

基于光瞳滤波器的径向偏振光束的聚焦整形

朱化凤^{1,2} 王天阳² 刘 佩² 付剑波² 李代林² 王 宁² 王秀民²

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)
(² 中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266555)

摘要 焦点区域的光强分布对许多光学系统的性能起到非常重要的作用。利用分区衍射光学元件和分区双半波片的组合作为光瞳滤波器,同时对径向偏振光束的相位和偏振方向进行分区调节,使其变为不同的分区柱矢量偏振光束,这样可以实现对聚焦光强分布的有效调控。利用 Matlab 数值模拟,设置不同的设计参数可以使焦平面上获得不同的光强分布。利用本方法,在焦平面上除了可以得到现有文献中报道的环形光强分布、平顶光斑光强分布外,还得到了一种平顶模式的环形光强分布。该研究结果在粒子的操控与捕获、激光微加工等许多领域有着潜在的应用价值。

关键词 物理光学;径向偏振光;聚焦光强分布;衍射光学元件;半波片

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.s126001

Focus Shaping of Radial Polarized Beam Based on Pupil Filter

Zhu Huafeng^{1,2} Wang Tianyang² Liu Pei² Fu Jianbo² Li Dailin²
Wang Ning² Wang Xiumin²

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
(² College of Science, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract The optical intensity distribution in the focal volume plays an important role on the performance for many optical systems. Effective manipulation of focused optical intensity distribution can be obtained by using a pupil filter composed by zonal optical diffractive element and zonal double half-wave plate which can modulate both the phase and the direction of polarization of incident radially polarized beam zone by zone, and turn radially polarized beam into zonal cylindrically polarized beam. Numerical simulations of Matlab show that different intensity distributions can be obtained in the focal volume. Using the method, besides the existing doughnut intensity distribution and flattop focal spot in focal plane, the flattop doughnut intensity in the focal plane with hollow three-dimension (3D) pattern is obtained. This result can find potential use in fields such as particle manipulation and caption, laser micromachining, etc.

Key words physical optics; radially polarized beam; focused optical intensity distribution; diffractive optical element; half wave plate

OCIS codes 260.5430; 260.1960; 140.3300

1 引言

柱矢量偏振光具有良好的偏振柱对称性,近年来其独特的聚焦特性被科学界所重视。柱矢量偏振

光束已经在许多尖端的科学领域得到运用,同时得到了良好的效果。比如显微镜、平板印刷^[1]、引导和捕捉粒子^[2-4]、提高存储密度^[5]。光镊为微操纵过程提供了一个非常简便且非损伤的研究方法^[6]。很

收稿日期: 2013-10-20; **收到修改稿日期:** 2013-11-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(14CX02021A, 201310425066, 20121174)、山东省自然科学基金(ZR2012DL12)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLST201204)

作者简介: 朱化凤(1977—),女,博士,副教授,主要从事光学显微成像及偏振光学工程等方面的研究。

E-mail: zhuhf@upc.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

多文献对柱矢量偏振光聚焦特性进行了研究。在许多的文献中贝塞尔高斯光束经过衍射光学元件或者半波片的调制,光束在聚焦的焦平面上呈现出许多特别的光强分布。Chen 等^[7-9]讨论了柱矢量光束聚焦整形技术,获得了长焦深及光链结构的聚焦场;周哲海等^[10]设计的两种衍射光学元件对径向偏振光的调制,实现了超小光斑及长焦深和光链结构的聚焦场分布;Zhan 等^[11]利用聚焦光束的入瞳处放置双半波片对柱矢量偏振光的偏振方向进行调制,得到了在焦平面上的呈平顶模式的光场分布。

径向偏振光作为柱矢量偏振光束家族中的重要一员,常常被用来产生其他形式的柱矢量偏振光。

本文同时借助分区衍射光学元件和双半波片对入射径向偏振光束进行分区调节,以达到对聚焦光强的调控目的。介绍了柱矢量偏振光聚焦理论和光瞳滤波器的结构和相应的聚焦光场分量表达式,并数值模拟了经过调制之后的聚焦光束的光强分布特点。

2 柱矢量偏振光聚焦理论

对于柱对称矢量偏振光聚焦后,在焦平面的中光场可以表示为

$$\mathbf{E}(r, \phi, z) = E_r \mathbf{e}_r + E_z \mathbf{e}_z + E_\phi \mathbf{e}_\phi, \quad (1)$$

径向、纵向和角向三个分量分别表示为^[12]

$$E_r(r, \phi, z) = 2A \int_0^\alpha \cos^{1/2}(\theta) \sin \theta \cos \theta J_1(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \quad (2)$$

$$E_z(r, \phi, z) = 2iA \int_0^\alpha \cos^{1/2}(\theta) \sin^2 \theta J_0(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \quad (3)$$

$$E_\phi(r, \phi, z) = 2A \int_0^\alpha \cos^{1/2} \theta \sin \theta J_1(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \quad (4)$$

