

# 径向偏振相干光束阵列的深聚焦

任广森 吴武明 宁禹 孙全 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** 调整相干光束阵列中单元光束的线偏振方向可以得到近似的径向偏振光,但其特性与理想的径向偏振光存在差异。基于 Richards-Wolf 矢量衍射积分理论,利用数值方法对径向偏振相干光束阵列的深聚焦场进行了分析。研究了实际应用中较为关注的主要参数,即焦面上轴向偏振场及总场主瓣宽度、轴向偏振场的纯净度及产生效率。结果表明,与理想径向偏振光不同,径向偏振相干光束阵列的深聚焦场在焦面上会出现角向偏振分量。采用单环排布并使光束紧贴透镜瞳面边缘,可以产生质量更好的轴向偏振场。对于单环排布阵列,增多光束数目对轴向偏振场及总场主瓣宽度、轴向偏振场的纯度影响不大,但可以提高轴向偏振场的生成效率。

**关键词** 物理光学; 深聚焦; 光束阵列; 径向偏振

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0102003

## Tight Focusing of a Radially Polarized Coherent Beams Array

Ren Guangsen Wu Wuming Ning Yu Sun Quan Xu Xiaojun

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

**Abstract** An effective radially polarized beam can be generated by coherently combined beams, each one with an appropriately oriented linear polarization, named radially polarized coherent beams array. However, the characteristic of the effective radially polarized beam is different from that of an ideal one. Based on the Richards-Wolf vector diffraction theory, numerical calculation is performed to analyze the intensity distribution at focal plane of a tightly focused radially polarized coherent beams array. The parameter, such as the full-width at half-maximum (FWHM) of the longitudinal and total field, the purity parameter and the generation efficiency of the longitudinal field are used to characterize the intensity distribution at focal plane. The results show that the azimuthally polarized field exists at focal plane for a tightly focused radially polarized coherent beams array, in contrast with an ideal radially polarized beam. To generate a radially polarized beam with better beam quality, the beamlets should be placed in one single ring and close to the pupil edge of the objective lens. When increasing the number of beams in the single-ring-shaped array, the FWHM of the longitudinal and total field and the purity parameter remain almost unchanged, but the generation efficiency of the longitudinal field is improved.

**Key words** physical optics; tight focusing; beams array; radial polarization

**OCIS codes** 140.3290; 140.3300; 260.5430; 350.4855

## 1 引言

径向偏振光束(RPB)是指横截面上各点的线偏振方向均指向径向的光束<sup>[1]</sup>。RPB在大数值孔径聚焦(深聚焦)条件下具有独特的性质,其会聚光斑比均匀偏振光更紧凑,甚至可以小于衍射极限<sup>[2-3]</sup>。这种特性在高密度光存储<sup>[4]</sup>中有重要应用。此外,

在共焦显微技术中利用 RPB 作为照明光源可以提高成像分辨率<sup>[5-6]</sup>。RPB 深聚焦光场的另一个重要特性是光轴附近会产生较强的轴向偏振电场<sup>[1,7-8]</sup>。光镊技术中,由于散射力和吸收力的存在,常规光镊难以束缚金属微粒<sup>[9]</sup>。而 RPB 的深聚焦光场中心只有轴向偏振电场,对金属微粒没有散射力和吸收

收稿日期: 2013-07-12; 收到修改稿日期: 2013-08-15

作者简介: 任广森(1989—),男,硕士研究生,主要从事光束传输与控制方面的研究。E-mail: ren\_gs@yeah.net

导师简介: 许晓军(1973—),男,研究员,主要从事高能固体激光器、大气光学与自适应光学方面的研究。

E-mail: xuxj@21cn.com

力的作用,因此可以利用这一特性获得更适合束缚金属微粒的光镊<sup>[9-10]</sup>。这一独特的轴向电场还可用于电子加速<sup>[11-12]</sup>、针尖增强拉曼光谱技术<sup>[13]</sup>等领域。因此,RPB的深聚焦特性是一个重要的研究内容<sup>[14-19]</sup>。

