

用 Stokes 参量法研究角锥棱镜的偏振特性

黄春晖, 翟 晟

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350116)

摘 要: 角锥棱镜的偏振特性会产生退偏效应影响免调试固体激光器的输出质量和效率, 也可以实现相干互注入用于激光合成领域。无论是光的合成还是退偏效应的消除, 都需要有精确的偏振特性数据。利用解析几何和光线追迹法从理论上推导出角锥六种光回路的 Mueller 偏振变换矩阵。为了提高测量精度和稳定性, 设计了一种动态检测 Stokes 参量的方法, 通过实验获得角锥棱镜六种传输光路的高精度数据, 实验与理论的误差率为 4.470%, 误差在合理范围内, 可以确定其偏振特性。所做研究将有助于消除角锥棱镜的退偏效应, 提高免调试固体激光器等设备的性能, 提高激光合成效率和质量。

关键词: 偏振; 角锥棱镜偏振特性; 动态波片实验; Stokes 参量; 高精度数据; 追迹

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0818007

Polarization characteristics of corner cube reflectors by Stokes parameters

Huang Chunhui, Zhai Sheng

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The cube corner reflectors (CCR) have the depolarization effect, which will affect the efficiency of the adjust-free solid state laser, and can also be applied to the beam combination. Both of them require accurate polarization characteristics. The Mueller matrices of 6 transmission light paths of the cube corner were deduced by using analytic geometry and ray tracing. To improve the experiment, a scheme of dynamic detection of Stokes parameter was designed to get high precision data. The error rate is 4.470% and is within a reasonable range. This study have meaning for eliminating the depolarization effect of cube corner, improving the performance of laser and improving the efficiency of beam combination.

Key words: polarization; cube corner reflectors polarization characteristics;

dynamic wave-plates experiment; Stokes parameters; high-precision data; ray tracing

收稿日期: 2018-03-12; 修订日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61177072)

作者简介: 黄春晖(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事量子通信与集成电路设计等方面的研究。Email: hchuang@fzu.edu.cn

0 引言

角锥棱镜作为一种性能优良的光学器件,广泛应用于激光测距、激光器、激光合成等领域^[1-3]。在野外和太空环境下,用角锥作为免调试固体激光器的反射镜可以提高激光器工作的稳定性。另外,角锥的偏振特性使其能用于激光合成领域,成为高度相干合成器件。

角锥棱镜的偏振效应是指偏振光通过角锥内部三次全反射后发生的偏振态变化现象^[4]。在免调试固体激光器中,偏振光在谐振腔中来回反射每次经过角锥棱镜都会造成一定程度上的退偏效应,它会降低激光器的输出效率,使激光器发热带来不稳定性。过去国内外对于角锥的偏振特性的实验测量,典型的有叶一东^[5]和 Kalibjian^[6]报道的结果,这些结果主要有两个不足:一是实验数据曲线都是动态变化来验证理论,缺乏静态高精度实验数据;二是用相位差和方位角来表示偏振态的变化,需要进行转化,不够简洁、明了。文中用 Stokes 参量法研究角锥棱镜的偏振特性,给出了具体的 Mueller 转换矩阵。设计了两种不同的 Stokes 参量实验方案,测量了不同光回路下角锥的 Mueller 转换矩阵,实验结果与理论计算相符,这将有助于角锥偏振特性的应用。

1 偏振特性分析

1.1 几何结构与 Jones 矩阵

Jones 参量直观地表示光的幅度和相位,更易描述光学理论过程,Stokes 参量表征了偏振光的强度,在实验测量方面有优势,两种描述方法分别对应 Jones 矩阵和 Mueller 矩阵。建立如图 1 所示的坐标

