

文章编号: 0258-7025(2005)04-0523-06

测量 $\lambda/4$ 波片实际相移量并判定快慢轴的方法

王政平, 李庆波, 谭 巧, 黄宗军, 史金辉

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 介绍了一种新颖的、利用两个偏振片和一个直角棱镜测定 $\lambda/4$ 波片实际相位延迟角(不包含整数倍 2π) 大小且可同时判定波片快慢轴的简便方法。根据波动光学理论并采用琼斯矩阵对该方法的测量原理进行了理论推导, 导出了该方法的不确定度, 用计算机仿真的方法比较了各个相关因素对测量不确定度影响的程度, 对该方法的使用条件进行了必要的讨论, 最后给出了应用实例以及对测量结果进行的验证性实验与计算机仿真, 结果表明该方法是可行的。此外, 该方法还具有所用器件易获得、操作简单、测量精度高等优点。

关键词 测量; 相位延迟; 椭圆测量术; 波片

中图分类号 O 432.2 **文献标识码** A

Method of Measuring Practical Retardance Value and Judging the Fast or Slow Axis of Quarter-Wave Plate

WANG Zheng-ping, LI Qing-bo, TAN Qiao, HUANG Zong-jun, SHI Jin-hui

(Science School, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A novel and simple method used for the measurement of the practical value of the retardance (an overall ambiguity modulo 2π is not considered) and the determination of the fast or slow axis of a quarter-wave plate employing two polaroids and a right-angle prism is reported. The theoretical analysis of the principle is given taking Jones matrix as a mathematical tool, the uncertainty of formula is derived, the effects of each factor upon the uncertainty are simulated using a computer. The working conditions of this method are discussed. An application example is given, and the measured result of the example is verified with results of test and computer simulation, which indicates that the method is feasible. Furthermore, this method has the advantages such as easier to obtain the optical devices needed, simpler to operate, and accurate etc.

Key words measurement; retardance; ellipsometry; wave plate

1 引 言

$\lambda/4$ 波片是光学测量中常用的元件。在许多需要用到波片的测量方法中, 不仅波片自身的测量精度直接影响其结果, 而且还经常需要事先精确地测定出波片的快慢轴方向。通常可用巴俾涅补偿片直接测量波片相位延迟角。但是由于这种器件事实上很难买到, 多数单位不具备使用该方法的条件。其他的方法有: 极大角法^[1,2]、半阴法^[3]、复合补偿

法^[4]、机械-光学旋光调制法^[5]等。通常用于判定快慢轴的方法有: 菲涅耳菱体法^[6]、电光补偿法、比色法、椭圆法等。本文报道了一种可以同时确定波片相位延迟角(不包含整数倍 2π) 和快慢轴的方法。该方法是在通常的椭圆测量系统中引入一个直角棱镜, 以便将总相位延迟量从测量误差很大的 $\pi/2$ 附近移至测量误差较小的 $5\pi/6$ 附近, 从而实现提高测量精度的目的。

收稿日期: 2003-12-16; 收到修改稿日期: 2004-03-15

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F01-02)资助项目。

作者简介: 王政平(1949—), 男, 河北人, 哈尔滨工程大学理学院教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为光学传感理论与技术。E-mail: zpwang@hrbeu.edu.cn

2 测量光路及方法

原理光路如图 1 所示。光源发出的光束经过起偏器后形成偏振方向与水平坐标轴 (x 轴) 夹角为 θ 的线偏振光。该光垂直射入待测 $\lambda/4$ 波片后, 出射的光线垂直射入直角棱镜的一个直角边, 经斜边全反射后从直角棱镜的另一直角边射出。输出光经过检偏器到达光功率计。图 1 中 P_1 为起偏棱镜, P_2 为检偏棱镜。

