

## 径向偏振光纯度检测及偏振态分布特性评价

彭红攀, 杨策, 卢尚, 陈檬, 周巍

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:** 光束横截面内偏振态分布均匀性是影响径向偏振光光束质量及其实际应用的关键因素。通过 PBS 测量法、狭缝法和 S 波片法三种方法对径向偏振光偏振纯度进行测量和对比, 分析了径向偏振光偏振态在横截面内分布均匀性。在 PBS 测量法和狭缝法测量径向偏振光过程中, 给出了径向偏振光纯度表达式, 分别测得径向偏振光纯度为 93.4% 和 84.1%, 并引入方差公式评价径向偏振光偏振态分布均匀特性。其中 PBS 测量法表达径向偏振光纯度更为准确, 狭缝法可以通过比较不同区域偏振度更精确地反映径向偏振光偏振态分布特性。S 波片法可以使用市场现有偏振分析仪间接测量径向偏振光纯度, 更适应于测量径向偏振光在放大过程中偏振态变化情况。

**关键词:** 偏振纯度检测; 径向偏振光; 偏振态分布均匀性

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0506007

## Radially polarized beam purity detection and evaluation of polarization distribution characteristics

Peng Hongpan, Yang Ce, Lu Shang, Chen Meng, Zhou Wei

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The uniformity of polarization distribution in the cross section of the beam is a key factor affecting the quality of the radially polarized beam and its practical application. The polarization purity of the radially polarized beam was measured and compared by the PBS measurement method, the slit method and the S-wave plate method, the uniformity of the polarization state of the radially polarized beam in the cross section was analyzed. In the process of measuring the radially polarized beam by the PBS measurement method and the slit method, the expression of the radial polarization purity was given, and the purity of the radially polarized beam was determined to be 93.4% and 84.1%, respectively. And the variance formula was used to evaluate uniform distribution of the radial polarization states. Among them, the PBS measurement method expressed the purity of the radially polarized beam more accurately, and the slit method can reflect the polarization distribution characteristics of the radially polarized beam more accurately by comparing the polarization degrees of different regions. The S-wave plate method can indirectly measure the purity of the radially polarized beam using the existing polarization analyzer in the market, and is more suitable for measuring the change of the polarization state of the radially polarized beam during the amplification process.

**Key words:** polarization purity detection; radially polarized beam; uniformity of polarization distribution

收稿日期: 2018-12-11; 修订日期: 2019-01-23

基金项目: 北京市基金重点 B 类项目 (KZ201510005001)

作者简介: 彭红攀 (1985-), 男, 博士生, 主要从事全固态皮秒径向偏振激光器方面的研究。Email: phphit@126.com

导师简介: 陈檬 (1963-), 女, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事全固态纳秒、皮秒、倍频激光器件等方面的研究。

Email: chenmeng@bjut.edu.cn

## 0 引言

近年来,随着径向和角向偏振光在许多应用领域的拓展,其越来越受到研究者的青睐。径向偏振光具有轴上光强为零,偏振态沿径向分布的特性。因此,径向偏振光在材料加工、粒子加速、金属切割、超分辨成像、空间光通信、信息加密以及在固体激光器中强泵浦功率放大<sup>[1-9]</sup>等领域体现出了巨大的应用价值。与此同时,也出现了多种主动或被动产生径向偏振光束的方法,如热致晶体双折射效应法,模式叠加干涉法,空间相位转换法等<sup>[10-12]</sup>。随着径向或切向偏振激光在工业领域的广泛应用,其对高功率的需求也日益增强,然而,高功率激光器往往伴随着光束纯度、波前畸变等光束质量参数降低的情况出现。在 2003 年,Inon Moshe 等人,提出径向或角向偏振激光在各向同性晶体放大器放大过程中可以消除热致双折射效应,这为径向和角向偏振高功率、高质量激光器的产生提供了有力支撑<sup>[3]</sup>。然而,随着后续对高功率径向偏振光束的研究发现,在实际放大系统中,热分布不均匀性,晶体本身的立方特性(如 YAG 晶体)以及在放大过程中光轴与晶体几何轴的对准情况,都会对产生高质量的径向偏振光束造成影响。因此,在获得高功率径向或角向偏振激光的同时,必须关注其光束质量退化情况,其中径向偏振光偏振态分布特性是影响其应用的关键因素。对于线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光,波前畸变、偏振度、光束质量因子等光束质量参数都有相应的仪器进行测量,进而衡量激光器参数指标情况。然而,对于径向和角向(统称为柱矢量光束)偏振光束偏振态分布情况还没有很好的衡量方法。Inon Moshe 在研究径向偏振光偏振纯度过程中使用了狭缝法,但未给出狭缝的具体尺寸和狭缝衍射的影响情况<sup>[12]</sup>。2014 年,浙江大学修鹏等人利用点对点偏振光检测方法,通过计算每点部分斯托克斯参数,得到每点径向和切向方向光强占该点总光强比值描述了矢量光束横向切面内各点的偏振态情况<sup>[13]</sup>。2016 年,北京信息科技大学周哲海等人也是基于 Stokes 参量法测量矢量光束偏振态,计算了 CCD 上每个像素点所代表光点偏振度。这两种测量矢量光束方法借助 CCD 像素点,离散地表征了径向偏振光各点的偏振度<sup>[14]</sup>,未涉及到光束横截面内偏振态分布均匀性分析,其中 CCD 像素情

