

## 光学波片相位延迟测量仪设计

刘维新, 魏志伟, 赵文谦, 丁星卜

(山东大学 空间科学研究院 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 山东 威海 264209)

**摘要:** 将光学波片放入激光谐振腔可使振荡模式发生分裂, 测量分裂模的频率差能准确测得波片的相位延迟。基于这一原理, 设计了光路沿竖直方向的相位延迟测量仪, 可根据频率差不同引起振荡模式的变化采用相应测量方法。对半外腔激光器、光强和频差探测单元、控制程序等部分进行了设计说明。为了实现自动化和高精度测量, 系统选定两正交偏振模的等光强点作为工作点, 并补偿初始相位延迟和波片倾斜误差。测试表明, 仪器能够对任意相位延迟的波片自动判定并测量, 对多级波片多次测量的标准差约  $0.01^\circ$ , 总的测量不确定度为  $0.03^\circ$  (优于  $\lambda/10\ 000$ ), 且只需要测量激光频率差, 具有可溯源性。

**关键词:** 相位延迟; 波片测量; 频率分裂; 正交偏振; 氦氖激光器

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0718001

## Design of phase retardation measuring instrument for optical wave plate

Liu Weixin, Wei Zhiwei, Zhao Wenqian, Ding Xingbu

(Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment,  
Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China)

**Abstract:** One laser oscillating mode would split into two with an optical wave plate being inserted in the resonator. The frequency difference of splitting modes can be measured to obtain the wave plate phase retardation. Based on the principle, a measuring instrument for wave plate was designed with optical path along vertical direction, which could choose certain measuring method according to oscillating modes altered by frequency difference. The half-cavity laser, the detection of laser intensity and frequency difference, the controlling program were described in detail. In order to automatically measure wave plate with high precision, the instrument utilized the equal intensity point of two orthogonally polarized lights as working point, and compensated the systematic errors from initial phase retardation and slightly tilted wave plate. In testing experiments, the instrument can automatically discriminate and measure arbitrary retardance wave plates. The measurements show standard deviation of about  $0.01^\circ$  and uncertainty of  $0.03^\circ$  (less than  $\lambda/10\ 000$ ) as to a multi-order quartz wave plate. The instrument has traceability and only the frequency difference of laser modes is acquired in measurement.

**Key words:** phase retardation; wave plate measuring; frequency splitting; orthogonal polarization; helium-neon laser

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(41627806)

作者简介: 刘维新(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光精密测量和空间探测技术方面的研究。Email: liuwx@sdu.edu.cn

## 0 引言

激光技术在精密测量领域有广泛应用,尤其当激光器本身作为传感器,通过在谐振腔内或腔外放置光学元件,使被测量转变为激光频率或光强的变化,可以进行高灵敏度测量<sup>[1-3]</sup>。光学波片是基本光学元件,广泛应用于光通信,干涉仪,矿石分析等领域,其相位延迟的准确性会影响光学系统的性能指标<sup>[4]</sup>,需要精确测量。目前常用的测量方法包括:旋转消光法、电光/磁光调制法<sup>[5-6]</sup>、旋转检偏器法<sup>[7]</sup>、内差/外差干涉法<sup>[8]</sup>、椭圆偏法<sup>[9]</sup>等。这些方法技术成熟,但多数需要精密测量角度,设备复杂且昂贵;部分方法的被测量为光强,受探测器非线性影响大;一般测量精度只有  $\lambda/100\sim\lambda/1\ 000$ ,且有的只适用于  $1/4$  波片或半波片,无法满足任意波片精密测量要求。

激光器既作为光源也作为探测器用于波片测量,是一种有效的方法。将波片放入激光回馈外腔中,使两正交偏振光的光强调谐曲线产生确定的相位差<sup>[10-11]</sup>,或者产生两偏振光的模式跳变现象<sup>[12-13]</sup>,都可实现相位延迟测量。基于激光回馈原理的测量系统结构简单,可在线测量,有很好的应用潜力,只是测量精度一般只有约  $0.3^\circ$ 。

为了更高精度测量波片,另一个方法是将波片直接放入激光谐振腔,使激光振荡模式发生频率分裂现象<sup>[14-15]</sup>。由于是将波片的相位延迟与激光频率(即波长)关联起来,且频率差可精确测量,因此该方法可使波片测量具有溯源性。文中在激光频率分裂研究基础上,设计了一种小型化自动测量的波片相位延迟测量仪。通过优化激光器、光强和频差探测单元参数,选择合适的工作点以及补偿系统误差,仪器可自动对任意相位延迟大小的波片进行高精度测量。

