

文章编号: 0253-2239(2010)12-3597-07

径向偏振光聚焦光斑研究

阎 杰 鲁拥华* 王 沛 明 海

(中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽省光电子科学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要 一阶径向偏振光偏振态在光束截面呈中心对称分布。通常认为, 径向偏振光聚焦时, 焦点处光斑直径比空间偏振态均匀分布的光源, 如线偏振光的光斑直径小, 而且焦点光场具有很强的纵向分量。通过数值计算的方法对径向偏振光和线偏振光的聚焦光斑进行了研究, 发现只有满足折射光线与光轴的夹角大于 70° 时, 径向偏振光的聚焦光斑直径才会变得小于线偏振光聚焦光斑沿偏振方向的光斑直径, 小于 70° 则相反。而线偏振光聚焦光斑垂直于偏振方向的直径始终小于径向偏振光聚焦光斑直径。另外, 通过在光路中加入光阑的方法, 可以进一步减小径向偏振光聚焦光斑的直径, 同样的方法只能减小线偏振光聚焦光斑垂直于偏振方向的直径, 而沿光偏振方向的光斑直径则不能减小。

关键词 物理光学; 径向偏振光; 聚焦; 环形孔径光阑

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103012.3597

Study of Focal Spot of Radially Polarized Beam

Yan Jie Lu Yonghua Wang Pei Ming Hai

(Anhui Key Laboratory Optoelectronic Science and Technology, Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract The first order radially polarized beam is with cylindrical symmetry in polarization. It is commonly thought that radial polarization leads to the best light beam focusing in terms of spot size, and the focal spot has strong longitudinal field. Using numerical calculation method, it is presented that the focal spot of radially polarized beam which is smaller than the size along polarization direction of focal spot with linear polarized beam can be obtained, if the angle between refracted light and optical axis is larger than 70° . But the size perpendicular to polarization direction of focal spot with linear polarized beam is always smaller than that of radially polarized beam. In addition, it can lead to the smaller focal spot of radially polarized beam when an annular aperture diaphragm is inserted in optical path. But this method is not suitable for the situation of linearly polarized beam along polarization direction.

Key words physical optics; radially polarized beam; focal; annular aperture diaphragm

1 引 言

一阶径向偏振光在光束截面上的偏振态沿光轴具有柱对称分布, 理论与实验发现, 径向偏振光的聚焦光斑直径要小于空间偏振态均匀分布光源的聚焦光斑直径, 如线偏振光^[1~3], 而且在焦点处有很强的

纵向光场分量。近年来, 径向偏振光的研究引起了人们的广泛关注^[4~8]。焦点处光场具有很强的纵向分量正是光镊所需要的, 利用径向偏振光可以获得捕获力更强的光镊以及光学势阱^[9~11]。由于径向偏振光的中心对称性, 作为近场光学金属探针的

收稿日期: 2010-03-22; **收到修改稿日期:** 2010-04-28

基金项目: 国家 973 计划(2006cb302905), 国家自然科学基金重点项目(60736037)和国家自然科学基金(10704070) 资助课题。

作者简介: 阎 杰(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事近场光线与轴对称偏振光等方面的研究。

E-mail: yanj@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 明 海(1947—), 男, 教授, 主要从事近场光学等方面的研究。E-mail: minghai@ustc.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: yhlu@ustc.edu.cn

照明光源能够获得更强的局域电磁场强度,提高探针灵敏度^[12],或提高光纤表面等离子体传感器的灵敏度^[13]。同时,也能用径向偏振光通过偏振特性的检测分辨出纳米颗粒或单分子在三维空间中的方向^[14~16]。另外,激光共聚焦成像显微镜的分辨率受到聚焦光斑直径、光斑形状的影响^[17,18],而径向偏振光在聚焦时,有更小的聚焦光斑直径,用径向偏振光作为激光共聚焦成像显微镜的照明光源,能够提高成像的分辨率^[19~21]。本文对径向偏振光的聚焦

