

椭圆环光阑对径向偏振光聚焦研究的影响

蔡勋明¹ 赵晶云² 范梦慧³ 罗姣莲¹

¹贵州民族大学贵州省普通高等学校绿色节能材料特色重点实验室, 贵州 贵阳 550025

²浙江理工大学理学院, 浙江 杭州 310018

³贵州民族大学理学院, 贵州 贵阳 550025

摘要 柱坐标下的径向偏振矢量光束在被高数值孔径透镜聚焦时,在紧聚焦条件下相比线偏振和圆偏振光束通过透镜后能获得较小的聚焦斑。在聚焦透镜前加上椭圆环光阑后能强化在聚焦区域内的光场轴向分量,能在单一方向上进一步缩小聚焦斑的尺寸。研究了径向偏振矢量光束经过椭圆环形光阑后的聚焦特性,在聚焦区域径向偏振分量形成两个聚焦瓣,而轴向分量形成椭圆形的聚焦斑,并做了相应的物理解释。当增加椭圆环形光阑内环半径时,径向偏振分量的聚焦瓣和轴向分量的聚焦斑单一方向聚焦尺寸均可小于光波长的三分之一,当进一步提高椭圆环形光阑内环半径时,由于通光量减少和衍射效应,不能得到更小的聚焦尺寸。研究结果对于提高激光扫描显微镜的单向分辨率具有重要意义。

关键词 物理光学; 偏振; 矢量光束; 光阑

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0326002

Effect of the Elliptic Annular Aperture on the Focusing of Radially Polarized Beam

Cai Xunming¹ Zhao Jingyun² Fan Menghui³ Luo Jiaolian¹

¹Special and Key Laboratory of Guizhou Provincial Higher Education for Green Energy-Saving Materials, College of Information Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China

²School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

³School of Science, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract When the radial polarization vector beam is focused by a high numerical aperture lens, compared with the linear polarization light and the circular polarized light cases, a smaller focused spot can be obtained by the radial polarization vector beam. An elliptic annular aperture can enhance the axial component of light in the focus area. So the focus spot size can be further reduced in one direction. The focusing characteristics of the radial polarization vector beam passing through an elliptic annular aperture are studied. Two focusing lobes are obtained by the radial polarization component of light. An elliptical focusing spot is obtained by the axial component of light and the corresponding physical explanation is given. When the inner radius increases, the focus size of the focusing spot and focusing lobes can be less than one third of the wavelength in one direction. When the inner ring radius of the elliptic annular aperture is further improved, a smaller focus size of light can't be obtained as the decrease of light and the diffraction effect. The results of the study are important for improving one direction resolution of laser scanning microscope.

Key words physical optics; polarization; vector beam; aperture

OCIS codes 260.2110; 260.1960; 140.3295

收稿日期: 2015-10-22; 收到修改稿日期: 2015-11-2

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合J字LKM[2013]19, 黔科合J字[2014]2090)

作者简介: 蔡勋明(1978—),男,博士,副教授,主要从事量子光学与物理光学方面的研究。E-mail: caixm1997@aliyun.com

1 引 言

具有轴对称的径向和角向偏振光是典型的矢量光束。由于这类偏振光有完美的轴对称性,与线偏振光和圆偏振光相比有许多不一样的特点,比如光强分布具有中空环型结构,在远场能形成远距离近似无衍射中空光束。径向和角向偏振光在高数值孔径透镜聚焦下能形成极小的聚焦光斑,可用于提高显微镜的分辨率等方面^[1-7]。径向偏振矢量光束被聚焦时,在光路上加上光阑后能显著加强聚焦区域的纵向成份,从而能获得更尖锐的聚焦构型,缩小聚焦斑的尺寸,同时也能在轴向提高聚焦深度。使用环形光阑时可以进一步强化纵向电场分量,缩小聚焦斑尺寸。已有的理论和实验研究表明^[8],适当提高圆环光阑的内外半径比,能获得极小的聚焦尺寸,但光阑的内外半径比太高时,通光量会减少,衍射效应也会加强,从而无法使光斑聚焦尺寸继续缩小。

