

多环涡旋光束的实验研究

黄素娟 谷婷婷 缪庄 贺超 王廷云

Experimental study on multiple-ring vortex beams

Huang Su-Juan Gu Ting-Ting Miao Zhuang He Chao Wang Ting-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 244103 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.244103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用改进的物理光学法和图形计算电磁学近似算法快速计算导体目标电磁散射特性

Fast computation of electromagnetic scattering characteristics from conducting targets using modified-physical optics and graphical electromagnetic computing

物理学报.2014, 63(16): 164202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164202>

连续相位板面形的随机特性研究

Surface stochastic characteristics of continuous phase plate

物理学报.2014, 63(16): 164203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164203>

表面颗粒污染物诱导薄光学元件初始损伤的机理

Mechanism of original damage of thin optical components induced by surface particle contamination

物理学报.2014, 63(13): 134201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134201>

菲涅耳深区散斑强度统计特性及演化

Statistical characteristics and variation of speckle intensity in deep fresnel diffraction region

物理学报.2014, 63(9): 094201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094201>

离轴拉盖尔-高斯涡旋光束传输中的光斑演变

Change of the off-center Laguerre-Gaussian vortex beam while propagation

物理学报.2012, 61(6): 064103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064103>

多环涡旋光束的实验研究*

黄素娟[†] 谷婷婷 缪庄 贺超 王廷云

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

(2014年5月5日收到; 2014年7月3日收到修改稿)

涡旋光束的产生、传输与应用是当前光学领域热门的研究课题之一. 本文提出的新型多环涡旋光束, 包括双环涡旋及三环涡旋光束, 它是由多束携带不同拓扑电荷数且束腰半径不同的拉盖尔-高斯涡旋光束共轴叠加而成, 其光强分布为多环结构. 从理论上研究了多环涡旋光束的形成与分布特征, 基于共轭对称延拓 Fourier 计算全息方法生成了多环涡旋光束的计算全息图, 并利用一个空间光调制器实验产生了与理论一致的高质量的多环涡旋光束. 研究表明多环涡旋光束的各环携带不同的轨道角动量, 空间分布保持相互独立. 这种新型的多环涡旋光束相对于携带单一拓扑电荷数的涡旋光束, 提供了更多的控制参数和更加多样化的结构分布, 因此在光学镊子、光学捕获等微操控以及光通信领域具有潜在的应用潜力.

关键词: 涡旋光束, 拓扑电荷数, 计算全息图, 空间光调制器

PACS: 41.85.-p, 42.25.Fx, 42.40.Jv, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.63.244103

1 引言

近年来, 具有螺旋波前结构的涡旋光束逐渐成为光学领域的研究热点^[1,2], 此类光束特征相位因子描述为 $\exp(i l \theta)$, 其中 l 为拓扑电荷数, Allen 等^[3,4] 证明此类光束中每个光子均携有 $l\hbar$ 大小的轨道角动量. 涡旋光束的产生方法主要有模式转换^[5]、螺旋相位板 (spiral phase plate, SPP)^[6,7] 和空间光调制器 (spatial light modulator, SLM)^[8,9], 目前实时与灵活性俱佳的空间光调制器被较广泛地用来产生涡旋光束, 通过加载不同的计算全息图 (computer-generated hologram, CGH), 可以方便地产生携带不同拓扑信息的动态涡旋光束.

随着对携带单一拓扑电荷数的涡旋光束研究逐渐深入, 复合涡旋光束逐渐成为该领域关注的热点. 如利用拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 涡旋光束^[3,10] 共轴叠加, 可以形成具有多样化结构分布和特殊传播特性的复合涡旋光束, 如 bottle 光束^[11]、光学摩天轮^[12]、光环晶格^[13-15] 等, 其为光束的相位分布、Guoy 旋转、光束自修复及冷原子囚

禁等^[14-17] 研究提供了大量的理论和实验依据. 近年来, 国内相关学者也在复合涡旋光束的研究中取得了一定的成果. 文献^[18] 研究了部分相干双环涡旋光束的传播特性. Guo 等^[19] 在研究抑制旁瓣得到最佳环形螺旋相位结构时, 提出了双环螺旋相位及其光强分布的复合涡旋光束. 文献^[20] 研究了具有双环结构的双涡旋光束的产生方法与传输特性, 该光束由 SPP 和 SLM 分别产生携带不同拓扑电荷数的涡旋光束在自由空间共轴叠加而成; 此后, 方杜娟等基于文献^[20] 的研究成果, 对分数阶双环涡旋光束的产生与空间传输特性进行了实验研究^[21]. 但文献^[19] 主要研究抑制涡旋光束旁瓣得到最佳环形相位结构, 而文献^[20, 21] 在双环涡旋光束的产生过程采用了较高复杂度的实验系统, 涡旋光束分别经 SLM 及 SPP 产生后需要进行准确的共轴叠加, 光束中心需要尽可能的对准, 并且在光合束位置需要保持等臂. 此外, 文献^[20, 21] 中基于 SLM 产生的外环涡旋光束, 其主亮环外围均有明显的旁瓣的存在.

本文研究新型的多环涡旋光束, 包含双环涡旋

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178088, 61235002, 61475098)、上海市科技创新行动计划 (批准号: 14511100100) 和上海市教委科研创新基金 (批准号: 12YZ011) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: sjhuang@shu.edu.cn

光束及三环涡旋光束, 它是由多束独立的LG涡旋光束共轴叠加而成, 各涡旋光束的束腰半径不同且拓扑电荷数相差较大, 其光强分布呈现为多环结构. 文中对多环涡旋光束进行了理论模拟, 基于共轭对称延拓 Fourier 计算全息生成多环涡旋光束的计算全息图, 并利用一个空间光调制器的光电实验进行了验证, 理论模拟与实验结果符合得很好, 研究结果有望应用在微观粒子的捕获、分拣与光信息编码等领域.