情况进行了研究,并与线偏振光作对比,得到径向偏振光作为更佳照明光源的适用范围,并进一步研究了光阑在减小径向偏振光聚焦光斑直径中的作用。

2 聚焦光场的计算方法

图 1 是线偏振光和径向偏振光在光束截面上的偏振态分布以及通过透镜聚焦时的示意图。焦平面附近的光场分布可以用 Richards&Wolf 矢量衍射理论计算给出^[22,23]。

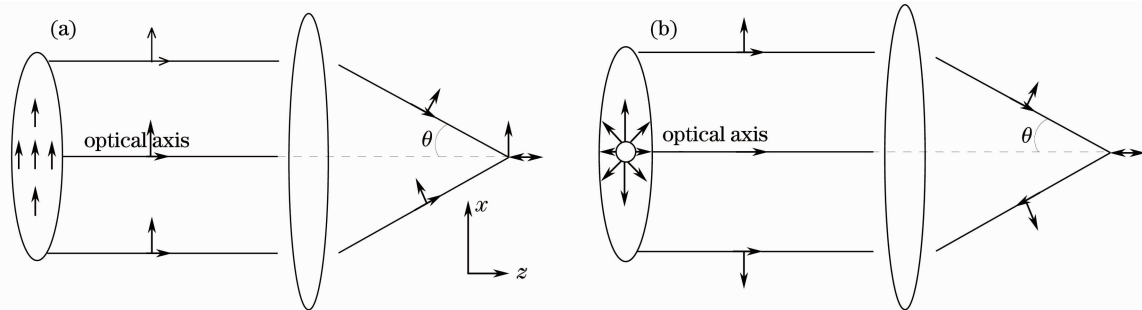


图 1 聚焦情况几何结构示意图。(a)线偏振光,(b)径向偏振光

Fig. 1 Geometry of focus. (a) linearly polarized beam, (b) radially polarized beam

线偏振光聚焦时,焦点处矢量光场各个分量的分布表示为

$$E_x = -\frac{iA}{\pi} \int_0^a \int_0^{2\pi} \cos^{1/2} \theta \sin \theta [\cos \theta + (1 - \cos \theta) \sin^2 \phi] \exp(ikr_p \cos \epsilon) d\theta d\phi,$$

$$E_y = \frac{iA}{\pi} \int_0^a \int_0^{2\pi} \cos^{1/2} \theta \sin \theta (1 - \cos \theta) \times \cos \phi \sin \phi \exp(ikr_p \cos \epsilon) d\theta d\phi,$$

$$E_z = \frac{iA}{\pi} \int_0^a \int_0^{2\pi} \cos^{1/2} \theta \sin^2 \theta \cos \phi \exp(ikr_p \cos \epsilon) d\theta d\phi,$$

(1)

式中 $r_p \cos \epsilon = xs_x + ys_y + zs_z$, (x, y, z) 是像平面的坐标, s_x, s_y, s_z 是沿坐标轴的单位矢量, A 是一个与入射光振幅有关的常量, θ 和 ϕ 分别是经过透镜折射后的光线与光轴的夹角和光线的方位角。

径向偏振光焦平面光场的各偏振分量采用极坐标分解的方法表示^[24]。考虑到径向偏振光聚焦时,像面电场的切向分量处处为 0,只需考虑光场的轴向分量和径向分量:

$$E_r^{(s)}(\rho_s, z_s) = A \int_0^a \cos^{1/2} \theta \sin(2\theta) l_0(\theta) \times J_1(k\rho_s \sin \theta) \exp(ikz_s \cos \theta) d\theta,$$

$$E_z^{(s)}(\rho_s, z_s) = 2iA \int_0^a \cos^{1/2} \theta \sin^2 \theta l_0(\theta) \times$$

$$J_0(k\rho_s \sin \theta) \exp(ikz_s \cos \theta) d\theta, \quad (2)$$

式中 (ρ_s, ϕ_s, z_s) 是像平面的坐标, $J_n(k\rho_s \sin \theta)$ 是第一类 n 阶贝塞尔函数, $l_0(\theta)$ 是入瞳的切趾函数,假设入射光是平面波,光瞳范围内 $l_0(\theta) = 1$,光瞳范围外 $l_0(\theta) = 0$ 。

