

doi:10.3788/gzxb20184707.0708001

径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的 传输及其偏振特性

刘永欣,张凯宁,蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室,厦门 福建 361021)

摘 要:理论和实验研究了径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束在自由空间传输的光强分布和偏振特性.数值计算表明,在无衍射区域,随着传输距离的增加,光强分布基本保持不变;对于零阶光束,其偏振态一直保持径向偏振不变;对于高阶光束,其偏振态发生变化,由初始的径向偏振逐渐变为椭圆偏振和线偏振的杂化状态.实验上,利用径向偏振转换器、螺旋相位板和轴棱锥元件产生了径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束,探测了其通过不同偏振片后的光强分布.实验结果与理论结果基本相符合.该研究也提供了一种产生杂化偏振矢量光束的方法.

关键词:传输;径向偏振;高阶贝塞尔-高斯涡旋光束;衍射

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)07-0708001-8

Propagation and Polarization Characteristics of the Radially Polarized High-order Bessel-Gaussian Vortex Beams

LIU Yong-xin, ZHANG Kai-ning, PU Ji-xiong

(Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: The intensity distribution and polarization characteristics of the radially polarized high-order Bessel-Gaussian vortex beams propagating in free space were studied theoretically and experimentally. Through numerical calculation, with transmission distance increasing, the intensity distribution remains unchanged in the diffraction free area. For a zero order beam, the polarization state remains the same. But for a higher order light beam, the polarization state changes, and the initial radial polarization gradually changes into the hybrid polarization state including elliptical polarization and linear polarization. In the experiment, a radially polarized high-order Bessel-Gaussian vortex beam is produced by using the radial polarization converter, vortex phase plate and axicon element. The light intensity distributions of the beams passing through different polarizers are detected. By comparing the experimental results with the theoretical results, it is found that they are basically consistent. The study also provides a method to produce the hybrid polarized vector beams.

Key words: Propagation; Radial polarization; High-order Bessel-Gaussian vortex beam; Diffraction

OCIS Codes: 080.4865; 260.1960; 260.5430; 050.1940; 350.5500

0 引言

近年来,矢量光束由于其独特的性质得到了广泛的研究^[1-5].其中,两个具有代表性的矢量光束是径向偏振矢量光束和角向偏振矢量光束.径向偏振光束是偏振具有轴对称分布的光束,相对于线偏振光束它有许多

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61505059, 61575070, 61275203)资助

第一作者:刘永欣(1979—),女,副教授,博士,主要研究方向为激光传输与变换.Email:yongxin@hqu.edu.cn

收稿日期:2018-01-25;录用日期:2018-04-09

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

优点,例如径向偏振光束经过大数值孔径聚焦后,焦平面上的聚焦光斑比线偏振光小的多,并且具有很强的纵向电场分量^[1],这一独特的深聚焦性质,引起了人们对径向偏振光束的研究兴趣.2006年,Yuichi Kozawa等研究了双环径向偏振光束经过高数值孔径透镜的聚焦特性,研究发现了具有实际应用的 bottle beam^[2].2007年,H.Kawauchi等的研究表明径向偏振光束的偏振和中空特性可导致散射力降低,进而改善光镊子的性能^[3].2008年,Nieminen等研究了径向和角向偏振光束在光镊中的运用,得出径向偏振光更容易在光镊系统中俘获圆形粒子^[4].2012年,孙顺红等将径向偏振和无衍射特性结合起来研究了径向偏振无衍射光束的产生及传输特性^[6],但仅限于不携带轨道角动量的零阶贝塞尔光束.而对于高阶贝塞尔-高斯光束在自由空间中自重建特性以及在大气湍流、海洋湍流中的传输特性人们都进行了深入研究^[7-10],但对于径向偏振高阶贝塞尔-高斯光束,这种既有径向偏振特性,又有无衍射特性,并且还携带轨道角动量的光束的研究甚少.

另外,人们对矢量无衍射贝塞尔光束也进行了不少的研究,例如2013年,Angela Dudley等利用空间光调制器和方位角变化的双折射板获得了携带不同轨道角动量的矢量无衍射贝塞尔光束^[11],2015年,Ignacio Moreno等提出了一种产生偏振态随传播距离变化的无衍射贝塞尔光束的新方法^[12],2016年又提出了一种产生拓扑荷数和偏振态随传播距离均变化的无衍射贝塞尔光束的方法^[13].另一方面,2010年,南开大学汪喜林、王慧田等研究了一种更复杂的矢量光束(杂化偏振光束),研究发现,在较大的数值孔径聚焦条件下,偏振态的弯曲可以产生轨道角动量,并给出了实验结果,证明了这一结论的正确性^[14].2012年,华侨大学蒲继雄等详细研究了杂化偏振光束的大数值孔径聚焦特性^[15],同时还研究了杂化偏振光束经过介质面的高数值孔径透镜聚焦后的聚焦特性,这种情况更贴近实际的应用情形,研究在理论上获得了更长焦深的亚微米“光针”^[16].本文主要对径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束在自由空间传输的光强分布和偏振特性进行了详细研究,发现除了保持其无衍射特性外,偏振态也在发生改变,演化成了一种杂化偏振的光束.

