

激光与光电子学进展

基于光谱干涉技术的波片相位延迟量测量方法

王伟^{1*}, 苏富芳², 高尚¹, 刘栋¹, 陈建中¹¹山东交通学院理学院, 山东 济南 250357;²曲阜师范大学物理工程学院山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273100

摘要 作为波片最重要的技术参数,波片相位延迟量的精确度会直接影响整个偏振光学系统的性能,在有些情况下,使用前需要对其进行精确测量。根据偏振干涉光谱曲线分布特性提出了一种测量波片相位延迟量的方法。此方法是将待测波片置于起偏镜和检偏镜之间,利用分光光度计测量一定范围内光谱透射率曲线,通过精确提取曲线上定值透射率对应波长,利用公式可同时获得待测波片的绝对相位延迟量、有效相位延迟量、波片级次、波片厚度等多个光学参数。理论分析和实验结果表明,该方法适用于具有任意延迟量的晶体零级或多级波片,具有测量精度高、对起偏镜与检偏镜透振方向和待测波片快轴方向调节无严格要求、操作简单的优势。

关键词 仪器,测量与计量;相位测量;偏振;波片;光谱技术

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212934

Method for Measurement of Phase Retardation of a Wave Plate Based on Spectral Interference Technology

Wang Wei^{*}, Su Fufang², Gao Shang¹, Liu Dong¹, Chen Jianzhong¹¹School of Science, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, Shandong, China;²Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, School of Physics and Physical Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273100, Shandong, China

Abstract The accuracy of the phase retardation of a wave plate, which is an important technical parameter, directly affects the performance of the entire polarization optical system. It may be necessary to measure the wave plate before use. Based on the curve distribution characteristics of the polarization interference spectrum, a method for measuring the phase retardation of a wave plate is presented. In this method, the wave plate to be measured is placed between a polarizer and an analyzer, and the transmission spectrum curve in a certain spectral range is measured using a spectrophotometer. Based on an accurate estimation of the wavelengths of certain points with specific transmission from the transmission spectrum curve, the thickness, absolute phase retardation, order, and effective phase retardation of the wave plate can be obtained simultaneously. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed method has advantages such as, suitability for zero-order or multi-order crystal wave plate with any phase retardation, high measurement precision, and ease of operation. Furthermore, it has no strict requirements for the directions of the fast axis of the wave plate and the transmission axes of the polarizer and the analyzer.

Key words instruments, measurement and metrology; phase measurement; polarization; wave plate; spectral technology

1 引言

波片是偏振光学系统中一种基本光学元件,可以用于入射光偏振态的转换和偏振面的旋转,在现代光学系统和偏光技术领域有着广泛的应用^[1-3]。作为波片最重要的技术参数,波片延迟量的精确度直接决定

着整个系统的测量精度和性能。波片相位延迟量是振动方向正交的两个光振动间产生的附加相位差大小。根据相位延迟量的大小,波片可以分为两大类:一类是产生的相位延迟量 δ_0 不足 2π 的波片称为零级波片,零级波片由于厚度太薄,不易加工,价格比较昂贵;另一类是使用较多的多级波片,是在所需的相位延迟量 δ_0

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-12-05; 录用日期: 2021-12-09; 网络首发日期: 2021-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(11904394)、山东省自然科学基金(ZR2017MA040, ZR2020MF102)

通信作者: *weiwangmail@163.com

的基础上叠加多个 2π 的延迟量,使其延迟量为 $\delta = 2n\pi + \delta_0$ (n 为波片的级次, δ 为绝对相位延迟量, δ_0 为有效相位延迟量),从而制作成较厚的波片,此类波片相对比较容易制造。相对于零级波片,温度和波长变化对多级波片的延迟量的影响更为灵敏。于是,在波片使用前对其高精度测量成为获得高质量偏振光学系统的必要条件^[4]。针对波片有效相位延迟量的测量,国内外研究者提出了诸如相位补偿法^[5-6]、光学调制法^[7-12]、光强测定法^[13-15]及其他多种高效的测量方法。然而在光非垂直入射、环境温度发生改变、入射光波长发生漂移时,在分析出射光偏振状态时,还需要考虑波片的绝对相位延迟量、级次等参数。为此研究者们提出了基于白光迈克尔孙干涉条纹法测量波片延迟量、级次的方法^[16-17];在外差偏光仪基础上,通过改变光波入射待测的角度,实现多级波片的厚度、双折射率及延迟量参数测量的方法^[18];通过测量波片宽光谱范围内透射率,精确测定两峰(谷)值波长或等值透射率对应