3 径向偏振光聚焦光斑特性

3.1 径向偏振光聚焦焦点处光场分布

假设聚焦透镜采用油浸物镜,匹配液折射率 $n_{oil} = 1.5$,入射光为平面波,波长是 633 nm。从图 2(a)可见,径向偏振光在小数值孔径 ($NA = 0.3$) 聚焦情况下,焦点处的光场分布呈空心的圆环状。这时,对总光场分布起主要贡献的是径向光场分量 E_r ,光场的纵向分量 E_z 强度比较小,如图 2(d)所示。随着聚焦数值孔径的增大,光场纵向分量比重增加,当 $NA = 1$ 时,光场的纵向分量与径向分量强度相同,如图 2(b)和(e)所示。通过选择合适的透镜数值孔径调整焦点处光场纵向分量与径向分量比例,甚至可以获得平顶型强度分布的方形聚焦光斑^[25]。随着聚焦数值孔径的进一步增大,当 $NA = 1.45$ 时,焦点处光场的纵向分量对光场分布起主要作用,如图 2(c)和(f)所示。此时,焦点处聚焦光斑呈理想的圆斑,且光斑的半径小于瑞利半径的预期。随着聚焦光斑直径的减小,焦点处光强增大。

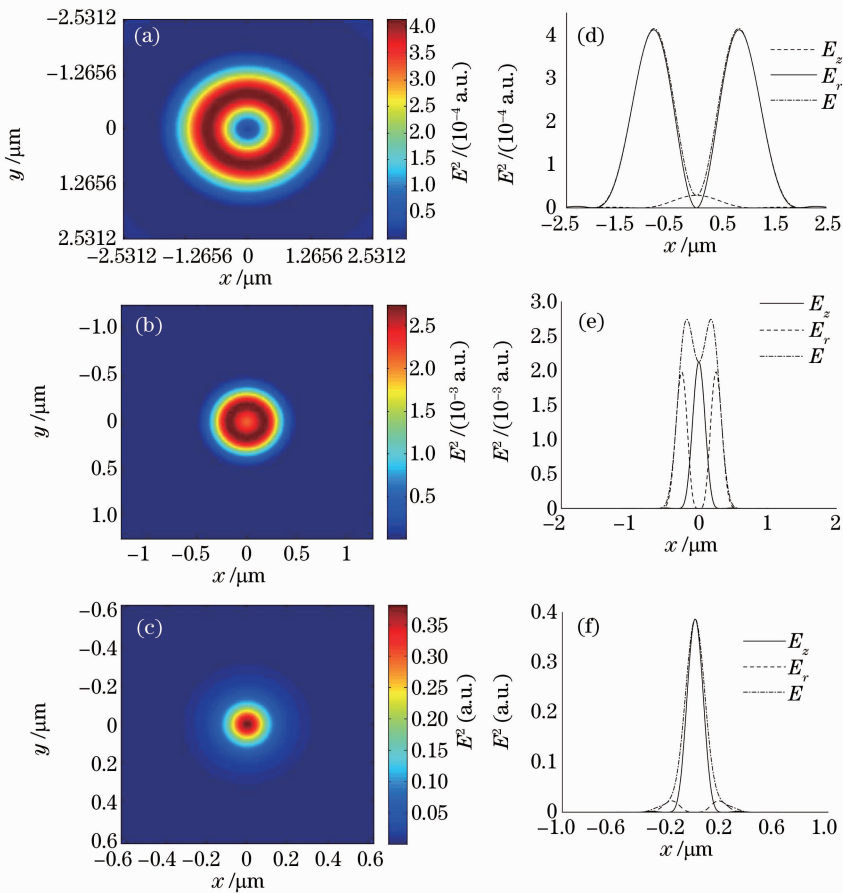


图 2 径向偏振光聚焦时,焦点处的光场分布(a),(b),(c)和光场各个分量的剖面图(d),(e),(f)[(a),(d)聚焦数值孔径 $NA=0.3$, (b),(e)聚焦数值孔径 $NA=1$, (c),(f)聚焦数值孔径 $NA=1.45$]

