

初级像差对角向偏振光深聚焦场的影响

任广森 宁禹 师宇斌 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 角向偏振光经深聚焦得到的轴对称环状光斑在粒子捕获和高分辨率成像等领域有重要应用,但是实际的深聚焦系统必然存在一些像差。基于 Richards-Wolf 矢量衍射积分理论,利用数值方法具体分析了五种初级像差对角向偏振光深聚焦场光强分布的影响。结果表明:球差、场曲不会破坏会聚场关于光轴旋转对称的特性,在实际焦面上仍可得到较为紧凑的中空光斑;畸变仅使焦面上的中空光斑位置发生偏移,但不改变其形状;像散会拉长中空光斑;彗差使光强向中空光斑的一边偏移,当彗差系数较大时,光斑中空特性消失。

关键词 物理光学;初级像差;深聚焦;角向偏振

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0702007

Effect of Primary Aberration on Tight Focused Azimuthally Polarized Beams

Ren Guangsen Ning Yu Shi Yubin Xu Xiaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The symmetric dark core with a high intensity ring resulting from tight focusing of an azimuthally polarized beam plays a significant role in the fields of particle trapping and high-resolution imaging, etc. However, even in the well-corrected tight focusing optical systems, some aberrations inevitably occur. Numerical calculation is performed to analyze the influence of primary aberrations on the tight focusing properties of azimuthally polarized beams based on Richards-Wolf vector diffraction theory. The results show that the primary spherical aberration and the field curvature do not destroy the circular symmetry of the intensity distribution and a sharp high intensity ring can be obtained on the real focal plane. A positional displacement of the intensity ring takes place in the presence of primary distortion. The intensity ring is elongated in the presence of primary astigmatism. The primary coma tends to drive the intensity ring to move favorably on one side of the dark core, and the intensity null vanishes when the aberration coefficient becomes large.

Key words physical optics; primary aberration; tight focusing; azimuthal polarization

OCIS codes 260.5430; 050.1940; 350.4855

1 引言

近年来,径向、角向偏振光束的深聚焦特性成为一个研究热点,其独特的性质在电子加速、粒子捕获和高分辨率成像等领域有重要应用。已经有很多学者对这一课题进行了研究^[1~9]。研究表明,径向偏振光深聚焦会在光轴附近产生很强的轴向分量电

场^[2],在一定条件下甚至可以得到小于衍射极限的会聚光斑^[5,6]。而角向偏振光深聚焦可以得尺度为波长量级的轴对称环状光斑^[2],这种光强分布可作为受激发射损耗(STED)显微术^[10]中的 STED 光,还可用于束缚低折射率的微小粒子^[11]。

在实际的大数值孔径聚焦系统中,光学元件的

收稿日期: 2013-01-05; 收到修改稿日期: 2013-02-01

作者简介: 任广森(1989—),男,硕士研究生,主要从事光束控制方面的研究。E-mail: guangsen.ren@yahoo.cn

导师简介: 许晓军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事高能固体激光器,大气光学与自适应光学等方面的研究。
E-mail: xuxj@21cn.com(通信联系人)

制造、装调必然会引入一些像差。因此研究像差对会聚场的影响很有必要。Biss 等^[12]研究了初级像差对径向偏振光束深聚焦场的影响,刘勇等^[13]研究了初级球差对径向、角向偏振贝塞尔-高斯光束聚焦场的影响。陈建农等^[14]研究了初级球差及孔径对径向偏振高阶矢量贝塞尔-高斯光束聚焦场的影响。本文将系统分析并对比各种初级像差对角向偏振光深聚焦光场的影响。

