

# 一种柱状矢量偏振光的检测与评价方法

修 鹏 江芸珊 王轶凡 匡翠方 李 帅 刘 旭

(浙江大学光电系, 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 针对非均匀复杂偏振光束难以用一种偏振状态描述的现象, 提出了一种点对点的偏振光检测方法, 该方法能够同时检测光束横切面内所有点的偏振态, 为非均匀偏振光描述提供足够的信息, 解决了柱状矢量偏振光光束的质量检测问题。运用这种方法, 对已知偏振光束进行验证检验取得了良好的效果, 证明了该方法可以作为一种可靠、稳定的方法用于柱状矢量偏振光检测与评价。另外, 一些描述柱状矢量偏振光均匀性的参数被重新定义, 为柱状偏振光的质量描述提供了量化指标。

**关键词** 物理光学; 光电检测; 柱状矢量偏振光检测; 径向偏振; 切向偏振

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0612002

## Measuring Method and Evaluation of Cylindrical Vector Polarized Beams

Xiu Peng Jiang Yunshan Wang Yifang Kuang Cuifang Li Shuai Liu Xu

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

**Abstract** The polarization state of inhomogeneous complex polarized beam is hard to describe and detect. A point-to-point polarized light measuring method is proposed which can get the polarization of all the points in the cross section in one detection and provide enough information describing inhomogeneous polarized beam, especially describing radially and azimuthally polarized beams. Detecting known polarized beams with this method, good results are obtained, which demonstrate the point-to-point method stable and reliable to detect the cylindrical vector beams. Parameters used to depict the uniformity of cylindrical polarization beams are also redefined, which provide the quantitative indexes supporting the measurement of cylindrical polarization beams.

**Key words** physical optics; photoelectric detection; cylindrical vector polarized beam detection; radially polarization; azimuthally polarization

**OCIS codes** 120.3180; 050.1960; 350.4855

## 1 引 言

非均匀偏振光整个波面范围内的每一个点都具有特定的偏振态, 通过一定方法使这些偏振态按照一定要求排布, 这种非均匀偏振光就可能产生特殊的效果, 进而扩展提高光学系统的功能或者性能, 近年来受到越来越多的研究者青睐。柱状矢量偏振光是一种重要的非均匀偏振光类型, 其波面内电场振幅和偏振态都呈圆对称分布, 而径向偏振光和切向

偏振光又是柱状偏振光的两种典型案例。由于这两种柱状矢量偏振光束具有能够聚焦成更小光斑的能力<sup>[1-5]</sup>, 因此, 被广泛应用在共聚焦显微术、光镊技术、印刷术和激光加工上<sup>[6-9]</sup>。目前, 已提出许多主动或被动产生柱状矢量偏振光的方法, 例如利用液晶偏振转换器、空间变介质亚波长光栅、双折射率晶体法、干涉法等产生满足要求的柱状矢量偏振光<sup>[10-15]</sup>, 但产生的光束与预期目标之间的差距, 通

**收稿日期**: 2013-11-18; **收到修改稿日期**: 2014-01-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(61205160, 61378051, 61377013, 61335003)、教育部博士点基金(20110101120061, 20120101130006)

**作者简介**: 修 鹏(1988—), 男, 硕士, 主要从事光学超分辨显微和数字图像处理方面的研究。

E-mail: xiupeng34687@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方面的研究。

E-mail: cfkuang@zju.edu.cn(通信联系人)

过现有的偏振检测方法无法快速准确测量,因此,如何对柱状矢量偏振光进行准确快速的质量检测是柱状矢量偏振光应用领域一项非常急迫的任务。在过去的研究中,研究人员们提出了许多对柱状矢量偏振光束质量描述的参数,例如偏振角度、圆偏振分量,以及切向偏振和径向偏振分量<sup>[16-19]</sup>。不同于均匀偏振光,非均匀偏振光每个点的偏振态都是独立的,所以准确描述非均匀偏振光的偏振状态必须以准确描述波面内每一个点的偏振态为前提,因此点对点的测量方法是对柱状矢量偏振光质量检测快捷有效的方法。另外,为了对柱状矢量偏振光的光束质量进行评价,重新定义了一些描述柱状矢量偏振光的参数,能够量化评价柱状矢量偏振光的质量。

