

文章编号: 0253-2239(2010)02-0557-05

# 利用 C 切钽酸钇晶体产生轴对称偏振光

黄金堂 韦 玮 雷张源 王克逸

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

**摘要** 研究了利用高双折射的 *c* 切钽酸钇(YVO<sub>4</sub>)晶体产生轴对称偏振光(包括径向偏振光和角向偏振光)的原理和实现方法,搭建了轴对称偏振光产生及定性测量平台。实验结果表明,当输入光为圆偏振光时,输出光为偏振态关于中心对称、强度均匀分布的轴对称偏振光;当输入光为线偏振光时,输出光偏振态关于中心对称,强度沿圆周呈余弦分布。轴对称偏振光在光操纵、材料加工和高分辨率显微测量等领域具有广泛的应用前景。

**关键词** 物理光学;轴对称偏振光;偏振转换;*c* 切钽酸钇晶体

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0557

## Generation of Cylindrical Vector Beams by Use of C-Cut YVO<sub>4</sub> Crystal

Huang Jintang Wei Wei Lei Zhangyuan Wang Keyi

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract** The principle and realization of the generation of cylindrical vector beams (CVB), including radially polarized beams (RPB) and azimuthally polarized beams (APB), are presented by use of high-birefringence *c*-cut YVO<sub>4</sub> crystal. The device for the production and qualitative measurement of RPB and APB is set up. The experimental results show that when the irradiation is circularly polarized beam, the output beams are cylindrical vector beams with centrosymmetrical polarization and homogeneous intensity distribution, and when the irradiation is linearly polarized beam, the polarization state of the output beam is centrosymmetrical while the intensity is of cosine distribution along the circumferential direction. The cylindrical vector beams have an broad application in many domains, such as optical manipulation, material processing and high-resolution measurement.

**Key words** physical optics; cylindrical vector beams; polarization conversion; *c*-cut YVO<sub>4</sub> crystal

## 1 引 言

轴对称偏振光(Cylindrical Vector Beams)因其在光操纵<sup>[1]</sup>、高分辨率显微测量<sup>[2]</sup>和材料激光加工<sup>[3]</sup>等领域的广泛应用,近年来吸引了越来越多的关注。由于光束本身偏振结构上的对称性,轴对称偏振光在聚焦时具有纵向强度大、横向尺寸小和平顶聚焦等性质<sup>[4]</sup>。目前国内外对轴对称偏振光的研究主要集中在光束的高数值孔径聚焦<sup>[4]</sup>、光束的相位奇异分布<sup>[5]</sup>及其在各个领域的应用研究<sup>[1~3]</sup>。已报道的轴对称偏振光的产生方法主要有亚波长光栅法<sup>[6]</sup>、轴对称偏振片法<sup>[7]</sup>、组合波片法<sup>[8]</sup>和全光纤装

置法<sup>[9]</sup>等。这些方法的实验操作复杂,主要光束转换器件制作成本过高或者能量利用率低。Shunichi Sato 等<sup>[10,11]</sup>利用带有 *c* 切钽酸钇(YVO<sub>4</sub>)晶体的谐振腔结构产生了较大功率的径向偏振光(Radially polarized beams, RPB),但由于谐振腔本身对光束偏振的选择性,无法获得角向偏振光(Azimuthally polarized beams, APB)。

本文基于光学双折射的原理,介绍并探讨了一种简单的在激光器外利用高双折射的 *c* 切钽酸钇晶体<sup>[12~14]</sup>和针孔相结合产生轴对称偏振光的方法。理论上分析了利用 *c* 切钽酸钇晶体将普通偏振光转

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(50875251)资助课题。

作者简介: 黄金堂(1984—),男,博士研究生,主要从事偏振全息方面的研究。E-mail: huangjit@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 王克逸(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: kywang@ustc.edu.cn

