

文章编号: 0253-2239(2010)11-3317-06

初级球差对椭圆偏振涡旋光束深聚焦场的影响

梁重庆 唐志列 郭利娜

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 研究了椭圆偏振涡旋光束经过具有初级球差的高数值孔径透镜的聚焦特性。基于德拜矢量积分理论, 获得了椭圆偏振涡旋贝塞尔-高斯光束经过具有初级球差的高数值孔径透镜后的复振幅的分布函数, 根据数值模拟的结果, 分析了不同的初级球差系数对右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束聚焦场光强分布和相位分布的影响。结果表明, 随着初级球差系数的增加, 椭圆偏振涡旋光束的强度会变小, 空心的尺寸会变大; 右旋椭圆偏振光纵向分量的相位分布呈现螺旋结构, 而且右旋椭圆偏振光和左旋椭圆偏振光的位错线半径会逐渐增大; 会聚点逐渐偏离焦平面, 纵向光场发生改变。

关键词 物理光学; 深聚焦; 德拜矢量积分理论; 初级球差; 椭圆偏振涡旋光束; 贝塞尔-高斯光束

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3317

Effect of Primary Spherical Aberration on Tight Focusing of Elliptically Polarized Vortex Beams

Liang Chongqing Tang Zhilie Guo Lina

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract The focusing properties of elliptically polarized vortex beams through a high numerical-aperture objective with primary spherical aberration are studied. Based on vectorial Debye theory, the complex amplitude distribution of elliptically polarized Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture objective with primary spherical aberration is derived. Numerical calculation is performed to analyze intensity distribution and phase distribution of the right-handed elliptically (RE) polarized beam and the left-handed elliptically (LE) polarized beam with different primary spherical aberration coefficients. It is shown that the intensity distribution of the vortex beams decreases with the spherical aberration coefficient, but the size of dark core increases. Additionally, the phase distribution of longitudinal component of RE polarized beam presents the spiral structure and the radii of the dislocation lines for RE polarized beam and LE polarized beam increase gradually with the primary spherical aberration coefficient. With the increment of spherical aberration coefficient, the converging point gradually deviates from the focal plane and the longitudinal field changes.

Key words physical optics; tight focusing; vectorial Debye theory; primary spherical aberration; elliptically polarized vortex beams; Bessel-Gaussian beams

1 引 言

激光束经过高数值孔径系统后, 能产生较小光斑和轴向分量, 而广泛应用于显微技术、数据存储、平板印刷技术、材料加工和光学捕获等领域^[1~6], 因

而至今为止已有不少学者对各类光束的深聚焦特性做了大量的研究^[7~10], B. Chen 等^[8]分析了椭圆偏振涡旋光束深聚焦后的光强、相位和角动量的分布特性, 张志明等^[9]分析了圆柱偏振贝塞尔-高斯光束

收稿日期: 2009-11-23; 收到修改稿日期: 2010-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(60877068)和广州市科技计划(2007J1-C0011)资助课题。

作者简介: 梁重庆(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事共焦显微成像技术方面的研究。E-mail: 04lcq1986@163.com

导师简介: 唐志列(1963—), 男, 教授, 主要从事声光成像和共焦显微成像技术等方面的研究。

E-mail: tangzhl@senu.edu.cn(通信联系人)

的深聚焦光场分布,获得了具有广泛应用的局域空心光束和平顶光束。众所周知,带有相位因子 $\exp(im\phi)$ 的涡旋光束^[11,12] 由于其轨道动量而应用于粒子操纵和数据存储等领域,激发了人们对这种涡旋光束的传输和聚焦性质的研究兴趣^[13~16]。光束的聚焦系统的像差或者系统外部环境引起的像差都会影响三维光场的分布,这会给实际应用带来许多问题,K. I. Willing 等^[1]曾提到球差会改变空心光束的结构形态等问题,所以,球差对涡旋光束的聚焦场也成为了一个新的研究热点^[17~20],D. P. Biss 等^[17]研究了初级球差对径向偏振涡旋光束的聚焦场的影响,R. K. Singh 等^[18]分析了初级球差对线偏振涡旋光束和圆偏振涡旋光束的深聚焦场的影响,但是至今为止都没有分析初级球差对椭圆偏振光束深聚焦场的影响。因此,本文基于德拜矢量积分理论,研究了椭圆偏振贝塞尔-高斯光束经过具有初级球差的高数值孔径透镜聚焦后的深聚焦特性,并通过数值计算分析了变化的初级球差系数对

