

π 相位光阑调制的高数值孔径聚焦特性研究

蔡勋明^{1,2}, 赵晶云², 童 红¹, 罗娇莲³, 杨吟野³, 李林福¹

¹ 贵州民族大学机械电子工程学院贵州省普通高等学校光电信息处理特色重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

² 浙江理工大学理学院物理系, 浙江 杭州 310018;

³ 贵州民族大学材料科学与工程学院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

摘要 利用半径较大的环形光阑使得聚焦区域产生较强的轴向电场分量, 用半径较小的环形光阑结合 π 相位板在聚焦区域形成轴向电场分布, 但电场振动方向与半径较大的环形光阑产生的轴向电场相反, 从而使得半径较大的环形光阑在聚焦区域形成的聚焦斑被整形, 在一定条件下可大大缩小光场聚焦斑的尺寸。研究结果表明, 相比使用单一环形光阑的情况, 这种方法可使得光场聚焦斑尺寸缩小 40 nm 以上。

关键词 物理光学; 偏振; 矢量光束; 光阑; π 相位板

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0526001

Study on High-Numerical-Aperture-Focused Characteristics by π Phase Diaphragm Modulation

Cai Xunming^{1,2}, Zhao Jingyun², Tong Hong¹, Luo Jiaolian³, Yang Yingye³, Li Lingfu¹

¹ *Special and Key Laboratory of Guizhou Provincial Higher Education for Optoelectronic Information Processing,*

School of Mechatronics Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

² *Department of Physics, School of Science, Zhejiang Science Technology University,*

Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

³ *Special and Key Laboratory of Guizhou Provincial Higher Education for Green Energy-Saving Materials,*

School of Material Science and Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract The strong axial electric field component can be obtained in the focus area by an annular diaphragm with a larger radius. In contrast, by another annular diaphragm with a smaller radius which combines with a π phase plate, the axial electric field distribution can be obtained in the focus area with the vibration direction opposite to that of the axial electric field produced by the annular diaphragm with a larger radius. Consequently, the focused spot formed by the annular diaphragm with a larger radius in the focus area is reshaped. In certain conditions, the size of the focused spot can be greatly reduced. The study results show that, compared with that when using sing annular diaphragm, the size reduction of the focused spot with the proposed method can be more than 40 nm.

Key words physical optics; polarization; vector beam; diaphragm; π phase plate

OCIS codes 260.2110; 140.3295; 260.5430

1 引 言

轴对称的径向偏振光是典型的矢量光束。这类偏振光有完美的轴对称性, 经高数值孔径透镜聚焦后能形成极小的聚焦光斑, 光学显微系统中常利用这类光束来提高光学显微分辨率^[1-8]。最近的研究表明, 利用圆环光阑, 结合径向偏振的矢量光束可以突破光学衍射极限的限制, 获得超分辨率的衍射图像^[9-10]。利用椭圆环光阑, 结合径向偏振的矢量光束可压缩聚焦光斑在某一方向上的聚焦尺寸^[11], 同时也会扩展聚焦光斑在另一方向上的聚焦尺寸, 因此只能得到单一方向上突破光学衍射极限的结果。要进一步压缩聚焦光斑尺

收稿日期: 2016-12-07; **收到修改稿日期:** 2017-01-09

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2014]2090)、贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字[2016]030)

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

寸,得到超分辨率的光学显微图像,应该同时调制光场的相位和强度分布^[12-13]。

利用相位板可实现对光场相位的调制。陈国钧^[14]等利用 π 相位板来调控光场位相产生矢量光束,即用简单的 π 相位板把线偏振光转换为径向和角向矢量空心光束,应用 Richards-Wolf 经典矢量衍射模型,计算高数值孔径透镜聚焦下的光场分布,在聚焦区获得了暗斑半径为 0.24λ (λ 为波长)的中空椭圆光束。Kozawa 等^[2,5]利用高阶径向极化的拉盖尔-高斯光束,通过光学系统聚焦产生所需光束,研究表明,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光斑。关于部分相干和圆偏振涡旋光束聚焦性质的研究表明^[16],圆偏振涡旋光束的自旋角动量可以转换为轨道角动量,且可以获得平顶光束。结合光阑和相位板可同时实现对聚焦区域光场相位和强度的调制,从而在聚焦区域获得极小的聚焦斑。