1 理论推导

假设在源平面 $z=0$ 有径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束,其场分布为 $\mathbf{E} = E_x(r_0, \phi_0, 0)\mathbf{e}_x + E_y(r_0, \phi_0, 0)\mathbf{e}_y$, 其中, $E_x(r_0, \phi_0, 0)$ 和 $E_y(r_0, \phi_0, 0)$ 分别为

$$E_x(r_0, \phi_0, 0) = J_n(\alpha r_0) \exp\left(-\frac{r_0^2}{w_0^2}\right) \exp(in\phi_0) \cos \phi_0 \quad (1)$$

$$E_y(r_0, \phi_0, 0) = J_n(\alpha r_0) \exp\left(-\frac{r_0^2}{w_0^2}\right) \exp(in\phi_0) \sin \phi_0 \quad (2)$$

式中, α 为贝塞尔函数项相关参数, w_0 为相应基模高斯光束的束腰宽度.径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束 ($\alpha = 1.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$, $n = 2$, $w_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$) 在源平面的光强分布及对应的偏振态分布如图 1 所示.

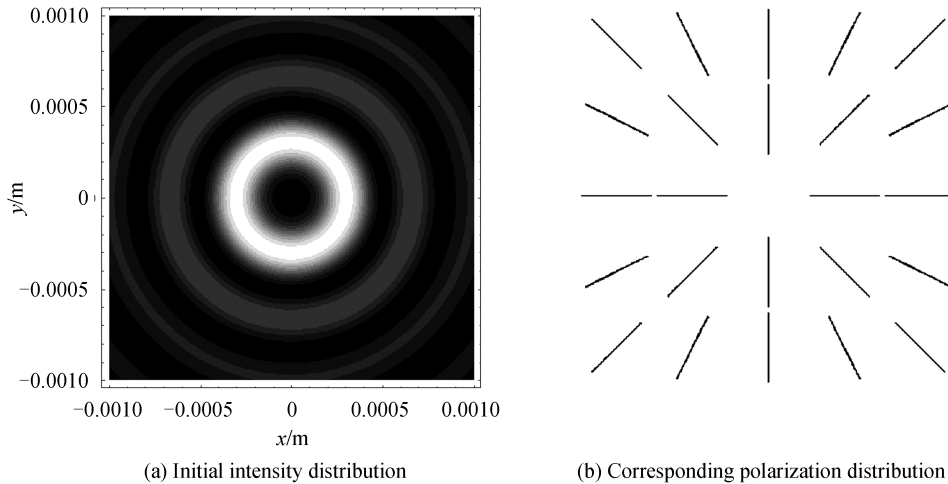


图 1 径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的光强分布及对应的偏振态分布

Fig.1 The intensity distribution of a radially polarized high-order Bessel-Gaussian vortex beam and the corresponding polarization distribution

在自由空间传输一段距离后 $z=z$ 平面的场分布由衍射积分公式并利用公式^[17]

$$\cos \phi = \frac{1}{2} [\exp(i\phi) + \exp(-i\phi)] \quad (3)$$

$$\sin \phi = -\frac{i}{2} [\exp(i\phi) - \exp(-i\phi)] \quad (4)$$

$$\int_0^{2\pi} \exp(-ix \cos \phi + in\phi) d\phi = \frac{2\pi}{i^n} J_n(x) \quad (5)$$

化简计算可得

$$E_x(r, \phi, z) = \frac{-\pi}{i^n \lambda z} \exp(ikz) \exp(in\phi) \int_0^\infty \exp\left(-\frac{r_0^2}{\omega_0^2}\right) J_n(ar_0) \exp\left[\frac{ik}{2z}(r_0^2 + r^2)\right] r_0 \times \left\{ \exp(i\phi) J_{n+1}\left(\frac{kr_0 r}{z}\right) - \exp(-i\phi) J_{n-1}\left(\frac{kr_0 r}{z}\right) \right\} dr_0 \quad (6)$$

$$E_y(r, \phi, z) = \frac{i\pi}{i^n \lambda z} \exp(ikz) \exp(in\phi) \int_0^\infty \exp\left(-\frac{r_0^2}{\omega_0^2}\right) J_n(ar_0) \exp\left[\frac{ik}{2z}(r_0^2 + r^2)\right] r_0 \times \left\{ \exp(i\phi) J_{n+1}\left(\frac{kr_0 r}{z}\right) + \exp(-i\phi) J_{n-1}\left(\frac{kr_0 r}{z}\right) \right\} dr_0 \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得到径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束在自由空间中传输的光强表达式为

$$I(r, \phi, z) = |E_x(r, \phi, z)|^2 + |E_y(r, \phi, z)|^2 \quad (8)$$

2 数值模拟与分析

利用 Mathematica 软件根据式(6)~(8)进行编程计算,通过数值模拟可得到图 2~6 的结果,若无特殊说明其计算参数分别为 $\alpha = 1.0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$, $\omega_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\lambda = 633 \text{ nm}$.

