

文章编号: 1005-5630(2025)06-0038-10

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202403290064

# s光和p光在反射过程中的相位延迟和 补偿方法研究

徐鸿帆<sup>1,2</sup>, 林剑<sup>1,2</sup>

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 光子芯片研究院, 上海 200093)

**摘要:** 偏振是光的重要特性之一, 在激光加工、成像方面有着广泛应用。光学元件对s光和p光的相位延迟差不同会使得其对光的偏振状态产生影响。诸如反射镜和二向色镜这类反射光学元件对出射光的偏振特性也会产生较大影响。通过实验测量了不同偏振和入射角度条件下, 反射镜和二向色镜在反射过程中s光和p光的相位延迟差, 并提出使用空间光调制器和液晶相位延迟器对这个差值进行补偿。实验结果表明, 该方法可以使相位延迟差从25°降低到4°左右, 从而有效抑制反射过程中偏振特性的改变。通过对相位延迟差的补偿, 可获得与理论基本一致的Si(001)样品的偏振拉曼曲线。这项工作对在实际光路中精确控制光的偏振方向具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 相位延迟差; 相位补偿; 消光比; 偏振拉曼

**中图分类号:** O 436.3 **文献标志码:** A

## Research on phase delay and compensation method of s-polarized and p-polarized-light during reflection

XU Hongfan<sup>1,2</sup>, LIN Jian<sup>1,2</sup>

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Polarization is one of the important properties of light and has a wide range of applications in laser processing and optical imaging. Optical elements have different phase delays for s-polarized and p-polarized-light, which may distort the polarization status of light. Reflective optical elements such as reflection mirrors and dichroic mirrors also have significant influences on the polarization characteristics of light. To address this issue, this paper experimentally measured the phase delay difference between s-polarized and p-polarized-light in the reflection process of reflection mirrors and dichroic mirrors under different polarization and incidence angles. A scheme

收稿日期: 2024-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(11874267)

第一作者: 徐鸿帆(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为偏振拉曼。E-mail: xuhongfan\_123@163.com

通信作者: 林剑(1979—), 男, 副教授, 研究方向为光学衍射神经网络、光学生物成像、拉曼散射。E-mail: jianlin@usst.edu.cn

was proposed to compensate for the phase delay difference by using a spatial light modulator (SLM) or a liquid-crystal phase retarder. Experimental results showed that after the compensation, phase delay difference induced by reflective optical elements could be reduced from  $25^\circ$  to about  $4^\circ$ . Based on this scheme, polarized Raman signals of Si(0 0 1) sample were acquired in good agreement with theoretical prediction. The method proposed in this work could be useful for the precise control of the light polarization in polarization related research and applications.

**Keywords:** phase delay difference; phase compensation; extinction ratio; polarized Raman

偏振作为光场的基本属性之一,在光与物质的相互作用中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。相较于传统探测技术,偏振探测技术不仅能获取目标表面的光强信息,还能提取目标的偏振信息(如偏振度、偏振角等),从而拓展信息维度,提升目标探测与识别的精度,并能够识别传统技术难以探测的目标和纹理特征<sup>[2]</sup>。这是光的其他属性所不具备的优势。在经典光学和量子光学的一系列应用中,需要精确调制光的空间分布矢量状态,如偏振态和相位分布<sup>[3-5]</sup>。这些应用包括调节矢量光场的振幅和相位分布,实现矢量光场的光学微加工以及光学成像等。例如: Lou等<sup>[6]</sup>利用飞秒矢量光场在硅上制作了复杂的二维亚波长微结构; Tsuru等<sup>[7]</sup>通过增强径向偏振飞秒光束在高数值孔径物镜焦点处的纵向电场,在透明玻璃材料的表面上进行激光纳米加工; Zhang等<sup>[8]</sup>基于量子纠缠的非局域特性引入量子成像,利用空间和偏振纠缠光子,实现了更高的信噪比,提高了可分辨像素数以及对生物有机体的高灵敏成像能力。陈晓辉等<sup>[9]</sup>基于光的偏振特性,搭建了曲面光学元件微缺陷的偏振检测装置,提高了光学元件的检测效率。偏振拉曼光谱是拉曼光谱的一个重要分支,它利用拉曼有源模式固有的偏振敏感性<sup>[10-11]</sup>,通过控制激发光以及在探测时拉曼信号的偏振特性,可以进行偏振拉曼的测量。基于柱矢量光束的纵向拉曼信号探测<sup>[12]</sup>,偏振拉曼光谱除了可以提供常规拉曼光谱能够给出的一般的化学识别信息之外,还可以探测有关分子取向和化学键振动对称性的信息<sup>[13]</sup>。

物体反射光或辐射光的偏振特性与其材质、几何形状、纹理结构、表面粗糙度、理化特性等密切相关<sup>[14]</sup>。光在倾斜入射时,由于p光和s光的反射率、透射率和位相移动不同,入射光的偏

