

## 激光与光电子学进展

## 非偏振分光棱镜的相移测量及其温度特性研究

高珊<sup>1,2</sup>, 孟晨<sup>1,2</sup>, 崔省伟<sup>1,2\*</sup>, 姚晓天<sup>1,2</sup>, 郝鹏<sup>1,2</sup>, 吴胜保<sup>1,2</sup><sup>1</sup>河北大学物理科学与技术学院光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;<sup>2</sup>河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002

**摘要** 非偏振分光棱镜在干涉仪中引入的非线性误差将对仪器的测量精度产生不可忽视的影响,所以测量非偏振分光棱镜所引入的相移特性并探究其补偿方法是非常有意义的。基于琼斯矩阵描述偏振态的方法,设计、搭建了非偏振分光棱镜透射及反射相移的测量系统,并对反射相移进行了有效补偿,此外,还对相移的温度特性进行了实验探究。系统采用双光电探测器平衡探测的方法可以消除光源功率抖动的影响,具有探测精度高、稳定性好、抗干扰能力强等优点。研究表明:非偏振分光棱镜的反射相移明显大于透射相移,将 2 个反射相移接近的非偏振分光棱镜进行组合后整体相移明显降低。此外,随着温度的变化,相移也会发生变化,相移的温度特性曲线中存在相移量最小的拐点,该方法有助于寻找非偏振分光棱镜的最佳工作温度。

**关键词** 分光棱镜; 相位延迟量; 相移补偿; 温度特性

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222256

## Phase Shift Measurements of Non-Polarized Beam Splitter and Its Temperature Characteristics

Gao Shan<sup>1,2</sup>, Meng Chen<sup>1,2</sup>, Cui Shengwei<sup>1,2\*</sup>, Yao X. Steve<sup>1,2</sup>, Hao Peng<sup>1,2</sup>, Wu Shengbao<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;<sup>2</sup>Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China

**Abstract** Non-linear errors introduced by a non-polarized beam splitter considerably impact the measurement accuracy of an interferometer. Therefore, it is necessary to measure phase shift characteristics introduced by the non-polarized beam splitter and explore the compensation method of the non-polarized beam splitter. Based on the Jones matrix method describing polarization states, we set up a measurement system for the transmission and reflection phase shifts of the non-polarized beam splitter and the effective compensation of the reflection phase shifts. In addition, the temperature characteristics of the phase shifts are experimentally investigated. The aforementioned system uses the balanced detection method of dual photo-detectors; this method exhibits high detection accuracy, good stability, and anti-interference and can also eliminate the fluctuation in light power. The results show that the reflection phase shift of the non-polarized beam splitter is larger than the transmission phase shift, and the overall phase shift is effectively reduced by combining two non-polarized beam splitters with almost the same reflection phase shifts. Moreover, the phase shift changes with a change in temperature. An inflection point of the minimum phase shift in the temperature characteristic curve is observed, which helps determine the optimal operating temperature of the non-polarized beam splitter.

**Key words** beam splitter; phase delay; phase shift compensation; temperature characteristics

## 1 引言

非偏振分光棱镜(NPBS)作为基本的分光元件,广泛应用于激光干涉仪、光学传感器、偏振显微镜等仪

器<sup>[1]</sup>。NPBS 一般由两个三角玻璃棱镜通过胶合剂胶合在基体上制成,其中一个三角棱镜的斜面上镀制多层干涉膜,通过调整膜层的厚度可以控制透射和反射的分光比<sup>[2-3]</sup>。当光束倾斜入射时,薄膜界面上 s、p 两

收稿日期: 2022-08-11; 修回日期: 2022-08-17; 录用日期: 2022-08-24; 网络首发日期: 2022-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(62105091)、河北省自然科学基金(F2021201016)