图 2 是径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束随传输距离的径向光强分布.由图 2 可看出,随着传输距离的增大,光束发生扩散,但在一段距离内(0.2~0.6 m 区间)光强分布基本保持不变,即在这个区域内光束具有无衍射性,该区域即为无衍射区.

图 3 是在无衍射区内不同传输距离处径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的光强分布及对应的偏振态分布,其中图 3(a)~(b) $z = 0.2 \text{ m}$, (c)~(d) $z = 0.4 \text{ m}$, (e)~(f) $z = 0.6 \text{ m}$.由图 3(a)、(c)、(e)可看出,光强的分布呈环状,并且随着传输距离的增大,其分布基本保持不变;而由对应的偏振态分布(b)、(d)、(f)可看出,偏振态不再是径向偏振,而逐渐变为椭圆偏振和线偏振的杂化状态,并且随着传输距离的改变,

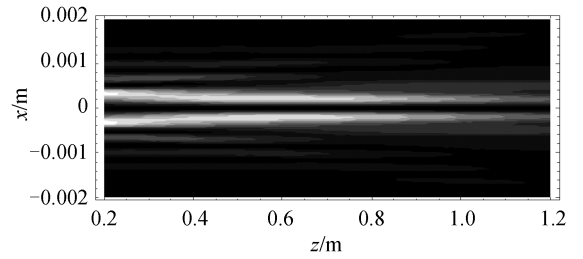
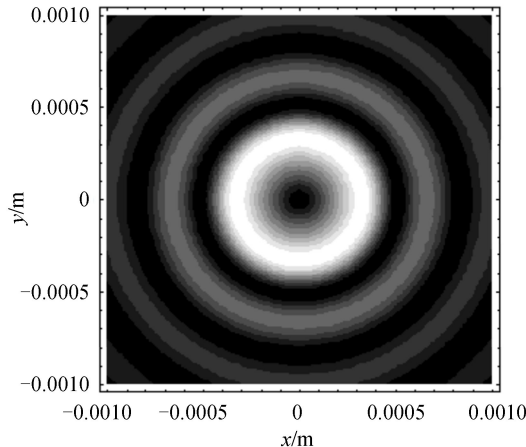
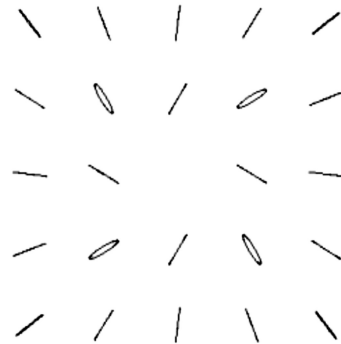


图 2 径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束($n=2$)随传输距离的径向光强分布($\phi=0$)

Fig.2 The radial intensity distribution of a radially polarized high-order Bessel-Gaussian vortex beam ($n=2$) in the x - z plane($\phi=0$)



