

文章编号 1004-924X(2012)10-2176-08

## 用于红外晶体双折射测量的单 1/4 波片法

唐玉国<sup>1</sup>, 何 淼<sup>1,2\*</sup>, 崔继承<sup>1,2</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 陈少杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**提出了一种基于单 1/4 波片法的测量方法以实现红外波段光学晶体双折射光程差的精确测量。采用厚度差小于一个周期厚度的两个样品进行比对,有效克服了单 1/4 波片法测量厚度的限制。依照此原理研制了测试波长为 3.39  $\mu\text{m}$  的晶体双折射测试设备。应用琼斯矩阵理论,推导了存在主要误差因素时的信号光强解析表达式,并由此分析了起偏器方位角误差、1/4 波片定位精度、样品方位角偏差、检偏器旋转定位精度对测量结果的影响,综合评价了本测量方法的精度。实验结果表明,应用研制的设备实测标准 1/4 波片的双折射光程差误差为 0.003 76  $\mu\text{m}$ ,相对误差为 0.44%,满足系统要求。得到的结果表明,采用基于单 1/4 波片法的新测量方法能够有效、精确测得红外晶体的双折射光程差。

**关键词:**红外晶体;双折射测量;单 1/4 波片法;精度分析

**中图分类号:**O734.2;O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122010.2176

## Senamont based measuring method for birefringence of infrared crystal

TANG Yu-guo<sup>1</sup>, HE Miao<sup>1,2\*</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1,2</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, CHEN Shao-jie<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: helen.he@yahoo.com.cn*

**Abstract:** A method based on the Senamont method was proposed to precisely measure the birefringence of an infrared crystal. Two specimens with the Optical Path Differences (OPD) within 1 wavelength caused by the birefringence were compared to overcome the measured OPD limit of Senamont method and to extend the method to the infrared band. According to the new method, a set of apparatus for measuring the birefringence of infrared crystal was developed. Moreover, by applying the Jones matrix, the expressions of signal intensity with various error sources were proposed to analyze precisely the influences of the error sources including the azimuth error of a polarizer, the orientation error of the quarter wave plate, the azimuth error of the specimen and the orientation error of the analyzer, then the measuring precision of this method was evaluated. The experiment results indicate that

收稿日期:2012-03-05;修订日期:2012-05-18.

基金项目:国家创新方法工作计划专项资助项目(No. 2008IM040700);吉林省科技支撑计划资助项目(No. 20106011)

the measured OPD error for a standard quarter wave plate is  $0.00376 \mu\text{m}$ , and the relative error is  $0.44\%$ , which is within the precision and satisfies the system targets.

**Key words:** infrared crystal; birefringence measurement; Senamont; precision analysis

## 1 引言

光学晶体材料已广泛应用于各种光学仪器以及光通信等领域中,其中各向异性光学晶体占有大比重<sup>[1-3]</sup>。双折射系数是各向异性光学晶体材料的重要性能指标之一<sup>[4-5]</sup>,其直接影响元件的功能。当加工出现偏差或受到外力作用产生应力双折射效应时,晶体材料的双折射光程差会偏离设计值,最终影响光学系统的成像质量及偏振状态。因此,使用前必须对晶体的双折射光程差进行精确测量。目前,已有补偿法<sup>[6]</sup>、光谱法<sup>[7-8]</sup>、光强测量法<sup>[9]</sup>、干涉法<sup>[10]</sup>、调制法<sup>[11]</sup>等多种方法用于可见波段对晶体双折射光程差进行精确测量;而对于光通信、探测等技术常用的红外波段,国内尚无成熟的双折射光程差测试技术。虽然有文献报道国外采用迈克尔逊干涉仪或非索干涉仪研制的测试设备,但由于其对红外探测器性能要求较高,尚未被广泛应用<sup>[12-16]</sup>。

已有的单 1/4 波片法<sup>[14]</sup>通过加入 1/4 波片将待测样品的位相差与出射线偏振光的振动方向联系起来,根据检偏器旋转寻找其消光位置时转过的角度来测定待测样品的双折射光程差,其要求直接可以测量的样品光程差不超过一个波长。本文提出了一种基于单 1/4 波片法的红外波段晶体双折射测量方法,以波长  $3.39 \mu\text{m}$  的红外激光光源为例,测量 2 片厚度稍有差异的样品,通过对比得到晶体的双折射光程差。该方法有效克服了单 1/4 波片法的测量厚度限制,将单 1/4 波片法测量的应用范围扩展到红外波段。本文依照此原理研制了工作波长为  $3.39 \mu\text{m}$  的红外晶体双折射测试设备。应用琼斯矩阵理论进行了精度分析,分别考察了 1/4 波片定位精度、待测样品的方位角偏差以及检偏器旋转定位精度对测量精度的影响,通过推导直观的信号光强解析表达式,减少了对出射椭圆偏振光的分析和检测过程。

