

## 基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪

何超<sup>1,3</sup>, 常金涛<sup>1,2</sup>, 王勇<sup>1,2</sup>, 廖然<sup>1</sup>, 谢军<sup>4</sup>, 马辉<sup>1,2\*</sup>

(1. 清华大学深圳研究生院 深圳市无损与微创重点实验室, 广东 深圳 518055;

2. 清华大学物理系, 北京 100084; 3. 清华大学医学院, 北京 100084;

4. 海南大学机电工程学院, 海南 海口 570228)

**摘要:**四象限探测器的各探测器互相匹配, 被广泛应用于光束准直等应用中, 适合于测量和监控快速变化或漂移的光束. 通过研究, 提出了一种基于四象限探测器的偏振态测量装置. 该装置在四象限探测器的每一个探测器前放置经过不同检偏方向的偏振片及特定相位延迟和快轴方向的波片, 构成四个检偏通道, 并通过探测器上的光强计算得到入射光的斯托克斯向量. 不同偏振片的偏振方向以及波片的相位延迟和快轴方向经过优化设计确定, 以便降低测量误差并提高测量稳定性. 该斯托克斯向量测量仪能够实现入射光偏振态的同时测量与高速输出, 对于动态偏振系统的监控具有独特优势. 通过类似优化设计, 亦可扩展系统使用波段, 改善红外波段测量效果.

**关键词:**偏振测量; 四象限探测器; 斯托克斯向量

**中图分类号:** O436.3 **文献标识码:** A

### A Stokes polarimeter based on four quadrant detector

HE Chao<sup>1,3</sup>, CHANG Jin-Tao<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1,2</sup>, LIAO Ran<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>4</sup>, MA Hui<sup>1,2\*</sup>

(1. Shenzhen Key Laboratory for Minimal Invasive Medical Technologies, Graduate School at Shenzhen,

Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Biomedical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Mechanical and Electrical Engineering College, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** Four-quadrant detectors which consist of four well balanced detectors have been used for beam collimation and target tracking. In this article, we report a Stokes polarimeter based on a four-quadrant detector. By placing polarizers and wave plates in front of the individual detectors, the four detection channels were turned into four polarization analyzing channels of a Stokes polarimeter. An optimization algorithm was proposed to determine the axis directions of the individual polarizers, as well as the axis direction and the retardance of the wave plates for minimizing the errors and increasing the robustness of the measurements. The polarimeter is capable of simultaneous measurements of fast varying polarization states. Using properly selected polarization optics and following the same optimization algorithm, the polarimeter can be extended to other wavelength range, such as the infrared.

**Key words:** polarization measurement, four-quadrant detector, Stokes vector

**PACS:** 42.25.Ja, 42.68.Mj, 42.81.Gs

### 引言

光的偏振态是光的基本属性之一. 在光学研究

的各个领域中, 光的偏振态都是重要的参数. 如, 在生物医学光学中, 偏振测量参数对微观结构很敏感, 能够提供普通光成像无法获得的生物组织病理变化

收稿日期: 2015-03-15, 修回日期: 2015-05-12

Received date: 2015-03-15, revised date: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(41106034, 11374179, 11174178)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41106034, 11374179, 11174178)

作者简介 (Biography): 何超 (1991-), 男, 浙江诸暨人, 硕士研究生, 清华大学, 主要研究领域为偏振检测. E-mail: ellipsisisme@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: mahui@tsinghua.edu.cn

信息<sup>[1-3]</sup>;在材料监测领域,椭偏仪能够精确测量薄膜的厚度和折射率<sup>[4]</sup>;近年来,偏振光还被用来测量大气气溶胶浓度,从而监测气候变化和空气污染<sup>[5]</sup>.此外,偏振光学的方法还广泛应用于日常摄影,天文学测量,偏振目标识别,偏振遥感等不同领域中<sup>[6-9]</sup>.

斯托克斯向量可以表征任意光的偏振态<sup>[10]</sup>.而全斯托克斯向量的测量,需要至少获得待测光分别经过四种不同的检偏元件后的光强值.在过去的几十年间,国内外发明了各式斯托克斯向量测量仪,以实现准确而快速的斯托克斯向量的测量<sup>[11]</sup>.

现有的斯托克斯向量测量仪可以分为含时性测量和同时性测量两类.含时性测量的系统,一般由转动的波片和偏振片组成,结构相对简单,理论比较成熟,已经被广泛应用.但是,由于其波片或偏振片的转动需要运动部件,且依次地进行至少四次测量,无法满足各检偏通道光强值的同时性测量以及斯托克斯向量快速输出的要求.同时,波片或偏振片的转动有可能造成光束漂移,增加了测量的不确定性.此外,一些含时的斯托克斯向量测量仪使用液晶波片或电光晶体代替传统晶体波片,虽然它利用电信号进行快速调制,能够实现斯托克斯向量快速输出,但各检偏通道光强值仍然不是同时性测量.并且这种斯托克斯向量测量仪往往需要两个或者更多的液晶或电光晶体调制器,成本较高.而同时性检测偏振态的装置,对诸多系统的测量具有重要意义,如生长的薄膜、活体生物组织等.目前已有多种方法能够实现同时性斯托克斯测量<sup>[12-13]</sup>.