## 2 原理与定义

### 2.1 斯托克斯参量

对于平行光束,其横向电场  $E(r, \theta)$  通常表达为  $E(r, \theta) = [E_x(r, \theta), E_y(r, \theta)]$ , 其振动信息可以用著名的斯托克斯公式表示<sup>[20]</sup>, 简化起见, 省略掉右边的  $(r, \theta)$ :

$$\begin{cases} s_0(r, \theta) = E_x^* E_x + E_y^* E_y \\ s_1(r, \theta) = E_x^* E_x - E_y^* E_y \\ s_2(r, \theta) = E_x^* E_y + E_x E_y^* = 2\text{Re}(E_x^* E_y) \\ s_3(r, \theta) = -i(E_x^* E_y - E_x E_y^*) = 2\text{Im}(E_x^* E_y) \end{cases} \quad (1)$$

斯托克斯参量的优势是计算所需的参量都可以通过直接测量得到, 利用 CCD、偏振片和四分之一波片探测不同角度透射偏振片后的光强信息, 可以计算得到光束波面内每一点的斯托克斯参量:

$$\begin{cases} s_0(r, \theta) = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ s_1(r, \theta) = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ s_2(r, \theta) = I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ s_3(r, \theta) = I_{\lambda/4, 45^\circ} - I_{\lambda/4, 135^\circ} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $I$  代表光强, 下标  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  表示接收到的光强对应偏振片的透射角度与  $x$  方向的夹角分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ , 最后一个公式里的  $\lambda/4$  表示光束通过了一个四分之一波片(波片的快轴与  $x$  轴方向重合)。斯托克斯参量满足如下公式, 当且仅当光束为完全偏振的时候等号成立:

$$s_0^2(r, \theta) \geq s_1^2(r, \theta) + s_2^2(r, \theta) + s_3^2(r, \theta). \quad (3)$$

### 2.2 径向偏振光与切向偏振光分量定义

某点的横向电场  $E(r, \theta)$ , 那么它的径向分量和切向分量分别定义为  $E_R, E_\theta$ :

$$\begin{cases} E_R(r, \theta) = E_x(r, \theta) \cos \theta + E_y(r, \theta) \sin \theta \\ E_\theta(r, \theta) = -E_x(r, \theta) \sin \theta + E_y(r, \theta) \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

所以径向和切向偏振光的强度可以定义为

$$I_R(r, \theta) = E_R^*(r, \theta) E_R(r, \theta) = \frac{1}{2} s_0 + \frac{\cos 2\theta}{2} s_1 + \frac{\sin 2\theta}{2} s_2, \quad (5)$$

$$I_\theta(r, \theta) = E_\theta^*(r, \theta) E_\theta(r, \theta) = \frac{1}{2} s_0 - \frac{\cos 2\theta}{2} s_1 - \frac{\sin 2\theta}{2} s_2, \quad (6)$$

式中  $s_0, s_1, s_2$  为(1)式中提到的斯托克斯参量, 可以根据(2)式计算得到, 由此可以准确得到光波截面内每一点的径向和切向光分量强度  $I_R, I_\theta$ 。径向偏振光强占该点总光强的比重(下面成为径向分量)为

$$\rho_R(r, \theta) = \frac{I_R(r, \theta)}{I(r, \theta)} = \frac{1}{2} + \frac{\cos 2\theta}{2} \frac{s_1}{s_0} + \frac{\sin 2\theta}{2} \frac{s_2}{s_0}, \quad (7)$$