况和能量衰减光学元件表面粗糙度都会对测量结果造成影响。文中基于轴对称偏振光经过偏振器后,不同偏振方向功率值相等的原理,提出 PBS 测量法和狭缝法测量不同偏振态的功率值,通过分析不同偏振方向的功率值差异,得出光束横截面内不同区域偏振态纯度,进一步得出横截面内偏振态分布的均匀特性。S 波片法是通过比较 S 波片前后线偏振光纯度,间接得到径向偏振光偏振态变化情况,该方法可采用市场上常规偏振分析仪测量<sup>[15]</sup>,更适用于径向偏振光放大系统偏振态检测。

## 1 径向偏振光的产生

通过腔外法在光路中加入引起空间相位变化的半波片(S wave-plate)实现水平线偏振光转化为径向偏振光。考虑一束准单色平面波沿 z 轴传播,其横向电场表达式为<sup>[11]</sup>:

$$E(r, \theta, z) = E_r(r, \theta, z)\vec{r} + E_\theta(r, \theta, z)\vec{\theta} \quad (1)$$

其中,径向和角向偏振电场表达式为:

$$E_r = E_s \cos \theta + E_p \sin \theta \quad (2)$$

$$E_\theta = -E_s \sin \theta + E_p \cos \theta \quad (3)$$

式中:p 和 s 表示两个正交且都垂直 z 轴的横向电场矢量分量; $\vec{r}$ 和 $\vec{\theta}$ 为极坐标的两个方向矢量。

水平偏振光琼斯矩阵为:

$$\vec{E}_s = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

该实验中所用 S 波片的琼斯矩阵表达式为<sup>[9]</sup>:

$$M_{hw} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{pmatrix} \quad (5)$$

因此,径向偏振光可表示为:

$$\vec{E}_{rad} = M_{hw}(\vec{E}_s) \quad (6)$$

将公式(4)和(5)代入公式(6)中,径向偏振光的琼斯矩阵为:

$$\vec{E}_{rad} = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

径向偏振光的矩阵公式与公式(2)径向偏振光电场表达式一致。

## 2 实验与分析讨论

### 2.1 PBS 测量法评价径向偏振光偏振特性

径向偏振光可以等效地看为无数条线偏振光的

叠加<sup>[10]</sup>。在光束横截面上任意偏振态电场矢量都可以分解为  $x$  方向和  $y$  方向(两正交方向)的偏振矢量。因此当径向偏振光经过偏振分光棱镜(PBS)后,将分为两束偏振态相互垂直的线偏振光,分别为水平偏振光(P 光)和垂直偏振光(S 光),其中 P 光完全通过 PBS,S 光出射方向与 P 光成  $90^\circ$ 角,如图 1 所示。若径向偏振光的偏振纯度为 100%,且关于晶体轴均匀对称分布分布均匀,经过 PBS 之后,P 光分量等于 S 光分量。若径向偏振光含有其它偏振光成分,P 光分量将不等于 S 光分量。因此可以通过这种方法评价径向偏振光的纯度和偏振态分布均匀性。通过旋转 PBS 角度,可以得到多角度的径向偏振光纯度。如图 1 所示,一束径向偏振光经过 PBS 之后,P 光透过,S 光分被反射,分别用功率计和光束分析仪(WinCamD-LCM, Dataray Corporation)接收。

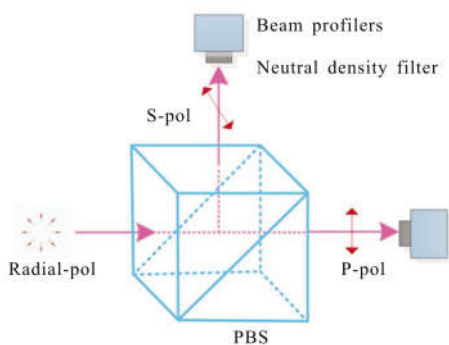


图 1 径向偏振光经过 PBS 后偏振分布

Fig.1 Polarization state distribution of radially polarized beam after passing through PBS