RPB的产生方法可以分为主动法与被动法。主动法是指使用腔内元件使激光器直接出射RPB<sup>[20-21]</sup>。被动法是指对出射光进行空间偏振调制得到RPB<sup>[22-26]</sup>。2009年,在已经充分发展的光纤激光相干合成技术基础上,Kurti等<sup>[27]</sup>提出并实验验证了,调整阵列中单元光束的线偏振方向至径向可以产生近似的RPB(本文称作径向偏振相干光束阵列,RPCBA)。之所以称之为近似的RPB,是因为合成光束横截面上各点偏振方向不是精确指向径向,而且光强分布不连续。因此,其深聚焦特性与理

想RPB存在差异。目前,关于RPB的应用研究大多基于其特殊的深聚焦特性。RPCBA能否走向实用取决于其是否保持了理想RPB的主要深聚焦特性。因此有必要详细研究RPCBA的深聚焦特性。本文基于Richards-Wolf矢量衍射积分理论,利用数值方法分析了RPCBA经深聚焦后焦面上的强度分布情况。

## 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由Richards和Wolf<sup>[28]</sup>建立的。Youngworth等<sup>[7]</sup>将该理论运用到径向、角向偏振光的深聚焦领域。非均匀偏振光焦点附近的三维电场可以表示为<sup>[29-30]</sup>

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

式中  $f$  为焦距,  $\lambda$  为波长,  $k$  为波数。如图1所示,  $(r, \phi, z)$  为焦点附近的柱坐标,  $(\rho, \varphi)$  为透镜瞳面上点的极坐标,  $\theta$  为瞳面上某点的会聚角。考虑典型的正弦规则透镜, 则  $\rho = f \sin \theta$ , 因此也可将  $(\theta, \varphi)$  作为透镜瞳面上某点的坐标。  $A(\theta, \varphi)$  为入射光场在瞳面的复振幅分布函数。  $a(\theta, \varphi)$ 、 $b(\theta, \varphi)$ 、 $c(\theta, \varphi)$  描述入射场偏振方向分布。对于理想的径向偏振光,  $a(\theta, \varphi) = \cos \varphi$ ,  $b(\theta, \varphi) = \sin \varphi$ ,  $c(\theta, \varphi) = 0$ 。  $n$  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  $\theta$  的最大值。对于实际的大数值孔径聚焦系统,  $n$  往往大于1,  $NA/n$  才是决定系统会聚能力的参数。为了表述的简洁, 本文设  $n = 1$ , 以  $NA$  表示系统的会聚能力。利用(1)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强度分布:

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{e}_x + E_y \mathbf{e}_y + E_z \mathbf{e}_z. \quad (2)$$

通常将总场表示为径向、角向和轴向偏振分量的叠加:

$$\mathbf{E} = E_r \mathbf{e}_r + E_\phi \mathbf{e}_\phi + E_z \mathbf{e}_z, \quad (3)$$

其中  $E_r = E_x \cos \phi + E_y \sin \phi$ ,  $E_\phi = -E_x \sin \phi + E_y \cos \phi$ 。