换成轴对称偏振光的原理,从实验上分别生成得到径向偏振光和角向偏振光,并给出了定性测量结果。

## 2 实验原理

### 2.1 轴对称偏振光简介

与普通偏振光在每一个波阵面上只有一个方向的电场矢量  $E$  不同,轴对称偏振光在波阵面上具有关于中心对称的电场矢量。图 1 是各种偏振光的在一个波阵面上的电场矢量分布图。图 1(a)和图 1(b)分别是 s 偏振光和 p 偏振光的电场矢量分布<sup>[15]</sup>,即在波阵面内,偏振矢量保持一致,且每个波阵面均是这样分布。圆偏振光[图 1(c)]在不同的波阵面电场方向不同,但是在一个面上只有一个方向的矢量。轴对称偏振光在一个波阵面上具有关于中心对称的电场矢量。根据矢量方向不同,可以分为径向偏振光[图 1(d),电场矢量沿半径方向]、角向偏振光[图 1(e),电场矢量沿圆周方向]和普通轴对称偏振光[图 1(f),电场矢量异于径向偏振光和角向偏振光]。轴对称偏振光由于光束偏振结构上的对称性,聚焦时光斑具有许多独特的性质,如径向偏振光聚焦时具有极强的纵向电场,角向偏振光聚焦光只有角向电场矢量,普通轴对称偏振光在局部电场方向与半径成  $24^\circ$  角的情况下将产生平顶聚焦<sup>[4]</sup>。因而,轴对称偏振光在光操纵、材料加工和高分辨率显微测量等领域具有广泛的应用。

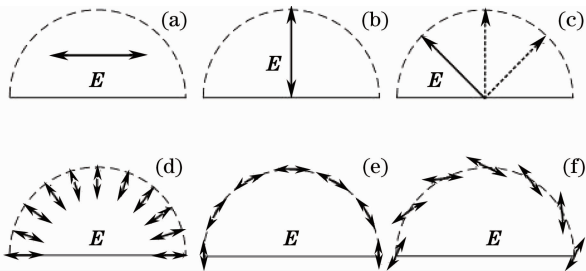


图 1 各种偏振光电场矢量分布图

Fig. 1 Electric vector distribution of different polarized lights

### 2.2 实验原理

利用高双折射  $c$  切钽酸钇晶体产生和测量轴对称偏振光的系统如图 2 所示。由 He-Ne 激光器出射的线偏振光经过光阑(D)、起偏器(P1, 主轴方向为  $0$ )和四分之一波片(Q, 主轴方向为  $45^\circ$ )转换成圆形圆偏振光束,再经过扩束器(BX)扩成光斑直径为 14 mm 的平行光束。该平行光束经一个透镜(L1, 焦距为 30 mm)会聚并入射到一块直径为 25 mm、长度为 34 mm 圆柱形  $c$  切钽酸钇晶体内。由于晶体

的各向异性性质,光束经过晶体后将形成两个聚焦点。再把一个位置可以三维调整的针孔(直径为  $50 \mu\text{m}$ )分别放在两个焦点处,光束经过透镜(L2)的准直,可以得到两种不同类型的轴对称偏振光。检偏器(P2)、成像透镜(L3)和相机组成的系统用于定性测量生成的偏振光。

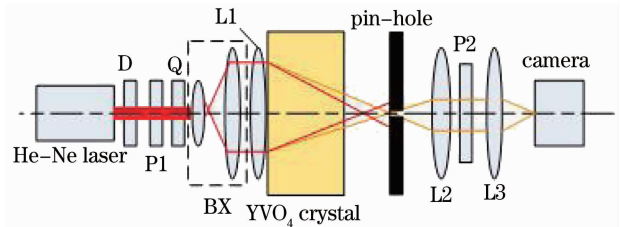


图 2 利用  $c$  切钽酸钇晶体产生轴对称偏振光及其定性测量系统图

Fig. 2 Experimental setup for the generation and qualitative measurement of cylindrical vector beams with  $c$ -cut  $\text{YVO}_4$  crystal

$c$  切钽酸钇晶体对普通偏振光的转换原理如图 3 所示。经过透镜(L1)聚焦后的光束入射到晶体内发生双折射,由于主平面和主截面重合,则  $o$  光和  $e$  光均位于主截面所在的圆柱截面上,不同的圆柱截面上  $o$  光和  $e$  光分别关于圆柱中心轴对称。根据塞米尔方程<sup>[16]</sup>计算得到,在  $632.8 \text{ nm}$  波长下, $o$  光和  $e$  光的折射率分别是 1.9929 和 2.2063,则在晶体后形成的焦点中离晶体较近的(图 3 中 A 点)是  $o$  光焦点,离晶体较远的是  $e$  光焦点(B 点)。 $o$  光的偏振矢量垂直于主平面, $e$  光的偏振矢量平行于主平面,则当针孔分别置于 A, B 点时将  $e$  光或  $o$  光滤掉,再经过透镜准直后可以得到角向偏振或径向偏振的平行光束。若入射到晶体内的光为圆偏振光,在晶体各纵向截面上分解得到  $o, e$  光振幅均为总振幅的  $\sqrt{2}/2$ ,则出射的角向偏振光和径向偏振光光束内能量分布均匀。