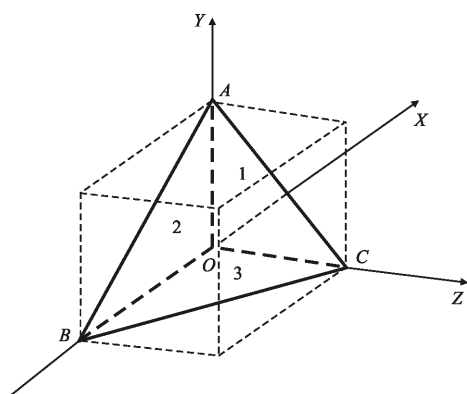


图 1 角锥的几何结构

Fig.1 Geometrical structure of cube corner

系来描述角锥棱镜的几何结构。角锥的三条互相垂直棱线 **BO**、**AO**、**CO** 作为 **X** 轴、**Y** 轴、**Z** 轴,分别界定了三个内反射面 **ACO**、**ABO**、**BCO**,三个面方程及其单位法向量分别为:

$$\begin{aligned} X=0, U_1=i \\ Z=0, U_2=-k \\ Y=0, U_3=-j \end{aligned} \quad (1)$$

式中: **i**, **j**, **k** 分别为 **X**、**Y**、**Z** 轴的单位向量。

假定入射方向垂直于正面 **ABC**,将三个面 **ACO**、**ABO**、**BCO** 分别用 1、2、3 面标注。入射光线先入射到 1 面,然后分别经过 2、3 面内反射,再沿着与入射光线平行的相反方向出射,将其定义为角锥的 1-2-3 路径。还有另外 5 种路径: 3-2-1、2-1-3、3-1-2、2-3-1、1-3-2。

光线在角锥内的三次反射都是全反射,入射光在三个入射面上的入射角为 54.7° 。传播路径如图 2 所示,可以看到内部的单位传播矢量分别为: I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 ,入射光线和出射光线的单位矢量分别为 I_0 、 I_5 。任意的偏振光都可以分解为水平方向和垂直方向两束线偏振光的叠加,以角锥的 **AB** 边为基准,定义 **S** 光方向平行 **AB**。第一次的内入射光线的单位矢量为 I_1 ,出射光线的单位矢量为 I_2 ,入射面法向量为 u_2 ,则:

$$u_2 = \frac{I_1 \times I_2}{|I_1 \times I_2|} \quad (2)$$

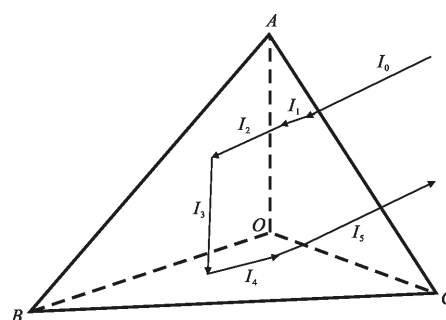


图 2 光线在角锥内部的传播轨迹

Fig.2 Path of light within CCR

按此原理可求出其他入射面的单位法向量,第一次垂直入射到 **ABC** 面的偏振光和最后出射光的 **S** 光分量的单位向量分别为 u_1 、 u_5 。由以上光路的传播过程,借助解析几何得到如表 1 所示的旋转坐标的夹角。

表 1 坐标旋转角

Tab.1 Angles of rotation of coordinates

Normals	Rotation	Angle/(°)
u_1, u_2	α_1	-60
u_2, u_3	α_2	-60
u_3, u_4	α_3	-60
u_4, u_5	α_4	-120

出射光和入射光的 Jones 矢量转换矩阵可以表示为^[7]:

$$J_{123} = T(\alpha_4)R_3T(\alpha_3)R_2T(\alpha_2)R_1T(\alpha_1) \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, 3$ 为三次反射的过程。常用的玻璃折射率 $n=1.515$, 将参数代入可得:

$$J_{123} = \begin{bmatrix} -0.0273 + 0.9585i & 0.2280 + 0.1686i \\ 0.2280 + 0.1686i & -0.9085 + 0.3069i \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 Mueller 矩阵

对于一个已知的 Jones 矩阵: $J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{13} & J_{14} \end{bmatrix}$, 可以