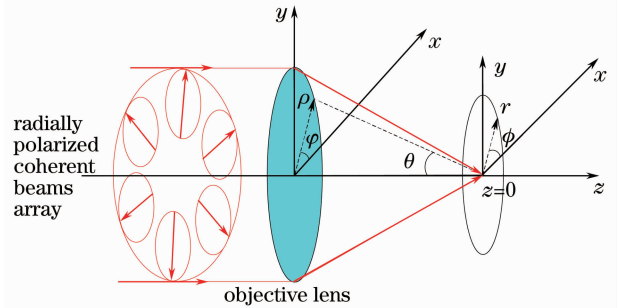


图1 RPCBA深聚焦示意图

Fig.1 Scheme for tight focusing of a RPCBA

设阵列由  $N$  束被直径为  $2R$  的孔径截断的基模高斯光束组成, 单元光束束腰半径为  $\omega_0$ , 定义截断参数  $\gamma = \omega_0/R$ 。以  $(\theta_i, \varphi_i)$  为阵列中第  $i$  束光的中心坐标, 设  $x = f \sin \theta \cos \varphi$ 、 $y = f \sin \theta \sin \varphi$ ,  $x_i = f \sin \theta_i \cos \varphi_i$ 、 $y_i = f \sin \theta_i \sin \varphi_i$ 。那么阵列光束在透镜瞳面的振幅分布为

$$A(\theta, \varphi) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\omega_0^2}\right], & \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} < R \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (4)$$

认为每束光均是线偏振的, 且入射光在瞳面上的偏振分布函数为

$$\begin{cases} a(\theta, \varphi) = \cos \varphi_i \\ b(\theta, \varphi) = \sin \varphi_i, \\ c(\theta, \varphi) = 0 \end{cases} \quad \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} < R. \quad (5)$$

即单元光束的中心坐标决定了其线偏振方向。由(1)、(4)、(5)式可以计算 RPCBA 的深聚焦场分布情况。

### 3 计算结果及讨论

理想 RPB 的深聚焦场(见文献[1]中图 20)没有角向偏振分量,轴向偏振分量强度峰值在光轴上,径向偏振分量呈围绕轴向偏振分量的环形。考虑一个六束光组成的 RPCBA 的深聚焦,参数设置为  $\omega_0 = 1.5 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 0.8$ ,  $NA = 0.85$ 。六束光紧贴瞳面边缘呈等间距环形排列,光束阵列的外接圆与透镜瞳面重合,外接圆直径  $D = 15 \text{ mm}$ 。光束阵列深聚焦场在焦面上的光强分布如图 2 所示,图中长度单

位为光波长  $\lambda$ ,光强分布已按总光强最大值归一化。可以看出由于透镜瞳面上光强分布的不连续, RPCBA 深聚焦场的径向偏振分量[图 2(a)]不是理想的环形,但轴向偏振分量几乎是圆形[图 2(c)]。另外, RPCBA 的深聚焦场出现了角向偏振分量[图 2(b)]。在上文所述的光束排布方式下,角向偏振分量的强度极大从与  $x$  轴夹角  $15^\circ$  开始,围绕光轴以  $30^\circ$  等间隔分布。图 2(e)表明角向偏振场强度较小,分布区域也对轴向偏振场影响甚微。与偏振一致阵列光束的相干合成类似, RPCBA 的深聚焦场强度分布也出现了旁瓣。这也是 RPCBA 与单束理想径向偏振光的不同之处。图 2(f)为聚焦场沿某旁瓣极大所在方向(与  $x$  轴成  $30^\circ$ )的强度分布。