(a) Intensity distribution at $z=0.2 \text{ m}$



(b) Corresponding polarization distribution at $z=0.2 \text{ m}$

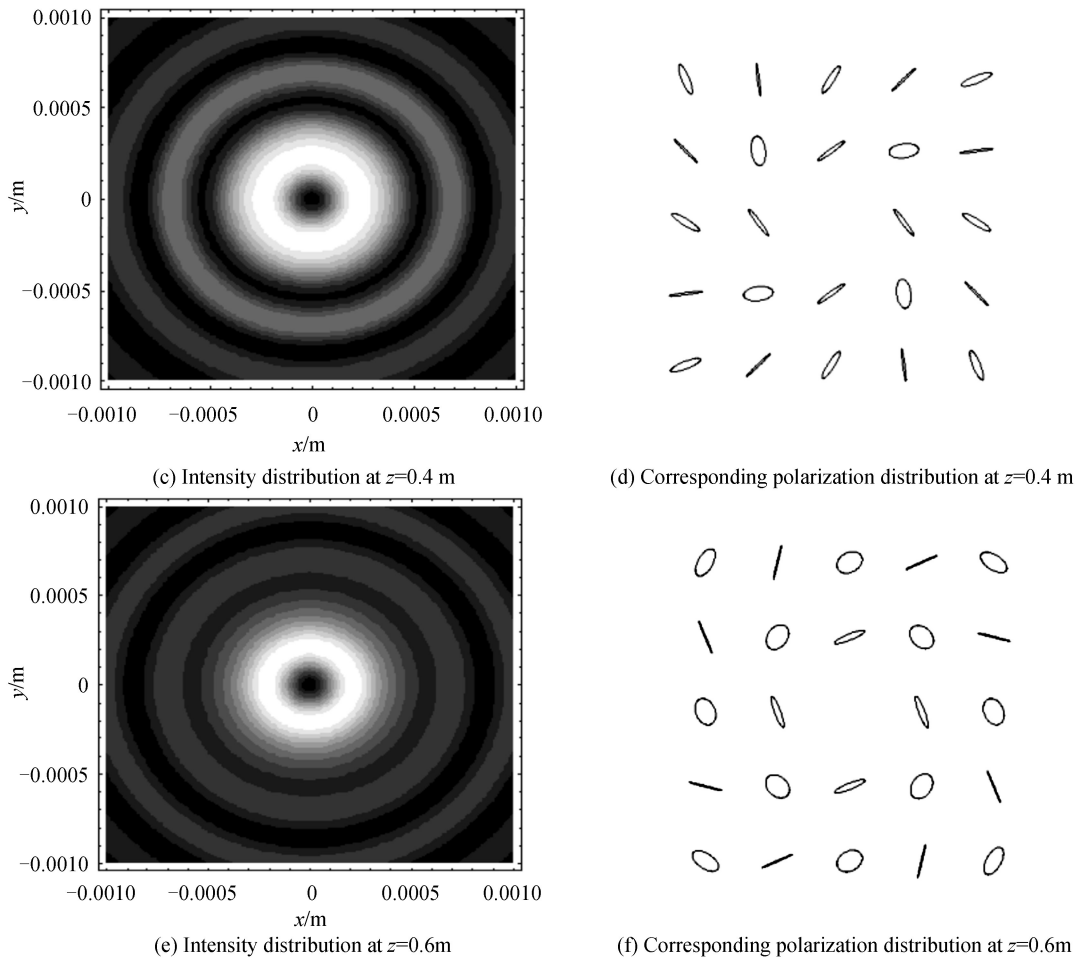


图3 在无衍射区内径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束($n=2$)的光强分布及对应的偏振态分布
 Fig.3 The intensity distributions of a radially polarized high-order Bessel-Gaussian vortex beam ($n=2$) in the non-diffracting region and the corresponding polarization distributions

光束上每点的偏振态也在随着改变.

由图2和图3(a)、(c)、(e)可知,在无衍射区域,贝塞尔-高斯涡旋光束的光强主要集中在半径为0.2 mm的圆环周围,而对于处于光束光强暗区的某些点的偏振态的研究意义不大,因此接下来主要对这个圆环上的偏振态进行详细分析.图4是在无衍射区内不同传输距离处径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束上半径为0.2 mm的圆环上的偏振态分布,其中(a) $z=0.2$ m, (b) $z=0.4$ m, (c) $z=0.6$ m.由图4可以看出,随着传输距离的增加,同一圆环上各点的偏振态都在改变,并且其椭圆率变大(椭圆的长短轴之比变小即 x ,

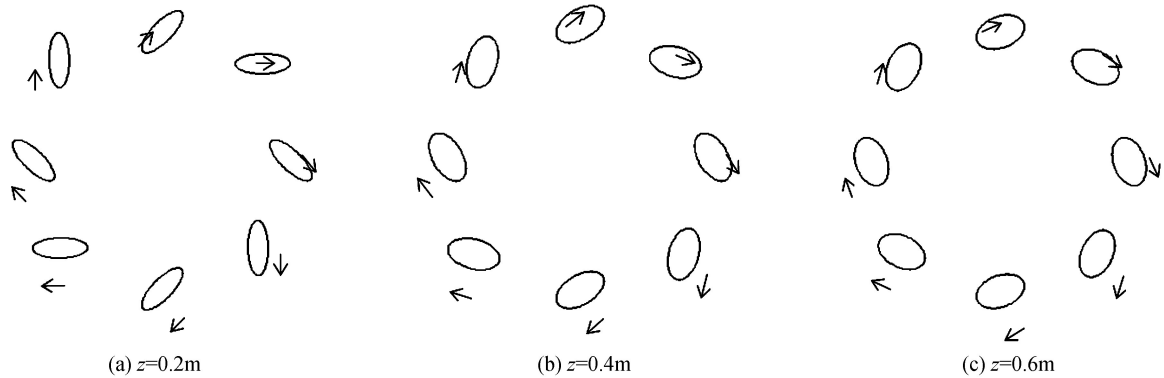


图4 在无衍射区内径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束($n=2$)上半径为0.2 mm的圆环上的偏振态分布
 Fig.4 Polarization distributions of a ring with a radius of 0.2 mm on a radially polarized higher-order Bessel-Gaussian vortex beam ($n=2$) in the non-diffracting region

y 方向上的光场的振幅比变小).另外,传输距离不变时,圆环上对称点的偏振椭圆形状相同,并且通过计算发现,对称点上的 x, y 方向上的光场的相位差相同,表示其偏振态的旋向性相同,例如图 4(a)中 $(0, 0.2 \text{ mm}), (0, -0.2 \text{ mm})$ 两点的相位差均为 0.223π ,即为右旋椭圆偏振态,而 $(0.2 \text{ mm}, 0), (-0.2 \text{ mm}, 0)$ 两点的相位差均为 0.777π ,也为右旋椭圆偏振态.而其他各点在不同传输距离处的旋向性如图中箭头所示,也均为右旋椭圆偏振态.

