

基于相干涡旋位相调制的偏振可调柱状 矢量偏振光的产生

王轶凡 匡翠方 顾兆泰 李 帅 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 柱状矢量偏振光可广泛应用于光刻、光学微加工、光镊和光学超分辨等技术领域。为了解决现有产生柱状矢量偏振光装置结构复杂和偏振不可调等问题,从理论和实验两方面对基于相干涡旋位相调制的柱状矢量偏振光束的产生进行了研究。理论上分析和证明了相干涡旋位相调制产生偏振可调柱状矢量偏振光方案的可行性,并模拟了径向偏振光和切向偏振光经过检偏器的光强分布。同时,实验证明了理论的正确性,并通过旋转两涡旋位相板的相对角度,将获得的径向偏振光转换为切向偏振光,实验结果与理论分析一致。

关键词 衍射;柱状矢量偏振;径向偏振;切向偏振;涡旋位相板

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1005001

Generation of Polarization-Adjustable Cylindrical Vector Beams Based on Vortex Phase Modulation and Interference

Wang Yifan Kuang Cuifang Gu Zhaotai Li Shuai Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Cylindrical vector beam can be widely used in the fields of photoetching, optical micro processing, optical tweezers and optical superresolution. To overcome the existing problems of the complexity of its setup and the unadjustable polarization, generation of cylindrical vector beam with adjustable polarization based on vortex phase modulation and interference is studied both theoretically and experimentally. Feasibility of our scheme is proved in theory, and intensity distributions of radially polarized beam and azimuthally polarized beam are simulated. Meanwhile, related experiments are conducted to prove the correctness of the theory. By rotating the relative angle between two vortex phase plates, the obtained radially polarized beam can be changed into azimuthally polarized one. Experimental results are agree with the theoretical analyses.

Key words diffraction; cylindrical vector polarization; radial polarization; azimuthal polarization; vortex phase plate

OCIS codes 050.1960; 120.3180; 350.4855

1 引 言

偏振是光波的重要特性之一,被广泛应用于测量、加工和制造等多个领域。线偏振光和椭圆偏振光(包括圆偏振光)是所熟知的传统偏振模式,其共同特点是波面内各点的偏振态均相同。柱状矢量偏振光(CVB)不同于传统偏振光,其偏振方向和振幅

在光束横截面上呈柱状对称分布。径向偏振光(RPB)和切向偏振光(APB)是柱状矢量偏振光最特殊的两种形式,其独特的偏振模式引起了研究者的广泛关注。柱状矢量偏振光在高数值孔径透镜的作用下具有独特的聚焦特性^[1-3]。研究表明,入射光场的轴向分量对于聚焦光斑的大小具有重要作用,

收稿日期: 2013-04-27; 收到修改稿日期: 2013-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(61205160)、教育部博士点基金(20110101120061, 20120101130006)

作者简介: 王轶凡(1989—),男,博士研究生,主要从事光学超分辨显微和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: yifanwang@zju.edu.cn

导师简介: 匡翠方(1977—),男,博士,副教授,主要从事光学超分辨显微和光电检测等方面的研究。

E-mail: cfkuang@zju.edu.cn(通信联系人)

径向偏振光具有较强的轴向分量,其聚焦光斑要小于线偏光的聚焦光斑^[4](特别是聚焦系统中采用环形光束照明);切向偏振光聚焦光斑呈面包圈状的中空形^[5-6]。这些聚焦光斑可以作为激光微加工、光学微操纵^[7]、光信息存储、超分辨显微成像^[8]和光与物质相互作用等领域的重要工具。

1972年, Mushiake 等^[9]首次在实验中利用激光谐振得到径向偏振光。之后,随着工艺水平的提高,出现了各种产生柱状矢量偏振光束的方法。根据产生方式的不同可以分为两类:一类称为主动法,该类方法通过改造激光器的谐振腔直接选取输出柱状矢量偏振光束的模式^[10-12];另一类称为被动法,该类方法主要利用谐振腔外的光学元件将传统的偏振模式调制为柱状矢量偏振光,或者通过半波片组合的方法构成位相延迟器,或者利用空间位相板对圆偏振光进行位相补偿之后干涉叠加等来实现^[13-18]。由于主动法存在系统结构控制参数要求高且只能应用于大尺寸谐振腔激光器等不足,被动产生的方法被广泛应用。