2 理论分析

2.1 LG 涡旋光束

LG 涡旋光束 (LG_p^l) 是实验中最典型的涡旋光束, 其中 l 为 LG 涡旋光束的拓扑电荷数, p 为径向量子数, 表示光束传播截面上的光强分布具有 $p+1$ 个亮环, 光束中心为相位奇点, 在此光束自消干涉导致光强为零, 光束呈暗中空形态. 本文在理论及实验中均采用单环模式的 LG 涡旋光束 ($p=0$), 该模式下拓扑电荷数为 l 的 LG 涡旋光束光电场复振幅可描述为

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

其中

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad \varphi = (|l| + 1) \tan^{-1}(z/z_R), \quad R = z[1 + (z_R/z)^2], \quad (2)$$

在 (1) 和 (2) 式中, r, θ, z 为柱坐标参数, w_0 表示束腰半径, $w(z)$ 为传播距离 z 处光斑大小, k 为波数, R 为曲率半径, z_R 为瑞利长度, φ 表示光束的 Guoy 相位, l 为涡旋光束的拓扑电荷数.

2.2 双环涡旋光束

基于 (1) 式, 设有两束 LG 涡旋光束在自由空间共轴叠加, 则可以得到双环涡旋光束, 设两涡旋光束的拓扑电荷数分别为 l_1, l_2 (其中 $|l_1| \ll |l_2|$), 且两涡旋光束的束腰半径分别为 w_{01}, w_{02} ($w_{01} < w_{02}$), 则双环涡旋光束的复振幅可表

示为

$$LG_{0(\text{two})}^l = LG_0^{l_1}(w_{01}) + LG_0^{l_2}(w_{02}), \quad (3)$$

则双环涡旋光束的光强 $I_{0(\text{two})}^l$ 和相位分布 $\phi_{0(\text{two})}^l$ 分别为

$$I_{0(\text{two})}^l = LG_{0(\text{two})}^l \times LG_{0(\text{two})}^{l*}, \quad (4)$$

$$\phi_{0(\text{two})}^l = \arg[LG_{0(\text{two})}^l]. \quad (5)$$

理论模拟取 (3) 式中双涡旋光束束腰半径 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$, 传播距离为 0.2 m . 图 1 为 $l_1 = -1$ 保持不变, l_2 取不同值的双环涡旋光束的理论光强分布和相位分布. 从图中容易看出, 双环涡旋光束的光强为独立的双环结构, 光束中心光强为零进而形成中空暗斑. 进一步研究双环涡旋光束的相位分布特性可以发现, 双环涡旋光束内外环携带的拓扑电荷数 (围绕光束中心, 相位由 0 至 2π 渐变次数) 不同, 因此内外环光子携带不同大小的轨道角动量; 此外, 不断增大外环拓扑电荷数 l_2 绝对值时, 外环半径不断增加, 内外环间距离随之增大. 图 1 (d)–(f) 是与图 1 (a)–(c) 对应的光束相位分布图, 外环拓扑电荷数 l_2 绝对值增大时, 内环光束相位分布不变, 外环光束围绕光束中心旋转一周, 相位灰度由 0 到 2π 变化次数 (表征拓扑电荷数绝对值) 不断增加. 此外还可以观察到, 在传输距离 $z = 0.2 \text{ m}$ 处, 双环涡旋光束各自的等相位线均为逆时针方向弧线 (拓扑电荷数为正时, 弧线方向为顺时针).

2.3 三环涡旋光束

基于 (1) 式, 设第三束 LG 涡旋光束在自由空间与 (3) 式描述的双环涡旋光束共轴叠加, 便可得到三环涡旋光束. 设第三束 LG 涡旋光束的拓扑电荷数为 l_3 ($|l_1| \ll |l_2| \ll |l_3|$), 束腰半径为 w_{03} ($w_{01} < w_{02} < w_{03}$). 三环涡旋光束的复振幅可以表示为

$$LG_{0(\text{three})}^l = LG_0^{l_1}(w_{01}) + LG_0^{l_2}(w_{02}) + LG_0^{l_3}(w_{03}), \quad (6)$$

则三环涡旋光束的光强 $I_{0(\text{three})}^l$ 和相位分布 $\phi_{0(\text{three})}^l$ 表达式为

$$I_{0(\text{three})}^l = LG_{0(\text{three})}^l \times LG_{0(\text{three})}^{l*}, \quad (7)$$

$$\phi_{0(\text{three})}^l = \arg[LG_{0(\text{three})}^l]. \quad (8)$$

理论模拟中保持三环涡旋光束束腰半径 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$, $w_{03} = 0.6 \text{ mm}$ 不变, 三束 LG 涡旋光束的传播距离均为 0.2 m .