图 5 是在 $z=0.4 \text{ m}$ 处不同拓扑荷数的径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的光强分布及对应的偏振态分布,其中图 5(a)~(b) $n=0$, (c)~(d) $n=1$.由图 5 可知,零阶的径向偏振贝塞尔-高斯涡旋光束的光强中心是暗斑,而 $n=1$ 时,其光束中心却为亮斑,这与线偏振的贝塞尔-高斯涡旋光束的情况不同.从数学角度分析是由于式(6)~(7)对 $n=0$ 会出现一阶贝塞尔函数,而对于 $n=1$ 则会出现零阶贝塞尔函数.从物理角度分析, $n=0$ 光束中心是暗斑是由于径向偏振引起的,而 $n=1$ 光束中心却为亮斑则与涡旋相位和径向偏振相互影响有关.由图 5(b)可知,零阶的径向偏振贝塞尔-高斯涡旋光束在传输中一直保持径向偏振态不变.由图 5(d)可知,一阶的径向偏振贝塞尔-高斯涡旋光束在传输中偏振态发生改变,逐渐变为椭圆偏振和线偏振的杂化状态.由图 5(d)和图 3(d)比较可知,在同一传输距离,对于不同的拓扑荷数 n , 其偏振态分布也不相同.由此可见,拓扑荷数 n 直接影响着偏振态的改变,也就是说,其偏振态的改变是由于光束携带轨道角动量引起的.

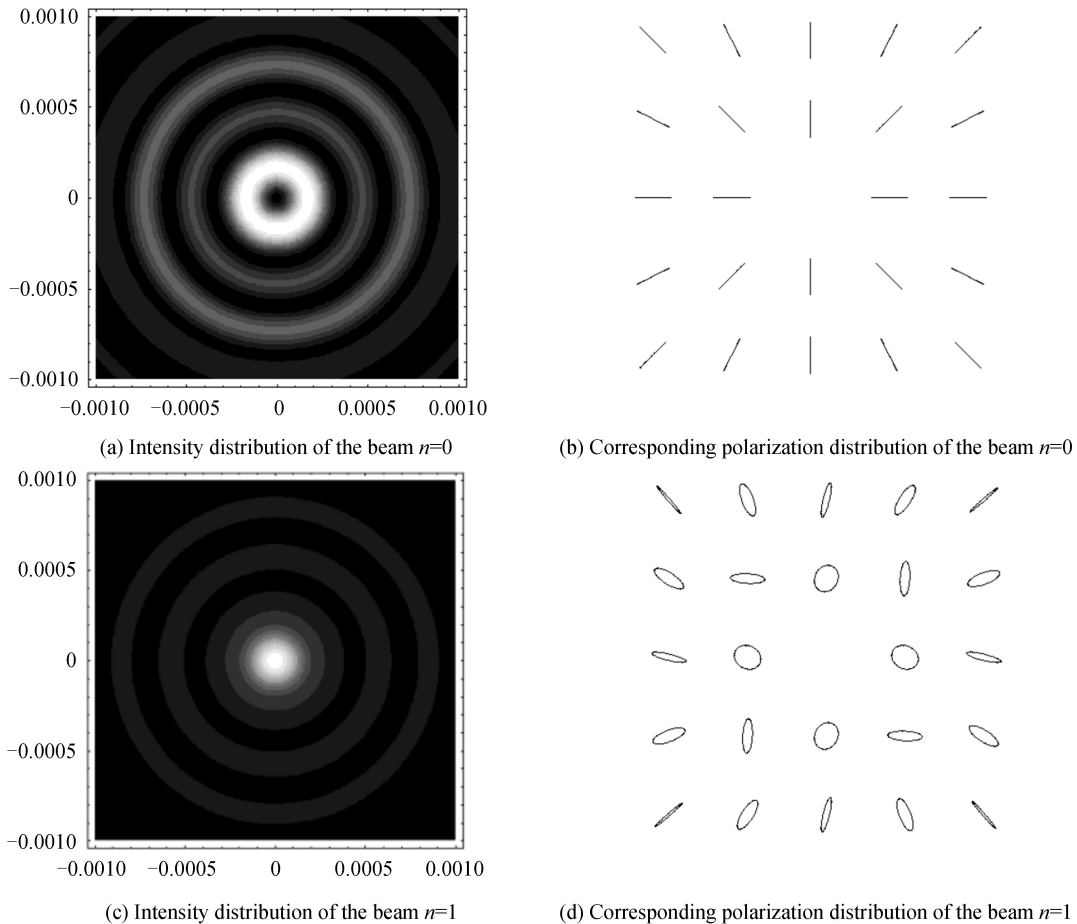


图 5 在 $z=0.4 \text{ m}$ 处不同拓扑荷数的径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的光强分布及对应的偏振态分布
 Fig.5 The intensity distributions of radially polarized high-order Bessel-Gaussian vortex beams at $z=0.4 \text{ m}$ plane and the corresponding polarization distributions

图 6 是在 $z=0.4 \text{ m}$ 处不同拓扑荷数的径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的经过不同偏振片的光强分布,其中图 6(a)~(b) $n=0$, (c)~(d) $n=1$, 偏振片方向如图中箭头所示.由图可知, $n=0$ 时,过光束中心与偏振片方向垂直方向上的光强为零,并且光强呈对称分布;而 $n=1$ 时,过光束中心与偏振片方向垂直方向上的光强并不为零,光强分布并不对称.这也是 $n=1$ 时光束的偏振态改变引起的.

