$ , 其每一项都包含了物光波的幅度信息  $A(m, n)$  和相位信息  $\varphi(m, n)$ . 进一步将此实值函数的取值线性映射至  $0 \sim 255$  并取整, 可编码得到 CGH, 利用该 CGH 就可以再现原始物光波.

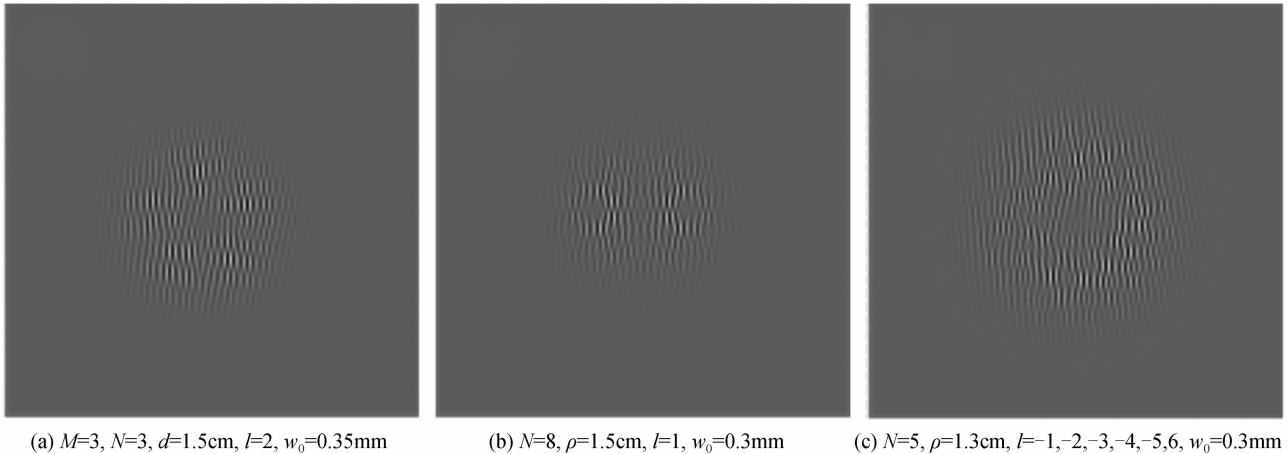


图5 光学涡旋阵列的全息图

Fig. 5 CGH of vortex beam arrays

基于式(3)和(4),利用共轭对称延拓傅里叶计算全息法编码生成光学涡旋阵列的 CGH. 图 5(a)~(c)分别为图 3(a)~(c)所示光学涡旋阵列的 CGH,该全息图包含了光学涡旋阵列的幅度和相位信息.

## 4 实验系统与结果分析

### 4.1 实验系统

实验系统如图 6, He-Ne 激光器(波长 633 nm, 光斑大小 0.75 mm, 功率 2 mW)发射的激光束, 经过功率衰减片 GDF 衰减后, 再经过扩束系统 BE 获得均匀的准平面光. 准平面光束经过分束器 BS<sub>1</sub> 被分成两部分: 透射部分传输一段距离后照射到反射式空间光调制器 (SLM, Holoeye, PLUTO, 像素数 1920×1080) 上. 通过计算机 PC<sub>1</sub> 向 SLM 上加载光学涡旋阵列计算全息图, 对入射光调制后可以产生光学涡旋阵列及其共轭部分, 利用光阑 A 选择所需的涡旋光阵列, 经透镜 L ( $f=200$  mm) 和中性密度衰减片 NDF<sub>2</sub>, 再用 CCD 照相机 (Pike 505B) 实时采集并保存在计算机 PC<sub>2</sub> 中.

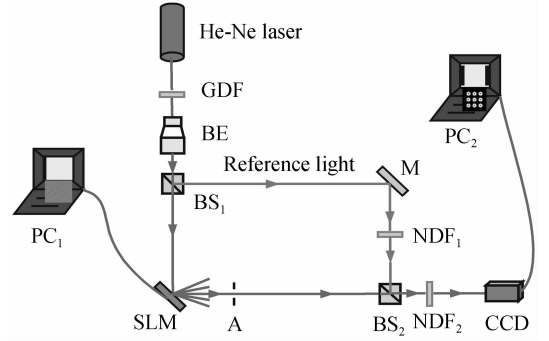


图 6 实验系统示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of the experimental setup

采用马赫-增德尔干涉系统验证实验产生的涡旋阵列. 反射部分的参考平面光波经反射镜 M 传播, 经过中性密度衰减片 NDF<sub>1</sub> 后传播至 BS<sub>2</sub> 处, 与产生的光学涡旋阵列进行相干叠加, 其干涉条纹用来检测其拓扑电荷.