Fig.2 Situation of radially polarized beam focusing (a), (b), (c) light field distribution on focal plane, (d), (e), (f) light intensity distribution of various component. [(a), (d) Numerical aperture $NA=0.3$. (b), (e) numerical aperture $NA=1$, (c), (f) numerical aperture $NA=1.45$

图 3 所示为线偏振光(偏振态沿 x 方向)在聚焦数值孔径为 $NA=1.45$ 时的聚焦情况。高数值孔径聚焦时,由于光场纵向分量 E_z 的增加,聚焦光斑呈椭圆形分布,图 3(b)是聚焦光斑沿入射光偏振方向的剖面图。所以线偏振光聚焦光斑的直径应分两

个方向考虑,即椭圆形聚焦光斑的长轴方向[入射光的偏振方向 L(long)]和光斑的短轴方向[垂直于入射光偏振的方向 L(short)],而不是只考虑光斑长轴方向的大小^[26]。

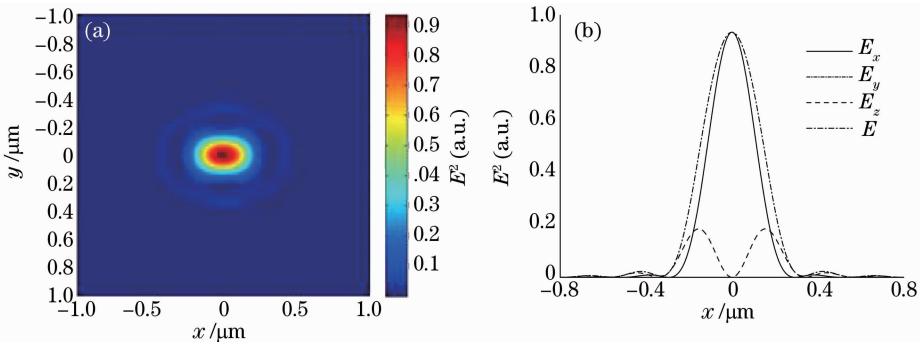


图 3 线偏振光聚焦数值孔径为 $NA=1.45$ 时,焦点处的光场分布(a)和光场各个分量的长轴剖面图(b)

Fig.3 Situation of linear polarized beam focusing with the numerical aperture $NA=1.45$, (a) light field distribution on focal plane, (b) light intensity distribution of the various component along the long axis

3.2 聚焦光斑直径随折射角度的变化

图 4(a)、(b) 分别是油浸物镜和普通物镜聚焦时, 聚焦光斑直径随聚焦数值孔径变化的关系。随着数值孔径的增大, 线偏振光和径向偏振光的焦点光斑直径都逐渐减小, 但是, 径向偏振光的聚焦光斑直径减小得更为迅速(小数值孔径聚焦时, 径向偏振

