

双涡旋光束的产生与传输

孙顺红 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 利用带有不同拓扑荷数的两束涡旋光束进行共轴叠加,产生了一种新型光束——双涡旋光束,其光强分布为双环结构。从实验和理论两方面对其传输特性进行了研究。研究表明,双涡旋光束的双环携带不同的轨道角动量,且相互独立地传输。此外,当双涡旋光束的内部拓扑荷数保持不变时,双涡旋光束两环间的距离随着外部拓扑荷数的增大而变大。

关键词 物理光学;惠更斯-菲涅耳衍射积分;双涡旋光束;拓扑荷数

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.s100520

Generation and Propagation of Double-Vortex Beams

Sun Shunhong Pu Jixiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract A new type of the double-vortex beam is generated by the coaxial superposition of vortex beams with two different topological charges, whose intensity distribution is double-ring. The propagation characteristics of this kind of beams theoretically and experimentally are studied. It is found that each ring of the double-vortex beam carries different orbital angular momentum, and is propagating independently. In addition, when the internal topological charge of the double-vortex beam remain unchanged, the distance between the two rings of the double-vortex beam gets bigger with increasing the external topological charge.

Key words physical optics; Huygens-Fresnel diffraction integral; double-vortex beams; topological charge

OCIS codes 260.1960; 050.4865; 350.5500; 350.5030

1 引 言

20 世纪 90 年代 Allen 等^[1,2]证明了涡旋光束是具有螺旋型相位结构的光束,其带有的相位因子为 $\exp(il\varphi)$,其中 l 为拓扑荷数,光束中的每个光子携带着 lh 的轨道角动量。涡旋光束的产生方法有很多种,如利用激光光束通过螺旋相位板^[3,4]、空间光调制器^[5,6]、全息光栅^[7,8]都可以产生涡旋光束,此外还可利用 Dove 旋转棱镜^[9]、相位转换法、多模光纤^[10]等产生。涡旋光束凭借其广阔的应用前景,近年来逐渐成为学术界的热门研究对象,特别是在量子计算、信息处理、粒子囚禁和操纵等领域尤为突出。

目前,随着对涡旋光束的深入研究,人们逐渐由对携带单个拓扑荷数的涡旋光束的研究拓展到更为复杂的涡旋光束的研究上来。如 Guo 等^[11]研究了

双环螺旋相位结构及其光强分布,但其研究的侧重点是如何抑制旁瓣得到最佳环状螺旋相位结构;Gao 等^[12]用迈克耳孙干涉仪对两个涡旋光束进行叠加并对它们的轨道角动量的本征态进行了研究。本文将分别从理论和实验上介绍一种双涡旋光束的产生方法并对其传输特性进行研究。

2 理论分析

涡旋嵌入拉盖尔-高斯型的光场中得到环形涡旋光束,柱坐标系下其光场复振幅为

$$E_1(r_1, \varphi_1, 0) = A \exp\left(-\frac{r_1^2}{w^2}\right) \left(\frac{r_1}{w}\right)^{|l|} \exp(-il\varphi_1), \quad (1)$$

式中 A 为振幅,简化处理,令其为常数, w 为光斑大

收稿日期: 2011-03-01; **收到修改稿日期:** 2011-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)和国务院侨办科研基金(10QZR03)资助课题。

作者简介: 孙顺红(1984—),女,硕士研究生,主要从事激光光束传输方面的研究。E-mail: sunshunhong@hqu.edu.cn

导师简介: 蒲继雄(1962—),男,博士,教授,主要从事光束传输与非线性光学方面的研究。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

(通信联系人)

小, l 为涡旋光束的拓扑荷数。

基于广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式, 可以得到环形涡旋光束在自由空间中传输 z 距离的传输公式为

$$E(r_2, \varphi_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \iint E_1(r_1, \varphi_1, 0) \times \exp\left(\frac{ik}{2z}[r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)]\right) r_1 dr_1 d\varphi_1, \quad (2)$$