波长测量波片厚度和绝对相位延迟量等参数的方法^[19-20]。但在实际测量过程中,由于峰(谷)值波长附近曲线变化率趋于零,很难精确定对应值波长^[19],另外,在满足波长提取条件下,需要扫描的波长范围较大,会存在测量时间长、效率较低的不足^[20]。本文基于偏振干涉光谱曲线分布特性提出一种测量方法,可以在更窄的光谱范围实现波片绝对相位延迟量、级次等物理量的精确测量,进一步缩短了测量时间和提高了光谱数据使用效率,同时对于起偏镜、检偏镜透振方向及待测波片快轴方向的调节无严格要求,方便了测量器件的调节。

2 测量原理

用于测量波片延迟量的光路原理图和坐标系如图 1 所示,将待测波片放置于起偏镜和检偏镜之间,从宽带光源出射的光沿着 z 轴方向先后垂直通过起偏镜、待测波片和检偏镜。

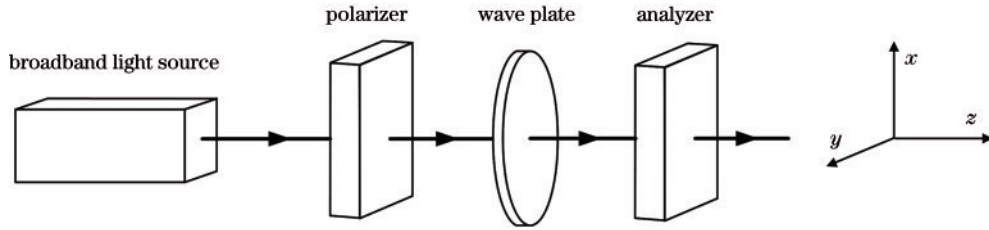


图 1 光路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path

假设入射光的强度为 I_0 ,可用琼斯矩阵表示为

$$E_{in} = \begin{bmatrix} \sqrt{I_0} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$M_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

设起偏镜的透振方向与 x 轴方向平行,其琼斯矩阵为

设待测波片在波长为 λ 时相位延迟量为 $\delta(\lambda)$,其快轴方向与 x 轴方向夹角为 θ ,其琼斯矩阵为

$$M_w = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta(\lambda)}{2} + j \sin \frac{\delta(\lambda)}{2} \cos 2\theta & j \sin \frac{\delta(\lambda)}{2} \sin 2\theta \\ j \sin \frac{\delta(\lambda)}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\delta(\lambda)}{2} - j \sin \frac{\delta(\lambda)}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix}.$$

设检偏镜的透振方向与起偏镜的透振方向成 α 角,其琼斯矩阵为

$$M_A = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}.$$

根据矩阵光学理论,则出射光可表示为

$$E_{out} = M_A M_w M_P \begin{bmatrix} \sqrt{I_0} \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{I_0} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha \cos \frac{\delta(\lambda)}{2} + j \cos \alpha \sin \frac{\delta(\lambda)}{2} \cos(\alpha - 2\theta) \\ \sin \alpha \cos \alpha \cos \frac{\delta(\lambda)}{2} + j \sin \alpha \sin \frac{\delta(\lambda)}{2} \cos(\alpha - 2\theta) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

出射光强为

$$I(\lambda)_{out} = E_{out}^\dagger E_{out} = I_0 \left[\cos^2 \alpha \cos^2 \frac{\delta(\lambda)}{2} + \cos^2(\alpha - 2\theta) \sin^2 \frac{\delta(\lambda)}{2} \right]. \quad (2)$$