提出了一种基于四象限探测器的全斯托克斯向量测量仪,它可以基于现有四象限探测器进行改装而成,体积小、成本低,可用于快速偏振态测量.另外,四象限探测器的每个探测器的光电响应高度相似,四个通道高度匹配,有利于提高斯托克斯向量的测量的精确度.

## 1 实验仪器

四象限光电探测器实际由 4 个光电探测器构成,当目标光斑质心不在 4 个探测器构成的坐标原点处时,4 个象限上探测器输出的光电信号幅度各不相同,比较 4 个光电信号的幅度大小就可以知道目标光斑质心落于哪个象限上,常用于激光制导或激光准直中.其响应速度和输出速度均非常快,而本文研究将其用作后端接收光强的探测器(Daheng Optics GCI-1301, A/D Conversion Period: 3us).

提出的 4 象限斯托克斯向量测量仪的结构如图 1(a)所示.实际测量时,待测的具有某种特定偏振态的细光束平行入射到扩束透镜组 L,使光斑均匀扩大,后入射到 4 个检偏通道,即 4 组波片与偏振片的组合中.出射的光强值最终被四象限探测器 D 记录,探测器接收到的模拟信号通过后端电路进行处理,转化为数字信号,输出到上位机或下位机终端进行斯托克斯向量的计算及偏振态的显示.

四组波片与偏振片的组合如图 1(b)所示,平行线代表偏振片的通光方向,而灰色方块表示波片,黑色箭头表示波片快轴方向,灰色罗马字母 I、II、III、IV 代表四个检偏通道的标号,亦为象限号.四个检偏通道使用了四块通光方向各异的偏振片(Thorlabs, Extinction Ratio > 1000:1 for 500 ~ 700 nm),偏振片通光角度的选取方式采用了现有的偏振相机中的微型偏振片单元的设计方案<sup>[14]</sup>,即与水平方向的夹角为 0 度(通道 II),45 度(通道 III),90 度(通道 IV)和 135 度(通道 I).通道 I 的偏振片前覆盖了一片 1/4 波片,本文使用消色差 1/4 波片(Edmund, 1/4λ Retarder Film for 350 ~ 800 nm),并使其快轴方向与水平方向一致.

为了验证此设计下斯托克斯向量测量仪测量的准确性,我们需要已知的偏振态作为参考光进行实验验证.本文给出已知偏振态发生器如图 2 所示,光源是波长 532 nm、功率 4 mW 的固体激光器(长春新产业光电技术有限公司, MGL-III-532nm),出射光为水平起偏的线偏振光;R1、R2 是消色差 1/4 波片(Thorlabs, AQWP05M-600, Ø10.0 mm),且 R1 快轴方向与水平呈 45 度夹角, P1 是一偏振片(Thorlabs, extinction ratio > 5000:1);光通过 R1 由水平线偏振变为圆偏振,转动 P1 和 R2 可产生任意可能的完全偏振态.

## 2 四象限偏振计的测量原理

### 2.1 斯托克斯向量介绍

一束光的偏振态可以使用电场矢量表示,对于沿 z 轴方向传播的光,电场可表示为:

$$\begin{aligned} E(z, t) &= E_x(z, t) + E_y(z, t) \\ &= E_x(t_0) \cos(qz - \omega t + \delta_x(t)) \hat{x} \\ &\quad + E_y(t_0) \cos(qz - \omega t + \delta_y(t)) \hat{y} \end{aligned} \quad (1)$$

这里  $E_x, E_y$  和  $\delta_x, \delta_y$  分别是  $x, y$  分量电场的振幅和相位,电场振动的方式决定了光的偏振态,光的偏振态包含线偏振态,圆偏振态和椭圆偏振态.1852 年 George Gabriel Stokes 提出,平面电磁波的偏振性