聚焦场光强分布和相位分布的影响。

2 理论分析

首先讨论位于深聚焦场入瞳处的贝塞尔-高斯光束,其分布函数可表示为^[21]

$$A_j(\theta, \phi) = E_j J_m \left(2\gamma \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right) \exp \left(-\gamma^2 \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \alpha} \right) \times \exp(im\phi), \quad j = x, y, \quad (1)$$

式中 E_j 为振幅常数, $J_m(\cdot)$ 为贝塞尔函数, γ 为高数值孔径聚焦系统的瞳孔半径和入射光束的束腰宽度的比值, α 为由透镜的数值孔径(NA)和透镜所处介质折射率 n 共同决定的最大光束汇聚角, m 为拓扑电荷数。

根据德拜矢量衍射积分和椭圆偏振光束的性质可知,椭圆偏振贝塞尔-高斯光束经过具有初级球差的高数值孔径透镜后,聚焦区域内的电场表达式为^[8]

$$E_{\pm}(r, \varphi, z) = -\frac{ikf}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} \sin \theta \sqrt{\cos \theta} A_1(\theta) \exp\{ik[z \cos \theta + r \sin \theta \cos(\phi - \varphi)]\} \times \begin{bmatrix} A_x(\theta, \phi) (\cos^2 \phi \cos \theta + \sin^2 \phi) \pm A_y(\theta, \phi) \exp(i\beta) \cos \phi \sin \phi (\cos \theta - 1) \\ A_x(\theta, \phi) \cos \phi \sin \phi (\cos \theta - 1) \pm A_y(\theta, \phi) \exp(i\beta) (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cos \theta) \\ - A_x(\theta, \phi) \sin \theta \cos \phi \mp A_y(\theta, \phi) \exp(i\beta) \sin \theta \sin \phi \end{bmatrix} d\phi d\theta, \quad (2)$$

式中 r, ϕ 和 z 为聚焦场上观察点的柱坐标表示, k 为入射光的波数, f 为透镜的焦距, $A_{x,y}(\theta, \phi)$ 为入射光束的光场分布函数, $A_1(\theta)$ 为球差函数。 $E_+(r, \varphi, z)$ 对应右旋椭圆偏振光, 而 $E_-(r, \varphi, z)$ 对应左旋椭圆偏振光, β 为椭圆偏振光 x 和 y 方向两条线偏振光之间的相位差。

而对于聚焦光束波面偏离理想球面的初级球差函数可表示为^[22]

$$A_1(\theta) = \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} A_s \frac{\sin^4 \theta}{\sin^4 \alpha} \right), \quad (3)$$

式中 A_s 为球差系数, λ 为入射光的波长。应用积分公式:

$$\int_0^{2\pi} \exp[im\phi + ikr \sin \theta \cos(\phi - \varphi)] d\phi = 2\pi i^m \exp(im\varphi) J_m(kr \sin \theta), \quad (4)$$

对(2)式中 ϕ 进行积分化简, 可得到聚焦区域内电场的 x, y 和 z 3 个振幅分量的表达式为

$$E_{\pm x}(r, \varphi, z) = A_x i^m \exp(im\varphi) I_m + \frac{1}{2} [A_x \pm (-i) A_y \exp(i\varphi)] i^{m+2} \exp[i(m+2)\varphi] I_{m+2} + \frac{1}{2} [A_x \pm i A_y \exp(i\varphi)] i^{m-2} \exp[i(m-2)\varphi] I_{m-2}, \quad (5)$$

$$E_{\pm y}(r, \varphi, z) = \pm A_y \exp(i\varphi) i^m \exp(im\varphi) I_m + \frac{1}{2} [(-i) A_x \mp A_y \exp(i\varphi)] i^{m+2} \exp[i(m+2)\varphi] I_{m+2} + \frac{1}{2} [i A_x \mp A_y \exp(i\varphi)] i^{m-2} \exp[i(m-2)\varphi] I_{m-2}, \quad (6)$$

$$E_{\pm z}(r, \varphi, z) = -[A_x \pm (-i) A_y \exp(i\varphi)] i^{m+1} \exp[i(m+1)\varphi] I_{m+1} + [A_x \mp i A_y \exp(i\varphi)] i^{m-1} \exp[i(m-1)\varphi] I_{m-1}, \quad (7)$$

