

非偏振分光棱镜的偏振敏感度测量

孟晨^{1,2}, 高珊^{1,2}, 姚晓天^{1,2}, 崔省伟^{1,2**}, 郝鹏^{1,2*}¹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;²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(NPBS)的偏振相关性会对外差干涉仪、偏振干涉仪和激光干涉仪等干涉系统的非线性误差、偏振误差和测量精度等带来不可忽视的影响。首先对 NPBS 偏振敏感度的 4 个特征参数的测量原理进行介绍,接着基于 NPBS 偏振敏感度测量系统进行一系列实验并对实验结果进行分析。NPBS 的 s 光与 p 光分量的透射比和反射比基于圆偏振光入射并同步测量透/反射光中 s、p 偏振方向的强度来实现,以抑制光源抖动及光电探测器响应不一致性对测量结果的影响。在相位偏振敏感度测量方面,基于偏振测量系统对透/反射光的斯托克斯分量 S_2 、 S_3 进行测量,获得 NPBS 的 s 光与 p 光的透/反射相位差。3 个 NPBS 样品的重复性测试实验结果表明:上述非偏振分光棱镜的偏振敏感度测量方法对 NPBS 透射比和反射比的测量精度(最大偏差与测量平均值之比)为 $-0.08\% \sim +0.08\%$,重复性优于 0.1% ,对 NPBS 透射相位差和反射相位差的测量精度为 $-0.84\% \sim +0.84\%$,测量重复性优于 1% 。对 NPBS 样品在不同入射波长和入射角度下的偏振敏感度进行了测量,结果显示:在 $1540 \sim 1560$ nm 范围内,被测 NPBS 样品的透/反射比变化小于 0.02 ,s 光与 p 光的透/反射相位差随着波长增加而减小;随着入射角度从 -5° 增大到 $+5^\circ$,s 光与 p 光之间的透/反射相位差减小。NPBS 反射相位差的变化大于透射相位差的变化,对波长和入射角度的变化更敏感。

关键词 测量; 非偏振分光棱镜; 干涉仪系统; 偏振敏感度; 相位差

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220909

1 引言

非偏振分光棱镜(NPBS)是干涉仪中常用的光学器件,具有偏振态的分离度低、应力小、保偏能力强、成本低等显著优点,已被广泛应用于各种干涉仪中^[1-4]。理想情况下的 NPBS 保持出射光的偏振态与入射光一致,即 s 光、p 光分量的透反射比相同,相位差的变化量为 0° ,但实际的加工工艺会导致 NPBS 具有一定的双折射效应,使得出射光的偏振态发生变化。NPBS 引入的附加相移以及 s、p 分量之间的分光比误差会增大干涉仪系统的非正交相移误差^[5]。NPBS 偏振敏感度不仅会导致外差干涉仪产生非线性误差,还会影响椭圆偏振仪的测量精度^[6-7]。因此,NPBS 对干涉仪系统误差的影响不容忽视,需要精确测量其自身产生的 s 光、p 光分量的强度变化和相位差变化,以便在使用时能够采取相应的补偿方法消除 NPBS 对干涉系统造成的影响。

NPBS 透/反射率偏振敏感度一般采用起偏/检偏的方法进行测量^[8]。在测量过程中,如何消除光源抖

动、探测器偏振响应不一致性等影响因素是保证测量精度必须解决的问题。NPBS 透/反射相位差偏振敏感度的测量可以借鉴波片相位延迟测量方法,主要有迈克耳孙干涉法^[9]、弹光调制法^[10-13]、穆勒矩阵法^[14]、光强调制法和椭圆偏振法等^[15-17],但这些测量方法所使用的系统一般比较复杂,往往需要用到多个光学器件,有的还需要结合光谱仪(或调制器)和电路结构进行测量,且数据处理繁琐,操作不便。另外,如何消除光源抖动以及光路系统、PD 偏振响应不一致性对测量结果的影响,也是保证测量结果精度必须要考虑的主要问题。

本课题组提出了一种 NPBS 偏振敏感度测量技术,并搭建了一套测量 NPBS 偏振敏感度的实验系统,采用该系统对通过 NPBS 的 s、p 偏振光之间的透射比、反射比、透射相位差和反射相位差进行测量,并进行了不同波长和不同入射角度下的 NPBS 偏振敏感度测量实验。本文提出的 NPBS 偏振敏感度测试方法具有测量速度快、系统结构简单、数据处理方便、重复性高等优点,而且能够消除光源抖动、光路系统误差和