通信作者: \*shengwei@hbu.edu.cn

个分量的反射及透射相位不同会引起额外的相移<sup>[4]</sup>。理想的 NPBS 需要振幅和相位都达到偏振无关的效果,然而在 NPBS 的设计中,分光比一直是研究的重点,相移问题经常会被忽视,从而在实际应用中 NPBS 会引入一定的误差。例如,NPBS 的分光比和相移等参数会使干涉仪的测量位移与实际位移之间产生非线性误差,降低干涉信号的对比度,限制干涉仪的分辨率和测量精度<sup>[5-7]</sup>。所以,测量 NPBS 所引入的相移特性并探究其补偿方法是非常有意义的。此外,NPBS 在使用过程中会受到不同环境因素的影响,其中环境温度变化所带来的影响几乎不可避免<sup>[8]</sup>。近年来,研究人员对 NPBS 在激光干涉仪中引入的相移误差展开了大量的研究工作。侯文政等<sup>[9]</sup>通过实验测量了不同 NPBS 在外差干涉仪中引入的最大非线性误差。邓元龙等<sup>[10]</sup>研究了 NPBS 的退偏效应及方位角对激光干涉仪中测量误差的影响。然而关于 NPBS 相移的温度特性研究以及如何补偿 NPBS 反射相移引入误差的研究却鲜有报道。王政平等<sup>[11]</sup>在实验中获取了 NPBS 反射相移和分光比的温度特性,但该方法使用旋转偏振片的方法进行功率测量,无法消除光源功率抖动的影响。李立艳等<sup>[12]</sup>通过旋转波片方位角的方法对 NPBS 在单频激光干涉仪中引入的非线性误差进行了补偿。詹其文等<sup>[13]</sup>在测径仪中使用 2 个相同的 NPBS 进行了反射相移的补偿,有效降低了反射相移引入的误差,从而提升了测量精度。本文旨在搭建一种可以在较大温度范围内精确探究 NPBS 相移的温度特性并验证 NPBS 反射相移补偿方案的系统。

设计并搭建了测量 NPBS 相移的系统,准确测量了常温下 NPBS 的透射/反射系数和相移。在此基础上设计实现了 NPBS 反射相移的补偿方案,实验验证了该方案的可行性。最后,研究了 NPBS 透射相移、反射相移的温度特性。

## 2 实验原理

波片的相位延迟量测量系统原理图如图 1 所示,圆偏振光入射到快轴与 X 轴夹角为 45° 相位延迟为  $\phi$  的待测波片上,再经过偏振分光棱镜(PBS)分成水平、竖直方向的两束正交线偏振光(p 光、s 光),p 光、s 光分

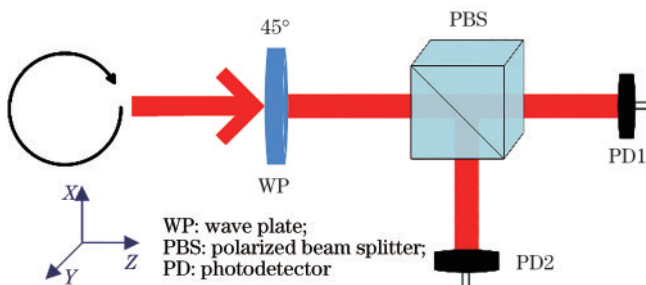


图 1 波片相位延迟测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of wave plate phase delay measurement

别被光电探测器 PD1 和 PD2 接收。

上述系统的光学过程用琼斯矩阵<sup>[14]</sup>描述为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_p = \mathbf{P}_T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{E}_m \\ \mathbf{E}_s = \mathbf{P}_R \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{E}_m \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_p$ 、 $\mathbf{E}_s$  分别为 p、s 分量的矢量光场; $\mathbf{P}_T$ 、 $\mathbf{P}_R$  分别为 PBS 的透射和反射偏振态; $\mathbf{W}$ 、 $\mathbf{P}$  分别为 45° 待测波片、PBS 的琼斯矩阵; $\mathbf{E}_m$  为入射右旋圆偏振光的矢量光场,琼斯矩阵<sup>[15]</sup>表示为

$$\mathbf{E}_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} E_0, \quad (2)$$

式中: $E_0$  为光波的振幅。 $\mathbf{W}$ 、 $\mathbf{P}$  的琼斯矩阵<sup>[16-17]</sup>表示为

$$\mathbf{W} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \exp(i\phi) & 1 - \exp(i\phi) \\ 1 - \exp(i\phi) & 1 + \exp(i\phi) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\phi$  为待测波片的相移,可表示为

$$\phi = \phi_s - \phi_p, \quad (4)$$

式中: $\phi_p$ 、 $\phi_s$  分别为 p 光、s 光的相位。

将式(2)、式(3)代入式(1)可得

$$\begin{cases} \mathbf{E}_p = \frac{1}{2\sqrt{2}} [1 + \exp(i\phi) + i - i\exp(i\phi)] E_0 \\ \mathbf{E}_s = \frac{1}{2\sqrt{2}} [1 - \exp(i\phi) + i + i\exp(i\phi)] E_0 \end{cases}, \quad (5)$$