式中 $I_m, I_{m\pm 1}$ 和 $I_{m\pm 2}$ 的表达式为

$$I_m(r, z) = -\frac{ikf}{2} \int_0^\alpha \sin \theta \sqrt{\cos \theta} A_1(\theta) \exp(ikz \cos \theta) (1 + \cos \theta) J_m(kr \sin \theta) d\theta, \tag{8}$$

$$I_{m\pm 1}(r, z) = -\frac{ikf}{2} \int_0^\alpha \sin^2 \theta \sqrt{\cos \theta} A_1(\theta) \exp(ikz \cos \theta) J_{m\pm 1}(kr \sin \theta) d\theta, \tag{9}$$

$$I_{m\pm 2}(r, z) = -\frac{ikf}{2} \int_0^\alpha \sin \theta \sqrt{\cos \theta} A_1(\theta) \exp(ikz \cos \theta) (\cos \theta - 1) J_{m\pm 2}(kr \sin \theta) d\theta. \tag{10}$$

3 数值计算与讨论

数值计算采用的参数分别是 $\gamma = 3/2, \alpha = 75^\circ, m = 1, A_x = 1, A_y = 2, \beta = \pi/4$, 其中所有位置坐标以及球差系数都对波长 λ 归一化。

图 1 给出 A_s 分别取 $0, 0.5\lambda$ 和 λ 时, 右旋和左旋椭圆偏振光束在焦平面内的光强分布。从图 1(a) 和

(d) 可以看出, 椭圆偏振光束经过消球差 ($A_s = 0$) 高数值孔径透镜的聚焦后, 得到一个空心的椭圆光斑。由图 1(b)~(c) 和 (e)~(f) 可看出, 随着初级球差系数的增大, 空心的尺寸变大了, 但是空心的数目始终保持不变, 而初级球差系数的增大却导致了光强强度的减小。

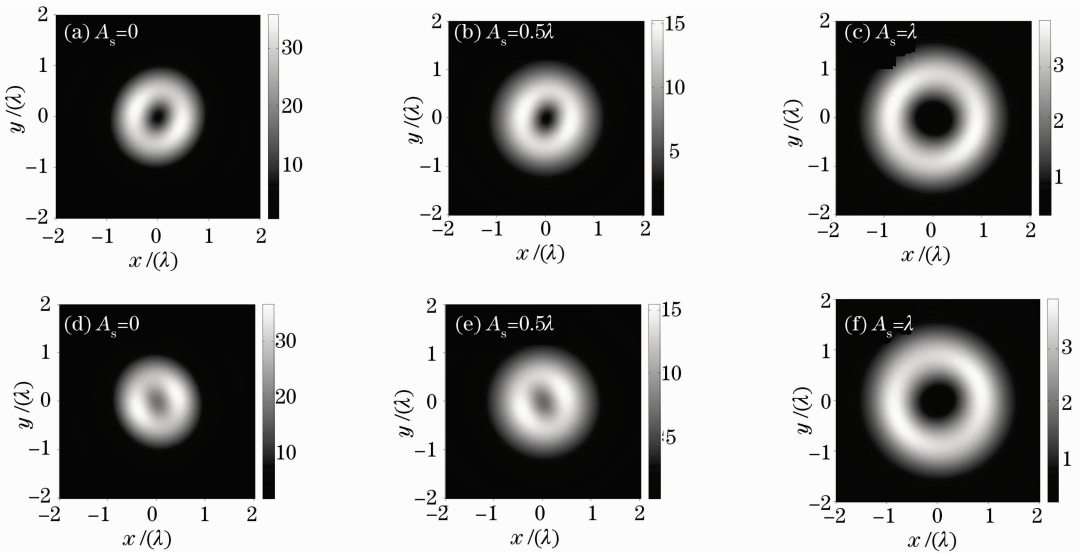


图 1 在焦平面内的光强分布。(a)~(c) 右旋椭圆偏振光; (d)~(f) 左旋椭圆偏振光

Fig. 1 Light-intensity distributions on the focal plane. (a)~(c) right-handed elliptically polarized beams; (d)~(f) left-handed elliptically polarized beams