式中  $I(r, \theta)$  代表总光照强度  $I(r, \theta) = s_0$ , 类似的切向分量可以表示为

$$\rho_\theta(r, \theta) = \frac{I_\theta(r, \theta)}{I(r, \theta)} = \frac{1}{2} - \frac{\cos 2\theta}{2} \frac{s_1}{s_0} - \frac{\sin 2\theta}{2} \frac{s_2}{s_0}, \quad (8)$$

式中  $\rho_R(r, \theta) + \rho_\theta(r, \theta) = 1$ 。

为了计算全局的径向分量和切向分量, 对整个光截面求平均, 可以得到

$$\bar{\rho}_R = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_R(r, \theta) I(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I(r, \theta) r dr d\theta}, \quad (9)$$

$$\bar{\rho}_\theta = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_\theta(r, \theta) I(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I(r, \theta) r dr d\theta}. \quad (10)$$

利用上述参数, 可以计算出  $\rho_R, \rho_\theta$  的方差  $\sigma_R^2, \sigma_\theta^2$ :

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_R^2 &= \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \sqrt{[\rho_R(r, \theta) - \bar{\rho}_R]^2} I(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I(r, \theta) r dr d\theta} \\ \sigma_\theta^2 &= \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \sqrt{[\rho_\theta(r, \theta) - \bar{\rho}_\theta]^2} I(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I(r, \theta) r dr d\theta} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

这两个参量全局性的描述了  $\rho_R(r, \theta)$  和  $\rho_\theta(r, \theta)$  的离散程度, 表征了在柱状矢量偏振光束切面内每

一点偏振态的一致性程度,它们的值越小表明整个光波界面内的偏振态越一致,偏振性质越好。由  $I_\theta = I - I_R, \bar{\rho}_\theta = 1 - \bar{\rho}_R$  可知  $\sigma_\theta^2 = \sigma_R^2$ 。因此,只需求出其中一个参量就可以描述光束的偏振一致性。

### 3 实验设计与结果讨论

#### 3.1 实验设计

根据理论分析中的方法,搭建了如图 1 所示的系统。1)光源部分,激光器出射的光束经过光纤准直滤波得到均匀的平行光,图中 CS 表示光纤滤波准直系统;2)设定偏振光束产生部分,该部分由两个偏振片(P)和液晶偏振转换器组成,调整两个偏振片的角度来调整入射到液晶偏振转换器上光的光强和偏振方向,液晶偏振转换器能够根据施加的电压点对点的把均匀线偏光转换为设定偏振光类型;3)斯托克斯参量检测部分,该部分由可以选择的偏振片和 CCD 组成。根据原理分析可知,柱状矢量偏振光检测只需测量斯托克斯参量的前三项就可计算出光的径向分量和切向分量,因此在该部分没有设计四分之一波片。

设计了均匀线偏振光验证、径向偏振光验证和切向偏振光验证三个验证实验,均匀线偏振光由偏振片产生,径向偏振光和切向偏振光由液晶偏振转换器产生。通过这些对已知偏振态的偏振光的测量来验证这种点对点柱状矢量偏振光测量方法的可靠性。

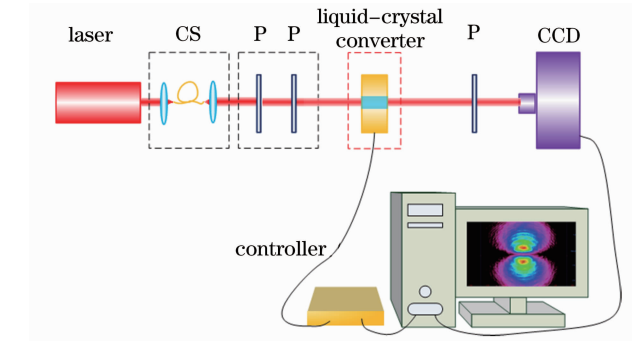
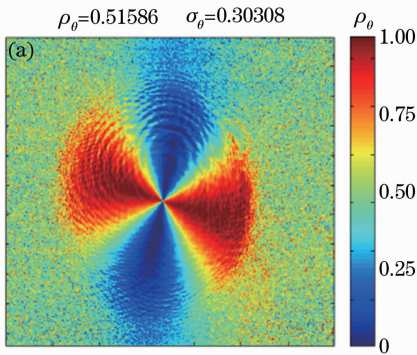