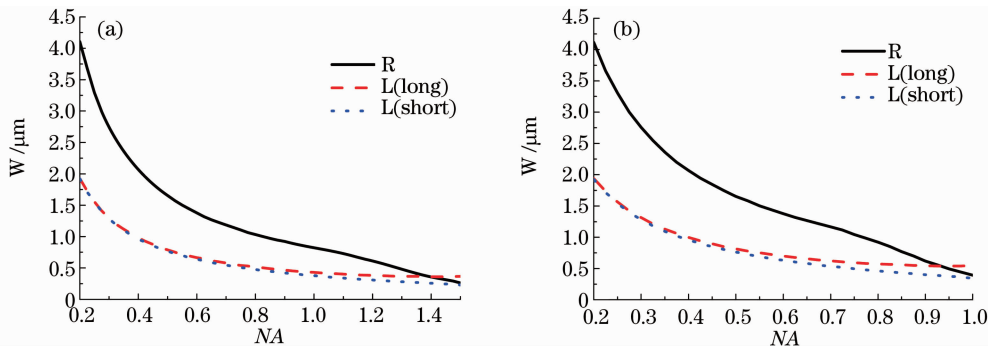


图 4 线偏振光与径向偏振光聚焦光斑直径随聚焦数值孔径的变化。(a) 油浸物镜聚焦, (b) 普通空气物镜聚焦

Fig. 4 Size of focal spot of radially polarized beam and linear polarized beam versus numerical aperture.

(a) oil immersion objective, (b) air immersion objective

另外, 从图 4 中可以发现不同类型物镜的聚焦光斑直径随数值孔径变化的趋势几乎一样(虽然数值孔径的绝对值不同), 由此推断径向偏振光与线偏振光的聚焦光斑相对大小的变化应与镜头折射后的光线与光轴的最大夹角 θ_{\max} 有关, 而不是数值孔径值的大小。因此, 用数值孔径的数学表达式 $NA = n \sin \theta$, 将聚焦光斑直径大小的变化与折射光线与光轴的最大夹角间的关系如图 5 所示。

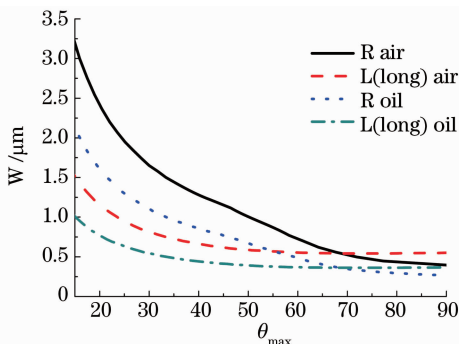


图 5 油浸物镜与普通空气物镜聚焦, 线偏振光偏振方向聚焦光斑直径与径向偏振光聚焦光斑直径大小随折射光与光轴最大夹角变化的关系

Fig. 5 When the beam is focused by immersion objective and ordinary objective, size of focal spot of the linearly polarized beam and radially polarized beam versus the greatest angle between the refracted light and optical axis

由图 5 可见, 不同类型的物镜(油浸物镜或者普通空气物镜)聚焦时, 聚焦光斑直径随光线最大折射

角变化的曲线几乎完全一样, 只是在油浸物镜聚焦时, 光斑直径整体变小, 这是由于高折射率匹配液对光波波长压缩的结果。不论是油浸物镜还是普通空气物镜聚焦时, 当折射后的光线与光轴的最大夹角超过 70° , 径向偏振光的聚焦光斑直径就变得小于线偏振光沿偏振方向的聚焦光斑直径; 而在小于 70° 的范围, 线偏振光沿偏振方向的聚焦光斑直径较小, 这种现象是由于焦点处光场的各个分量相对强度的变化引起。折射光与光轴的夹角越大, 光场纵向分量越强, 如图 1 所示。由于径向偏振光的偏振态分布是中心对称的, 经透镜折射后, 不同传播方向的光线纵向分量相位相同; 横向分量则相反。聚焦后在焦点处的纵向分量呈圆点分布, 光斑直径较小; 而横向分量呈空心圆环分布, 光斑直径较大。所以当聚焦数值孔径增大时, 径向偏振光的聚焦光斑直径能够迅速减小。线偏振光聚焦的情况正好相反, 光场不同空间位置的纵向分量相位相反, 纵向分量的聚焦光斑在沿入射光偏振方向呈两瓣对称分布, 使得大数值孔径聚焦时整体光场呈椭圆形。

4 利用光阑进一步减小径向偏振光聚焦光斑直径

由前面分析可知, 径向偏振光聚焦时, 随折射光线与光轴间最大夹角的增大, 聚焦光斑的直径迅速减小。这说明折射光线与光轴夹角较大的部分光线在焦点处能得到较小直径的聚焦光斑。如果将入射