通过公式

$$M = U(J \otimes J^*)U^{-1} \quad (5)$$

将 Jones 矩阵转换为 Mueller 矩阵, 其中 $U =$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & i & -i & 1 \end{bmatrix}, \otimes \text{代表了克罗克内积, 可得:}$$

$$J \otimes J^* = \begin{bmatrix} J_{11} \cdot J_{11}^* & J_{12} \cdot J_{12}^* \\ J_{21} \cdot J_{21}^* & J_{22} \cdot J_{22}^* \end{bmatrix}. \text{将公式(4)代入公式(5)可得到}$$

对应的 Mueller 矩阵, 具体的六个方向结果见表 2。

表 2 实验与理论比较

Tab.2 Comparison between experiment and theory

Path	123	132	213
Theory	$\begin{bmatrix} 0.8391 & 0.3109 & -0.4464 \\ 0.3109 & 0.3994 & 0.8625 \\ 0.4464 & -0.8625 & 0.2385 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.0898 & -0.8471 & 0.5237 \\ 0.2254 & 0.5295 & -0.8178 \\ 0.9701 & -0.0446 & 0.2385 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.0898 & 0.2254 & -0.9701 \\ -0.8471 & -0.5295 & -0.0446 \\ -0.5237 & 0.8178 & 0.2385 \end{bmatrix}$
Experiment	$\begin{bmatrix} 0.85628 & 0.32282 & -0.45166 \\ 0.28825 & 0.43952 & 0.86832 \\ 0.42859 & -0.83822 & 0.21875 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.05038 & -0.84957 & 0.51353 \\ 0.34982 & -0.52495 & -0.81289 \\ 0.93546 & 0.05158 & 0.27476 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.00944 & 0.28571 & -0.95247 \\ -0.88720 & -0.51584 & -0.01769 \\ -0.46130 & 0.80764 & 0.30412 \end{bmatrix}$
Path	231	321	312
Theory	$\begin{bmatrix} -0.0898 & -0.2254 & 0.9701 \\ 0.8471 & -0.5295 & -0.0446 \\ 0.5237 & 0.8178 & 0.2385 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.8391 & -0.3109 & 0.4464 \\ -0.3109 & 0.3994 & 0.8625 \\ -0.4464 & -0.8625 & 0.2385 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.0898 & 0.8471 & -0.5237 \\ -0.2254 & -0.5295 & -0.8178 \\ -0.9701 & 0.0446 & 0.2385 \end{bmatrix}$
Experiment	$\begin{bmatrix} -0.10363 & -0.29328 & 0.95306 \\ 0.85527 & -0.50796 & -0.00580 \\ 0.50772 & 0.80791 & 0.30272 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.89208 & -0.31935 & 0.43496 \\ -0.29635 & 0.39111 & 0.85783 \\ -0.34113 & -0.86316 & 0.27375 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.14415 & 0.84567 & -0.49265 \\ -0.27555 & -0.53209 & -0.81125 \\ -0.95042 & 0.04142 & 0.31490 \end{bmatrix}$

2 实验系统设计

2.1 实验方法

在实验测量过程中, 光强度的测量技术是比较成熟的, 可以做到既高速又精确。设置一种固定的参数模式, 某个传播方向的传输矩阵为: $M =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & b & c \\ 0 & d & e & f \\ 0 & g & h & i \end{bmatrix}, \text{调节偏振器使得输入态为 } I_{in,1} = [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T,$$

得到:

$$I_{out,1} = M \cdot I_{in,1} = \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ d \\ g \end{bmatrix} \quad (6)$$

然后调节偏振器使得 $I_{in,2} = [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T, I_{in,3} = [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ 分别得到 $I_{out,2}, I_{out,3}$, 进而得到 M 矩阵的后两列数值。上述实验可得到一个光学回路 (如 1-2-3) 的变换矩阵。