1990年, Tidwell 等^[19]提出了一种基于马赫-曾德尔干涉光路的径向偏振光的产生方法。2013年,针对 Tidwell 的方法, Gu 等^[20]提出了一种改进的马赫-曾德尔干涉方法,可以实现偏振可调的柱状矢量偏振光,但到目前为止没有相关的实验验证。本文基于文献^[20]的理论分析,模拟了径向偏振光和切向偏振光经过检偏器后的强度分布,并从实验上验证了基于相干涡旋位相调制产生偏振可调柱状矢

量偏振光的正确性,通过旋转两涡旋位相板的相对位置,径向偏振光可转换为切向偏振光。

2 实验系统

一种生成偏振可调柱状矢量偏振光的系统如图 1 所示。激光器(592 nm, MPB 公司)发出的激光耦合进入单模保偏光纤(PMF),由单模保偏光纤出射的激光经过透镜准直,之后经 $\lambda/2$ 波片调制,由 PBS 分为两束, p 光透射并沿原传播方向继续传播, s 光反射并垂直于原传播方向传播, $\lambda/2$ 波片用来调节 s 光和 p 光的相对振幅大小;被 PBS 分开的 s 光和 p 光经由一对起始线重合涡旋位相板(RPC Photonics 公司)调制(即若 p 光 $0\sim 2\pi$ 调制,则 s 光 $2\pi\sim 0$ 调制,反之也成立)。实验采用的涡旋位相板的起始摆放方式如图 2(a)和(b)所示,以光线传播方向为 Z 轴,两块涡旋位相板起始线均与 X 轴正半轴重合;之后 p 光和 s 光分别经由反射镜反射,并于合束 PBS 处重新合为一束光,整个系统构成马赫-曾德尔干涉仪结构;两束光的偏振方向不同,根据光的独立传播定理,原本两路光中都需放置的 $\lambda/4$ 波片可以合为一片放置于合束 PBS 之后,以达到简化系统和节约成本的目的; $\lambda/4$ 波片的作用是使两线偏光分别转化为左旋圆偏光和右旋圆偏光,实验采用的摆放方案为快轴与 X 轴成 -45° 的角,经 $\lambda/4$ 波片后,两束光干涉叠加,即生成了所需的柱状矢量偏振光。

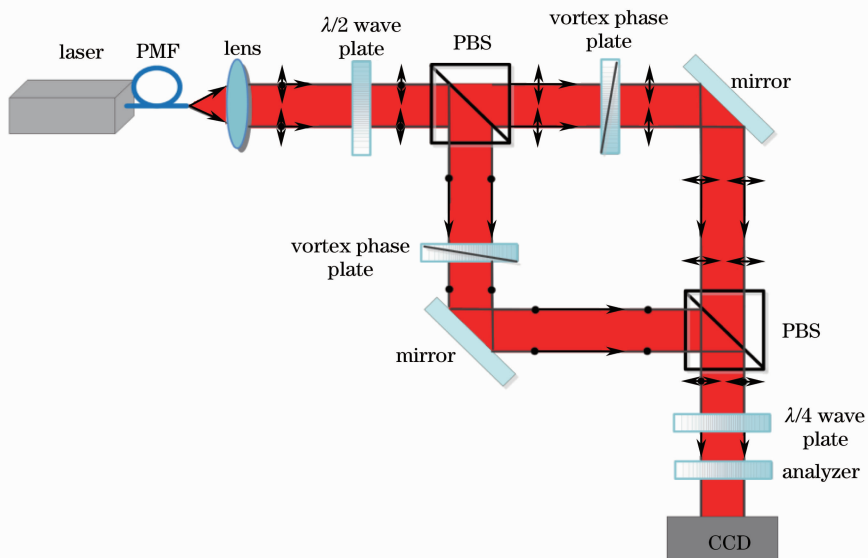


图 1 生成偏振可调柱状矢量偏振光的系统结构

Fig. 1 System setup for generating a polarization-adjustable cylindrical vector beam