本文研究了径向偏振的矢量光束经光阑和相位板调制后通过高数值孔径透镜进行聚焦的情况。使用一个半径较大的环形光阑调制径向偏振的矢量光束,使得聚焦区域产生较强的轴向电场分量。然后利用半径相对较小的环形光阑结合 π 相位板在聚焦区域形成轴向电场分布。由于透过光阑的光场相位被调制,轴向电场振动方向与半径较大的环形光阑产生的轴向电场振动方向相反,这样半径较大的环形光阑在聚焦区域产生的轴向电场被半径较小的环形光阑产生的轴向电场反向切割,即聚焦光斑被整形。研究表明,只在调整环形光阑内外半径的情况下,光场聚焦斑尺寸的缩小量可以超过 40 nm ,即小于光波长的三分之一,这为获得突破光学衍射极限的聚焦光斑提供了一种简单有效的方法。

2 理论模型

一束径向偏振的高斯光束沿 z 轴方向传播,光振幅分布表达式可写为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = A_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right) \exp[i(kz - \omega t)](\mathbf{e}_x \cos \phi + \mathbf{e}_y \sin \phi), \quad (1)$$

式中 ϕ 为 xy 面内光偏振方向与 x 轴的夹角,光束经光阑和高数值孔径透镜聚焦, $\mathbf{e}_x \cos \phi + \mathbf{e}_y \sin \phi$ 为偏振方向。

光路示意图如图 1 所示,光束初始为径向极化,电极化方向为 $\mathbf{g}_0 = \mathbf{e}_x \cos \phi + \mathbf{e}_y \sin \phi$ 。图 1 中 θ 为聚焦光线与 z 轴的夹角, 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。光束经过光阑后的横截面为圆环。 r_0 为半径较大圆环的外半径。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,有如下方程

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

$$x^2 + y^2 = m^2 r_0^2 (0 \leq m \leq 1). \quad (3)$$

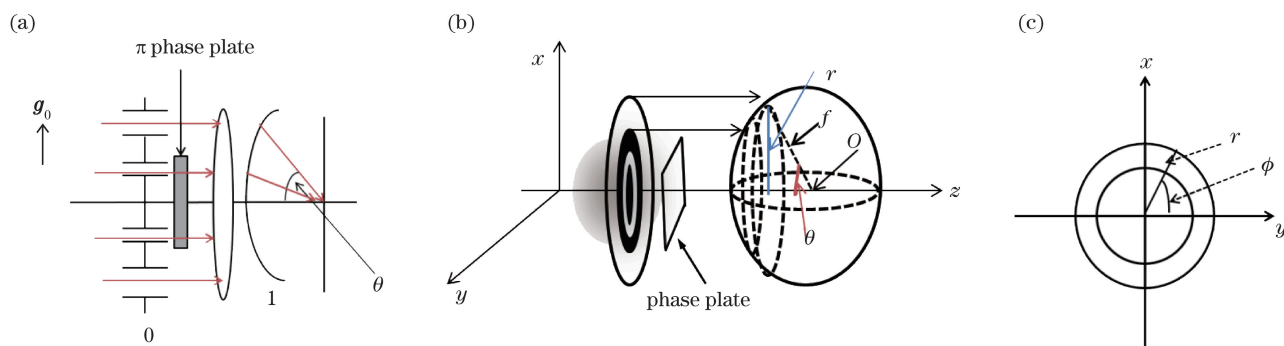


图 1 光路示意图。(a) 系统纵向截面图;(b) 系统立体图;(c) 光阑正面图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path. (a) Longitudinal section diagram of system;

