

# 含多阶涡旋的无衍射阵列光束的设计

高垣梅 卢城臻

(山东师范大学 物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

**摘要** 涡旋在光学领域一直有很广泛的应用价值,光学微操纵技术,自由空间的光通信,以及光学测量技术都用到了涡旋光.而高阶涡旋光和阵列涡旋光更是对粒子的批量自组装具有高效的作用,但以往的论文设计出的高阶涡旋光只局域在很小的传播范围( $10^{-6}$  m),所以几乎没有应用价值.本文从理论上设计了含高阶涡旋的阵列涡旋无衍射光场,这种光场的无衍射传播距离大约在 30 cm 左右.在数学上通过傅里叶变换方法推导了阵列涡旋无衍射光场的数学表达式,用数值模拟的方法得到了涡旋阵列光场,实验上利用空间光调制器(SLM)得到了多阶涡旋阵列光场.此外,我们还测量了这种多阶阵列涡旋光场的无衍射距离.本文的研究在光学微操纵,粒子批量自组装等领域具有应用价值.

**关键词** 高阶涡旋;涡旋阵列;无衍射距离;傅立叶变换

**中图分类号** O439

**文献标识码** A

## 0 引言

光学涡旋是一种具有相位奇点,且以奇点为中心进行螺旋传播的光场结构.光学微操纵技术,自由空间的光通信,以及光学测量技术都用到了涡旋光.“无衍射光束”在 1987 年由 Durnin<sup>[1]</sup>引入光学,它被理解为单色光场,在自由空间传播中其横向强度剖面保持不变.由于它的不变长度比传统的高斯光束要长,因此一度引起了人们的广泛关注.在文献<sup>[2-4]</sup>中简单介绍了无衍射光束的一般类型,并对其特性进行了研究.它为光学捕获<sup>[5]</sup>、光镊<sup>[6,7]</sup>、原子光学<sup>[8]</sup>、计量和非线性光学<sup>[9,10]</sup>等提供了大量的机会.在众多的研究中,周期性涡旋光子结构的研究是必要的,其独特的结构特性,控制光传播<sup>[11]</sup>带隙结构和光学晶格表面光孤子,使其在不同物理领域具有重要的研究价值和应用前景<sup>[12-14]</sup>.特别是具有准晶体结构和万花筒结构的图案与自然界中固体材料的晶格结构相对应,它吸引了古代和现代文化中的科学家、数学家和艺术家<sup>[15,16]</sup>.因此,周期涡旋光子结构的优点已经是不容置疑的事实.

周期光学图案可以通过多种方法制备,如直接激光书写<sup>[17]</sup>、电子束光刻<sup>[18]</sup>和多束干涉<sup>[19]</sup>.对于复杂晶格的制备,多束光干涉技术在大面积制备时具有本质上平行的特殊优势.与传统的实验方法相比,基于振幅掩模傅里叶变换的多光束干涉法是一种非常稳定的二维方形光子晶格生成方法<sup>[10,14,20]</sup>,降低了实验难度.但该方法存在明显的局限性,难以实现相位调制,且无衍射光场的传播距离相对较短.近年来,利用空间光调制器(SLM)生成多光束的方法更加灵活可靠,通过控制干扰光束间的相对相位差,可以制备手性光子晶体<sup>[21]</sup>等复杂结构,甚至可以在这些复杂结构<sup>[22]</sup>中嵌入缺陷位点.

本文基于上述工作中提出的相位控制方法<sup>[21,22]</sup>,设计制作了一种涡旋阵列光场.首先,给出  $N=12, l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$  的场分布函数,在光学傅里叶变换的基础上,通过对几个  $\delta$  函数的傅里叶变换得到无衍射光场的函数.另外,通过对几个  $\delta$  函数加载涡旋拓扑荷实现涡旋阵列无衍射光场.在此基础上,分别给出了与之对应的阵列光束的模拟强度调制和相位调制.最后,实验得到了这种无衍射涡旋光场,并测量了这种涡旋光束的非畸变传播距离.

