

# 线偏光 Stokes 参量同步测量系统

翟凤潇, 杨坤, 朱祥, 张志峰, 苏磊

(郑州轻工业学院 技术物理系, 河南 郑州 450002)

**摘要:**设计了一种基于二维光栅分光的线偏光 Stokes 参量测量系统. 将二维正交光栅的 4 束 ( $\pm 1$ ,  $\pm 1$ ) 级衍射光作为探测光束入射到检偏器阵列的 4 个单元上, 每个单元是具有不同方位角的检偏器, 然后由 CCD 探测器同时探测. 利用二维正交光栅、检偏器阵列和面阵 CCD 探测器实现了同步移相功能. 利用 CCD 探测的 4 束光强度可以得到线偏光的 Stokes 参量. 实验结果表明, 本方案简单易行, 测量结果不受光源强度变化的影响.

**关键词:**偏振态; Stokes 参量; 同步测量; 线偏光

**中图分类号:** O439

**文献标志码:** A

## Simultaneous measurement system for Stokes parameters of linear polarized light

ZHAI Feng-xiao, YANG Kun, ZHU Xiang, ZHANG Zhi-feng, SU Lei

(Dept. of Tech. and Physics, Zhengzhou Univ. of Light Ind., Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A measurement system for Stokes parameters of linear polarized light based on orthogonal grating was presented. Four diffractive beams of ( $\pm 1$ ,  $\pm 1$ ) orders were incident on one of the analyzer in the analyzer array respectively. The analyzer array is composed of four analyzers with different polarization directions. The intensities of light through the analyzer array were detected by a CCD simultaneously. The simultaneous phase shifting is realized by an orthogonal grating, analyzer array and CCD detector. Linear Stokes parameters of incident light were obtained by calculation of detected light intensities. The experimental results indicated that the designed method was feasible and simple. In addition, the measured result is free of the intensity fluctuation of incident light.

**Key words:** polarization; Stokes parameter; simultaneous measurement; linear polarized light

## 0 引言

Stokes 参量可用来表示完全偏振光或部分偏振光乃至自然光. 物体发射或反射光束的 Stokes 参量

携带丰富的物体的信息, 因此 Stokes 参量的测量具有重要的应用价值和理论意义<sup>[1-3]</sup>. 常用的 Stokes 参量测量技术分为 2 类: 一类是使用旋转检偏器或旋转起偏器<sup>[4-5]</sup>, 另一类是相位调制方法<sup>[6]</sup>. 使用旋

收稿日期: 2011-09-19

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010A510019); 郑州轻工业学院博士基金项目(2008BSJJ024, 2010BSJJ031)

作者简介: 翟凤潇(1979—), 男, 河南省永城县人, 郑州轻工业学院讲师, 博士, 主要研究方向为激光与物质的作用及其测量技术.

转检偏器的方法具有结构简单、成本低等特点,但调制频率较低. 旋转的检偏器会引起光束偏离光轴,增大系统误差,光源的光强波动也会影响测量结果. 相位调制方法的调制频率比较高,系统中没有移动器件. 由于相位延迟是波长和温度的函数,波片使用前需要精确校准. 上述 2 种技术获取数据速度较慢,不能满足实时测量、在线测量和快速过程监控的要求.

基于分振幅技术的偏光仪具有结构简单、成本较低和数据获取速度快等优点,引起了人们的重视. Y. Cui 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于光栅分振幅技术的偏光仪,该偏光仪中的透射光栅可将入射光分成光强分布相同的 16 级衍射光,在每束衍射光后分别放置方位角不同的线起偏器,将一个 1/4 波片放置在其中一个线起偏器前构成圆起偏器. S. Krishnan<sup>[8]</sup>等提出了另一种基于光栅分光的偏光仪,入射光垂直入射到反射光栅上,利用 +1 级, +2 级, -1 级和 -2 级衍射光来实现偏振探测.

在某些研究或应用中,通常只考虑线性偏振信息,圆偏振信息是无关的,我们只需利用偏振仪测量 Stokes 的前 3 个参量<sup>[9]</sup>,如利用偏振光研究眼睛、星体<sup>[10-11]</sup>等. 本文拟提出一种基于同步移相的线偏振光 Stokes 参量测量技术. 利用二维正交光栅、检偏器阵列和面阵 CCD 探测器实现同步移相功能. 二维正交光栅的 4 束一级衍射光作为探测光束入射到检偏器阵列的 4 个单元上,每个单元是具有不同方位角的检偏器,然后由 CCD 探测器同时探测.

