

# 矢量偏振光束产生新方法

黄 妍 叶红安 高来勛 张 敏 刘书钢

(黑龙江大学黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 为了解决现有矢量偏振光束(VPB)产生装置结构复杂、成本高等问题,提出了利用一种由多个线型偏振器件构成的同心圆环装置即显偏器(PAF)产生矢量偏振光束的新方法。基于显偏器的特殊结构特点,由 LED 光源输出的自然光束经显偏器,可产生角向偏振光束(APB),再经两个快轴成  $45^\circ$  角的半波片可将角向偏振光束转换成径向偏振光束(RPB)。采用此方法获得的矢量偏振光束经线偏振片验证其光强分布情况,研究发现所得结果与已发表的实验结果相符,验证了该方法的有效性和实用性。

**关键词** 物理光学;矢量偏振光束;显偏器;角向偏振光束;径向偏振光束

**中图分类号** O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0402004

## New Method of Generating Vectorial Polarized Beams

Huang Yan Ye Hong'an Gao Laixu Zhang Min Liu Shugang

(Key Laboratory of Electronics Engineering, College of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** In order to resolve the complicated structure and higher cost problems with current vectorial polarized beams (VPB) generating devices, a new method of generating vectorial polarized beams is proposed by using a ring device with many linear polarizer components concentric circles which is called polarization axis finder (PAF). Based on the special structure property of PAF, nature light emitted by a light emitting diode (LED) encounters the PAF, and then the azimuthally polarized beam (APB) is formed. A polarization transformation of APB to radially polarized beam (RPB) is consisted of two half-wave plates with angle of  $45^\circ$  between the two fast axes. The intensity distributions with different polarizer directions for vectorial polarized beams are observed. The experimental results generally agree with the results previously reported, which can verify the validity and practicality of this method.

**Key words** physical optics; vectorial polarized beam; polarization axis finder; azimuthally polarized beam; radially polarized beam

**OCIS codes** 260.5430; 230.5440; 230.3670

## 1 引 言

矢量偏振光束(VPB)的空间偏振分布引起的特殊性质,使其与线偏振光、圆偏振光有许多显著的不同,引起了研究者的广泛关注。径向偏振光束(RPB)经高数值孔径聚焦后,焦点处光斑直径比空间偏振态均匀分布的光源(如线偏振光)的光斑直径

小,且焦点光场具有很强的纵向分量,对瑞利金属粒子具有非常强的俘获特性<sup>[1]</sup>;径向偏振光束沿光轴方向具有轴对称的电场分布,其光束为中空圆环型<sup>[2]</sup>;径向、角向偏振光束(APB)都是偏振本征态,它们在  $c$  切向晶体中传播时,不会发生串扰现象<sup>[3]</sup>。基于以上诸多特性,矢量偏振光束在多种领域得到

**收稿日期**: 2011-11-17; **收到修改稿日期**: 2011-12-30

**基金项目**: 黑龙江省教育委员会海外学人项目(1251HZ002)和黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室项目(DZZD20100014)资助课题。

**作者简介**: 黄妍(1981—),女,博士研究生,讲师,主要从事光学传感及检测技术等方面的研究。

E-mail: huangyan@hlju.edu.cn

**导师简介**: 叶红安(1950—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学传感及检测技术等方面的研究。

E-mail: yehongan@hlju.edu.cn(通信联系人)

了广泛的应用,例如引导和捕捉粒子<sup>[4]</sup>、粒子加速<sup>[5]</sup>、提高显微镜的分辨率<sup>[6]</sup>、金属切割<sup>[7]</sup>、提高存储密度<sup>[8]</sup>以及表面等离子体共振(SPR)<sup>[9]</sup>等方面。随着人们对矢量偏振光束认识的不断深入,它将在越来越多的领域得到应用。

本文提出了利用一种由多个线型偏振器件构成的同心圆环装置产生角向偏振光束,经两个快轴成45°角的半波片可将其转换为径向偏振光束,这种方法已经申请发明专利,国家知识产权局已经开始受理<sup>[10]</sup>。采用此方法获得的矢量偏振光束经线偏振片验证其光强分布情况,研究发现所得结果与参考文献<sup>[11]</sup>已发表的实验结果相符,验证了该方法的有效性和实用性。