实验中, 首先将参考光路遮挡, 使用 CCD 实时拍摄空间光调制器调制产生的光束, 并保存在 PC<sub>2</sub> 中. CCD 前的 NDF<sub>2</sub> 用于防止 CCD 的饱和. 在拍摄并保存实验结果后, 释放遮挡的参考平面光束, 让其传播至 BS<sub>2</sub> 处与 SLM 产生的光束进行叠加干涉, 并将干涉条纹记录并保存在 PC<sub>2</sub> 中.

### 4.2 实验结果分析

基于图 6 实验系统, SLM 上分别加载图 5 所示的全息图, 并将参考光路遮挡, 使用 CCD 实时拍摄 SLM 调制产生的光学涡旋阵列, 如图 7 所示.

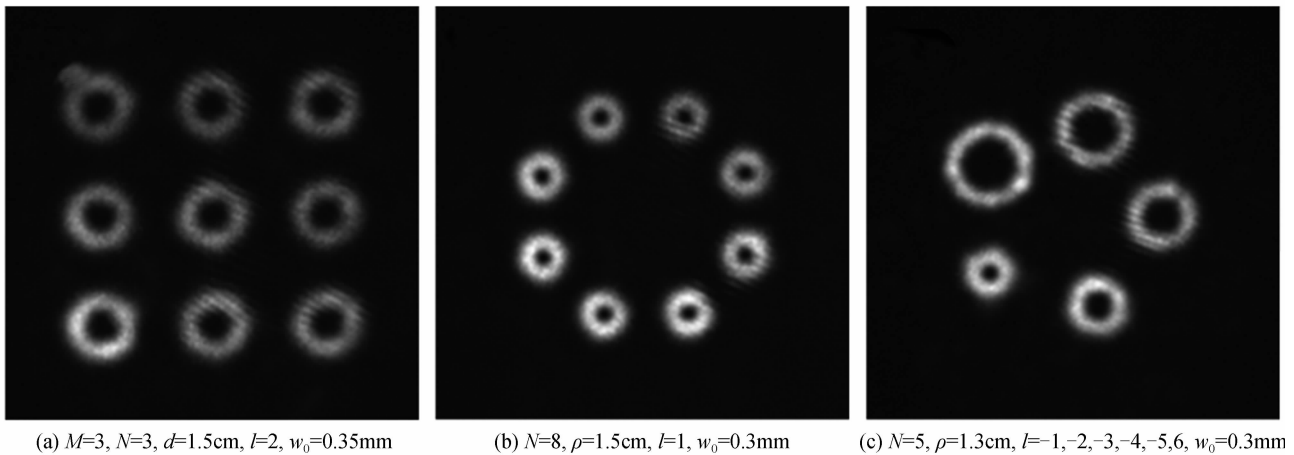


图 7 光学涡旋阵列的实验光强分布图

Fig. 7 Experimental intensity distributions of vortex beam arrays

图 7 产生的光学涡旋阵列涡旋中心光强为零, 且相互独立均匀分布. 该方法的产生的光学涡旋阵列质量高、无旁瓣. 实验结果和图 3 所示的理论结果完全一致. 基于上述方法, 光学涡旋阵列的结构分布可根据实际要求设计, 且涡旋光束数目可控、涡旋光束之间的距离、每个位置处的涡旋光束拓扑电荷及束腰半径均独立可控. 实验结果和理论模拟一致.

为进一步探究实验产生的光学涡旋阵列特性, 基于马赫-增德尔干涉系统进行验证. 各光学涡旋阵列干

涉图样如图 8 所示. 在图 8(a) 矩形涡旋光束阵列中, 阵列中心处干涉角为  $0^\circ$ , 即同轴干涉, 其他涡旋光束位置处为离轴干涉. 该阵列中心处涡旋光束与参考光同轴干涉出现两个拖尾条纹, 其他位置处涡旋光束干涉条纹中心部分条纹由一条分别分裂成 3 条, 且开口为顺时针方向, 表明该涡旋光束阵列的拓扑电荷数均为 2; 在图 8(b) 环形涡旋光束阵列中, 环上干涉条纹中心部分条纹由一根分别分裂为 2 根, 且开叉方向为顺时针, 表明此光学涡旋阵列是由 8 个拓扑电荷为 1 的涡旋光束组成的环形光学涡旋阵列; 在图 8(c) 环形涡旋光束阵列中, 干涉条纹中心部分条纹由 1 根分别开叉为 2, 3, 4, 5, 6 根, 且开叉方向为逆时针方向, 表明该环形光学涡旋阵列拓扑电荷分别为  $-1, -2, -3, -4, -5$ .