利用欧拉公式  $\exp(i\phi) = \cos \phi + i \sin \phi$ , 可将式(5)变换为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_p = \frac{1}{2\sqrt{2}} [(1+i)(1+\sin \phi) + (1-i)\cos \phi] E_0 \\ \mathbf{E}_s = \frac{1}{2\sqrt{2}} [(1+i)(1-\sin \phi) - (1-i)\cos \phi] E_0 \end{cases}, \quad (6)$$

2 个探测器接收的光强  $I_p$ 、 $I_s$  分别为

$$\begin{cases} I_p = \mathbf{E}_p \cdot \mathbf{E}_p^* = \frac{1}{2} (1 + \sin \phi) E_0^2 \\ I_s = \mathbf{E}_s \cdot \mathbf{E}_s^* = \frac{1}{2} (1 - \sin \phi) E_0^2 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{E}_p^*$ 、 $\mathbf{E}_s^*$  分别为  $\mathbf{E}_p$ 、 $\mathbf{E}_s$  的共轭复数。

由式(7)可知,平衡探测的信号  $I_p - I_s$  为  $\sin \phi |E_0|^2$ , 相移测量的灵敏度为  $\cos \phi |E_0|^2$ , 因此该装置适用于 NPBS 的较小相移测量。此外,在实际实验中由于 2 个探测器对输出功率的响应和初始背景强度不同,所以在系统校准时,需对  $I_p$ 、 $I_s$  进行调平衡。双 PD 调平衡原理如图 2(a) 所示,PD 接收的光强值与激光器输出功率是线性关系,可表示为

$$\begin{cases} I_s = \alpha \cdot x_s + b_s \\ I_p = \beta \cdot x_p + b_p \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$  分别为 PD1、PD2 接收的光强对光源功率的响应曲线系数; $x$  为激光器的输出功率; $b$  为测试环境的背景强度。经平移变换使  $I_s' = I_p$ , 即两条响应曲线重合,如图 2(b) 所示。调平衡后的  $I_s'$  的表达式为

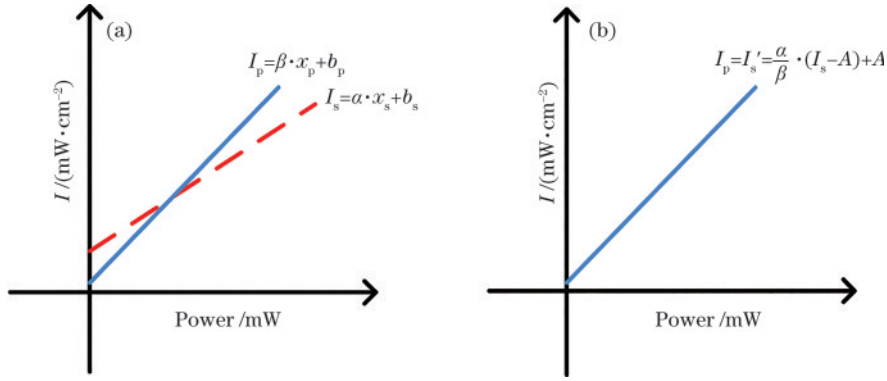


图 2 双 PD 调平衡原理图。(a) 调平衡前 PD 对功率的响应曲线图; (b) 调平衡后 PD 对功率的响应曲线图

Fig. 2 Schematic diagrams of dual-PD balancing. (a) PD response curve to power before balancing; (b) PD response curve to power after balancing

$$I'_s = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)(I_s - A) + A, \quad (9)$$

式中:  $A = (\alpha \cdot b_p - \beta \cdot b_s) / (\alpha - \beta)$  为两条响应曲线交点纵坐标的数值。

根据式(7)、式(9)得到相移的计算公式为

$$\phi = \arcsin \nu, \quad (10)$$

式中:  $\nu = (I_p - I'_s) / (I_p + I'_s)$ 。由式(10)可知, 入射光  $E_0$  的大小将不会影响平衡探测的相移结果, 因此该方法可以有效避免光源功率抖动、背景强度等因素对测量结果的影响。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 常温下测量 NPBS 相移实验