(b) stereogram of system; (c) front view of diaphragm

由(3)式可得

$$r = mr_0, \quad (4)$$

由 $\sin \theta = r/f$, 可得

$$d\theta = \frac{r_0}{f \cos \theta} dm. \quad (5)$$

面积元 ds 所对应的立体角 $d\Omega$ 为

$$d\Omega = \frac{ds}{f^2} = \frac{r_0 \sin \theta}{f \cos \theta} dm d\phi. \quad (6)$$

设光束的束腰半径为

$$r_w = m_0 r_0, \quad 0 < m_0 < 1, \quad (7)$$

式中 m_0 为实参数。光振幅表达式可写为

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

根据 Youngworth 等^[17] 提出的方法, 设聚焦区域柱坐标为 (ρ_s, ϕ_s, z_s) , 可得聚焦区域电场的表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} e_{\phi}^{(s)} &= -\frac{ikf}{2\pi} \int_{m_1 0}^{m_2 2\pi} \cos^{3/2} \theta \exp\left(-\frac{m^2}{m_0^2}\right) \sin(\phi - \phi_s) \exp\{ik[z_s \cos \theta + \rho_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s) + \pi]\} \frac{r_0 \sin \theta}{f \cos \theta} dm d\phi - \\ &\quad \frac{ikf}{2\pi} \int_{m_3 0}^{1 2\pi} \cos^{3/2} \theta \exp\left(-\frac{m^2}{m_0^2}\right) \sin(\phi - \phi_s) \exp\{ik[z_s \cos \theta + \rho_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)]\} \frac{r_0 \sin \theta}{f \cos \theta} dm d\phi \\ e_{\rho}^{(s)} &= -\frac{ikf}{2\pi} \int_{m_1 0}^{m_2 2\pi} \cos^{3/2} \theta \exp\left(-\frac{m^2}{m_0^2}\right) \cos(\phi - \phi_s) \exp\{ik[z_s \cos \theta + \rho_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s) + \pi]\} \frac{r_0 \sin \theta}{f \cos \theta} dm d\phi - \\ &\quad \frac{ikf}{2\pi} \int_{m_3 0}^{1 2\pi} \cos^{3/2} \theta \exp\left(-\frac{m^2}{m_0^2}\right) \cos(\phi - \phi_s) \exp\{ik[z_s \cos \theta + \rho_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)]\} \frac{r_0 \sin \theta}{f \cos \theta} dm d\phi \\ e_z^{(s)} &= -\frac{ikf}{2\pi} \int_{m_1 0}^{m_2 2\pi} \cos^{1/2} \theta \exp\left(-\frac{m^2}{m_0^2}\right) \exp\{ik[z_s \cos \theta + \rho_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s) + \pi]\} \frac{r_0 \sin^2 \theta}{f \cos \theta} dm d\phi - \\ &\quad \frac{ikf}{2\pi} \int_{m_3 0}^{1 2\pi} \cos^{1/2} \theta \exp\left(-\frac{m^2}{m_0^2}\right) \exp\{ik[z_s \cos \theta + \rho_s \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)]\} \frac{r_0 \sin^2 \theta}{f \cos \theta} dm d\phi \end{aligned} \right. , \quad (9)$$

式中 $e_{\phi}^{(s)}$ 、 $e_{\rho}^{(s)}$ 和 $e_z^{(s)}$ 分别为电场的方位角分量、径向分量和 z 向分量。 m_1 、 m_2 、 m_3 为光阑内环与外环半径参数, 半径较大的光阑内、外环半径分别为 $m_3 r_0$ 和 r_0 , 半径较小的 π 相位板光阑内、外环半径分别为 $m_1 r_0$ 和 $m_2 r_0$ 。由于电场初始为径向偏振的, 因此主要考虑 $e_{\rho}^{(s)}$ 和 $e_z^{(s)}$ 。电场的径向分量和 z 向分量对应的聚焦光强为

$$p_{\rho}^{(s)} \propto e_{\rho}^{(s)} \cdot e_{\rho}^{(s)*}, \quad p_z^{(s)} \propto e_z^{(s)} \cdot e_z^{(s)*}, \quad (10)$$