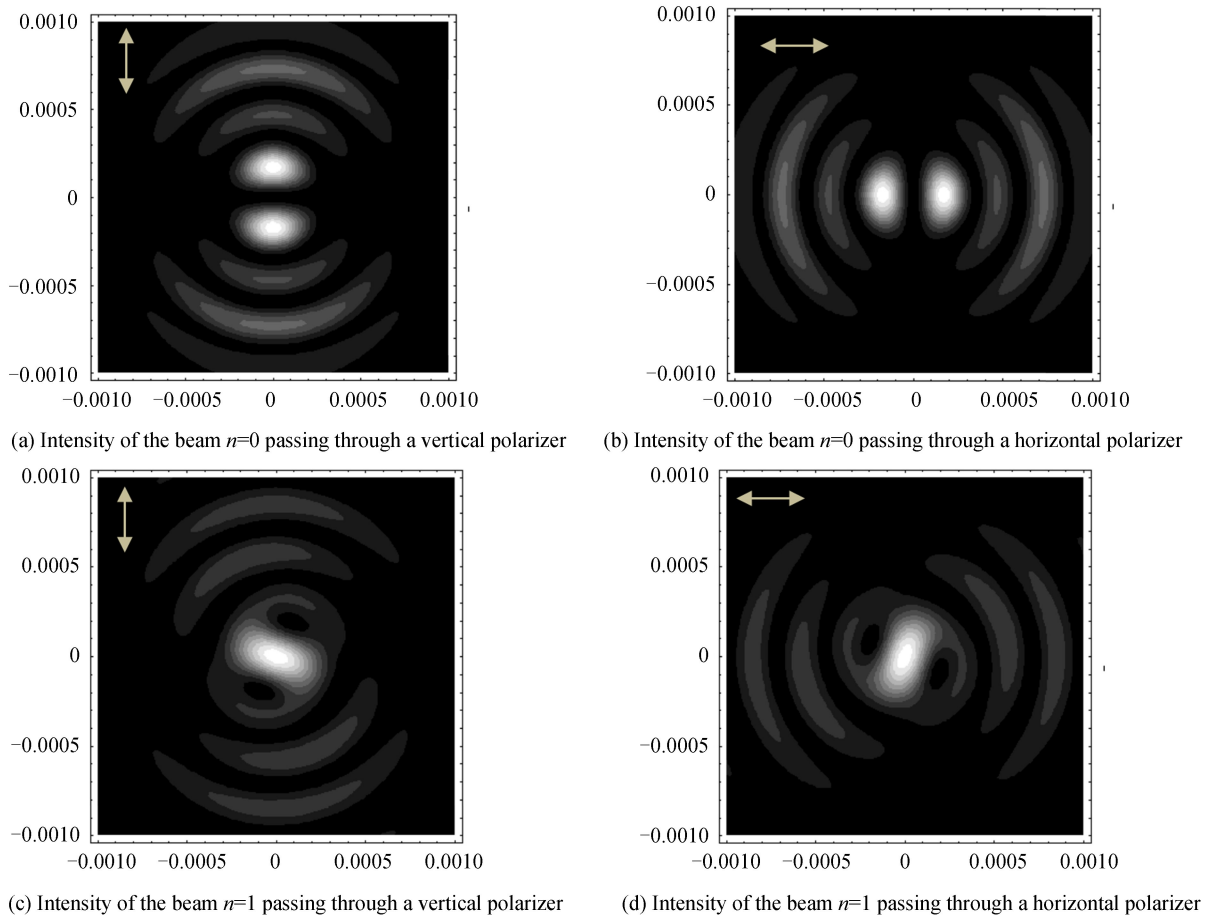


图 6 在 $z=0.4$ m 处径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的经过不同偏振片的光强分布

Fig.6 The intensity distributions of radially polarized high-order Bessel-Gaussian vortex beams with different topological charges at $z=0.4$ m plane passing through the polarize

3 实验研究

图 7 为实验光路的示意图,光源是波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,出射光是线偏振光,两个不同焦距的凸透镜构成的放大倍数为 3 倍的扩束系统,光经过扩束系统后进入径向偏振转换器,光束的偏振态从线偏振变为径向偏振,之后,光束先通过螺旋相位板再经过轴棱锥(轴棱锥底角为 0.5°),从而产生径向偏振贝塞尔-高斯涡旋光束.偏振片用于检测光束偏振态.由于实验中产生的光束的最大准直范围在 0.6 m 左右,于是将 CCD 位于轴棱锥后 0.4 m 处进行探测.