2.2 静态实验方案设计

设计了一种静态波片角锥偏振特性测量方案。如图 3 所示, 以 JDSU-5411-G1-808 nm 单横模半

导体激光器作为光源,驱动器为 LDI-800。激光器发射光后经过光隔离器防止光回射,偏振器为大恒新纪元的 glan taylor 偏振器加上 1/4 波片的组合。角锥棱镜为长春金龙光电的 K9 高精角锥,光电二极管为实验室自制零差检测电路,PBS 实现 1:1 分光。LABVIEW 采集系统硬件方面包括 BNC-2110 连接盒,NI PCI-6111 S 系列数据采集(DAQ)板卡。

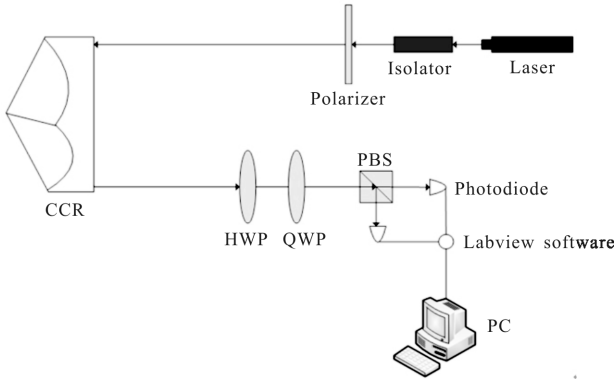


图 3 静态实验设计方案

Fig.3 Design scheme of static experiment

偏振光 $I_{in}=[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 经过 1/2 波片和 1/4 波片后经过 PBS 实现分光,两束偏振光分别入射到零差检测的光电二极管,经过差分检测得到 $I_{out}(\theta_1, \theta_2)$, 其中 θ_1, θ_2 表示 1/2 波片和 1/4 波片角度, 参数为 null 时表示不用该波片。首先不使用 1/4 波片,得到输出结果为:

$$I_{out}(\theta_1, null)=[\cos 4\theta_1 \cdot S_1 + \sin 4\theta_1 \cdot S_2 \ S_0 \ 0 \ 0]^T \quad (7)$$

零差检测检测到的是光强,也就是公式(7)中向量的第一项。将 1/2 波片的快轴的方位角 θ_1 分别设置为 $0, \frac{\pi}{8}$, 就可以分别得到 S_1, S_2 。将 1/4 波片加入偏振检测系统后,可以得到输出结果为:

$$I_{out}(\theta_1, \theta_2)=[A \cdot S_1 + B \cdot S_2 + \sin(2\theta_2) \cdot S_3 \ S_0 \ 0 \ 0]^T \quad (8)$$

其中, $A=2(\cos(4\theta_1)/4 + \cos(4\theta_2 - 4\theta_1)/4)$, $B=2(\sin(4\theta_1)/4 - \sin(4\theta_2 - 4\theta_1)/4)$, 将 θ_2 设置为 $\frac{\pi}{4}$, 将 θ_1 设置为 $\frac{\pi}{8}$, 就得到了 S_3 。

2.3 动态实验设计与仿真

动态波片角锥偏振特性测量实验如图 4 所示。其他的器件与图 3 相同,数据采集系统的核心部分使用了动态旋转波片的方式^[8-9]。偏振光经过 10:1 的 NPBS 后分成信号光和触发光,信号光离开 NPBS 后进入不断旋转的 1/4 波片,它由一个中心和波片

中心对齐的轮轴带动。数字电机带动了另一个轮轴,并通过传送带带动 1/4 波片转动,为了防止滑动问题,选用了带有齿轮的传送带和轮轴。离开 1/4 波片后,信号光进入线偏振器,再经过聚焦镜聚焦防止光束过于发散。光电二极管前的衰减片使得信号光的强度保持在线性区域。另一个方向, NPBS 分出的触发光后经过一个编码轮盘(Encoding Whell),该轮盘和 1/4 波片一起同轴转动,轮盘上均匀地分布着小孔,使得触发光间隔相同的时间进入光电二极管。轮盘上的透光孔每透过一个触发光点就对信号光采样一次,采样率可以通过设置转动速度加以改变。对于一束偏振光 I_{in} 经过 1/4 波片和线偏振器后得到的输出光可以表示为 $M(\beta) \cdot M(\alpha) \cdot I_{in}$, 其中 $M(\alpha), M(\beta)$ 分别为 1/4 波片和线偏振器的 Mueller 矩阵。可以将线偏振器的传输轴和水平 X 轴的夹角设置为 0° , 此时光电二极管检测到的光强度为:

$$E(\alpha) = \frac{X - Y \cdot \sin(2\alpha) + Z \cdot \cos(4\alpha) + W \cdot \sin(4\alpha)}{2} \quad (9)$$

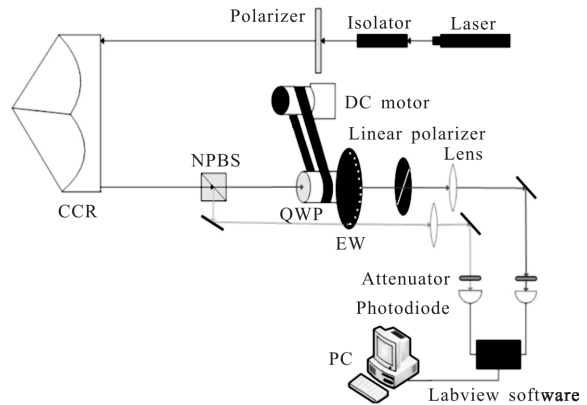


图 4 动态实验设计方案

Fig.4 Design scheme of dynamic experiment

其中, $S_0=X-Z, S_1=2Z, S_2=2W, S_3=Y$ 。公式(9)实际上是一个傅里叶函数的截断,因此可以得到^[10]:

$$\begin{aligned} X &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} E(\alpha) d\alpha \\ Y &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} E(\alpha) \sin(2\alpha) d\alpha \\ Z &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} E(\alpha) \cos(4\alpha) d\alpha \\ W &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} E(\alpha) \sin(4\alpha) d\alpha \end{aligned} \quad (10)$$

对于公式(9)中的波片旋转角度采用离散取样

方式 $\alpha = \omega t$, 其中 ω 是波片旋转的角速度, 改变了波片旋转的角速度就改变了采样率。在图 4 中, 光电二极管采集到的数据经过数据处理中心后完成公式 (10) 的变换, 得到 Stokes 参量。取典型值线偏振态为 $[1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$, α 从 $0 \sim 2\pi$ 变化, 进行数值仿真可以得到图 5。可以看到当采样率较高时, 离散点取值与连续点取值趋势误差很小, 几乎完全相同。

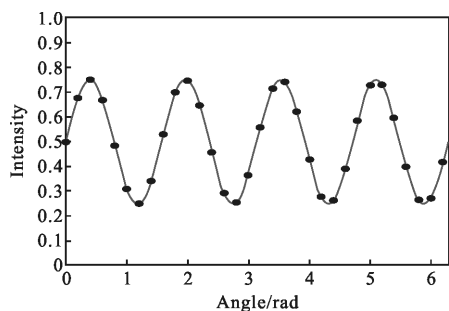


图 5 采样仿真图

Fig.5 Sampling simulation diagram

3 实验结果与分析

3.1 动态实验结果

动态实验并不需要零差检测中两束光相减的过程, 采样率可以较高。设置采样率为 33.333 3 sps, 传输路径为 123, 输入态按照 2.1 节过程设置, 具体的结果如图 6 所示。

