

大数值孔径聚焦的特性研究

陈宝算 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 激光束经过大数值孔径透镜聚焦后,会得到一个亚波长量级的极小光斑,能够应用于显微技术、光刻和光数据存储。基于德拜矢量衍射积分公式,研究了激光束经过大数值孔径透镜的聚焦特性。较为系统地分析了大数值孔径聚焦的光强、相位、相干度和偏振度特性,以及入射光束偏振度和相位变化对聚焦光斑形状的影响。研究表明,激光束经过大数值孔径透镜聚焦后,光束本身带有的自旋角动量会转化成光束的轨道角动量。同时,随着大数值孔径的聚焦过程,激光束的相干度和偏振度也会发生变化。另外,通过调制入射光束的偏振度和相位分布情况,可以实现光束的整形。

关键词 物理光学;大数值孔径聚焦;德拜矢量衍射积分;角动量

中图分类号 O436.3

OCIS 050.1970 050.1220

文献标识码 A

Focusing Properties of High-Numerical Aperture Focusing

Chen Baosuan Pu Jixiong

(Department of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract By focusing a laser beam through a high-numerical aperture objective, a sub-wavelength focal spot is obtained, which enables the application of a laser beam in microscopy, lithography and optical data storage. In this paper, the focusing properties of a laser beam through a high-numerical aperture are studied based on the vectorial Debye diffraction theory. The intensity, phase, degree of coherence and degree of polarization in the focal field are analyzed systematically. The influence of the polarization and phase state of the incident beam on the shape of the focal spot is also investigated. It is found that the spin angular momentum of the incident laser beam will convert to the orbital angular momentum while focusing. Meanwhile, the degree of coherence and the degree of polarization of a beam can change during the focusing process. Moreover, by modulating the polarization and phase state of the incident beam, the desired shape of focusing spots can be obtained.

Key words physical optics; high numerical-aperture focusing; vectorial Debye theory; angular momentum

1 引言

激光束经过大数值孔径透镜聚焦后,在聚焦场会产生一个纵向分量并在焦平面上得到很小的聚焦光斑,因而在实际中有广泛的应用,例如,在光数据存储、光刻、平板印刷术以及材料加工等方面的应用^[1~6]。自1959年提出矢量衍射积分公式对激光束经过大数值孔径透镜聚焦进行研究以来,许多学者对大数值孔径聚焦的研究和应用产生了广泛的兴趣^[7~10]。2000年,K. S. Youngworth等^[5]对圆柱偏振矢量光束的大数值孔径聚焦进行了研究;2006年,Q. Zhan^[11]研究了圆偏振光束经过大数值孔径透镜聚焦的光强特性;随后,R. K. Sing研究小组^[12]将球差引入透镜,首次研究了带球差的透镜对大数值孔径聚焦的影响;另外,Z. Zhang等^[13,14]研究了激光束经过介面和单轴双折射晶体的大数值孔径聚焦。本文基于本小组对大数值孔径聚

收稿日期: 2010-04-16; **收到修改稿日期:** 2010-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)、福建省自然科学基金(A0810012)和中国科学院瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLST 200912)资助课题。

作者简介: 陈宝算(1985—),女,硕士研究生,主要从事光束传输与变换等方面的研究。E-mail: baosuan@hqu.edu.cn

导师简介: 蒲继雄(1962—),男,教授,主要从事光束传输与非线性光学等方面的研究。

E-mail: jixiong@hqu.edu.cn(通信联系人)

焦所做的研究,分析激光束经过大数值孔径透镜的聚焦特性,通过偏振调制实现对光束的整形,讨论大数值孔径聚焦的应用。

2 理论推导

根据德拜矢量衍射理论,一束完全相干 x 方向线偏振激光束经过大数值孔径透镜聚焦后,在聚焦场的光场表达式可以写为^[15]

$$\mathbf{E}(r, \varphi, z) = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = -\frac{ikf}{2\pi} \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} A(m, \theta, \phi) \exp\{ik[z \cos \theta + r \sin \theta \cos(\phi - \varphi)]\} \times \sin \theta \sqrt{\cos \theta} \begin{bmatrix} \cos^2 \phi \cos \theta + \sin^2 \phi \\ \cos \phi \sin \phi (\cos \theta - 1) \\ \sin \theta \cos(\phi) \end{bmatrix} d\phi d\theta. \quad (1)$$