## 1 相位延迟测量仪系统设计

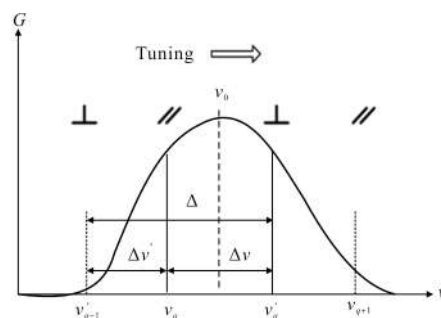
### 1.1 基本测量原理

根据激光物理,当具有一定相位延迟的波片放入氦氖激光器谐振腔内时,沿着双折射的两个方向,会使原本长度唯一的谐振腔"分裂"为物理长度不同(光程不同)的两个腔长,对应的每一级纵模会分裂为偏振态相互正交的两个频率(如图 1(a)所示,⊥表示垂直偏振态,∥表示水平偏振态),则腔内波片的

相位延迟满足:

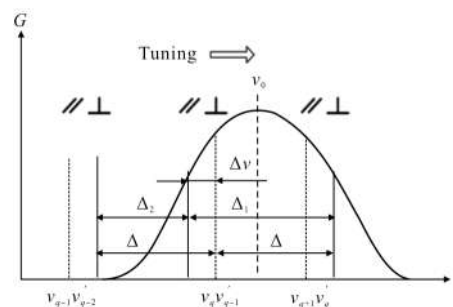
$$\phi=(\Delta\nu/\Delta)\pi=(\Delta\nu/\Delta)\times 180^\circ \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu$ 为分裂模频差; $\Delta$ 为纵模间隔。实际在测量中,可以通过改变谐振腔长使 $\nu_q$ 和 $\nu'_q$ , $\nu_q$ 和 $\nu'_{q-1}$ 依次进入出光带,两次测量频差得到 $\Delta=\Delta\nu+\Delta\nu'$ ,代入公式(1)计算相位延迟。



(a) 发生频率分裂时

(a) Frequency splitting occurs



(b) 未发生频率分裂时

(b) No frequency splitting

图 1 波片相位延迟的测量原理

Fig.1 Principle of wave plate phase retardation measurement

但当波片为半波片(或全波片)时, $q$ 级分裂模 $\nu_q$ 非常靠近相邻级的分裂频率 $\nu'_{q-1}$ (或 $\nu'_{q-2}$ ),二者由于模竞争而无法同时振荡。一般当隐频率分裂量 $\Delta\nu$ 小于约 20 MHz 时,调谐腔长过程中 $\nu'_{q-1}$ 由于与已经振荡的 $\nu_q$ 同偏振而无法起振,如图 1(b)中虚线所示,此时可测得振荡模 $\nu_q$ 和 $\nu'_q$ 的频差 $\Delta_1=\Delta+\Delta\nu$ 。同样的道理,继续调谐腔长,使 $\nu_q$ 和 $\nu'_{q-2}$ 处于出光带同时振荡,可以测得频差 $\Delta_2=\Delta-\Delta\nu$ ,进而得到半波片或全波片的相位延迟分别为<sup>[16]</sup>:

$$\phi_{\text{HWP}}=\frac{2\Delta_1}{\Delta_1+\Delta_2}\times 180^\circ, \quad \phi_{\text{FWP}}=\frac{3\Delta_1+\Delta_2}{\Delta_1+\Delta_2}\times 180^\circ \quad (2)$$

当隐频率分裂量  $\Delta\nu$  处于约 20~40 MHz 范围时,不会发生上述两种情况,而是在腔长调谐过程中振荡模式由一个偏振态快速跳变为正交的另一个偏振态,发生模式跳变。此时,无法利用公式(1)或公式(2)得到波片相位延迟,可以在谐振腔内再放入一个偏置波片(如 1/4 波片)。通过频率分裂测量偏置波片和待测波片共同作用下的相位延迟  $\phi_{total}$ ,再将待测波片取出,测量偏置波片的相位延迟  $\phi_{offset}$ ,则待测波片相位延迟为:

$$\phi = \phi_{total} - \phi_{offset} + \pi = \phi_{total} - \phi_{offset} + 180^\circ \quad (3)$$