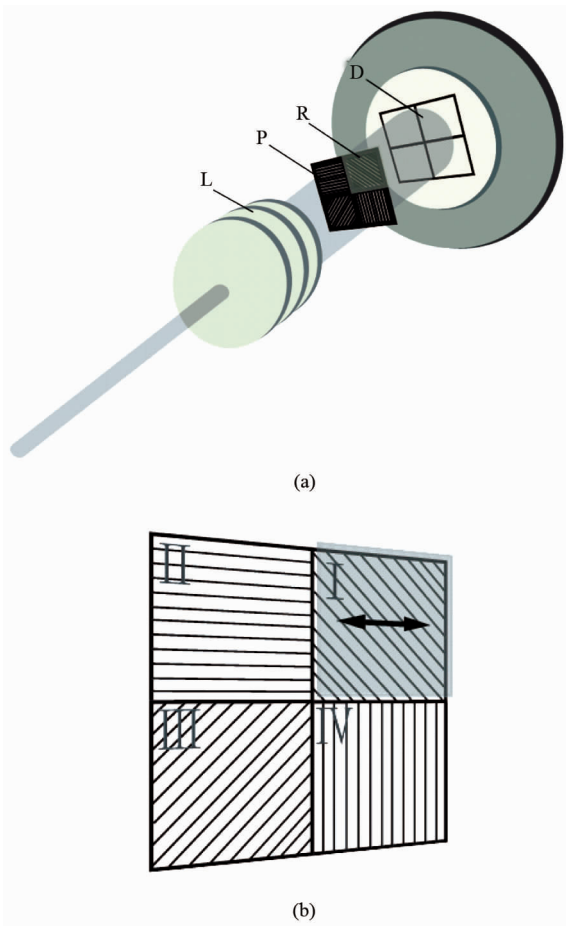


图 1 (a) 基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪, (b) 偏振片组加波片

Fig. 1 (a) The polarimeter based on the four-quadrant detector, (b) Polarizers and the wave plate

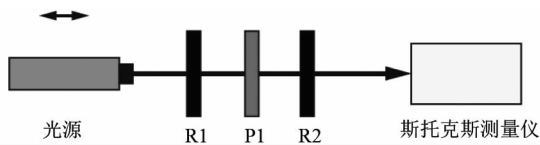


图 2 偏振发生装置

Fig. 2 Polarization state generation

质可以使用四个可测量光强组合表示<sup>[10]</sup>. 斯托克斯参量由电场矢量的时间平均值定义为:

$$\begin{aligned} s_0 &= \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ s_1 &= \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ s_2 &= 2 \langle E_x E_y \cos(\delta_y - \delta_x) \rangle \\ s_3 &= 2 \langle E_x E_y \sin(\delta_y - \delta_x) \rangle \end{aligned} \quad , \quad (2)$$

也可以写成光强形式:

$$\begin{aligned} s_0 &= I_x + I_y \\ s_1 &= I_x - I_y \\ s_2 &= I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \end{aligned}$$

$$s_3 = I_R - I_L \quad , \quad (3)$$

其中  $I_x, I_y, I_{+45^\circ}, I_{-45^\circ}$  分别表示沿着下标所示方向的偏振分量,  $I_R$  和  $I_L$  分别表示右旋和左旋偏振光. 式(3)中第一个参量  $s_0$  为光强, 其他的三个参量表示偏振态. 四个斯托克斯参量可以写成列向量形式:

$$S = (s_0 \quad s_1 \quad s_2 \quad s_3)^T \quad , \quad (4)$$

$S$  被称作斯托克斯向量.

## 2.2 四象限探测器测量原理介绍

在本文所描述系统中, 偏振态待测的入射光被分为 4 束子光束, 分别进入 4 个检偏通道, 并被 4 个探测器分别接收. 利用 4 次检偏获得斯托克斯向量的基本原理已经十分成熟<sup>[11]</sup>, 但针对不同测量装置有不同计算设计方法, 为了方便后续分析, 针对本文所述四象限斯托克斯向量测量仪的主要计算过程简述如下:

对于进入检偏通道 I 的子光束, 进入前后光的偏振态的变化为:

$$S_{out} = M_p \cdot M_r \cdot S_m \quad (5)$$

而对于进入检偏通道 II、III、IV 的子光束, 进入前后光的偏振态的变化为:

$$S_{out} = M_p \cdot S_m \quad , \quad (6)$$

这里,  $S_m$  为入射光的斯托克斯向量, 即入射偏振态,  $S_{out}$  为出射光在四象限探测器接收时的偏振态,  $M_p$  为偏振片的穆勒矩阵,  $M_r$  是波片的穆勒矩阵, 上述  $M_p \cdot M_r$  或  $M_p$  可理解为入射斯托克斯向量到出射斯托克斯向量的变换, 此变换能够衡量斯托克斯向量测量仪的所有偏振特征. 四象限探测器获得的最终信号是光的强度信号, 是斯托克斯向量  $S_{out}$  的第一个元, 根据矩阵乘法原则, 其值只与上述  $M_p \cdot M_r$  或  $M_p$  矩阵的第一行有关.

已知任意角度的偏振片的穆勒矩阵为:

$$M_p = \begin{bmatrix} p_x^2 + p_y^2 & (p_x^2 - p_y^2) \cos 2\theta_p & (p_x^2 - p_y^2) \sin 2\theta_p & 0 \\ (p_x^2 - p_y^2) \cos 2\theta_p & (p_x^2 - p_y^2) \cos^2 2\theta_p + 2p_x p_y \sin^2 2\theta_p & (p_x^2 + p_y^2) \cos 2\theta_p \sin 2\theta_p - 2p_x p_y \cos 2\theta_p \sin 2\theta_p & 0 \\ (p_x^2 - p_y^2) \sin 2\theta_p & (p_x^2 - p_y^2) \cos 2\theta_p \sin 2\theta_p - 2p_x p_y \cos 2\theta_p \sin 2\theta_p & 2p_x p_y \cos^2 2\theta_p + (p_x^2 + p_y^2) \sin^2 2\theta_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2p_x p_y \end{bmatrix} \quad , \quad (7)$$

其中  $p_x$  和  $p_y$  分别为偏振片透光极大方向和极小方向的出射光与入射光电场强度比,  $\theta_p$  为偏振片极小消光方向的方位角, 即偏振片的透光方向.