式中 (r, φ, z) 为焦平面上观察点的柱坐标表示形式,如图 1 所示。 f 为大数值孔径透镜的焦距, $k = 2\pi/\lambda$ 为光束的波矢, $\alpha = \arcsin d_{\text{NA}}$ 表示最大数值孔径角, d_{NA} 为聚焦透镜的数值孔径。 $A(m, \theta, \phi)$ 是入射光束在正弦近似条件下的切趾函数,其中 m 为入射光束所带拓扑电荷数^[15,16]。从(1)式可以看出,入射光束经过大数值孔径透镜聚焦以后,在聚焦光场除了 x 向电场 E_x 外,还产生了 y 和 z 方向的电场 E_y 和 E_z ,即大数值孔径聚焦对激光束有去偏作用,并且聚焦后,在聚焦场产生了一个纵向分量 E_z 。

若考虑入射光束为部分相干光束,则经过大数值孔径透镜聚焦后,在焦平面附近的交叉谱密度矩阵可以表示为^[17]

$$\mathbf{W}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \begin{bmatrix} W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & W_{xy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & W_{xz}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) \\ W_{yx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & W_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & W_{yz}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) \\ W_{zx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & W_{zy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) & W_{zz}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中每一项矩阵元为

$$W_{ij}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z) = \langle E_i^*(\mathbf{r}_1, \varphi_1, z) E_j(\mathbf{r}_2, \varphi_2, z) \rangle \quad (i, j = x, y, z). \quad (3)$$

$\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 为观察平面上两点的位置坐标, $\langle \rangle$ 表示系综平均。令 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}, \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, 则焦平面上任一点的总光强可以表示为

$$I_t(\mathbf{r}, \varphi, z) = W(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z) = W_{xx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z) + W_{yy}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z) + W_{zz}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, z) = I_x(\mathbf{r}, \varphi, z) + I_y(\mathbf{r}, \varphi, z) + I_z(\mathbf{r}, \varphi, z). \quad (4)$$

相应地,焦平面上任一点 \mathbf{r} 处不同方向之间的相干度可以表示为^[17]

$$\mu_{ij}(\mathbf{r}) = W_{ij}(\mathbf{r}) / \sqrt{W_{ii}(\mathbf{r})W_{jj}(\mathbf{r})} \quad (i, j = x, y, z), \quad (5)$$

而偏振度可表示为^[18]

$$P(\mathbf{r}, \varphi, z) = \sqrt{\frac{3}{2} \left\{ \frac{I_x(\mathbf{r}, \varphi, z)^2 + I_y(\mathbf{r}, \varphi, z)^2 + I_z(\mathbf{r}, \varphi, z)^2}{[I_x(\mathbf{r}, \varphi, z) + I_y(\mathbf{r}, \varphi, z) + I_z(\mathbf{r}, \varphi, z)]^2} - \frac{1}{3} \right\}}. \quad (6)$$

3 结果与分析

图 2 比较了右旋和左旋圆偏振拉盖尔-高斯光束经过大数值孔径透镜聚焦后,在焦平面上的总光强及 x, y 和 z 分量光强分布。可见激光束经过大数值孔径聚焦以后,在焦平面上得到亚波长量级的光斑,并产生一个纵向分量。另外,对右旋圆偏振光的情况,焦面总光强为空心型分布,且 z 分量光强的空心明显比 x 与 y