下面根据这一原理设计波片测量仪,能够自动判别相位延迟的大小并采用相应的公式测量。

### 1.2 测量仪整体设计

根据激光频率分裂原理,对波片相位延迟测量仪进行优化设计,整体结构如图 2 所示。其中,系统光路为竖直布局,从上到下为:光强探测单元、激光测量部分、频差探测单元三部分,以及自动控制测量过程的计算机程序。

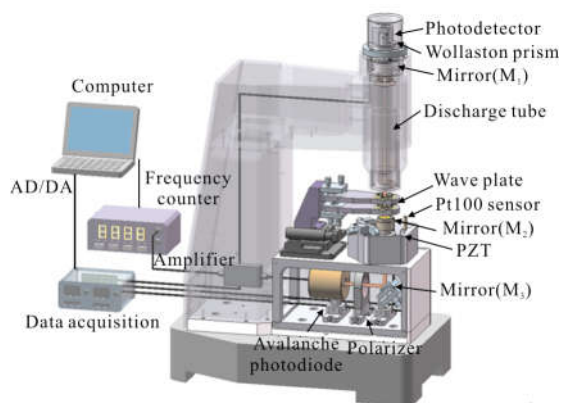


图 2 波片相位延迟测量仪系统设计

Fig.2 Schematic design of wave plate phase retardation measuring system

系统方案中,待测波片放入激光测量部分产生频率分裂。其中,半外腔 He-Ne 激光器工作波长为 632.8 nm,由反射镜  $M_1$  和  $M_2$  构成谐振腔, $M_2$  固定在压电陶瓷 PZT 上,可以沿激光轴线调谐腔长。在激光器开腔部分设置调整好的波片架,用于放置待测波片及偏置波片。为检测和补偿环境温度对片测量结果的影响,在波片架附近设置 Pt100 温度传感器实时记录温度。

光强探测单元用于在测量过程中实时记录光强

变化曲线,判断是否发生模式跳变,并寻找频差测量的工作点。频差探测单元用于在工作点多次测量激光两正交偏振模的频差。为实现波片自动测量,系统采用计算机程序接收光强和频差探测信号,改变 PZT 驱动电压控制激光腔长,并针对不同相位延迟的波片代入相应计算公式给出最终测量结果。

### 1.3 激光测量部分

He-Ne 激光器是相位延迟测量仪的核心部件,会在很大程度上决定仪器的性能指标,因此需要特殊设计谐振腔结构和参数。一方面,激光激光器要有足够大的出光带宽,保证分裂的两个频率能够同时振荡。另一方面,激光器不能工作在多纵模状态下,以免出现频差混叠,且激光器要工作在 TEM00 模状态下。综合考虑这些因素,设计激光器使纵模间隔约 750 MHz 左右。通过选择 He-Ne 激光器的放电毛细管和两个腔镜的曲率半径和透射率,可满足:出光带宽控制在 1 000 MHz 左右,测量同级分裂模和纵模时两振荡模距出光带边缘有一定距离,拍频信噪比较高,利于准确测量频差;谐振腔长调谐过程中激光器始终输出基横模。由于要对激光器两端输出光分别探测光强和频差,前者需要小功率即可,后者则对功率和信号比要求较高,因此设计腔镜  $M_2$  比  $M_1$  的透射率约大 1 倍。

在竖直结构的激光测量光路中,放入波片后要保证其快/慢轴沿激光本征偏振方向,因此设计了有 8 个调节自由度的支架以调整波片位置和角度。另外,激光腔镜  $M_2$  需要精密调节使激光出光,受限空间小以及调节旋钮外置,设计二维调整架如图 3 所示。其中,镜架 A 可以使  $M_2$  沿 x 轴方向调整倾斜角,镜架 B 可以使  $M_2$  沿 y 轴方向调整倾斜角,角度