已知任意角度的波片的穆勒矩阵为:

$$M_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta_r + \sin^2 2\theta_r \cos \delta & 0.5 \sin 4\theta_r (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta_r \sin \delta \\ 0 & 0.5 \sin 4\theta_r (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta_r + \cos^2 2\theta_r \cos \delta & \cos 2\theta_r \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta_r \sin \delta & -\cos 2\theta_r \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad , \quad (8)$$

其中,  $\delta$  和  $\theta_r$  分别表示波片的相位延迟大小和双折射快轴方位角。

由上述可知,待测偏振态的入射光束通过四个检偏通道后会得到四个光强值,这里将四个光强写成向量形式,便于之后对斯托克斯向量的求解.该过程可以使用矩阵运算表示:

$$I = AS_{in} \quad , \quad (9)$$

其中,  $I$  是四个通道所得到的四个光强值组成的光强向量,  $A$  称为仪器矩阵,用来描述仪器的偏振特性,  $S$  是入射光斯托克斯向量,其中:

$$I = (i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad i_4)^T \quad , \quad (10)$$

$$A(1, :) = (p_x^2 + p_y^2, \cos 2\theta_{p1}(p_x^2 - p_y^2), \sin 2\theta_{p1}(p_x^2 - p_y^2), 0)$$

$$A(2, :) = (p_x^2 + p_y^2, \cos 2\theta_{p2}(p_x^2 - p_y^2), \sin 2\theta_{p2}(p_x^2 - p_y^2), 0)$$

$$A(3, :) = (p_x^2 + p_y^2, \cos 2\theta_{p3}(p_x^2 - p_y^2), \sin 2\theta_{p3}(p_x^2 - p_y^2), 0)$$

$$A(4, :) = \cos 2\theta_{p4}(p_x^2 - p_y^2)(\cos^2 2\theta_r + \cos \delta \sin^2 2\theta_r) + \sin 2\theta_{p4}(p_x^2 - p_y^2)(\cos 2\theta_r \sin 2\theta_r - \cos 2\theta_r \sin 2\theta_r \cos \delta), \\ \sin 2\theta_{p4}(p_x^2 - p_y^2)(\cos^2 2\theta_r + \cos \delta \sin^2 2\theta_r) + \sin 2\theta_{p4}(p_x^2 - p_y^2)(\cos 2\theta_r \sin 2\theta_r - \cos 2\theta_r \sin 2\theta_r \cos \delta), \\ \cos 2\theta_r \sin 2\theta_{p4} \sin \delta (p_x^2 - p_y^2) - \cos 2\theta_{p4} \sin 2\theta_r \sin \delta (p_x^2 - p_y^2) \quad , \quad (11)$$

$$S_m = (s_0 \quad s_1 \quad s_2 \quad s_3)^T \quad , \quad (12)$$

由式(9)可得到入射斯托克斯向量  $S_{in}$ :

$$S_{in} = A^{-1} \cdot A \quad , \quad (13)$$

当  $A$  矩阵为方阵时,  $A^{-1}$  代表矩阵  $A$  的逆矩阵,而当矩阵不为方阵时,  $A^{-1}$  代表矩阵  $A$  的伪逆矩阵  $A_p^{-1}$ :

$$A_p^{-1} = (A^T A)^{-1} A^T \quad , \quad (14)$$

其中,  $A^T$  为矩阵  $A$  的转置,  $(A^T A)^{-1}$  为  $(A^T A)$  的逆.在计算偏振态  $S$  时,  $I$  和  $A$  必须提前确定,这样我们就能通过上述理论推导,通过仪器矩阵和探测器获得的光强,计算出入射光偏振态,从而完成偏振态的检测.

### 3 四象限偏振计的设计方法与优化

为了提高四象限偏振测量仪的测量精度,下面对四个检偏通道的设计进行优化.上述文中已给出仪器矩阵  $A$  的计算公式,  $A$  可以表示了仪器的偏振性质,对4个检偏通道的优化即寻找最优化的仪器矩阵<sup>[15-16]</sup>.为了衡量仪器矩阵的优劣程度,我们使用矩阵  $A$  的条件数( $k(A)$ )来寻找最优化的仪器矩

阵<sup>[15-16]</sup>,条件数在数学上的解释为,一个矩阵的条件数最小为1,越接近1,线性方程组的求解越精确.式(15)给出条件数的定义,以及式(16)给出所选的二类范数的定义:

$$k(A) = \|A\| \|A^{-1}\| \quad , \quad (15)$$

$$\|A\|_2 = \sup_x \frac{\|A \cdot x\|_2}{\|x\|_2} \quad , \quad (16)$$

通过条件数,我们可以选取特定相位延迟和快轴方向的波片,以及特定通光方向的偏振片,从而使得仪器矩阵  $A$  的条件数达到最小,提高测量精度.