图 2 是不同初级球差系数下, 右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束各分量在焦平面的强度分布。由图可知, 当 $A_s = 0$ 时, 右旋椭圆偏振光束的 x 分量和 y 分量都只有一个空心, 而 z 分量有两个; 左旋椭圆偏振光束的 x 分量和 y 分量依然只有一个空心, 而 z 分量却变成了具有一定能量的实心点, 这是由于 z 方向电场的自旋角动量与光束的角动量相互作用的结果。当 $A_s = 0.5\lambda$ 时, 各分量保持着原来空心的数目, 但强度会明显地变小。

图 3 是不同初级球差系数下, 右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束在焦平面内 z 分量的相位分布。

由图 3(a) 和 3(d) 可知, 右旋椭圆偏振光束的 z 分量的两个涡旋相位都是由 $-\pi$ 到 π , 所以其光强分布会出现两个空心; 而左旋椭圆偏振光束的 z 分量却是不变的, 所以其光强分布就出现了一个实心点, 上述情况都跟图 2(c1) 和 (c3) 的情况相吻合。当在有初级球差的情况下, 右旋椭圆偏振光束的 z 分量光场的相位分布呈现螺旋结构, 但是随着初级球差系数的增大, 右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束相位的弯曲程度增大, 位错线的半径随球差系数的增加而增大。这是因为光束的横向场分布会随着球差系数的增大而扩展, 因此位错线的半径随之增大。