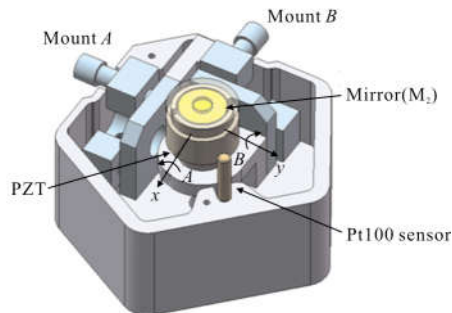


图 3 激光腔镜  $M_2$  二维调整架

Fig.3 2D adjusting mount for laser resonator mirror  $M_2$

调节范围为 $\pm 2^\circ$ 。

### 1.4 光强和频差探测单元

在光强探测单元中,要准确测量激光输出的两正交偏振光的光强,确定频差测量时的工作点。激光器从  $M_1$  端输出光向上入射到 Wollaston 棱镜,按正交偏振严格分成两束,分别由两个硅光电池探测。接收到的光电流信号经 I/V 转换和放大后,产生幅值约 5 V 的电信号,总的光电转换系数约为 50 V/mW。光强信号由 12 位数据采集卡进行 A/D 转换输入计算机,对于信号范围输入电压,最小可分辨 1.22 mV,转换速率 10  $\mu$ s,可满足光强探测的要求。

对于频差探测单元,激光器从  $M_2$  端输出光向下经过  $45^\circ$  倾斜反射镜  $M_3$  后折转为水平方向,以缩减光路长度。两振荡模式对应的偏振态是相互垂直的,由起偏方向沿正交偏振方向角平分线的偏振片形成光拍,其频率即为两振荡模式的频差。由于测量时最大频差超过纵模间隔约 750 MHz,采用响应快的雪崩光电二极管 APD 进行探测。光拍信号由高频放大器放大后峰峰值达到 1 V,可满足频率计对信噪比的要求。频率计通过 RS232 串口通信将频差值传输到计算机。为减小 APD 及频率计读数等电信号误差,需要多次测量频差计算得到平均值。

## 2 系统调整及关键技术

### 2.1 频差测量工作点选取

波片测量过程中,两振荡模式有较宽的共存区,其频差随激光腔长会有微小变化。因此,需要确定一个合适的工作点读取频差,获得高信噪比,减小误差并易于控制测量过程。一个可行的工作点是等光强点(Equal intensity point, EIP),如图 1 所示,两模式  $\nu_q$  和  $\nu'_q$  位于出光带中心频率  $\nu_0$  左右两侧对称的位置时,它们在增益曲线上的烧孔一样,光强一样,为等光强点。二者形成的拍频信号交流成分幅度最大,信噪比最好,容易实现自动判别。

图 4 中给出了两偏振光的光强随腔长的变化曲线。可以看出,在等光强点 EIP1 和 EIP2,两偏振模的光强接近相等。测量时,由于光强曲线不完全光滑,为避免程序在等光强点反复判断,可设定光强差小于 0.1 V 即认为光强相等。同时光强探测单元测得光强转换的电压值最大约 5 V,因此判别阈值约

为光强峰值的 1/50。这会对频差带来一定的随机误差,但已经在仪器的测量不确定度范围之内了。

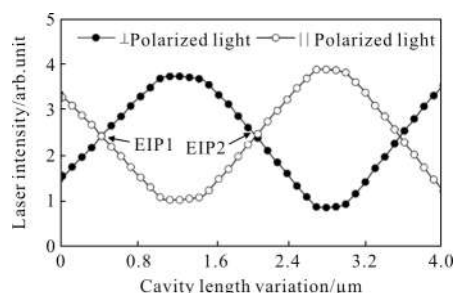


图 4 两偏振光光强调谐曲线的等光强点

Fig.4 Equal intensity point (EIP) of two polarized lights intensity tuning curve

### 2.2 波片倾斜角调整和测量

波片的相位延迟与倾角有关,放入激光谐振腔时需要精细调整其面法线沿激光轴线方向。

研究同时发现,谐振腔内的波片放正后,会引起分裂模的不寻常调谐<sup>[17]</sup>,降低测量重复性和复现性。仪器设计中使波片相对于激光轴线倾斜一定的小角度,测量完成后再补偿系统误差。

实际只需要精密调整并测量波片架相对于激光轴线的倾角,方法如图 5 所示。首先调整腔镜  $M_2$  使

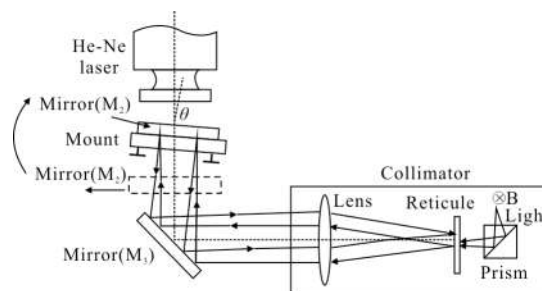


图 5 波片架倾角调整和测量示意图

Fig.5 Schematic diagram of adjusting and measuring the titled angle of wave plate mount