振特性在透射光和反射光中不能保持一致<sup>[15]</sup>。用于波片相位延迟差测量的方法有相位补偿法<sup>[16-17]</sup>、光学调制法<sup>[18-19]</sup>、光强测定法<sup>[20-21]</sup>等。但有关反射光学元件相位延迟差的测量与补偿的研究却比较少。在实际搭建的偏振控制系统中,反射光学元件也会对出射光的偏振状态产生影响。因此,应当将对波片相位延迟差测量和补偿的研究拓展到光学反射系统中。

先通过椭偏仪测量了不同入射角度下,反射镜和二向色镜在反射过程中s光和p光的相位延迟差;接着搭建了通过光强测量相位延迟差的实验系统,并结合使用空间光调制器(spatial light modulator, SLM)或液晶相位延迟器对该差值进行补偿,提高斜偏振光在反射过程中的消光比,进而起到调制相位延迟差的作用。这两种方法都可以使反射镜和二向色镜的相位延迟从 $25^\circ$ 左右降低到 $4^\circ$ 左右,且均具有较好的补偿效果。SLM调制的总体补偿效果优于液晶相位延迟器,但其系统的搭建也相对复杂,因此可根据不同的实际需求选择不同的方法进行相位延迟差的补偿。最后,将本文提出的两种方法应用于偏振拉曼系统,在入射部分使用SLM,在信号探测部分使用液晶相位延迟器来补偿相位延迟差,可以获得与理论值基本一致的Si(0 0 1)样品的偏振拉曼曲线。这项工作对精确控制光的偏振方向具有重要意义。

## 1 反射过程中相位延迟的计算

### 1.1 计算模型

Rothen最早提出了椭偏仪<sup>[22]</sup>,它在相位延迟的测量工作中担任重要角色。实验用的椭偏仪测量原理如图1所示。

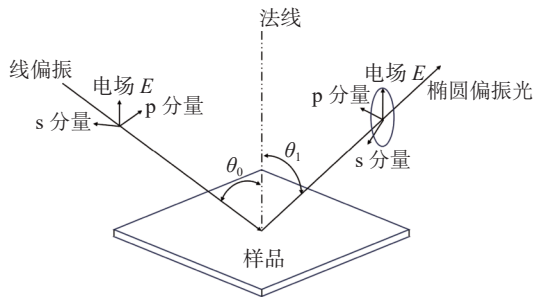


图 1 线偏振光经过反射后变为椭圆偏振光的示意图  
Fig. 1 Diagram of linearly polarized light becomes elliptically polarized after reflection

一束线偏振光以某一特定角度入射到样品上，经样品反射之后，线偏振光会分解为 s 光分量和 p 光分量，进而变成椭圆偏振光。将 p 光和 s 光的反射系数  $r_p$  和  $r_s$  之比定义为  $\rho$ 。金属膜层选择用 Born 和 Wolf 的复折射率，即用介质膜层的复折射率  $N_1$  来表示。根据菲涅尔公式，当光束倾斜入射时，得到 s 光和 p 光的菲涅尔系数<sup>[23]</sup> 分别为

$$N_1 \cos \theta_1 = u_1 + iv_1 \quad (1)$$

$$r_s = \frac{n_0 \cos \theta_0 - (u_1 + iv_1)}{n_0 \cos \theta_0 + (u_1 + iv_1)} = |r_s| e^{i\varphi_s} \quad (2)$$

$$r_p = \frac{n_0(u_1 + iv_1) - [(u_1 + iv_1)^2 + n_0^2 \sin^2 \theta_0] \cos \theta_0}{n_0(u_1 + iv_1) + [(u_1 + iv_1)^2 + n_0^2 \sin^2 \theta_0] \cos \theta_0} = |r_p| e^{i\varphi_p} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \psi e^{i\Delta} \quad (4)$$

式中： $n_0$  为入射平面内物质的折射率； $\theta_0$  与  $\theta_1$  分别为入射光入射角度与反射光出射角度； $\varphi_p$  和  $\varphi_s$  分别为 p 光与 s 光的相位； $\tan \psi$  为 p 光与 s 光的振幅比的变化值； $\Delta$  为 p 光与 s 光的相位差（相位延迟差），且  $\psi$  和  $\Delta$  均为仪器能够测得的样品椭圆偏参数。

### 1.2 消光比与相位延迟差的关系

对于一束偏振光，电矢量可表示为  $E = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y e^{i\delta} \end{pmatrix}$ ，其中  $a_x$ 、 $a_y$  为 x、y 偏振分量的振幅， $\delta$  为 x、y 偏振分量的相位延迟差。而在实验测量中只能获得偏振光的方位角  $\theta$ 、消光比 (extinction ratio)  $R_e$  与各分量的反射率  $r_i^2$ 。如果

想得到 x、y 偏振分量的相位延迟差角  $\delta$ ，可以通过消光比  $R_e$  计算获得。

如图 2，偏振椭圆长轴  $x'$  与 x 轴成  $\theta$  角（即方位角），椭圆长短轴分别为  $b_{x'}$ 、 $b_{y'}$ ，同时定义  $\alpha$  为振幅比角、 $\beta$  为椭圆率角，两者分别满足