式中 λ 为光波长, $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为对应波矢。借助关系式^[13]

$$\exp\left[-\frac{ikr_1 r_2}{z} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\right] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp[im(\varphi_1 - \varphi_2)], \quad (3)$$

$$\int_0^{2\pi} \exp(in\varphi) d\varphi = \begin{cases} 2\pi & \text{if } n = 0 \\ 0 & \text{if } n \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

将(1)式代入(2)式, 经(3)、(4)式整理化简得到环形涡旋光束在自由空间中的具体传输表达式为

$$E(r_2, \varphi_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik}{2z}r_2^2\right) i^l \times \exp(-il\varphi_2) 2\pi \int \exp\left(-\frac{r_1^2}{w^2}\right) \left(\frac{r_1}{w}\right)^{|l|} \times \exp\left(\frac{ik}{2z}r_1^2\right) J_l\left(-\frac{kr_1 r_2}{z}\right) r_1 dr_1. \quad (5)$$

基于上述的理论基础分析, 若是两束涡旋光束在自由空间某处进行相干叠加, 则可得到双涡旋光束及其传输特性。双涡旋光束内环和外环的拓扑荷数不同, 分别为 l_1, l_2 ($l_1 < l_2$), 内、外环各自的传输公式与单涡旋光束的传输公式相同, 即

$$E_{l_1}(r_2, \varphi_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik}{2z}r_2^2\right) i^{l_1} \exp(-il_1\varphi_2) 2\pi \int \exp\left(-\frac{r_1^2}{w^2}\right) \left(\frac{r_1}{w}\right)^{|l_1|} \exp\left(\frac{ik}{2z}r_1^2\right) J_{l_1}\left(-\frac{kr_1 r_2}{z}\right) r_1 dr_1, \quad (6)$$

$$E_{l_2}(r_2', \varphi_2', z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik}{2z}r_2'^2\right) i^{l_2} \exp(-il_2\varphi_2') 2\pi \int \exp\left(-\frac{r_1'^2}{w^2}\right) \left(\frac{r_1'}{w}\right)^{|l_2|} \exp\left(\frac{ik}{2z}r_1'^2\right) J_{l_2}\left(-\frac{kr_1' r_2'}{z}\right) r_1' dr_1'. \quad (7)$$