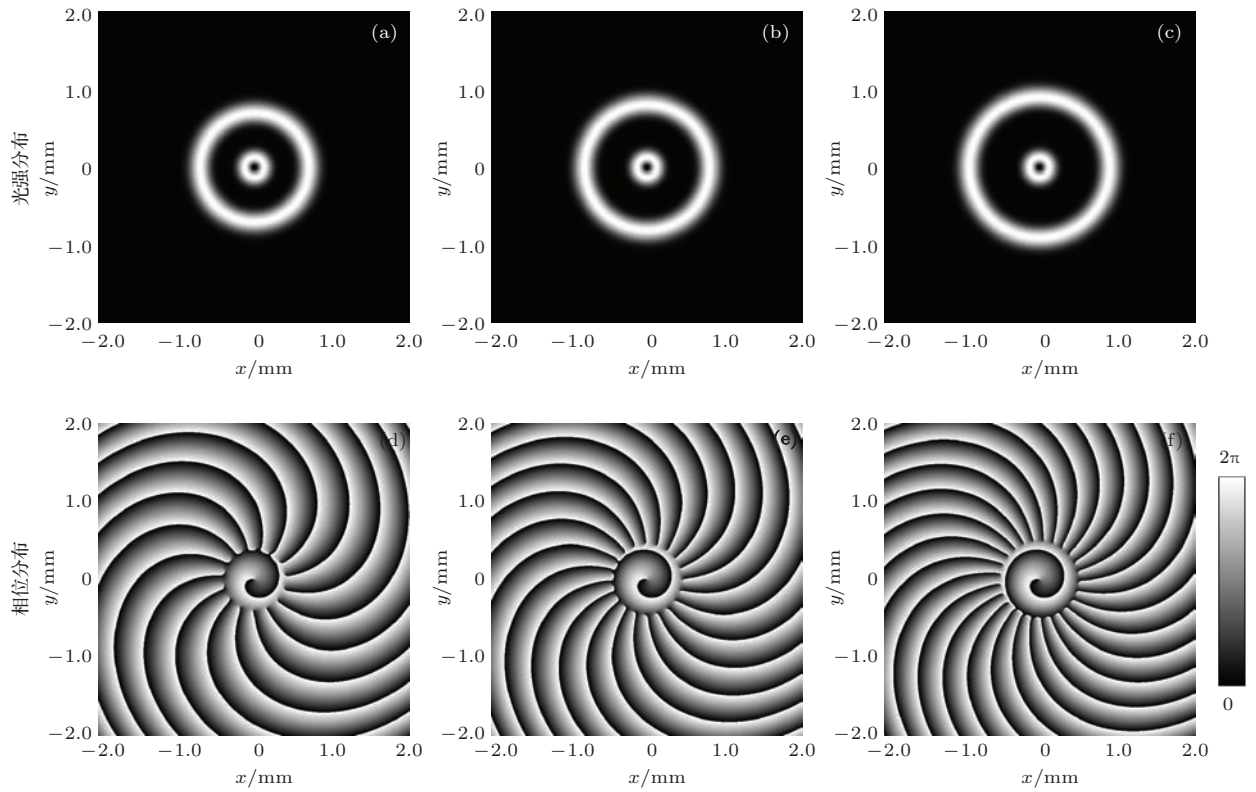


图1 双环涡旋光束的理论光强与相位分布 保持内外环束腰半径 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$ 及内环拓扑电荷数 $l_1 = -1$ 不变; 外环拓扑电荷数取值为: (a), (d) $l_2 = -15$; (b), (e) $l_2 = -20$; (c), (f) $l_2 = -25$

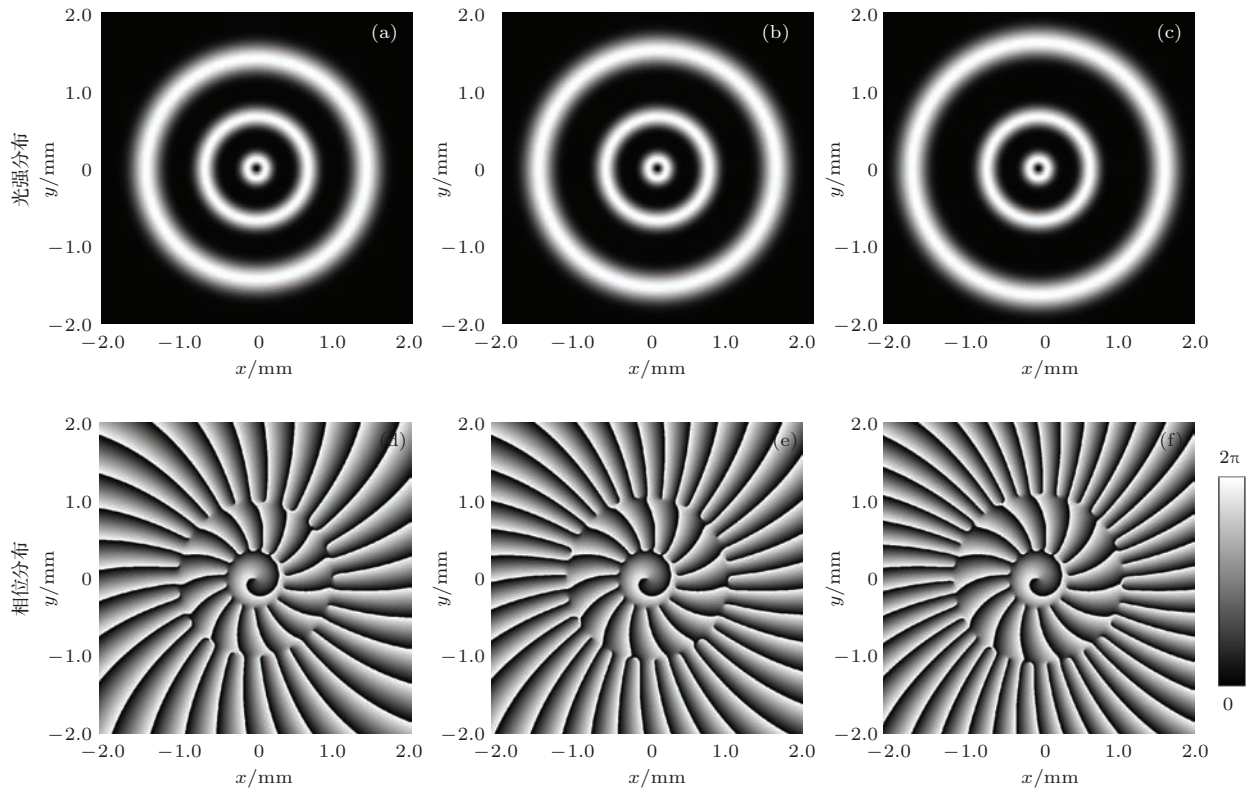


图2 三环涡旋光束的理论光强与相位分布 保持内环中环与外环束腰半径 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$, $w_{03} = 0.6 \text{ mm}$ 及内环中环拓扑电荷数 $l_1 = -1$, $l_2 = -15$ 不变; 外环拓扑电荷数取值为: (a), (d) $l_3 = -32$; (b), (e) $l_3 = -37$; (c), (f) $l_3 = -42$