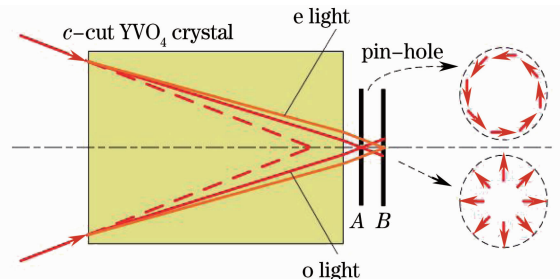


图 3  $c$  切钽酸钇晶体偏振转换原理图

Fig. 3 Principle of polarization conversion by use of  $c$ -cut  $\text{YVO}_4$  crystal

### 3 实验结果与讨论

实验时,He-Ne 激光在晶体后形成两个焦点,在放入针孔前,采用定性测量系统记录了透射光强的分布。图 4 是晶体出射光在偏振片(P2)主轴分别位于  $0, -45^\circ, -90^\circ$  和  $-135^\circ$  方向时的光强分布图。显然,由于焦点位置不同,成像光斑为双环结构。而且,当偏振片(P2)主轴旋转时,光斑内环和外环都有一个暗区同步旋转,这说明内、外环的光斑都有一个关于中心对称的偏振结构。

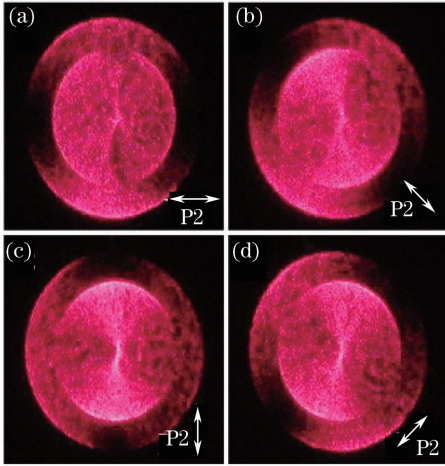


图 4 钽酸钷晶体出射光强分布图  
(箭头方位为 P2 主轴方向)

Fig. 4 Output intensity pattern from  $YVO_4$  crystal (the arrows represent the transmission directions of P2)

通过精密三维平移台将针孔控制在近焦点(图 3 中 A 点)处,旋转检偏器(P2),利用相机记录下检偏器在不同主轴方向时的透射光强图,如图 5 所示。图 5(a)是 P2 为水平透过时的光强分布,可以看出,光斑在竖直直径方向上具有最高的能量,水平直径方位的透过光强为 0(水平直径方位的电场为竖直偏振,即垂直于直径),而且竖直方向的极大值和水平方向的 0 值之间是渐变的;图 5(c)是 P2 为竖直透过时的光强分布,此时,光斑在水平直径方位上具有最高的能量,竖直直径方位透过光强为 0(竖直直径位置为水平偏振);图 5(b), (d), (e), (f), (g), (h)则分别是起偏器主轴以  $45^\circ$  为步长顺时针旋转时得到的透射光强图,可以看出,相较于图 5(a),随着偏振片的旋转,透射光强分布同步旋转,说明光斑内各直径上电场均垂直于直径振动,总体上表现光场具有圆周方向的偏振方向,且偏振矢量大小分布是均匀的,即出射光是光强均匀分布的角向偏振光。这与上面的理论分析吻合得很好。本实验采用针孔在 A 处滤掉 e 光,由于 e 光在针孔内也有光场分布,

所有在透过光斑中含有 e 光成分。根据几何关系,光斑中的 e 光部分分布在光斑中心区域,所以在旋转偏振片的过程中中心的光斑并不能完全消去。实验中,可以通过选择直径更小的针孔进行滤波,得到中心亮斑较小的角向偏振光。但是,当针孔的直径小于波长时,入射光将在针孔处发生衍射,从而影响出射光的光束质量。因此,研究提高出射光的偏振纯度的方法是我们下一步的工作重点。