激光器出光,取出  $M_2$  后放入波片架,重新调整激光器出光,此时波片架严格对准激光轴线。然后将  $M_2$  反射面朝下,在水平方向上放置平行光管,调整其出射光经  $M_3$  向上入射到  $M_2$ ,并原路返回显示在分划板上,调整并读取波片架转过的倾角  $\theta$  并记录。最后将  $M_2$  安装好再次调激光器出光。每次测量波片后,根据记录的波片架倾角  $\theta$  值以及波片厚度(或级次),可补偿额外引入的相位延迟。对于多级石英波片,其整数部分或级次可由螺旋测微器测得,小数部

分由测量仪得到,合并后得到波片的实际厚度。

### 2.3 初始相位延迟补偿

激光器内由于光学玻璃元件存在残余应力,会在谐振腔内引入一定的各向异性。He-Ne 激光器加工完成后,残余各向异性大小基本确定,可以等效成相位延迟很小的全波片。通常,等效全波片的相位延迟约  $0.1\sim 1^\circ$ ,相对于波片测量已经不可忽略,需要进行补偿。

具体方法是:在未放入波片前,激光分裂模处于如图 1(b)中的抑制状态,系统自动测量并采用式  $\phi = |(\Delta_1 - \Delta_2)/(\Delta_1 + \Delta_2)| \times 180^\circ$  得到初始相位延迟  $\Delta\phi_r$ ;放入波片使其快/慢轴与等效全波片快/慢轴方向一致(即激光器本征偏振方向);测量后再从最终结果扣除  $\Delta\phi_r$  进行误差补偿。实际中,对测量仪的初始相位延迟进行了多次测量,结果如图 6 所示。可见,初始相位延迟的平均值为  $0.1765^\circ$ ,标准差为  $0.0005^\circ$ 。一般  $\Delta\phi_r$  的值随时间变化很小,因此可以存储到控制程序中,每次测量波片后,都从结果中扣除  $\Delta\phi_r$ 。

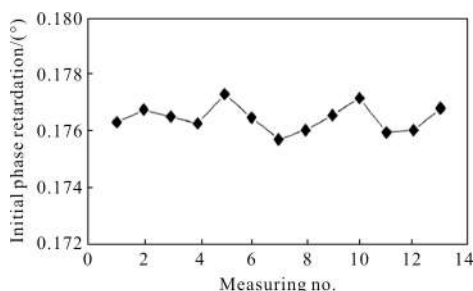


图 6 测量系统的初始相位延迟量

Fig.6 Initial phase retardation of measuring system

## 3 自动测量及结果分析

### 3.1 测量过程自动控制

结合 1.1 节中给出的针对不同波片的测量公式,以及第 2 节中给出的工作点选取和系统误差补偿方法,编写计算机控制程序,自动根据相位延迟大小判别波片并进行测量,有效提高测量重复性。控制程序通过 D/A 输出电压信号驱动 PZT 伸长,通过 A/D 记录光强信号和 Pt100 的温度值,通过串口读取频率计测得的频差值。

图 7 为程序流程图。程序进行初始化后,首先,测量系统初始相位延迟并记录,提示输入待测波片

厚度或级次;输出驱动电压控制 PZT 伸长,采集光强探测单元接收的两偏振光强信号并求差;当两光强差小于设定的阈值且逐渐减小时,达到第一个工作点 EIP1,多次读取频率计的频差并取平均值记为  $\nu_1$ ,同时记录 Pt100 探测的环境温度;继续增大 PZT 电压,采集两光强信号直至到达第二个工作点 EIP2,多次读取频差值并记录平均值  $\nu_2$  和温度值。其次,根据两个工作点光强变化进行判断,如果没有发生模式跳变,计算在两个等光强点测得的频差之和  $\nu_1 + \nu_2$ ,与纵模间隔  $\Delta$  比较  $\eta = (\nu_1 + \nu_2)/\Delta$ ;如果  $\eta \approx 1$ ,