图2为传播距离0.2 m处, 内环拓扑电荷数 $l_1 = -1$ 和中环拓扑电荷数 $l_2 = -15$ 不变, l_3 取不同值的三环涡旋光束的理论光强分布与相位分布, 其中三环涡旋光束束腰半径分别为 $w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm, $w_{03} = 0.6$ mm. 由图2可以观察到, 三环涡旋光束光强为独立的同心三环结构, 光束中心同样为中空暗斑. 当不断增大外环拓扑电荷数 l_3 的绝对值时, 外环半径不断增加, 中环与外环间距离也随之增大. 图2(d)—(f)是与图2(a)—(c)对应的光束相位分布图, 由图可知三环涡旋光束三环上的光子可携带三种不同大小的轨道角动量, 因此其相对于传统的单环或双环涡旋光束, 提供了更强的信息编码与粒子分拣、捕获能力. 此外还可发现, 在

传输距离 $z = 0.2$ m处, 三环涡旋光束由外环到内环等相位线的弧度逐渐增大.

图3(a)—(c)给出的是内环与外环拓扑电荷数 $l_1 = -1$, $l_3 = -37$ 不变, 中环涡旋光束拓扑电荷数 l_2 取值 -15 , -19 , -23 时三环涡旋光束的光强分布, 其中三环涡旋光束束腰半径分别为 $w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm, $w_{03} = 0.6$ mm. 可以看到, 不断增大中环拓扑电荷数 l_2 绝对值时, 中环半径不断增加, 中环与内环间距离随之增大, 而中环与外环间距离不断减小. 图3(d)—(f)描述的是与图3(a)—(c)对应的光束相位分布图, 可知中环相位分布随拓扑电荷数 l_2 的改变而不断变化.

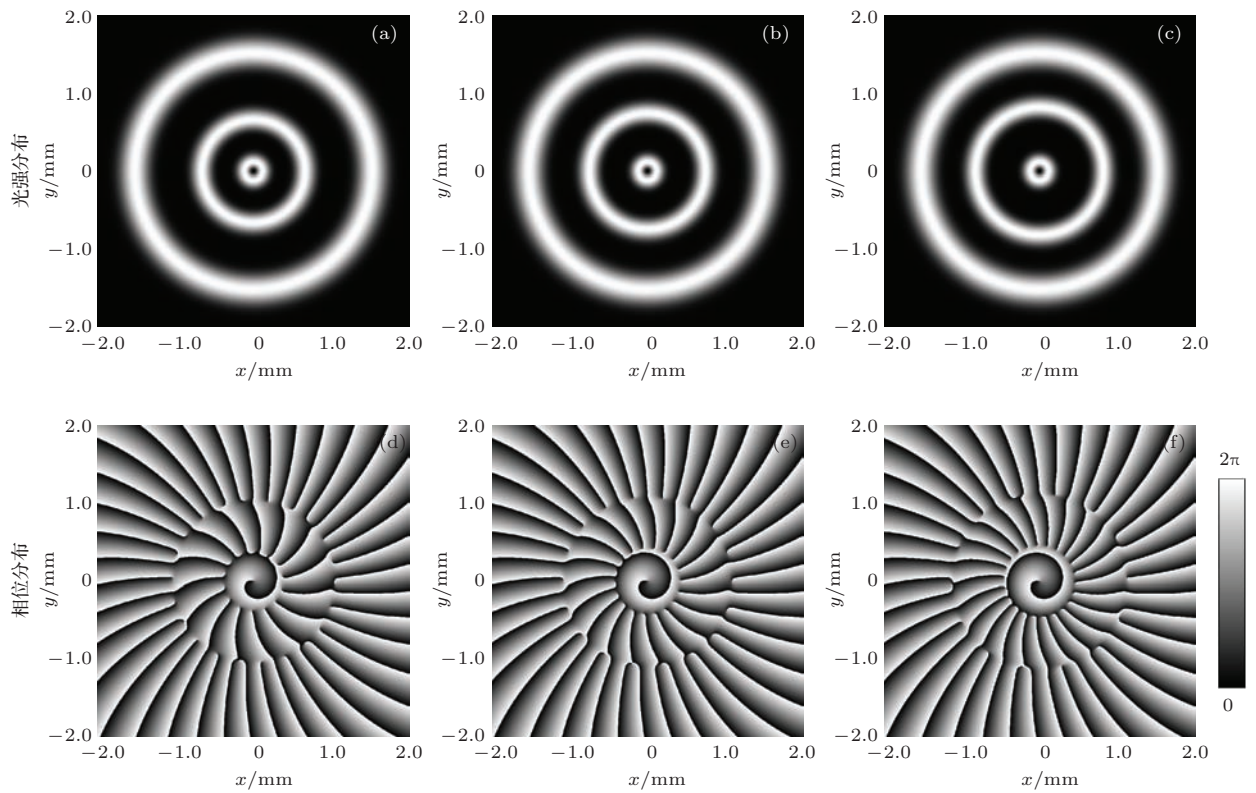


图3 三环涡旋光束的理论光强与相位分布 保持内环中环与外环束腰半径 $w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm, $w_{03} = 0.6$ mm 及内环外环拓扑电荷数 $l_1 = -1$, $l_3 = -37$ 不变; 中环拓扑电荷数取值为: (a), (d) $l_2 = -15$; (b), (e) $l_2 = -19$; (c), (f) $l_2 = -23$

3 多环涡旋光束计算全息图的产生

3.1 共轭对称延拓 Fourier 计算全息

本文采用共轭对称延拓 Fourier 计算全息^[22]方法生成多环涡旋光束的CGH. 基于共轭对称延拓复函数的 Fourier 变换是实函数这一特性, 直接将物光波共轭对称延拓后做 Fourier 变换 (FT), 进行适当的编码可生成全息图. 其原理简述如下.