NPBS 的相移测量实验装置如图 3 所示, 系统采用分布反馈 (DFB) 半导体激光器 (输出波长为

1550 nm, 功率可调范围为 0~40 mW) 作为光源。激光器发出的光经光纤准直器 (工作距离为 200 mm, 束腰直径为 880  $\mu\text{m}$ ) 转变成平行光, 光纤准直器 (单模光纤) 固定在光学平台上可以使光纤的应力保持不变, 从而保证激光器输出的光经准直器后功率及偏振态的稳定性。出射光再经  $0^\circ$  的起偏器 P、 $45^\circ$  的四分之一波片 (QWP) 后获得圆偏振光, 由于 NPBS 与 PBS 的轴向相同, 难以精准扭转  $45^\circ$  轴向, 所以需在 NPBS 后插入一个  $22.5^\circ$  的二分之一波片 (HWP), 使经过 NPBS 的出射光偏振态旋转  $45^\circ$ , 经 PBS 分成的 p 光、s 光分别被光电探测器 PD1 和 PD2 接收 (PD1 和 PD2 均为 Thorlabs:PDA20CS2, 接收面积为  $3.14 \text{ mm}^2$ )。PD 接收的光强信号通过数据采集卡 (采样率为 10 Hz) 转化为电压信号, 同时对其进行记录。

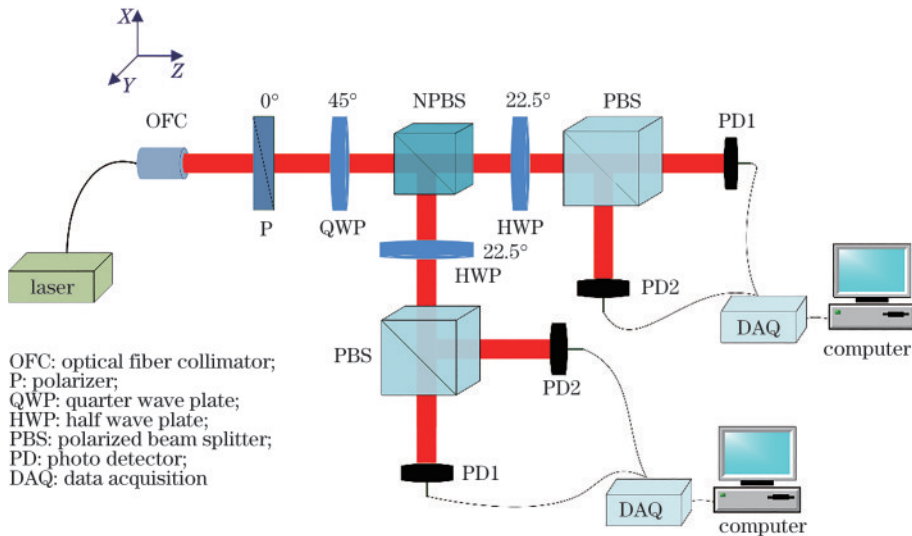


图 3 相移测量实验装置

Fig. 3 Experimental device for phase shift measurement

式(3)是在认为待测器件为理想波片的情况下得到的结果, 如果考虑到 NPBS 的透射率和反射率对相

移测量过程的影响, NPBS 及  $22.5^\circ$  HWP 的琼斯矩阵<sup>[17-18]</sup>可表示为

$$\mathbf{B}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \eta \exp(i\delta) \end{bmatrix}, \mathbf{B}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \kappa \exp(i\varphi) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中： $\mathbf{B}_T$ 、 $\mathbf{B}_R$ 分别为 NPBS 透射及反射的琼斯矩阵； $\mathbf{H}$ 为 22.5°HWP 的琼斯矩阵； $\eta$ 、 $\kappa$ 分别为 p、s 分量的透射系数和反射系数； $\delta$ 、 $\varphi$ 分别为 NPBS 的透射相移和反

射相移，分别表示为

$$\eta = T_s/T_p, \delta = \delta_s - \delta_p, \kappa = R_s/R_p, \varphi = \varphi_s - \varphi_p, \quad (12)$$

式中： $T_s$ 、 $T_p$ 分别为 s、p 分量的透射率； $R_s$ 、 $R_p$ 分别为 s、p 分量的反射率。

根据上述分析，引入 NPBS 和 HWP 后，2 个探测器接收的光强分别为

$$\begin{cases} I_s = \frac{1}{4}(1 + \eta \sin \delta - i\eta \cos \delta)(1 + \eta \sin \delta + i\eta \cos \delta) E_0^2 = \left(\frac{1}{4} + \frac{\eta}{2} \sin \delta + \frac{\eta^2}{4}\right) E_0^2 \\ I_p = \frac{1}{4}(1 - \eta \sin \delta + i\eta \cos \delta)(1 - \eta \sin \delta - i\eta \cos \delta) E_0^2 = \left(\frac{1}{4} - \frac{\eta}{2} \sin \delta + \frac{\eta^2}{4}\right) E_0^2 \end{cases}, \quad (13)$$