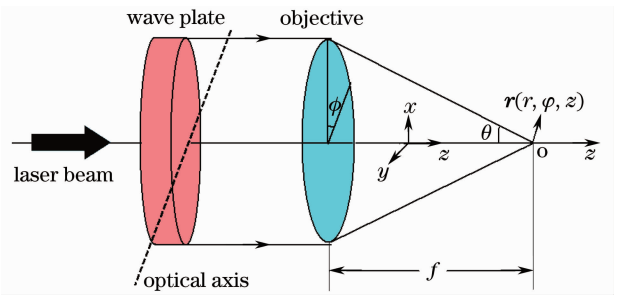


图 1 大数值孔径聚焦系统示意图

Fig. 1 Scheme of high numerical-aperture focusing

分量光强的空心大,而对左旋圆偏振光的情况,焦面总光强不再为空心型光强分布,而是近于平顶型的光强分布,其 z 分量光强也不为空心型分布。左旋圆偏振光经过大数值孔径聚焦后,正是由于纵向分量中心光强不为零,使总光强分布出现类似平顶型的光强分布,所以可通过调整偏振态的类型来实现光束整形。

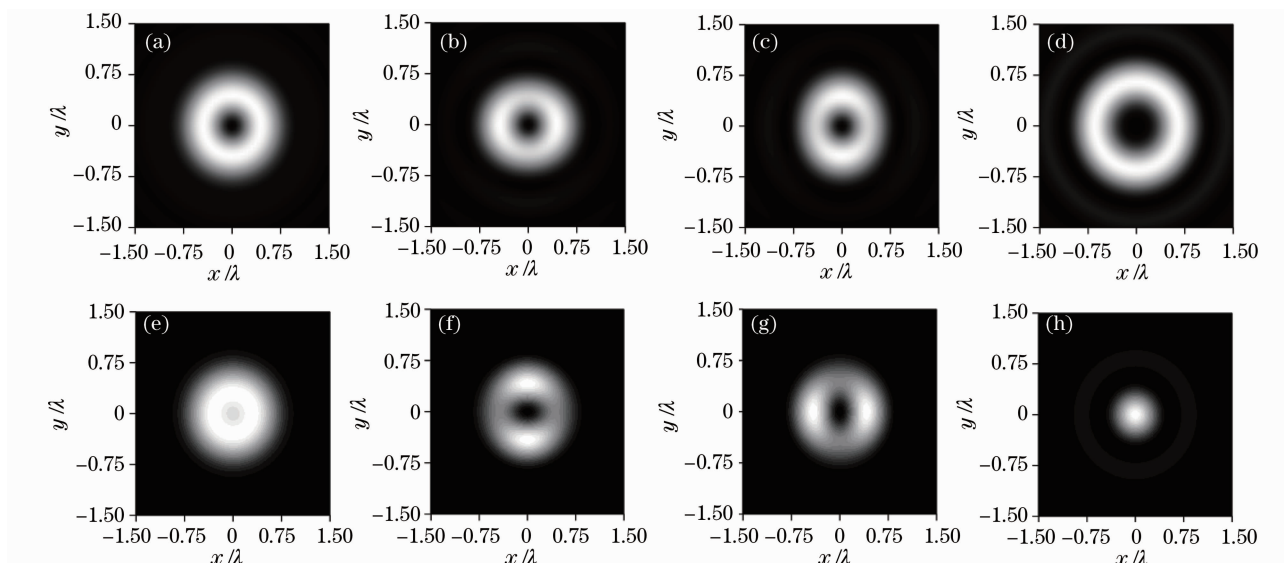


图2 焦平面上的光强分布。(a)~(d)右旋圆偏振;(e)~(h)左旋圆偏振。(a),(e) $I(r,\varphi,z)$, (b),(f) $I_x(r,\varphi,z)$, (c),(g) $I_y(r,\varphi,z)$, (d),(h) $I_z(r,\varphi,z)$,其他参数取为: $d_{NA}=0.9$, $f=1$ cm, $w_0=1$ cm, $\lambda=633$ nm, $m=1$

Fig.2 Intensity distributions on the focal plane. (a)~(d) right-hand circularly polarized; (e)~(h) left-hand circularly polarized. (a), (e) $I(r,\varphi,z)$, (b), (f) $I_x(r,\varphi,z)$, (c), (g) $I_y(r,\varphi,z)$, (d), (h) $I_z(r,\varphi,z)$, the other parameters are chosen as $d_{NA}=0.9$, $f=1$ cm, $w_0=1$ cm, $\lambda=633$ nm, $m=1$