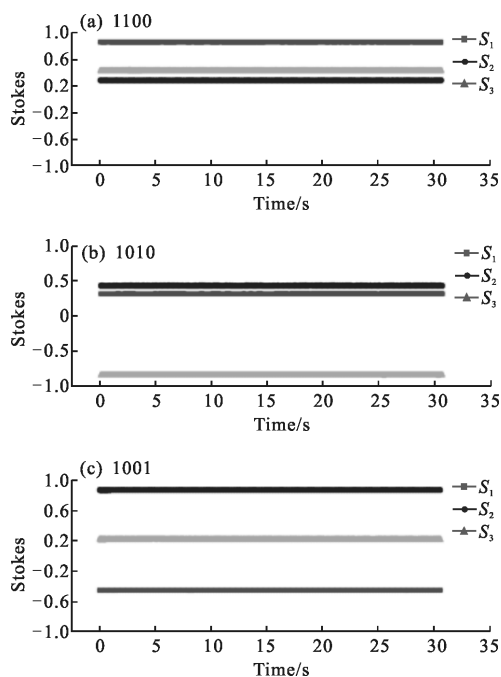


图 6 动态实验结果

Fig.6 Dynamic experiment result

3.2 静态实验结果与比较

静态实验设置采集卡采样速率为 1 sps, 输入态为 $[1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, 传播方向为 123, 零差检测会将光强转换为电压, 实验结果如图 7 所示。归一化后得到 $[1 \ -0.488 \ 3 \ 0.816 \ 3 \ 0.308 \ 7]^T$, 完整 123 方向的结果见表 3。

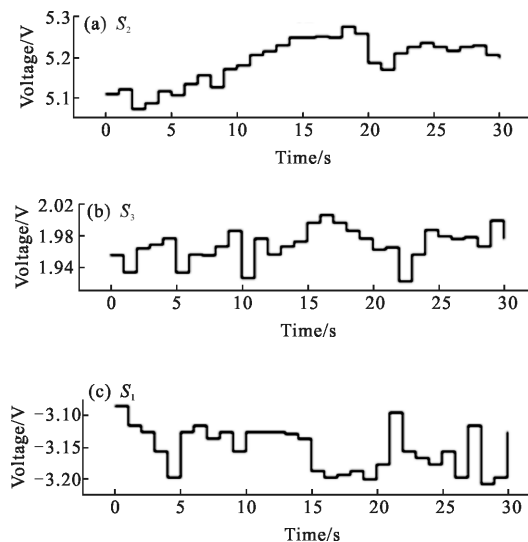


图 7 1001 输入态时 Stokes 参数的静态实验结果

Fig.7 Static experiment result of Stokes parameters for 1001 input state

表 3 动态与静态实验的比较

Tab.3 Comparison of dynamic and static experimental results

Experiment	Mueller matrix	MER
Static	$\begin{bmatrix} 0.8525 & 0.3530 & -0.4883 \\ 0.3080 & 0.4622 & 0.8163 \\ 0.4230 & -0.8132 & 0.3087 \end{bmatrix}$	9.659%
Dynamic	$\begin{bmatrix} 0.85628 & 0.32282 & -0.45166 \\ 0.28825 & 0.43952 & 0.86832 \\ 0.42859 & -0.83822 & 0.21875 \end{bmatrix}$	4.470%

静态实验每隔 1 s 采样一个点, 而动态实验每隔 0.33 s 采样一个点, 后者对于偏振态的监测效果更好。相同条件下动态实验结果如图 8 所示, 可知动态实验除了仪器刚启动电机不稳定造成抖动外, 其后数据很稳定。