图 1 点对点柱状矢量偏振光产生及检测系统  
Fig. 1 Experimental setup to produce and synthesis the cylindrical beam

#### 3.2 实验结果与讨论

实验中可以得到非常准确的均匀线性偏振光,因此可以用均匀线偏振光作为标定基准来验证点对点偏振检测方法的准确性。实验得到整个切面内的径向分量和切向分量比重分别为  $\bar{\rho}_R = 0.484, \bar{\rho}_\theta = 0.516$ ,与理论的  $\bar{\rho}_R = \bar{\rho}_\theta = 0.5$  非常接近,误差在 3% 左右,说明这种点对点的偏振光检测方法是可靠的。图 2(a) 展示了  $\rho_\theta$  的大小及分布情况(因为  $\rho_\theta + \rho_R = 1$ ,所以  $\rho_\theta$  的分布情况,即可表征整个光束切面内的偏振态分布,深红色代表  $\rho_\theta = 1$ ,为完全切向偏振,深蓝色代表  $\rho_\theta = 0$ ,为完全径向偏振),图 2(a) 的周围各种色彩的点是由噪声导致,由于噪声的随机性,整个光斑进行评价时噪声会相互抵消不影响最终结果。

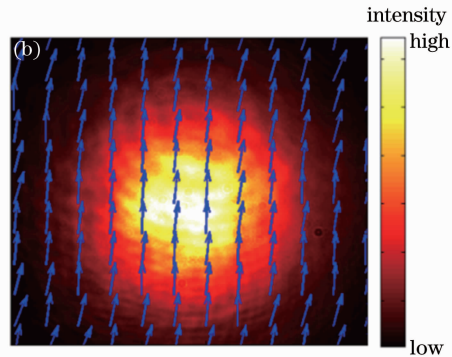


图 2 均匀线偏振光每点偏振信息。(a)  $\rho_\theta$  值的分布图;(b)均匀线偏光每点偏振方向

Fig. 2 Polarization information of every point on the spot of uniformly linearly polarized light. (a) Value and distribution of  $\rho_\theta$ ; (b) direction of linear polarization

图 2(b)上的箭头表示的是这种点对点的偏振检测方法得到的光束切面内每点的偏振态,可以看出整个波面内都是非常均匀的单方向排布,与均匀线偏光的性质吻合,从而证明了点对点偏正检测方法的可靠性。

径向偏振光验证实验中,测量光束斯托克斯参量得到的图像如图 3 所示,由于光束相位补偿板边缘衍射,导致图像上有明显的条纹,但由于斯托克斯参量计算时利用的是同一点在四张图上的相对光强信息,所以条纹不会影响偏振测量结果。

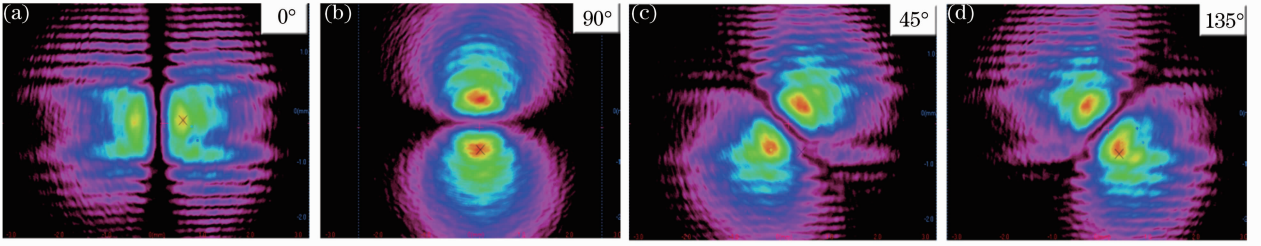


图 3 径向偏振光透过偏振片强度分布。(右上角角度标签代表检偏器透过轴与  $x$  方向的夹角)