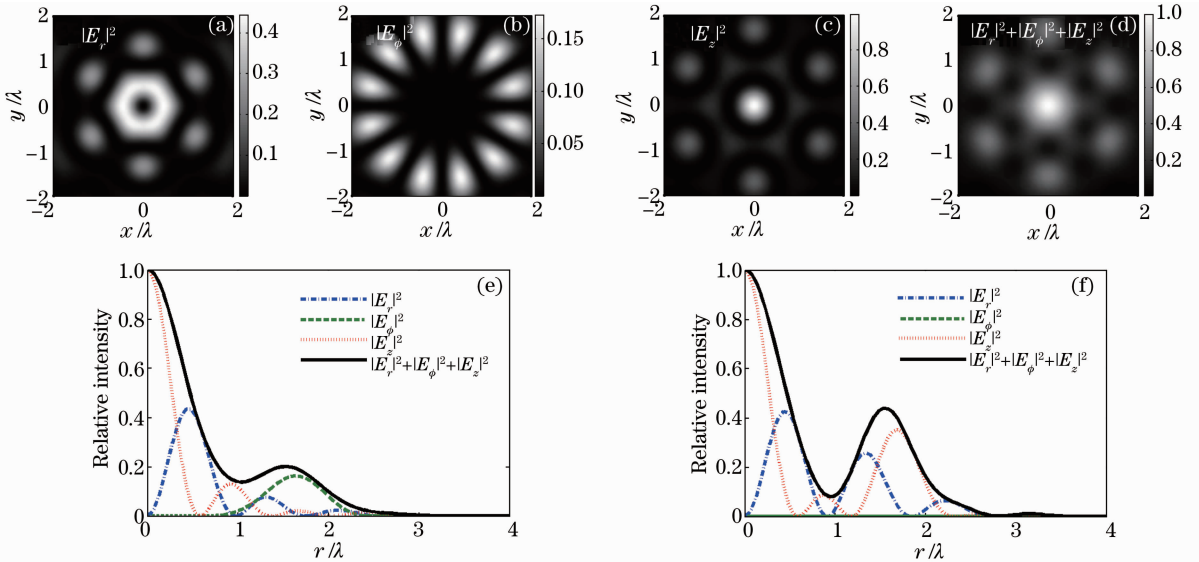


图 2 RPCBA 深聚焦场在焦面上的相对强度分布。(a) 径向偏振分量; (b) 角向偏振分量; (c) 轴向偏振分量; (d) 总场; (e) 各分量场在与  $x$  轴成  $15^\circ$  角方向上的强度分布; (f) 各分量场在与  $x$  轴成  $30^\circ$  角方向上的强度分布

Fig. 2 Relative intensity distribution at focal plane of a RPCBA focused by a high-NA objective lens. (a) Radial component; (b) azimuthal component; (c) longitudinal component; (d) total field; (e) relative intensity distribution along the  $15^\circ$  direction with respect to the  $x$ -axis; (f) relative intensity distribution along the  $30^\circ$  direction with respect to the  $x$ -axis

为了定量描述 RPCBA 的深聚焦场,需要确定主要的描述参量。实际应用中,焦面上的总场以及轴向偏振场的宽度是关注的重点,更紧凑的轴向偏振场在显微技术、电子加速、光镊技术及针尖增强拉曼光谱技术中有重要意义<sup>[9,11-13,16]</sup>。RPCBA 深聚焦场的轴向偏振场及总场主瓣在焦面上为近似的圆

形,本文以  $x$  方向上的半峰全宽( $\omega_{1/2}$ )描述总场及轴向偏振场的主瓣宽度。图 2 中轴向偏振场及总场的  $\omega_{1/2}$  分别为  $0.54\lambda$  和  $0.95\lambda$ 。由图 2 可以看出轴向偏振分量主瓣内还有其他偏振分量。为了描述轴向偏振场的纯度,可以定义纯度参数<sup>[16]</sup>

$$\eta = \frac{\int_0^{2\pi r_0} \int_0^{2\pi r_0} |E_z(r, \phi)|^2 r dr d\phi}{\int_0^{2\pi r_0} \int_0^{2\pi r_0} [|E_r(r, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \phi)|^2 + |E_z(r, \phi)|^2] r dr d\phi}, \quad (6)$$

式中  $r_0$  为焦面上轴向偏振分量强度分布第一极小的半径。 $\eta$  越大表示轴向偏振场越纯, 图 2 中  $\eta=44.3\%$ 。类似的, 定义

$$\xi = \frac{\int_0^{2\pi r_0} \int_0^{2\pi r_0} |E_z(r, \phi)|^2 r dr d\phi}{\int_0^{2\pi \infty} \int_0^{2\pi \infty} [|E_r(r, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \phi)|^2 + |E_z(r, \phi)|^2] r dr d\phi} \quad (7)$$