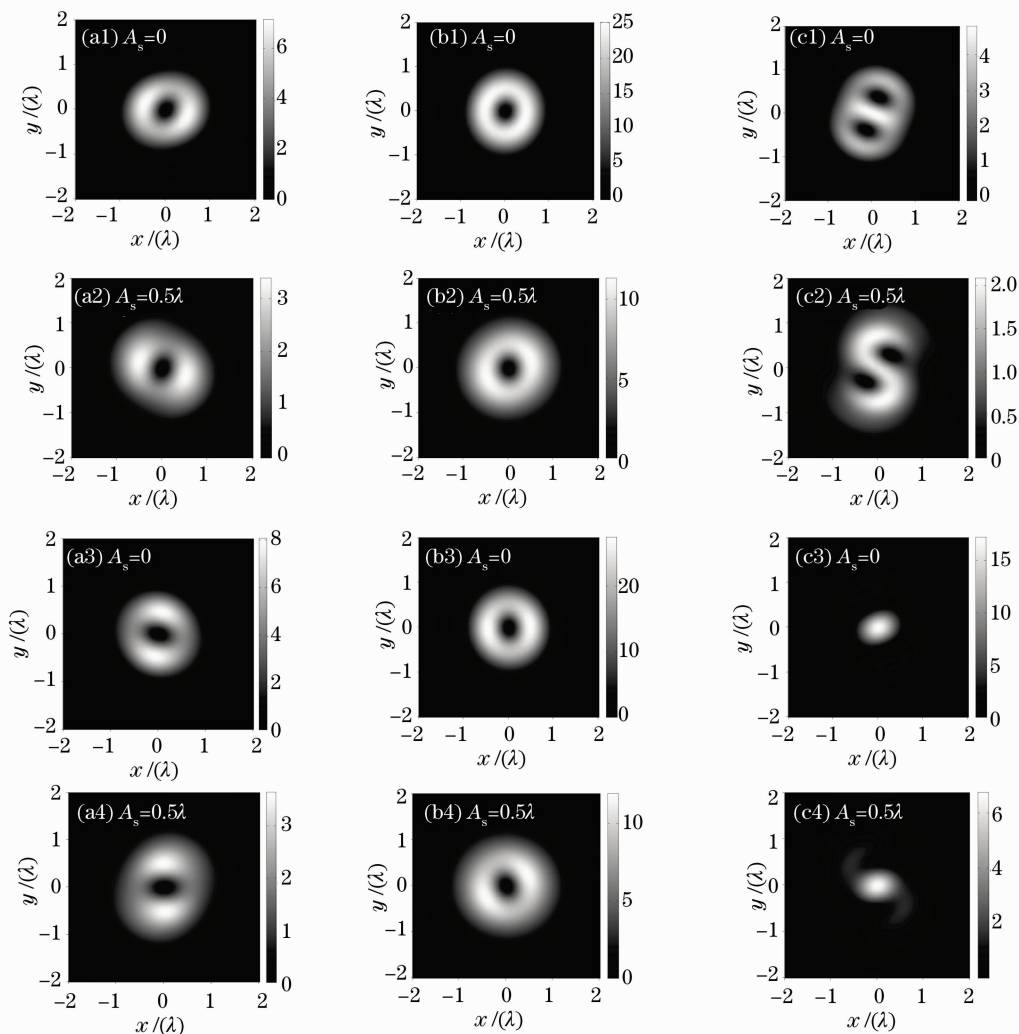


图2 在焦平面内右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束偏振分量的强度分布。(a1)~(a4) $|E_x|^2$, (b1)~(b4) $|E_y|^2$, (c1)~(c4) $|E_z|^2$

Fig. 2 Intensity distributions of polarized components for the right-handed elliptically polarized beams and left-handed elliptically polarized beams in the focal plane. (a1)~(a4) are $|E_x|^2$, (b1)~(b4) are $|E_y|^2$, (c1)~(c4) are $|E_z|^2$

图4所示的是当 $A_s=0, 0.5\lambda$ 和 λ 时,右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束的纵向光强分布。可以看出,当 $A_s=0$ 时,右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束的纵向光强分布都是同时关于 y 轴和 z 轴对称的,而且两者的中间也同时存在着一个空心区域,但是在焦平面上右旋椭圆偏振光束的空心区域的尺寸比左旋偏振光束的大,上述情况都跟图1的情况相吻合。随着初级球差系数的增大,在 $z=0$ 处(即焦平面上)空心区域的尺寸都会增大,跟图1讨论的情况相符合;还可以发现,当 $A_s=0$ 时,光强的最大值位于 $z=0$ 处,而 $A_s=0.5\lambda$ 对应的光强最大值位于约 -0.8λ 处, $A_s=\lambda$ 对应的光强最大值又位于约 -1.8λ 处,所以,光束的衍射会聚点随着 A_s 的增大,逐渐远离系统的焦平面,也因此导致了焦平

面上光强强度的减少。

4 结 论

基于德拜矢量衍射积分,得到了在存在初级球差的情况下,椭圆偏振贝塞尔-高斯光束深聚焦光场的函数表达式。然后通过数学模拟,分析了不同初级球差对焦平面内右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束的强度和相位的影响。结果表明,随着初级球差的变大,椭圆偏振贝塞尔-高斯光束的强度会变小,而空心的尺寸却变大;各分量的空心数目不受初级球差的影响,但强度会明显地减小;右旋椭圆偏振光束的纵向分量的相位分布呈现螺旋结构,而且右旋椭圆偏振光束和左旋椭圆偏振光束的位错线半径随球差系数的增加而增大。汇聚点逐渐偏离焦平