#### 3.1 在偏振片原条件下的波片优化

首先,我们保持图1(b)偏振片组的通光方向不变,通过条件数,对波片的相位延迟和快轴方向进行优化.我们计算不同的相位延迟大小和不同快轴角度下的仪器矩阵  $A$  的条件数,如图3所示.其中横轴为图1(b)中波片的相位延迟,纵轴为波片的快轴方向.为了突出显示较低条件数的区域,图中显示的是条件数取对数  $\log_{10}$  的值.图3中深色部分是条件数较小的区域,且颜色越深,仪器矩阵越好;浅色部分为条件数较大的区域,且颜色越浅,仪器矩阵越差.当波片为0度,相位延迟为114度时,对应条件数可以达到最小值,其条件数达到这种设计条件下的最优值,约2.88.由于114度的波片需要定制,而定制产品指标并不稳定,且价格昂贵,所以通常使用常见的1/4的波片进行斯托克斯向量测量<sup>[17]</sup>.本文实验一将采用1/4波片,验证基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪的可行性.当使用1/4波片,波片快轴为0度,对应的条件数约为3.23,接近最优值,且仍能保证较高测量精度.

通过这种优化设计,使在偏振相机中的微型偏振片单元的设计方案<sup>[14]</sup>的基础上,增加了可测量全斯托克斯向量的功能,并且给出了在此基础上的最优解.

#### 3.2 全局最优条件下偏振片与波片的优化

我们利用条件数,以全局最优,即全斯托克斯向量整体测量最精确的目标,设计偏振片通光方向、波片相位延迟及快轴方向.通过条件数计算可得:当四个偏振片通光方向一致,且波片快轴方向相对偏振片通光方向的角度分别约为:15.1度,51.7度,128.3度,164.9度时,可使得仪器矩阵达到最优,条件数达到最小<sup>[18]</sup>.如图4所示,偏振片通光方向都为0度,波片的快轴方向各不相同,其方向由黑色箭头表示.其中,波片的相位延迟皆为约132度.在这种以全局最优为前提的设计下,仪器条件数达到

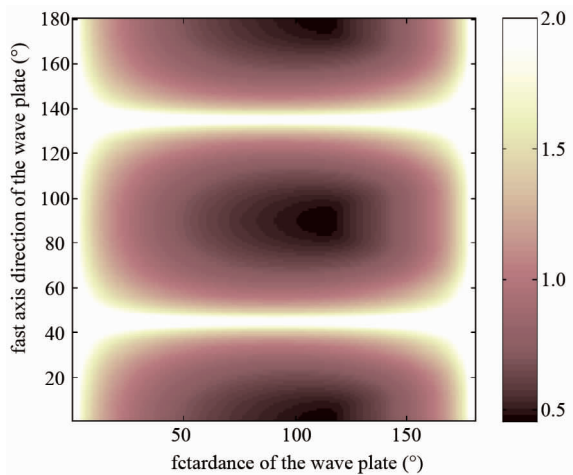


图3 条件数分布图

Fig. 3 The condition number map

理论最小值,其约为 1.73. 由于 132 度的波片也需要定制,本文实验二采用基于 1/4 波片的全局优化方案,验证基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪的可行性. 当使用 1/4 波片时,波片为 0 度,对应的条件数约为 3.40,接近最优值,且仍能保证较高测量精度.

本设计保证了在全斯托克斯向量测量中,平衡每一个斯托克斯向量的元,使整体的仪器矩阵达到最优. 即在考虑整体的前提下,使仪器矩阵的条件数达到最小,完成了考虑全局最优条件下的偏振片与波片的偏振参数的优化.

上述设计的前提,是在假定偏振器件参数都随波长不改变,但在实际测量中,波长的变化依旧是影响偏振器件参数变化的重要因素. 红外波段一直在偏振测量中有着非常重要地位,在特定红外波段使偏振测量精准有着重要意义<sup>[19]</sup>. 对于实际的消色差波片或非消色差波片,其相位延迟随波长变化都不能保证为固定值. 在这里,条件数亦可作为一种判别依据,为实际波片与偏振片的选型,提供选择方案.

当在特定红外波段进行斯托克斯向量测量时,为了提高斯托克斯向量测量精度,可以对特定波段分波长进行条件数计算,以平均条件数最接近仪器理论最低条件数作为评判标准,对照实际偏振片、波片的参数曲线进行选型,从而实现特定红外波段测量精度的提升.