则透过率 $T(\lambda)$ 为

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)_{out}}{I_0} = \frac{1}{2} \left[\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha - 2\theta) \right] + \frac{1}{2} \left[\cos^2 \alpha - \cos^2(\alpha - 2\theta) \right] \cos \delta(\lambda). \quad (3)$$

在起偏镜、检偏镜透振方向和波片快轴方向固定时,上式中 $\cos^2 \alpha$ 和 $\cos^2(\alpha - 2\theta)$ 为定值,透过率 $T(\lambda)$ 只与待测波片绝对延迟量 $\delta(\lambda)$ 的大小有关。而 $\delta(\lambda) = 2\pi d \Delta n(\lambda) / \lambda$, 其中 d 为待测波片的厚度, $\Delta n(\lambda)$ 表示波片材料的双折射率色散关系, $\Delta n(\lambda)$ 可展开为

关于 λ 的幂级数, 可表示为^[21]

$$\Delta n(\lambda) = \Delta_0 + \Delta_1 \lambda + \Delta_2 \lambda^2 + \dots + \Delta_n \lambda^n + \dots, \quad (4)$$

式中, Δ_0 、 Δ_1 、 Δ_2 和 Δ_n 分别代表幂级数第 0 级、第 1 级、第 2 级和第 n 级展开系数, 波长 λ 的单位为 μm 。对于某一晶体材料, 相应的展开系数可以通过光学手册或相关资料查询^[21]。常见的制作波片的晶体材料有方解石、云母和石英晶体, 其展开系数为: 石英晶体为 $\Delta_0 = 0.011945$, $\Delta_1 = -0.008214$, $\Delta_2 = 0.005714$; 云母晶体为 $\Delta_0 = -0.002456$, $\Delta_1 = -0.007084$, $\Delta_2 = -0.005286$; 方解石晶体为 $\Delta_0 = -0.241428$, $\Delta_1 = 0.199762$, $\Delta_2 = -0.138095$ 。

为不失一般性, 假设检偏镜与起偏镜夹角 $\alpha = 85^\circ$, 待测波片是厚度为 $500 \mu\text{m}$ 的石英波片, 其快轴方向与起偏镜透振方向的夹角 $\theta = 40^\circ$, 利用式(3)可以得到 $400 \sim 500 \text{ nm}$ 范围内光谱透射率理论分布曲线, 如图 2 所示。

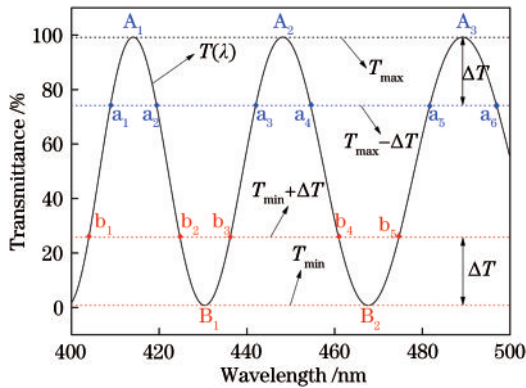


图 2 $\alpha = 85^\circ$ 、 $\theta = 40^\circ$ 、厚度为 $500 \mu\text{m}$ 的石英波片透射率理论分布曲线

Fig. 2 Theoretical transmittance spectrum curves of a $500\text{-}\mu\text{m}$ -thick quartz wave plate when $\alpha = 85^\circ$ and $\theta = 40^\circ$

从图 2 中可以看出, 光谱透射率分布曲线 $T(\lambda)$ 为类余弦型曲线。曲线上峰值 (A_1, A_2, A_3) 和谷值 (B_1, B_2) 交替出现。根据式(3)中透射率变化规律可知, 相邻两个峰值和谷值位置对应的 $\delta(\lambda)$ 数值相差为 π 。即

$$\delta(\lambda_{A_1}) - \delta(\lambda_{B_1}) = \pi, \delta(\lambda_{B_1}) - \delta(\lambda_{A_2}) = \pi, \dots, \quad (5)$$