收稿日期:2018-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(11304187,11247022,11304165)资助

通讯作者:高垣梅,女,汉族,博士,教授,研究方向:介观光子学体系, E-mail:gaoyuanmei@sdu.edu.cn.

## 1 理论分析与仿真

为了阐明相关的概念和理论,以 12 重晶格光场作为参考,傅里叶变换方法的原理图如图 1 所示,由  $\delta$  函数表示的 12 个点光源规则排列在傅里叶变换透镜的前焦平面,12 个点均匀的排列在半径为  $a$  的一个圆上.相邻光源之间可以引入一个  $2l\pi/12$  的相位差,其中  $l$  为拓扑荷. $l=0$  时在焦平面  $x-y$  上的光场分布  $U$  可以由下面的十二个  $\delta$  函数描述

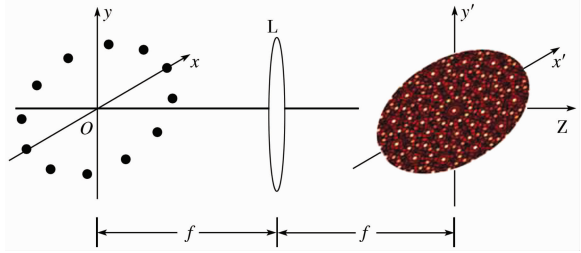


图 1 傅里叶变换法的原理示意图

$$\begin{aligned}
 U(x, y) = & \delta(x - a, y) + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{2\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{2\pi}{12}\right) \\
 & + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{4\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{4\pi}{12}\right) + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{6\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{6\pi}{12}\right) \\
 & + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{8\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{8\pi}{12}\right) + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{10\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{10\pi}{12}\right) \\
 & + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{12\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{12\pi}{12}\right) + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{14\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{14\pi}{12}\right) \\
 & + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{16\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{16\pi}{12}\right) + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{18\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{18\pi}{12}\right) \\
 & + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{20\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{20\pi}{12}\right) + \delta\left(x - a \cdot \cos \frac{22\pi}{12}, y - a \cdot \cos \frac{22\pi}{12}\right).
 \end{aligned} \tag{1}$$