光中对应折射角度较小、处于光束中心部分的光线挡掉，只留下折射角度较大的边缘部分光线，能得到更小的聚焦光斑^[26~28]。为实现这个目的，在入射光光路中加一个环形光阑，环形光阑结构和位置如图 6 所示。

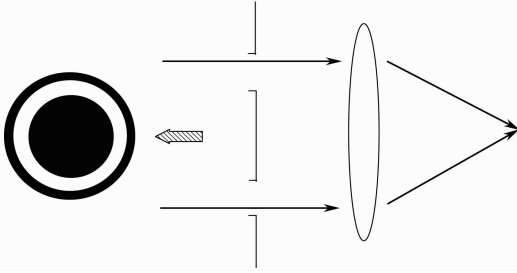


图 6 聚焦光路中加入环形光阑和环形光阑结构的示意图
Fig. 6 Geometry of annular aperture diaphragm and the path of ray

光路中加入环形光阑后，聚焦光斑直径随聚焦数值孔径的变化如图 7 所示。环形光阑的大小用对应的数值孔径来表示，图中不同曲线对应不同大小的环形光阑。

图 7(a)、(b)是线偏振光在加入环形光阑后的

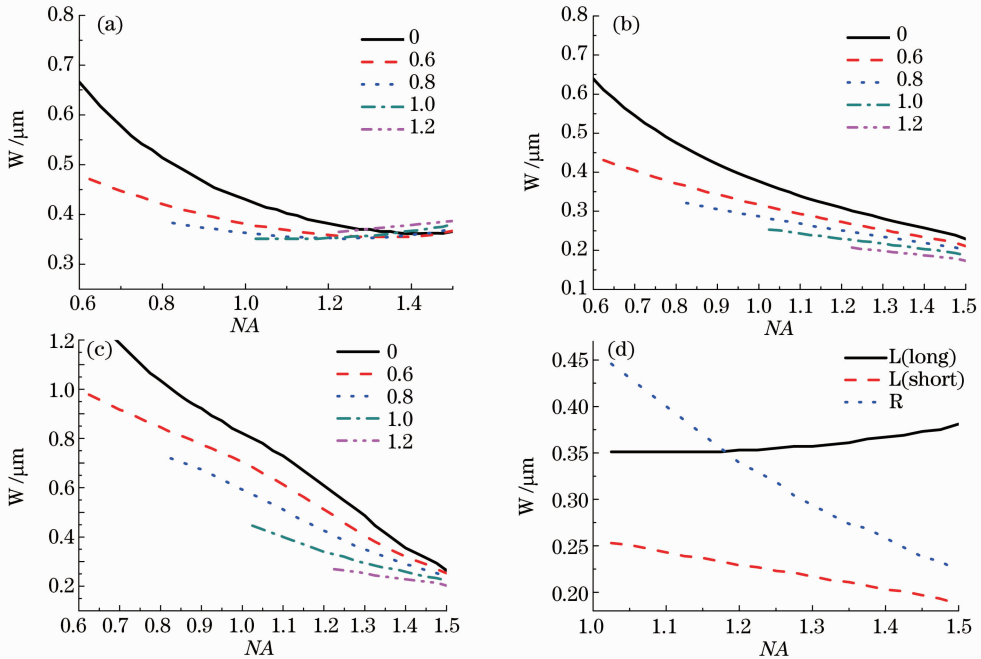


图 7 加不同大小环形光阑时不同偏振光的聚焦光斑大小随聚焦数值孔径的变化。(a)线偏振光沿偏振方向，(b)线偏振光垂直于偏振方向，(c)径向偏振光。(d)加入大小为 $NA=1$ 的光阑后，径向偏振光(R)，线偏振光沿偏振方向[L(long)]，线偏振光垂直于偏振方向[L(short)]的光斑直径比较