#### 4 实验与讨论

我们使用图 2 中的偏振态产生器,将 P1 通光方向置于 0 度,R2 的快轴方向从 0 度转动到 180 度,

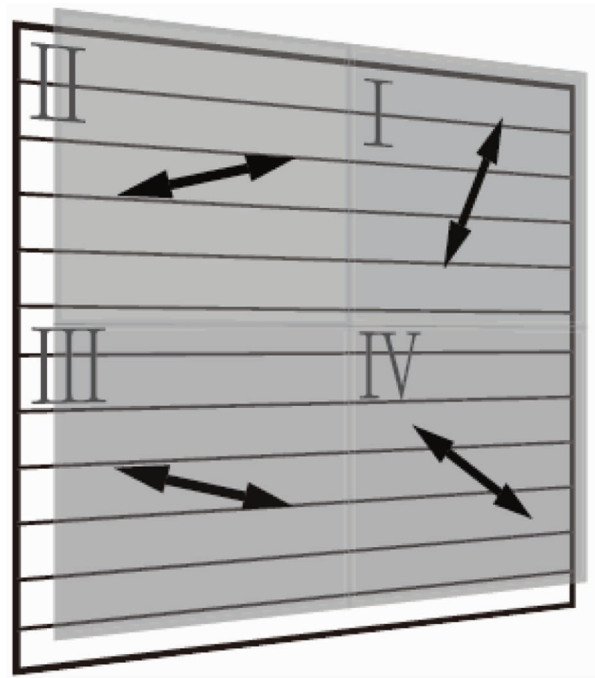


图4 偏振片通光方向与波片快轴方向

Fig. 4 The axis of the polarizer and the fast axis of the wave plate

产生若干偏振态已知的标准偏振光,对四象限斯托克斯向量测量仪的可行性、准确性进行验证. 下面给出上述 3.1 与 3.2 中实验一与实验二的测量结果:

实验一的结果如图 5 所示. 其中, $s_1, s_2, s_3$  三条曲线为理论曲线,这里均已对光强  $s_0$  进行归一化. 而使用四象限斯托克斯向量测量仪测量并计算得到的数据,在对光强  $s_0$  归一化后的斯托克斯参量  $s_1', s_2', s_3'$  在图 5 中用星号、圆圈、叉表示. 图 5 横轴是图 2 中波片 R2 的快轴方向,单位为度,纵轴是将光强归一化后,其余各斯托克斯参量的数值.

实验二的结果如图 6 所示. 其中, $s_1, s_2, s_3$  三条曲线为理论曲线,这里均已对光强  $s_0$  进行归一化. 实验后计算得到的数据,在对光强  $s_0$  归一化后的斯托克斯参量  $s_1'', s_2'', s_3''$  在图 6 中用星号、圆圈、叉表示. 图 6 横轴是图 2 中波片 R2 的快轴方向,单位为度,纵轴是将光强归一化后,其余各斯托克斯参量的数值.

通过计算可得:实验一的线偏振平均误差为 1.88%,全局平均误差为 2.05%;实验二的线偏振平均误差为 2.09%,全局平均误差为 1.96%. 我们可以得到如下结论: a) 两个实验均具有较高的测量精度,说明本文提出的基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪的可行性. b) 实验误差的可能来源:

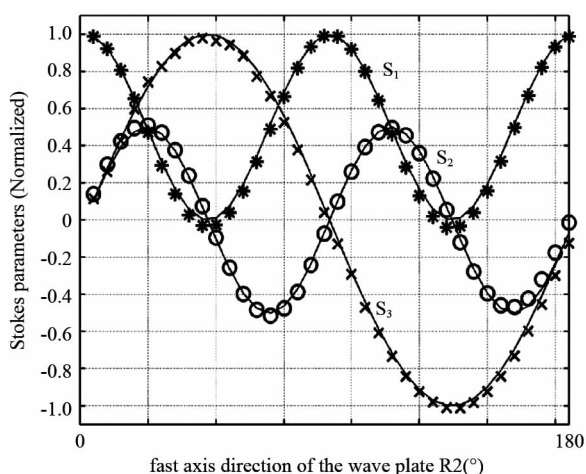


图5 实验一测量结果与标准曲线对比

Fig. 5 The comparison of the experimental data and the standard curve in the first experiment

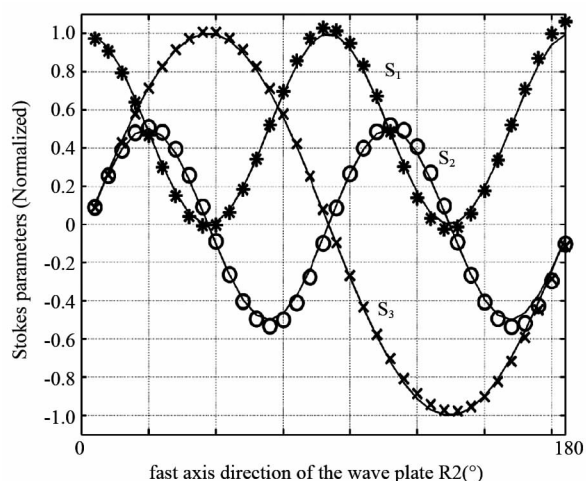


图6 实验二测量结果与标准曲线对比

Fig. 6 The comparison of the experimental data and the standard curve in the second experiment

激光光源偏振态的振荡,光束的漂移;偏振片组和波片的制作,边缘的吻合程度的好坏;偏振器件和探测器的对准等各项因素.