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

3 结果讨论

采用数值的方法来计算(9)式中电场的径向分量和 z 向分量, 首先把光束束腰半径参数设为 $m_0 = 0.82$, 光波长 $\lambda = 532$ nm。图 2 给出了聚焦区域总场的强度分布, 即轴向分量加径向分量的总强度分布图。图 2 中圆环光阑的最大外半径 $r_0 = 4.4$ mm, 透镜聚焦半径 $f_r = 4.6$ mm, m_3 取值为 0.95。

从图 2(a)看出,用半径较大的环形光阑可使聚焦区轴向光场的光强大幅增加,可获得一个较小的总场聚焦斑。但从文献[1,11]的研究得知,进一步提高环形光阑内外半径比无法进一步缩小聚焦斑半径,本文提出用半径较大的环形光阑和半径较小的环形光阑结合 π 相位板的组合来进一步缩小聚焦区域的聚焦斑半径。半径较小的环形光阑结合 π 相位板在透镜聚焦区域产生一个反向轴向电场,即轴向电场振动方向与半径较大的环形光阑产生的电场振动方向相反,透镜聚焦区域聚焦光斑的轴向电场被反向电场切割,从而达到对聚焦光斑整形的目的。从图 2(b)、(c)可以看出,整形后中央聚焦光斑半径减小,但中央聚焦光斑周围形成了较强的衍射光环。由图 2(d)可知,调整光阑参数可抑制光环的产生,增大中央光斑的光强。为研究聚焦光斑的半径,图 3 给出了图 2 中各光斑的剖面图,参数与图 2 一致。

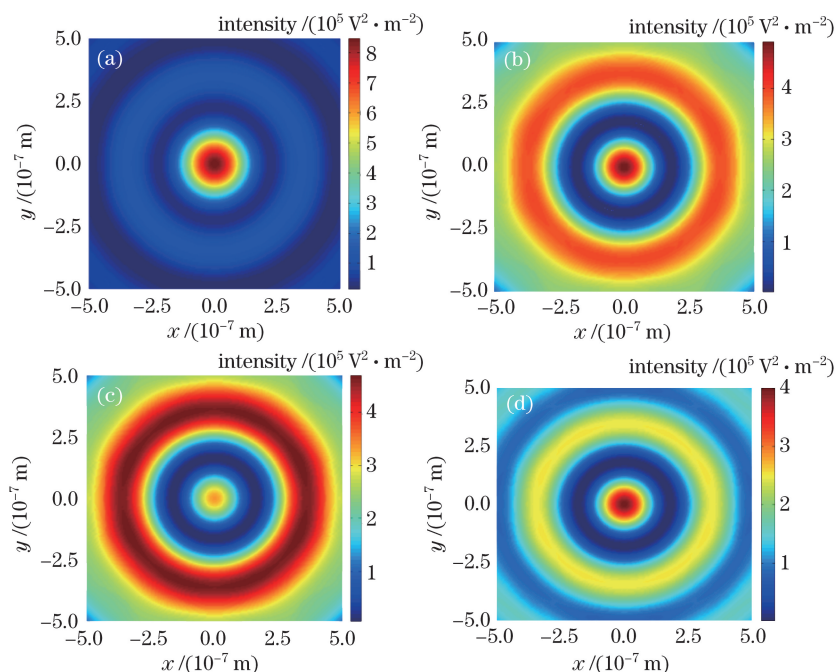


图 2 当 $m_3=0.95$ 、 $m_0=0.82$ 时,光场的聚焦光强分布。(a) $m_1=0, m_2=0$; (b) $m_1=0.30, m_2=0.35$;
(c) $m_1=0.40, m_2=0.45$; (d) $m_1=0.52, m_2=0.55$

Fig. 2 When $m_3=0.95$ and $m_0=0.82$, focus intensity distributions of light field. (a) $m_1=0, m_2=0$;
(b) $m_1=0.30, m_2=0.35$; (c) $m_1=0.40, m_2=0.45$; (d) $m_1=0.52, m_2=0.55$