为了检测生成的柱状矢量偏振光的偏振态,在 $\lambda/4$ 波片后端依次放置检偏器和 CCD(Beam on HR CCD,Duma Optronics 公司),检偏器的透光轴与 X 轴平行,CCD 与电脑相连。通过观测 CCD 上光强的分布来确定生成的偏振光。其中,采用 PBS 分束合束的方式可以提高光能利用率。

3 原理分析

为了简化数学推导,此处采用文献[20]的琼斯

矩阵分析方法。根据 p 光的传播路径,p 光依次经过 $0\sim 2\pi$ 涡旋位相板、反射镜、合束 PBS 和 $\lambda/4$ 波片,其中 $0\sim 2\pi$ 涡旋位相板提供位相调制 $\exp(i\phi)$ ($0\leq|\phi|\leq 2\pi$),涡旋位相板位相分布如图 2(a)中所示,以柱坐标系考虑即与 X 轴夹角相等的点上引入的位相大小相等,即各径向上引入的位相 $0\sim 2\pi$ 分布。对于 p 光,则 $\lambda/4$ 波片后 p 光的光场分布可由下式计算:

$$\mathbf{E}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \exp(i\phi) A \exp(-i\phi_A) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{Ar_p \exp[-i(\phi_A + \pi)]}{2} \exp(i\phi) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $A \exp(-i\phi_A)$ 为 p 光初始振幅和位相信息, r_p 和 r_s 为反射镜的反射系数。同理,对于 s 光来说,根据 s 光的传播路径,s 光经过与 p 光涡旋位相板起始线重合涡旋位相旋向相反的 $0\sim 2\pi$ 涡旋位相板、反射镜、合束 PBS 的反射面和 $\lambda/4$ 波片,根据 p 光受到的位相调制,s 光的位相调制为 $\exp(-i\phi)$ ($0\leq|\phi|\leq 2\pi$),则 s 光经 $\lambda/4$ 波片后的光场强度分布可以写成

$$\mathbf{E}_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \exp(-i\phi) B \exp(-i\phi_B) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{Br_s^2 \exp[-i(\phi_B + \pi/2)]}{2} \exp(-i\phi) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

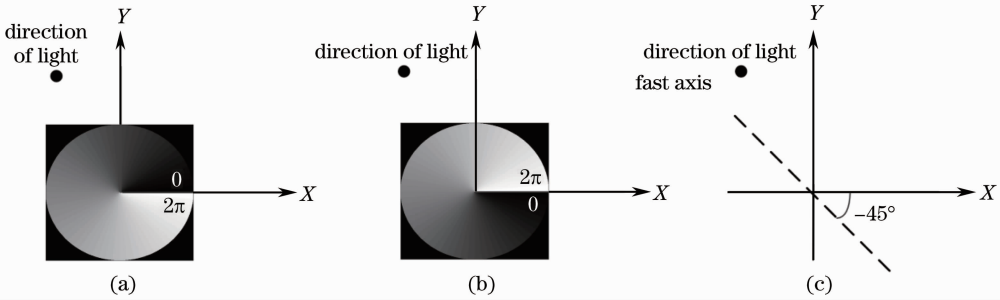


图 2 实验中摆放位置说明。(a) p 光涡旋位相板; (b) s 光涡旋位相板; (c) $\lambda/4$ 波片

Fig. 2 Introductions to positions in the experiment. (a) Vortex phase plate for the p polarization beam; (b) vortex phase plate for the s polarization beam; (c) $\lambda/4$ wave plate