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-24; 录用日期: 2022-08-25; 网络首发日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(62105091)、河北省重点研发计划(19212109D)、河北省自然科学基金(F2020201041, F2021201013, F2021201016)、河北省创新能力提升计划(20542201D)、河北大学高层次人才科研启动项目(801260201243)

通信作者: *haopeng@hbu.edu.cn; **bugswwei@163.com

PD 响应度不一致性的影响,在评估 NPBS 对于干涉仪系统造成的误差以及选择高质量 NPBS 等方面具有重要意义。

2 测量原理

NPBS 的结构如图 1 所示。理想情况下,一束偏振光入射 NPBS 并经 NPBS 透/反射后,偏振态相比入射时不会发生变化,但由于实际加工工艺缺陷以及 NPBS 自身的影响,出射光的偏振态会发生变化。这种偏振态的改变体现在 s 光、p 光分量的强度变化和相位变化两个方面。NPBS 对 s 光、p 光分量的透/反射比以及透/反射相位差均不相同,这些都会影响干涉仪系统的非线性误差、偏振误差和测量精度等。强度变化可由透射后的 s 光与 p 光分量的透射率比值(透射比)以及反射后的 s 光与 p 光分量的反射率比值(反射比)表征,而相位变化可由透射后 s 光与 p 光分量的相位差的变化量(透射相位差)以及反射后 s 光与 p 光分量的相位差的变化量(反射相位差)表征。因此,本文采用 s 光与 p 光分量的透射比 η_T 、反射比 η_R 、透射相位差 τ_T 、反射相位差 τ_R 共同表征 NPBS 的偏振敏感度(下角标 T 和 R 分别表示透射和反射),即

$$\eta_T = \frac{\eta_{Ts}}{\eta_{Tp}} = \frac{I_{Ts}/I_{Is}}{I_{Tp}/I_{Ip}}, \quad \eta_R = \frac{\eta_{Rs}}{\eta_{Rp}} = \frac{I_{Rs}/I_{Is}}{I_{Rp}/I_{Ip}}, \quad (1)$$

$$\tau_T = \Delta\varphi_T - \Delta\varphi_1, \quad \tau_R = \Delta\varphi_R - \Delta\varphi_1,$$

式中: η_{Ts} 和 η_{Tp} 分别表示 NPBS 对 s 光和 p 光的透射率; η_{Rs} 和 η_{Rp} 分别表示 NPBS 对 s 光和 p 光的反射率; I_{Is} 和 I_{Ip} 分别表示入射 NPBS 的 s 光和 p 光的光强; I_{Ts} 和 I_{Tp} 分别表示经 NPBS 透射后的 s 光和 p 光的光强; I_{Rs} 和 I_{Rp} 分别表示经 NPBS 反射后的 s 光和 p 光的光强; $\Delta\varphi_1$ 表示入射 NPBS 时 s 光与 p 光之间的相位差; $\Delta\varphi_T$ 表示经 NPBS 透射后的 s 光与 p 光之间的相位差; $\Delta\varphi_R$ 表示经 NPBS 反射后的 s 光与 p 光之间的相位差。

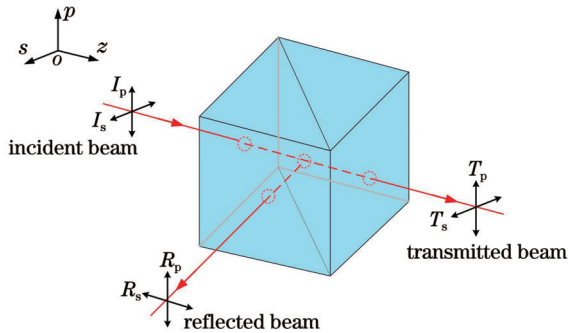


图 1 NPBS 结构原理图

Fig. 1 Schematic of NPBS structure

采用圆偏振光对 NPBS 的透/反射比偏振敏感度进行测量。圆偏振光的两个正交偏振分量的振幅大小相同,经过 NPBS 的透/反射光通过 PBS 偏振分光后进行强度测量。利用两个光电探测器(PD)同时进行

测量,得到 s 光、p 光光强对应的电压值,最后经过数据处理便可得到透/反射比偏振敏感度。然而,在实际测量光路中,光源抖动、光路系统误差以及两个光电探测器的响应不一致性均会影响 NPBS 透/反射比(η_{Ts}/η_{Tp} , η_{Rs}/η_{Rp})的测量结果。因此,在测量透/反射比之前需要对两个探测器进行归一化校正,以消除上述因素的影响。