## 2 测量原理

晶体双折射测量装置采用 Polarizer-Compensator-Specimen-Analyzer (PCSA) 光路设置,如图 1 所示,其中补偿器采用 1/4 波片。光源采用 He-Ne 激光器,发出  $3.39 \mu\text{m}$  红外光,经斩波器调制形成交变光强信号后,依次通过起偏器、待测样品、石英 1/4 波片、检偏器,最终被高精度、高信噪比的 PbSe 红外探测器组件接收,探测器集成模拟信号预处理功能,将调制后的光强转换为交流电压信号,供后续采样处理。通过计算机控制 1/4 波片与待测样品之间的相对位置,使得经起偏器出射的线偏振光通过之后仍为线偏振光,偏振方向改变的角度与样品双折射相位差成正比,可以通过旋转检偏器进行检测。

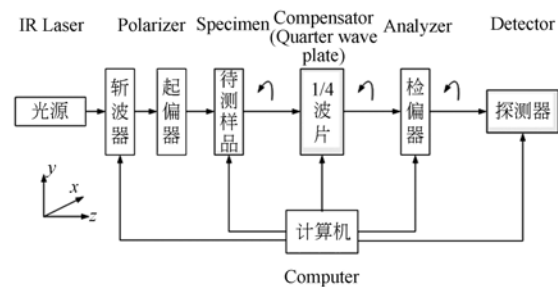


图 1 测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring apparatus

将起偏器的透光轴、1/4 波片快轴调整到设定的  $x$  轴方向,放置待测样品,使样品快轴与  $x$  轴成  $45^\circ$ ,利用琼斯矩阵理论,分别代入 1/4 波片、待测样品的琼斯矩阵  $\mathbf{G}_Q$ 、 $\mathbf{G}_S$  以及通过起偏器后的线偏振光的琼斯矢量  $\mathbf{E}_1$ <sup>[1,2]</sup>,得到由 1/4 波片出射光的琼斯矢量  $\mathbf{E}_2$ :

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{G}_Q \mathbf{G}_S \mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -i \tan(\frac{\delta}{2}) \\ -i \tan(\frac{\delta}{2}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos \frac{\delta}{2} \\ a \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中:  $\delta$  为待测样品的双折射相位差,  $\delta =$

$2\pi\Delta/\lambda$  ( $\Delta$  为待测样品的双折射光程差,  $\lambda$  为入射激光波长)。由  $E_2$  可知, 出射光为偏振方向与  $x$  轴成  $\delta/2$  的线偏振光, 通过旋转检偏器可以测出其偏振方向, 从而得到相位差  $\delta$ 。

实际操作中, 在放入待测样品前将检偏器的透光轴方向调整至  $y$  轴方向, 即检偏器转动过程中的消光位置, 此时探测器检测的光强信号最小。将  $1/4$  波片与样品的快轴方向分别调整至  $x$  轴方向 (与起偏器透光轴一致) 后, 控制检偏器转动一周, 再次寻找消光位置, 并记录两次消光位置间转过的角度。设检偏器的透光轴与  $x$  轴夹角为  $\theta$ , 则从检偏器出射光的琼斯矢量为:

$$\mathbf{E}_3 = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cos \frac{\delta}{2} \\ a \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} = a \cdot \cos \left( \theta - \frac{\delta}{2} \right) \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} \\ \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

则探测器上接收的信号光强为:

$$I_3 = \mathbf{E}_3 \cdot \tilde{\mathbf{E}}_3 = a^2 \cdot \cos^2 \left( \theta - \frac{\delta}{2} \right). \quad (3)$$

在检偏器转动一周过程中, 光强呈余弦分布, 两次出现消光。当检偏器再次转动到消光位置时, 光强再次出现最小值, 此时检偏器透光轴与  $x$  轴夹角为  $\delta/2$ , 即检偏器在两次消光位置之间转过的角度为:

$$\phi = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi \cdot \Delta}{\lambda}. \quad (4)$$