式中 $B \exp(-i\phi_B)$ 是 s 光初始的振幅和位相信息。

A 和 B 的相对大小可以由 $\lambda/2$ 波片来调节,为了获取纯净的柱状矢量偏振光,可调节 A 和 B 的大小使得 A 和 B 有如下关系:

$$\frac{Ar_p}{2} = \frac{Br_s^2}{2} = C. \quad (3)$$

除各自涡旋位相板引入的位相差外,两束光的额外位相差不会影响最终柱状矢量偏振光的生成。为了

简化数学推导,调节两光路使得两束光除去涡旋位相板引入的位相外余下位相相等,设 ϕ_s 为 s 光传播光程引入的位相变化量, ϕ_p 为 p 光传播光程引入的位相变化量,即有 $\exp[-i(\phi_B + \pi/2)] \exp(-i\phi_s) = \exp[-i(\phi_A + \pi)] \exp(-i\phi_p) = \exp(-i\theta)$ 。则在 $\lambda/4$ 波片后 s 光和 p 光的光场分布可以写为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_p = C \exp(-i\theta) \left\{ \exp(i\phi) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \exp(-i\phi) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \right\} = 2C \exp(-i\theta) \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由(4)式可知,产生的光偏振的分布由角度 ϕ 来决定,不再是传统线偏光或椭圆偏光的均一分布,而是径向偏振,如图 3(a)所示。从(4)式的形式可知,只

要一个左旋圆偏光和一个右旋圆偏光分别经过起始线重合涡旋位相旋向相反的涡旋位相板调制后,其两束光的干涉叠加即为径向偏振光。

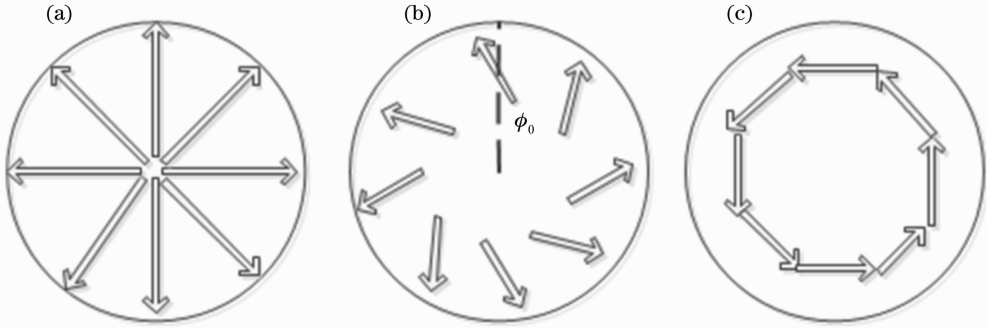


图 3 (a)径向偏振; (b) 旋转 ϕ_0 的柱状矢量偏振; (c) 切向偏振

Fig. 3 (a) Radial polarization; (b) cylindrical vector with ϕ_0 rotation; (c) azimuthal polarization

当两涡旋位相板的起始线都同时顺着或者逆着涡旋位相板的涡旋位相旋向旋转 ϕ_0 时,即两涡旋位相板的起始线之间的夹角为 $2\phi_0$ 时,(4)式可改写为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_p = C \exp(-i\theta) \left\{ \exp[i(\phi + \phi_0)] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \exp[-i(\phi + \phi_0)] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \right\} = 2C \exp(-i\theta) \begin{bmatrix} \cos(\phi + \phi_0) \\ \sin(\phi + \phi_0) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则可以得到一个偏振可调的柱状矢量偏振光,如图 3(b)所示。结合(4)式和(5)式可以看出,经涡旋位相旋向相反的涡旋位相板调制的左旋圆偏光和右旋圆偏光的干涉叠加可以生成偏振可调的柱状矢量光,其偏振方向与两涡旋位相板的起始线夹角有关。

特殊情况:当 $\phi_0 = \pi/2 + 2q\pi$ (q 是整数) 时,即两涡旋位相板的起始线之间的夹角为 π 时,径向偏振光可以转变为切向偏振光,如图 3(c)所示。此时,切向偏振光的公式可以表示为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_p = C \exp(-i\theta) \left\{ \exp[i(\phi - \pi/2)] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \exp[-i(\phi + \pi/2)] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \right\} = 2C \exp(-i\theta) \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (6)$$

最终生成的柱状矢量偏振光经由检偏器和 CCD 来检验。设检偏器的光轴沿 X 轴,则经过检偏器后,径向偏振光的光矢量分布为

$$\mathbf{E}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} 2C \exp(-i\theta) \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} = 2C \exp(-i\theta) \begin{bmatrix} \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