设一物光波复振幅 $f_0(m, n)$ 由幅度和相位两部分组成:

$$f_0(m, n) = A(m, n) \exp[i\varphi(m, n)]$$

$$(m = 1, 2, \dots, M/2 - 1;$$

$$n = 1, 2, \dots, N - 1). \quad (9)$$

将上述物光波进行共轭对称延拓得到下述复振幅分布:

$$f(m, n) = \begin{cases} f_0(m, n) & (m = 1, 2, \dots, M/2 - 1; n = 1, 2, \dots, N - 1) \\ f_0^*(M - m, N - n) & (m = M/2 + 1, \dots, M - 1; n = 1, 2, \dots, N - 1), \\ 0 & (m = 0 \text{ 或 } n = 0 \text{ 或 } m = M/2) \end{cases} \quad (10)$$

上标“*”表示复共轭. 令列数 M 和行数 N 均为偶数, 并使 $f(0, n) = f(m, 0) = f(M/2, n) = 0$, 对称中心位置为 $(M/2, N/2)$. $f(m, n)$ 的离散 FT 为

$$F(\mu, \nu) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \times \exp \left[-i2\pi \left(\frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N} \right) \right] \quad (\mu = 0, \dots, M - 1; \nu = 0, \dots, N - 1), \quad (11)$$

(11) 式中 μ 和 ν 为分别为水平和垂直方向的频域样本序号. 将 (9), (10) 式代入 (11) 式中整理化简可得

$$F(\mu, \nu) = \frac{2}{MN} \sum_{m=1}^{(M/2)-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ A(m, n) \times \cos \left[2\pi \left(\frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N} \right) - \varphi(m, n) \right] \right\} \quad (\mu = 0, 1, \dots, M - 1; \nu = 0, 1, \dots, N - 1). \quad (12)$$

从 (12) 式可以看出物光波复振幅 $f_0(m, n)$ 经过共轭对称延拓和 FT 后, 得到包含物光波幅度信息 $A(m, n)$ 和相位信息 $\varphi(m, n)$ 的二维离散实值函数 $F(\mu, \nu)$. 将其映射至 0—255 并取整, 可编码得到 8 bit 深度的 CGH, 利用该 CGH 可以再现原始物光波.

3.2 多环涡旋光束的 CGH

利用共轭对称延拓 Fourier 计算全息, 基于 (3) 和 (6) 式编码多环涡旋光束的 CGH. 图 4(a), (b) 分别为图 1(a) 所示的双环涡旋光束、图 2(a) 所示的三环涡旋光束的 CGH, 图 4(c), (d) 分别为图 4(a), (b) 中心区域 (正方形内) 放大 4 倍后的灰度分布, 其分布不同于传统的全息光栅或者螺旋相位图, 但包含了多环涡旋光束的幅度和螺旋相位信息.

4 实验装置与结果分析

4.1 实验装置

实验装置如图 5 所示. 氦氖激光器 (波长 633 nm, 光斑大小 0.75 mm, 功率 2 mW) 发射的

激光, 经渐变密度衰减片衰减到 1 mW, 经扩束系统后获得均匀的准平面光. 准平面光照射在反射式空间光调制器 (SLM, Holoeye, LCR_2500) 上. 通过计算机 1 将多环涡旋光束的 CGH 加载在 SLM 的液晶屏上, 加载 CGH 的液晶屏可充当一个动态衍射元件, 对入射的光波进行调制, 便可以产生 +1 级 (包含多环涡旋光束及其共轭图像)、0 级及 -1 级图像. 通过光阑选择多环涡旋光束, 经透镜 ($f = 500$ mm) 和中性密度衰减片, 光束被 CCD 照相机 (CoolSNAP, Turbo 1394 型) 实时拍摄并保存在计算机 2 中.

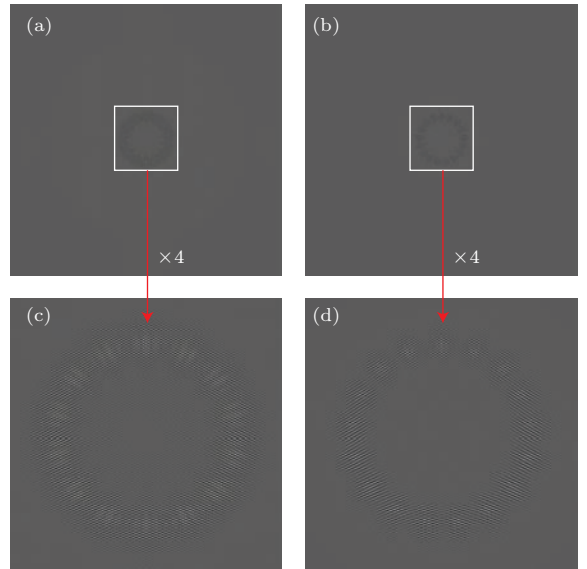


图 4 多环涡旋光束的 CGH (a) 双环涡旋光束 (图 1 所示) 的 CGH; (b) 三环涡旋光束 (图 2 所示) 的 CGH; (c) 图 (a) 中心区域 4 倍放大后分布; (d) 图 (b) 中心区域 4 倍放大后分布

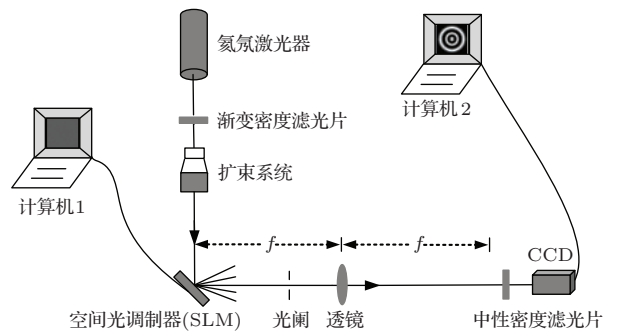


图 5 实验装置示意图

4.2 实验结果与分析

使用 CCD 在距离 SLM 1.2 m 处拍摄实验结果. 图 6(a) 给出了 $l_1 = -1, l_2 = -15, w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm 时双环涡旋光束的实验光强分布图, 图 6(b) 为对应的径向光强分布.