利用式(5)确定 A_1, B_1 点对应的波长, 可计算出待测波片的延迟量^[19]。但由于透射率分布曲线在峰值(谷值)位置时, 曲线变化率趋于零, 因而很难精确确定峰值(谷值)对应波长, 会造成一定的误差。为克服该方法的不足, 在图 2 中同时绘出了 $T_1 = T_{\max} - \Delta T$ 和 $T_2 = T_{\min} + \Delta T$ 两条定值透射率直线(其中 T_{\max} 为峰值透射率, T_{\min} 为谷值透射率, ΔT 为一定值)。两条定值透射率直线 $T_1 = T_{\max} - \Delta T$ 和 $T_2 = T_{\min} + \Delta T$ 与透过率曲线 $T(\lambda)$ 相交形成了两组交点 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 和 b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 。利用旋转矢量表示方法其对应相位延迟量关系如图 3 所示。

根据式(3)及图 3 中 $\cos \delta(\lambda)$ 数值的周期性变化规

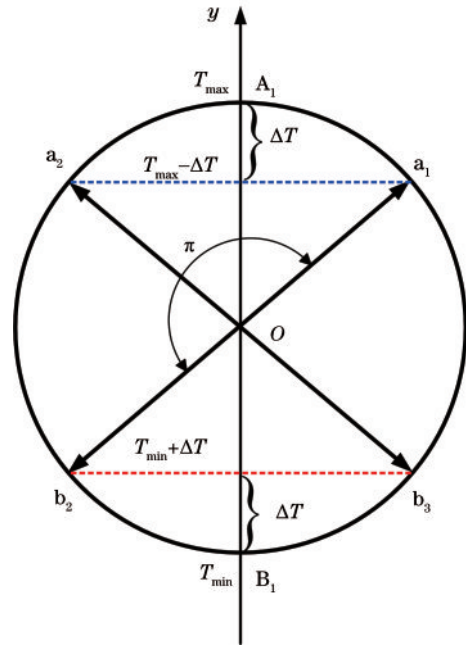


图 3 交点 a_1, a_2 和 b_2, b_3 对应延迟量在旋转矢量中的相对位置
Fig. 3 Relative relationship of phase retardation of intersection points a_1, a_2, b_2, b_3 by rotation vector

律, 可得

$$\delta(\lambda_{a_1}) - \delta(\lambda_{b_2}) = \pi, \quad (6)$$

即

$$\frac{2\pi d \Delta n(\lambda_{a_1})}{\lambda_{a_1}} - \frac{2\pi d \Delta n(\lambda_{b_2})}{\lambda_{b_2}} = \pi. \quad (7)$$

根据式(7)可以得到待测波片的厚度为

$$d = \frac{\lambda_{a_1} \lambda_{b_2}}{2[\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2} - \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}]}. \quad (8)$$

在波长为 λ 处待测波片绝对相位延迟量为

$$\delta(\lambda) = \frac{\pi \Delta n(\lambda) \lambda_{a_1} \lambda_{b_2}}{\lambda [\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2} - \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}]}. \quad (9)$$

波长为 λ 处待测波片的有效相位延迟量为

$$\delta_0(\lambda) = \text{MOD}[\delta(\lambda), 2\pi], \quad (10)$$

式中, MOD 为取余函数。待测波片的级次为

$$n = \text{INT}\left[\frac{\delta(\lambda)}{2\pi}\right], \quad (11)$$

式中, INT 为去尾取整函数。

从式(5)~(11)推导过程可以看出, 其表达式与起偏镜与检偏镜的夹角 α 和波片快轴与起偏镜的夹角 θ 的大小无关。所以, 理论上而言, 只要 ΔT 的数值合适, 可使得 $T_1 = T_{\max} - \Delta T$ 和 $T_2 = T_{\min} + \Delta T$ 两条直线与透过率曲线 $T(\lambda)$ 相交并形成交点, 上述计算方法即成立。但在实际操作过程中, 为精确地提取透过率曲线 $T(\lambda)$ 与 T_1 和 T_2 两条直线的交点波长, 应尽量使 $T(\lambda)$ 曲线上峰值透射率 T_{\max} 与谷值透射率 T_{\min} 差值处于比较大的情况。图 4 给出理论上峰值透射率 T_{\max} 与谷值透射率 T_{\min} 差值随 α 和 θ 变化分布和其等高线分布图。