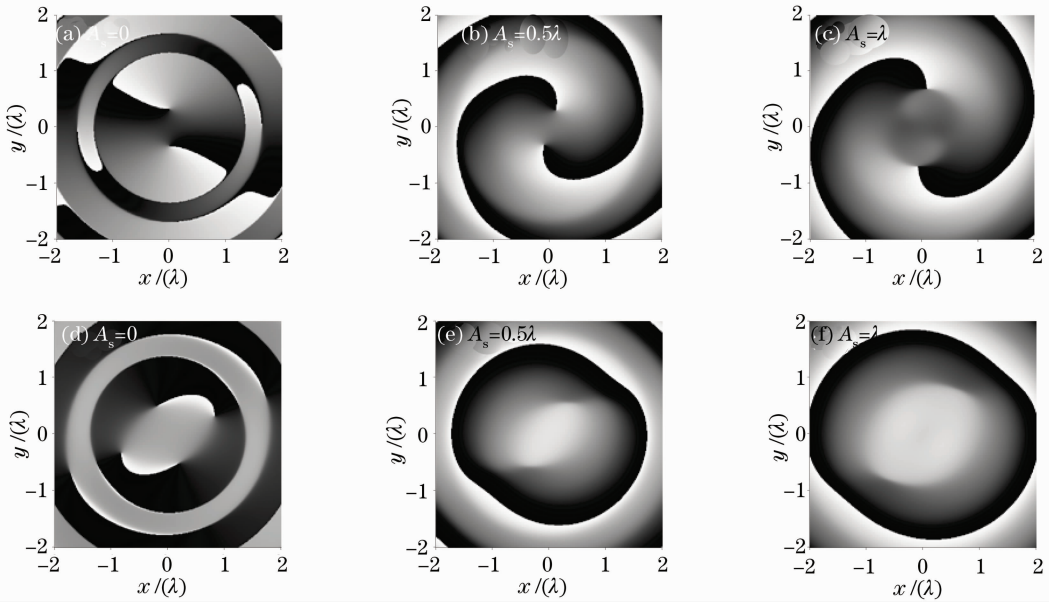


图 3 在焦平面内右旋椭圆偏振光束(a)~(c)和左旋椭圆偏振光束(d)~(f)纵向分量 z 的相位分布

Fig. 3 Phase distributions of the longitudinal component for the right-handed elliptically polarized beams (a)~(c) and left-handed elliptically polarized beam (d)~(f) in the focal plane

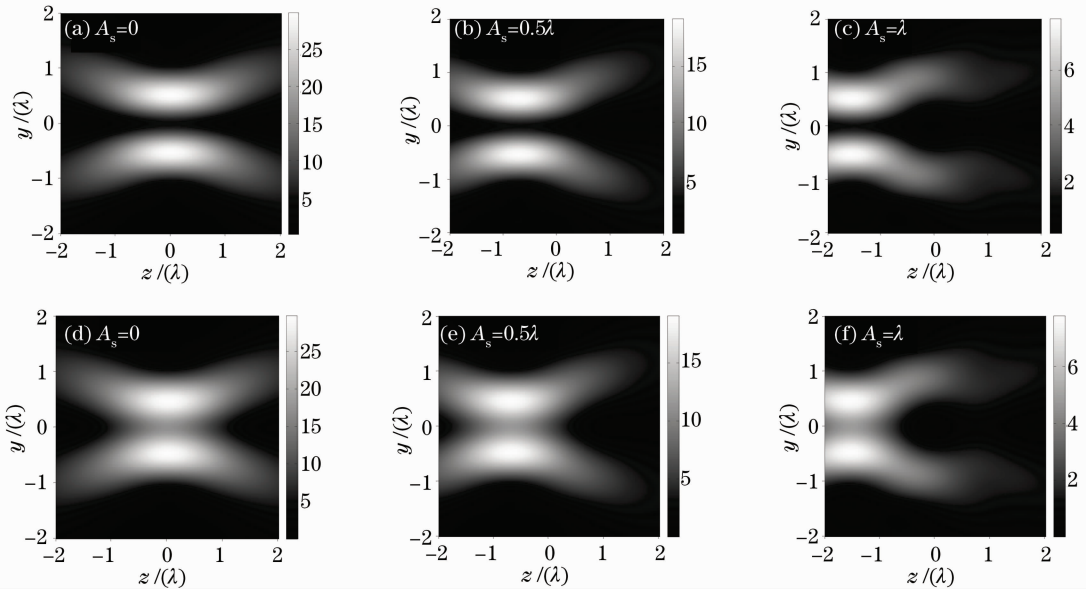


图 4 右旋椭圆偏振光束(a)~(c)和左旋椭圆偏振光束(d)~(f)的纵向强度分布

Fig. 4 Longitudinal intensity distributions of right-handed elliptically polarized beams (a)~(c) and left-handed elliptically polarized beams (d)~(f)