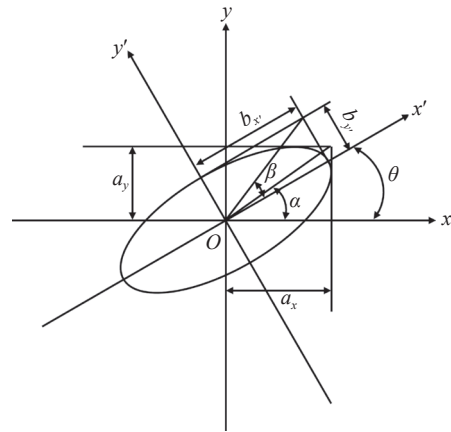


图 2 偏振椭圆的坐标转换关系  
Fig. 2 Coordinate transformation relation of polarization ellipse

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{a_y}{a_x}, -90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ \tan \beta = \frac{b_{y'}}{b_{x'}}, -45^\circ \leq \beta \leq 45^\circ \end{cases} \quad (5)$$

相位延迟差角  $\delta$ 、方位角  $\theta$ 、振幅比角  $\alpha$  及椭圆率角  $\beta$  应该满足

$$\begin{cases} \tan 2\theta = \tan 2\alpha \cos \delta \\ \sin 2\beta = \sin 2\alpha \sin \delta \end{cases} \quad (6)$$

在实际测量中可知方位角  $\theta$  及长短轴方向的能量。长短轴方向的能量比值称为偏振消光比  $R_e$ ，其满足关系

$$R_e = \left( \frac{b_x}{b_y} \right)^2 = \frac{1}{\tan^2 \beta} \quad (7)$$

消掉式 (6) 中的  $\alpha$ ，可得到相位延迟差角  $\delta$  满足

$$\left( 1 + \frac{\tan^2 2\theta}{\cos^2 \delta} \right) \left( 1 - \frac{\sin^2 2\beta}{\sin^2 \delta} \right) = 1 \quad (8)$$

进一步推导可得

$$\sin^2 \delta = \frac{\sin^2 2\beta (1 + \tan^2 2\theta)}{\sin^2 2\beta + \tan^2 2\theta} \quad (9)$$

对于 x 偏振光和 y 偏振光，即  $\theta$  为 0 或者  $\pi/2$ ，此时的相对相位延迟差量并不会影响其消

光比,但是对于斜偏振,即 $\theta$ 为 $\pi/4$ 或 $3\pi/4$ 时,可以得到

$$1 - \frac{\sin^2 2\beta}{\sin^2 \delta} = 0 \quad (10)$$

即 $\beta = \pm\delta/2$ ,则相对相位延迟差角 $\delta$ 与消光比 $R_e$ 之间满足

$$\delta = \arctan \sqrt{1/R_e} \quad (11)$$

### 1.3 相位调制元件对相位延迟差的影响

已知反射元件存在相位延迟,假设其s光和p光的相位延迟差为 $\delta_1$ ,用琼斯矩阵可以表示为

$$J_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

相位调制元件对s光和p光的调制相位分别是 $\delta_s$ 和 $\delta_p$ ,设s光和p光的调制相位延迟差为 $\delta_2 = \delta_s - \delta_p$ ,也可用琼斯矩阵表示为

$$J_2 = \begin{pmatrix} e^{i\delta_p} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_s} \end{pmatrix} = e^{i\delta_p} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

结合式(12)和式(13)可得相位补偿之后的反射元件的琼斯矩阵为

$$J = J_1 J_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i(\delta_1 + \delta_2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta'} \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中, $\delta' = \delta_1 + \delta_2$ 为经过相位叠加之后的相位延迟差。对于电矢量 $\mathbf{E} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}$ 的线偏振光,先通过相位调制元件加载相位补偿相位延迟差。经过反射元件后的电矢量 $\mathbf{E}_1$ 可表示为

$$\mathbf{E}_1 = J\mathbf{E} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y e^{i(\delta_1 + \delta_2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y e^{i\delta'} \end{pmatrix} \quad (15)$$

由式(15)可知,当 $\delta_2 = -\delta_1 + k\pi$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2$ )时, $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}$ ,即表示经过反射元件之后的偏振光与入射光状态一致,所以使用相位调制元件可以补偿相位延迟差。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 椭偏仪对相位延迟差的测量

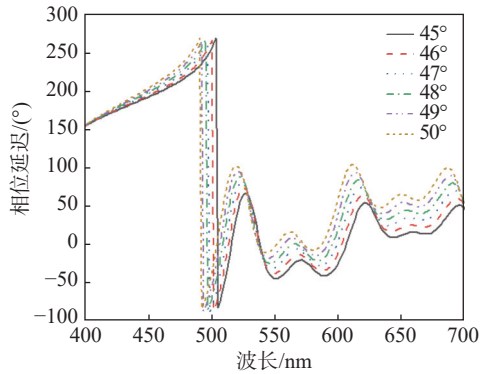
利用 J. A Woollam 公司的 M-2000 型号的椭

圆偏振仪对 Thorlabs 公司的 BB1-E02 反射镜(工作波段为 400~750 nm,对s光和p光的反射率均大于 99%)和 Semrock 公司的 Di03-R635-t1 二向色镜(截止波长为 655.8 nm,对于 350~647.1 nm 波长的 s 光和 p 光的反射率均大于 94%,对 658.8~1 200 nm 波长的 s 光和 p 光的透射率均大于 93%)进行相位延迟差的测量。常采用的反射角度为 45°,但实际光路中的反射角度可能略微偏离 45°,所以测试了入射角度为 45°~50°时的相位延迟差量 $\Delta$ ,以及s光与p光振幅比的反正切量 $\psi$ 。