Fig. 7 Size of focal spot with different annular aperture diaphragm versus NA. (a) Linearly polarized beam along polarization direction, (b) linearly polarized beam perpendicular to polarization direction, (c) radially polarized beam, (d) focal spot size of radially polarized beam (R), linearly polarized beam along polarization direction [L(long)], and linearly polarized beam perpendicular to polarization direction [L(short)] after an annular aperture diaphragm with $NA=1$ is inserted

聚焦情况。如图 7(a)所示，线偏振光聚焦光斑沿偏振方向的直径在大数值孔径聚焦时，随加入光阑而增大。而聚焦光斑垂直于偏振方向的直径随光阑的增大而减小，如图 7(b)所示。这是由于加入光阑后，焦点处光场的纵向分量比重增加，沿偏振方向的光斑直径随之增大，而垂直于偏振方向的光斑分布没有纵向分量的贡献，所以滤掉低频量后聚焦光斑直径减小。

图 7(c)所示，随着光路中加入环形光阑直径的增大，径向偏振光聚焦光斑直径减小。在聚焦数值孔径为 $NA=1.4$ ，加入环形光阑的大小为 $NA=1$ 时，聚焦光斑的直径只有加光阑前的 0.64 倍。下面分析加光阑后，径向偏振光聚焦处的光场分布。图 8 中径向偏振光聚焦光斑分布的结果与图 2(f)比较可知，加入光阑后，光场的纵向分量比重增加，横向分量减小，于是得到的焦点处聚焦光斑的直径变小。图 7(d)所示，光路中加入光阑后，径向偏振光聚焦光斑直径变小，与线偏振光沿偏振方向聚焦光斑相比，相对尺寸更小，但是，仍然大于线偏振光垂直于偏振方向光斑直径。

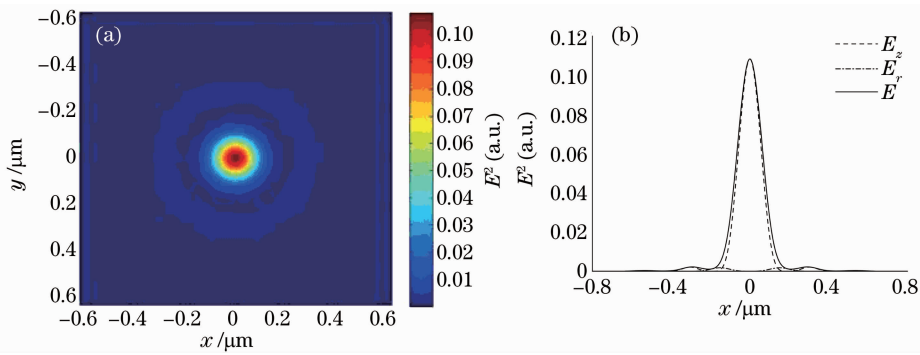


图 8 聚焦数值孔径为 $NA=1.45$, 光路中加入大小为 $NA=1$ 的环形光阑时, (a) 焦点的光场分布和 (b) 总光场与各个分量的剖面图

Fig. 8 Situation of $NA=1.45$ and the annular aperture diaphragm of $NA=1$ is inserted in optics. (a) light field distribution on focal plane, (b) intensity distribution of total light field and the various component

5 结 论

研究了径向偏振光的聚焦特性, 得出径向偏振光在折射光与光轴的最大夹角超过 70° 时, 聚焦光斑直径小于线偏振光沿偏振方向的聚焦光斑直径, 但仍大于线偏振光垂直于偏振的方向的聚焦光斑直径。通过在光路中加入环形光阑的方法, 能进一步减小径向偏振光的聚焦光斑直径, 同样的方法对线偏振光不适用。由此可见, 利用径向偏振光替代线偏振光作为激光共聚焦扫描显微镜的照明光源, 能够在一定范围内提高成像系统一维方向的分辨率。