为轴向偏振场的生成效率, 即轴向偏振分量主瓣能量占总场能量的比重。图 2 中  $\xi=8.3\%$ 。以上述参量为主要指标, 本文研究了会聚系统数值孔径和阵列排布方式对 RPCBA 深聚焦场的影响。计算了六束光组成的 RPCBA 经不同数值孔径的透镜聚焦后, 焦面上的电场强度分布。深聚焦场主要参数变化情况如图 3 所示。除 NA 外, 阵列及聚焦系统参数与图 2 相同。图 3 表明, 随着透镜数值孔径的增大, 深聚焦场的各项指标均趋向于更优。总场及轴向场主瓣宽度减小, 轴向场的生成效率及纯度均增大。这是因为大数值孔径对应大会聚角, 而会聚角越大, 焦点处的轴向电场分量就越多。对于一个会

聚透镜, 瞳面上远离中心的位置实际会聚角较大。这正是使用振幅呈环形分布的径向偏振光可以得到高质量轴向偏振场的原因<sup>[10,31]</sup>。因此, 充分利用会聚系统的大数值孔径可以高效利用入射光能量, 产生主瓣宽度较窄、纯度较高的轴向偏振场。RPCBA 的深聚焦可以通过以下方式充分利用系统的大数值孔径, 即使用束腰较窄的光束并使光束紧贴透镜瞳面边缘单环排列。值得注意的是, 大数值孔径会造成轴向偏振场在  $z$  轴上分布范围的缩小。另一方面, 大数值孔径会聚透镜的制造对工艺要求较高。实际应用中应当综合考虑这些因素。

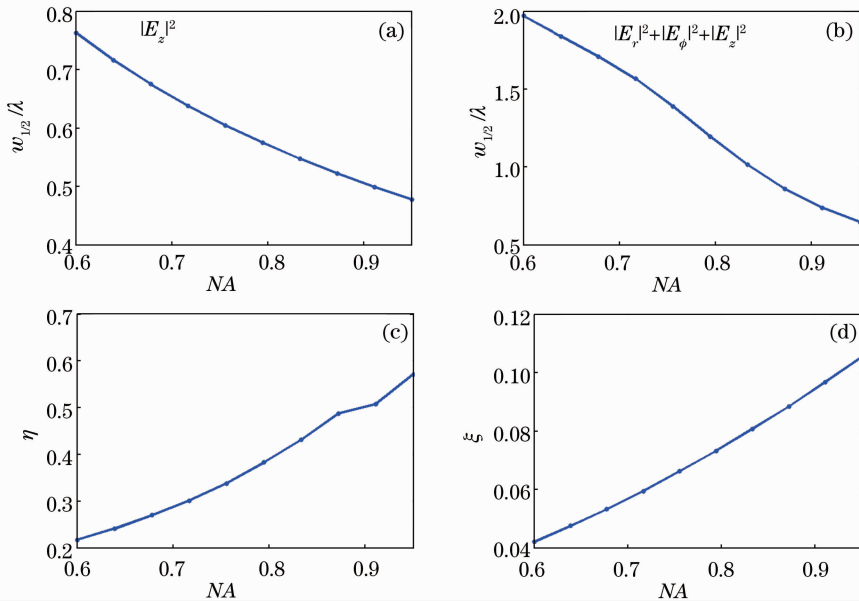


图 3 数值孔径 NA 对 RPCBA 深聚焦场主要参数的影响。(a) 轴向偏振场半峰全宽; (b) 总场半峰全宽; (c) 轴向偏振场纯度; (d) 轴向偏振场产生效率

Fig. 3 Influence of NA on the intensity distribution of a RPCBA focused by a high-NA objective lens. The FWHM of (a) the longitudinal field and (b) the total field, (c) the purity parameter and (d) the generation efficiency of longitudinal field corresponding to different values of NA are plotted, respectively