对于激光扫描显微镜,获得极小尺寸的聚焦光斑是非常重要的,因为聚焦光斑尺寸的缩小将会直接提高分辨率。目前的研究集中在改变光学器件和改变光束本身等几个方面,比如在光路中加入光阑^[8-11],从而在聚焦区域得到强的轴向电场或磁场分布,提高分辨率。已有用高阶径向极化的拉盖尔-高斯光束来聚焦的理论研究^[12],研究结果表明相比圆偏振的高斯光束,高阶径向极化的拉盖尔-高斯光束能获得更小的聚焦斑。也有在光路中插入 π 相位板的研究,显著缩小了光斑直径^[13]。另外,也有矢量光束聚焦场特性与聚焦透镜数值孔径之间关系以及圆偏振涡旋光束强聚焦的平顶光束构成的研究报告^[14-15]。

在使用圆环形光阑难以进一步缩小聚焦尺寸的情况下,本文研究了光路中加入椭圆环形光阑后径向偏振矢量光束的聚焦特性,目的是在某一单方向上继续缩小聚焦尺寸。研究结果表明在聚焦区域径向偏振分量形成两个聚焦瓣,而轴向分量形成椭圆形的聚焦斑。当增加椭圆环形光阑内环半径时,径向偏振分量的聚焦瓣和轴向分量的聚焦斑单一方向聚焦尺寸均可小于光波长的三分之一,从而可以在某一方向显著缩小聚焦尺寸,提高分辨率。适当增加椭圆环光阑内外长短轴,透镜焦距等参数后,发现可在单一方向上进一步缩小椭圆聚焦斑聚焦尺寸的同时大幅增大光强。该方案具有简单可行的特点。

2 理论模型

一束平行入射的光束沿 z 轴方向传播,设与传播方向垂直的 $x-y$ 面上光强分布为高斯分布,故光振幅分布表达式可写为

$$E(x,y,z) = \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{r_0^2}\right) \exp[i(kz - \omega t)] [\cos(\phi)e_x + \sin(\phi)e_y], \quad (1)$$

其中 ϕ 为 $x-y$ 面内光偏振方向与 x 轴夹角,光束被光阑和高数值孔径透镜聚焦, $\cos(\phi)e_x + \sin(\phi)e_y$ 为偏振方向,如图 1 所示。

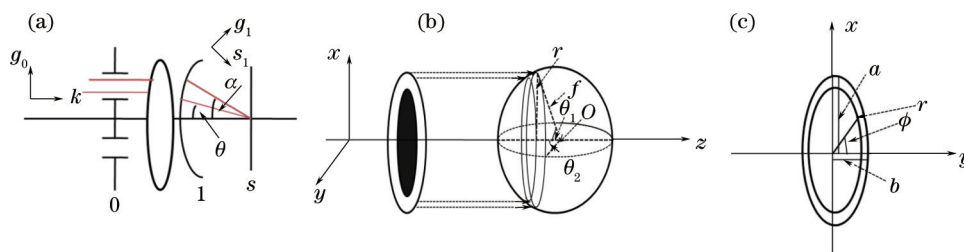


图 1 光路示意图。(a)系统纵向截面图;(b)聚焦立体图;(c)光束截面图

Fig.1 Optical path diagram. (a) Longitudinal section diagram of system; (b) focus space diagram of system; (c) transverse section diagram of light beam

假设光束初始为径向极化的,故初始电极化方向为 $g_0 = \cos(\phi)e_x + \sin(\phi)e_y$ 。图 1 中 θ 为聚焦光线与 z 轴夹角, o 为聚焦点, f 为焦距, r 为光束横截面在极坐标下的极径, ϕ 为极角。过光阑后光束横截面为椭圆环, a 为椭圆环的长轴, b 为椭圆环的短轴。极坐标下 $x = r \cos \phi$, $y = r \sin \phi$ 。考虑环形光束在球面上的投影面积元为 $ds = f^2 \sin(\theta)d\theta d\phi$, 为计算环形光束在球面上的投影面积,可得

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1, \quad (2)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = m^2 (0 \leq m \leq 1), \quad (3)$$

由(3)式可得

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = m^2 \rightarrow \frac{r^2 \cos^2 \phi}{a^2} + \frac{r^2 \sin^2 \phi}{b^2} = m^2 \rightarrow r = \frac{mab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}}, \quad (4)$$

由 $\sin \theta = r/f$, 可得

$$d\theta = \frac{ab}{\cos(\theta)f\sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} dm, \quad (5)$$

面积元 ds 所对应的立体角 $d\Omega$ 为

$$d\Omega = \frac{ds}{f^2} = \frac{abf \sin \theta}{\cos \theta \sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} dm d\phi, \quad (6)$$