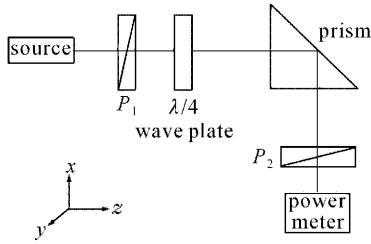


图 1 原理光路图

Fig. 1 Schematic diagram of the method

在 $\theta = \pi/4$ 的条件下, 按下述方法设定四分之一波片选定轴位置(为快轴或是慢轴)与检偏器 P_2 透光轴的位置, 分别记录输出功率 I_1, I_2, I_3, I_4 , 并将它们代入本文导出的公式(1)(推导过程见本文第 3 节)

$$\begin{cases} \cos\delta_1 = \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} + \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \right) \times \frac{1}{2 \times \cos\Delta} \\ \sin\delta_2 = \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} - \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \right) \times \frac{1}{2 \times \sin\Delta} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 δ_1, δ_2 都是波片实际延迟量的测量值, 理论上二者应相等。但由于所用测量光路不同, 考虑到测量过程中实际存在的不确定度, 实际测量结果的 δ_1 和 δ_2 在数值上会有细微不同; I_1, I_2 分别为 $\lambda/4$ 波片选定轴在 x 轴(水平)方向, 检偏器透光轴与 x 轴夹角分别为 $\pm 45^\circ$ 时, 光功率计显示的数值; I_3, I_4 分别为 $\lambda/4$ 波片选定轴在 y 轴(垂直)方向, 检偏器透光轴与 x 轴夹角分别为 $\pm 45^\circ$ 时, 光功率计显示的数值; Δ 为直角棱镜的反射相移, 需事先测出。则 $\lambda/4$ 波片相位延迟角 δ 的测量结果按惯例取为

$$\delta = (\delta_1 + \delta_2)/2, \quad (2)$$

当 $\delta < 0$ 时, 选定轴为快轴; 当 $\delta > 0$ 时, 选定轴为慢轴。

3 测量原理

设起偏器透光轴与水平坐标 x 轴间的夹角为

θ (本实验中 θ 一直为 45°), 则透过起偏器的光矢可用琼斯矩阵表示为^[7]

$$\mathbf{E}_{in}(\theta) = A \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 A 为光波的振幅。

光在整个光路的传输过程可表示为

$$\mathbf{E}_{out} = \mathbf{P}(\psi)\mathbf{R}(\Delta)\mathbf{Wk}(\delta)\mathbf{E}_{in}(\theta), \quad (4)$$

式中 $\mathbf{Wk}(\delta)$ 为待测 $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵, 其中 δ 为波片的相位延迟角; $\mathbf{R}(\Delta)$ 为直角棱镜的反射矩阵; $\mathbf{P}(\psi)$ 为检偏器的矩阵, ψ 为检偏器透光轴与水平坐标轴的夹角。

波片的琼斯矩阵如下^[8]

$$\mathbf{Wk}(\delta) = \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2\alpha + \sin^2\alpha & (e^{i\delta} - 1) \sin\alpha \cos\alpha \\ (e^{i\delta} - 1) \sin\alpha \cos\alpha & e^{i\delta} \sin^2\alpha + \cos^2\alpha \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 α 为 $\lambda/4$ 波片慢轴与 x 轴方向的夹角(文献[8]定义的“快轴”为相位变化快)。

反射过程用琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{R}(\Delta) = \begin{bmatrix} e^{i\Delta_p} & 0 \\ 0 & e^{i\Delta_s} \end{bmatrix} = e^{i\Delta_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\Delta = \Delta_s - \Delta_p$ 为反射相移量, Δ_p, Δ_s 分别为反射面上 p 分量和 s 分量的反射相移。

检偏器的琼斯矩阵如下

$$\mathbf{P}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos^2\psi & \sin\psi \cos\psi \\ \sin\psi \cos\psi & \sin^2\psi \end{bmatrix}. \quad (7)$$

光功率计接收到的光强为

$$I_{out} = \mathbf{E}_{out}^+ \mathbf{E}_{out}, \quad (8)$$

式中光矢上标“+”表示对光矢的厄米运算。

公式(4)中直角棱镜反射相移 Δ 的实际测量方法及其理论分析可见参考文献[9]。其测量光路如图 2 所示。

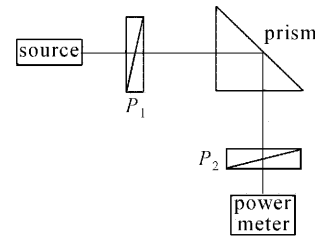


图 2 测量直角棱镜反射相移的原理光路图

Fig. 2 Schematic diagram of the method to measure the reflection-induced retardance of a prism