考虑  $\delta$  函数的傅里叶变换

$$F[A\delta(x - x_0, y - y_0)] = A \exp[-2i\pi(f_x x_0 + f_y y_0)]. \tag{2}$$

在傍轴近似下,经过傅里叶变换透镜后得到的场分布

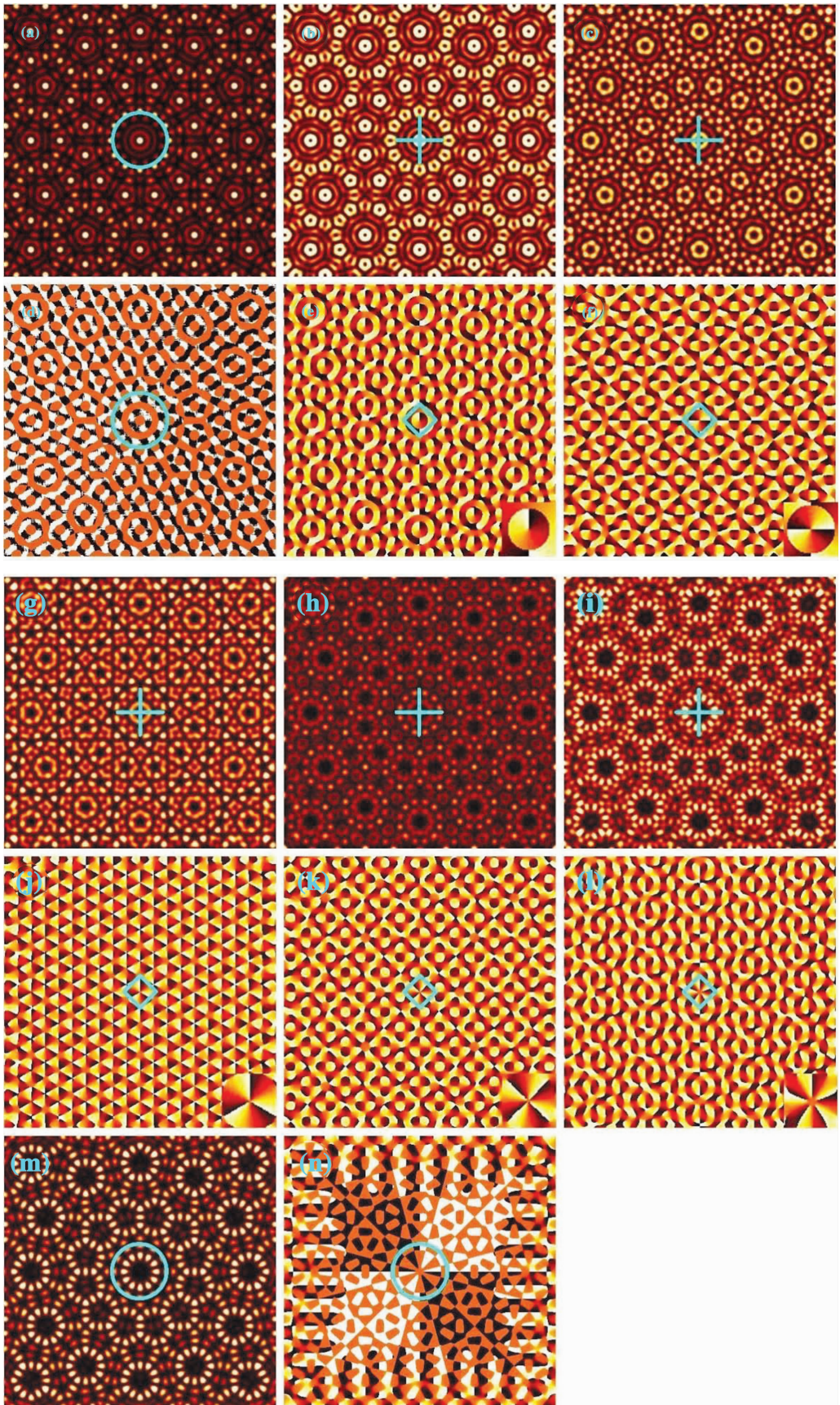
$$\begin{aligned}
 \Psi(x', y') = & 4 \cdot \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda f} x' \cdot \cos \frac{\pi}{6}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda f} y' \cdot \sin \frac{\pi}{6}\right) + 2 \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi a}{\lambda f} x'\right) \\
 & + 4 \cdot \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda f} x' \cdot \cos \frac{\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda f} y' \cdot \sin \frac{\pi}{3}\right),
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中  $\lambda$  为光波波长,  $f$  为透镜焦距.由式(3)可知,输出场为沿  $z$  方向传播的无衍射光束,其横向截面图形显示为阵列结构.

图 2 分别描述了当  $N=12$  和  $l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$  时,模拟强度调制图样(第一行、第三行和图 2(m))和相位调制(第二行、第四行和图 2(n)).从图 2 中可以看出,当  $l=0$  和  $l=6$ [图 2(d)和图 2(n)]时,阵列光场中没有涡旋,而当  $l=1, 2, 3, 4$  和  $5$  时,阵列光场中有拓扑荷涡旋存在.位相图中右下角的插图表示放大的中心涡旋的相位.从插图可以看出,图 2(c)中涡旋拓扑荷为 1,图 2(f)中涡旋拓扑荷是 2,图 2(j)中涡旋拓扑荷是 3,图 2(k)中涡旋拓扑荷是 4,图 2(l)中涡旋拓扑荷是 5.这表明分别形成了不同阶涡旋的长程有序的涡旋阵列结构光场.