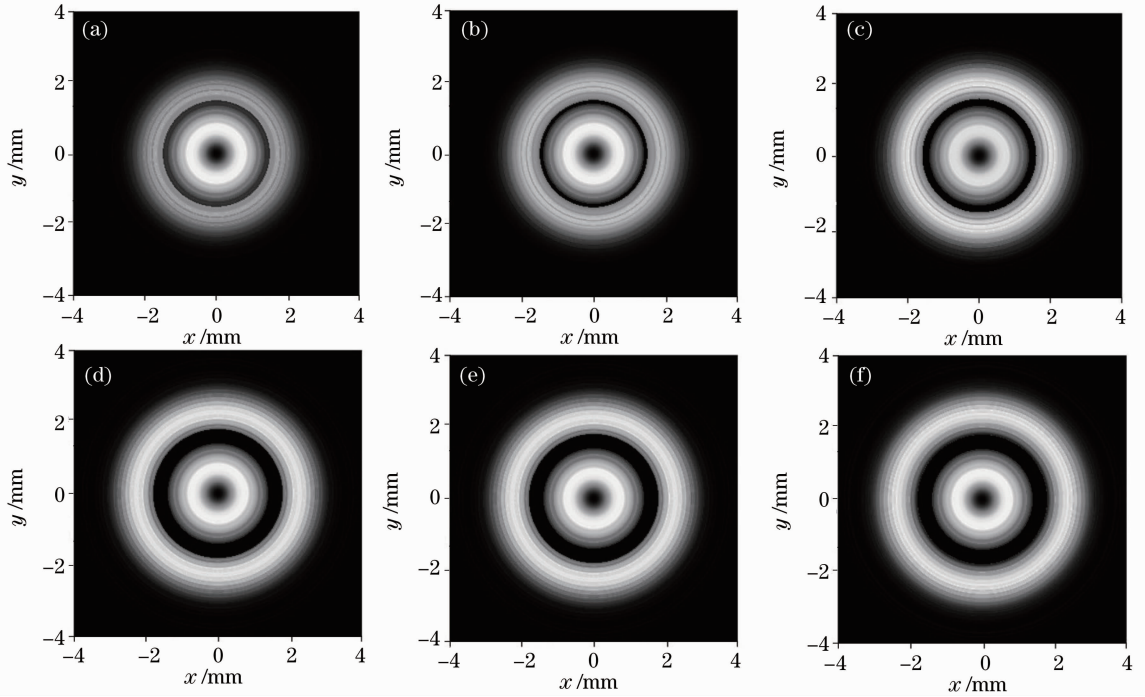


图1 在 $z=0.9$ m 处, 内环拓扑荷数 $l_1=1$ 保持不变, 外环拓扑荷数 l_2 取不同值的双涡旋光束的理论光强分布图。

(a) $l_2 = -6$, (b) $l_2 = -7$, (c) $l_2 = -8$, (d) $l_2 = -9$, (e) $l_2 = -10$, (f) $l_2 = -11$

Fig.1 Theoretical intensity distributions of double-vortex beams with unchanged internal topological charge ($l_1 = 1$) and different external topological charges (l_2) at $z=0.9$ m. (a) $l_2 = -6$, (b) $l_2 = -7$, (c) $l_2 = -8$, (d) $l_2 = -9$, (e) $l_2 = -10$, (f) $l_2 = -11$

令 $r_2 = r'_2 = r, \varphi_2 = \varphi'_2 = \varphi$, 则双涡旋光束的电场表达式和光强表达式分别为

$$E(r, \varphi, z) = E_{l_1}(r, \varphi, z) \cdot \hat{x} + E_{l_2}(r, \varphi, z) \cdot \hat{y}, \quad (8)$$

$$I(r, \varphi, z) = E(r, \varphi, z)E^*(r, \varphi, z). \quad (9)$$

3 数值计算结果与分析

图 1 是 $z=0.9$ m 处, $l_1=1$ 保持不变, l_2 取不同值的双涡旋光束的理论光强分布图。涡旋光束的横向涡旋光场是光束横截面上的相位以螺旋式围绕中心变化的光场, 其中心光场为零进而形成中心暗斑; 涡旋光束的拓扑荷数越大, 涡旋中心暗斑就会越大, 但中心光强始终为零(这是偶旋光束的特征)中心光强就会越弱。因此从图 1 可以看到, 对于双涡旋光束而言, 保持其内环拓扑荷数 $l_1=1$ 不变, 不断增大其外环拓扑荷数时, 双涡旋光束的内外两环间的距

离就会随外环拓扑荷数的增大而增大。图 1(f) 描述的双涡旋光束两环间的距离比图 1(a) 描述的双涡旋光束两环间的距离大。由于实验条件的限制, 这里只讨论了双涡旋光束内环拓扑荷数 $l_1=1$ 的情况, 内环拓扑荷数为其它值时也是成立的。

图 2 给出了与图 1 中双涡旋光束相对应的相位分布图, 由图 2 可知, 双涡旋光束可以同时携带不同的拓扑荷数, 即双涡旋光束可携带不同的轨道角动量, 这对信息编码与传输具有重要意义。

光束(除激光外)在传输过程中会发生扩散现象。由图 3 可知, 随着传输距离的增大, 双涡旋光束的光斑会逐渐扩大, 如图 3(d) 的光斑比图 3(a) 的光斑要大一些; 随着传输距离的增大, 双涡旋光束的空心也随之增大; 此外, 由图 3 可知, 随着传输距离的增大, 双涡旋光束的内外两环仍保持各自独立传输, 不发生相互影响。