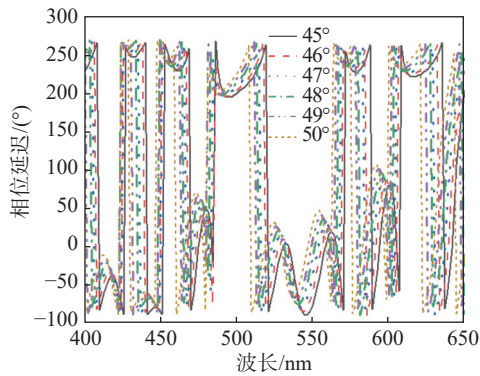
用椭偏仪对不同入射角度的椭偏参数的测量结果如图3所示。由图3(a)和(b)可知,反射镜和二向色镜在不同波长处测得的s光和p光的相位延迟差不同,且当入射角在小角度内变化时,相位延迟差会随着入射角度的变化而变化。由式(2)、式(3)和式(4)可知,某一特定波长的椭偏参数和入射角度 $\theta_0$ 有关。如图3所示,椭偏仪对反射镜和二向色镜的相位延迟测量在某些波长处会发生突变,可能的原因有:1)在测量中发生了干涉效应,因为多层膜的厚度可能会导致特定波长的光发生干涉,从而引起相位延迟的突变;2)可能存在镀膜的损耗,即在一些特定波长下,镀膜的吸收和散射都有可能引起相位延迟发生非预期的变化。图3(c)和(d)中,p光与s光振幅比的反正切量 $\psi$ 基本保持不变,说明波长和入射角度的改变基本不会对s光和p光的振幅比产生影响。

以 638 nm 为例,椭偏仪对反射镜和二向色镜的测量结果见表1。可以发现,振幅比反正切量的变化基本可以忽略。当入射角度由 45°增至 50°,虽然只相差了 5°,反射镜和二向色镜的相位延迟差量却有明显变化:在这个角度变化范围内,反射镜的相位延迟差从 11.36°变为 51.89°,二向色镜的相位延迟差从 -63.63°变为 196.05°。

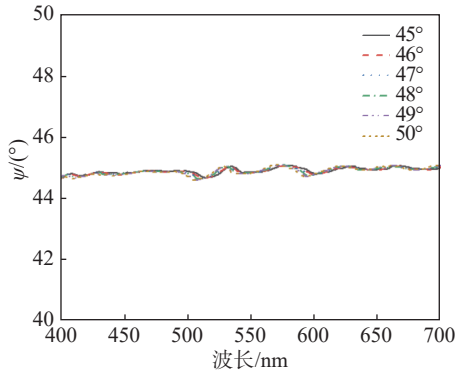
理想情况下,光学元件的相位延迟差量需接近 0°或者 180°。由于实验常用反射元件将光路垂直反射,所以对于反射元件,光需要接近 45°入射。由实验结果可知:当入射角为 45°时,反射镜的相位延迟差为 11.36°,此时反射镜对反射光偏振特性的影响最小;当入射角为 46°时,二向色镜的相位延迟差是 -21.94°,此时



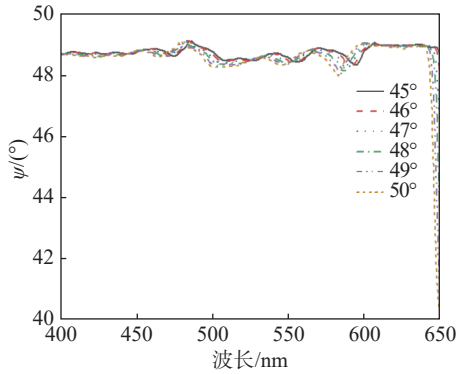
(a) 反射镜相位延迟差



(b) 二向色镜相位延迟差



(c) 反射镜振幅比反正切量



(d) 二向色镜振幅比反正切量

图 3 椭偏仪椭圆参数

Fig. 3 Ellipsometer parameter measurement results of ellipsometer

表 1 638 nm 处椭偏仪测量结果

Tab. 1 Ellipsometry measurement results at 638 nm

测量对象	入射角度/(°)	相位延迟差/(°)	振幅比反正切量/(°)
反射镜	45	11.36	44.98
	46	17.07	44.97
	47	23.88	44.95
	48	31.78	44.94
	49	41.06	44.95
	50	51.89	44.94
二向色镜	45	-63.63	44.96
	46	-21.94	44.76
	47	46.55	44.54
	48	118.77	44.65
	49	164.55	44.75
	50	196.05	44.83