为了探究左旋和右旋圆偏振光聚焦以后,光强分布情况不同的原因,研究了左旋和右旋圆偏振光聚焦以后纵向分量的相位分布情况如,图3所示。从图3(a)可见,一阶右旋圆偏振拉盖尔-高斯光束经过大数值孔径透镜聚焦后,其纵向分量的相位出现了两个螺旋形的相位分布,类似于二阶拉盖尔-高斯光束的相位分布情况,这表明右旋圆偏振光经过大数值孔径聚焦后,其纵向分量所带拓扑电荷数增大,所以图2(d)中纵向分量光强的空心增大,又由于光束所带轨道角动量可通过 $m\hbar$ 计算得到,所以光束的轨道角动量也增大。这是由于右旋圆偏振光带有一个单位自旋角动量,经过大数值孔径透镜聚焦后,这个自旋角动量会转化成轨道角动量,且该轨道角动量与光束本身所带轨道角动量同向,所以使得总轨道角动量增大了。而从图3(b)可见,左旋圆偏振光经过大数值孔径聚焦后,其纵向分量的相位不再为螺旋形相位分布,而是均匀分布,说明聚焦后光束所带拓扑电荷数减小了,所以图2(h)中纵向分量的光强分布不再为空心型分布。这同样可用自旋角动量到轨道角动量的转化来解释,但由左旋圆偏振光转化而来的轨道角动量与光束所带轨道角动量反向,使光束的总轨道角动量减小。

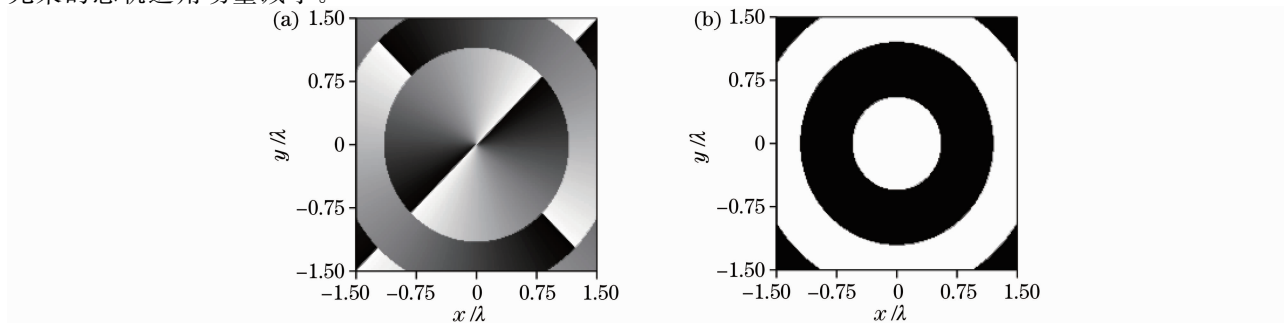


图3 焦平面上的相位分布。(a)右旋圆偏振,(b)左旋圆偏振,其他参数同图2

Fig.3 Phase distributions on the focal plane. (a) right-hand circularly polarized, (b) left-hand circularly polarized.

The other parameters are chosen the same as in Fig. 2

图 4 给出了不同偏振对总光强分布的调制。从图 4(a)可以看出,当入射光束为线偏振光时,总光强分布沿 x 轴方向被拉伸,并且在 y 轴方向存在两个峰值光强,光斑呈椭圆形,光强中心存在一个暗斑。当入射光束为右旋椭圆偏振光时,两个光强峰值逐渐向四周扩散,形成一个较为均匀的椭圆形环状光斑,中心光强的值逐渐减小如图 4(b)所示。而从图 4(c)可以看出,当入射光束的偏振度继续增大,逐渐过渡到右旋圆偏振光束时,在焦平面处形成一个圆环形光斑,中心光强为零,并且圆环上的光强均匀分布。此外,从文献[1]还可以看出,当选择入射光束为圆柱偏振光束时,则可以在焦平面附近得到局域空心光束。所以在深聚焦系统中,可通过调制入射光束的偏振实现聚焦光束的整形。