2 理论模型

有关会聚偏振光三维电磁场研究的基础理论是 Richards 等^[1]建立的。之后,Youngworth 等^[2]运用该理论对径向、角向偏振光的聚焦特性进行了理论研究。非均匀偏振光焦点附近的三维电场可以表示为^[1,15]

$$\begin{bmatrix} E_x(r, \phi, z) \\ E_y(r, \phi, z) \\ E_z(r, \phi, z) \end{bmatrix} = -\frac{if}{\lambda} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \varphi (\cos \theta - 1) & \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) & \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) & 1 + \sin^2 \varphi (\cos \theta - 1) & \sin \varphi \sin \theta \\ -\sin \theta \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a(\theta, \varphi) \\ b(\theta, \varphi) \\ c(\theta, \varphi) \end{bmatrix} \times \\ A(\theta, \varphi) \sqrt{\cos(\theta) \sin(\theta)} \times \exp\{ik[r \sin \theta \cos(\varphi - \phi) + z \cos \theta]\} d\theta d\varphi, \quad (1)$$

式中 (r, ϕ, z) 为焦点附近的柱坐标, (θ, φ) 为聚焦系统出瞳面上的会聚角和方位角坐标(图 1), f 为焦距, λ 为波长, k 为波数, n 为透镜后方介质折射率, NA 为会聚系统数值孔径, $\alpha = \arcsin(NA/n)$ 为会聚角 θ 的最大值, $A(\theta, \varphi)$ 为入射光场的复振幅分布函数。 $a(\theta, \varphi)$ 、 $b(\theta, \varphi)$ 、 $c(\theta, \varphi)$ 决定入射场偏振方向分布,对于角向偏振光, $a(\theta, \varphi) = -\sin \varphi$, $b(\theta, \varphi) = \cos \varphi$, $c(\theta, \varphi) = 0$ 。利用式可以计算给定相位、振幅和偏振分布的入射光场在焦点附近的电场分布。

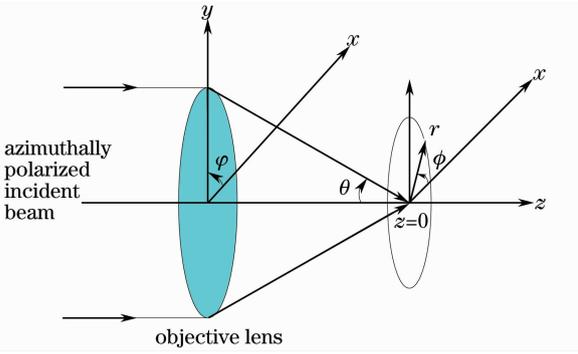


图 1 角向偏振光的聚焦

Fig. 1 Focusing of an azimuthally polarized beam

若聚焦系统存在像差,则应当在 $A(\theta, \varphi)$ 中考虑像差的影响。本文着重研究初级像差对角向偏振光深聚焦场的影响,认为入射光的振幅是均匀的,因此 $A(\theta, \varphi)$ 仅体现像差造成的波前起伏:

$$A(\theta, \varphi) = \exp[ik\Phi(\theta, \varphi)], 0 < \theta < \alpha, \quad (2)$$

式中 $\Phi(\theta, \varphi)$ 是初级像差对入射光的相位影响,可以表示为^[16]

$$\Phi(\theta, \varphi) = \begin{cases} U_d \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \cos \varphi \\ U_s \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right)^4 \\ U_{cu} \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right)^2 \\ U_{as} \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \cos \varphi \right)^2 \\ U_{co} \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right)^3 \cos \varphi \end{cases}, \quad (3)$$

式中 U_d, U_s, U_{cu}, U_{as} 和 U_{co} 分别为畸变系数、球差系数、场曲系数、像散系数和彗差系数。由(1)~(3)式可以计算特定像差系数下,任意偏振分布的非均匀偏振光经大数值孔径聚焦的三维电场分布。相应的光强分布为

$$I(r, \phi, z) = |E_x(r, \phi, z)|^2 + |E_y(r, \phi, z)|^2 + |E_z(r, \phi, z)|^2. \quad (4)$$

3 仿真结果与讨论

3.1 无像差情况

角向偏振光在理想条件下的深聚焦特性在文献^[2]中有详细讨论,这里只给出主要结论。本文所有计算都设定会聚系统参数为 $NA=1.2, n=1.5$ 。如图 2 所示,角向偏振光的聚焦光斑为关于光轴旋转对称的圆环,焦点附近的会聚场关于焦面对称。存在像差时,可能出现会聚光强极大值不在几何焦面 ($z=0$) 上的情况,可认为光强极大值所在面为实际焦面。图 2 中的实际焦面就是几何焦面。