从图 3 可以得知,图 2(a)~(d)各图光强的半峰全宽(FWHM)分别为 214, 180, 166, 176 nm。由图 3(b)可知,与图 2(a)相比,聚焦斑尺寸缩小了 48 nm,但是中央亮斑的光强低于周围亮环;调整光阑参数可抑制中央亮斑周围的次级衍射环,相比图 2(a)的情况,中央亮斑的 FWHM 缩小了 38 nm;可通过调整光阑参数获得极小聚焦光斑,同时抑制次级衍射环。图 4 给出了进一步改进光阑参数后的研究结果。

从图 4 可知,修改半径较大的光阑和半径较小的光阑的参数,可以使得中央聚焦光斑的半径缩小,同时也可抑制次级衍射亮纹的强度,使其不至于过大。从图 4(b)~(d)可以看出,调整光阑参数可将次级衍射环光强压制到接近中央亮斑最大光强的一半。为进一步分析光斑半径,图 5 给出了图 4 中各光斑的剖面图,参数与图 4 一致。

图 5(a)黑色实线为图 4(a)的剖面图,红色点线为图 4(b)的剖面图,图 5(b)黑色实线为图 4(c)的剖面图,红色点线为图 4(d)的剖面图。从图 5 可以得知,图 4(a)~(d)光斑光强的 FWHM 分别为 210, 168, 168, 164 nm。从图 5 可知,图 4(c)的情况最好,次级衍射环得到了较好的压制,同时中央亮斑的尺寸相比较图 4(a)缩小了 42 nm。

为了进一步研究 FWHM 与光阑参数 m 之间的关系,可保持三个 m 值不变,改变另一个 m 值,定量研究 FWHM、次级衍射环相对主峰光强(RISDR)、 m 数之间的关系。取图 4(c)的情况,只让 m_1 参数改变,FWHM、次级峰相对主峰光强(主峰为 1)、 m_1 三者的变化情况如表 1 所示。

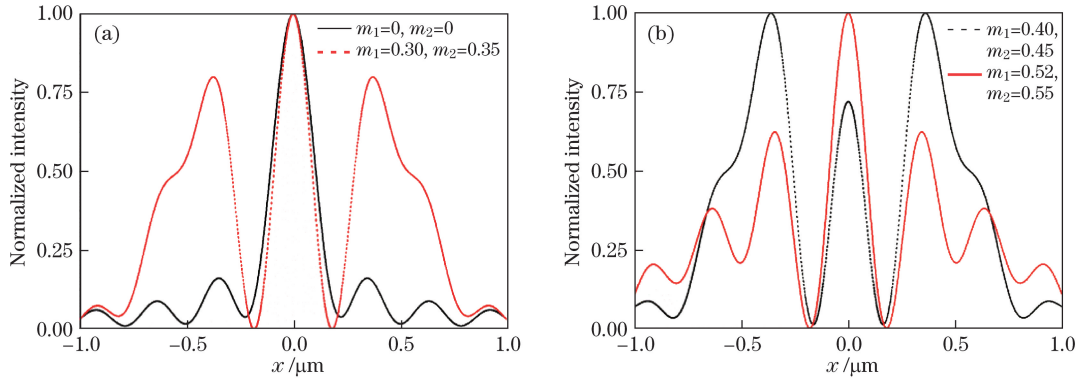


图 3 当 $m_3=0.95, m_0=0.82$ 时, 光场的聚焦光强分布剖面图。(a) 对应图 2(a)、(b); (b) 对应图 2(c)、(d)

Fig. 3 When $m_3=0.95$ and $m_0=0.82$, profile diagrams of focus intensity distributions of light field.