光束分析仪采集的光斑强度分布如图 2 所示。图 2(a)是径向偏振光总光强分布,图 2(b)和图 2(d)是径向偏振光经过 PBS 之后的水平偏振光和垂直偏振光光强分布,图 2(c)是径向偏振光通过左旋  $45^\circ$  PBS 的偏振光光强分布,图 2(e)是径向偏振光通过右旋  $45^\circ$  PBS 后的偏振光光强分布。

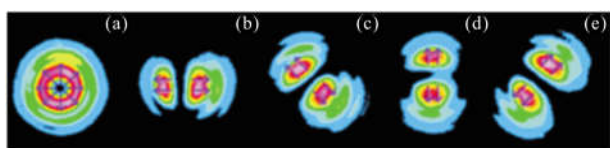


图 2 不同偏振态情况下的光强分布

Fig.2 Beam intensity distribution under different polarization states

图 2(b)~(e)反映了径向偏振光不同偏振方向的

光强分布,从图中可以看出四个不同偏振方向光束强度分布均匀性差异较小。此外,从光强分布图的特征可以定性地说初始光束为径向偏振光(这也是判断径向偏振光的常见方法)。为了进一步分析径向偏振光在横截面内偏振态分布均匀性,用功率计分别测量上述五种偏振态下的功率,其功率值比为 98.3:54:50:44:48。用  $W$  表示总功率, $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$  分别对应图 2(b)~(e)的光强。定义径向偏振光纯度表达式:

$$POL=1-\frac{\left|W_n-\frac{W}{2}\right|}{\frac{W}{2}} \cdot 100\%, n=1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

式中:  $\frac{W}{2}$  为总功率一半;  $W_n$  对应功率计的不同功率,公式(8)通过不同偏振态功率的变化计算径向偏振光的偏振度,即(纯度),用 POL 表示。代入相应数值,计算得到四种情况下径向偏振光的纯度分别为: 90.13%, 98.27%, 89.52%, 97.66%。当  $n$  取值较多时,检测径向偏振光纯度的方位也相应地增多(旋转 PBS 至不同的角度),可以更准确地反应径向偏振光束不同区域偏振状态的情况。为了衡量径向偏振光在整体横截面内偏振态分布均匀性特性,引入方差  $\sigma^2$ ,其表达式为:

$$\sigma^2=\frac{\sum(100 \cdot POL-100 \cdot \overline{POL})^2}{N}, N=1, 2, 3, 4 \dots \quad (9)$$

式中:  $\sigma^2$  为总体方差;  $\overline{POL}$  为总体平均值;  $N$  为总体数量。

将上述 POL 值代入公式(8),  $\overline{POL}=93.9\%$ , 可以求出  $\sigma^2=16.56$ , 此值越小表明径向偏振光不同方向纯度值变化范围越小,径向偏振光偏振态分布均匀性越好。此外,  $N$  值越大,用此种方法评价径向偏振光偏振态分布均匀性越准确,用此种方法表征径向偏振光纯度越精确。

## 2.2 狭缝法评价径向偏振光偏振特性

当径向偏振光经过狭缝时,偏振态与该狭缝平行的光完全通过,偏振态与狭缝垂直的光通过最少。如图 3 所示,狭缝后置一个 PBS,测量透过狭缝后光束的消光比。消光比越高说明所测区域径向偏振度越高,因此,通过测量透过 PBS 偏振光所占经过狭缝后总功率的比值可表示此狭缝区域偏振纯度(POL)。

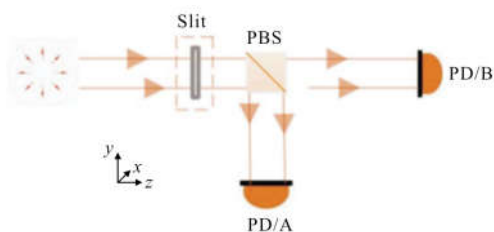


图 3 狭缝法测量径向偏振光纯度装置

Fig.3 Device of the slit method to measure the purity of radially polarized beam

在狭缝法测量径向偏振纯度过程中,狭缝尺寸的变化影响测量结果的准确性。狭缝尺寸过小衍射严重,狭缝尺寸过大起不到阻止非平行于狭缝的偏振态光束通过,这都会影响径向偏振光纯度的检测。为了得到合理的狭缝尺寸,该实验将狭缝尺寸从零开始逐渐增大,通过光束分析仪观测光斑变化情况(如图 4 所示)。图 4(a)~(g)依次为 10、60、100、120、130、140、150  $\mu\text{m}$  狭缝尺寸的光强轮廓图。图中箭头表示狭缝的方向。当狭缝尺寸为 130  $\mu\text{m}$  时,光斑衍射效应较小;当狭缝尺寸大于 130  $\mu\text{m}$  时,衍射光斑的形状靠近狭缝的形状。因此,文中选择 130  $\mu\text{m}$  狭缝作为测量径向偏振光纯度检测尺寸。