## 2 矢量偏振光束的概念

矢量偏振光束空间每一点的振动方向均与半径方向成 $\phi_0$ 角,如图1所示<sup>[12]</sup>。

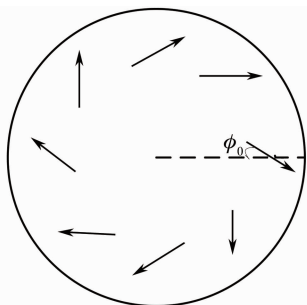


图1 矢量偏振光束一般形式  
Fig. 1 Generalized form of VPB

矢量偏振光束在柱坐标中的电场分布为

$$\mathbf{E}(r, \theta) = E_0(r)(r \cos \phi_0 + \theta \sin \phi_0), \quad (1)$$

式中 $\mathbf{r}$ 是径向单位矢量, $\theta$ 是角向单位矢量, $E_0(r)$ 是孔径切趾函数,表示电场的相对振幅,并且电场的相对振幅与径向有关。由此得出,轴对称径向偏振光束和轴对称角向偏振光束的线性叠加构成了轴对称矢量偏振光束。

当 $\phi_0 = 90^\circ$ 时,表示角向偏振光束,如图2(a)所示;当 $\phi_0 = 0^\circ$ 时,表示径向矢量光束,如图2(b)所示。

## 3 矢量偏振光束的产生

近几年研究者纷纷寻找各种有效的方法来产生矢量偏振光束,其产生方法可以分为两类:一类是腔内法,即在激光腔内直接添加特殊光学元器件产生径向或角向偏振光束<sup>[13]</sup>;另一类是腔外法,如螺旋相位板<sup>[11]</sup>、组合波片法<sup>[14]</sup>、相干偏振操纵法<sup>[15]</sup>等。

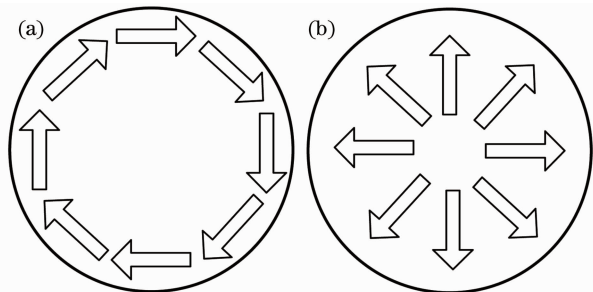


图2 矢量偏振光束截面图。(a)角向偏振光束;  
(b)径向偏振光束

Fig. 2 Beam cross-section of vectorial polarized beam.  
(a) APB; (b) RPB

显偏器(PAF)为英国 TSI 公司生产的商业产品,可以用于显示线偏振光的偏振方向。线偏振光通过显偏器后,在接收屏上会出现两个相对的楔形暗区,沿着两楔形暗区中心的方向即为线偏振光的振动方向。如果圆偏振光入射到显偏器时,楔形区域的强度将会明显减弱。显偏器是一个具有圆形同心传播轴的线型偏振器件,每一个小的区域都是一个线型偏振器,传输轴的方向垂直于径向,如图3所示。

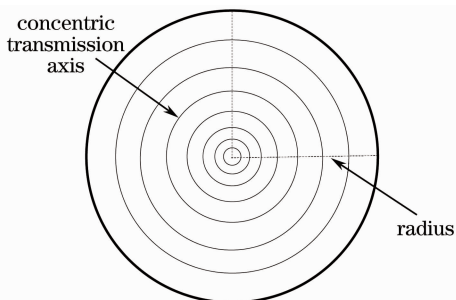


图3 显偏器截面图

Fig. 3 Cross-section of PAF

由于显偏器可看作是一个线栅偏振,即由多个线型偏振器构成的同心圆环结构。当自然光入射到显偏器时,会在角向方向上通光,即形成角向偏振光束。由LED光源输出的自然光经过透镜 $L_1$ 和显偏器后转换为角向偏振光束,实验装置如图4所示<sup>[10]</sup>。

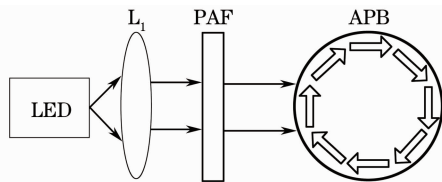


图4 产生角向偏振光束的实验装置图

Fig. 4 Experimental layout for generating APB

将两个半波片组合在一起构成的偏振旋转器如图5所示<sup>[16]</sup>,此装置的转换原理可使用琼斯矩阵进行数学推导。其中 $\mathbf{E}_i$ 和 $\mathbf{E}_t$ 分别代表初始偏振态和