(a) Corresponding to Fig. 2(a) and Fig. 2(b); (b) corresponding to Fig. 2(c) and Fig. 2(d)

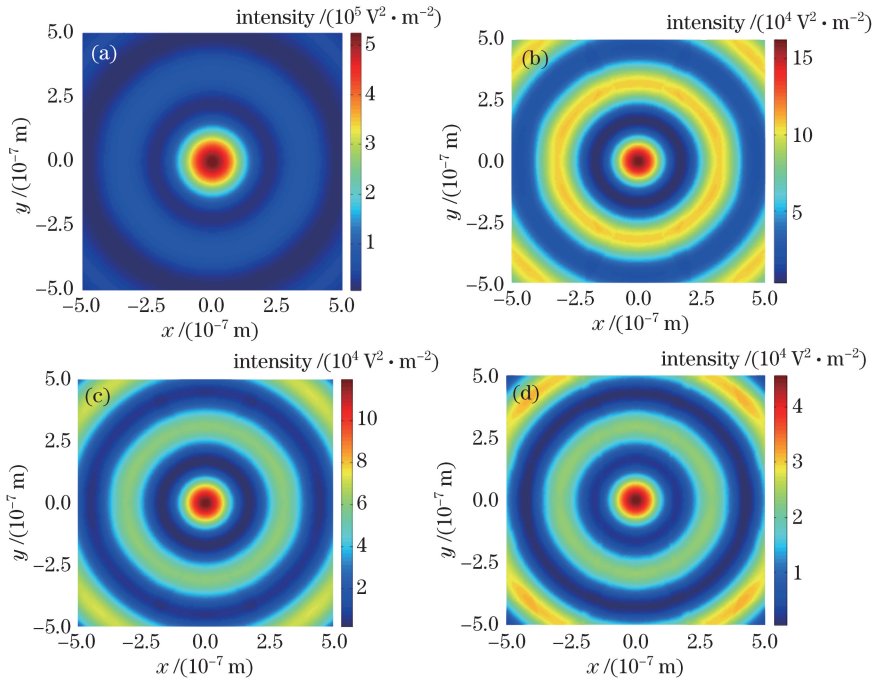


图 4 当 $m_3=0.97, m_0=0.90$ 时, 光场的聚焦光强分布图。(a) $m_1=0, m_2=0$; (b) $m_1=0.657, m_2=0.680$;

(c) $m_1=0.757, m_2=0.780$; (d) $m_1=0.853, m_2=0.880$

Fig. 4 When $m_3=0.97$ and $m_0=0.90$, focus intensity distributions of light field. (a) $m_1=0, m_2=0$;

(b) $m_1=0.657, m_2=0.680$; (c) $m_1=0.757, m_2=0.780$; (d) $m_1=0.853, m_2=0.880$

表 1 聚焦斑 FWHM 和次级衍射环相对光强随 m_1 的变化

Table 1 Changes of FWHM of focus spot and relative light intensity of secondary diffraction ring with m_1

m_1	0.762	0.761	0.760	0.759	0.758	0.757	0.756	0.755	0.754	0.753	0.752
FWHM /nm	178	177	174	173	170	168	166	164	161	160	158
RISDR /%	32	35	38	42	46	51	57	64	72	83	96

从表 1 可以看出, 随着 m_1 的减小, 半径较小的光阑缝宽增加, 聚焦斑 FWHM 相应减小, 但次级衍射环相对光强增加; 当 m_1 大于 0.757 时, 不仅次级衍射环光强增加, 高阶衍射环光强也会增加, 最后高阶衍射环光强甚至会超过中央聚焦斑光强。因此, 应选择合适的 m_1 参数, 兼顾 FWHM 和次级衍射环与主峰的相对光强。