椭圆光束的束腰半径为

$$r_0 = \frac{m_0 ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}}, (0 < m_0 < 1), \quad (7)$$

其中 m_0 为实参数。则光振幅表达式可写为

$$E(x, y, z) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right) \exp[i(kz - \omega t)] = \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \exp[i(kz - \omega t)] = \exp\left(-\frac{m^2}{m_0^2}\right) \exp[i(kz - \omega t)], \quad (8)$$

则根据 K S Youngworth 等^[16]提出的方法, 设聚焦区域柱坐标为 (ρ, φ, z_s) , 可得聚焦区域电场的表达式为

$$e_\phi^{(s)} = -\frac{ikf}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{m_1}^1 \cos^{3/2}(\theta) \exp(-m^2/m_0^2) \sin(\phi - \phi_s) \exp\{ik[z_s \cos(\theta) + \rho_s \sin(\theta) \cos(\phi - \phi_s)]\} \\ \frac{ab \sin \theta}{f \cos \theta \sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} dm d\phi, \quad (9)$$

$$e_\rho^{(s)} = -\frac{ikf}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{m_1}^1 \cos^{3/2}(\theta) \exp(-m^2/m_0^2) \cos(\phi - \phi_s) \exp\{ik[z_s \cos(\theta) + \rho_s \sin(\theta) \cos(\phi - \phi_s)]\} \\ \frac{ab \sin \theta}{f \cos \theta \sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} dm d\phi, \quad (10)$$

$$e_z^{(s)} = -\frac{ikf}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{m_1}^1 \cos^{1/2}(\theta) \exp(-m^2/m_0^2) \exp\{ik[z_s \cos(\theta) + \rho_s \sin(\theta) \cos(\phi - \phi_s)]\} \frac{ab \sin^2 \theta}{f \cos(\theta) \sqrt{a^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi}} dm d\phi, \quad (11)$$

表达式中 $e_\phi^{(s)}$, $e_\rho^{(s)}$, $e_z^{(s)}$ 为电场的方位角分量, 径向分量和 z 向分量。 m_1 为椭圆内环与外环半径比参数, f 为焦距。由于电场初始为径向偏振的, 故主要考虑(9)式和(10)式。电场的径向分量和 z 向分量对应的聚焦光强分别为

$$p_\rho^{(s)} \propto e_\rho^{(s)} \cdot e_\rho^{(s)*}, \quad p_z^{(s)} \propto e_z^{(s)} \cdot e_z^{(s)*}, \quad (12)$$

其中 $e_\rho^{(s)*}$ 和 $e_z^{(s)*}$ 分别为 $e_\rho^{(s)}$ 和 $e_z^{(s)}$ 的共轭。

3 结果讨论

对(9)式和(10)式, 采用数值的方法来计算, 光束束腰半径参数为 $m_0 = 0.82$ 。当 m_1 为 0 时, 对应椭圆孔光阑; 当 m_1 不为 0 时, 对应椭圆环光阑。光波长为 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。图 2(a)、(b)椭圆环孔光阑的长轴 $a = 2.2 \text{ mm}$, 短轴 $b = 0.8 \text{ mm}$ 。透镜聚焦半径为 $f = 2.38 \text{ mm}$, m_1 取值为 0.98。图 2(c)圆环光阑 $a = 2.2 \text{ mm}$, $b = 2.2 \text{ mm}$ 。图 2(d)椭圆环光阑 $a = 2.2 \text{ mm}$, $b = 1.6 \text{ mm}$ 。

图 2 中 x - y 坐标单位为 m , 由于焦点电场强度大小与初始光束幅值相关, 故聚焦区光强单位只取相对值。图 2 显示经过椭圆环形光阑后, 聚焦光斑也为椭圆形。对于聚焦区域的径向电场分量, 图 2(a)显示聚焦区域形成了两个聚焦瓣, 在 x 方向上聚焦尺寸(光强的半峰全宽, 即光强下降为最大值 1/2 时对应的宽度)得