Fig. 3 Irradiance distribution of the radically polarized beam emerging from the polarizer (whose transmission axis making  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  with the  $x$ -direction)

通过对测得的斯托克斯参量处理计算,得到切向偏振分量计算结果如图 4(a)所示,  $\bar{\rho}_R = 0.9372$ ,  $\bar{\rho}_\theta = 0.0628$ ,  $\sigma_R^2 = \sigma_\theta^2 = 0.0544$ , 其偏振方向如图 4(c)所示。实验结果吻合了径向偏振光各点的偏振状态。同样的方式进行切向偏振光验证实验,得到的切向分量结果如图 4(b)所示,  $\bar{\rho}_R = 0.0505$ ,

$\bar{\rho}_\theta = 0.9496$ ,  $\sigma_R^2 = \sigma_\theta^2 = 0.0447$ , 其偏振方向如图 4(d)所示。待测切向偏振光各点的偏振状态也被准确地检测到。图 4(c)、(d)光斑的中心有一个黑点,是由于圆柱矢量偏振光偏振态的圆对称性导致,直观上表现了圆柱矢量偏振光的特点。

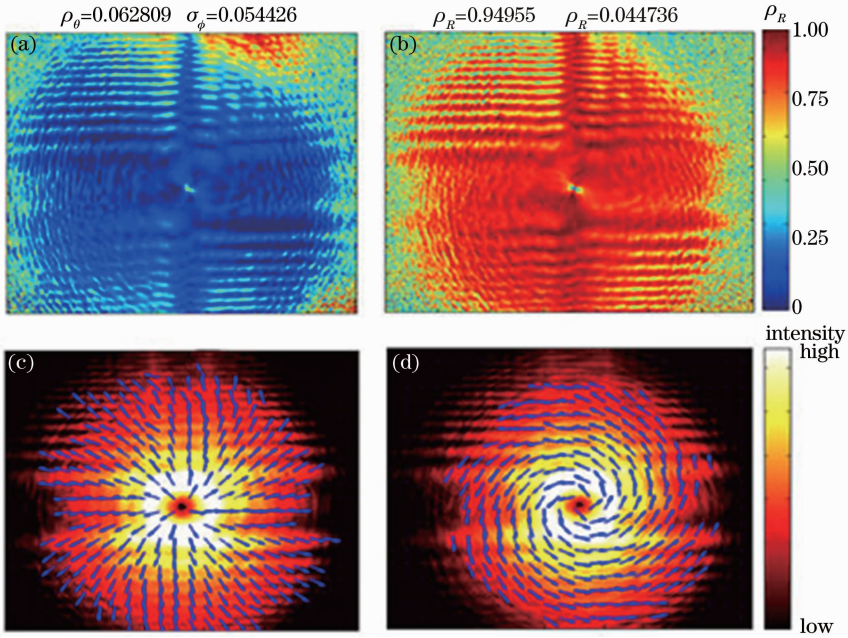


图 4  $\rho_\theta$  和偏振方向分布图。(a)径向偏振光  $\rho_\theta$  分布;(b)切向偏振光  $\rho_\theta$  分布;(c)径向偏振光偏振分布;(d)切向偏振光偏振分布

Fig. 4 Value of  $\rho_\theta$  and direction of polarization at each point of the cylindrical vector beams. (a) Radical polarization; (b) azimuthal polarization; (c) radically polarized beam; (d) azimuthally polarized beam