终止偏振态,  $C_1$  和  $C_2$  分别代表第一个和第二个半波片的快轴方向,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为  $C_1$  和  $C_2$  与  $E_i$  间的夹角.  $\mathbf{R}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$  代表旋转坐标,  $\mathbf{T}$  代表经过两个偏振片后的偏振方向旋转情况, 则

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}(-\phi_2) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \times \mathbf{R}(\phi_2) \mathbf{R}(-\phi_1) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{R}(\phi_1) = \begin{bmatrix} \cos 2\phi_2 & \sin 2\phi_2 \\ \sin 2\phi_2 & -\cos 2\phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\phi_1 & \sin 2\phi_1 \\ \sin 2\phi_1 & -\cos 2\phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2(\phi_2 - \phi_1) & -\sin 2(\phi_2 - \phi_1) \\ \sin 2(\phi_2 - \phi_1) & \cos 2(\phi_2 - \phi_1) \end{bmatrix} = \mathbf{R}[-2(\phi_2 - \phi_1)] = \mathbf{R}(-2\Delta\phi), \quad (2)$$

由(2)式可知, 经两个快轴成  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$  角的半波片后, 偏振方向逆时针旋转  $2\Delta\phi$  角.

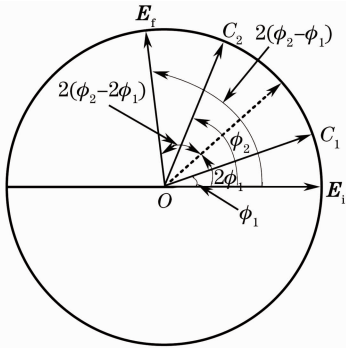


图 5 两个半波片组成的偏振转换器原理图  
Fig. 5 Schematic of the two half-wave plates polarization rotator

与单个半波片不同, 由两个半波片组合而成的偏振转换器, 此装置与入射的初始偏振状态无关, 偏振方向的旋转角度仅取决于两个半波片快轴之间的夹角  $\Delta\phi$ . 当  $\Delta\phi = \phi_0/2$  时, 角向偏振光束通过此装置便可得到任意角度的轴对称矢量偏振光束. 当  $\Delta\phi = 45^\circ$  时, 即可由角向偏振光束得到径向偏振光束; 反之亦然, 即径向偏振光束经两个快轴成  $45^\circ$  的半波片后, 也可转换为角向偏振光. 由显偏器产生的角向偏振光束, 通过由两个快轴成  $45^\circ$  角的半波片组成的偏振转换装置转换为径向偏振光, 如图 6 所示<sup>[7,12]</sup>.

因为径向和角向偏振光束的电场具有轴对称性, 径向偏振光的电场矢量完全位于线偏振片的透光轴方向, 角向偏振光的电场矢量垂直于线偏振片的透光轴方向. 根据马吕斯定律, 可知位于两个轴之间的偏振辐射会减弱. 目前, 常用的检验角向和

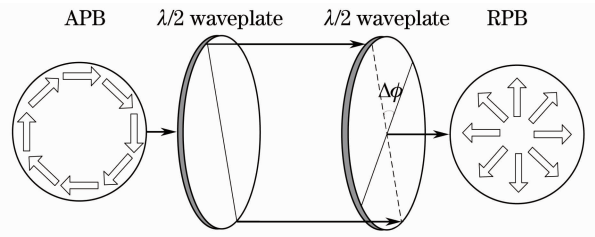


图 6 角向和径向偏振光束转换装置图

Fig. 6 Conversion device between azimuthally and radially polarized beams

径向偏振光束的方法是使其通过线偏振片, 观察其光强的分布情况<sup>[11]</sup>. 由 LED 光源发出的自然光经过图 4 和图 6 装置后的输出光束, 分别通过线偏振片后的光强分布如图 7 所示, 图中箭头方向代表线偏振片的偏振方向. 通过旋转线偏振片, 来改变线偏振片的偏振方向, 实验结果显示, 当角向偏振光束通过线偏振片时, 在垂直于偏振方向上会出现两个清晰的扇区; 当径向偏振光束通过线偏振片时, 在平行于偏振方向上会出现两个清晰的扇区. 所得结果与文献[11]中的光强分布相符, 即验证了通过显偏器获得矢量偏振光束的有效性和可行性.