式中 k 是沿光轴方向的波矢, $J_m(x)$ 是第一类 m 阶贝塞尔函数, α 是由数值孔径(NA)决定的最大光束会聚角, $\alpha = \arcsin(NA/n)$, 其中 n 为介质折射率。

3 光瞳滤波器对聚焦光束的调制理论

光瞳滤波器件是由一个衍射光学元件和一个双波片组成。将衍射光学元件和双波片平行放在聚焦系统的入瞳处,对入射光线的振幅、相位及偏振方向进行调制,光学系统的聚焦整形图如图 1 所示。

现在将衍射光学元件设置为 N 个环带的环形结构,各个环带的相对半径为 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N-1}, r_N$, 在系统中这些环带外边沿对应的光束会聚角分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 。其复振幅透射率则可以写为

$$T(\theta) = \begin{cases} a_1 \exp(i\sigma_1), & \theta \in [\theta_0, \theta_1], \\ a_2 \exp(i\sigma_2), & \theta \in [\theta_1, \theta_2], \\ \vdots \\ a_N \exp(i\sigma_N), & \theta \in [\theta_{N-1}, \theta_N], \end{cases} \quad (5)$$

式中 a_n 和 σ_n 分别为第 n 个环带复振幅透射率的振幅和相位值, $a_N \in [0, 1], \sigma_N \in [0, \pi]$ 。

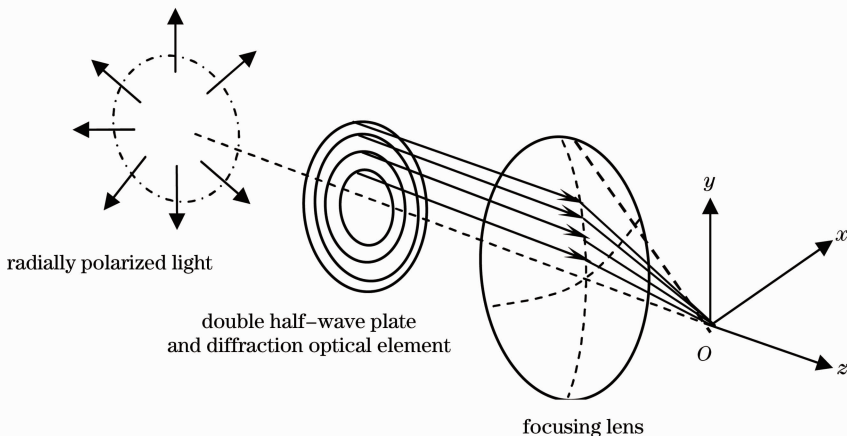


图 1 聚焦光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of focusing optical system

双半波片的结构如图 2(a)所示, L_1 是完整的一个半波片, L_2 是分区的半波片, 环带的数目与上面衍射光学元件相同。系统中不同的环带对应的波片

快轴的方向与 L_1 对应的快轴的方向之间的夹角分布分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$, 如图 2(b)所示。

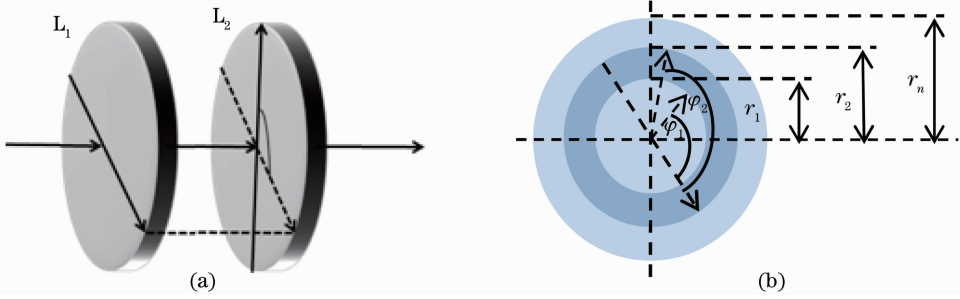


图 2 双半波片。(a)双半波片结构示意图;(b)分区半波片 L_2 结构示意图

Fig. 2 Double half-wave plates. (a) Schematic of double half-wave plates; (b) schematic of zonal half-wave plate L_2

此时, 聚焦光场的径向、纵向和角向分量分别表示为

$$E_r(r, \phi, z) = \sum_1^N 2A \cos \varphi_n \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} T(\theta) \cos^{1/2}(\theta) \sin \theta \cos \theta J_1(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \quad (6)$$

$$E_z(r, \phi, z) = \sum_1^N 2iA \cos \varphi_n \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} T(\theta) \cos^{1/2}(\theta) \sin^2(\theta) J_0(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \quad (7)$$

$$E_\phi(r, \phi, z) = \sum_1^N 2A \sin \varphi_n \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} T(\theta) \cos^{1/2}(\theta) \sin \theta J_1(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta. \quad (8)$$