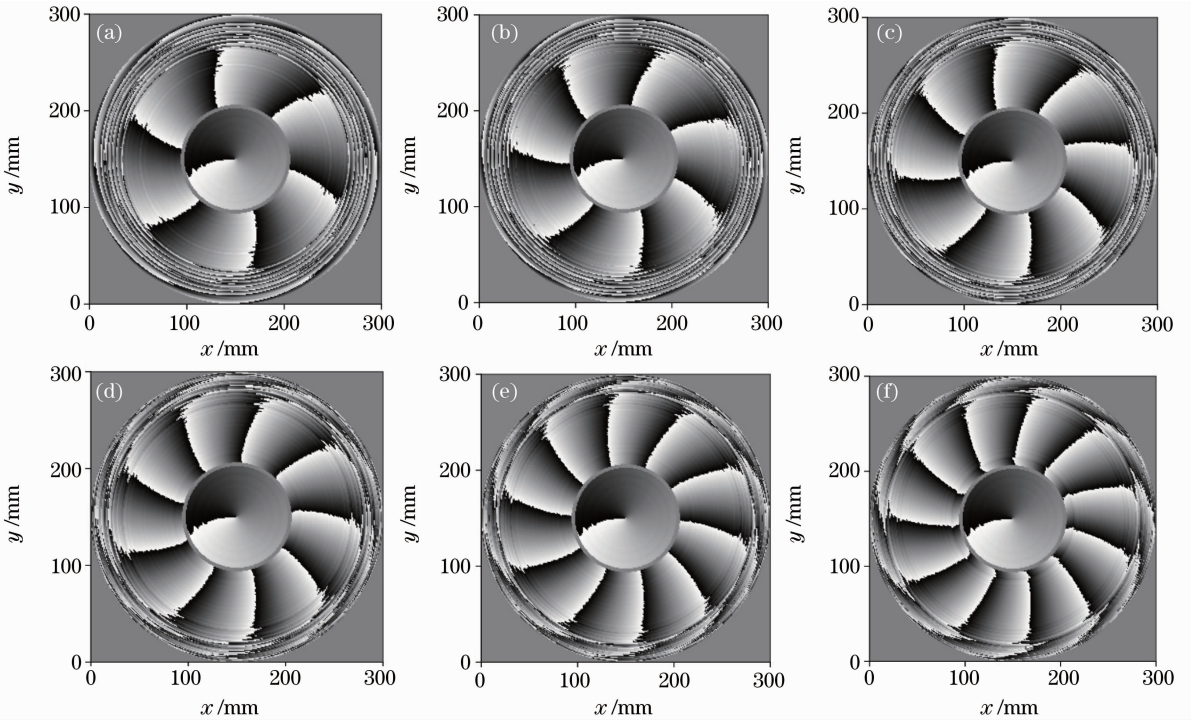


图 2 在 $z=0.9$ m 处, 内环拓扑荷数 $l_1=1$ 保持不变, 外环拓扑荷数 l_2 取不同值的双涡旋光束的相位分布图。

(a) $l_2 = -6$, (b) $l_2 = -7$, (c) $l_2 = -8$, (d) $l_2 = -9$, (e) $l_2 = -10$, (f) $l_2 = -11$

Fig. 2 Phase distributions of double-vortex beams with unchanged internal topological charges ($l_1=1$) and different external topological charges (l_2) at $z=0.9$ m. (a) $l_2 = -6$, (b) $l_2 = -7$, (c) $l_2 = -8$, (d) $l_2 = -9$, (e) $l_2 = -10$, (f) $l_2 = -11$

4 实验装置及观测结果

4.1 实验装置

实验装置图如图 4 所示, 由 He-Ne 激光器发出的激光经分束器(BS1)后分成两束, 其中一束经过拓扑荷数为 +1 的螺旋相位板(SPP)后变成 $l=1$ 的

涡旋光束, 另外一束经过空间光调制器(SLM)后得到拓扑荷数较大(大于 5)的整数阶涡旋光束, 这两束涡旋光经合束器(BS2)后合成双涡旋光束, 再由 CCD 得到其光强分布情况。偏振片 1 和偏振片 2 调节两束涡旋光束的偏振方向, 使它们的偏振方向