此时透射相移、反射相移的计算公式分别为

$$\delta = \arcsin \frac{\nu(1 + \eta^2)}{2\eta}, \varphi = \arcsin \frac{\nu(1 + \kappa^2)}{2\kappa}, \quad (14)$$

相移测量系统未放置 HWP 时，入射光经起偏器、QWP、NPBS、PBS 后得到 p、s 分量，2 个分量的光场分别为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_p = E_0 \\ \mathbf{E}_s = -i\eta \exp(i\delta) \cdot E_0 \end{cases}, \quad (15)$$

2 个探测器接收的光强为

$$\begin{cases} I_p = E_0^2 \\ I_s = \eta^2 E_0^2 \end{cases}, \quad (16)$$

由式(9)、式(16)可知透射系数  $\eta = \sqrt{I_s/I_p}$ ，同理可得反射系数与透射系数的表达式相同。

利用上述系统测量了 5 个定制的 NPBS 在常温下的透射/反射系数和相移，测量结果如表 1 所示。

表 1 NPBS 的透射/反射系数和相移测量结果

Table 1 Measurement results of transmission/reflection coefficient and phase shift of NPBS

Data set	NPBS1	NPBS2	NPBS3	NPBS4	NPBS5
Transmittance	1.0556	0.9898	0.9802	1.0538	1.0282
Standard deviation	0.0001	0.0002	0.0002	0.0004	0.0002
Transmission phase shift / (°)	1.6084	4.7505	2.7267	4.7897	5.1764
Standard deviation / (°)	0.0042	0.0027	0.0099	0.0043	0.0096
Reflectance	1.0115	1.0031	1.0291	0.9123	0.9316
Standard deviation	0.0001	0.0003	0.0002	0.0004	0.0003
Reflection phase shift / (°)	19.7022	30.7308	25.0126	25.0643	25.2185
Standard deviation / (°)	0.0031	0.0034	0.0022	0.0044	0.0032

表 1 中透射/反射系数和透射/反射相移均为多次测量取平均值，NPBS1~NPBS5 的透射相移在 1°~6° 范围内，透射相移的标准差在 0.0027°~0.0099° 范围内，透射系数的标准差在 0.0001~0.0004 范围内。NPBS1~NPBS5 的反射相移在 19°~31° 之间，反射相移的标准差在 0.0022°~0.0044° 范围内，反射系数的标准差在 0.0001~0.0004 范围内。多次测量的标准差体现了相移测量装置具有极高的稳定性及重复性，且系统的测量精度较高。基于 NPBS 的制作原理分析相移大小的影响因素：当光束倾斜入射到薄膜上时，s 分量和 p 分量的有效折射率不同，根据菲涅耳公式可得光束倾斜入射在不同折射率的两介质分界面时 s 分量和 p 分量的反射系数，结合菲涅耳系数的递推算法可以得到反射相移的大小与玻璃基底折射率、介质膜材料折射率、介质膜材料厚度等因素有关，同理透射相

移也可以得到类似的结论<sup>[19-20]</sup>。此外，由于镀膜层对入射光存在一定的吸收，所以实验测得透射率和反射率不是完全互补的。

### 3.2 NPBS 反射相移补偿实验

由常温下 NPBS 透射/反射系数和相移的测量结果可知，振幅和相移都会影响 NPBS 的非偏振效果，但研究人员一直致力于制作分光比为 50:50 的 NPBS，而忽略反射引起的相位延迟问题。在实际应用中，需要消除反射相移带来的误差来提高系统的测量准确度<sup>[21]</sup>。因此，搭建了 NPBS 反射相移补偿系统，并将 2 个反射相移接近的 NPBS 按照图 4 的方式组合，来验证相移补偿方案的可行性<sup>[13]</sup>。相移补偿原理：第 1 个 NPBS 的 s 分量经过第 2 个 NPBS 时变成 p 分量，同理，第 2 个 NPBS 的 s 分量是第 1 个 NPBS 的 p 分量。因此，入射光经过 2 个 NPBS 后，s 分量、p 分量之间的相