## 5 结论

提出的基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪,可以实现快速、实时的斯托克斯向量检测,且结构简单.为了提高测量精度,本文使用条件数,寻找到更优的设计,并给出一定优化条件下的实验结果.实验结果表明,该斯托克斯向量测量仪能够实现入射光偏振态的同时测量与高速输出,对于动态偏振系统的监控具有独特优势.通过类似优化设计,亦可扩展系统使用波段,改善红外波段测量效果.基于四

象限探测器的偏振测量仪,出于其本身固有的特点,可被广泛用于斯托克斯向量测量仪,椭偏仪,偏振遥感设备,穆勒矩阵测量装置等偏振仪器中;对于悬浮体系,生物组织和气溶胶颗粒物等对同时性要求很高的体系的偏振散射测量上,亦有较好的应用前景.

## References

- [1] Rajan S. Gurjar, Vadim Backman, Lev t. Perelman, *et al.* Imaging human epithelial properties with polarized lightscattering spectroscopy [J]. *NATURE MEDICINE*, 2001, **7** (11): 1245-1248.
- [2] Du E, He Honghui, Nan Zeng, *et al.* Mueller matrix polarimetry for differentiating characteristic features of cancerous tissues [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, **19** (7): 076013 1-8.
- [3] He Honghui, Sun Minghao, Nan Zeng, *et al.* Mapping local orientation of aligned fibrous scatterers for cancerous tissues using backscattering Mueller matrix imaging [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, **19** (10): 106007 1-8.
- [4] CHEN Shu-Guang, YE Xian-Jing, MO Dang. Optiacl properties of sputtered amorphous silicon from ellipsometric spectrum study [J]. *Journal of Semiconductors* (陈树光, 叶贤京, 莫党. 用椭圆偏振光谱法研究溅射无定形硅的光学性质. *半导体学报*), 1982, **3** (1): 23-30.
- [5] FransSnik, Jeroen H. Rietjens H., ArnoudApituley, *et al.* Mapping atmospheric aerosols with a citizen science network of smartphone spectropolarimeters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, **41** (20): 7351-7358.
- [6] FransSnik, Julia Craven-Jones, Michael Escuti, *et al.* An Overview of Polarimetric Sensing Techniques and Technology with Applications to Different Research Fields [C]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9099 (90990B).
- [7] SHAO Wei-Dong, WANG Pei-Gang, ZHENG Qin-Bo, *et al.* Polarimetric calibration airborne remote sensing polarimeters [J]. *Infrared Millim. Waves* (邵卫东, 王培纲, 郑亲波, 等. 机载偏振遥感仪的偏振定标. *红外与毫米波学报*), 2003, **22** (2): 137-140.
- [8] ZHANG Chao-Yang, CHENG Hal-Feng, CHEN Zhao-Hui, *et al.* Detecting low reflectivity camouflage net by using polarization remote sensing [J]. *Infrared Millim. Waves* (张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 偏振遥感识别低反射率伪装网研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28** (2): 137-140.
- [9] LIU Bi-Liu, SHI Jia-Ming, ZHAO Da-Peng, *et al.* Mechanism and Applications of Polarization Detection [J]. *J Infrared Millim. Waves* (刘必鏊, 时家明, 赵大鹏, 等. 偏振探测的机理及应用. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (5): 5-9.
- [10] Stokes G G. . On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources [S. l.]. *Mathematical and Physical Papers*.
- [11] Tyo J Scott, Goldstein Dennis L., Chenault David B., *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *APPLIED OPTICS*, 2006, **45** (22): 5453-5469.
- [12] Zhao Xiao-jin, Pan Xiaofang, Fan Xiaolei, *et al.* Patterned dual-layer achromatic micro-quarter-wave-retarder array for active polarization imaging [J]. *OPTICS EXPRESS*, 2014, **22** (7): 8024-8034.

(下转第98页)