根据读出的  $\phi$  值可以得出待测样品的双折射光程差  $\Delta$ , 即:

$$\Delta = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \phi. \quad (5)$$

由于检偏器转动角度  $\phi$  只能在  $0 \sim 180^\circ$ , 测出的光程差不超过  $\lambda$ , 因此采用该方法能够直接检测的样品必须小于一个周期厚度  $d_0$  ( $d_0 = \lambda/\Delta n$ , 其中  $\Delta n$  为样品的等效双折射率)。而对于红外波段晶体, 当样品厚度小于  $d_0$  时, 对加工和装调的精度要求很高, 现有工艺难以实现。基于此, 采用厚度差小于  $d_0$  的 2 片待测样品进行测量, 通过测得的两光程差值进行比对, 得到实际样品的双折射光程差。

当样品的双折射相位差大于  $2\pi$  时, 可以表示为:

$$\delta = \delta' + m \cdot 2\pi, \quad (6)$$

其中:  $m$  为正整数,  $\delta'$  为小于  $2\pi$  的部分。

利用等效双折射率, 样品的厚度可以表示为:

$$d = d' + m \cdot \frac{\lambda}{\Delta n} = d' + md_0, \quad (7)$$

其中:  $d' < d_0$ 。

因此, 测出的检偏器转动角度为:

$$\phi = \frac{\delta'}{2} = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n d'. \quad (8)$$

对于厚度分别为  $d_1$ 、 $d_2$  的两样品, 由式 (7)、(8) 可得:

$$d_1 = d_1' + m \cdot \frac{\lambda}{\Delta n}, \quad d_2 = d_2' + n \cdot \frac{\lambda}{\Delta n}, \quad (9)$$

$$\phi_1 = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n d_1', \quad \phi_2 = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n d_2', \quad (10)$$

因此, 有:

$$\phi_1 - \phi_2 = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n (d_1' - d_2'). \quad (11)$$

由于  $d_1 > d_2$  且  $d_1 - d_2 < d_0$ , 包含以下两种情况:

(1) 若  $m = n$ , 则  $d_1' - d_2' = d_1 - d_2$ , 代入式 (4)、(11), 得

$$\Delta = \frac{\lambda(\phi_1 - \phi_2)}{\pi(d_1' - d_2')} \cdot d = \frac{\lambda(\phi_1 - \phi_2)}{\pi(d_1 - d_2)} \cdot d. \quad (12)$$

(2) 若  $m = n + 1$ , 则  $d_1' - d_2' = d_1 - d_2 - d_0$ , 根据式 (10) 及  $d_0$  的定义, 双折射光程差  $\Delta$  的表达式修正为:

$$\Delta = \frac{\lambda(\phi_1 - \phi_2)}{\pi(d_1' - d_2')} \cdot d = \frac{\lambda(\phi_1 - \phi_2 + \pi)}{\pi(d_1 - d_2)} \cdot d. \quad (13)$$

### 3 精度分析

由于测试过程主要依靠寻找信号光强的最小值 (即消光位置) 来测量样品的双折射相位差, 装置中主要偏振器件的方位角及相位精度都会对探测器接收的信号光强带来影响。如图 2 所示, 光源发出的光经过起偏器、待测样品、 $1/4$  波片、检偏器, 最终到达探测器靶面, 由于激光器采用稳压电源控制保证了输出光束质量稳定, 只有各偏振器件的方位角及相位偏差会改变出射光的偏振态, 最终影响信号光强。分别考察这 4 个器件的误差对测试结果的影响。

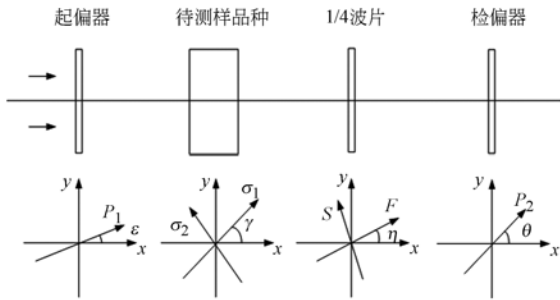


图 2 测试光路中各偏振器件方位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of orientations of polarizing elements

### 3.1 起偏器方位角误差引起的测量误差

起偏器的作用是将光源发出的自然光变成线偏振光,其透光轴取向决定出射线偏振光的振动方向。设起偏器透光轴方向与  $x$  轴的夹角为  $\epsilon$ ,如图 2 中所示,则出射光的偏振态可由起偏器的琼斯矩阵计算确定:

$$\begin{bmatrix} \cos^2 \epsilon & \cos \epsilon \sin \epsilon \\ \cos \epsilon \sin \epsilon & \sin^2 \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(\cos \epsilon + \sin \epsilon) \cos \epsilon \\ a(\cos \epsilon + \sin \epsilon) \sin \epsilon \end{bmatrix}. \quad (14)$$