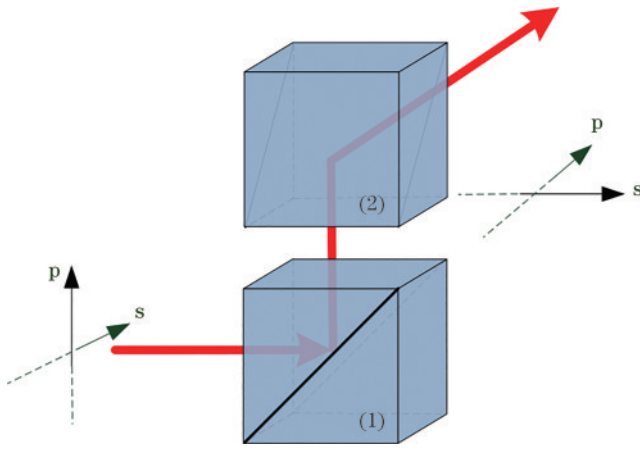


图 4 NPBS 反射相移补偿示意图

Fig. 4 Schematic diagram of compensation for NPBS reflection phase shift

位延迟相互抵消。

NPBS4 和 NPBS5 的反射相移分别为  $25.0643^\circ$ 、 $25.2185^\circ$ ，反射相移的差值为  $0.1542^\circ$ ，相移补偿后测得反射相移为  $0.1680^\circ$ ，实验结果表明：在误差允许的

范围内，上述方法可以实现相移补偿。然而，由于 2 个 NPBS 的尺寸较小，NPBS 的俯仰很难调整到最佳角度，导致 2 个 NPBS 的相移差值与补偿后整体的相移值相差  $0.0138^\circ$ ，但补偿后的相移仅为补偿前的  $0.67\%$ ，很好地验证了相移补偿方案的可行性。

### 3.3 NPBS 相移的温度特性研究

由于相移的大小与光学玻璃折射率、介质膜材料折射率以及介质膜材料厚度等因素有关，而光学玻璃折射率和介质膜材料折射率均随温度的变化而改变，所以相移也会受温度影响。因此，基于图 3 NPBS 相移测量的实验装置，将 NPBS 放入温箱盖两端开孔（圆孔直径为 3 mm）的温箱中探究透射相移、反射相移的温度特性。实验条件：10~80  $^\circ\text{C}$  梯度升温，温度间隔为  $5^\circ\text{C}$ ，10~35  $^\circ\text{C}$  升温过程每升温  $5^\circ\text{C}$  的时间为 3 min，在此温度下保温 10 min，35~80  $^\circ\text{C}$  升温过程中每升温  $5^\circ\text{C}$  的时间为 10 min，在此温度下保温 10 min。为了使 NPBS 实际温度与温箱温度一致，实验中选取保温时间段第 6 分钟的数据来计算相移。透射相移、反射相移的温度特性曲线结果如图 5 所示。