参 考 文 献

- 1 S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler *et al.*. Focusing light to a tighter spot[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **179**(1~6): 1~7
- 2 B. Hao, J. Leger. Experimental measurement of longitudinal component in the vicinity of focused radially polarized beam[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3550~3556
- 3 R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(23): 233901
- 4 Q. Zhan. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2009, **1**(1): 1~57
- 5 T. Grosjean, D. Courjon, M. Spajer. An all-fiber device for generating radially and other polarized light beams [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(1~2): 1~5
- 6 Lin Huichuan, Liu Hui, Pu Jixiong. Extra cavity coherent superposition for generation of radially polarized beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 251~256
林惠川, 刘 辉, 蒲继雄. 腔外相干叠加产生径向偏振光[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 251~256
- 7 Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Generation and focusing property with high-numerical aperture lens of vectorial polarized beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 129~133
张艳丽, 李小燕, 朱健强. 矢量偏振光束的产生及其高数值孔径聚焦性质[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 129~133
- 8 Huang Jintang, Wei Weilei, Zhang Yuan *et al.*. Generation of cylindrical vector beams by use of C-Cut YVO₄ crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 557~561
黄金堂, 韦玮雷, 张 源 等. 利用 C 切钒酸钇晶体产生轴对称偏

振光[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 557~561

- 9 Q. W. Zhan. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3377~3382
- 10 Y. Q. Zhao, Q. W. Zhan, Y. L. Zhang *et al.*. Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(8): 848~850
- 11 Z. H. Zhou, Q. F. Tan, G. F. Jin. Focusing of high polarization order axially-symmetric polarized beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 938~940
- 12 W. Chen, Q. Zhan. Optical plasmonic focusing with radial polarization[C]. *SPIE*, 2007. **6450**: 64500D
- 13 J. Yan, Y. H. Lu, P. Wang *et al.*. Improving the sensitivity of fiber-optic SPR sensor via radially polarized beam excitation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 909~911
- 14 K. Sendur, W. Challener, O. Mryasov. Interaction of spherical nanoparticles with a highly focused beam of light [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 2874~2886
- 15 L. Novotny, M. R. Beversluis, K. S. Youngworth *et al.*. Longitudinal field modes probed by single molecules[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(23): 5251~5254
- 16 A. V. Failla, H. Qian, H. Qian *et al.*. Orientational imaging of subwavelength au particles with higher order laser modes[J]. *Nano Lett.*, 2006, **6**(7): 1374~1378
- 17 R. Arimoto, C. Saloma, T. Tanaka *et al.*. Imaging properties of axicon in a scanning optical-system [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(31): 6653~6657
- 18 I. Leiserson, S. G. Lipson, V. Sarafis. Superresolution in far-field imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 209~211
- 19 K. S. Youngworth, T. G. Brown. Inhomogeneous polarization in scanning optical microscopy[C]. *SPIE*, 2000, **3919**: 75~85
- 20 Q. W. Zhan, J. R. Leger. Microellipsometer with radial symmetry[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4630~4637
- 21 M. A. Lieb, A. J. Meixner. A high numerical aperture parabolic mirror as imaging device for confocal microscopy[J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(7): 458~474
- 22 E. Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems. I. An integral representation of the image field[C]. *Proc. Royal Society of London*, 1959, **235**(1274): 349~357
- 23 B. Richard, E. Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system [C]. *Proc. Royal Society of London*, 1959, **253**(1274): 358~379
- 24 K. S. Youngworth, T. G. Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(2): 77~87

- 25 Q. W. Zhan, J. R. Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 324~331
- 26 G. M. Lerman, U. Levy. Effect of radial polarization and apodization on spot size under tight focusing conditions[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 4567~4581
- 27 C. J. R. Sheppard, A. Choudhury. Annular pupils, radial polarization, and superresolution [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(22): 4322~4327
- 28 B. H. Jia, X. S. Gan, M. Gu. Direct measurement of a radially polarized focused evanescent field facilitated by a single LCD[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6821~6827