图 4 所示为增多光束数目对 RPCBA 深聚焦场的影响。各光束呈等间距单环排列且紧贴透镜瞳面边缘,相关参数为  $\omega_0 = 1 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 0.8$ ,  $NA = 0.85$ 。可以看出,增多光束数目对总场及轴向偏振场的主

瓣宽度、轴向偏振场的纯度几乎没有影响。但是轴向偏振场的生成效率有所提高,其原因是更紧密的排列使焦面上的能量向主瓣集中。

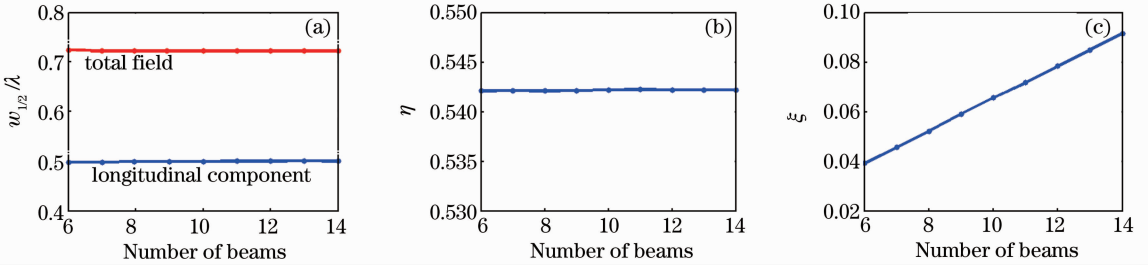


图 4 光束数目对 RPCBA 深聚焦场的影响。(a) 轴向偏振场和总场 FWHM; (b) 轴向偏振场纯度; (c) 轴向偏振场产生效率

Fig. 4 Influence of the number of beams on the intensity distribution of a RPCBA focused by a high-NA objective lens. (a) FWHM of the longitudinal field and the total field, (b) the purity parameter and (c) the generation efficiency of longitudinal field corresponding to different numbers of beams are plotted, respectively

## 4 结 论

基于 Richards-Wolf 矢量衍射积分理论,建立了 RPCBA 经大数值孔径透镜聚焦后,焦面上的电场强度分布计算模型。以焦面上轴向偏振场及总场主瓣宽度、轴向偏振场纯度、生成效率为主要参数,利用数值方法对 RPCBA 的深聚焦场进行了分析研究。与理想 RPB 不同,RPCBA 的深聚焦场在焦面上会出现角向偏振分量,但其强度较小,分布区域也对轴向偏振分量影响较小。采用单环排布并使光束紧贴透镜瞳面边缘可以更有效地利用透镜的大数值孔径,得到质量更好的轴向偏振场。在采用单环排布的前提下,增大光束数目对轴向偏振场及总场主瓣宽度、轴向偏振场的纯度影响不大,但可以提高轴向偏振场的生成效率。本文结果对于 RPCBA 的实用化具有参考价值。

## 参 考 文 献

- Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Adv in Opt Photon*, 2009, 1(1): 1–57.
- Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(23): 233901.
- Chen Huifang, Liu Tao, Zhang Zaixuan. Sharper 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.
- Kim W, Park N, Yoon Y, *et al.*. Investigation of near-field imaging characteristics of radial polarization for application to optical data storage[J]. *Opt Rev*, 2007, 14(4): 236–242.
- Youngworth K S, Brown T G. Inhomogeneous polarization in scanning optical microscopy[C]. *SPIE*, 2000, 3919: 75–85.
- Tang W T, Yew E Y S, Sheppard C J R. Polarization conversion