3.2 球 差

由(3)式可以看出,球差只与坐标 θ 相关,因此球差不改变会聚场的旋转对称特性。图 3 是初级球

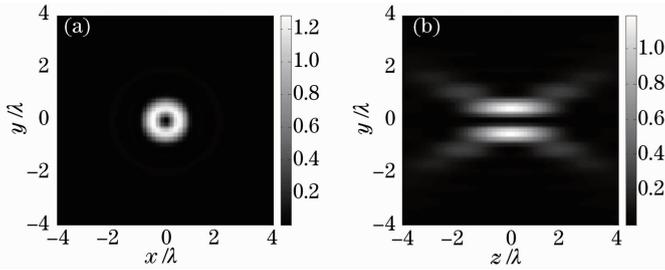


图2 角向偏振光深聚焦场强度分布。(a) x - y 面；(b) y - z 面

差系数分别取 $0.5\lambda, \lambda$ 和 1.5λ 时,角向偏振光在几何焦面上的光强分布图。可以看出,焦面光场始终关于光轴旋转对称,并保持中空。随着球差系数的增大,几何焦面上的光斑越来越弥散,中空区域先变大后变小(图3)。从会聚场在 y - z 面上的光强分布(图4)可以看出,随着初级球差系数的增大,会聚场

的光强极大点不断向几何焦点右侧偏移。图4中 $U_s = 0.5\lambda, \lambda$ 和 1.5λ 对应的实际焦面分别是过 $z = 1.36\lambda, 2.72\lambda$ 和 4.16λ 的与光轴垂直的平面。图5给出了实际焦面上的光强分布。可以看出,随着球差的增大,实际焦面上的光强分布形状与图2(a)差异不大,但峰值光强有所减小且开始出现次级环。

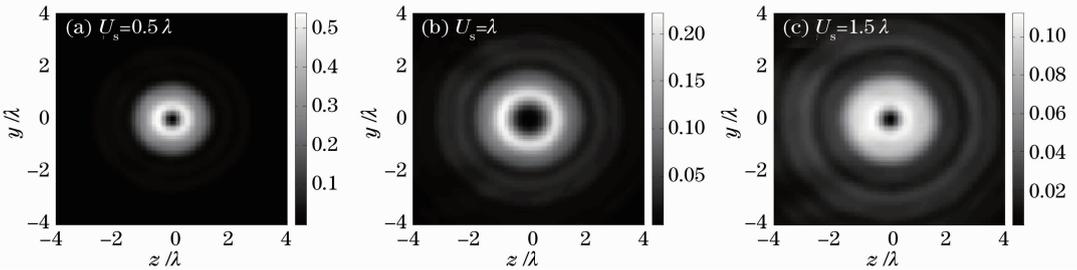


图3 存在球差时几何焦面上的光强分布

Fig.3 Intensity distribution at the geometrical focal plane in the presence of primary spherical aberration

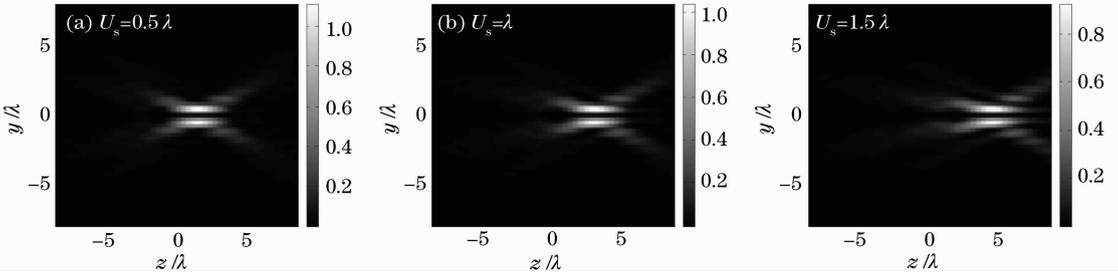


图4 存在球差时焦点附近 y - z 面上的光强分布

Fig.4 Intensity distribution near the focal point at the y - z plane in the presence of primary spherical aberration