## 2 实验装置和结果讨论

制作涡旋阵列光场的实验装置如图 3 所示,光源为功率为 120 mw 的 Nd:YAG 激光器产生的波长为 532 nm 的激光.通过放大倍数是 20 倍的显微镜物镜和焦距为 190 mm 的透镜得到一束宽光束准直平面波.平面波辐照到一个反射式纯位相空间光调制器 SLM (1280 × 1024 分辨率和 12  $\mu$ m 像素间距)上,将数值计算得到的相位掩模加载到 SLM 上,使入射的激光束被 SLM 反射后,按照所加载的相位掩模进行调制.调制后的光束通过透镜 L2 ( $f=300$  mm),在透镜的后焦平面上产生多阶衍射图样.使用合适的滤波器来选择衍射图样中的第一衍射阶光.一级衍射光再通过透镜 L3 ( $f=300$  mm).在透镜 L3 的后焦面上形成的光场图样由 CCD 摄像机记录,其中透镜 L2 和透镜 L3 组成  $4f$  傅里叶滤波系统.



注:第一、三行是强度图,二、四行是相应的位相图,(m)是强度图,(n)是相应的位相图。(a)和(d) $l=0$ , (b)和(e) $l=1$ , (c)和(f) $l=2$ , (g)和(j) $l=3$ , (h)和(k) $l=4$ , (i)和(l) $l=5$ , (m)和(n) $l=6$ 。

图2 复杂涡旋光场的数值模拟图

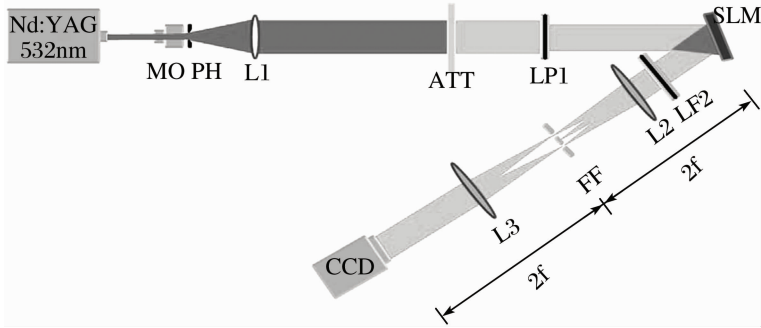


图 3 实验产生的涡旋格子阵列强度图,MO 是显微镜,PH 是针孔, L 是透镜,ATT 是衰减片,LP 是线性偏振片,FF 是空间滤波器, SLM 是空间光调制器,CCD 是光电信号相机

另一个值得提及的有趣现象是无衍射光束的有效无衍射传输距离. 为了测量涡旋光束的非畸变传播距离,将 CCD 沿光场传播方向前后移动. 在图 4 中,描述了当  $N=12$  和  $l=1$  时,不同传播距离位置处的横向强度分布. 图 4(a)表示用 CCD 捕捉到的  $4f$  系统焦平面上的光场横向强度分布,图 4(b)-(e)表示 CCD 位置与焦平面距离分别是 50,100,150,200 mm 时所采到的图像. 判断阵列涡旋光场的无衍射距离,从涡旋的无畸变程度来描述. 从图 4(a),(b)和(c)中可以看出,涡旋阵列的每一个涡旋光场(形状如面包圈)都是闭合的,这说明它是在无衍射传播. 从图 4(d)中可以看出,当  $z=150$  mm 时,有少量包含涡旋的“面包圈”发生畸变(不闭合的),也就是说阵列光场中有少量涡旋是衍射传播的,但大部分涡旋是无衍射传播的. 在图 4(e)中,当  $z=200$  mm 时,绝大部分的“面包圈”都不是闭合的,这是阵列涡旋场中的涡流扭曲,这说明阵列光场的传播是有衍射的,不再是无衍射传播. 所以无衍射传播距离  $z$  的取值范围大约从  $-150$  到  $+150$  mm. 即涡旋阵列光束的无衍射传播距离大约是 300 mm.