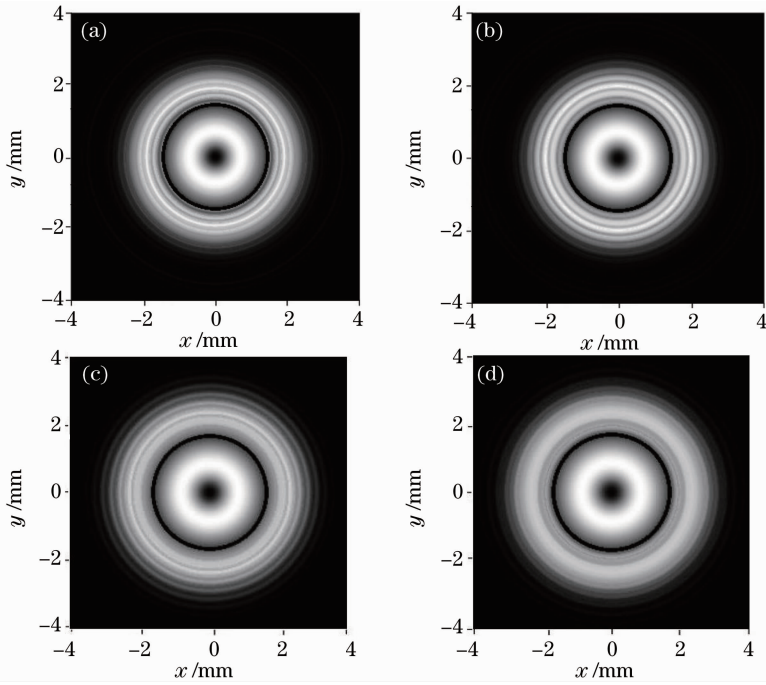


图 3 $l_1=1, l_2=-7$ 的双涡旋光束理论光强分布图。(a) $z=1.1$ m, (b) $z=1.3$ m, (c) $z=1.5$ m, (d) $z=1.7$ m

Fig. 3 Theoretical intensity distributions of the double-vortex beams with $l_1=1, l_2=-7$.

(a) $z=1.1$ m, (b) $z=1.3$ m, (c) $z=1.5$ m, (d) $z=1.7$ m

互相垂直,发生相干叠加。由 SLM 得到的涡旋光束经过反射镜 1、反射镜 2 和合束器反射,即经过 3 次反射,得到涡旋光束的旋转方向与反射前的涡旋光束的旋转方向相反,即由上述实验装置得到的双涡旋光束内外两环的旋转方向相反,双涡旋光束的

内环是 $l=1$ 的涡旋光束,外环是拓扑荷数为负的涡旋光束。此外,反射镜 1 和反射镜 2 还有两个作用,1)调节涡旋光束的高度,使其经过合束器反射时能与 $l=1$ 的涡旋光束等高共轴;2)调节涡旋光束到合束器的距离,使两束涡旋光束到合束器的距离是等臂的。

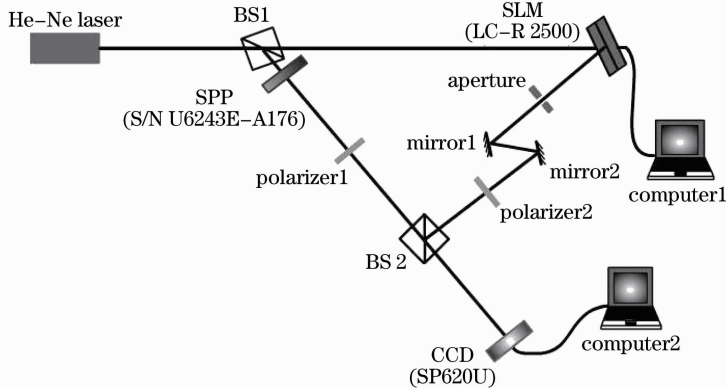


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

4.2 观测结果

图 5 和图 6 是由实验装置拍摄得到的双涡旋光束的光强分布图。图 5 的实验拍摄图形与图 1 理论模拟图基本一致。图 6 的实验拍摄图形与图 3 理论模拟图基本一致,图 6 看到的现象会更明显些。