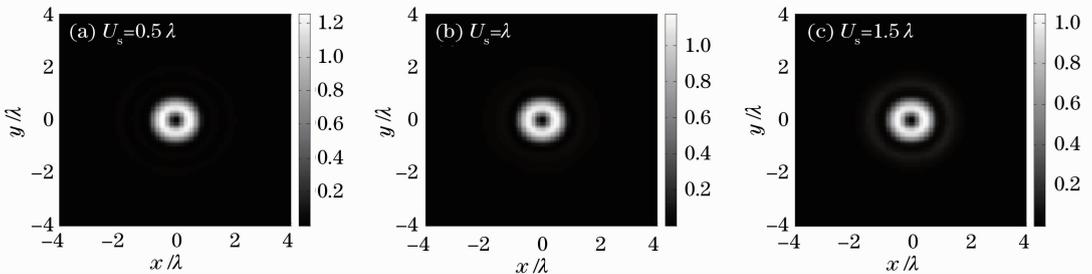


图5 存在球差时实际焦面上的光强分布

Fig.5 Intensity distribution at the real focal plane in the presence of primary spherical aberration

3.3 畸变

从(3)式可以看出初级畸变相当于 x 方向上的

波前倾斜,且畸变系数越大,波前倾斜越明显。图6是初级畸变系数分别取 $0.5\lambda, \lambda$ 和 1.5λ 时,角向偏

振光在焦面上的光强分布图。可以看出焦面上的光斑仍然是旋转对称的,但是对称轴发生了偏移,光斑

形状保持不变。从图 7 可以看出传输方向上的光强分布特性变化也不大。

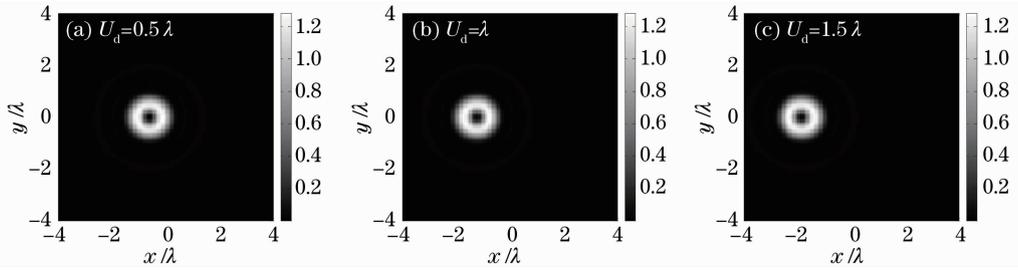


图 6 存在畸变时焦面上的光强分布

Fig. 6 Intensity distribution at the focal plane in the presence of primary distortion

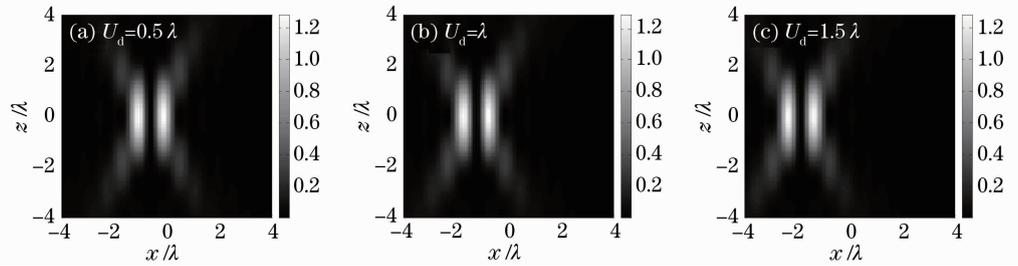


图 7 存在畸变时焦点附近 $x-z$ 面上的光强分布

Fig. 7 Intensity distribution near the focal point at the $x-z$ plane in presence of primary distortion