测得的反射相移为

$$\Delta_{meas.} = \pm \arcsin(\sqrt{1 - V^2}), \quad (9)$$

式中

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (10)$$

I_{\max}, I_{\min} 分别为检偏器 P_2 旋转一周所得到的光强最大值和最小值。

计算机仿真证实在本实验中事先测得的直角棱镜反射相移 Δ 为正值。所以(9)式可表示为

$$\Delta = \arcsin(\sqrt{1 - V^2}). \quad (11)$$

当 $\lambda/4$ 波片的选定轴与 x 轴方向相同时,依公式(4),(8),输出光矢为

$$\mathbf{E}_{\text{out}x} = A \begin{bmatrix} \cos^2 \psi \cos \theta + \frac{1}{2} \sin(2\psi) \sin \theta e^{i(\Delta - \delta)} \\ \frac{1}{2} \sin(2\psi) \cos \theta + \sin^2 \psi \sin \theta e^{i(\Delta - \delta)} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

相应的光强为

$$I_x = A^2 \left[\frac{1}{2} \sin(2\psi) \sin(2\theta) \cos(\Delta - \delta) + \cos^2 \psi - \sin^2 \theta \cos(2\psi) \right]. \quad (13)$$

令检偏器 P_2 的透光轴分别与 x 轴夹角 $\psi = \pm 45^\circ$, 得到光矢与光强 I_1, I_2 分别为

$$\mathbf{E}_{\text{out}1} = \frac{A}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta + \sin \theta e^{i(\Delta - \delta)} \\ \cos \theta + \sin \theta e^{i(\Delta - \delta)} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$I_1 = \frac{A^2}{2} [1 + \sin(2\theta) \cos(\Delta - \delta)], \quad (15)$$

$$\mathbf{E}_{\text{out}2} = \frac{A}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta - \sin \theta e^{i(\Delta - \delta)} \\ -\cos \theta + \sin \theta e^{i(\Delta - \delta)} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$I_2 = \frac{A^2}{2} [1 - \sin(2\theta) \cos(\Delta - \delta)]. \quad (17)$$

当 $\lambda/4$ 波片的选定轴与 y 轴方向相同时,根据公式(4),(8),输出光矢为

$$\mathbf{E}_{\text{out}y} = A \begin{bmatrix} \cos^2 \psi \cos \theta + \frac{1}{2} \sin(2\psi) \sin \theta e^{i(\Delta + \delta)} \\ \frac{1}{2} \sin(2\psi) \cos \theta + \sin^2 \psi \sin \theta e^{i(\Delta + \delta)} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

相应的光强为

$$I_y = A^2 \left[\frac{1}{2} \sin(2\psi) \sin(2\theta) \cos(\Delta + \delta) + \cos^2 \psi - \sin^2 \theta \cos(2\psi) \right]. \quad (19)$$

令检偏器 P_2 的透光轴分别与 y 轴夹角 $\psi = \pm 45^\circ$, 得到光矢与光强 I_3, I_4 分别为

$$\mathbf{E}_{\text{out}3} = \frac{A}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta + \sin \theta e^{i(\Delta + \delta)} \\ \cos \theta + \sin \theta e^{i(\Delta + \delta)} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$I_3 = \frac{A^2}{2} [1 + \sin(2\theta) \cos(\Delta + \delta)], \quad (21)$$

$$\mathbf{E}_{\text{out}4} = \frac{A}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta - \sin \theta e^{i(\Delta + \delta)} \\ -\cos \theta + \sin \theta e^{i(\Delta + \delta)} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$I_4 = \frac{A^2}{2} [1 - \sin(2\theta) \cos(\Delta + \delta)]. \quad (23)$$

由公式(15),(17),(21),(23)可以得到波片相位延迟角 δ 的计算公式为

$$\begin{cases} \cos \delta_1 = \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} + \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \right) \frac{1}{2 \cos \Delta \sin(2\theta)} \\ \sin \delta_2 = \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} - \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \right) \frac{1}{2 \sin \Delta \sin(2\theta)} \end{cases}. \quad (24)$$

在从公式(12)到公式(24)的推导中假定选定轴为慢轴。当选定轴为快轴时可以导出与公式(24)相同的结果。

调整起偏角 θ 为 45° , 可以得到公式(1)。由于 δ_1, δ_2 理论上应相等,所以可以根据(1)式中的两个三角函数 $\cos \delta_1$ 和 $\sin \delta_2$ 确定 δ 所在的象限,并且得到数值结果: $\delta = (\delta_1 + \delta_2)/2$, 即公式(2)。