- in confocal microscopy with radially polarized illumination[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(14): 2147–2149.
- Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Opt Express*, 2000, 7(2): 77–87.
- Yan Jie, Lu Yonghua, Wang Pei, *et al.*. Study of focal spot of radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3597–3603.
- 阎杰, 鲁拥华, 王沛, 等. 径向偏振光聚焦光斑研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3597–3603.
- Zhan Q. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. *Opt Express*, 2004, 12(15): 3377–3382.
- Yu Yongjiang, Chen Jiannong, Yan Jinliang, *et al.*. Longitudinally polarized subwavelength beam generated by focusing radially modulated Bessel-Gaussian beam [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 044205.
- 于永江, 陈建农, 闫金良, 等. 聚焦径向调制 Bessel-Gaussian 光束实现亚波长尺寸纵向偏振光束[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 044205.
- Varin C, Piché M. Acceleration of ultra-relativistic electrons using high-intensity TM<sub>01</sub> laser beams[J]. *Appl Phys B*, 2002, 74(suppl): S83–S88.
- Cicchitelli L, Hora H. Longitudinal field components for laser beams in vacuum[J]. *Phys Rev A*, 1990, 41(7): 3727–3732.
- Hayazawa N, Saito Y, Kawata S. Detection and characterization of longitudinal field for tip-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(25): 6239–6241.
- Kozawa Y, Sato S. Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(6): 820–822.
- Zhang Z, Pu J, Wang X. Tight focusing of radially and azimuthally polarized vortex beams through a dielectric interface [J]. *Chin Phys Lett*, 2008, 25(5): 1664–1667.
- Wang H, Shi L, Lukyanchuk B, *et al.*. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. *Nature Photon*, 2008, 2(8): 501–505.
- Sheppard C J R, Yew E Y S. Performance parameters for focusing of radial polarization [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(5): 497–499.
- Rajesh K B, Suresh N V, Anbarasan P M, *et al.*. Tight focusing of double ring shaped radially polarized beam with high NA lens axicon[J]. *Opt Laser Technol*, 2011, 43(7): 1037–1040.

- 19 Liu T, Tan J, Liu J. Tighter focusing of amplitude modulated radially polarized vector beams in ultra-high numerical aperture lens systems[J]. *Opt Commun*, 2013, 294: 21–23.
- 20 Li J, Ueda K, Musha M, *et al.*. Converging-axicon-based radially polarized ytterbium fiber laser and evidence on the mode profile inside the gain fiber [J]. *Opt Lett*, 2007, 32 (11): 1360–1362.
- 21 Kozawa Y, Yonezawa K, Sato S. Radially polarized laser beam from a Nd:YAG laser cavity with a c-cut YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Appl Phys B*, 2007, 88(1): 43–46.
- 22 Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, *et al.*. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(5): 285–287.
- 23 Wang X, Ding J, Ni W, *et al.*. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement [J]. *Opt Lett*, 2007, 32 (24): 3549–3551.
- 24 Liu S, Li P, Peng T, *et al.*. Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer [J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 21715–21721.
- 25 Dong X, Weng X, Guo H, *et al.*. Generation of radially polarized beams using spatial light modulator[J]. *Optik*, 2012, 123(5): 391–394.
- 26 Gao Xingyu, Liu Shugui. Study on focusing of radially polarized beam by high numerical aperture objective [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(10): 101801.  
高兴宇, 刘书桂. 径向偏振光高数值孔径物镜聚焦的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(10): 101801.
- 27 Kurti R S, Halterman K, Shori R K, *et al.*. Discrete cylindrical vector beam generation from an array of optical fibers[J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 13982–13988.
- 28 Richards B, Wolf E. 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.
- 29 Pereira S F, van de Nes A S. Superresolution by means of polarization, phase and amplitude pupil masks[J]. *Opt Commun*, 2004, 234(1-6): 119–124.
- 30 Lerman G M, Levy U. Tight focusing of spatially variant vector optical fields with elliptical symmetry of linear polarization[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(15): 2194–2196.
- 31 Sheppard C J R, Choudhury A. Annular pupils, radial polarization, and superresolution[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(22): 4322–4327.

栏目编辑:张 腾