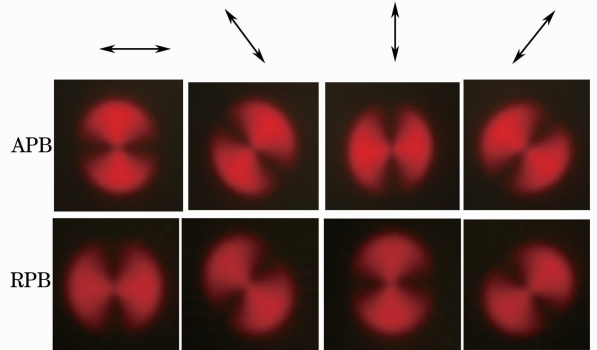


图 7 角向和径向偏振光经不同方向检偏器后的光强分布

Fig. 7 Observed intensity distributions with different polarizer directions for azimuthally and radially polarized beams

## 4 结 论

提出了一种产生矢量偏振光束的新方法, 利用由多个线型偏振器件构成的同心圆环装置即显偏器, 根据其特殊的结构特点, 由 LED 光源输出的自然光束经显偏器, 可产生角向偏振光束, 再经两个快轴成  $45^\circ$  角的半波片可将角向偏振光束转换成径向偏振光束. 并对此方法所产生的角向和径向偏振光束经线偏振片验证其光强分布情况, 研究发现所得结果与已发表的实验结果相符, 验证了该方法的有

效性和实用性。该实验装置具有结构简单、价格低廉、便于使用等优点,具有更为广泛的应用前景。

随着对矢量偏振光束研究的逐渐深入,下一阶段的研究重点为:使用面阵 CCD 器件来定量研究由显偏器产生的径向偏振光和角向偏振光的偏振度和精确度等,并与其他产生矢量偏振光束的方法进行对比分析;自行加工制作由多块扇形线偏振片拼接而成的径向偏振光产生装置,与显偏器产生的矢量偏振光束的偏振度和精确度进行对比分析。相信通过对矢量偏振光束更加深入的研究以及更多新特性的发现,矢量偏振光束将具有更加广泛的应用空间。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 Chen Jiannong, Yu Yongjiang. The effect of primary spherical aberration and aperture on focusing of radially polarized high-order vector Bessel-Gauss beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2724~2729  
陈建农, 于永江. 初级球差及孔径对径向偏振高阶矢量贝塞尔-高斯光束聚焦的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2724~2729
- 3 Huang Jintang, Wei Wei, Lei Zhangyuan *et al.*. Generation of cylindrical vector beams by use of C-cut YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Acta Optica 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
- 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 Yousef I. Salamin. Mono-energetic GeV electrons from ionization in a radially polarized laser beam[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 90~92
- 6 Chen Weibin, Zhan Qiwen. Numerical study of an apertureless near field scanning optical microscope probe under radial polarization illumination [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 4106~4161
- 7 V. G. Niziev, A. V. Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, **32**(13): 1455~1461
- 8 WanChin Kim, NoCheol Park, YongJoong 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
- 9 Zhehai Zhou, Qiaofeng Tan, Guofan Jin. Surface plasmon interference formed by tightly focused higher polarization order axially symmetric polarized beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(12): 1178~1181
- 10 Huang Yan, Zhang Min, Gao Laixu *et al.*. Generating method and device of axially symmetric vectorial polarized beams [P]. Patent of China, A, 201110271723.1, 2011-9-14  
黄妍, 张敏, 高来勋等. 轴对称矢量偏振光获取方法及实现该方法的装置 [P]. 中国专利, A, 201110271723.1, 2011-9-14
- 11 K. J. Moh, X. C. Yuan, J. Bu *et al.*. Generating radial or azimuthal polarization by axial sampling of circularly polarized vortex beams[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(30): 7544~7551
- 12 Zhan Qiwen, James Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 324~331
- 13 Yu Yi, Pang Yu, Sun Yinhong *et al.*. Radially or azimuthally polarized laser based on mode selection of thermally induced bifocus[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2451~2455  
于益, 庞毓, 孙殷宏等. 基于热致双焦点选模的径向、切向偏振激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2451~2455
- 14 Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Generation and focusing property with high-numerical aperture lens of vectorial polarized beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 129~133  
张艳丽, 李小燕, 朱健强. 矢量偏振光束的产生及其高数值孔径聚焦性质[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 129~133
- 15 Lin Huichuan, Liu Hui, Pu Jixiong. Extra cavity coherent superposition for generation of radially polarized beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 251~256  
林慧川, 刘辉, 蒲继雄. 腔外相干叠加产生径向偏振光[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 251~256
- 16 Zhan Qiwen, James R. Leger. Microellipsometer with radial symmetry [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4630~4637

栏目编辑: 谢婧