最后可以由 δ 的符号判定快、慢轴。

4 不确定度分析

在使用本方法的过程中,直角棱镜反射相移的测量不确定度 $\delta\Delta$, 测量 I_1, I_3 时的误差角 $\delta\psi_{+45^\circ}$, 测量 I_2, I_4 时的误差角 $\delta\psi_{-45^\circ}$ 和起偏角误差 $\delta\theta$ 都会引入测量不确定度,因此要逐项分析。

4.1 Δ 的测量不确定度

$$\delta\Delta = \sqrt{\left(\frac{\partial\Delta}{\partial\psi_{\max}} \right)^2 (\delta\psi_{\max})^2 + \left(\frac{\partial\Delta}{\partial\psi_{\min}} \right)^2 (\delta\psi_{\min})^2 + \left(\frac{\partial\Delta}{\partial\theta} \right)^2 (\delta\theta)^2}, \quad (25)$$

式中各项分别是图2所示系统中测 I_{\max} 时的误差角 $\delta\psi_{\max}$, 测 I_{\min} 时的误差角 $\delta\psi_{\min}$ 和预偏角误差 $\delta\theta$ 及 $\delta\Delta$ 对这三个误差量的偏导数[8]。

4.2 δ_1 的测量不确定度

δ_1 对影响其测量不确定度的四个因素的偏导数分别为

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial \Delta} = \frac{-\sin \Delta}{\cos \Delta \sqrt{1 - \frac{(V_2 + V_1)^2}{4 \cos(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times \left[\frac{V_1 + V_2}{2 \sin(2\theta) \cos \Delta} - \cos \delta \right], \quad (26)$$

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial \psi_{+45^\circ}} = \frac{\partial \delta_1}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \psi_{+45^\circ}} + \frac{\partial \delta_1}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \psi_{+45^\circ}} = \frac{1}{2 \sin(2\theta) \cos \Delta \sqrt{1 - \frac{(V_1 + V_2)^2}{4 \cos(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times [2 - (V_2 + V_1)] \times \cos(2\theta), \quad (27)$$

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial \psi_{-45^\circ}} = \frac{\partial \delta_1}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \psi_{-45^\circ}} + \frac{\partial \delta_1}{\partial I_4} \frac{\partial I_4}{\partial \psi_{-45^\circ}} = \frac{1}{2 \sin(2\theta) \cos \Delta \sqrt{1 - \frac{(V_1 + V_2)^2}{4 \cos(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times (2 + V_1 + V_2) \times \cos(2\theta), \quad (28)$$

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial \theta} = \frac{\cos(2\theta)}{\sin(2\theta) \sqrt{1 - \frac{(V_2 + V_1)^2}{4 \cos(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times \left[\frac{V_1 + V_2}{\cos \Delta \sin(2\theta)} - 2 \cos \delta \right], \quad (29)$$

则 δ_1 的测量不确定度为

$$\delta \delta_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta_1}{\partial \psi_{+45^\circ}} \right)^2 (\partial \psi_{+45^\circ})^2 + \left(\frac{\partial \delta_1}{\partial \psi_{-45^\circ}} \right)^2 (\partial \psi_{-45^\circ})^2 + \left(\frac{\partial \delta_1}{\partial \theta} \right)^2 (\partial \theta)^2 + \left(\frac{\partial \delta_1}{\partial \Delta} \right)^2 (\partial \Delta)^2} \quad (30)$$

4.3 δ_2 的测量不确定度

δ_2 对影响其测量不确定度的四个因素的偏导数分别为

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial \Delta} = \frac{\cos \Delta}{\sin \Delta \sqrt{1 - \frac{(V_1 - V_2)^2}{4 \sin(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times \left[\frac{V_2 - V_1}{2 \sin(2\theta) \sin \Delta} + \sin \delta \right], \quad (31)$$

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial \psi_{+45^\circ}} = \frac{\partial \delta_2}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \psi_{+45^\circ}} + \frac{\partial \delta_2}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \psi_{+45^\circ}} = \frac{1}{2 \sin(2\theta) \sin \Delta \sqrt{1 - \frac{(V_1 - V_2)^2}{4 \sin(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times (V_1 - V_2) \cos(2\theta), \quad (32)$$