切向偏振光的光矢量分布为

$$\mathbf{E}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} 2C \exp(-i\theta) \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix} = 2C \exp(-i\theta) \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

则 CCD 上径向偏振光的归一化光强可以写为

$$I_R = \cos^2 \phi, \quad (9)$$

CCD 上切向偏振光的归一化光强可以写为

$$I_A = \sin^2 \phi. \quad (10)$$

以上推导过程中,若左旋圆偏光和右旋圆偏光确定,则对两涡旋位相板的要求仅是涡旋位相旋向相反,

并未要求起始线的位置,则说明起始线位置并不影响最终结果的生成。起始线位置的任意性又说明了最终径向偏振光或者切向偏振光的生成仅与两起始线的夹角有关,则生成切向偏振光时只要两起始线夹角满足 π 即可,可只旋转其中一只位相板,即有下式成立:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_p = C \exp(-i\theta) \left\{ \exp[i(\phi - \pi)] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \exp(-i\phi) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \right\} = 2C \exp[-i(\theta - \pi/2)] \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (11)$$

4 仿真与实验结果

根据(9)、(10)式,径向偏振光和切向偏振光经过透光轴平行于 X 轴的检偏器,其强度的模拟结果如图 4(a)、(b)所示。由于柱状矢量偏振光中心的偏振态是混乱的(光束在中心点的干涉或者衍射作用),所以中心点的强度为零,从仿真结果中也可以看出中心存在强度为零的偏振奇点。

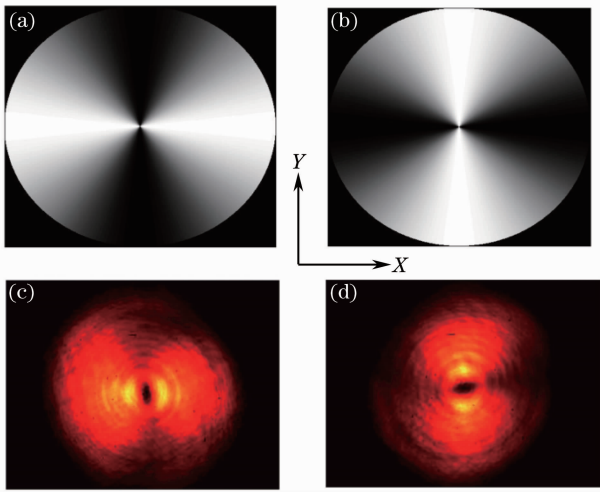


图 4 偏振光通过检偏器后的光强分布。(a)径向,模拟;(b)切向,模拟;(c)径向,观测;(d)切向,观测

Fig. 4 Intensity distribution of polarized beam after analyzer. (a) Radial, simulated; (b) azimuthal, simulated; (c) radial, experimental; (d) azimuthal, experimental

按照图 1 进行实验,打开激光器,调节 p 光和 s 光的强度,使得两束光满足(3)式。一开始两涡旋位相板起始线均在 X 轴正轴,旋向相反,则在 CCD 上观测到的强度分布图如图 4(c)所示,对比图 4(a),与径向偏振光的理论结果一致。然后旋转 s 光(或者 p 光)的涡旋位相板 180° ,在 CCD 上观测到的强度分布如图 4(d)所示,对比图 4(b),与切向偏振光的理论结果一致。其中需要注意的是,实验结果中的中心椭圆暗斑是由于系统本身的像差和实际系统的干涉、衍射等造成的中心偏振奇点扩大,并不与理论分析矛盾。实验验证了基于相干涡旋位相调制的柱状矢量偏振光束的产生方法的正确性,同时也验证了偏振可调理论的正确性:通过旋转两涡旋位相板,可以获得偏振可调的柱状矢量偏振光。