3.4 场 曲

从(3)式可以看出,场曲与球差都不改变会聚场的轴对称特性。然而场曲对入射场相位的影响与场点距入瞳中心距离的二次方相关,而球差与其四次方相关,因此相同像差系数下场曲对会聚场的影响比球差小。随着场曲系数的增大,几何焦面上的轴

对称光环内、外半径均变大(图 8),实际焦面向光的传播方向移动(图 9)。场曲系数为 $0.5\lambda, \lambda$ 和 1.5λ 时实际焦面分别位于 $z = 0.8\lambda, 2.56\lambda$ 和 3.68λ 处,比存在相应球差时的偏移量小。实际焦面上的峰值光强比存在相应球差时大(图 10)。

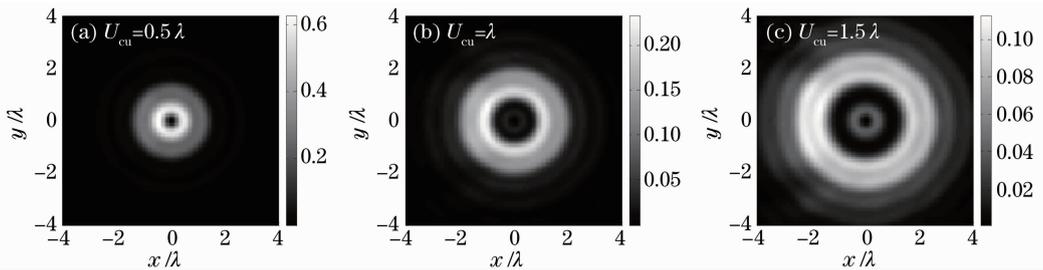


图 8 存在场曲时几何焦面上的光强分布

Fig. 8 Intensity distribution at the geometrical focal plane in the presence of primary curvature of field

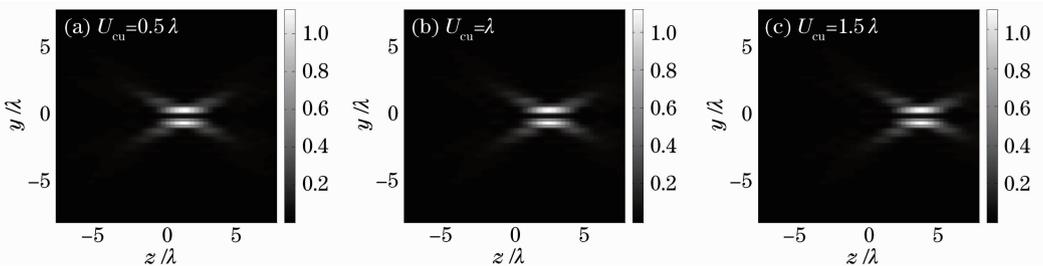


图 9 存在场曲时焦点附近 $y-z$ 面上的光强分布

Fig. 9 Intensity distribution near the focal point at the $y-z$ plane in the presence of primary curvature of field

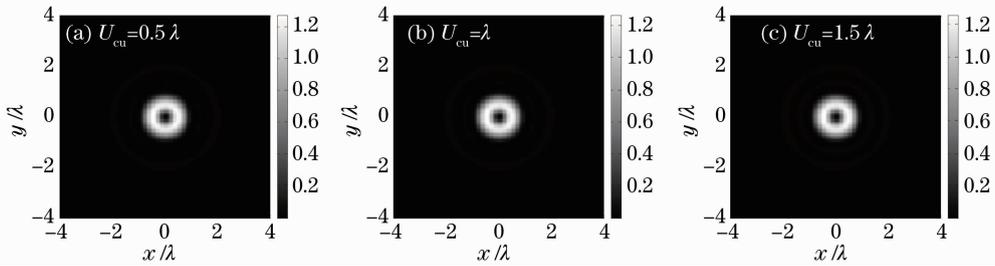


图 10 存在场曲时实际焦面处的光强分布

Fig. 10 Intensity distribution at the real focal plane in the presence of primary curvature of field