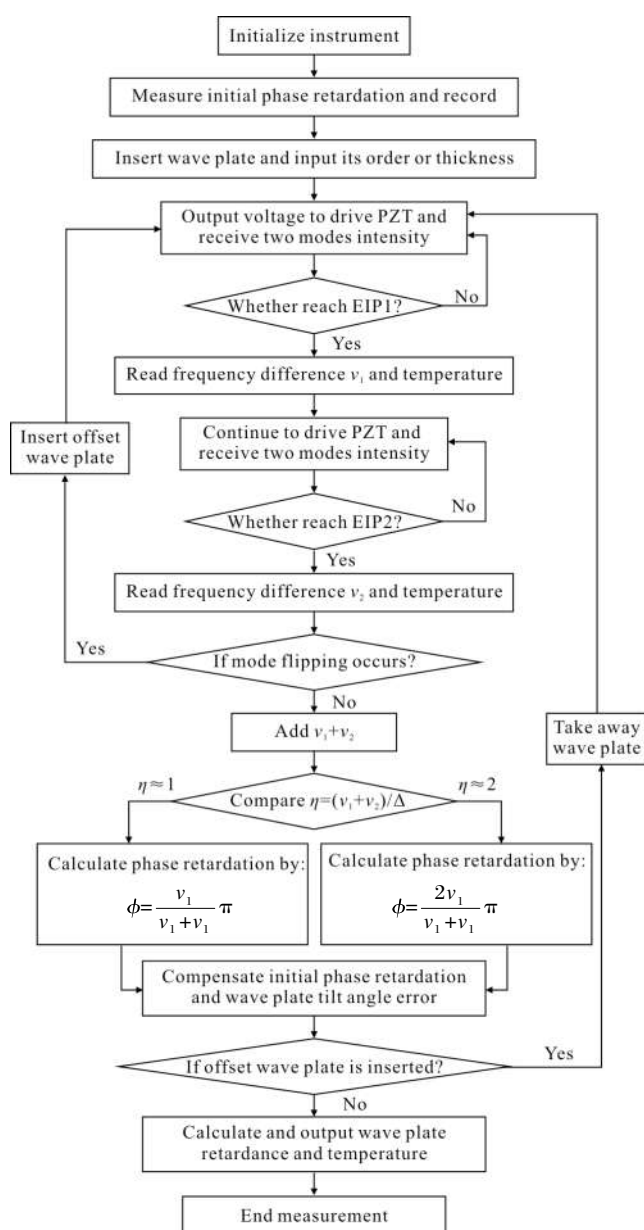


图 7 自动测量流程图

Fig.7 Flow chart of automatic measurement

则被测波片为可以产生频率分裂的非半/全波片,代入公式(1)计算相位延迟大小;如果  $\eta \approx 2$ , 则被测波片是很接近标准波片的半/全波片,代入公式(2)计算相位延迟;如果测量中发生模式跳变,提示放入偏置波片重复上述测量过程,先后测得相位延迟  $\phi_{total}$  和  $\phi_{offset}$ , 代入公式(3)计算相位延迟。最后,根据记录的初始相位延迟,波片架的倾斜角,以及待测波片的厚度(或级次),补偿系统误差得到最终测量结果并输出和保存。

### 3.2 不同波片相位延迟测量

已完成的波片测量仪,可测量任意大小相位延迟,包括常用的 1/4 波片,半波片/全波片,单次测量时间不超过 20 s。实物装置如图 8 所示。对常用的石英波片实测结果及分析如下。

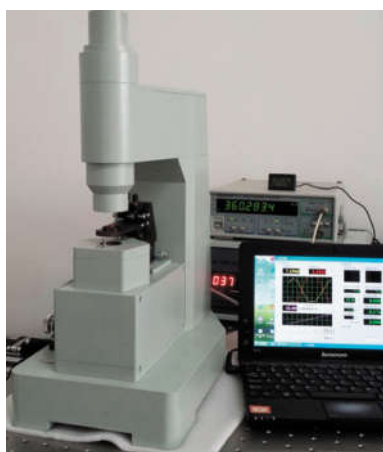


图 8 波片相位延迟测量仪实物

Fig.8 Picture of phase retardation measuring instrument for wave plate

对不同相位延迟波片进行多次测量,结果见表1。波片样品为石英多级波片,厚度约 1.5 mm,表面镀 632.8 nm 波长的增透膜。其中,1/4 波片和 1/8 波片放入谐振腔后可以产生频率分裂,而半波片放入谐振腔后激光处于模式抑制状态。