当  $\epsilon=0$  时,出射光为振动方向沿  $x$  轴的线偏振光,也即测试中需要的理想状态;当  $\epsilon \neq 0$  时,线偏振光的振动方向改变,与  $x$  轴的夹角与  $\epsilon$  相等,并且出射光强随  $\epsilon$  变化。

由于测试过程中起偏器的透光轴方位不变,光路中其他器件方位均以起偏器透光轴方向为基准进行调整。当起偏器方位角存在误差  $\epsilon$  时,其后各器件方位通过寻找消光位置,均与理想位置保持夹角为  $\epsilon$ ,此时相当于整个坐标系旋转了角

度  $\epsilon$ ,如图 3 所示,不会引起测量结果的误差,即  $\delta\Delta_1=0$ 。

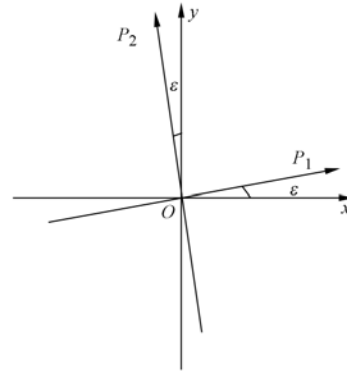


图 3 起偏器方位角误差带来的坐标系变化

Fig. 3 Revolved coordination caused by azimuth error  $\epsilon$  of polarizer

### 3.2 1/4 波片偏差引起的测量误差

1/4 波片通过在快慢轴之间引入相位差  $\pi/2$ ,将线偏振光变换为椭圆偏振光,出射光的长短轴方向与波片的快慢轴方向相关。因此,1/4 波片相位差的准确度和定位精度都会影响出射光的偏振态,直接关系到测量结果的准确性。由于采用标准 1/4 波片进行测量,所以引起测量误差的主要来源为 1/4 波片的定位偏差。

标准 1/4 波片定位出现偏差时,波片快轴方向与  $x$  轴的夹角  $\eta$  直接影响出射光的偏振态。此时 1/4 波片的琼斯矩阵变为:

$$\mathbf{G}_Q'' = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \cos 2\eta & -i \sin 2\eta \\ -i \sin 2\eta & 1 + i \cos 2\eta \end{bmatrix}. \quad (15)$$

因此,1/4 波片出射光的琼斯矢量为:

$$\mathbf{E}_{22} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \cos 2\eta & -i \sin 2\eta \\ -i \sin 2\eta & 1 + i \cos 2\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta'}{2} & -i \sin \frac{\delta'}{2} \\ -i \sin \frac{\delta'}{2} & \cos \frac{\delta'}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} a \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta'}{2} - i \sin \frac{\delta'}{2} \sin 2\eta - i \cos \frac{\delta'}{2} \cos 2\eta \\ \sin \frac{\delta'}{2} \cos 2\eta - i \left( \sin \frac{\delta'}{2} + \cos \frac{\delta'}{2} \sin 2\eta \right) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

由式(16)可知,出射光  $\mathbf{E}_{22}$  为椭圆偏振光,通过旋转检偏器寻找信号光强最小值将求得其短轴

方向。探测器接收的信号光强为:

$$\begin{aligned} I_{32} = \mathbf{E}_{32} \cdot \tilde{\mathbf{E}}_{32} &= a^2 \cdot \sqrt{(\cos \delta' \cos^2 2\eta - \sin \delta' \sin 2\eta)^2 + (\sin \delta' \sin 2\eta + \frac{1}{2} \cos \delta' \sin 4\eta)^2} \cdot \\ &\cos^2 \left[ \theta - \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{\sin \delta' \sin 2\eta + \frac{1}{2} \cos \delta' \sin 4\eta}{\cos \delta' \cos^2 2\eta - \sin \delta' \sin 2\eta} \right) \right] + \\ &\frac{a^2}{2} \left[ 1 - \sqrt{(\cos \delta' \cos^2 2\eta - \sin \delta' \sin 2\eta)^2 + (\sin \delta' \sin 2\eta + \frac{1}{2} \cos \delta' \sin 4\eta)^2} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