到大幅缩小,为 180 nm ,约为光波长的三分之一。对于轴向电场分量,同样从图 2(b)看出聚焦斑也为椭圆。聚焦斑在 x 方向上的聚焦尺寸也约为波长的三分之一。比较图 2(a)与图 2(b)可知,加上椭圆环形光阑后电场轴向分量大大加强,光强约为径向分量光强的三倍。图 2(c)为圆环光阑,聚焦尺寸为 208 nm ,与文献[8]的结果基本一致。图 3(d)中 x 方向上聚焦尺寸为 194 nm 。从图 2(b)、(c)、(d)可知,椭圆环光阑短轴改变,即光阑从圆环向椭圆环变化中单一方向聚焦尺寸缩小了 28 nm ,即在单一方向的聚焦尺寸有较大减小。聚焦光斑形成的物理机制需要结合光束的偏振特性以及椭圆环形光阑来解释。光束在聚焦前是径向偏振的,因此经过环形光阑时内环半径越大,则经透镜聚焦后光偏振矢量向光轴方向偏折越大,故轴向分量越大,在焦点处形成了更锐利的聚焦斑。对于轴向分量,如果从焦点处向椭圆环形光阑划分半波带,由于半波带面积不相等,则相邻半波带所发出的次波在焦点处并不能互相抵消,众多半波带叠加后形成亮点。聚焦斑的 y 方向为长轴, x 方向为短轴,而椭圆环光阑 x 方向为长轴, y 方向为短轴,总体上从 x 方向讲,光阑波元到达聚焦点时比 y 方向经历距离更长,由波元干涉叠加知识可知聚焦斑 x 轴会短于 y 轴,呈椭圆形。对于径向分量,光阑各波元在聚焦斑中心叠加相消形成暗点。 x 方向点能划分的波带数更多,因此叠加后 x 方向极大值高于 y 方向极大值,形成两个聚焦瓣。

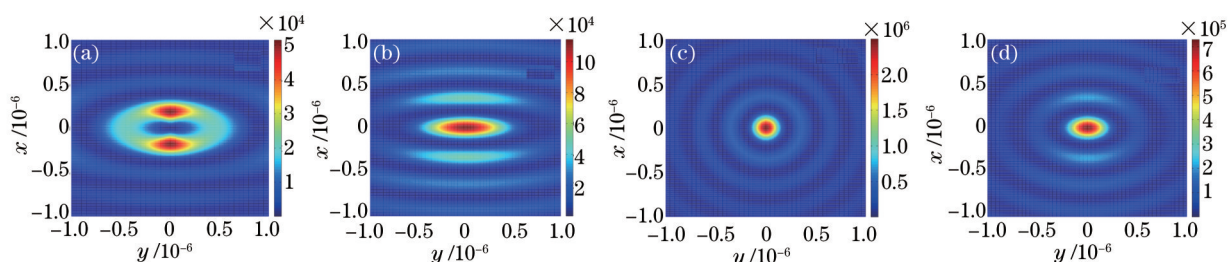


图 2 光场聚焦光强分布图。(a) 径向, $a=2.2$ mm, $b=0.8$ mm; (b) 轴向, $a=2.2$ mm, $b=0.8$ mm; (c) 轴向, $a=2.2$ mm, $b=2.2$ mm; (d) 轴向, $a=2.2$ mm, $b=1.6$ mm

Fig.2 Focus intensity distribution diagram of light field. (a) Radial, $a=2.2$ mm, $b=0.8$ mm; (b) axial, $a=2.2$ mm, $b=0.8$ mm; (c) axial, $a=2.2$ mm, $b=2.2$ mm. (d) axial, $a=2.2$ mm, $b=1.6$ mm

图 3(a)、(b) 椭圆环孔光阑的长轴 $a=4.4$ mm ,短轴 $b=1.5$ mm ,透镜聚焦半径为 $f=4.6$ mm , m_1 取值为 0.98。图 2(c)圆环光阑 $a=4.4$ mm , $b=4.4$ mm 。图 2(d)椭圆环光阑 $a=4.4$ mm , $b=3.4$ mm 。