面,纵向光场发生改变,也因此导致了焦平面上光强强度的减少和空心尺寸的增大。

参 考 文 献

1 K. I. Willing, J. Keller, M. Bossi *et al.*. STED microscopy resolves nanoparticle assemblies [J]. *New J. Phys.*, 2006, **8**(106): 1~8
2 G. D. Jeffries, J. S. Edgar, Y. Zhao *et al.*. Using polarization-shaped optical vortex traps for single-cell nanosurgery [J]. *Nano-*

Lett., 2007, **7**(2): 415~420

3 G. M. Lerman, U. Levy. Tight focusing of spatially variant vector optical fields with elliptical symmetry of linear polarization [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2194~2196
4 L. E. Helseth. Smallest focal hole [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **257**(1): 1~8
5 H. E. M. E. J. Frises, N. R. Heckenberg *et al.*. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**S(5): 826~829
6 J. W. M. Chon, X. Gan, M. Gu. Splitting of the focal spot of a

- high numerical-aperture objective in the free space [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(9): 1576~1578
- 7 B. Chen, Z. Zhang, J. Pu. Tight focusing of partially coherent and circularly polarized vortex beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **26**(4): 862~869
- 8 B. Chen, J. Pu. Tight focusing of elliptically polarized vortex beams[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(7): 1288~1294
- 9 Zhang Zhiming, Pu Jixiong, Wang Xiqing. Focusing of cylindrically polarized Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture lens [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 401~405
张志明, 蒲继雄, 王喜庆. 圆柱偏振贝塞尔-高斯光束经过高数值孔径透镜的聚焦[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 401~405
- 10 Z. Zhang, J. Pu, X. Wang. Tightly focusing of linearly polarized vortex beams through a dielectric interface[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(13): 3421~3426
- 11 I. V. Basistiy, M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov. Optical wavefront dislocations and their properties[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **119**(5-6): 604~612
- 12 D. M. Palacios, I. D. Maleev, A. S. Marathay *et al.*. Spatial correlation singularity of a vortex field[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(14): 143905
- 13 A. Y. Bekshaev, M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov. Transformation of higher-order optical vortices upon focusing by an astigmatic lens [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(4-6): 237~247
- 14 L. H. Helseth. Optical vortices in focal regions [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1-6): 85~91
- 15 Z. Zhang, J. Pu, X. Wang. Tight focusing of a radially and azimuthally polarized vortex beams through a uniaxial birefringent crystal[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(12): 1963~1967
- 16 Chen Baosuan, Pu Jixiong, Zhang Zhiming *et al.*. Focusing of partially coherent and circularly polarized Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1664~1670
陈宝算, 蒲继雄, 张志明 等. 部分相干圆偏振贝塞尔-高斯光束经过高数值孔径透镜的聚焦[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1664~1670
- 17 D. P. Biss, T. G. Brown. Primary aberrations in focused radially polarized vortex beams[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(3): 384~393
- 18 R. K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh. Effect of primary spherical aberration on high-numerical-aperture focusing of a Laguerre-Gaussian beam [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(6): 1307~1318
- 19 Liu Yong, Zhao Zhaoxiong, Zhao Fujian. Effect of primary spherical aberration on focusing of circularly polarized vortex Bessel-Gaussian beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2660~2663
刘 勇, 赵肇雄, 赵福建. 球差对圆偏振涡旋贝塞尔-高斯光束聚焦场的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2660~2663
- 20 Liu Yong, Chen Jiabi. Effect of primary spherical aberration on focusing field of cylindrical-vector Bessel-Gaussian beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1996~1999
刘 勇, 陈家璧. 初级球差对矢量柱状贝塞尔-高斯光束聚焦场的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1996~1999
- 21 R. H. Jordan, D. G. Hall. Free-space azimuthal paraxial wave equation: the azimuthal Bessel-Gauss beam solution [J]. *Opt. Lett.*, 1944, **19**(7): 427~429
- 22 R. Kant. An analytical solution of vector diffraction for focusing optical systems with Seidel aberrations I. Spherical aberration, curvature of field, and distortion [J]. *J. Mod. Opt.*, 1993, **40**(11): 2293~2310