### 1 偏振光 Stokes 参量测量系统和原理

光的偏振态可以由 Stokes 矢量  $S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$  描述. Stokes 矢量的 4 个分量由下式给出:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_{rep} - I_{lep} \end{bmatrix}$$

其中,参量  $S_0$  描述了总的光强,参量  $S_1$  描述了光波  $x$  方向线偏振分量与  $y$  方向线偏振分量强度,  $S_2$  描述沿与  $x$  轴夹角  $\pm 45^\circ$  方向线偏振强度,  $S_3$  表示圆偏振度,  $I_{rep}$  表示右旋圆偏振光强度,  $I_{lep}$  表示左旋圆偏振光强度. 光学仪器对于光波的相位测量较难实

现. Stokes 矢量表示光偏振态的 4 个分量是不同方向的偏振光强度,可以通过偏振器和延迟器测得,经过不同偏振光的叠加可以解出待测光 Stokes 矢量的 4 个分量元.

线偏振光 Stokes 参量测量系统如图 1 所示. 系统主要包括 He-Ne 激光器,可变光衰减器 VA,起偏器 P,光扩束器 BE,小孔光阑 H,二维正交光栅 G,特制光阑 D,检偏器阵列 PA,聚焦透镜  $L_1, L_2$  和 CCD 探测器. He-Ne 激光器工作波长为 632.8 nm,输出功率为 2 mW. 输出光被可变衰减器调节到合适强度后入射到起偏器,起偏器 P 为格兰-泰勒透镜,通过绕轴旋转可以产生不同振动方向的线偏振态. 已形成的偏振光垂直入射到二维正交光栅 G 上产生 0 级和  $(\pm m, \pm n)$  级衍射光. 衍射光束被凸透镜  $L_1$  准直后通过特制的光阑 D 放置在二维正交光栅. 该光阑由 4 个按正方形排列的圆孔组成,其作用是允许具有相同光强的  $(\pm 1, \pm 1)$  级衍射光通过,阻挡 0 级和更高级别的衍射光通过. 通过光阑的 4 束光分别入射到检偏器阵列的 4 个单元.  $2 \times 2$  的检偏器阵列 PA 是由 4 个方位角不同的检偏器组成的,其方位角分别是  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $-45^\circ$ . 4 束探测光通过检偏器阵列后的光强由 CCD 光电探测器同时探测. 探测信号最后输入到计算机并通过编制的 Matlab 程序计算出 Stokes 参量数值.

偏振光  $S$  通过任何一个光学器件变换成偏振光  $S'$ ,  $S' = MS$ ,  $M$  为  $4 \times 4$  矩阵,称为米勒矩阵. 偏振器米勒矩阵

$$M_p(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对于一级衍射效率为  $\eta$  的二维正交光栅,米勒矩阵

$$G = \eta \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因此待测偏振光  $S$  被光栅衍射后透过偏振角为  $\theta_p$  的检偏器后偏振态为

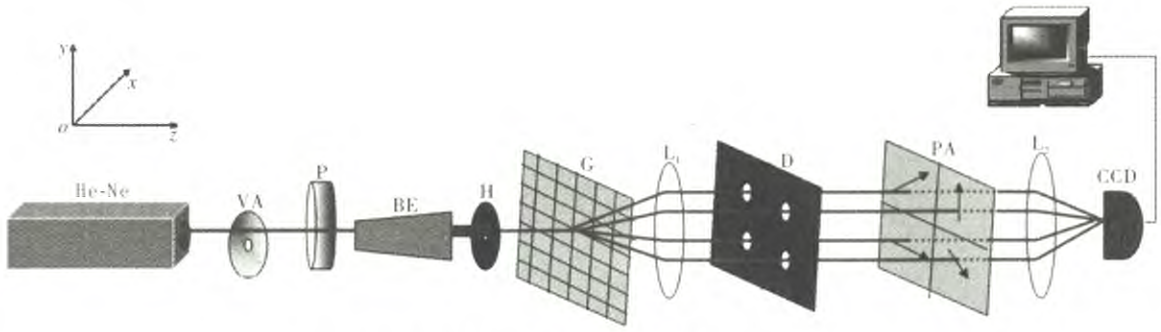


图 1 线偏振光 Stokes 参量测量系统示意图

$$S' = M_p(\theta_p)GS = \frac{\eta}{2} \begin{bmatrix} S_0 + S_1 \cos 2\theta_p + S_2 \sin 2\theta_p \\ S_0 \cos 2\theta_p + S_1 \cos^2 2\theta_p + S_2 \sin 2\theta_p \cos 2\theta_p \\ S_0 \sin 2\theta_p + S_1 \sin 2\theta_p \cos 2\theta_p + S_2 \sin^2 2\theta_p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