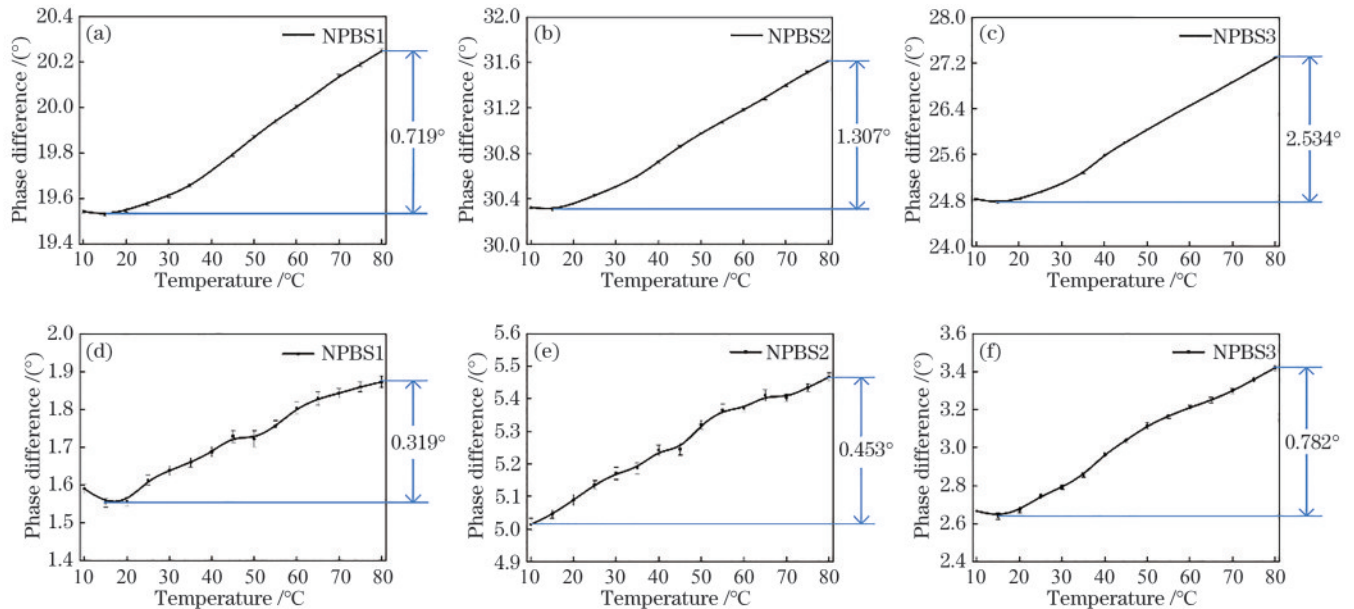


图 5 相移的温度特性曲线图。(a)NPBS1 反射相移；(b)NPBS2 反射相移；(c)NPBS3 反射相移；(d)NPBS1 透射相移；(e)NPBS2 透射相移；(f)NPBS3 透射相移

Fig. 5 Temperature characteristic curves of phase shift. (a) NPBS1 reflection phase shift; (b) NPBS2 reflection phase shift; (c) NPBS3 reflection phase shift; (d) NPBS1 transmission phase shift; (e) NPBS2 transmission phase shift; (f) NPBS3 transmission phase shift

由图 5 可知，温度在 10~80  $^\circ\text{C}$  之间变化，NPBS 的反射相移和透射相移也随之发生改变。3 个 NPBS 反射相移温度特性曲线的趋势接近一致，在 15  $^\circ\text{C}$  附近 NPBS 反射相移最小，当温度升高或降低时，NPBS 的反射相移都随温度的变化呈现上升趋势。升温过程中，NPBS1 的反射相移变化了  $0.719^\circ$ ，NPBS2 的反射相移变化了  $1.307^\circ$ ，NPBS3 的反射相移变化了  $2.534^\circ$ 。NPBS1 和 NPBS3 透射相移温度特性曲线的

趋势相似，10~15  $^\circ\text{C}$  透射相移随温度的升高而减小，15~80  $^\circ\text{C}$  透射相移随温度的升高而增大，在 15  $^\circ\text{C}$  附近 NPBS 透射相移最小。然而，NPBS2 的透射相移随温度的升高几乎一直增大，推测 NPBS2 透射相移温度特性曲线的拐点可能在 10  $^\circ\text{C}$  或 10  $^\circ\text{C}$  以下。10~80  $^\circ\text{C}$  升温过程中 NPBS1、NPBS2、NPBS3 的透射相移分别变化了  $0.319^\circ$ 、 $0.453^\circ$ 、 $0.782^\circ$ ，根据相移温度特性曲线中多组测量的结果分析可以看出系统具有较高的稳定

性。NPBS 相移的温度特性对光学仪器的实际测量灵敏度至关重要,探究 NPBS 相移的温度特性曲线有助于找到 NPBS 的最佳工作温度,保证光学测量系统在工作温度的稳定性,提高系统测量灵敏度。此外,根据相移随温度的变化可以找到在该温度下对应的响应系数,并对其进行温度补偿。

## 4 结 论

深入研究 NPBS 的相移及其温度特性,可以帮助校正 NPBS 在激光干涉仪、椭圆偏振仪等仪器中引入的非线性误差,探究相移的温度特性曲线,确定 NPBS 的最佳工作温度。针对此问题,设计并搭建了可以精确测量 NPBS 的附加相移且实现反射相移补偿的系统,利用此系统研究了温度对 NPBS 相移的影响。实验结果表明:测量的 5 个 NPBS 的透射相移在  $6^\circ$  以内,反射相移在  $31^\circ$  以内。将 2 个反射相移大小接近的 NPBS 组合后可以实现相移补偿,补偿后的相移量为  $0.1680^\circ$ ,仅为补偿前的  $0.67\%$ 。此外,相移量在  $15^\circ\text{C}$  附近存在拐点,当温度升高或降低时相移量均会增加。与偏振分析仪、光功率计等测量 NPBS 相移的系统相比,搭建的双 PD 平衡探测系统具备抗干扰能力强、探测精度高等优势。