二向色镜对反射光偏振特性的影响最小。

## 2.2 使用消光比测量相位延迟差

在本研究中，搭建了一个通过消光比测量相位延迟差的实验系统。该系统使用 638 nm 的激光，经过起偏器后，得到一束线偏振光，在起偏器后面加入半波片以改变入射光的偏振方向(本文中实验均是从垂直偏振方向开始改变)。激光以 45°入射至样品，经样品反射后，反射光路与入射光路垂直。在反射光路中，用检偏器和功率计测量不同偏振方向入射时的激光最大功率和最小功率。根据式(7)计算出每个偏振方向入射的消光比。实验测量系统如图 4 所示，不同偏振方向入射时的消光比测量结果如图 5 所示。通过理论分析发现：当消光比接近 1 时，偏振状态更接近圆偏振；当消光比远离 1 甚至为  $\infty$  时，偏振状态更接近线偏振。

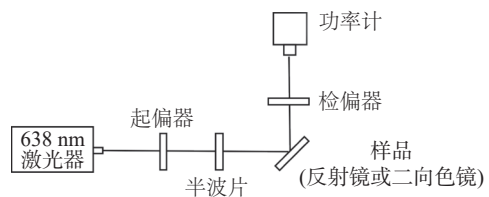


图 4 相位延迟差测量系统

Fig. 4 Phase delay measurement system

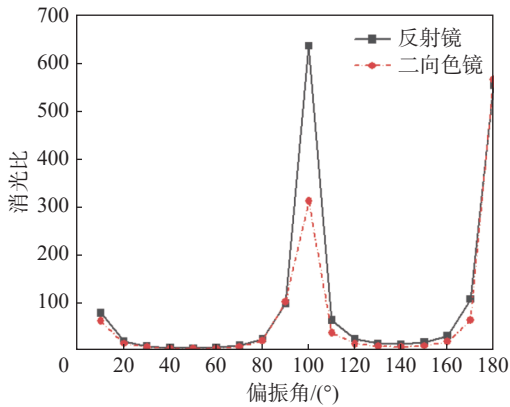


图 5 不同偏振方向入射的消光比

Fig. 5 Extinction ratio of incident light in different polarization directions

由图 5 可知, 不同偏振方向的入射光入射时, 经过反射镜和二向色镜后的反射光消光比会改变, 即偏振状态发生了变化。当入射偏振角接近  $90^\circ$  或  $180^\circ$ , 即对应水平偏振方向或垂直偏振方向时, 消光比均高于 100, 此时偏振状态均保持良好; 当入射偏振角越偏离水平偏振方向和垂直偏振方向时, 消光比会逐渐接近 1, 并且当入射光的偏振方向偏离垂直偏振方向  $50^\circ$  时, 两种样品的消光比均达到最小, 反射镜测量的结果为 5.4, 二向色镜测量的结果为 3.6。通过式 (11) 可求得: 反射镜在反射过程中 s 光和 p 光的相位延迟差为  $23.18^\circ$ ; 二向色镜在反射过程中, s 光和 p 光的相位延迟差为  $28.12^\circ$ 。在图 4 所示的测量系统中, 当激光以  $45^\circ$  入射至样品时, 反射镜和二向色镜测得的相位延迟差均与表 1 中所示结果不同。这可能是测量时, 反射角略微偏离  $45^\circ$ 。从表 1 中椭偏仪的测量结果可知, 当入射光角度偏离  $45^\circ$  仅  $2^\circ$  时, 反射镜的相位延迟差就变为  $23.88^\circ$ , 而二向色镜的相位延迟差则变为  $46.55^\circ$ 。而实际光路中的入射和反射角度有可能略微偏离  $45^\circ$ , 因此认为该实验结果依旧可信。