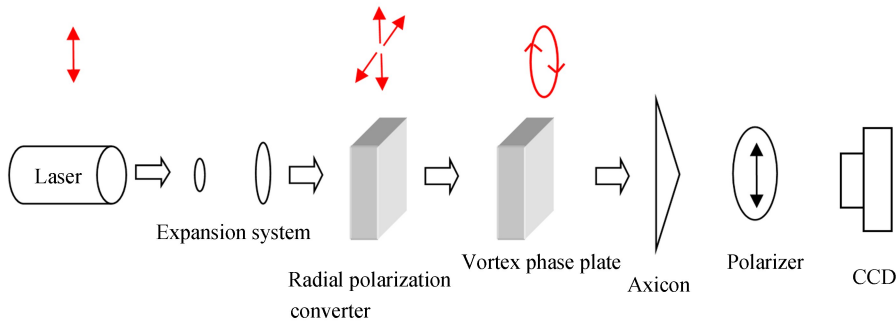


图 7 实验装置示意图

Fig.7 The schematics of the experimental setup

首先研究径向偏振零阶贝塞尔-高斯光,此时移除光路中的螺旋相位板,令偏振片水平方向为 x 方向,竖直方向为 y 方向,偏振片的偏振化方向与 x 轴夹角为 $0^\circ, 90^\circ$ 时,测量径向偏振零阶贝塞尔-高斯光经过偏振

片后的光强分布,实验结果如图 8 所示.加入螺旋相位板,产生径向偏振一阶贝塞尔-高斯涡旋光,测量其经过偏振片后的光强分布,如图 9 所示.

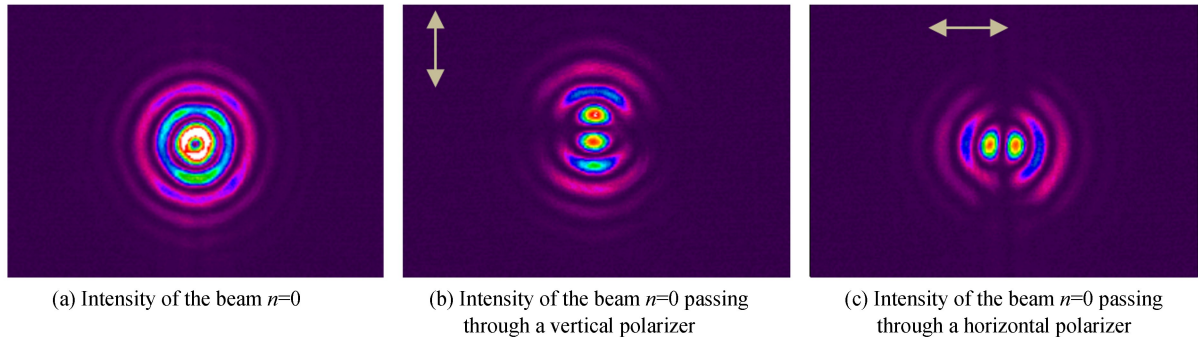


图 8 经过偏振片后的光强分布实验结果

Fig.8 Experiment results of the intensity distributions passing through the polarize

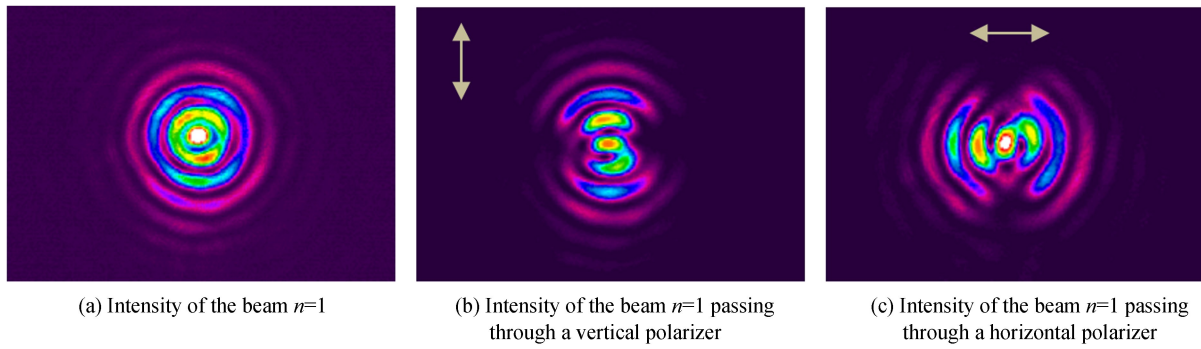


图 9 加入螺旋相位板后,经过偏振片后的光强分布实验结果

Fig.9 Experiment results of the intensity distributions passing through the polarize with the vortex phase plate

由图 8 可见,径向偏振零阶贝塞尔-高斯光为空心光束,这与数值模拟的图 5(a)相符合.当经过偏振片后,过光束中心与偏振片方向垂直方向上的光强为零,与理论结果图 6(a),(b)相一致.这说明径向偏振零阶贝塞尔-高斯光的偏振态一直都保持径向偏振不变.