由图 6(a) 观察可知, 双环涡旋光束光强分布为独立的同心双环结构, 双环涡旋光束中心为中空暗斑, 实验结果与理论模拟图 1(a) 基本一致. 图 6(b) 为双环涡旋光束的径向光强分布, 可以看出实验产生的双环涡旋光束径向光强分布(虚线)有四个光强极大值(波峰), 实验结果与理论结果(实线)符合较好.

图 7(a)–(c) 描述的内外环束腰半径 $w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm 及内环拓扑电荷数 $l_1 = -1$ 不变, 外环涡旋光束拓扑电荷数 l_2 分别取 $-15, -20, -25$ 时双环涡旋光束的光强分布

图 7 中结果表明, 双环涡旋光束保持内环拓扑电荷数 l_1 不变, 不断增大外环拓扑电荷数 l_2 绝对值时, 外环半径不断增加, 内外环间距离随之增大, 两环之间暗斑也随之展宽. 实验结果与理论模拟图 1(a)–(c) 结果基本一致. 此外, 需要指出的是,

实验产生的双环涡旋光束各亮环外围均无旁瓣, 光束质量高.

图 8(a) 给出了 $l_1 = -1, l_2 = -15, l_3 = -32, w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm, $w_{03} = 0.6$ mm 时, CCD 距 SLM 1.2 m 处拍摄的三环涡旋光束实验光强分布图, 图 8(b) 为对应的径向光强分布.

从图 8(a) 观察到三环涡旋光束光强分布为独立的同心三环结构, 光束中心及各环之间均为暗斑, 实验结果与理论模拟图 2(a) 符合较好. 图 8(b) 为三环涡旋光束的径向光强分布, 可以看出实验产生的三环涡旋光束径向光强分布(虚线)有六个波峰, 实验结果与理论结果(实线)基本一致.

图 9 描述的为三环束腰半径 $w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm, $w_{03} = 0.6$ mm 及内环中环拓扑电荷数 $l_1 = -1, l_2 = -15$ 不变, 外环涡旋光束拓扑电荷数 l_3 依次取 $-32, -37, -42$ 时, CCD 距 SLM 1.2 m 处拍摄的三环涡旋光束实验光强分布图.

由图 9 观察发现, 三涡旋光束保持内环中环拓扑电荷数不变, 不断增大外环拓扑电荷数 l_3 绝对值时, 外环半径不断增加, 中环与外环间距离随之增大. 实验结果与理论模拟图 2(a)–(c) 结果基本一致.

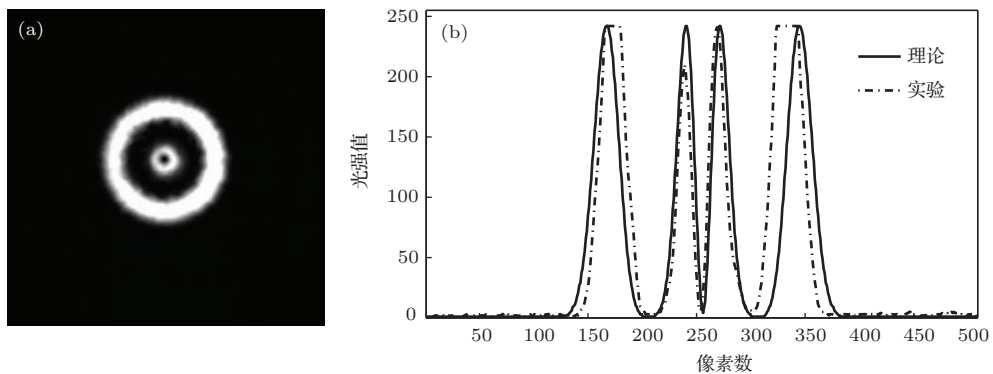


图 6 双环涡旋光束的实验光强与径向光强分布 内外环束腰半径 $w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm, 拓扑电荷数 $l_1 = -1, l_2 = -15$; (a) 光强分布; (b) 径向光强分布

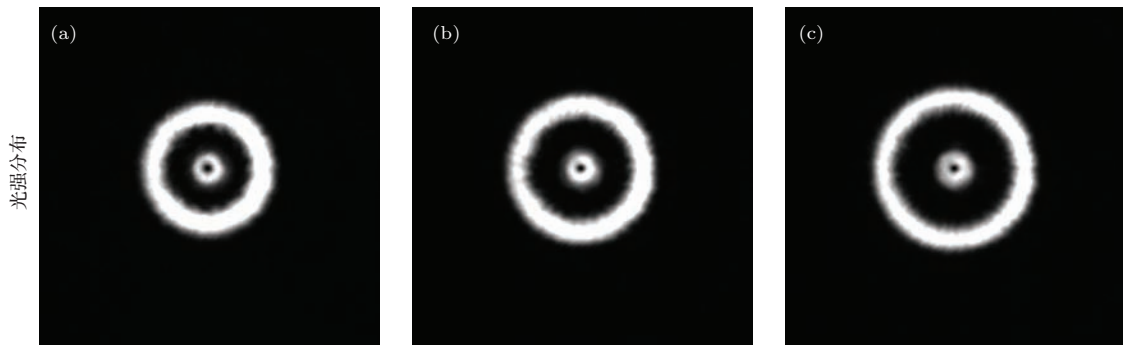


图 7 双环涡旋光束的实验光强分布 保持内外环束腰半径 $w_{01} = 0.2$ mm, $w_{02} = 0.4$ mm 及内环拓扑电荷数 $l_1 = -1$ 不变; 外环拓扑电荷数取值为: (a) $l_2 = -15$; (b) $l_2 = -20$; (c) $l_2 = -25$