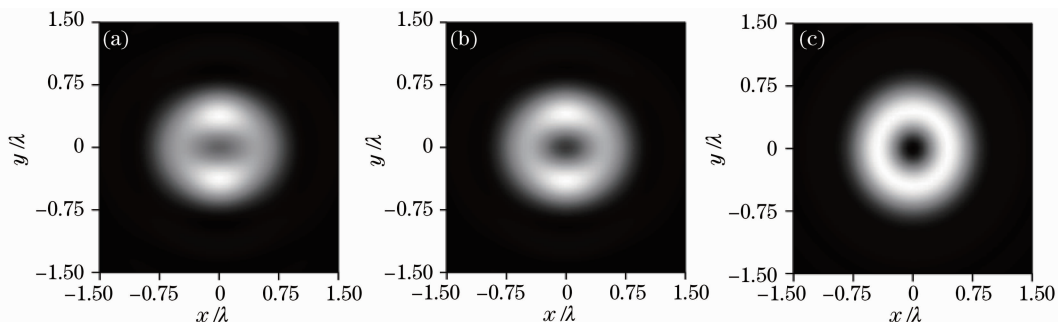


图 4 不同偏振对光强分布的调制。(a) x 向线偏振,(b)右旋椭圆偏振,(c)右旋圆偏振。其他参数同图 2

Fig. 4 Polarization modulation on intensity distribution. (a) x linearly polarized, (b) right-hand elliptically polarized, (c) right-hand circularly polarized. The other parameters are chosen the same as in Fig. 2

除了利用光束的偏振态对光束进行调制外,光束的相位也是调制光束的一个参数。如图 5(a),当入射光束拓扑电荷数为 $m=0$ 的拉盖尔-高斯光束时,则在聚焦平面可以得到高斯型光强分布的聚焦光斑,而当入射光束为拓扑电荷数 $m=1$ 的拉盖尔-高斯光束,即入射光束为具有螺旋形相位分布的涡旋光束时,则可以在聚焦平面得到空心型的光强分布。这说明,入射光束的相位也是调制光斑类型的一个参数,通过调制入射光束的相位,可以实现光束的整形。另外, L. Rao 等^[19]在大数值孔径聚焦系统前加一个 5 区域相位板对入射光束进行相位调制,在聚焦场附近得到有广泛实际应用意义的局域空心光束,进一步证明通过调制光束的相位可以改变聚焦光斑的形状,得到理想的光强分布形式。

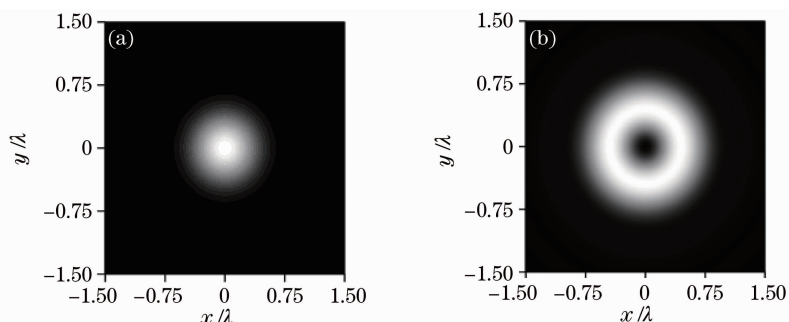


图 5 相位对光强分布的调制。(a)高斯光束,(b)涡旋光束。其他参数同图 2

Fig. 5 Phase modulation on intensity distribution. (a) Gaussian beam, (b) vortex beam.