- tra of pyridine adsorbed at a silver electrode [J]. *Chemical Physics Letters*, 1974, **26**(2): 163 – 166.
- [17] Jeanmaire D L, Vanduyne R P. Surface Raman spectro-electrochemistry .1. heterocyclic, aromatic, and aliphatic- amines adsorbed on anodized silver electrode [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1977, **84**(1): 1 – 20.
- [18] Pettinger B, Schambach P, Villagomez C J, *et al.* Tip-enhanced Raman spectroscopy: near-fields acting on a few molecules [J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2012, **63**: 379 – 399.
- [19] Chan K L A, Kazarian S G. Tip-enhanced Raman mapping with top-illumination AFM [J]. *Nanotechnology*, 2011, **22**(17): 175701.
- [20] Stadler J, Schmid T, Zenobi R. Developments in and practical guidelines for tip-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Nanoscale*, 2012, **4**(6): 1856 – 1870.
- [21] Steidtner J, Pettinger B. High-resolution microscope for tip-enhanced optical processes in ultrahigh vacuum [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, **78**(10): 103104.
- [22] Sun M T, Zhang Z L, Zheng H R, *et al.* In-situ plasmon-driven chemical reactions revealed by high vacuum tip-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Scientific Reports*, 2012, **2**: 647.
- [23] Chen C, Hayazawa N, Kawata S. A 1.7 nm resolution chemical analysis of carbon nanotubes by tip-enhanced Raman imaging in the ambient [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 3312.
- [24] Nakata A, Nomoto T, Toyota T, *et al.* Tip-enhanced Raman spectroscopy of lipid bilayers in water with an alumina- and silver-coated tungsten tip [J]. *Analytical Sciences*, 2013, **29**(9): 865 – 869.
- [25] Hartstein A, Kirtley J R, Tsang J C. Enhancement of the infrared-absorption from molecular monolayers with thin metal overlayers [J]. *Physical Review Letters*, 1980, **45**(3): 201 – 204.
- [26] Brown L V, Zhao K, King N, *et al.* Surface-enhanced infrared absorption using individual cross antennas tailored to chemical moieties [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, **135**(9): 3688 – 3695.
- [27] Pollard B, Muller E A, Hinrichs K, *et al.* Vibrational nano-spectroscopic imaging correlating structure with intermolecular coupling and dynamics [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 3587.
- [28] Knoll B, Keilmann F. Enhanced dielectric contrast in scattering-type scanning near-field optical microscopy [J]. *Optics Communications*, 2000, **182**(4-6): 321 – 328.
- [29] Hillenbrand R, Taubner T, Keilmann F. Phonon-enhanced light-matter interaction at the nanometre scale [J]. *Nature*, 2002, **418**(6894): 159 – 162.
- [30] Knoll B, Keilmann F. Near-field probing of vibrational absorption for chemical microscopy [J]. *Nature*, 1999, **399**(6732): 134 – 137.
- [31] Hillenbrand R, Keilmann F. Complex optical constants on a subwavelength scale [J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(14): 3029 – 3032.
- [32] Huth F, Schnell M, Wittborn J, *et al.* Infrared-spectroscopic nanoimaging with a thermal source [J]. *Nature Materials*, 2011, **10**(5): 352 – 356.
- [33] Amenabar I, Poly S, Nuansing W, *et al.* Structural analysis and mapping of individual protein complexes by infrared nanospectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 3587.
- [34] Brucherseifer M, Kranz C, Mizaikoff B. Combined in situ atomic force microscopy-infrared-attenuated total reflection spectroscopy [J]. *Analytical Chemistry*, 2007, **79**(22): 8803 – 8806.
- [35] Buergens F, Kersting R, Chen H T. Terahertz microscopy of charge carriers in semiconductors [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(11): 112115.
- [36] Yamamoto K, Ishida H. Optical theory applied to infrared-spectroscopy [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 1994, **8**(1): 1 – 36.
- [37] Chen H T, Kersting R, Cho G C. Terahertz imaging with nanometer resolution [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(15): 3009 – 3011.
- [38] Planken P C M, van Rijmenam C, Schouten R N. Opto-electronic pulsed THz systems [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, **20**(7): S121 – S127.
- [39] von Ribbeck H G, Brehm M, van der Weide D W, *et al.* Spectroscopic THz near-field microscope [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(5): 3430 – 3438.
- [40] Jacob R, Winnerl S, Fehrenbacher M, *et al.* Intersublevel spectroscopy on single InAs-quantum dots by terahertz near-field microscopy [J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(8): 4336 – 4340.
- [41] Kurihara T, Yamaguchi K, Watanabe H, *et al.* Dielectric probe for scattering-type terahertz scanning near-field optical microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(15): 151105.

(上接 62 页)

- [13] Chang Jintao, Nan Zeng, He Honghui, *et al.* Single-shot spatially modulated Stokes polarimeter based on a GRIN lens [J]. *OPTICS LETTERS*, 2014, **39**(9): 2656 – 2659.
- [14] Meenal Kulkarni, Viktor Gruev, Integrated spectral-polarization imaging sensor with aluminum nanowire polarization filters [J]. *OPTICS EXPRESS*, 2012, **20**(21): 22997 – 23012.
- [15] Ambirajan A, Look Jr D C. Optimum angles for a polarimeter: part I [J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(6): 1651 – 1655.
- [16] Ambirajan A, Look Jr D C. Optimum angles for a polarimeter: part II [J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(6): 1656 – 1658.
- [17] Dennis H. Goldstein. Polarized Light, 2nd revised and expanded [M]. Marcel Dekker, Inc., 1993, 27.6.
- [18] Tyo J S. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *APPLIED OPTICS*, 2002, **41**(4): 619 – 630.
- [19] Gurton K P, Yuffa A J, Videen G W. Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging [J]. *OPTICS LETTERS*, 2014, **39**(13): 3857 – 3859.