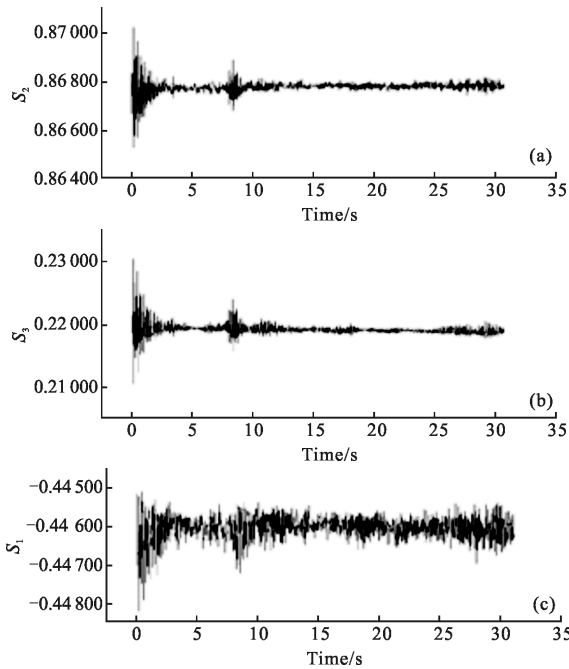


图 8 1001 输入态时 Stokes 参数的动态实验结果

Fig.8 Dynamic experiment result of Stokes parameters for 1001 input state

3.3 误差分析与比较

为了衡量理论和实际结果的偏差,定义一个矩阵误差率(Matrix Error Rate, MER)为:

$$MER = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \left| \frac{a_{ij,actual} - a_{ij,theoretical}}{a_{ij,theoretical}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

将其用于两组实验数据中,具体见表 3。

两个系统共有的误差有波片的延迟误差、角锥的加工角度误差、角锥的失谐、激光器强度不稳定、光电探头的信号噪声等。查阅器件手册,此次使用角锥的角度公差为 3' 左右。实验使用的波片为宽谱波片,预计会成为主要的误差来源。设计如图 9 所示的

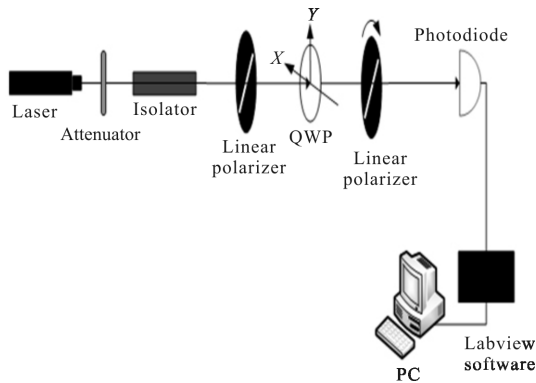


图 9 波片延迟误差实验设计方案

Fig.9 Design scheme of wave plate phase delay error experiment

波片真实延迟量测量实验。实验过程如下:将第一个线偏振器传输轴设置为水平方向,得到输入 1/4 波片的偏振光 $I_{input} = E_0 [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$,其中 E_0 为光强度。对于 1/4 波片,使用波片通用旋转 Mueller 矩阵 $M(\delta, \theta)$,设置快轴与水平线的夹角 $\theta = \frac{\pi}{4}$,第二个线偏振器传输轴与水平方向成 β 角,传输矩阵为 $M(\beta)$ 。光经过 1/4 波片和偏振器后得到 $M(\beta) \cdot M(\delta, \theta) \cdot I_{input}$ 。光电探测器检测到的参数为:

$$E(\delta, \beta) = \frac{E_0}{2} [1 + \cos(\delta) \cdot \cos(2\theta)] \quad (12)$$

分别取 β 为 0° 和 45° 后,可得:

$$\cos(\delta) = \frac{E(\delta, 0^\circ)}{E(\delta, 45^\circ)} - 1 \quad (13)$$

具体的实验数据如图 10 所示。将数据代入公式(13)可得: $\delta_{actual} = 87.4331^\circ$,理想 1/4 波片的延迟为 $\delta_{theoretical} = 90^\circ$,得到相位误差率(Phase Error Rate, PER)为:

$$PER = \left| \frac{\delta_{actual} - \delta_{theoretical}}{\delta_{theoretical}} \right| \times 100\% = 2.85\% \quad (14)$$