由信号光强的最小值可以得到定位误差  $\Delta\eta$  引起的测量误差  $\delta\Delta_2$  :

$$\delta\Delta_2 = \begin{cases} \frac{\lambda}{\pi} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{\sin \delta' \sin 2\eta + \frac{1}{2} \cos \delta' \sin 4\eta}{\cos \delta' \cos^2 2\eta - \sin \delta' \sin^2 2\eta} \right] - \frac{\delta'}{2} \right\} & \delta' < \frac{\pi}{2} \\ \frac{\lambda}{\pi} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{\sin \delta' \sin 2\eta + \frac{1}{2} \cos \delta' \sin 4\eta}{\cos \delta' \cos^2 2\eta - \sin \delta' \sin^2 2\eta} \right] - \frac{\delta'}{2} + \frac{\pi}{2} \right\} & \delta' > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (18)$$

图 4 给出了当样品相位差  $\delta' = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ , 光源波长  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$  时, 双折射光程差测量误差  $\delta\Delta_2$  与  $1/4$  波片定位误差  $\Delta\eta$  的关系。

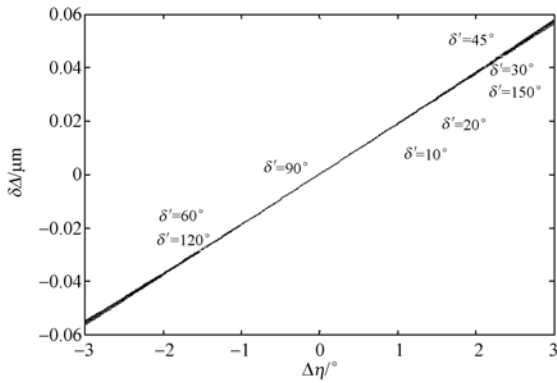


图 4 光程差误差与  $1/4$  波片定位误差的关系

Fig. 4 Relations of measured OPD error and the orientation error of quarter wave plate

由图 4 可知,  $1/4$  波片定位误差越大, 引入的双折射光程差误差越大, 对于  $\delta' = 90^\circ$  的样品, 当  $1/4$  波片定位误差为  $10'$  时, 光程差误差为  $0.0031 \mu\text{m}$ 。

### 3.3 样品的方位角误差

为实现样品双折射光程差的精确测量, 要求样品快轴方向与  $1/4$  波片快轴方向夹角为  $45^\circ$ , 以保证从  $1/4$  波片出射的光为线偏振光。因此, 除  $1/4$  波片的定位偏差将导致光程差偏差外, 样品的方位角误差也会影响测量结果。设样品快轴方向与  $x$  轴夹角为  $\gamma$ , 如图 2 所示, 当存在方位角误差 (即  $\gamma \neq 45^\circ$ ) 时, 从  $1/4$  波片出射光的琼斯矢量为:

$$\mathbf{E}_{23} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1-i & 0 \\ 0 & 1+i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\frac{\delta'}{2}) - i \sin(\frac{\delta'}{2}) \cos(2\gamma) & -i \sin(\frac{\delta'}{2}) \sin(2\gamma) \\ -i \sin(\frac{\delta'}{2}) \sin(2\gamma) & \cos(\frac{\delta'}{2}) - i \sin(\frac{\delta'}{2}) \cos(2\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} a (1-i) \begin{bmatrix} \cos(\frac{\delta'}{2}) - i \sin(\frac{\delta'}{2}) \cos(2\gamma) \\ \sin(\frac{\delta'}{2}) \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(19)可见,  $\mathbf{E}_{23}$  表征的不是线偏振光, 旋转检偏器寻找最小值测量的光程差存在偏差。此时探测器接收的信号光强为:

$$\mathbf{I}_{33} = \mathbf{E}_{33} \cdot \tilde{\mathbf{E}}_{33} = a^2 \sqrt{[1 - 2\sin^2(\frac{\delta'}{2}) \sin^2(2\gamma)]^2 + \sin^2 \delta' \sin^2 2\gamma} \cdot \cos^2 \left[ \theta - \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{\sin \delta' \sin 2\gamma}{1 - 2\sin^2(\frac{\delta'}{2}) \sin^2(2\gamma)} \right] \right] + \frac{a^2}{2} \left[ 1 - \sqrt{[1 - 2\sin^2(\frac{\delta'}{2}) \sin^2(2\gamma)]^2 + \sin^2 \delta' \sin^2 2\gamma} \right] \quad (20)$$