从式①可以看出,通过检偏器阵列后,与光强有关的分量  $S'_0, S'_1, S'_2$  都发生了变化. 探测器只能探测到总光强,①中第 1 项测量值  $S'_0$  就是光强,设为

$$I(\theta_p) = \frac{\eta}{2} (S_0 + S_1 \cos 2\theta_p + S_2 \sin 2\theta_p) \quad (2)$$

利用②式由通过不同偏振方向检偏器的光强可以得出入射光的线性 Stokes 参量. 检偏器阵列 4 个偏振方向角  $\theta_p$  分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $-45^\circ$  时,从②式可以得出

$$\begin{cases} S_0 = \frac{1}{\eta} [I(0) + I(90^\circ)] \\ S_1 = \frac{1}{\eta} [I(0) - I(90^\circ)] \\ S_2 = \frac{1}{\eta} [I(45^\circ) + I(-45^\circ)] \end{cases}$$

对于描述偏振态的 Stokes 参量各分量,我们更关心其相对值,因此用归一化参量表示光的偏振态,即  $\hat{S}_0 = 1, \hat{S}_1 = S_1/S_0, \hat{S}_2 = S_2/S_0$ .

## 2 实验结果

按照图 1 所示的 Stokes 参量测量系统测量由起偏器生成的偏振光偏振状态. 在测量之前,首先标定正交衍射光栅 4 束衍射光的强度,并扣除 CCD 探测器的背底噪声. 把起偏器偏振方向与  $x$  轴方向平行时记为线偏光的偏振角为  $0^\circ$ ,测量时以  $6^\circ$  为步长,从  $0^\circ$  到  $360^\circ$ ,偏振方向将随着起偏器的转动产

生变化,此时 CCD 接收到的 4 束光强也发生相应变化. 根据 CCD 探测的 4 束光强,经过计算机处理可以直接得到归一化 Stokes 参量数值.

图 2 为检偏器 4 个单元的偏振方向示意图和不同偏振态透过检偏器后 CCD 探测的结果. 图 2 中显示,当改变偏振态时,CCD 探测的 4 束光强度发生了明显的变化. 根据归一化 Stokes 参量的定义,  $\hat{S}_1, \hat{S}_2$  的测量结果和理论值如图 3 所示. 由图 3 可见  $\hat{S}_1, \hat{S}_2$  的实验值与理论值吻合较好. 所有实验测量值相对误差  $< 3\%$ .

在本测量系统中,利用光栅分出 4 束强度相等的光束,用面阵 CCD 同时探测可以提高测量精度,消除激光强度起伏造成的测量误差. 本系统测量误差主要来自起偏器和检偏器角度定位以及器件本身缺陷(如消光比不够高)等. 对光学器件定位误差,可以通过精密标定来达到减小测量误差的目的. 对器件本身缺陷造成的误差,可以通过采用质量更高的器件加以改善.

## 3 结论

本文提出了一种基于二维正交光栅的线性偏振态 Stokes 参量快速同步测量系统方案. 利用光栅分出 4 束强度相等的光束,用面阵 CCD 同时探测可以提高测量精度,消除激光强度起伏造成的测量误差;采用检偏器阵列避免了测量过程中检偏器旋转,减小了由于检偏器定位引起的测量误差. 理论分析和实验结果表明,该测量方法的数据获取速度远高于旋转器件法和相位调制法,可以实现在线测量和在线监控等应用. 由于没有移动部件,减小了系统误差. 此外,与其他利用光栅分光的偏光仪相比,本技术采用二维正交光栅和 CCD 相结合,系统