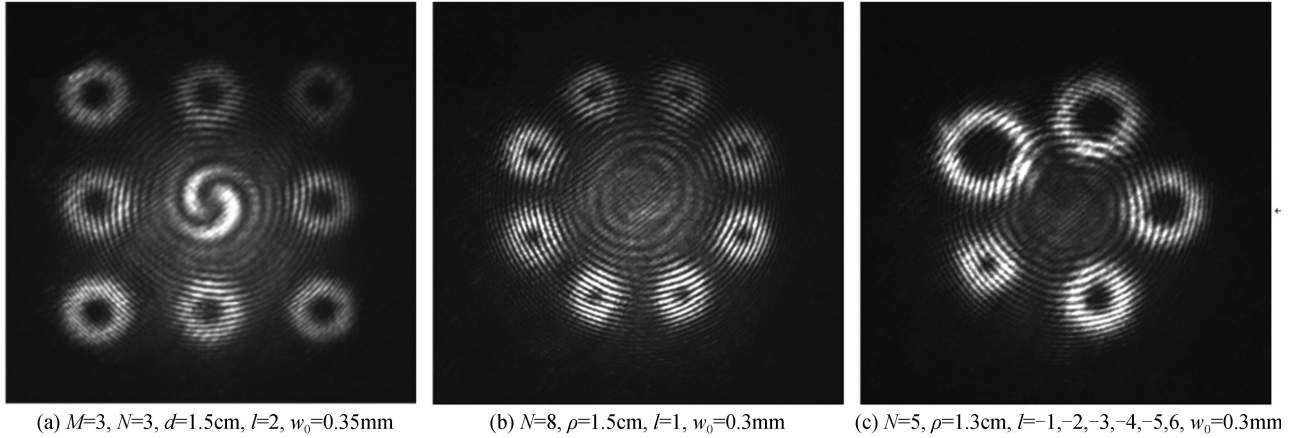


图 8 光学涡旋阵列实验干涉图

Fig. 8 Experimental intensity distributions of vortex beam arrays

基于上述研究, 可以拓展研究产生更为丰富、复杂的光学涡旋阵列, 如图 9 所示. 图 9(a) 为  $8 \times 8$  的拓扑电荷均为 2、束腰半径为 0.3 mm 的矩形光学涡旋阵列. 图 9(b) 为  $2 \times 5$  的拓扑电荷分别为 1~10、束腰半径为 0.3 mm 的矩形光学涡旋阵列. 图 9(c) 为双环形光学涡旋阵列, 内环有 5 个拓扑电荷为 2、束腰半径为 0.3 mm 的涡旋光束, 外环有 8 个拓扑电荷为  $-6$ 、束腰半径为 0.35 mm 的涡旋光束.