由信号光强  $\mathbf{I}_{33}$  的最小值, 可以得到样品方位角偏差  $\Delta\gamma$  引入的双折射测量误差  $\delta\Delta_3$  为:

$$\delta\Delta_3 = \frac{\lambda}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{\sin \delta' \cdot \sin \left[ 2 \left( \frac{\pi}{4} + \Delta\gamma \right) \right]}{1 - 2\sin^2 \left[ \frac{\delta'}{2} \right] \cdot \sin^2 \left[ 2 \left( \frac{\pi}{4} + \Delta\gamma \right) \right]} \right] - \frac{\delta'}{2} \right\} \quad (21)$$

图 5 给出了当样品方位角偏差  $\delta' = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ , 光源波长  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$  时, 双折射光程差测量误差  $\delta\Delta_3$  与 1/4 波片位相偏差  $\Delta\gamma$  的关系。

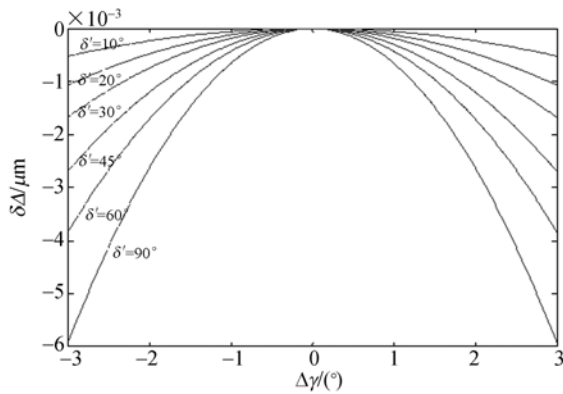


图 5 光程差误差与样品方位角偏差的关系

Fig. 5 Relations of measured OPD error and the azimuth error of specimen

由图 5 可知, 样品方位角偏差越大, 引入的双折射光程差误差越大, 对于  $\delta' = 90^\circ$  的样品, 当样品方位角偏差为  $10'$  时, 光程差误差为  $1.82 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ 。

### 3.4 检偏器的旋转定位误差

1/4 波片法通过记录检偏器在两次消光位置间转过的角度  $\phi$ , 得到样品的位相差  $\delta'$ 。当检偏器透光轴初始方向确定, 双折射光程差正比于检偏器的旋转定位角度, 即:

$$\Delta = \frac{\lambda}{\pi} \phi = \frac{\lambda}{\pi} \theta. \quad (22)$$

因此, 由检偏器旋转定位误差引起的测量误差由下式得到:

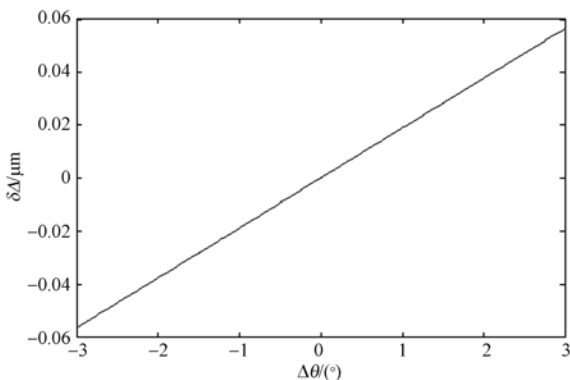


图 6 光程差误差与检偏器旋转定位误差的关系

Fig. 6 Relations of measured OPD error and the orientation error of polarizer

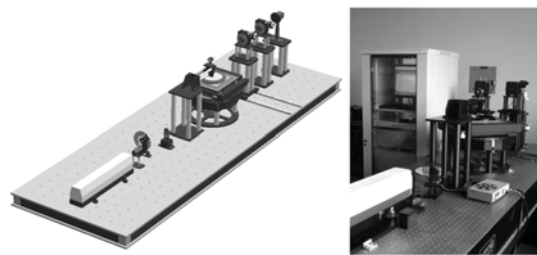
$$\delta\Delta_1 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \Delta\theta. \quad (23)$$

图 6 给出了当光源波长  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$  时, 双折射光程差测量误差  $\delta\Delta_1$  与检偏器旋转定位误差  $\Delta\theta$  的关系。

由图 6 可知, 检偏器旋转定位误差越大, 引入的双折射光程差误差越大, 对于  $\delta' = 90^\circ$  的样品, 当检偏器旋转定位误差为  $10'$  时, 光程差误差为  $0.0031 \mu\text{m}$ 。

## 4 实验结果

采用标准试件作为样品, 对依照本文中测量方法研制的晶体双折射测试设备进行测试实验。晶体双折射测试设备的测试光路部分按图 1 中所示准确摆放在光学平台上, 由控制系统进行信号光强采集与传输、数据处理与显示、各组件旋转定位, 通过配套的上位机应用软件实现人机交互、流程控制。图 7 为晶体双折射测试设备的布局图 (a) 及实物图 (b)。