径向偏振光与切向偏振光的验证实验证明了点对点的偏振光检测方法能够准确测量出柱状矢量偏振光横向切面内各点的偏振态,  $\sigma_R^2$ 、 $\sigma_\theta^2$  的引入能够评价柱状矢量偏振光的均匀性,表征了柱状矢量偏振光偏振质量的优劣。

## 4 结 论

对如何精确地检测与评价柱状矢量偏振光的质量进行了研究,提出了点对点柱状矢量偏振光检测

方法。通过均匀线偏光、径向偏振光和切向偏振光三个验证实验,证明了这种点对点柱状矢量偏振光检测方法的准确性与可靠性。同时,还提出了  $\sigma_\theta^2$ 、 $\sigma_R^2$  对径向偏振光和切向偏振光的全局描述,为径向偏振光和切向偏振光的质量评价提供了量化指标。另外,如果在点对点柱状矢量偏振光的光路中加入四分之一波片,系统便能够测量光波界面内每个点的完整斯托克斯参量,进而对任意复杂的非均匀偏振光进行检测,为光波偏振调制应用的进一步发展提供

了测量基础。

### 参 考 文 献

- 1 K Youngworth, T Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Opt Express*, 2000, 7(2): 77–87.
- 2 Q Zhan, J R Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams [J]. *Opt Express*, 2002, 10(7): 324–331.
- 3 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.
- 4 X Hao, C Kuang, T Wang, *et al.*. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(23): 3928–3930.
- 5 C Kuang, X Hao, X Liu, *et al.*. Formation of sub-half-wavelength focal spot with ultra long depth of focus [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(7): 1766–1769.
- 6 B Jia, H Kang, J Li, *et al.*. Use of radially polarized beams in three-dimensional photonic crystal fabrication with the two-photon polymerization method [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(13): 1918–1920.
- 7 Q Zhan. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization [J]. *Opt Express*, 2004, 12(15): 3377–3382.
- 8 X L Wang, J Ding, J Q Qin, *et al.*. Configurable three-dimensional optical cage generated from cylindrical vector beams [J]. *Opt Commun*, 2009, 282(17): 3421–3425.
- 9 Q Zhan. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Adv Opt Photon*, 2009, 1(1): 1–57.
- 10 Wang Yifan, Kuang Cuifang, Gu Zhaotai, *et al.*. Generation of polarization-adjustable cylindrical vector beams based on vortex phase modulation and interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1005001.  
王轶凡, 匡翠方, 顾兆泰, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1005001.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Huang Jintang, Wei Weilei, Zhang Yuan, *et al.*. Generation of cylindrical vector beams by use of C-cut YVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(2): 557–561.  
黄金堂, 韦玮雷, 张 源, 等. 利用 C 切钒酸钇晶体产生轴对称偏振光 [J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 557–561.
- 14 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, 高来勋, 等. 矢量偏振光束产生新方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0402004.
- 15 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.
- 16 Qin Zhaoyu, Cheng Zhaogu, Zhang Zhiping, *et al.*. High-speed and real-time measurement of Stokes parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 659–662.  
覃兆宇, 程兆谷, 张志平, 等. 偏振光斯托克斯参量的高速实时测量技术 [J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 659–662.
- 17 J M Movilla, G Piquero, R Martínez-Herrero, *et al.*. Parametric characterization of non-uniformly polarized beams [J]. *Opt Commun*, 1998, 149(4): 230–234.
- 18 G Piquero, J M Movilla, P M Mejías, *et al.*. Degree of polarization of non-uniformly partially polarized beams: a proposal [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1999, 31(3): 223–226.
- 19 R M Herrero, P M Mejías, G Piquero. Overall parameters for the characterization of non-uniformly totally polarized beams [J]. *Opt Commun*, 2006, 265(1): 6–10.
- 20 R M Herrero, P M Mejías. Stokes-parameters representation in terms of the radial and azimuthal field components: a proposal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(7): 1099–1102.

栏目编辑: 张浩佳