基于(6)~(8)式, 可以同时通过调节不同径向区域的相位和偏振方向来调节被聚焦光束的光学性质, 从而更好地控制光束的聚焦特性。

4 数值模拟

当一束径向偏振光束入射如图 1 所示的光学系统时, 通过适当设计器件参数, 如各环带的数目和半径、波片和光轴之间的夹角等, 可以调整入射光束的相位和偏振方向从而实现聚焦光束光学特性调控。现有报道的有关通过光瞳滤波的方式对聚焦光场进行调控, 许多都是本方法的特殊情况。当 $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_N = 0$, 光束变为角向均匀偏振的情形。当不对器件进行分区(即 $n=1$)的情形, 只利用两波片对光束的偏振方向进行偏转, 情况就成变文献[11]中的情况。

通过适当的调节设计参数, 可以很容易地实现以前报道的环形光场、平顶聚焦光斑等光场分布。下面以三区环带结构为例, 并令三个环带的振幅的透射率 $a_1 = a_2 = a_3 = 1$, 衍射光学元件的三个区对应

的相位 $\sigma_1 = \pi, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = \pi$ 。半波片 L_1 和 L_2 和光轴之间的夹角分别为 φ_1, φ_2 和 φ_3 , 并取 $NA = 0.8, n=1, \lambda=980 \text{ nm}$ 。

当 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0^\circ$ 时, 令 $\theta_2 = 0.9\alpha, \theta_1$ 分别为 0.6α 和 0.8α 时光强分布图如图 3(a)和(b)所示。可以很容易地得到环形的光强分布(a)和平顶模式的聚焦光斑(b)。又如令 $\theta_1 = 0.3\alpha, \theta_2 = 0.8\alpha, \varphi_1 = 170^\circ, \varphi_2 = 40^\circ, \varphi_3 = 20^\circ$, 即通过分别调整三区的光场的偏振方向可以得到环形聚焦光强分布, 如图 3(c)所示。

当半波片的偏转角分别取 $\varphi_1 = 133.5^\circ, \varphi_2 = 23.2^\circ, \varphi_3 = 65.5^\circ$, 各环带外边沿对应的光束会聚角分别取 $\theta_1 = 0.56\alpha$ 和 $\theta_2 = 0.64\alpha$, 对应的焦平面上的光强分布如图 4 所示。由图 4 见焦平面上的光强分布呈现环形的平顶分布模式。图 5 给出的是对应的 Y-Z 平面上的光强分布图, 它是中空的三维光强分布模式。这种光强分布在激光微加工领域和粒子的操控与捕获领域具有潜在的应用价值。

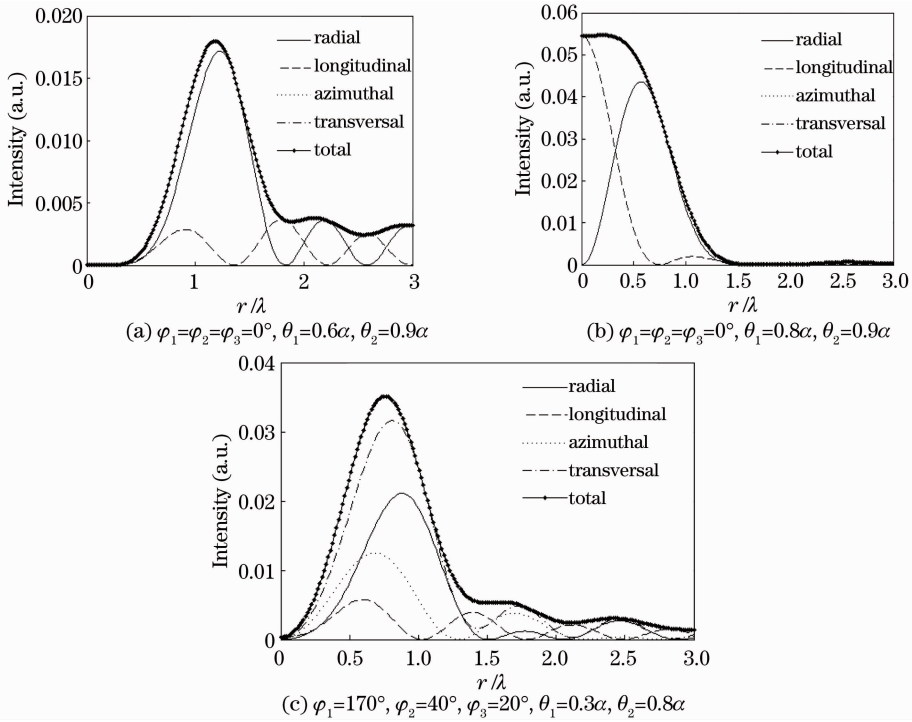


图 3 不同设计参数的滤波器对应的光强分布曲线

Fig. 3 Intensity distributions with different designing parameters of pupil filter