5 结 论

本文从理论和实验两方面验证了基于相干涡旋位相调制偏振可调柱状矢量偏振光产生方法的正确性。理论上通过基于琼斯矩阵的偏振理论分析,证明了经过涡旋位相旋向相反涡旋位相板调制的左旋圆偏光和右旋圆偏光干涉叠加可以获得柱状矢量偏振光,具体偏振方向与两涡旋位相旋向相反涡旋位相板的起始线夹角相关。实验上通过搭建类似于马赫-曾德尔干涉系统的光路系统,验证了基于相干涡旋位相调制产生柱状偏振光理论的正确性,同时也验证了系统产生的柱状矢量偏振光偏振可调的特性。柱状矢量偏振光可广泛应用于光刻、光学微加工、光镊和光学超分辨等技术领域,有着广泛的应用前景。实验系统简单,调节方便,可以作为柱状矢量偏振光产生方法的参考。

参 考 文 献

- 1 Y Xue, C Kuang, S Li, *et al.*. Sharper fluorescent super-resolution spot generated by azimuthal polarized beam in STED microscopy [J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 17653–17666.
- 2 Y Xue, C Kuang, X Hao, *et al.*. A method for generating a three-dimensional dark spot using a radially polarized beam [J]. *J Optics*, 2011, 13(12): 125704.
- 3 K Prabhakaran, R Chandrasekaran, G Mahadevan, *et al.*. Tight focusing of generalized cylindrical vector beam with high NA lens axicon [J]. *Opt Commun*, 2013, 295: 230–234.
- 4 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.
- 5 Q Zhan. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Adv Opt Photon*, 2009, 1(1): 1–57.
- 6 X Hao, C Kuang, Y Li, *et al.*. Manipulation of doughnut focal spot by image inverting interferometry [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(5): 821–823.
- 7 X Hao, C Kuang, Y Li, *et al.*. A focal spot with variable intensity distribution for optical tweezers [J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(4): 045602.
- 8 Guo Ling, Li Jinsong. Phase pupil filter with cosine function for sharper focus of radially polarized beam [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121001.
- 郭玲,李劲松.余弦型相位光瞳滤波器缩小径向偏振光焦斑[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121001.
- 9 Y Mushiake, K Matsumura, N Nakajima. Generation of radially polarized optical beam made by laser oscillation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1972, 60(9): 1107–1109.
- 10 J Li, K Ueda, M Musha, *et al.*. Generation of radially polarized mode in Yb fiber laser by using a dual conical prism [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(20): 2969–2971.
- 11 Y Kozawa, S Sato. Generation of a radially polarized laser beam

- by use of a conical Brewster prism [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(22): 3063–3065.
- 12 K Yonezawa, Y Kozawa, S Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a c-cut Nd:YVO₄ crystal [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(14): 2151–2153.
- 13 K Moh, X C Yuan, J Bu, *et al.*. Generating radially or azimuthal polarization by axial sampling of circularly polarized vortex beams [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(30): 7544–7551.
- 14 Q Hu, Z Tan, X Weng, *et al.*. Design of cylindrical vector beams based on the rotating Glan polarizing prism [J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 7343–7353.
- 15 G Machavariani, Y Lumer, I Moshe, *et al.*. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1468–1470.
- 16 Tang Xinchun, Gao Jiancun, Wang Kun, *et al.*. Generation of a radially polarized light and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 030001.
唐新春, 高健存, 王 坤, 等. 径向偏振光的产生方法及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 030001.
- 17 Huang Yan, Ye Hong'an, Gao Laixu, *et al.*. New method of generating vectorial polarized beams [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0402004.
黄 妍, 叶红安, 高来勛, 等. 矢量偏振光束产生新方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0402004.
- 18 Chen Hao, Ding Jianping. Generation of phase adjustable nonuniform polarization beam [C]. *Five Provinces Optics (Laser) Institution Academic Conference of Lu Yu Gan Hei Su*, 2011.
陈 浩, 丁剑平. 位相可调的非均匀偏振光束的产生 [C]. *鲁豫赣黑苏省光学(激光)学会 2011 学术年会论文摘要集*, 2011.
- 19 S C Tidwell, D H Ford, W D Kimura. Generating radially polarized beams interferometrically [J]. *Appl Opt*, 1990, 29(15): 2234–2239.
- 20 Z Gu, C Kuang, S Li, *et al.*. An interferential method for generating polarization-rotatable cylindrical vector beams [J]. *Opt Commun*, 2013, 286: 6–12.

栏目编辑: 张 腾