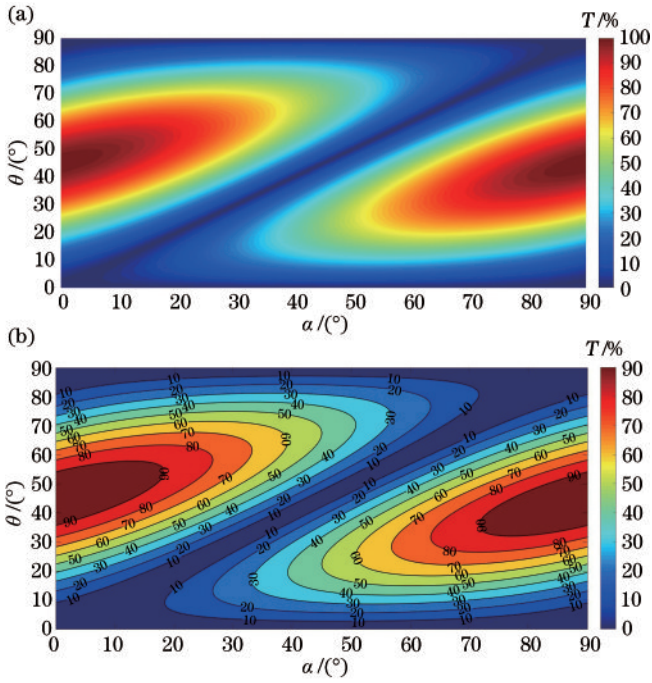


图 4 峰值透射率 T_{\max} 与谷值透射率 T_{\min} 差值随 α 和 θ 的 (a) 变化分布及其 (b) 等高线分布情况

Fig. 4 Difference of peak transmittance T_{\max} and valley transmittance T_{\min} dependence on (a) α and θ and (b) its contour map

从图 4(a) 中可以看出: 峰值与谷值透射率最大差

值 100% 出现在 $(\alpha = 0^\circ, \theta = 45^\circ)$ 和 $(\alpha = 90^\circ, \theta = 45^\circ)$ 两处, 即起偏镜和检偏镜透振方向平行或垂直, 待测波片快轴与起偏镜透振方向成 45° 。另外, 从图 4(b) 中还可以得到: 在 $\alpha = 0^\circ \pm 5^\circ, \alpha = 90^\circ \pm 5^\circ$ 和 $\theta = 45^\circ \pm 5^\circ$ 范围内, 峰值与谷值透射率差值均大于 92.54%, 也可认为在此范围内, 既可以保证精确地提取 T_1 和 T_2 两条直线与透过率曲线 $T(\lambda)$ 交点波长, 又可以在实际测量过程中给起偏镜、检偏镜和待测波片方位调节上预留 $\pm 5^\circ$ 的余量, 从而降低实验测量器件调节的难度。

3 实验结果

实验上, 利用岛津分光光度计 (UV-2550PC) 搭建如图 5 所示的测量系统, 系统采用双光路比较测量方法。复合宽带光源由卤素灯和氙灯构成, 可覆盖波长范围为 190~900 nm。从复合宽带光源出射的光先后经过单色仪和斩光器, 分成测量光路和参考光两路。测量光与参考光均由光电倍增管接收, 转变为电信号后进入计算机进行数据处理, 从而得到一定光谱范围内透过率曲线 $T(\lambda)$ 。测量中使用的起偏镜和检偏镜均为消光比小于 10^{-5} 的格兰泰勒棱镜, 待测波片为工作波长 632.8 nm 的多级石英波片, 检偏器和待测波片分别固定于精密光学调整架上, 用于调节透振方向和快轴方向。