The other parameters are chosen the same as in Fig. 2

当考虑入射拉盖尔-高斯光束为相干长度 $L_c=1$ cm 的部分相干光,分析激光束经过大数值孔径聚焦后在焦平面上任一点不同方向的相干度分布情况。从图 6 可以看出,相干度分布函数是关于 x 的振荡函数。对于右旋圆偏振光[图 6(a)],当 x 比较小时,即在传输轴附近时,焦平面上 $|\mu_{xy}|$, $|\mu_{xz}|$ 和 $|\mu_{yz}|$ 3 个相干度的值都为 1,即为完全相干,在一定 x 值处,3 个相干度的值都急剧下降,随着 x 的继续增大,相干度开始出现振荡。对于左旋圆偏振光[图 6(b)], $|\mu_{xy}|$, $|\mu_{xz}|$ 和 $|\mu_{yz}|$ 3 个相干度关于 x 的分布函数与右旋圆偏振光类似,但 $|\mu_{xy}|$ 的振荡相对右旋圆偏振光来得小,而 $|\mu_{xz}|$ 和 $|\mu_{yz}|$ 的振荡比右旋圆偏振光厉害,而且在 x 值还比较小时就开始振荡,即 $|\mu_{xz}|$ 和 $|\mu_{yz}|$ 维持完全相干的范围比右旋圆偏振光维持完全相干的范围小。

图 7 给出了右旋和左旋圆偏振光经大数值孔径透镜聚焦后在焦平面上的偏振度分布情况。从图可以看

出,对左旋和右旋圆偏振光,经过大数值孔径透镜聚焦后,在焦平面上的偏振度分布都为圆对称分布,并且,沿着任一径向方向,偏振度都是关于径向的振荡函数。对右旋圆偏振光[图 7(a)],偏振度从中心较小的一个偏振度向四周开始振荡,而对左旋圆偏振光[图 7(b)],中心偏振度最大,同样地,偏振度的值向四周开始振荡。

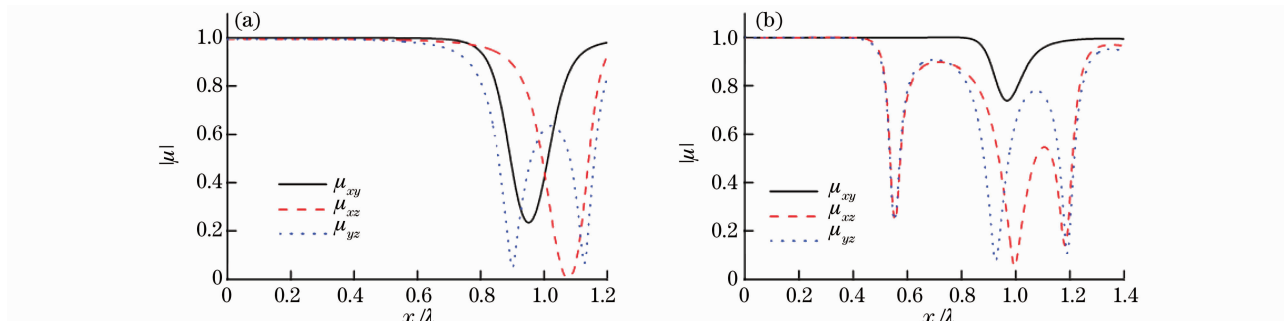


图 6 焦平面上的相干度分布。(a)右旋圆偏振,(b)左旋圆偏振, $L_c=1$ cm,其他参数同图 2

Fig. 6 Spectral degree of coherence distributions on the focal plane. (a) right-hand circularly polarized, (b) left-hand circularly polarized, $L_c=1$ cm, the other parameters are chosen the same as in Fig. 2