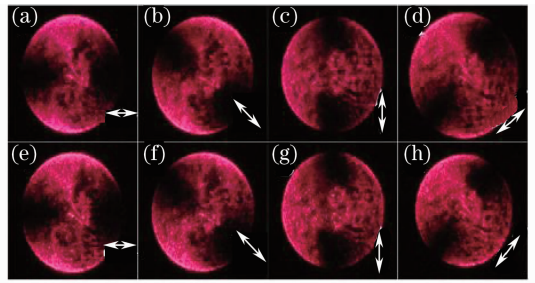


图 5 近焦点出射光定性测量图(箭头方位为 P2 主轴方向)

Fig. 5 Qualitative measurement of the output light from the near focus (the arrows represent the transmission directions of P2)

类似地,图 6 是针孔在 B 点处时检偏器 P2 在不同角度下的透射光强图。透射光束具有偏振方向为直径方向的电场矢量,且光斑内强度分布均匀,即在 B 点处滤波将得到光强均匀分布的径向偏振光。

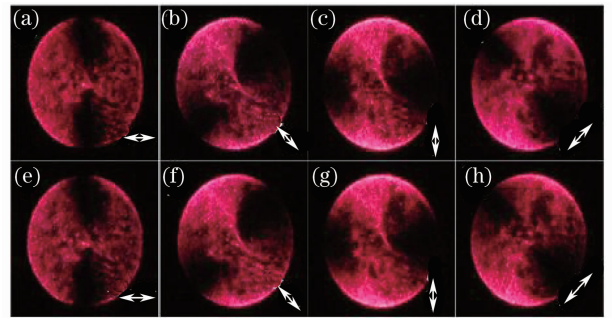


图 6 远焦点出射光测量图(箭头方位为 P2 主轴方向)

Fig. 6 Qualitative measurement of the output light from the far focus (the arrows represent the transmission directions of P2)

为了进一步理解轴对称偏振光偏振性质和光斑强度分布,将图 2 中四分之一波片去掉,以水平偏振的线偏振光入射到晶体内,重复上面的步骤,得到近焦点和远焦点情况下相机记录的透射光强,如图 7(a1)~(f1)和(a2)~(f2)所示。近焦点情况下,随着检偏器旋转,有一块暗区同步旋转,说明出射光与圆偏振光输入时具有相同的偏振态分布,但是不同角度下透射光都有一个水平方向的暗区;类似地,

在远焦点情况下,出射光与圆偏振光输入时具有相同的偏振态,但是出射光都有一个竖直方向的暗区。实际上,当入射光为水平方向的线偏振光时,出射光在水平偏振的方位应具有最大值,竖直偏振的方位值为 0,即角向偏振光应该在竖直的直径上具有光强最大值,水平的直径上光强为 0,而径向偏振光应该在水平的直径上具有光强最大值,竖直的直径上光强为 0;不同直径上光强的分布从最大值到 0 之

间是沿圆周方向余弦分布的。图 7(f1)和(f2)给出了水平线偏振光输入时角向偏振光和径向偏振光的电场分布图。图 7(e1),(e2)所示的实验结果很好地验证了上述推论。图 7(e1),(e2)显示角向偏振光和径向偏振光分别在水平直径和竖直直径方位具有光强最大值,与理论分析非常吻合。所以,当输入光为线偏振光时,输出光也为轴对称偏振光,但是光斑的强度分布沿圆周方向呈余弦分布。

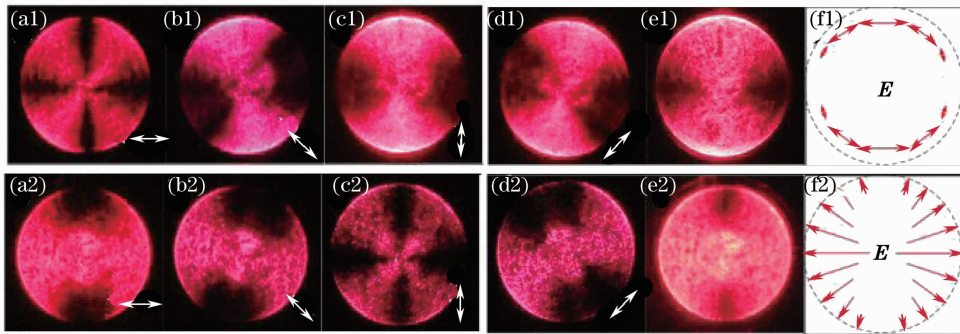


图 6 线偏振光输入时产生的轴对称偏振光测量图[(a1)~(f1)近焦点,(a2)~(f2)远焦点]