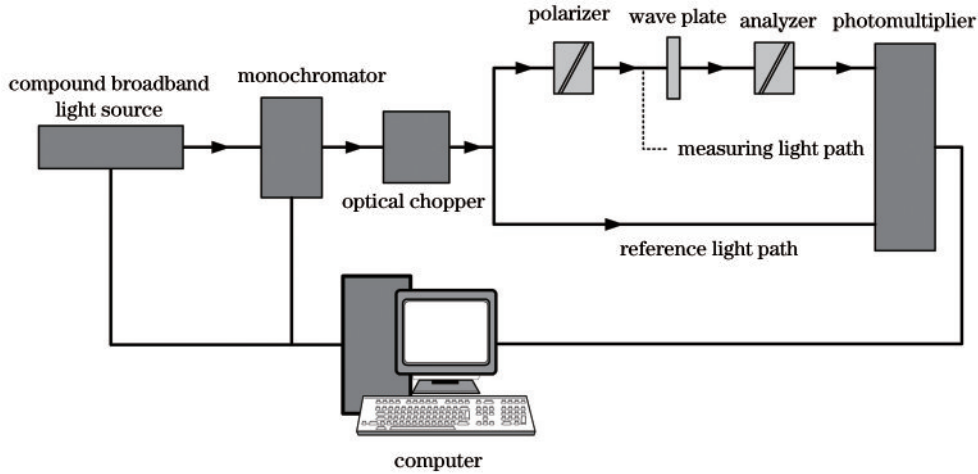


图 5 提出测量系统的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of proposed measuring system

根据以上测量原理的分析可知, 对于起偏镜、检偏镜透振方向及待测波片快轴方位有 $\pm 5^\circ$ 的调节余量。所以, 起偏镜、检偏镜透振方向及待测波片快轴方向的调节可以采用目测方法完成。具体方法如下: 调节起偏镜透振方向, 使其和检偏镜处于消光位置, 插入待测波片再次调整波片处于消光位置, 从此位置再顺时针或逆时针旋转 45° 。根据矩阵光学, 考虑到目测的误差, 此时起偏镜或检偏镜近似成 90° , 待测波片快轴与起偏镜或检偏镜近似成 45° 或 -45° , 完全能满足上述

测量要求。另外, 从上述测量器件调节过程可以发现, 本方法无需提前知晓待测波片的快轴方向。

开启分光光度计, 经过充分预热后, 选择最高光谱分辨率 0.1 nm, 得到 450~700 nm 光谱透射率曲线 $T(\lambda)$ 如图 6 所示。

图 6 同时还绘出 $T_1 = T_{\max} - \Delta T$ 和 $T_2 = T_{\min} + \Delta T$ 两条直线 (其中 $\Delta T = 0.4$)。曲线 $T(\lambda)$ 与直线 T_1 和 T_2 相交形成一系列交点, 利用 Origin 绘图软件可以精确提取到交点波长大小, 根据式 (8)~(11), 可以计

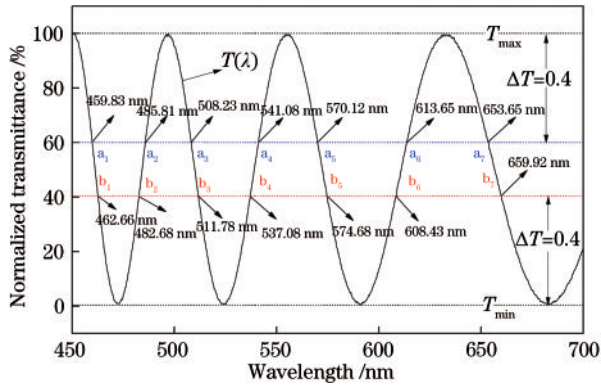


图 6 实验上测量的透过率分布曲线

Fig. 6 Measured transmittance spectrum curves in experiment

算出来待测波片厚度、工作波长为 632.8 nm 时绝对相位、级次、有效相位等光学参数,其相应测量数据、计算结果和相对误差如表 1 所示。

从表 1 中可以看出:待测多级石英波片平均厚度为 455.0469 μm,平均绝对相位延迟量为 12.9945π rad,波片级次为 6 级,有效相位延迟量为 0.9945π rad,测量相对误差小于 2.5%,在工作波长为 632.8 nm 时为半波片,测量数据与厂家提供的数据吻合非常好。