图 10 为三环束腰半径 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$, $w_{03} = 0.6 \text{ mm}$ 及内外环拓扑电荷数 $l_1 = -1$, $l_3 = -37$ 保持不变, 中环拓扑电荷数 l_2 分别取 -15 , -19 , -23 时三环涡旋光束的光强分布图.

从图 10 (a)—(c) 中不难发现, 三环涡旋光束保

持内外两环拓扑电荷数不变, 不断增大中环拓扑电荷数 l_2 的绝对值时, 中环半径不断增加, 中环与内环间距离不断增大, 而中环与外环间距离随之减小. 实验结果与理论模拟图 3 (a)—(c) 基本一致. 在此需要指出的是, 实验产生的三环涡旋光束各亮环外围均无旁瓣, 光束质量高.

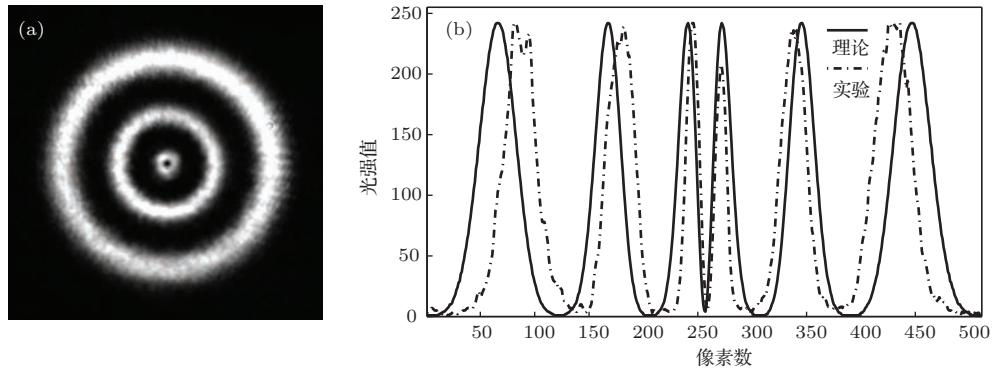


图 8 三环涡旋光束的实验光强与径向光强分布 内环中环与外环的束腰半径为 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$, $w_{03} = 0.6 \text{ mm}$, 拓扑电荷数 $l_1 = -1$, $l_2 = -15$, $l_3 = -32$; (a) 光强分布; (b) 径向光强分布

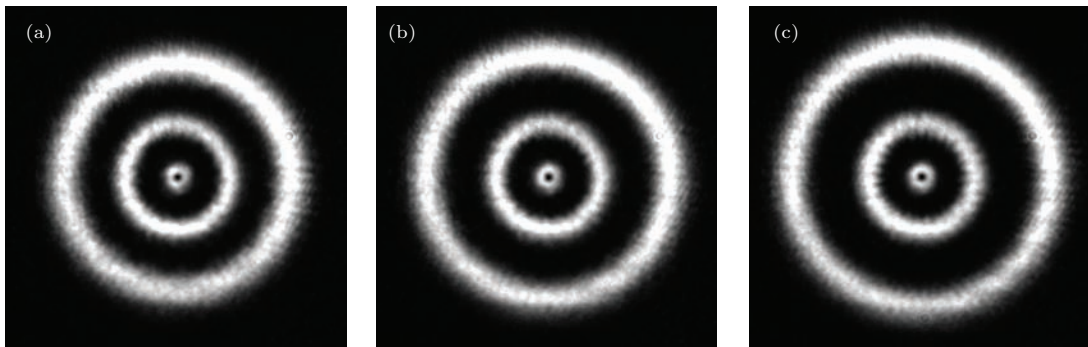


图 9 三环涡旋光束的实验光强分布 保持内环中环与外环束腰半径 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$, $w_{03} = 0.6 \text{ mm}$ 及内环中环拓扑电荷数 $l_1 = -1$, $l_2 = -15$ 不变; 外环拓扑电荷数取值为: (a) $l_3 = -32$; (b) $l_3 = -37$; (c) $l_3 = -42$

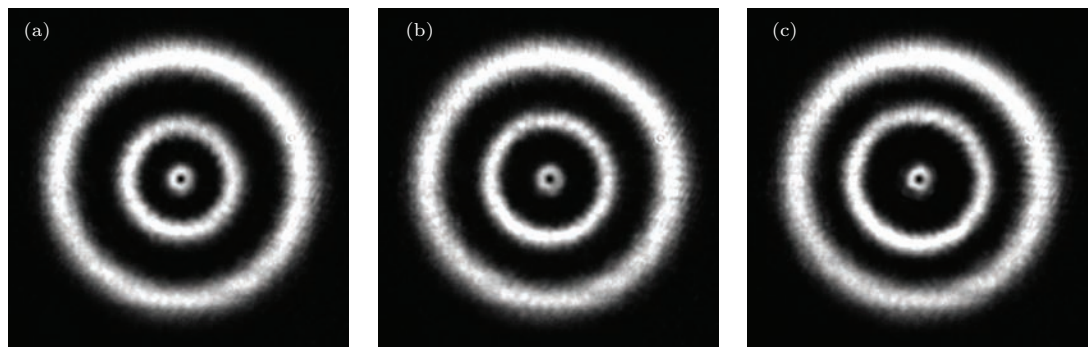


图 10 三环涡旋光束的实验光强分布 保持内环中环与外环束腰半径 $w_{01} = 0.2 \text{ mm}$, $w_{02} = 0.4 \text{ mm}$, $w_{03} = 0.6 \text{ mm}$ 及内环外环拓扑电荷数 $l_1 = -1$, $l_3 = -37$ 不变; 中环拓扑电荷数取值为: (a) $l_2 = -15$; (b) $l_2 = -19$; (c) $l_2 = -23$