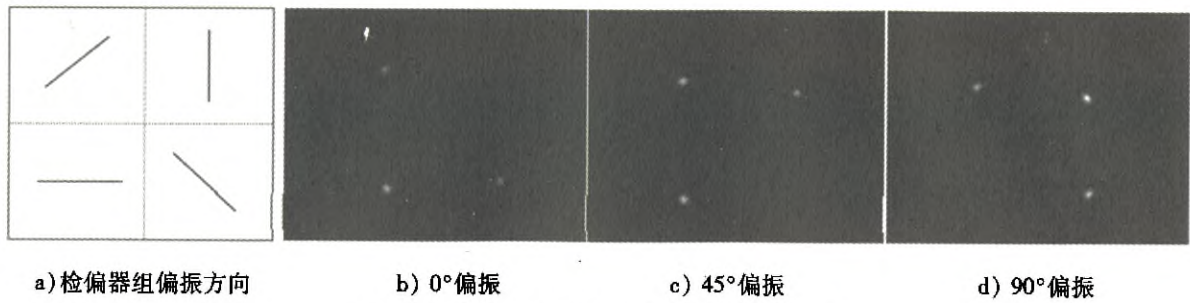


图 2 不同偏振态光强 CCD 探测示意图

统结构紧凑,光源光强的波动对测量结果也没有影响.本系统经过简单的扩展,可以测量各种偏振光,对于快速实时椭圆偏振测量技术具有很好的应用价值.

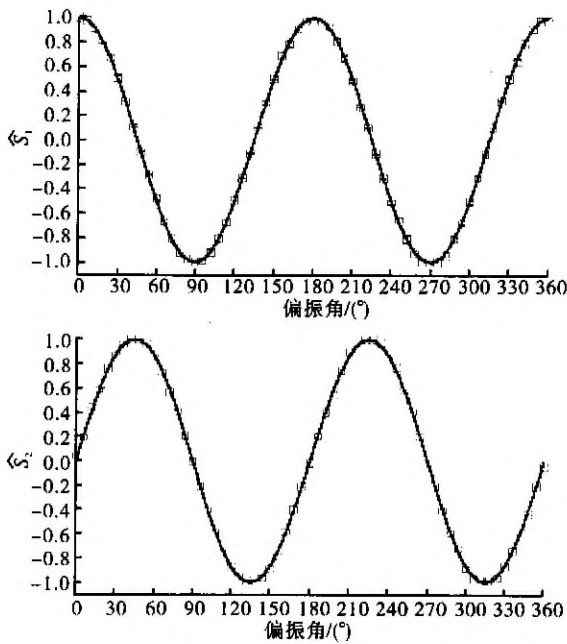


图 3 归一化 Stokes 参量测量结果

参考文献:

[1] Lin Jing-fung. Measurement of linear birefringence using a rotating-wave-plate Stokes polarimeter [J]. *Optik*, 2010, 121:2144.

[2] Chen Po-chun, Lo Yu-lung, Yu Tsung-chih, et al. Measurement of linear birefringence and diattenuation properties of optical samples using polarimeter and Stokes parameters [J]. *Opt Exp*, 2009, 17(18):15860.

[3] Niramalya Ghosh, Jalpa Soni, Wood M F G, et al. Mueller matrix polarimetry for the characterization of complex random medium like biological tissues [J]. *Pramana J Phys*, 2010, 75(6):1071.

[4] Lin Jing-fung. Concurrent measurement of linear and circular birefringence using rotating-wave-plate Stokes polarimeter [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(25):4529.

[5] Chakraborty S, Bera S C. Design of a Stokes polarimeter using rotators [J]. *J Opt*, 2010, 39(2):82.

[6] Geminiano Martínez-Poce, Cristina Solano, Carlos Pérez-Barrios. Hybrid complete Mueller polarimeter based on phase modulators [J]. *Optics and Lasers in Eng*, 2011, 49:723.

[7] Cui Y, Azzam R M A. Sixteen-beam grating-based division of amplitude photopolarimeter [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(1):89.

[8] Krishnan S, Scott Hampton, Azzam R M A. Spectroscopic ellipsometry using the grating division-of-amplitude photopolarimeter [J]. *Thin Solid Films*, 2004(455-456):24.

[9] Jaulin A, Bigué L. High speed partial Stokes imaging using a ferroelectric liquid crystal modulator [J]. *J of the European Optical Society*, 2008(3):08019.

[10] Juan M Bueno. Polarimetry in the human eye using an imaging linear polariscope [J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2002(4):553.

[11] Landolfi M, Landi Degl' Innocenti E, Landi Degl' Innocenti M, et al. Linear polarimetry of AP stars I a simple canonical model [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1993, 272:285.