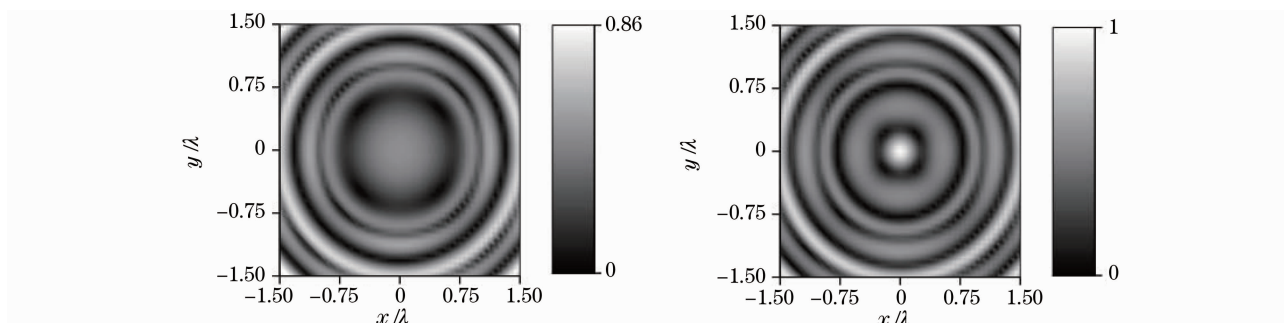


图 7 焦平面上的偏振度分布。(a)右旋圆偏振,(b)左旋圆偏振。其他参数同图 2

Fig. 7 Polarization distributions on the focal plane. (a) right-hand circularly polarized, (b) left-hand circularly polarized. The other parameters are chosen the same as in Fig. 2

4 结 论

基于德拜矢量衍射积分理论,研究了光束经过大数值孔径透镜聚焦的特性,包括光强、相位、相干度和偏振度特性。研究发现,激光束经过大数值孔径透镜聚焦后,光束本身的自旋角动量会转化成光束的轨道角动量,且光束的偏振特性和相位特性会影响聚焦光斑的光强分布,利用这个特性,可以将大数值孔径聚焦用于光束的整形。另外,激光束的相干性和偏振性随着大数值孔径聚焦的过程会发生变化,对不同的偏振特性,大数值孔径聚焦对光束的相干度和偏振度变化的影响也不一样。对大数值孔径聚焦特性的研究,有助于激光束在光刻、显微技术、光数据存储、粒子操控和充当光学扳手等方面应用。

参 考 文 献

- 1 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-高斯光束经高数值孔径透镜的聚焦[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 401~405
- 2 N. Bokor, N. Davidson. A three dimensional dark focal spot uniformly surrounded by light[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **279**(2): 229~234
- 3 T. Grosjean, D. Courjon. Smallest focal spots[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(2): 314~319
- 4 E. P. Walker, T. D. Milster. Beam shaping for optical data storage[J]. *SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 2001, **4443**: 73~92
- 5 K. S. Youngworth, T. G. Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(2): 77~87

- 6 L. E. Helseth. Focusing of atoms with strongly confined light potentials[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **212**(4-6): 343~352
- 7 E. Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems I. an integral representation of the image field[J]. *R. Soc. Ser. A*, 1959, **253**(1274): 349~357
- 8 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
- 9 J. W. M. Chon, X. Gan, M. Gu. Splitting of the focal spot of a high numerical-aperture objective in free space[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(9): 1576~1578
- 10 Chen Baosuan, Pu Jixiong. Focusing of elliptically polarized vortex beams through a high numerical-aperture objective[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 244~250
陈宝算, 蒲继雄. 椭圆偏振涡旋光束经高数值孔径透镜的聚焦[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 244~250
- 11 Q. Zhan. Properties of circularly polarized vortex beams[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 867~869
- 12 R. K. Sing, P. Senthikumar, 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
- 13 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
- 14 Z. Zhang, J. Pu, X. Wang. Tight focusing of radially and azimuthally polarized vortex beams through a uniaxial birefringent crystal[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(12): 1963~1967
- 15 M. Gu. *Advanced Optical Imaging Theory*[M]. Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1999
- 16 M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov. *Progress in Optics*[M]. E. Wolf, ed., Amsterdam, Elsevier, 2001, **42**: 219~276
- 17 K. Lindfors, T. Setälä, M. Kaivola *et al.*. Degree of polarization in tightly focused optical fields[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(3): 561~568
- 18 T. Setälä, A. Shevchenko, M. Kaivola *et al.*. Degree of polarization for optical near fields[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(1): 016615
- 19 L. Rao, J. Pu. Formation of small bottle light beams[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(12): 3352~3355