3.5 像散

图 11 是初级像散系数分别取 0.5λ , λ 和 1.5λ 时,角向偏振光在几何焦面上的光强分布。像散会破坏会聚场的旋转对称特性,会聚光斑在 x 方向上被拉长,且像散系数越大,拉长越明显。从图 12 可

以看出,在像散的作用下角向偏振光深聚焦场并没有一个明显的实际焦面。在 $x-z$ 平面内,光强极大值出现在几何焦面附近,但在 $y-z$ 平面内光强极大值出现在 $z=2\lambda$ 附近。

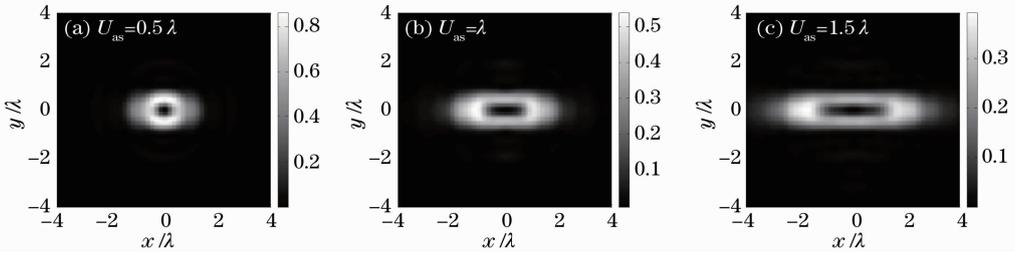


图 11 存在初级像散时几何焦面上的光强分布

Fig. 11 Intensity distribution at the geometrical focal plane in the presence of primary astigmatism

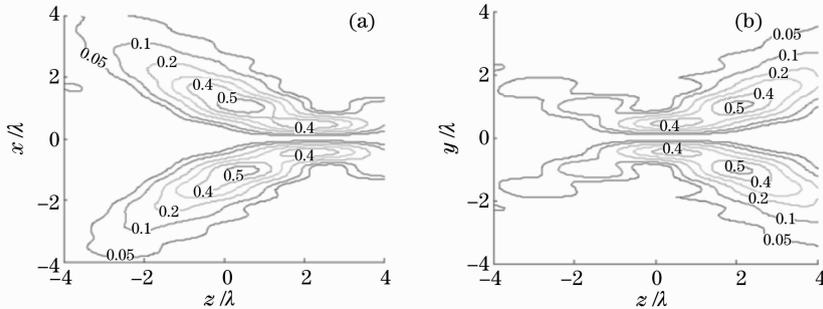


图 12 $U_{as}=\lambda$ 时焦点附近纵向光强分布。(a) $x-z$ 平面; (b) $y-z$ 平面

Fig. 12 Longitudinal intensity distribution near the focal point when $U_{as}=\lambda$. (a) $x-z$ plane; (b) $y-z$ plane

3.6 彗差

图 13 为初级彗差对角向偏振光深聚焦场的影响。可以看出彗差对焦面光强分布的影响很大。初

级彗差会使会聚场的暗中空结构逐渐被破坏,焦面上的光强向光场一边偏移,且彗差系数越大,偏移越明显。

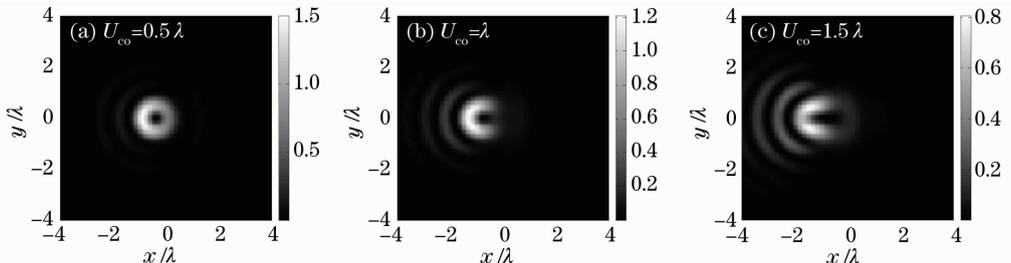


图 13 存在初级彗差时几何焦面上的光强分布

Fig. 13 Intensity distribution at the geometrical focal plane in the presence of primary coma