为了更深入地说明双涡旋光束在传输过程中其内外两环保持各自独立向前传输,在实验装置图 4 中合束器后加上焦距 $f=5$ cm 的聚焦透镜,得到图 7 所示的实验光强分布图。由图 7 可知,在聚焦场中双涡旋光束仍然保持其双环各自独立地向前传输。

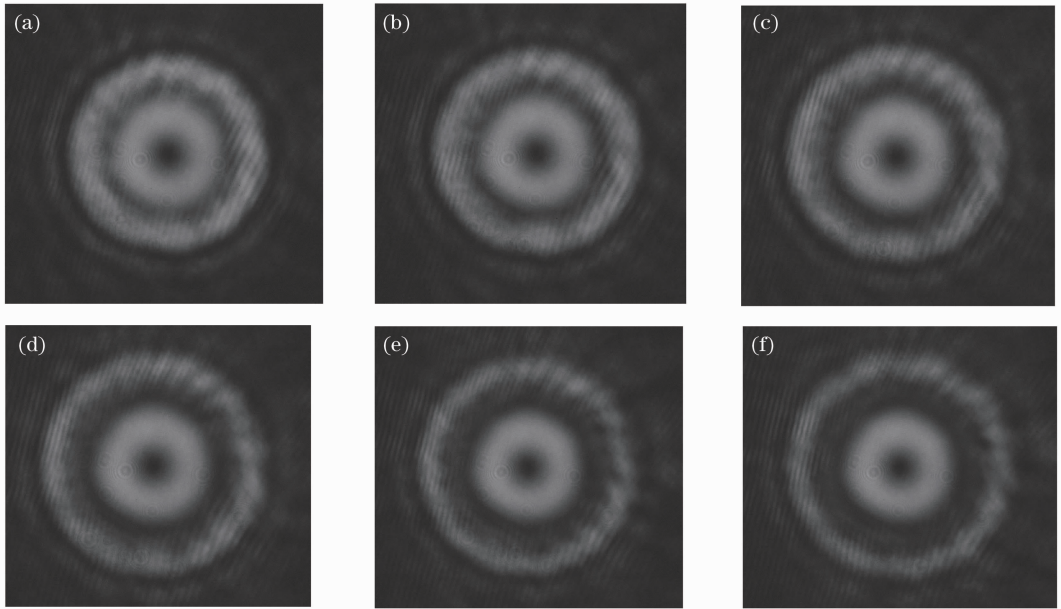


图 5 在 $z=0.9$ m 处, $l_1=1$ 保持不变, l_2 取不同值的双涡旋光束的实验光强分布图。(a) $l_2=-6$, (b) $l_2=-7$, (c) $l_2=-8$, (d) $l_2=-9$, (e) $l_2=-10$, (f) $l_2=-11$

Fig. 5 Experimental intensity distributions of double-vortex beams with unchanged internal topological charge ($l_1=1$) and different external topological charges (l_2) at $z=0.9$ m, where (a) $l_2=-6$, (b) $l_2=-7$, (c) $l_2=-8$, (d) $l_2=-9$, (e) $l_2=-10$, (f) $l_2=-11$

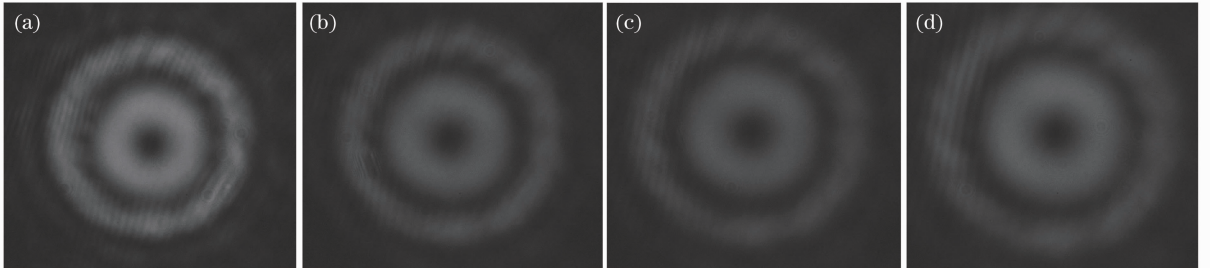


图 6 $l_1=1, l_2=-7$ 的双涡旋光束实验光强分布图。(a) $z=1.1$ m, (b) $z=1.3$ m, (c) $z=1.5$ m, (d) $z=1.7$ m

Fig. 6 Experimental intensity distributions of double-vortex beams with $l_1=1, l_2=-7$.