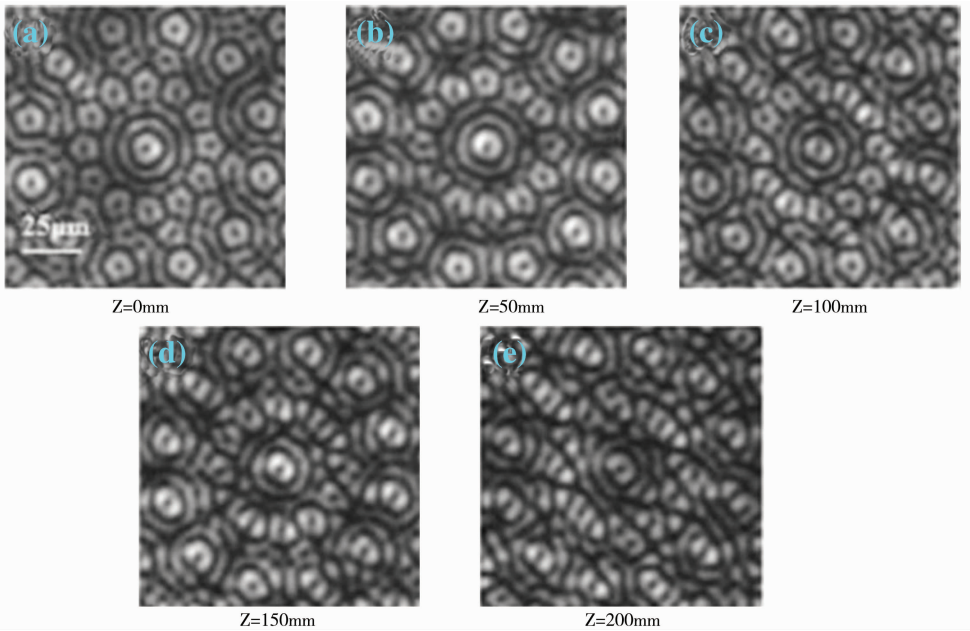


图 4 当  $N=12$  和  $l=1$  时,沿  $z$  轴方向传播不同距离处,涡旋阵列光束的强度图样

### 3 结论

本文探讨了十二个规则排列,有相同位相差的  $\delta$  函数通过傅里叶变换后得到的 12 重阵列涡旋光场. 从理论上很好地模拟了 12 重晶格阵列涡旋光场的强度调制和相位调制. 在实验中,把理论模拟的位相调制图加载到纯相位空间光调制器(SLM)上,光束通过 SLM 以后就携带这种信息,通过  $4f$  傅里叶系统后,得到了这个阵列晶格光场. 并实验研究了阵列涡旋光场的非畸变传播距离. 由于相位奇异并具有轨道角动量的涡旋光束在光镊、冷原子俘获和引导以及光子纠缠态的研究中得到了广泛的应用,因此,所产生的阵列涡旋场有望在这些领域提供潜在的应用价值.