5 结 论

本文研究了新型的多环涡旋光束, 包括双环涡旋光束与三环涡旋光束, 它们是由束腰半径不同、拓扑电荷数相差较大的多束拉盖尔-高斯涡旋光束共轴叠加而成, 其光强分布为多环结构. 文中对多环涡旋光束进行了理论模拟, 对其光强与相位分布进行了相应的理论分析, 并基于共轭对称延拓 Fourier 计算全息生成多环涡旋光束的计算全息图, 利用一个空间光调制器进行的光电实验产生了与理论一致的多环涡旋光束. 多环涡旋光束的各环携带不同的轨道角动量, 可作为光学镊子或光学扳手分别操控不同尺寸和位置的微观粒子; 此外利用多环涡旋光束各环携带的不同的轨道角动量进行编码可以极大地提高光通信编码能力, 使得其在光通信与量子信息编码等领域具有特殊的研究价值和应用潜力.

参考文献

- [1] Curtis J E, Grier D G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 133901
- [2] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, Dunlop H R, Wegener M J 1992 *Opt. Quantum Electron.* **24** S951
- [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [4] Barnett S M, Allen L 1994 *Opt. Commun.* **110** 670
- [5] Beijersbergen M W, Allen L, Vanderveen H E L O, Woerdman J P 1993 *Opt. Commun.* **96** 123
- [6] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, Woerdman J P 1994 *Opt. Commun.* **112** 321
- [7] Turnbull G A, Robertson D A, Smith G M, Allen L, Padgett M J 1996 *Opt. Commun.* **127** 183
- [8] Curtis J E, Koss B A, Grier D G 2002 *Opt. Commun.* **207** 169
- [9] Ostrovsky A S, Parrao P C, Arrizon V 2013 *Opt. Lett.* **38** 534
- [10] Ding P F, Pu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174201 (in Chinese) [丁攀峰, 蒲继雄 2012 物理学报 **61** 174201]
- [11] Arlt J, Padgett M J 2000 *Opt. Lett.* **25** 191
- [12] Arnold S F, Leach J, Padgett M J, Lembessis V E, Ellinas D, Wright A J, Girkin J M, Girkin J M, Ohberg P, Arnold A S 2007 *Opt. Express* **15** 8619
- [13] He X D, Xu P, Wang J, Zhan M S 2009 *Opt. Express* **17** 21007
- [14] Vaity P, Singh R P 2011 *Opt. Lett.* **36** 2994
- [15] Litvin I A, Burger L, Forbes A 2013 *Opt. Lett.* **38** 3363
- [16] Baumann S M, Kalb D M, MacMillan L H, Galvez E J 2009 *Opt. Express* **17** 9818
- [17] Ando T, Matsumoto N, Ohtake Y, Takiguchi Y, Inoue T 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** 2602
- [18] Fang G J, Pu J X 2012 *Chin. Phys. B.* **21** 084203
- [19] Guo C S, Liu X, He J L, Wang H T 2004 *Opt. Express* **12** 4625
- [20] Sun S H, Pu J X 2011 *Acta Opt. Sin.* **31**(s1) 100520 (in Chinese) [孙顺红, 蒲继雄 2011 光学学报 **31**(s1) 100520]
- [21] Fang G J, Sun S H, Pu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064210 (in Chinese) [方桂娟, 孙顺红, 蒲继雄 2012 物理学报 **61** 064210]
- [22] Huang S J, Wang S Z, Yu Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 952 (in Chinese) [黄素娟, 王朔中, 于瀛洁 2009 物理学报 **58** 952]

Experimental study on multiple-ring vortex beams*

Huang Su-Juan[†] Gu Ting-Ting Miao Zhuang He Chao Wang Ting-Yun

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering,
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 5 May 2014; revised manuscript received 3 July 2014)

Abstract

The generation, propagation and application of vortex beams have been hot research topics in recent years. In this paper we introduce the novel multiple-ring vortex beams, including double-ring vortex beams and triple-ring vortex beams, which are generated by the coaxial superposition of multiple Laguerre-Gaussian vortex beams with different topological charge numbers and different waist parameters, and their intensity distribution is of multiple-ring. We study the generation and distribution characteristics of multiple-ring vortex beams theoretically, obtain the computer generated hologram of multiple-ring vortex beams based on conjugate symmetric extension Fourier computer generated holography, and experimentally generate quality multiple-ring vortex beams using a spatial light modulator. Excellent agreement between theoretical and experimental results is observed. The study indicates that each ring of multiple-ring vortex beams carries different orbital angular momentum, and the spatial distribution is independent. The novel multiple-ring vortex beams provide more controllable parameters and more diverse structure distributions, which enable their applications in the fields of micro-manipulation as optical tweezers or optical spanner. Furthermore, they also have potential applications as available encoding tools in optical communication.

Keywords: vortex beam, topological charge, computer-generated hologram, spatial light modulator

PACS: 41.85.-p, 42.25.Fx, 42.40.Jv, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.63.244103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178088, 61235002, 61475098), the Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan, China (Grant No. 14511100100), and the Innovation Fund of Shanghai Education Committee, China (Grant No. 12YZ011).

[†] Corresponding author. E-mail: sjhuang@shu.edu.cn