## 参 考 文 献

- [1] 黄彤宇,孟若愚,赵千皓,等. 模块化全偏振显微镜[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1517002.  
Huang T Y, Meng R Y, Zhao Q H, et al. Modular full-polarization microscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1517002.
- [2] Shi J H, Wang Z P, Guan C Y, et al. Multi-wavelength metal-dielectric nonpolarizing beam splitters in the near-infrared range[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(3): 515-518.
- [3] 史金辉,朱正,王政平,等. 可见光波段金属介质膜消偏振分光镜的理论设计[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100303.  
Shi J H, Zhu Z, Wang Z P, et al. Theoretical design of a novel metal-dielectric non-polarizing beam splitter in the visible range[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100303.
- [4] Cui J N, He Z Q, Tan J B, et al. Realization of a robust homodyne quadrature laser interferometer by performing wave plate yawing to realize ultra-low error sensitivity[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 23505-23518.
- [5] 谈宜东,徐欣,张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504001.  
Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1504001.
- [6] Zhao C G, Tan J B, Liu T. Effect of asymmetrical transfer coefficients of a non-polarizing beam splitter on the nonlinear error of the polarization interferometer[J]. Optoelectronics Letters, 2010, 6(5): 371-375.
- [7] 王煜,陈洪芳. 基于连续小波变换的激光外差干涉非线性误差补偿[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2104006.  
Wang Y, Chen H F. Nonlinear error compensation of laser heterodyne interference based on continuous wavelet transform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2104006.
- [8] 康崇,王政平,黄宗军,等. 无偏振效应分束器反射相移对法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振态的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(12): 1857-1860.  
Kang C, Wang Z P, Huang Z J, et al. Influence of reflection-induced-retardance of non-polarizing beam splitter upon the polarization state of the output light of faraday mirror optical current transformer[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(12): 1857-1860.
- [9] 侯文玫,张运波,许琦欣. 分光镜对外差激光干涉仪非线性的影响[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 163-168.  
Hou W M, Zhang Y B, Xu Q X. Effect of beam splitter on nonlinearity in heterodyne interferometers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 163-168.
- [10] 邓元龙,李学金,耿优福,等. 非偏振分光镜对外差干涉仪非线性误差的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112008.  
Deng Y L, Li X J, Geng Y F, et al. Influence of nonpolarizing beam splitters on nonlinear error in heterodyne interferometers[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112008.
- [11] 王政平,张尚婷,郝蕴琦. NPBS 参量温度特性及其对 OCRCS 影响的理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(1): 98-101.  
Wang Z P, Zhang S T, Hao Y Q. Theoretical investigation on temperature features of NPBS parameters and their influences on OCRCS[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(1): 98-101.
- [12] 李立艳,吴冰,苑勇贵,等. 单频激光干涉仪非线性误差补偿方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0726003.  
Li L Y, Wu B, Yuan Y G, et al. Research on nonlinear error compensation method for single-frequency laser interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0726003.
- [13] Zhan Q W, Leger J R. Microellipsometer with radial symmetry[J]. Applied Optics, 2002, 41(22): 4630-4637.
- [14] 李之通,赵一鸣,李祚涵,等. Porro 棱镜相位延迟及其补偿波片的设计分析[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2101004.  
Li Z T, Zhao Y M, Li Z H, et al. Design and analysis of phase delay of Porro prism and compensation wave-plate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2101004.
- [15] 朱玲玲,曾爱军,李凡月,等. 与快轴方向无关的  $\lambda/8$  波片相位延迟量实时测量方法[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508002.  
Zhu L L, Zeng A J, Li F Y, et al. Real-time measurement method for retardation of eighth waveplate independent of fast axis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0508002.
- [16] 王政平,李庆波,谭巧,等. 测量  $\lambda/4$  波片实际相移量并判定快慢轴的方法[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 523-528.  
Wang Z P, Li Q B, Tan Q, et al. Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow

- axis of quarter-wave plate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 523-528.
- [17] Deng Y L, Li X J, Geng Y F, et al. Effect of nonpolarizing beam splitter on measurement error in heterodyne interferometric ellipsometers[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(8): 085204.
- [18] 张博, 严利平, 刁晓飞. 波片阵列对准误差对激光干涉非线性误差的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0904003. Zhang B, Yan L P, Diao X F. Effect of alignment error of wave plate array on nonlinear error of laser interference [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0904003.
- [19] 高晓丹. 变角度 3~5  $\mu\text{m}$  红外消偏振增透膜的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 033101. Gao X D. Design of infrared non-polarizing anti-reflective film of 3-5  $\mu\text{m}$  at variable incidence angle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 033101.
- [20] 王文梁, 郝宏刚. 近红外双波段消偏振分光膜的设计[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1131002. Wang W L, Hao H G. Designs of near infrared two-waveband non-polarizing beam splitter[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1131002.
- [21] 张鹏, 崔建军. 外差干涉仪非线性误差补偿抑制与测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1100003. Zhang P, Cui J J. Research progress in nonlinear error compensation suppression and measurement of heterodyne interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1100003.