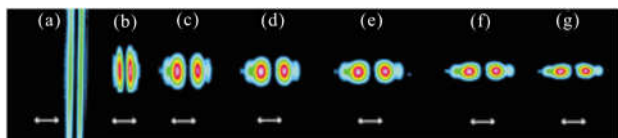


图 4 光束强度随狭缝尺寸变化情况

Fig.4 Change of beam intensity distribution with slit size

将狭缝与 PBS 看做一个整体,狭缝与  $x$  轴夹角为  $\alpha$ ,透过狭缝后的总功率为  $P$ ,透过 PBS 后的功率为  $P_B$ ,被 PBS 反射后的功率为  $P_A$ 。

$$P = P_A + P_B \quad (10)$$

$$POL = \frac{P_B}{P} \times 100\% \quad (11)$$

旋转狭缝与 PBS,可以测到多个不同 POL 值。该实验分别测得狭缝旋转  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的偏振度为 83.2%、80.9%、83.8%、88.4%,  $\overline{POL}$  值为 84.1%。由于偏振态与狭缝不平行的光束依然有部分能通过狭缝,因此狭缝法测得的偏振度值较低。对比不同角度情况下偏振纯度,引用公式(2)计算得到方差值为 7.6,方差值越小表明径向偏振光偏振态分布越均

匀,该径向偏振光源比 2.1 部分实验使用光源在横截面内偏振态分布均匀性好。

相比 PBS 方法,狭缝法将径向偏振光束进行了更精细的划分,更能反映出偏振光束局部的偏振状态,它可以更精确地评价径向偏振光偏振态分布均匀性。

### 2.3 S 波片法测量径向偏振光纯度

目前市场上的偏振分析仪器难以检测柱矢量偏振光束偏振态。若将径向偏振光束转换为可以用常规偏振仪器检测的偏振光,则可以更快速准确地得到径向偏振光偏振分布情况。径向偏振光经过 S 波片的矩阵方程为:

$$M_{hw} \vec{E}_{rad} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

从公式(12)可知,径向偏振光束经过 S 波片之后转换为了水平线偏振光。

S 波片法实验装置如图 5 所示,从主激光器出来的线偏振激光,经过由半波片和法拉第旋转器组成的隔离器(防止光反射回主激光器造成损伤)。径向偏振光连续经过两个 S 波片后,又转换为线偏振光。通过光束分析仪观测出射光束光强轮廓如图 6 所示。

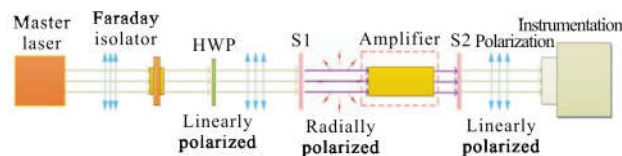


图 5 S 波片法测量偏振度实验装置

Fig.5 Experiment device of S wave plate method to measure polarization

图 6(a)是水平线偏振光经过两个 S 波片之后又转换为水平线偏振光的光强分布。为检测图 6(a)偏振分布状态,使光束经过 PBS,透过 PBS 后的光强分布如图 6(b)所示,被 PBS 反射光强分布如图 6(c)所示。通过功率测量可知,图 6(b)功率远高于图 6(c)功率,由于衰减片的调整导致两图光强分布强度相似。由于衰减片的调整,使得两图光强相似。

从图中可以看出,水平偏振光经过 PBS 之后依然基本保留了原偏振状态。用偏振分析仪(PAX1000IR1, Thorlabs)检测线偏振的种子光束(master laser)的偏振纯度为 96%,经过两次 S 波片之

后测得线偏振光的偏振纯度为 93%。偏振纯度的降低是由光轴与两个 S 波片中心轴不重合度造成的。径向偏振光在放大过程中 (如图中 5 虚线所示), 其偏振态受到放大器热分布不均匀性影响而发生变化, 由于 S 波片法可以通过常规偏振仪对比径向偏振光放大前后的偏振态变化情况, 因此用这种方式检测径向偏振激光放大后偏振纯度更为方便。