(a) 布局图

(b) 实物图

(a) Layout of apparatus (b) Photo of apparatus

图 7 晶体双折射测试设备

Fig. 7 Apparatus for measuring birefringence

由于对比法中的两样品测量过程完全相同, 为减少随机误差, 验证实验中选用标准 1/4 波片作为样品, 测量检偏器在两次消光位置间转过的角度, 即采用单 1/4 波片法, 得到其测量位相差与光程差。通过计算测量位相差与标准 1/4 波片的位相差  $90^\circ$  的偏差, 验证本方法的测量精度。上位机软件界面中可以设置测试参数, 并实时显示测试曲线与数据, 如图 8 所示。

标准 1/4 波片试件实测数据在表 1 中列出。由以上精度分析可知, 对于样品  $\delta' = 90^\circ$ , 当光路中各误差源均按  $10'$  分配时, 起偏器、1/4 波片、样品、检偏器引入的光程差测量误差分别为 0、

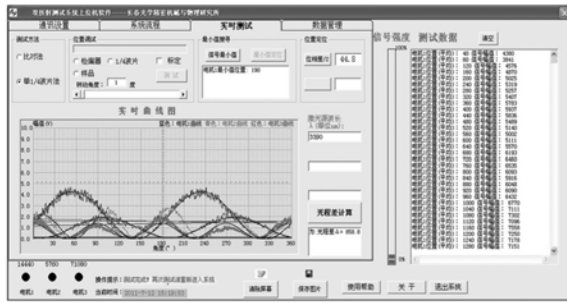


图 8 标准 1/4 波片实测结果

Fig. 8 Experiment result of a standard quarter wave plate

0.003 1、 $1.82 \times 10^{-5}$  和  $0.003 1 \mu\text{m}$ , 系统误差按下式(24)合成:

$$\delta\Delta = \sqrt{\delta\Delta_1^2 + \delta\Delta_2^2 + \delta\Delta_3^2 + \delta\Delta_4^2}. \quad (24)$$

由式(24)计算得出, 系统误差  $\delta\Delta$  为  $0.004 384 \mu\text{m}$ , 因此, 本方法的测试精度达到  $0.004 384 \mu\text{m}$ . 表 1 中的测量结果表明, 对标准 1/4 波片重复测量 3 次, 测量误差均在系统精度允许范围内。

表 1 标准 1/4 波片实测数据

Tab. 1 Experiment results of standard quarter wave plate

重复测量次数	检偏器位置 1/(°)	检偏器位置 2/(°)	测量相位差/(°)	误差/ $\mu\text{m}$
1	145.2	190	89.6	0.003 76
2	146.2	191.4	90.4	0.003 76
3	145.7	190.8	90.2	0.001 88

## 参考文献:

- [1] 谈恒英, 郝道垠. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
TAN H Y, YU D Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Mechanical Press, 2006. (in Chinese)
- [2] BORN M, WOLF E. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978.  
BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
- [3] 王皖燕. 晶体学和晶体材料研究的进展[J]. 科技导报, 2002, 3: 26-28.  
WANG W Y. Progress in the research of crystal [J]. *Science and Technology Review*, 2002, 3: 26-28. (in Chinese)
- [4] 李德惠. 晶体光学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.  
LI D H. *Crystal Optics* [M]. Beijing: Beijing China Geology Press, 1993. (in Chinese)
- [5] 玄伟佳, 王东光, 邓元勇, 等. 双折射滤光器的误差分析与性能优化[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 52-59.  
XU W J, WANG D G, DENG Y Y, et al.. Error analysis and performance optimization of birefringent filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 52-59. (in Chinese)
- [6] 苏美开, 宋连科, 李艺, 等. 波片测量中的补偿法[J]. 应用激光, 1999, 10(5): 220-222.  
SU M K, SONG L K, LI Y, et al.. Compensation method for measuring wave plates [J]. *Applied Lasers*, 1999, 10(5): 220-222. (in Chinese)
- [7] 孙英姿, 王东光, 张洪起, 等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 665-668.  
SUN Y Z, WANG D G, ZHANG H Q, et al.. Method and precision analysis for measuring retar-