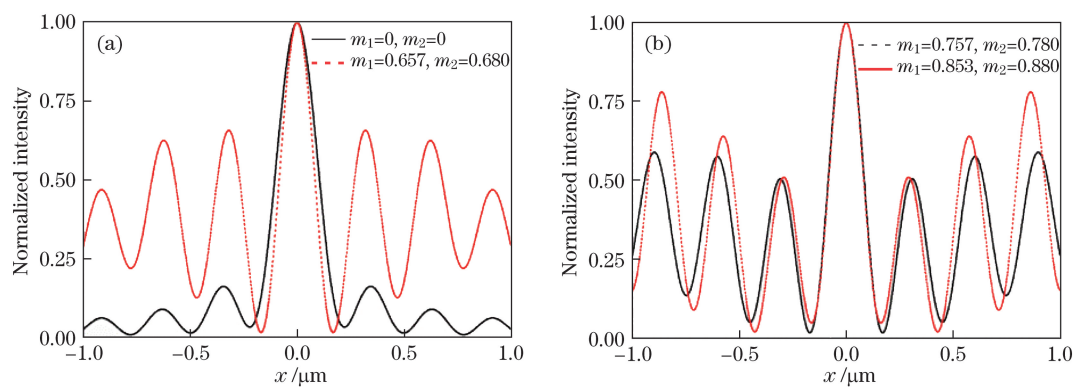


图 5 当 $m_3=0.97$ 、 $m_0=0.90$ 时,光场的聚焦光强剖面图。(a) 对应图 4(a)、(b);(b) 对应图 4(c)、(d)

Fig. 5 When $m_3=0.97$ and $m_0=0.90$, profile diagrams of focus intensity distributions of light field.

(a) Corresponding to Fig. 4(a) and Fig. 4(b); (b) corresponding to Fig. 4(c) and Fig. 4(d)

4 结 论

提出了一种用半径较大的光阑结合半径较小的光阑及相位板来缩小矢量光束经透镜聚焦后的聚焦光斑的方法。研究表明,相比只有半径较大环形光阑聚焦时,合理设置半径较大光阑和半径较小光阑的参数可使中央聚焦光斑的束腰半径缩小 40 nm 以上,得到小于三分之一光波长的聚焦斑,同时压制次级衍射光环,使次级衍射环光强接近中央聚焦光斑最大光强的一半。该研究结果有助于提高激光扫描显微镜中的显微分辨率,可通过改进光学系统设计,在得到极小中央聚焦光斑的同时较大程度地压制次级衍射光环,进一步提高分辨率。

参 考 文 献

- [1] Yang L X, Xie X S, Wang S C, *et al.* Minimized spot of annular radially polarized focusing beam[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1331-1333.
- [2] Kozawa Y, Sato S. Numerical analysis of resolution enhancement in laser scanning microscopy using a radially polarized beam[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2076-2084.
- [3] Zhu B Z, Shen S H, Zheng Y, *et al.* Numerical studies of focal modulation microscopy in high-NA system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19138-19147.
- [4] Sheppard C J R, Choudhury A. Annular pupils, radial polarization, and superresolution[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(22): 4322-4327.
- [5] Kozawa Y, Hibi T, Sato A, *et al.* Lateral resolution enhancement of laser scanning microscopy by a higher-order radially polarized mode beam[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 15947-15954.
- [6] Chen Y K, Zhang D G, Han L, *et al.* Surface-plasmon-coupled emission microscopy with a polarization converter[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 736-738.
- [7] Wang H F, Shi L P, Lukyanchuk B, *et al.* Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 501-505.
- [8] 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.
- [9] Xie X S, Chen Y Z, Yang K, *et al.* Harnessing the point-spread function for high-resolution far-field optical microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(26): 263901.
- [10] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 91(23): 233901.
- [11] Cai Xunming, Zhao Jingyun, Fan Menghui, *et al.* Effect of the elliptic annular aperture on the focusing of radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0326002.
蔡勋明, 赵晶云, 范梦慧, 等. 椭圆环光阑对径向偏振光聚焦研究的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0326002.
- [12] Wai T T, Yew E Y S Y, Colin J R S. Polarization conversion in confocal microscopy with radially polarized

- illumination[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2147-2149.
- [13] Li P, Liu S, Xie G F, *et al.* Modulation mechanism of multi-azimuthal masks on the redistributions of focused azimuthally polarized beams[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7131-7139.
- [14] 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.
- [15] Chen G Y, Song F, Wang H T. Sharper focal spot generated by 4π tight focusing of higher-order Laguerre-Gaussian radially polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3937-3940.
- [16] Chen B S, Zhang Z M, Pu J X. Tight focusing of partially coherent and circularly polarized vortex beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(4): 862-869.
- [17] Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 77-87.