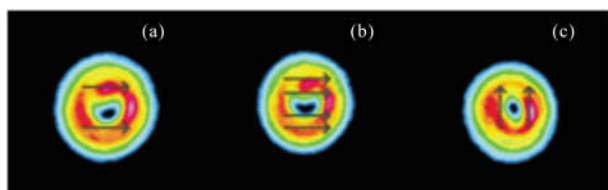


图 6 出射光束光强轮廓, (a) 光束经过第二个 S 波片后光强分布, (b) 光束透过 PBS 后光强分布, (c) 被 PBS 反射光强分布

Fig.6 Intensity profile of the output beam, (a) shows the intensity distribution of the beam after passing through the second S-wave plate, (b) and (c) show the intensity distribution of the beam after passing through the PBS and reflected beam by the PBS, respectively

### 3 结 论

文中通过 PBS 功率测量法和狭缝法对径向偏振光的偏振态分布均匀性进行了实验分析。其中, PBS 功率测量法分析了不同光束区域的偏振纯度, 引入方差公式量化了径向偏振光偏振态分布均匀性。狭缝法通过旋转狭缝将一束径向偏振光分成多份进行检测, 相比 PBS 功率法它更精细地表达了不同区域的偏振极化程度, 同样引入方差公式量化表征径向偏振光横截面内偏振态分布均匀性。文中分析了 S 波片法检测径向偏振光的可行性, 又进行了实验验证, 该方法可方便地用于径向偏振光放大实验的偏振度检测。S 波片法能利用市场现有偏振仪间接测量径向偏振光纯度是其最大优势。文中提出的几种测量径向偏振光纯度的方法以及评价径向偏振光偏振态在横截面内分布均匀性的方法同样适用于角向偏振光束, 这为柱矢量光束偏振纯度检测以及偏振态分布均匀性的衡量提供了参考方案, 为柱矢量光束在材料处理、信息传输等领域的更进一步应用提供支持。

#### 参考文献:

[1] Zhang F, Yu H, Fang J, et al. Efficient generation and tight focusing of radially polarized beam from linearly polarized beam with all-dielectric metasurface [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6656–6664.

- [2] Chang C C, Chen X D, Pu J X. High-energy nanosecond radially polarized beam output from Nd:YAG amplifiers [J]. *Optical Review*, 2017, 24 (2): 188–192.
- [3] Loescher A, Negel J P, Graf T, et al. Thin-disk multipass amplifier emitting radially polarized beam with 635 W of average power and 2.1 mJ of pulse energy [C]//Laser Sources and Applications III. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9893: 98930N.
- [4] Li Chen, Stoian R, Chen Guanghua. Laser-induced periodic surface structures with ultrashort laser pulse [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 1–17. (in Chinese)
- [5] Herrero R M, Mejias P M, Piquero G, et al. Global parameters for characterizing the radial and azimuthal polarization content of totally polarized beams [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(8): 1976–1980.
- [6] Wei Tongda, Zhang Yunhai, Tang Yuguo. Effect of polarization, phase and amplitude on depletion focus spot in STED [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1157–1164. (in Chinese)
- [7] Wang Sicong, Li Xiangping. Wavefront manipulation of tightly focused cylindrical vector beams and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 185–202. (in Chinese)
- [8] Zhan Xiangkong, Li Zhengyong, Zhang Yi, et al. Radially polarized beam restructuring based on Stokes-vector measurement and interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0427002. (in Chinese)
- [9] Li H R, Fan C J, Dang J C, et al. Focusing properties of power-exponent-phase vortex beam focused by high numerical-aperture objective [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2018, 30(1): 1–5.
- [10] Martynas B, Mindaugas G, Peter G K. Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(1): 783–795.
- [11] Tidwell S C, Ford D H, Kimura W D. Generating radially polarized beams interferometrically [J]. *Appl Opt*, 1990, 29 (15): 2234–2239.
- [12] Moshe I, Jackel S, Meir A. Production of radially or azimuthally polarized beams in solid-state lasers and the elimination of thermally induced birefringence effects [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(10): 807–809.
- [13] Xiu Peng, Jiang Yunshan, Wang Yifan, et al. Measuring method and evaluation of cylindrical vector polarized beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612002. (in Chinese)
- [14] Zhou Zehai, Zhu Lianqing. Measurement method of polarization state of vector beams based on Stokes parameters [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(6): 742–746. (in Chinese)
- [15] Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, et al. Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 1915–1922. (in Chinese)