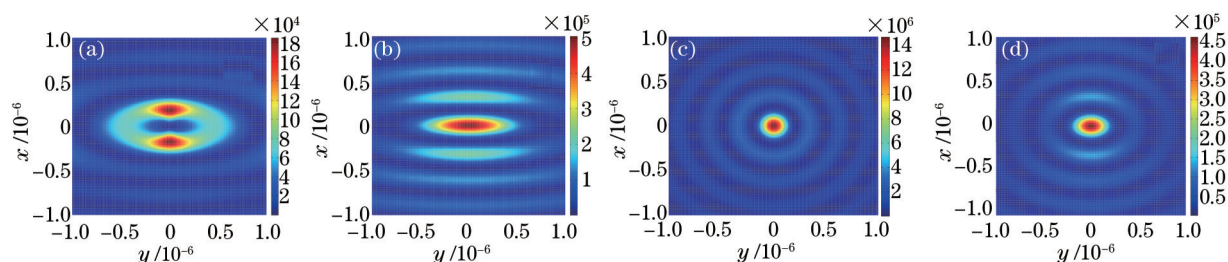


图 3 光场聚焦光强分布图。(a) 径向, $a=4.4$ mm, $b=1.5$ mm; (b) 轴向, $a=4.4$ mm, $b=1.5$ mm; (c) 轴向, $a=4.4$ mm, $b=4.4$ mm; (d) 轴向, $a=4.4$ mm, $b=3.4$ mm

Fig.3 Focus intensity distribution diagram of light field. (a) Radial, $a=4.4$ mm, $b=1.5$ mm; (b) axial, $a=4.4$ mm, $b=1.5$ mm; (c) axial, $a=4.4$ mm, $b=4.4$ mm; (d) axial, $a=4.4$ mm, $b=3.4$ mm

图 3 中 x - y 坐标单位为米。经过椭圆环形光阑后,对于聚焦区域的径向电场分量,聚焦区域也形成了两个聚焦瓣,图 3(a)显示 x 方向上聚焦瓣尺寸约为 172 nm ,即小于光波长的三分之一。对于轴向电场分量,同样从图 3(b)看出聚焦斑为椭圆, x 方向上尺寸为 172 nm 。图 3(c)为圆环光阑,聚焦尺寸为 202 nm 。图 3(d) x 方向上聚焦尺寸为 186 nm 。图 3(b)、(c)、(d)比较可知,保持椭圆环长轴不变,短轴改变,聚焦斑 x 方向聚焦尺寸缩小了 30 nm 。比较图 2(b)和图 3(b)可知,椭圆环半径加大及透镜焦距改变后,通光量得到大幅增加,聚焦斑的光强也增加了约 3.5 倍,聚焦斑单一方向尺寸可进一步缩小。因此,改变椭圆环半径和透镜焦距提供了一种在缩小聚焦斑尺寸的同时提高聚焦斑光强的方法。

以下考虑聚焦斑尺寸随椭圆内环与外环半径比参数 m_1 的变化。图 4(a)中椭圆环孔光阑的长轴

$a = 2.2$ mm, 短轴 $b = 0.8$ mm。透镜聚焦半径为 $f = 2.38$ mm。图 4(b) 中椭圆环孔光阑的长轴 $a = 4.4$ mm, 短轴 $b = 1.5$ mm, 透镜聚焦半径为 $f = 4.6$ mm。光波长 $\lambda = 532$ nm。

图 4 中 y 坐标为归一化的聚焦光强。椭圆内环与外环半径比参数 m_1 从 0.6 增加到 0.995。由图 4 可以看出, 当参数 m_1 增加时, x 方向聚焦全高半宽逐渐减小, 但 m_1 增加到 0.95 以后, 聚焦曲线的半高全宽基本保持不变, 图 4(a) 为 180 nm, 图 4(b) 为 172 nm。且由于衍射效应的增强, 次级衍射峰越来越强, 故 m_1 不宜超过 0.98。

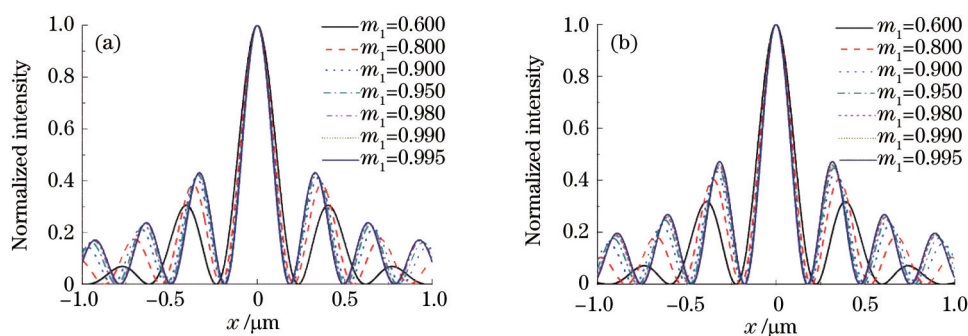


图 4 光场轴向分量聚焦光强图。(a) $a=2.2$ mm, $b=0.8$ mm; (b) $a=4.4$ mm, $b=1.5$ mm

Fig.4 Focus intensity distribution diagram of the axial components of light field. (a) $a=2.2$ mm, $b=0.8$ mm; (b) $a=4.4$ mm, $b=1.5$ mm