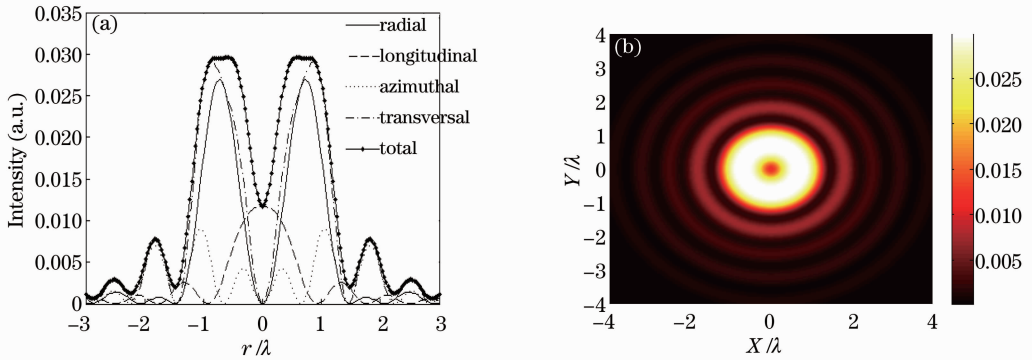


图 4 焦平面上的平顶环形光强分布图

Fig. 4 Flattop doughnut intensity in the focal plane

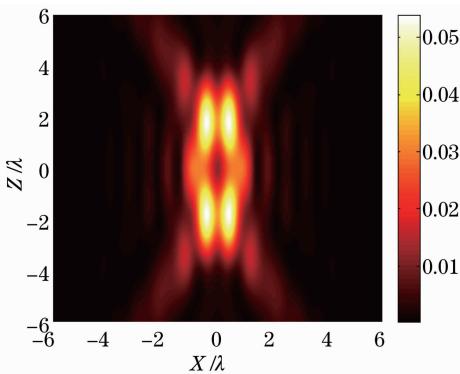


图 5 焦点区域 Y-Z 方向上的三维光强分布

Fig. 5 Three-dimensional optical intensity distribution in Y-Z plane near the focal volume

5 结 论

利用滤波器实现径向偏振光聚焦光强分布的调控。滤波器是由衍射光学元件和双半波片组成,分别对相位和光束的偏振方向进行调制。Matlab 数值模拟结果表明,可以根据光学系统的需要通过调整滤波器的不同设计参数,对焦点区域光强分布有效调控。得到了一些环形的和平顶光斑的光强分布。通过设计参数的适当选择,在焦平面上得到了环形的平顶模式的光强分布,其具有中空的三维光强分布。该研究结果在粒子的操控与捕获、激光微加工等领域将有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 M P MacDonald, G C Spalding, K Dholakia. Microfluidic sorting in an optical lattice [J]. *Nature*, 2003, 426(69651): 421–424.
- 2 Yukiko Shimizu, Hiroyuki Sasada. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(25): 4713–4716.
- 3 Qiwen Zhan. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization [J]. *Opt Express*, 2004, 12(15): 3377–3382.
- 4 Hikaru Kawauchi, Kazuhiro Yonezawa, Yuichi Kozawa, *et al.*. Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(13): 1839–1841.
- 5 Wan-Chin Kim, No-Cheol Park, Yong-Joong Yoon, *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.
- 6 Gary J Brouhard, Henry T Schek, Alan J Hunt. Advanced optical tweezers for the study of cellular and molecular biomechanics [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2003, 50(1): 121–125.
- 7 W Chen, W Zhen. Three-dimensional focus shaping with cylindrical vector beams [J]. *Opt Commun*, 2006, 265(2): 411–417.
- 8 Y Q Zhao, Q 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.
- 9 Y Q Zhao, Q Zhan, Y P Li. Design of DOE for beam shaping with highly NA focused cylindrical vector beam [C]. *SPIE*, 2005, 5636: 56–65.
- 10 Zhou Zhehai, Zhang Xiaoqing. Theory and application of focus shaping of radially polarized beams [J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University*, 2011, 26(3): 44–48.
周哲海, 张晓青. 径向偏振光束的聚焦整形及应用研究[J]. *北京信息科技大学学报*, 2011, 26(3): 44–48.
- 11 Qinwen Zhan, James R Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams [J]. *Opt Express*, 2002, 10(7): 324–331.
- 12 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