### 2.3 相位延迟差的补偿实验

分别使用 SLM 和液晶相位延迟器这两种相位调制元件对相位延迟差进行补偿。

#### 1) SLM 对相位延迟差的补偿

搭建了如图 6 所示的实验光路, 用于验证 SLM 对相位延迟差的补偿效果。采用波长为 638 nm 的半导体激光器, 激光经过偏振片和半

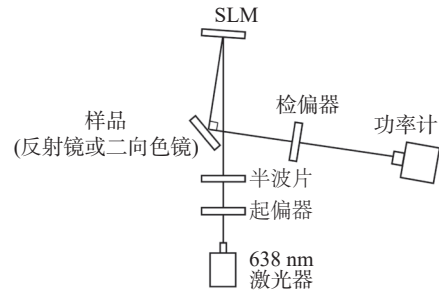


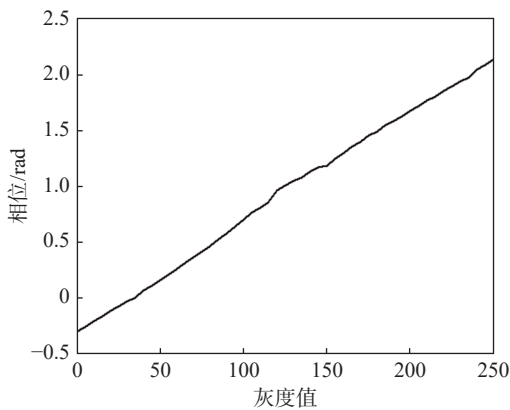
图 6 SLM 相位补偿实验系统

Fig. 6 Phase compensation experimental system using SLM

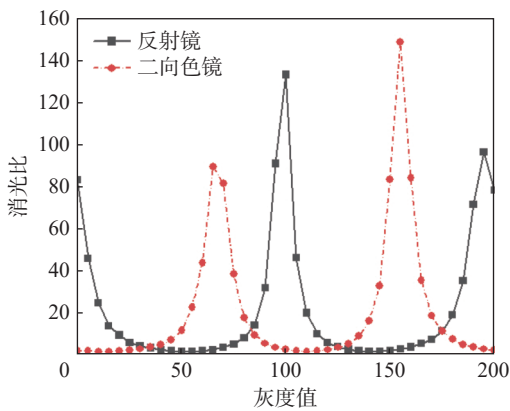
波片的组合后生成偏振方向可控的线偏振光源, 再经过 SLM 和反射镜或二向色镜反射。最后, 在反射光路部分使用检偏器和功率计测量不同偏振方向反射后的激光最大功率和最小功率, 并计算消光比。

由图 5 已知, 当入射光偏振方向偏离垂直偏振方向  $50^\circ$  左右时, 消光比最小, 并且在该角度下可通过式 (11) 计算出样品的相位延迟差。所以先将入射光的偏振方向调整为与垂直轴成  $50^\circ$  左右, 然后调整 SLM 上加载的灰度图的灰度值, 进而改变入射光束的相位。加载灰度图的灰度值与相位之间的关系如图 7(a) 所示, 加载灰度图的灰度值与斜偏振入射光的消光比之间的关系如图 7(b) 所示。当 SLM 上加载的灰度值变化时, 反射镜和二向色镜的反射光消光比也会相应改变, 结合式 (11), 说明 s 光和 p 光的相位延迟差也随之变化。并且当加载的灰度值为 100, 即加载相位为  $0.7\pi$  时, 反射镜获得的调制效果最明显, 消光比达到最大, 为 133。此时的相位延迟差为  $4.9^\circ$ , 相比于未补偿之前的相位延迟差 ( $23.18^\circ$ ) 得到了比较好的补偿。当加载的灰度值为 155, 即加载相位为  $1.24\pi$  时, 二向色镜获得的调制效果最明显, 消光比最大为 149, 此时的相位延迟差为  $4.68^\circ$ , 相比于未补偿之前的相位延迟差 ( $28.12^\circ$ ) 也得到了比较好的补偿。所以通过 SLM 补偿相位延迟差是可行的。

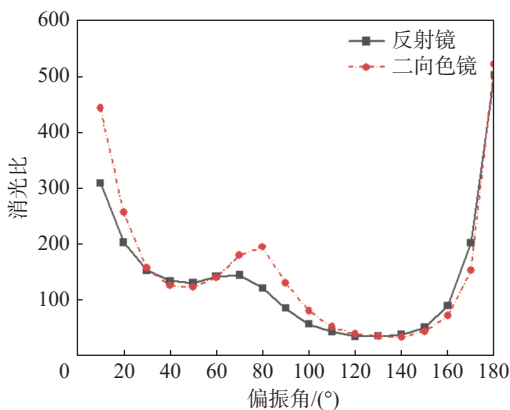
分别将反射镜和二向色镜调制效果最好的灰度图加载到 SLM 上, 测量不同偏振方向入射后反射光最大功率和最小功率, 并计算出每个偏振方向消光比, 测得的实验结果如图 7(c) 所示。将图 5 与图 7(c) 进行对比, 可以发现, 经过 SLM 补偿相位延迟差后, 斜偏振 ( $45^\circ$  和  $135^\circ$  附近) 时, 消光比有明显的提升, 说明偏振状态得



(a) 加载灰度值与相位的关系



(b) 加载灰度值与消光比的关系



(c) SLM 相位补偿后不同偏振方向入射的消光比测量结果

图 7 SLM 相位补偿实验结果

Fig. 7 Results of SLM phase compensation experiment

到了较好的补偿。

### 2) 相位延迟器对相位延迟差的补偿

所使用的液晶相位延迟器 (liquid crystal variable retarder, LCVR) 为 LABEK 公司的 H20-A, 它基于向列相液晶和氧化铟锡 (indium tin oxide, ITO) 玻璃材料, 调节相位延迟的功能主要由液晶盒内的向列相液晶填充层实现。当没

有外加电压时, 液晶分子在聚酰亚胺层的作用下, 沿着摩擦方向排列; 当通过玻璃衬底的 ITO 导电层接入外部交流电压时, 液晶分子会在电压的影响下发生排列方向的改变。改变程度与电压幅值有关, 且当电压增大到一定水平时, 排列方向将几乎不再发生变动, 其本质上是一个延迟量可调的各向异性波片。所搭建的实验系统如图 8 所示, 只需要在入射光路中加入液晶相位延迟器就可以起到相位补偿的效果。