## 5 结 论

基于 1/4 波片法, 提出了一种红外晶体双折射光程差的测量方法, 采用两厚度差小于周期厚度的样品进行比对测量, 有效克服了 1/4 波片法的测量限制, 从琼斯矩阵理论出发推导更为直观的信号光强解析式, 进行精度分析, 避免了对出射椭圆偏振光的分析与检测。通过分析, 测量精度主要取决于如下误差因素: (1) 1/4 波片定位误差; (2) 样品方位角误差; (3) 检偏器旋转定位误差。其中 1/4 波片定位误差与检偏器旋转定位误差对光程差测量精度影响较大, 样品方位角误差影响较小, 起偏器方位角误差不影响测量精度, 对于  $\delta' = 90^\circ$  的样品, 当各误差源分别取  $10'$  时, 其引入的光程差测量误差依次为:  $0.003 1$ 、 $1.82 \times 10^{-5}$  和  $0.003 1 \mu\text{m}$ , 由此合成的测量精度为  $0.004 384 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 应用本测量方法, 标准 1/4 波片的光程差测量偏差为  $0.003 76 \mu\text{m}$ , 在精度允许范围内, 满足系统要求。

- dation of infrared wave plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006,26(5):665-668. (in Chinese)
- [8] 张志勇,邓元勇,王东光,等. 几种波片位相延迟测量方法的比较[J]. *光学精密工程*. 2007,15(11):1678-1685.  
ZHANG ZH Y, DENG Y Y, WANG D G, *et al.*. Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1678-1685. (in Chinese)
- [9] 沈奕,王勇竞,姜言森,等. 延迟膜光谱分析测试系统及应用[J]. *光学精密工程*. 2009,17(5):964-968.  
SHEN Y, WANG Y J, JIANG Y S, *et al.*. Measuring and analyzing system for retardation films at different wavelengths[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):964-968. (in Chinese)
- [10] 宋连科,李国华,代作晓,等. 0.29~2.5 $\mu\text{m}$  波段晶体双折射率的连续偏光干涉测量[J]. *光电子·激光*,1996,7(6):356-360.  
SONG L K, LI G H, DAI Z X, *et al.*. Continuous birefringence measurement in 0.29 to 2.5 $\mu\text{m}$  range by polarization interfering[J]. *Optics · Laser*. 1996,7(6):356-360. (in Chinese)
- [11] 赵培,吴福全,郝殿中,等. 1/4 波片延迟量的位相调制椭圆偏测量法[J]. *光学学报*,2006,(26)3:379-382.  
ZHAO P, WU F Q, HAO D ZH, *et al.*. Measurement of the delay of the quarter wave plate by phase modulated ellipsometry [J]. *Acta Optica Sinica*. 2006,(26)3:379-382. (in Chinese)
- [12] GEORGE B, EARL C, KENNETH G. Interferometric Null method for measuring stress-induced birefringence[J]. *Applied Optics*,1974,13(7):1660-1669.
- [13] RUMMEL S P, REEDY H E, HERRIT G L. Residual stress birefringence in ZnSe and multispectral ZnS[J]. *SPIE*,2286:132-141.
- [14] ROUKE J L, MOORE D T. Birefringence measurements in gradient-index rod lenses[J]. *Applied Optics*,1999,38(31):6574-6580.
- [15] COCHRAN E R, CHIAYU A. Interferometric stress birefringence measurement [J]. *Applied Optics*,1992,31(31):6702-6706.
- [16] 苏大图,赵立平,沙定国,等. *光学测试技术*[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.  
SU D T, ZHAO L P, SHA D G, *et al.*. *Optical Testing Technology*[M]. Beijing: Beijing institute of technology press, 1996.

## 作者简介:



唐玉国(1967—),男,吉林人,理学博士,研究员,博士生导师,1989年于吉林工业大学获学士学位,1995年于中国科技大学获博士学位,主要从事光谱仪器及医用光谱技术的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com



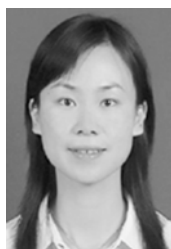
何森(1986—),女,河北涿州人,硕士,2009年于南京理工大学获学士学位,2012年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光谱仪器研发及光电系统设计的研究。E-mail: helen.he95@yahoo.com.cn



崔继承(1976—),男,吉林长春人,博士研究生,副研究员,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光学设计理论及光谱仪器设计的研究。E-mail: jicheng\_cui@yahoo.com.cn



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,2002年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com



陈少杰(1985—),女,黑龙江宁安人,博士研究生,助理研究员,2007年于南京理工大学获学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术的研究。E-mail: sha-ojie.csj@gmail.com