(a) $z=1.1$ m, (b) $z=1.3$ m, (c) $z=1.5$ m, (d) $z=1.7$ m

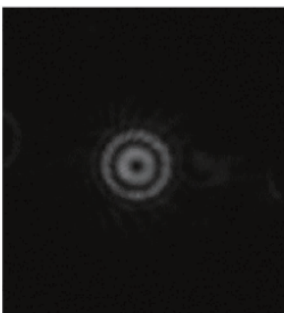


图 7 $z=0.9$ m 处, $l_1=1, l_2=-7$ 的双涡旋光束经过焦距 $f=5$ cm 的透镜聚焦得到的光强分布图

Fig. 7 Intensity distribution of double-vortex beam with $l_1=1, l_2=-7$ through lens with focal length $f=5$ cm at $z=0.9$ m

5 结 论

本文先基于广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式得到了双涡旋光束的理论光强表达式,又进一步在实验上得到了这种双涡旋光束。研究发现,通过改变内外环拓扑荷数的大小和正负可以得到不同的双涡旋光束。在保持其内环拓扑荷数不变而增大其外环拓扑荷数时,双涡旋光束两环之间的距离将随之增大。当双涡旋光束的内外双环的拓扑荷数保持不变而改变传输距离时,双涡旋光束在传输过程中会发生光束的扩大,但是双环仍是各自独立地进行传输而不会发生相互影响。双涡旋光束携带不同的拓扑荷数,其轨道角动量相比于单个拓扑荷数的涡旋光束具有多样性,因此这种双涡旋光束在光通信、信

息编码与传输等领域具有十分重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 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]. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(11): 8185~8189
- 2 Barnett S. M., Allen L.. Orbital angular momentum and nonparaxial light beams[J]. *Opt. Commun.*, 1994, **110**(5-6): 670~678
- 3 Beijersbergen M. W., Coerwinkel R. P. C., Kristensen M. *et al.*. Helical wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Opt. Commun.*, 1994, **112**(5-6): 321~327
- 4 Turnbull G. A., Robertson D. A., Smith G. M. *et al.*. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimeter-wave frequencies by use of a spiral phase plate [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **127**(4-6): 183~188
- 5 Curtis J. E., Koss B. A., Grier D. G.. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**(1-6): 169~175
- 6 Li Yangyue, Chen Ziyang, Liu Hui *et al.*. Generation and interference of vortex beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(3): 1740~1748
李阳月, 陈子阳, 刘 辉 等. 涡旋光束的产生与干涉[J]. *物理学报*, 2010, **59**(3): 1740~1748
- 7 Wang Xiao, Littman M. G.. Laser cavity for generation of variable-radius rings of light [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10): 767~768
- 8 Yin Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong *et al.*. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics[J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(3): 336~380
印建平, 刘南春, 夏 勇 等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(3): 336~380
- 9 Abramochkin E., Losevsky N., Volostnikov V.. Generation of spiral-type laser beams[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **141**(1-2): 59~64
- 10 Schweiger Gustav, Nett Ralf, Ozel Bilal *et al.*. Generation of hollow beams by spiral rays in multimode light guides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4510~4517
- 11 Guo Chengshan, Liu Xuan, He Jingliang *et al.*. Optimal annulus structures of optical vortices[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4625~4634
- 12 Gao Chunqing, Qi Xiaoqing, Liu Yidong *et al.*. Superposition of helical beams by using a Michelson interferometer [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(1): 72~78
- 13 Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M.. Table of Integrals, Series, and Products[M]. San Diego: Academic Press, 1980. 910~914