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial \psi_{-45^\circ}} = \frac{\partial \delta_2}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \psi_{-45^\circ}} + \frac{\partial \delta_2}{\partial I_4} \frac{\partial I_4}{\partial \psi_{-45^\circ}} = \frac{-1}{2 \sin(2\theta) \sin \Delta \sqrt{1 - \frac{(V_1 - V_2)^2}{4 \sin(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times (V_1 - V_2) \cos(2\theta), \quad (33)$$

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial \theta} = \frac{\cos(2\theta)}{\sin(2\theta) \sqrt{1 - \frac{(V_1 - V_2)^2}{4 \sin(\Delta)^2 \sin(2\theta)^2}}} \times \left[\frac{V_2 - V_1}{\sin \Delta \sin(2\theta)} + 2 \sin \Delta \sin \delta \right], \quad (34)$$

则 δ_2 的测量不确定度为

$$\delta \delta_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta_2}{\partial \psi_{+45^\circ}} \right)^2 (\partial \psi_{+45^\circ})^2 + \left(\frac{\partial \delta_2}{\partial \psi_{-45^\circ}} \right)^2 (\partial \psi_{-45^\circ})^2 + \left(\frac{\partial \delta_2}{\partial \theta} \right)^2 (\partial \theta)^2 + \left(\frac{\partial \delta_2}{\partial \Delta} \right)^2 (\partial \Delta)^2} \quad (35)$$

4.4 δ 的总测量不确定度

δ 的总不确定度为

$$\delta \delta = \frac{1}{2} (\delta \delta_1 + \delta \delta_2). \quad (36)$$

最终测量结果可以表示为

$$\delta = \delta_{\text{meas.}} \pm \delta \delta. \quad (37)$$

4.5 四个误差因素分别对 δ 不确定度影响的分析与比较

令公式(36)中各个误差分别在 $-0.087 \sim +0.087 \text{ rad}(-5^\circ \sim +5^\circ)$ 之间变化,不考察的误差为零,得到其各自对总不确定度的影响的计算机仿真

结果如图3所示(图中 ψ_1 为 ψ_{+45° , ψ_2 为 ψ_{-45°)。

由图3可知,检偏器角度的调整误差对总不确定度的影响最大,起偏器误差角的影响次之,直角棱镜反射相移测量不确定度的影响与前三者比几乎可以忽略不计。

4.6 讨论

1) 由上述分析可知用本方法可以测定 $\lambda/4$ 波片实际相位延迟角大小,而且可以判定其快、慢轴。

2) 直接测量范围为 $-\pi \leq \delta \leq \pi$ 。

3) 由于本方法需要在同一光路四个不同设置状态下测量系统输出光强,考虑到测量操作需要一

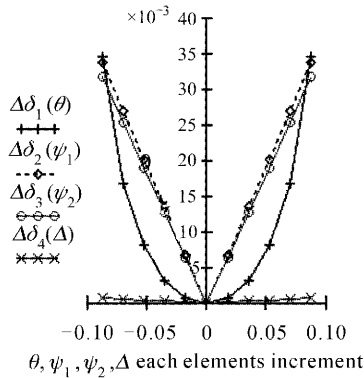


图3 各分量对总不确定度的影响

Fig. 3 Effects of each element on the total uncertainty

定时间且波片相位延迟与三棱镜反射相移都是波长的函数,因此,为了提高测量系统的可靠性,所用的光源应是稳频稳功率的,同时对光功率计的稳定性也有很高的要求,以避免由于光源功率涨落与频率漂移或光功率计灵敏度波动降低测量结果的可靠性。同时,为了保证光路尽可能少受震动及杂散光的干扰,测量应在置于暗室中的光学全息平台上进行。

5 应用实例

选取了适用波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的 $\lambda/4$ 波片为待测波片,测量光路如图 1 所示。采用中国计量测试高科技联合实验室生产的 JL-2000 型双纵模稳定 He-Ne 激光器为光源,其功率稳定度优于 1%。同时采用该室生产的 LM-5D 型光功率计测量通过光路后的光功率。它的功率测量范围分为: $2 \mu\text{W}$, $20 \mu\text{W}$, $200 \mu\text{W}$, 2 mW , 20 mW 与 200 mW 6 档;最高分辨率为 $0.001 \mu\text{W}$ 。测量不确定度在标准定标波长 $0.633 \mu\text{m}$ 时小于 5%。