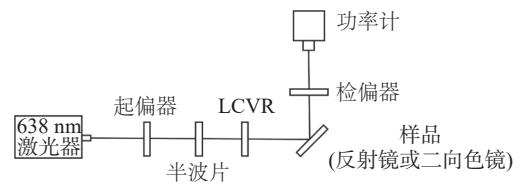


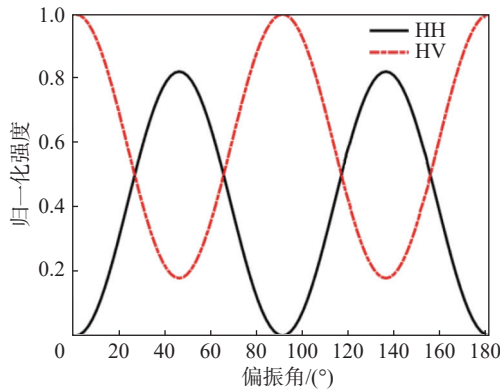
图 8 液晶相位延迟器相位补偿实验系统

Fig. 8 Liquid crystal variable retarder phase compensation experimental system

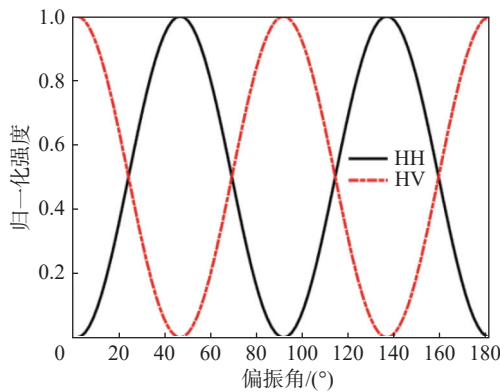
与 SLM 加载相位补偿相位延迟差实验类似, 首先将入射光的偏振方向调整为与垂直轴成  $50^\circ$  左右, 然后通过调整加载到液晶相位延迟器上面的电压, 改变液晶相位延迟器上的延迟量, 补偿相位延迟差。加载的电压与相位之间的关系如图 9(a) 所示, 加载的电压与斜偏振入射光的消光比变化关系如图 9(b) 所示。当加载的电压为  $2.5\text{ V}$ , 即加载的相位为  $1.85\pi$  时, 其对反射镜调制的效果最明显, 消光比最大, 为  $136.25$ 。此时的相位延迟差为  $4.89^\circ$ , 相比于未补偿之前的相位延迟差 ( $23.18^\circ$ ) 得到了比较好的补偿。当加载的电压为  $8.5\text{ V}$ , 即加载的相位为  $0.34\pi$  时, 其对二向色镜调制的效果最明显, 消光比最大, 为  $517.35$ 。此时的相位延迟差为  $2.5^\circ$ , 相比于未补偿之前的相位延迟差 ( $28.12^\circ$ ) 也得到了较好的补偿。所以, 通过液晶相位延迟器补偿相位延迟差是可行的。

分别将反射镜和二向色镜调制效果最好的电压加载到液晶相位延迟器上, 测量不同偏振方向入射后, 反射光最大功率和最小功率, 计算出每个偏振方向消光比, 测量的实验结果如图 9(c) 所示。将图 9(c) 与图 5 进行比较, 可以发现经过液晶相位延迟器补偿相位延迟差之后, 斜偏振 ( $45^\circ$  和  $135^\circ$  附近) 时, 消光比有了明显的提升, 说明偏振状态也得到了较好的补偿。