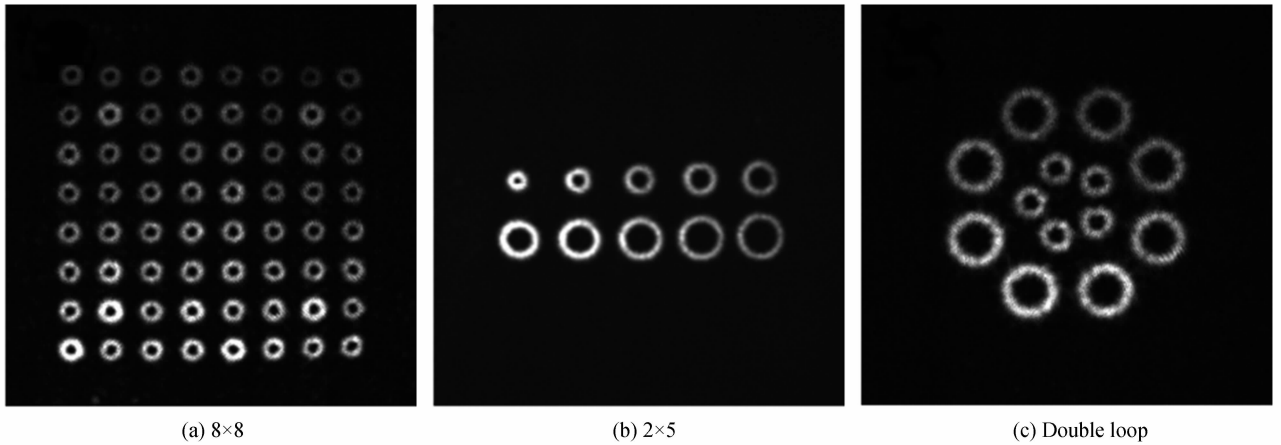


图 9 复杂光学涡旋阵列

Fig. 9 Complex optical vortex array

## 5 结论

本文所研究的高质量光学涡旋阵列基于面向目标的共轭对称延拓傅里叶计算全息方法, 其中, 阵列分布结构、阵列中涡旋光束的数目、涡旋光束之间的距离、每个位置处的涡旋光束拓扑电荷及束腰半径均可控. 基于单个反射式空间光调制器, 产生与理论模拟相一致的无旁瓣光学涡旋阵列, 实验光路简单易实现. 通过马赫-增德尔干涉系统验证生成的光学涡旋阵列. 本文所提供的高质量光学涡旋阵列有望用来对同时刻不同位置上的微粒子进行实时多重操控, 为提高涡旋光束对微粒子的捕获效率提供了理论和实验依据.

参考文献

- [1] CURTIS J E, GRIER D G. Structure of optical vortices [J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(13): 133901.
- [2] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, *et al.* Laser beams with phase singularities [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, **24**(9): S951-S962.
- [3] 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.
- [4] WANG Z, ZHANG N, YUAN X C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 482-492.
- [5] BOZINOVIC B N, YUE Y, REN Y, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. *Science*, 2013, **340**(6140): 1545-1548.
- [6] GRIER D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810-816.
- [7] YANG C H, CHEN Y D, WU S T, *et al.* Independent manipulation of topological charges and polarization patterns of optical vortices [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 31546.
- [8] ORLOV S, REGELSKIS K. Propagation of Bessel beams carrying optical vortices [J]. *Optics Communications*, 2002, **209**(1): 155-165.
- [9] ZHU W, GUAN J, DENG F, *et al.* The propagation properties of the first-order and the second-order Airy vortex beams through strongly nonlocal nonlinear medium [J]. *Optics Communications*, 2016, **380**: 434-441.
- [10] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Optics Communications*, 1993, **96**(1): 123-132.
- [11] LI S, WANG Z. Generation of optical vortex based on computer-generated holographic gratings by photolithography [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(14): 141110.
- [12] KOTLYAR V V, KOVALEV A A, STAFEEV S S, *et al.* An asymmetric optical vortex generated by a spiral refractive plate [J]. *Journal of Optics*, 2013, **15**(2): 025712.
- [13] OSTROVSKY A S, RICKENSTORFF-PARRAO C, ARRIZÓN V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(4): 534-536.
- [14] GUO C S, ZHANG Y, HAN Y J, *et al.* Generation of optical vortices with arbitrary shape and array via helical phase spatial filtering [J]. *Optics Communications*, 2006, **259**(2): 449-454.
- [15] VYAS S, SENTHILKUMARAN P. Vortex array generation by interference of spherical waves [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(32): 7862-7867.
- [16] VYAS S, SENTHILKUMARAN P. Interferometric optical vortex array generator [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(15): 2893-2898.
- [17] WEI G X, LU L L, GUO C S. Generation of optical vortex array based on the fractional Talbot effect [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(14): 2665-2669.
- [18] YU J, ZHOU C, JIA W, *et al.* Three-dimensional Damman vortex array with tunable topological charge [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(13): 2485-2490.
- [19] CHAI Zhong-yang, WANG Qi-chang, ZENG ZHEN, *et al.* Research on the generation of optical vortex array using a wedge array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0426005.  
柴忠洋, 王祺昌, 曾臻, 等. 基于光楔阵列产生光学涡旋阵列的研究 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0426005.
- [20] LI S, XU Z, LIU J, *et al.* Experimental demonstration of free-space optical communications using Orbital Angular Momentum (OAM) array encoding/decoding [C]. *Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2015 Conference on*. IEEE, 2015: 1-2.
- [21] HUANG Su-juan, WANG Shuo-zhong, YU Ying-jie. Computer generated holography based on fourier transform using conjugate symmetric extension [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(2): 952-958.  
黄素娟, 王朔中, 于瀛洁. 共轭对称延拓傅里叶计算全息 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(2): 952-958.