实验前预先测得直角棱镜的反射相移为 $\Delta = \Delta_{\text{meas.}} \pm \delta\Delta = (1.06 \pm 0.05) \text{ rad}$ 。调整 $\theta = \pi/4$, 分别测得 $I_1 = 371 \text{ nW}$, $I_2 = 54 \text{ nW}$, $I_3 = 9 \text{ nW}$, $I_4 = 414 \text{ nW}$ 。将测量结果代入公式(1)和(2),得到延迟角的测量结果为 $\delta_{\text{meas.}} = 1.789 \text{ rad}(102.5^\circ)$;其选定轴为慢轴。

直角棱镜反射相移的测量不确定度为 $\delta\Delta = 0.05 \text{ rad}$ 。测量中使用的两个偏振片度盘的精度都为 $1.745 \times 10^{-3} \text{ rad}(0.1^\circ)$,但是考虑到测量过程中角度调整的实际情况,各个偏振片的调整误差角均增大 10 倍,取为

$$\delta\psi_{+45^\circ} = \delta\psi_{-45^\circ} = \delta\theta = 0.017 \text{ rad} = 1^\circ.$$

将调整误差角值及反射相移测量不确定度代入公式(30),(35)得 $\delta\delta_1 = 2 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 及 $\delta\delta_2 = 4 \times 10^{-3} \text{ rad}$,再由公式(36)算得 $\delta\delta = 3 \times 10^{-3} \text{ rad} = 0.2^\circ$ 。

最终测量结果为 $\delta = \delta_{\text{meas.}} \pm \delta\delta = (1.789 \pm 0.003) \text{ rad} \approx (102.5 \pm 0.2)^\circ$ 。

因此,本方法的测量精度应在 0.1° 数量级 (0.2°)。

为验证本方法的可重复性,实际测量了 4 组实验数据,如表 1 所示。结果表明,本方法具有比较令人满意的可重复性。

表 1 $\lambda/4$ 波片相位延迟角测量数据

Table 1 Measured data of retardance angle of quarter-wave plate

$\Delta / (^\circ)$	60.7	60.8	61.0	60.2
I_1 / nW	371	375	380	368
I_2 / nW	54	55	54	56
I_3 / nW	9	8	10	8
I_4 / nW	414	410	425	420
$\Delta_1 / (^\circ)$	102.50	102.86	102.09	103.20
$\Delta_2 / (^\circ)$	102.50	102.15	102.95	101.91
$\delta / (^\circ)$	102.50	102.51	102.52	102.56
$\bar{\delta} / (^\circ)$	102.52			

为了验证测量结果 $\delta_{\text{meas.}} = 102.5^\circ$ 的正确性,进行了如图 4 所示的验证实验。令线偏光透射过 $\lambda/4$ 波片,并调整线偏光偏振方向与波片慢轴方向之间夹角为 45° ,再用一个可旋转的检偏器检偏。若该波片的相位延迟角是 $\pi/2$,则出射光应为圆偏振光,随检偏器旋转一周其光强分布应该是圆形,否则应为长轴分布在 1,3 象限(当 $\delta < \pi/2$) 或 2,4 象限(当 $\delta > \pi/2$) 的椭圆。光矢(光强的平方根)分布实测结果为一个长轴在 2,4 象限的椭圆,如图 5 所示(图中 W 表示测量光强值出现的序号)。表明该波片引入的相位延迟角确实大于 $\pi/2$ 。为了进一步验证测量值 δ 的正确性,将 δ 值代入计算机仿真程序,所得图形如图 6 所示,可见与图 5 符合得很好(两图的横纵坐标表示光矢分别在 x 方向和 y 方向的投影)。