表 1 多级 1/2 石英波片 (632.8 nm) 测量数据及计算结果
Table 1 Measurement results of a quartz multiple-order 1/2 wave plate at 632.8 nm and computation results

λ_a / nm	λ_b / nm	d / μm	δ / rad	n	δ_0 / rad	E_r / %
459.83	482.68	454.8837	12.9899π	6	0.9899π	1.01
485.81	511.78	454.8340	12.9885π	6	0.9885π	1.15
508.23	537.08	455.5166	13.0080π	6	1.0080π	0.80
541.08	574.68	455.0638	12.9950π	6	0.9950π	0.50
570.12	608.43	454.4094	12.9763π	6	0.9763π	2.37
613.65	659.92	454.3688	12.9752π	6	0.9752π	2.48
462.66	485.81	455.3674	13.0037π	6	1.0037π	0.37
482.68	508.23	455.3263	13.0025π	6	1.0025π	0.25
511.78	541.08	456.0093	13.0220π	6	1.0220π	2.20
537.08	570.12	454.4981	12.9789π	6	0.9789π	2.11
574.68	613.65	455.6586	13.0120π	6	1.0120π	1.20
608.43	653.65	454.6265	12.9825π	6	0.9825π	1.75
Average		455.0469	12.9945π	6	0.9945π	1.35

4 误差分析

根据误差理论,利用式(8),待测波片厚度的最大绝对误差可以表示为

$$\Delta d = \left| \frac{\partial d}{\partial \lambda_{a_1}} \right| \Delta \lambda_{a_1} + \left| \frac{\partial d}{\partial \lambda_{b_2}} \right| \Delta \lambda_{b_2} = \frac{\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2}^2}{2[\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2} - \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}]^2} \Delta \lambda_{a_1} + \frac{\Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}^2}{2[\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2} - \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}]^2} \Delta \lambda_{b_2}, \quad (12)$$

式中, $\Delta \lambda_{a_1}$ 、 $\Delta \lambda_{b_2}$ 表示分光光度计测量误差,假设 $\Delta \lambda_{a_1} = \Delta \lambda_{b_2} = \Delta \lambda$, Δd 可以表示为

$$\Delta d = \frac{\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2}^2 + \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}^2}{2[\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2} - \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}]^2} \Delta \lambda. \quad (13)$$

从式(13)可以看出:厚度的最大绝对误差大小取决于两项: $f(\lambda_{a_1}, \lambda_{b_2}) = \frac{\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2}^2 + \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}^2}{2[\Delta n(\lambda_{a_1}) \lambda_{b_2} - \Delta n(\lambda_{b_2}) \lambda_{a_1}]^2}$ 和 $\Delta \lambda$ 。

进一步研究表明函数 $f(\lambda_{a_1}, \lambda_{b_2})$ 为减函数,即:为减少误差,可选择在长波波段提取交点波长;同时,厚度的最大绝对误差更依赖于 $\Delta \lambda$, $\Delta \lambda$ 的大小决定于分光光度计的最小分辨率,故为减少误差,可以选择分辨率更高的分光光度计。实验中使用的分光光度计分辨率为 0.1 nm,利用式(13)可得到理论上波片厚度测量最大相对误差为 0.414%。如果分光光度计分辨率提高至 0.01 nm,误差将会下降一个数量级。另外,实验上可采用多次测量取平均值、选择波长更长的波段、借助软件更精确地提取交点波长等方法进一步减小误差。

5 结 论

通过测量一定范围内光谱透射率曲线,在精确提取两条定值透射率 ($T_{\max} - \Delta T$ 和 $T_{\min} + \Delta T$) 直线与透射率曲线 $T(\lambda)$ 交点对应波长的基础上,可以同时获得

待测波片的绝对相位延迟量、波片级次、有效相位延迟量、波片厚度等多个光学参数。相对于现有光谱测量方法,该方法能够在窄波带扫描情况下实现波片光学参数的测量,缩短了测量时间,提高了测量效率和光谱数据使用效率。同时,该方法还具有待测波片快轴方位无需提前知晓,检偏镜、起偏镜、待测波片方位调节余量大,对测量样品无损伤和无污染的优势。