4 结 论

研究了径向偏振矢量光束经过椭圆环光阑后被高数值孔径透镜聚焦时在聚焦区域的光强分布。椭圆环光阑的加入强化了聚焦区域内的光场轴向分量, 从而进一步缩小了聚焦斑的尺寸。结果表明光束经过椭圆环形光阑后在聚焦区域内的径向偏振分量形成两个聚焦瓣, 而轴向分量形成椭圆形的聚焦斑, 从而在单一方向上缩小了聚焦斑尺寸。聚焦区域光场轴向分量光强大大强于径向偏振分量。当增加椭圆环形光阑内环半径时, 径向偏振分量的聚焦瓣和轴向偏振分量的聚焦斑单一方向聚焦尺寸均可小于光波长的三分之一。保持椭圆环长轴不变, 短轴改变, 即光阑从圆环向椭圆环变化中聚焦斑单一方向聚焦尺寸得到了较大缩小。适当加大椭圆环半径和透镜焦距后, 通光量得到大幅增加, 焦斑的光强也大幅增加, 而聚焦斑的尺寸可以进一步缩小。当进一步提高椭圆环形光阑内环半径时, 由于通光量减少和衍射效应, 不能得到更小的聚焦尺寸。

参 考 文 献

- 1 Xie Xiangsheng, Chen Yongzhu, Yang Ken, *et al.*. Harnessing the point-spread function for high-resolution far-field optical microscopy [J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 113(26): 263901.
- 2 L E Helseth. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens systems [J]. *Opt Commun*, 2001, 191(3-6): 161-172.
- 3 C C Sun, C K Liu. Ultrasmall focusing spot with a long depth of focus based on polarization and phase modulation [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(2): 99-101.
- 4 H Wang, L Shi, B Lukyanchuk, *et al.*. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics [J]. *Nat Photonics*, 2008, 2(8): 501-505.
- 5 C J R Sheppard, S Mehta. Three-level filter for increased depth of focus and Bessel beam generation [J]. *Opt Express*, 2012, 20(25): 27212-27221.
- 6 Chen Yikai, Zhang Douguo, Han Lu, *et al.*. Surface-plasmon-coupled emission microscopy with a polarization converter [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(5): 736-738.
- 7 X L Wang, J Chen, Y N Li, *et al.*. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(25): 253602.
- 8 Yang Liangxin, Xie Xiangsheng, Wang Sicong, *et al.*. Minimized spot of annular radially polarized focusing beam [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(8): 1331-1333.
- 9 R Dorn, S Quabis, G Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(23): 233901.
- 10 K Kitamura, K Sakai, S Noda. Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 4518-4525.

- 11 Li Peng, Liu Sheng, Xie Gaofeng, *et al.*. Modulation mechanism of multi-azimuthal masks on the redistributions of focused azimuthally polarized beams[J]. Opt Express, 2015, 23(6): 7131-7139.
- 12 Y Kozawa, S Sato. Numerical analysis of resolution enhancement in laser scanning microscopy using a radially polarized beam[J]. Opt Express, 2015, 23(3): 2076-2084.
- 13 Chen Guojun, Zhou Qiaoqiao, Ji Xianming, *et al.*. Study on high-numerical-aperture-focused characteristics of vector beam produced by π phase plate[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1226001.
陈国钧, 周巧巧, 纪宪明, 等. π 相位板产生矢量光束的高数值孔径聚焦特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1226001.
- 14 Liu Xuening, Wang Jiming, He Chongjun, *et al.*. Backward focus engineering with controlled cylindrical vector beams under different numerical apertures[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0114004.
刘雪宁, 王吉明, 赫崇君, 等. 不同数值孔径下调控矢量光束聚焦场的反向构建[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0114004.
- 15 Liu Jian, Yang Yanfang, He Ying, *et al.*. Flattop beam creation based on strong focusing of circularly polarized vortex beams[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0526003.
刘 键, 杨艳芳, 何英等. 基于圆偏振涡旋光束强聚焦的平顶光束的构成[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0526003.
- 16 K S Youngworth, T G Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. Opt Express, 2000, 7(2): 77-87.

栏目编辑: 史 敏