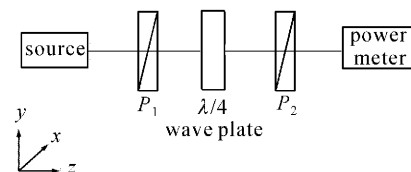


图 4 验证性实验光路

Fig. 4 Schematic diagram of the verifying test

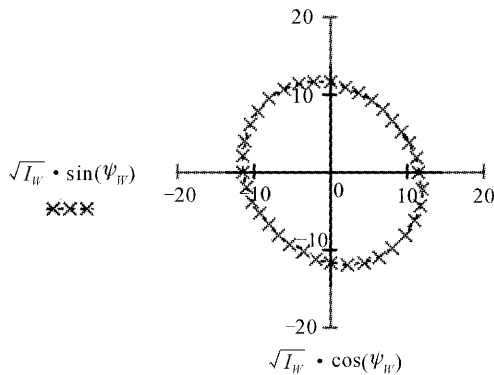


图5 旋转检偏器得到的光矢分布
Fig. 5 Optical vector distribution while rotating the analyzer

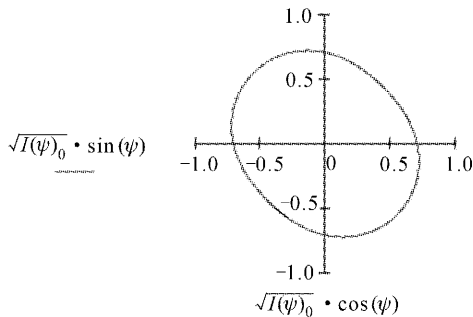


图6 $\delta = 102.5^\circ$ 时仿真所得的光矢分布
Fig. 6 Simulated optical vector distribution with the measured value of $\delta = 102.5^\circ$

6 结 论

报道了一种采用偏振片和直角棱镜测量波片相位延迟角并判定其快慢轴的方法。依据波动光学理论采用琼斯矩阵导出了该方法的原理公式,推导了测量不确定度公式,比较了各因素对不确定度的影响,对该法的使用条件、可重复性及可靠性分别进行了必要的讨论,最后给出了应用实例及其验证性实验与计算机仿真的结果。验证结果表明该方法是可行的、可重复的与可靠的。此外,该方法操作简单,

测量精度高,实用性强。

参 考 文 献

- 1 Wang Ning, Li Guohua, Zhang Dawei. A simple way of determining the phasic delay angle of waveplate [J]. *J. Qufu Normal University*, 2001, **27**(4):47~49
王 宁,李国华,张大伟.一种测定波片相位延迟角的简便方法[J]. *曲阜师范大学学报*, 2001, **27**(4):47~49
- 2 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1121~1123
王 伟,李国华,吴福全等.测量波片延迟量和快轴方位的新方法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1121~1123
- 3 Xue Qingwen, Li Guohua. Half-shade method for measuring the phase retardation of quarter-wave plate [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(2):150~151
薛庆文,李国华.半阴法测量 $\lambda/4$ 波片的相位延迟[J]. *光电子·激光*, 1988, **9**(2):150~151
- 4 Xue Qingwen, Li Guohua. Composite compensated method for measuring the phase retardation of the wave plate [J]. *Laser Journal*, 1996, **17**(2):84~85
薛庆文,李国华.复合补偿法测量波片的相位延迟[J]. *激光杂志*, 1996, **17**(2):84~85
- 5 Xu Wendong, Li Xishan. A new method for measuring phase delay of wave plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(10):1096~1101
徐文东,李锡善.波片相位延迟量精密测量新方法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(10):1096~1101
- 6 Wang Jiming, Li Guohua. Application of Fresnel rhomb in for the optic axis of a $1/4$ wave plate [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(3):245~246, 249
王吉明,李国华.菲涅尔菱体在确定 $1/4$ 波片快慢轴中的应用[J]. *光学技术*, 2002, **28**(3):245~246, 249
- 7 R. C. Jones. A new calculus for the treatment of optical systems: I; II; III [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, **31**(7):488~503
- 8 P. S. Theocaris, E. E. Gdoutos. Matrix Theory of Photoelasticity [M]. Berlin, Springer-Verlag, 1979. Chinese Edition, Translated by Yang Jihui, Beijing: Science Press, 1987. 49~85
P. S. 西奥卡里斯, E. E. 格道托斯著. 光测弹性学矩阵理论 [M]. 杨霁辉译. 第一版. 北京:科学出版社, 1987. 49~85
- 9 Li Qingbo, Wang Zhengping, Sun Weimin *et al.*. Novel method of measuring reflection-induced retardance employing polarizers and its theoretical analysis [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2002, **23**(3):59~62
李庆波,王政平,孙伟民等.用偏振片测量反射相移的方法及其理论分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2002, **23**(3):59~62