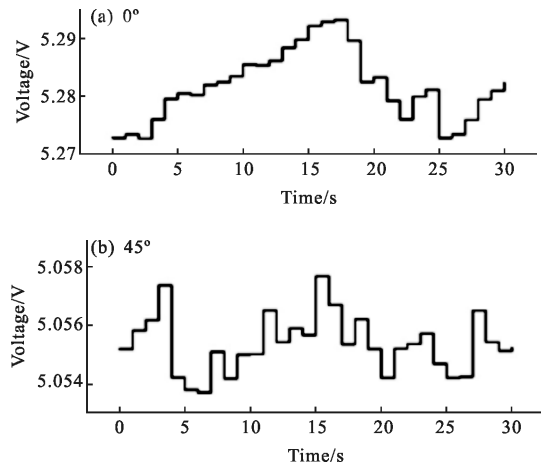


图 10 偏振器 0° 和 45° 实验结果

Fig.10 Experimental results for polarizers at 0° and 45°

对于静态实验来说,使用了两个宽谱波片,误差为两个波片的误差的叠加。此外,误差还包括手工调节角度误差、手动调节导致的仪器不准直、PBS 分光无法做到理论上的 1:1、静态波片轨道容易受到外界影响等。预计静态实验误差相对于动态实验较大。

对动态实验系统来说,参考文献[11]中指出:此类动态波片测量系统的误差理论上应该小于 5%。上文中的 PER 为 2.85%,再加上角锥加工误差等其他

系统误差,因此动态波片系统的合理误差范围应该是 2.85%~5%。实验结果的误差率 4.470%在误差范围内。

4 结 论

文中先通过 Jones 参量推导出了角锥棱镜六种传输光路的传输矩阵 J_{lm} ,然后利用克罗克内积将其转换成对应的 Stokes 参量变换矩阵 -Mueller 矩阵 M_{ijk} 。设计了静态波片和动态波片两种实验测量方案,具体测量了角锥棱镜的 Mueller 矩阵,两种实验方案与理论的误差率分别为 9.659%和 4.470%,理论与实验结果在误差范围内。比较而言,静态实验相对较为简便,动态实验则可以得到高精度角锥偏振特性数据。所做的研究可为快速、精确地测量角锥棱镜的偏振特性提供实验方案,拓展角锥的应用领域。

参考文献:

- [1] Kalibjian R. Polarization preserving corner cubes [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 239-246.
- [2] Shi Yan, Jin Ting, Li Song, et al. Models simulation of oriented prism laser resonator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 521-525. (in Chinese)
石岩, 金挺, 李松, 等. 定向棱镜激光腔模式模拟研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(5): 521-525.
- [3] Lu Changyong, Li Li, Liu Xu, et al. Directional prism resonator to improve the output performance of IOPO [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (6): 820-822. (in Chinese)
- 卢常勇, 李莉, 刘旭, 等. 定向棱镜改善内腔式光参量振荡器输出性能[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 820-822.
- [4] Cheng Y, Liu X, Wan Q, et al. Mutual injection phase locking coherent combination of solid-state lasers based on corner cube[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5150-5152.
- [5] Li Jianmin, Ye Yidong, Liao Yuan, et al. Theoretical and experimental study on polarization characteristics of corner-cube folded resonator [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2010, 22(7): 1495-1499. (in Chinese)
李建民, 叶一东, 廖原, 等. 折叠式角锥棱镜谐振腔的偏振特性理论与实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1495-1499.
- [6] Kalibjian R. Stokes polarization vector and Mueller matrix for a corner-cube reflector[J]. *Optics Communications*, 2004, 240(1-3): 39-68.
- [7] Crabtree K, Chipman R. Polarization conversion cube-corner retroreflector[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(30): 5882-5890.
- [8] Lin J F, Lee M Z. Concurrent measurement of linear birefringence and dichroism in ferrofluids using rotating-wave-plate Stokes polarimeter [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7): 1669-1674.
- [9] Kihara T. Measurement of Stokes parameters by quarter-wave plate and polarizer [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2005, 3-4: 235-242.
- [10] Fluerau C, Latoui S, Besse J, et al. Error analysis of a rotating quarter-wave plate Stokes' polarimeter [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2008, 57 (4): 731-735.
- [11] Arnoldt S. Rotating quarter-wave plate Stokes polarimeter [D]. Bonn: Bonn University, 2011.