(a) 存在相位延迟差仿真结果

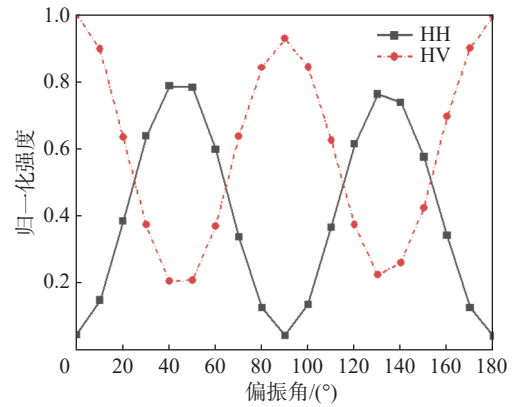


(b) 不存在相位延迟差仿真结果

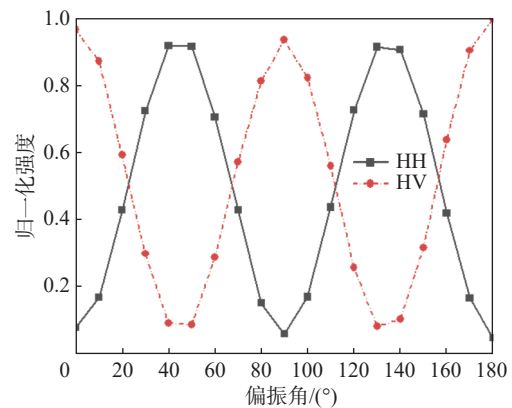
图 11 偏振拉曼仿真结果

Fig. 11 Simulation results of polarization Raman

响，所以有必要消除这种影响。大多数研究只考虑了波片相位延迟差的影响，但是诸如反射镜和二向色镜这类反射光学元件在反射过程中 s 光和 p 光的相位延迟差对输出光的偏振特性也会产生一定的影响。针对这一问题，提出使用 SLM 和液晶相位延迟器补偿反射镜和二向色镜在反射过程中 s 光和 p 光的相位延迟差，使经过反射镜和二向色镜反射之后的反射光偏振特性与入射光偏振特性基本保持一致。常用的反射角度为 45°，但是实际光路中的反射角度有可能略微偏离 45°。为了验证本文提出的方法具有可行性，首先使用椭偏仪测量了反射镜和二向色镜在 45°到 50°入射角度入射时的椭偏参数，发现相位延迟差的变化比较明显，并且相位延迟差的变化与入射的角度也有关系。然后通过光强测试法测出反射镜在反射过程中 s 光和 p 光的相位延迟差为 23.18°，二向色镜在反射过程中 s 光和 p 光的相位延迟差为 28.12°，与椭偏仪测量结果对比后，分析可能是因为实际光路中入射角偏离 45°。最后使用 SLM 和液晶相位延迟器进行



(a) 未加液晶相位延迟器补偿测量结果



(b) 液晶相位延迟器补偿后测量结果

图 12 偏振拉曼测量结果

Fig. 12 Measurement results of polarization Raman

补偿相位延迟差的实验，发现反射镜和二向色镜的相位延迟差都从 25°左右降低到了 4°左右，均得到了明显的补偿。但是比较后发现，通过 SLM 调制的补偿总体效果比用液晶相位延迟器的效果好，但是其系统的搭建会更加复杂。所以可以根据实际情况选择不同的方法进行相位补偿。将本文提出的两种方法应用于偏振拉曼系统，在入射部分使用 SLM 补偿相位延迟差，在信号探测部分使用液晶相位延迟器补偿相位延迟差，可以获得与理论基本一致的 Si(0 0 1)样品的偏振拉曼曲线。该研究对在实际光路中精确控制光的偏振方向具有一定借鉴意义。

参考文献:

[1] 樊硕. 偏振与相位调制矢量光束聚焦特性研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.  
 [2] 黄萌, 陈青山, 李晓英, 等. 粗糙表面反射偏振特性的研究进展 [J]. 激光杂志, 2023, 44(7): 1-8.

- [3] CHIPMAN R, LAM W S T, YOUNG G. Polarized light and optical systems[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [4] ROSALES-GUZMÁN C, NDAGANO B, FORBES A. A review of complex vector light fields and their applications[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(12): 123001.
- [5] WANG J W, CASTELLUCCI F, FRANKE-ARNOLD S. Vectorial light-matter interaction: exploring spatially structured complex light fields[J]. *AVS Quantum Science*, 2020, 2(3): 031702.
- [6] LOU K, QIAN S X, WANG X L, et al. Two-dimensional microstructures induced by femtosecond vector light fields on silicon[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 120.
- [7] TSURU Y, KOZAWA Y, UESUGI Y, et al. Laser nanoprocessing via an enhanced longitudinal electric field of a radially polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(6): 1405.
- [8] ZHANG Y D, HE Z, TONG X, et al. Quantum imaging of biological organisms through spatial and polarization entanglement[J]. *Science Advances*, 2024, 10(10): eadk1495.
- [9] 陈晓辉, 王鑫森, 段亚凡. 光学元件微缺陷偏振检测的图像处理方法研究 [J]. *光学仪器*, 2024, 46(5): 24 – 30
- [10] GRZYBOWSKI J M, KHANNA R K, LIPPINCOTT E R. Evidence of ion - pairing in the polarized Raman spectra of a  $\text{Ba}^{2+} - \text{CrO}_4^{2-}$  doped KI single crystal[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 1975, 4(1): 25 – 30.
- [11] DAMEN T C, PORTO S P S, TELL B. Raman effect in zinc oxide[J]. *Physical Review*, 1966, 142(2): 570 – 574.
- [12] 徐万祥, 林剑. 基于柱矢量光束的纵向拉曼信号探测 [J]. *光学仪器*, 2023, 45(1): 25 – 31
- [13] BOWER D I. Investigation of molecular orientation distributions by polarized Raman scattering and polarized fluorescence[J]. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 1972, 10(11): 2135 – 2153.
- [14] 任立勇, 梁健, 屈恩世, 等. 偏振光学成像: 器件, 技术与应用 (特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(8): 0851505.
- [15] 李刚, 孙连春, 于兆波, 等. 光学薄膜中的偏振效应 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 647 – 651.
- [16] 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.
- [17] MONTAROU C C, GAYLORD T K. Two-wave-plate compensator method for single-point retardation measurements[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(36): 6580 – 6595.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] WILLIAMS P A, ROSE A H, WANG C M. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6466 – 6472.
- [21] 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.
- [22] ROTHEN A. The ellipsometer, an apparatus to measure thicknesses of thin surface films[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1945, 16(2): 26 – 30.
- [23] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 52.

(编辑: 李晓莉)