参 考 文 献

- [1] Lin K, Tutunnikov I, Ma J Y, et al. Spatiotemporal rotational dynamics of laser-driven molecules[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(2): 024002.
- [2] Liu C, Chen J B, Zhang Y C, et al. Five-wavelength optical-resolution photoacoustic microscopy of blood and lymphatic vessels[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(1): 016002.
- [3] Tan D Z, Wang Z, Xu B B, et al. Photonic circuits written by femtosecond laser in glass: improved fabrication and recent progress in photonic devices[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(2): 024002.
- [4] 侯俊峰, 于佳, 王东光, 等. 自校准法测量波片相位延迟[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408007.
Hou J F, Yu J, Wang D G, et al. Phase retardation measurement of wave plates based on the self-calibration method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0408007.

- [5] Kurzynowski P, Woźniak W A. Phase retardation measurement in simple and reverse Senarmont compensators without calibrated quarter wave plates[J]. *Optik*, 2002, 113(1): 51-53.
- [6] Montarou C C, Gaylord T K. Two-wave-plate compensator method for single-point retardation measurements[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(36): 6580-6595.
- [7] 穆廷魁, 李国华, 宋连科. 石英波片相位延迟随温度的变化行为[J]. *中国激光*, 2006, 33(7): 949-952.
Mu T K, Li G H, Song L K. Study on retardation variation behavior of quartz wave-plate follows temperature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(7): 949-952.
- [8] Zhang Y, Song F J, Li H Y, et al. Precise measurement of optical phase retardation of a wave plate using modulated-polarized light[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(30): 5837-5843.
- [9] Chen X J, Yan L S, Yao X S. Waveplate analyzer using binary magneto-optic rotators[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12989-12994.
- [10] Zeng A J, Li F Y, Zhu L L, et al. Simultaneous measurement of retardance and fast axis angle of a quarter-wave plate using one photoelastic modulator[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4347-4352.
- [11] Chen Q H, Liu B C, He Y X, et al. Phase retardation measurement of an arbitrary wave plate based on magneto-optical modulating and residue detecting of the base frequency component of the signal[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4514-4517.
- [12] 王金伟, 李克武, 景宁, 等. 波片相位延迟量测量和快轴标定系统[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 0217002.
Wang J W, Li K W, Jing N, et al. Phase retardation measurement and fast axis calibration system for wave plate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0217002.
- [13] Williams P A, Rose A H, Wang C M. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6466-6472.
- [14] Xie C K, Zeng A J, Huang H J, et al. Real-time measurement of retardation and fast axis azimuth for wave plates[J]. *Journal of Optical Technology*, 2015, 82(5): 294-297.
- [15] 彭建国, 袁沐, 金振宇, 等. 基于双光束检偏的波片测量系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0912002.
Peng J G, Yuan S, Jin Z Y, et al. Accurate parameter measurement of wave plate based on the dual-beam polarization analyzer configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0912002.
- [16] 王军, 陈磊, 吴泉英, 等. 一种基于白光迈克耳孙干涉仪波片延迟量的测量方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0508001.
Wang J, Chen L, Wu Q Y, et al. Retardation measurement of wave plates using white-light Michelson interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0508001.
- [17] 任洪亮, 王久扬, 楼立人, 等. 利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 249-253.
Ren H L, Wang J Y, Lou L R, et al. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using Michelson interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 249-253.
- [18] Jeng Y T, Lo Y L. Heterodyne polariscope for sequential measurements of the complete optical parameters of a multiple-order wave plate[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(6): 1134-1141.
- [19] 冯伟伟, 林礼煌, 陈立刚. 石英波片偏光干涉谱的研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(6): 1044-1048.
Feng W W, Lin L H, Chen L G. Polarized-light interference spectrum of quartz wave plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 1044-1048.
- [20] Wang W, Chen J Z, Liu Z B. Spectral technique for measuring phase retardation of a wave plate[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(1): 12601-12606.
- [21] Hariharan P. Achromatic and apochromatic halfwave and quarterwave retarders[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35: 3335-3337.