## 参 考 文 献

- [1] Durnin J, Miceli Jr J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499.
- [2] Bouchal Z. Dependence of Bessel beam characteristics on angular spectrum phase variations[J]. Journal of Modern Optics, 1993, 40(7): 1325-1329.
- [3] Ruschin S. Modified Bessel nondiffracting beams[J]. JOSA A, 1994, 11(12): 3224-3228.
- [4] Chávez-Cerda S, McDonald G S, New G H C. Nondiffracting beams; travelling, standing, rotating and spiral waves[J]. Optics communications, 1996, 123(1-3): 225-233.
- [5] Carnegie D J, Stevenson D J, Mazilu M, et al. Guided neuronal growth using optical line traps[J]. Optics express, 2008, 16(14): 10507-10517.
- [6] Garces-Chavez V, McGloin D, Melville H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. Nature, 2002, 419(6903): 145.
- [7] Giorgini S, Pitaevskii L P, Stringari S. Theory of ultracold atomic fermi gases[J]. Reviews of Modern Physics, 2008, 80(4): 1215.
- [8] McGloin D, Spalding G C, Melville H, et al. Applications of spatial light modulators in atom optics[J]. Optics Express, 2003, 11(2): 158-166.
- [9] Kartashov Y V, Vysloukh V A, Torner L. Soliton shape and mobility control in optical lattices[J]. Progress in Optics, 2009, 52: 63-148.
- [10] Martin H, Eugenieva E D, Chen Z, et al. Discrete solitons and soliton-induced dislocations in partially coherent photonic lattices[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(12): 123902.
- [11] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. Photonic Crystals; Molding the Flow of Light[M]. USA New Jersey; Princeton University Press, 2011.
- [12] Terhalle B, Desyatnikov A S, Bersch C, et al. Anisotropic photonic lattices and discrete solitons in photorefractive media[J]. Applied Physics B, 2007, 86(3): 399-405.
- [13] Fleischer J W, Carmon T, Segev M, et al. Observation of discrete solitons in optically induced real time waveguide arrays[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(2): 023902.
- [14] Neshev D N, Alexander T J, Ostrovskaya E A, et al. Observation of discrete vortex solitons in optically induced photonic lattices[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(12): 123903.
- [15] Lu P J, Steinhardt P J. Further notes on quasi-crystal tilings[J]. Science, 2007, 316(5827): 981-982.
- [16] Zaslavsky G M. Weak Chaos and Quasi-Regular Patterns [M]. Cambridge; Cambridge Nonlinear Science Series 1, 1991.
- [17] Deubel M, Von Freymann G, Wegener M, et al. Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications[J]. Nature materials, 2004, 3(7): 444.
- [18] Decker M, Ruther M, Krieglner C E, et al. Strong optical activity from twisted-cross photonic metamaterials[J]. Optics Letters, 2009, 34(16): 2501-2503.
- [19] Wang X, Ng C Y, Tam W Y, et al. Large-area two-dimensional mesoscale quasi-crystals[J]. Advanced materials, 2003, 15(18): 1526-1528.
- [20] Qi X, Liu S, Zhang G, et al. Gap solitons in optically induced two-dimensional square photonic lattices in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystals[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(13): 131111.
- [21] Xavier J, Joseph J. Tunable complex photonic chiral lattices by reconfigurable optical phase engineering[J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 403-405.
- [22] Kumar M, Joseph J. Embedding a nondiffracting defect site in helical lattice wave-field by optical phase engineering[J]. Applied Optics, 2013, 52(23): 5653-5658.

## Design of Diffractive Array Beams with Multiorder Vortices

GAO Yuan-mei LU Cheng-zhen

(School of Physics and Electronic Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract** vortex has been widely used in optical field. Optical micro-manipulation techniques, optical communication in free space, and optical measurement techniques all use vortex light. The high-order vortex light and array vortex light have more efficient effect on the bulk self-assembly of particles. However, the high-order vortex light designed in previous papers is only localized in a small propagation range ( $10^{-6}$  m), so it has little application value. In this paper, the array vortex beam with high-order vortex is designed theoretically by us, and the propagation distance of this light field is about 30cm. The mathematical expression of array vortex diffraction free optical field is derived with Fourier transform. The optical field of vortex array is obtained by numerical simulation. High-order vortex lattice light field was obtained experimentally by using spatial light modulator (SLM). In addition, the diffraction free distance of the high-order lattice vortex field was measured. The research in this paper has application value in optical micro-manipulation, particle self-assembly and other fields.

**Key words** higher order vortex; vortex array; no diffraction distance; Fourier transform