由图 9 可知,径向偏振一阶贝塞尔-高斯涡旋光为实心光束,当经过偏振片后,过光束中心与偏振片方向垂直方向上的光强明显不为零,与理论结果图 6(c),(d)相一致.可见径向偏振一阶贝塞尔-高斯涡旋光的偏振态在传播的过程中确实发生变化,不再保持径向偏振.

4 结论

理论和实验研究了径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束在自由空间传输的光强分布和偏振特性.数值计算发现,在无衍射传输区域,随着传输距离的增加,光强分布基本保持不变.对于零阶光束,其偏振态一直保持径向偏振不变.但对于高阶光束,其偏振态却随之发生变化,由初始的径向偏振逐渐变为椭圆偏振和线偏振的杂化状态.另外,高阶光束中各点的偏振态随着传输距离和光束拓扑荷数的不同而改变.实验上,利用径向偏振转换器、螺旋相位板和轴棱锥元件产生了径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束.通过实验结果与理论结果的比较发现两者基本相符合,即径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束在自由空间传输后其偏振态不再是径向偏振.该研究也提供了一种产生杂化偏振矢量光束的新方法.

参考文献

- [1] DORN R, QUABIS S, LEUCHS G, *et al.* Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2003, **91**(23): 233901.
- [2] KOZAWA Y, SATO S, *et al.* Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(6): 820-822.
- [3] KAWAUCHI H, YONEZAWA K, KOZAWA Y, *et al.* Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(13): 1839-1841.

- [4] NIEMINEN T A, HECKENBERG N R, RUBINSZTEIN D H, *et al.* Forces in optical tweezers with radially and azimuthally polarized trapping beams[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(2): 122-124.
- [5] XU Zhao-xin, HUANG Xiu-zhang, HUANG Pan-li, *et al.* Generation of Hybridly polarized vector beams by manipulating Pancharatnam-Berry phase[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(1): 0126002.
徐兆鑫, 黄修章, 黄攀立, 等. 基于 Pancharatnam-Berry 相位调控产生混合偏振矢量光束[J]. 光子学报, 2018, **47**(1): 0126002.
- [6] SUN Shun-hong, LIN Hui-chuan, CUI Sheng-wei, *et al.* Generation and propagation characteristics of the radially polarized non-diffracting beam[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, **42**(10): 1022-1028.
孙顺红, 林惠川, 崔省伟, 等. 径向偏振无衍射光束的产生及其传输特性研究[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2012, **42**(10): 1022-1028.
- [7] ZHANG Qian-an, WU Feng-tie, ZHENG Wei-tao, *et al.* Self-reconstructing properties of high-order Bessel-Gauss beam[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, **41**(10): 1131-1137.
张前安, 吴逢铁, 郑维涛, 等. 高阶贝塞尔-高斯光束的自重建特性[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2011, **41**(10): 1131-1137.
- [8] EYYUBOGLU H T. Propagation of higher order Bessel-Gaussian beams in turbulence[J]. *Applied Physics B*, 2007, **88**(2): 259-265.
- [9] CHEN Bao-suan, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong. Propagation of partially coherent Bessel-Gaussian beams in turbulent atmosphere[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(6): 820-827.
- [10] LIU Yong-xin, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong. Propagation of stochastic electromagnetic high-order Bessel-Gaussian beams in the oceanic turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(12): 124205.
刘永欣, 陈子阳, 蒲继雄. 随机电磁高阶 Bessel-Gaussian 光束在海洋湍流中的传输特性[J]. 物理学报, 2017, **66**(12): 124205.
- [11] DUDLEY A, LI Y, MHLANGA T, ESCUTI M, *et al.* Generating and measuring non-diffracting vector Bessel beams [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(17): 3429-3432.
- [12] MORENO I, DAVIS J A, JEFFREY A D, *et al.* Non-diffracting Bessel beams with polarization state that varies with propagation distance[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(23): 5451-5454.
- [13] DAVIS J A, MORENO I, BADHAM K, *et al.* Nondiffracting vector beams where the charge and the polarization state vary with propagation distance[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(10): 2270-2273.
- [14] WANG Xi-lin, CHEN Jing, LI Yong-nan *et al.* Optical orbital angular momentum from the curl of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**(25): 253602.
- [15] HU Ke-lei, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong. Tight focusing properties of hybridly polarized vector beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(6): 1099-1104.
- [16] HU Ke-lei, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong. Generation of super-length optical needle by focusing hybridly polarized vector beams through a dielectric interface[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(16): 3303-3305.
- [17] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[M]. Alan Jeffrey, Daniel Zwillinger, Seventh Edition, Academic Press, 2007; **28**, 491.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos.61505059,61575070,61275203)

引用格式: LIU Yong-xin, ZHANG Kai-ning, PU Ji-xiong. Propagation and Polarization Characteristics of the Radially Polarized High-order Bessel-Gaussian Vortex Beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0708001

刘永欣, 张凯宁, 蒲继雄. 径向偏振高阶贝塞尔-高斯涡旋光束的传输及其偏振特性[J]. 光子学报, 2018, **47**(7): 0708001