可见,系统的测量分辨率可达 0.001°,多次重复测量的标准差不超过 0.01°。需要说明的是,多级波片受环境温度影响明显,不同温度下的相位延迟需进行误差补偿。综合考虑补偿系统误差后的残余误差,以及各种随机误差,可以确定该测量仪对于多级波片(厚度 1.5 mm)总的测量不确定度约为 0.03°(优于  $\lambda/10\ 000$ ),对于零级波片为 0.8',可以满足高精

度波片的测量需求。

表 1 不同波片测量结果(环境温度 26.9°C)

Tab.1 Measurement results of different wave plate (measured at 26.9°C)

Measuring no.	Retardance of 1/4 wave plate $\Phi/(\circ)$	Retardance of 1/2 wave plate $\Phi/(\circ)$	Retardance of 1/8 wave plate $\Phi/(\circ)$
1	91.800	177.318	47.175
2	91.801	177.314	47.185
3	91.801	177.304	47.185
4	91.806	177.300	47.186
5	91.796	177.294	47.186
Average	91.801	177.306	47.183
1 $\sigma$	0.003 6	0.009 9	0.004 7

## 4 结 论

文中设计了一种基于激光频率分裂原理的光学波片测量仪,其针对不同相位延迟大小的波片,自动采用相应的方法进行计算,使测量范围可覆盖 1/8 波片、1/4 波片、半/全波片在内的任意波片。为提高精度和实现自动化测量,系统采用等光强点读取频差和补偿系统误差等技术,使测量不确定度优于  $\lambda/10\ 000$ 。因为是以激光频率差作为被测量,精度比普通仪器高约一个量级,有很好的重复性和复现性,尤其能将测量结果溯源到光波长,因此还可用于波片测量仪器的定标和计量测试。

### 参考文献:

- [1] Zhang Shulian, Wolfgang Holzapfel. Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications [M]. Berlin: John Wiley and Sons, 2013.
- [2] Zhang Shulian, Thierry Bosch. Orthogonally polarized lasers and their applications [J]. *Optics & Photonics News*, 2007, 18(5): 38-43.
- [3] Zhu Kaiyi, Guo Bo, Lu Yueyue, et al. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 729-735.
- [4] Edward A West, Matthew H Smith. Polarization errors associated with birefringent waveplates [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1574-1580.

- [5] Shyu L H, Chen C L, Su D C. Method for measuring the retardation of a wave plate [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(22): 4228–4230.
- [6] Chen Xiaojun, Yan Lianshan, Yao X Steve. Waveplate analyzer using binary magneto–optic rotators [J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12989–12994.
- [7] Cheng Xiaotian, Li Yinzhu, Liu Cheng, et al. Method for measuring the retardation of a wave plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(7): 651–654. (in Chinese)
- [8] Lin Yao, Zhou Zhiyao, Wang Runwen. Optical heterodyne measurement of the phase retardation of a quarter–wave plate [J]. *Optics Letters*, 1988, 13 (7): 553–555.
- [9] Tan Qiao, Xu Qifeng, Xie Nan. New method for retardance measurement of a quarter–wave plate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0717002. (in Chinese)
- [10] Li Jiang, Tan Yidong, Zhang Shulian. Generation of phase difference between self–mixing signals in a–cut Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a waveplate in the external cavity [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3615–3618.
- [11] Zhang Peng, Tan Yidong, Liu Ning, et al. Phase difference in modulated signals of two orthogonally polarized outputs of a Nd:YAG microchip laser with anisotropic optical feedback [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4296–4299.
- [12] Fei Ligang, Zhang Shulian. Laser feedback technique for precise retardation Measurements [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(11): 2974–2977.
- [13] Li Jiyang, Tan Yidong, Wu Ji, et al. Birefringence measurement of liquid crystals based on laser feedback effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (3): 0306003. (in Chinese)
- [14] Zong Xiaobin, Liu Weixin, Zhang Shulian. Measurement of retardations of arbitrary wave plates by laser frequency splitting [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45 (3): 033602.
- [15] Tan Yidong, Zhang Shulian. Orthogonally linearly polarized dual frequency Nd: YAG lasers with tunable frequency difference and its application in precision angle measurement [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(9): 2590–2593.
- [16] Liu Weixin, Liu Ming, Zhang Shulian. Method for the measurement of phase retardation of any wave plate with high precision [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(30): 5562–5569.
- [17] Liu Weixin, Sun Mingzhe. Anomalous variation of beat frequency in a dual frequency He–Ne laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(2): 024206.