4 结 论

基于 Richards-Wolf 矢量衍射积分理论,获得了角向偏振光通过有初级像差的透镜聚焦的三维光场表达式。数值分析了五种初级像差对角向偏振光大数值孔径聚焦场的影响。结果表明:存在球差、场曲时,在实际焦面上仍可得到较为紧凑的中空光斑;畸变仅使几何焦面上的中空光斑位置移动;像散和彗差会破坏会聚场的旋转对称特性,存在像散时会聚光斑可以保持中空,而彗差会破坏会聚光斑的中空特性。在光学捕获和 STED 显微术等关注焦面光强分布情况的应用中,应当尽量减小会聚系统的像散和彗差,其他三种初级像差的影响可以通过调整会聚系统与目标面的相对位置来弥补。

参 考 文 献

- 1 B Richards, E Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems II. structure of the image field in an aplanatic system [J]. Proc R Soc Lond A, 1959, 253(1274): 358-379.
 - 2 K S Youngworth, T G Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical vector beams[J]. Opt Express, 2000, 7(2): 77-87.
 - 3 Y Kozawa, S Sato. Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam[J]. Opt Lett, 2006, 31(6): 820-822.
 - 4 B Tian, J Pu. Tight focusing of a double ring shaped azimuthally polarized beam[J]. Opt Lett, 2011, 32(11): 2014-2016.
 - 5 R Dorn, S Quabis, G Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(23): 233901.
 - 6 H Wang, L Shi, B Lukyanchu, *et al.*. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. Nat Photon, 2008, 2(8): 501-505.
 - 7 Chen Huifang, Liu Tao, Zhang Zaixuan. Shaper focus of radially polarized beam with a continuous phase filter[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0616001.
- 陈慧芳, 刘 涛, 张在宣. 连续相位滤波器缩小径向偏振光束焦

- 斑[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0616001.
- 8 Li Donghua, Pu Jixiong, Wang Xiqing. Effect of primary spherical aberration on optical trapping force of radially polarized beam[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 071401.
 - 李东华, 蒲继雄, 王喜庆. 初级球差对径向偏振光轴向光阱力的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 071401.
 - 9 Guo Ling, Li Jinsong. Phase pupil filter with cosine function for sharper focus of radially polarized beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 121001.
 - 郭 玲, 李劲松. 余弦型相位光瞳滤波器缩小径向偏振光焦斑 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 121001.
 - 10 T A Klar, E Engel, S W Hell. Breaking Abbe's diffraction resolution limit in fluorescence microscopy with stimulated emission depletion beams of various shapes[J]. Phys Rev E, 2001, 64(6): 066613.
 - 11 Y Zhao, G Milne, J S Edgar, *et al.*. Quantitative force mapping of an optical vortex trap[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(16): 161111.
 - 12 D P Biss, T G Brown. Primary aberrations in focused radially polarized vortex beams [J]. Opt Express, 2004, 12(3): 384-393.
 - 13 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.
 - 14 Chen Jiannong, Yu Yongjiang. The effect of primary spherical aberration and aperture on focusing of radially polarized high-order vector Bessel-Gauss beams[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2724-2728.
 - 陈建农, 于永江. 初级球差及孔径对径向偏振高阶矢量贝塞尔-高斯光束聚焦的影响[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2724-2728.
 - 15 S F Pereira, A S van de Nes. Superresolution by means of polarization, phase and amplitude pupil masks[J]. Opt Commun, 2004, 234(1-6): 119-124.
 - 16 R Kant. An analytical method of vector diffraction for focusing optical systems with Seidel aberrations II. astigmatism and coma [J]. J Mod Opt, 1995, 42(2): 299-320.

栏目编辑:殷建芳