Fig. 7 Measurement of APB and RPB produced with linear polarization input

[(a1)~(f1) near focus, (a2)~(f2) far focus]

## 4 结 论

利用高双折射的  $c$  切钽酸铋晶体产生了具有轴对称偏振态分布的径向偏振光和角向偏振光。理论分析表明当入射光为圆偏振光时可以得到偏振态关于中心对称、强度均匀分布的径向偏振光和角向偏振光;当入射光为线偏振光时,得到的径向和角向偏振光具有中心对称的偏振态分布,但是其强度沿圆周方向分别呈余弦分布。实验结果与理论分析相吻合。本方法具有调节方便且对任意波长激光都适用的优点。轴对称偏振光聚焦时具有超分辨率的光斑尺寸和强度分布,在高分辨率显微测量、材料激光加工和光操纵等领域具有广泛的应用。

## 参 考 文 献

- Zhang Yanli, Zhao Yiqiong, Zhan Qiwen *et al.*. Study of 3D optical chain with highly focused vector beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1253~1258  
张艳丽, 赵逸琼, 詹其文等. 高数值孔径聚焦三维光链的研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1253~1258
- Qiwen Zhan, James R. Leger. High-resolution imaging ellipsometer[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4443~4450
- V. G. Niziev, A. V. Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, **32**: 1455~1461
- Qiwen Zhan, James R. Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(07): 324~331
- Chen Hao, Li Yongping. Gouy phase shift of the highly focused radially polarized beam[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2007,

**24**(5): 539~543

陈 昊, 李永平. 轴对称光束的 Gouy 相位[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(5): 539~543

- Ze'ev Bomzon, Gabriel Biener, Vladimir Kleiner *et al.*. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(5): 285~287
- José A. Ferrari, Wolfgang Dultz, Heidrun Schmitzer *et al.*. Achromatic wavefront forming with space-variant polarizers: Application to phase singularities and light focusing[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(5): 053815~1
- S. Quabis, R. Dorn, G. Leuchs. Generation of a radially polarized doughnut mode of high quality[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**: 597~600
- T. Grosjean, D. Courjon, M. Spajer. An all-fiber device for generating radially and other polarized light beams[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(1-2): 1~5
- Hikaru Kawauchi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato. Generation of radially polarized Ti:sapphire laser beam using a  $c$ -cut crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(17): 1984~1986
- Kazuhiro Yonezawa, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of the birefringence of a  $c$ -cut Nd:YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2151~2153
- Xiang Qing, Huang Dexiu. A wedge type optical isolator using a YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(3): 225~228  
向 清, 黄德修. 钽酸铋晶体楔型光隔离器[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(3): 225~228
- Gong Mali, Lu Chengqiang. Acousto-optically Q-switched 1342 nm laser with Nd:YVO<sub>4</sub> crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 502~506  
巩马理, 陆成强. 声光调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体 1342 nm 激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 502~506
- Li Xiaoli, Shao Jie, Zang Huaguo *et al.*. High repetition rate short pulse width Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*,

- 2008, **35**(2): 206~210
- 李小莉, 邵杰, 臧华国等. 高重复率窄脉宽 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 206~210
- 15 Gu Zhengtian, Wang Guangbin, Liang Peihui *et al.*. Measurement of optical parameters of azo-dyes doped PMMA films by P-polarized reflectance[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(10): 902~906
- 顾铮先, 王光斌, 梁培辉等. p-偏振双面反射法测定偶氮染料掺杂 PMMA 薄膜光学参数[J]. 中国激光, 1999, **A26**(10): 902~906
- 16 Cui Chuanpeng, Zhang Yudong, Zhuang Xinxin *et al.*. Z-scan measurement of nonlinear refractive indexes of YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(2): 145~147
- 崔传鹏, 张雨东, 庄欣欣等. 用“Z-scan”方法测钒酸钇的三阶非线性折射率[J]. 中国激光, 1999, **A26**(2): 145~147