在 NPBS 偏振相位敏感度测量方面,通常采用斯托克斯参量来计算透射相位差和反射相位差。如图 1 所示,设平面单色波沿 z 轴方向传输, p-o-s 是与 z 方向垂直的平面直角坐标系,则电场矢量 \mathbf{E} 在 p 分量和 s 分量上的轨迹方程可表示为

$$\begin{cases} E_p(t) = E_{op}(t) \cos(\omega t + \delta_p) \\ E_s(t) = E_{os}(t) \cos(\omega t + \delta_s) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $E_{op}(t)$ 和 $E_{os}(t)$ 分别表示电场矢量 \mathbf{E} 在 p 分量和 s 分量上的振动振幅; ω 表示瞬时角频率; δ_p 和 δ_s 分别表示 p 分量和 s 分量上的初始相位。则光波的电场分量的振幅和相位差与 4 个斯托克斯参量的关系^[18]为

$$\begin{cases} S_0 = \langle E_{op}^2 \rangle + \langle E_{os}^2 \rangle \\ S_1 = \langle E_{op}^2 \rangle - \langle E_{os}^2 \rangle \\ S_2 = 2 \langle E_{op} E_{os} \cos(\Delta\delta) \rangle \\ S_3 = 2 \langle E_{op} E_{os} \sin(\Delta\delta) \rangle \end{cases}, \quad (3)$$

式中: S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 为 4 个斯托克斯分量; $\langle \rangle$ 表示取平均运算; $\Delta\delta$ 表示两个正交偏振分量之间的相位差, $\Delta\delta = \delta_s - \delta_p$ 。

当一束 45° 线偏振光入射 NPBS 后,进入偏振测量系统的光的 4 个斯托克斯参量归一化后为: $S_0=1$, $S_1=0$, $S_2=1$, $S_3=0$ 。入射 NPBS 的光的 s 分量与 p 分量之间的相位差 $\Delta\varphi_1$ 、经 NPBS 透射后的 s 分量与 p 分量之间的相位差 $\Delta\varphi_T$ 、经 NPBS 反射后的 s 分量与 p 分量之间的相位差 $\Delta\varphi_R$ 分别为

$$\Delta\varphi_1 = \arctan\left(\frac{S_{13}}{S_{12}}\right), \quad \Delta\varphi_T = \arctan\left(\frac{S_{T3}}{S_{T2}}\right),$$

$$\Delta\varphi_R = \arctan\left(\frac{S_{R3}}{S_{R2}}\right), \quad (4)$$

式中: S_{12} 和 S_{13} 、 S_{T2} 和 S_{T3} 、 S_{R2} 和 S_{R3} 分别表示入射 NPBS、经 NPBS 透射和反射后的 S_2 、 S_3 斯托克斯参量。由式(4)可以看出,利用斯托克斯参量求解 s 分量、p 分量之间的相位差与二者的振幅大小无关。由式(1)可得透射相位差 τ_T 和反射相位差 τ_R 分别为

$$\tau_T = \Delta\varphi_T - \Delta\varphi_1, \quad \tau_R = \Delta\varphi_R - \Delta\varphi_1. \quad (5)$$

由式(5)可以看出,测量进入 NPBS 的入射光以及经 NPBS 透/反射的 s 分量与 p 分量之间的相位差,然后对相对差进行差分,就可得到 NPBS 透/反射偏振相位敏感度参量 τ_T 和 τ_R 。该方法能够消除光路中光源抖动误差和光路系统误差(s 光与 p 光之间相位差的误

差)带来的影响。

3 测量方案及实验结果

NPBS 的透射比和反射比测试系统如图 2(a) 所示。实验中使用的光源是 Yenista Optics 公司生产的高功率可调谐激光器, 型号为 T100S-HP/CL。该激光器的波长调节范围为 1500~1630 nm, 输出功率稳定性为 ±0.01 dB/h。起偏器(LPNIR050-MP2)、1/4 波片(ZERO-ORDER)和偏振分束器(PBS054)均为 Thorlabs 公司生产。激光器发出的光经光纤准直器出

射到起偏器后成为线偏振光, 接着通过 1/4 波片, 当波片快轴与起偏器透射轴夹角为 45° 时可得到一束圆偏振光。实验中通过转动 1/4 波片并观察两个 PD 探测输出的电压值是否相等来调整透射轴与快轴成 45°。形成的圆偏振光入射到 NPBS, 经 NPBS 透射或反射后再经过 PBS 分成两个正交偏振分量, 两个正交偏振分量分别进入两个光电探测器(PD_p和 PD_s, 型号均为 PDA20CS2), 两个光电探测器将接收的光强转换为电压值, 电压值被采集卡(DAQ, USB-1608GX)采集。

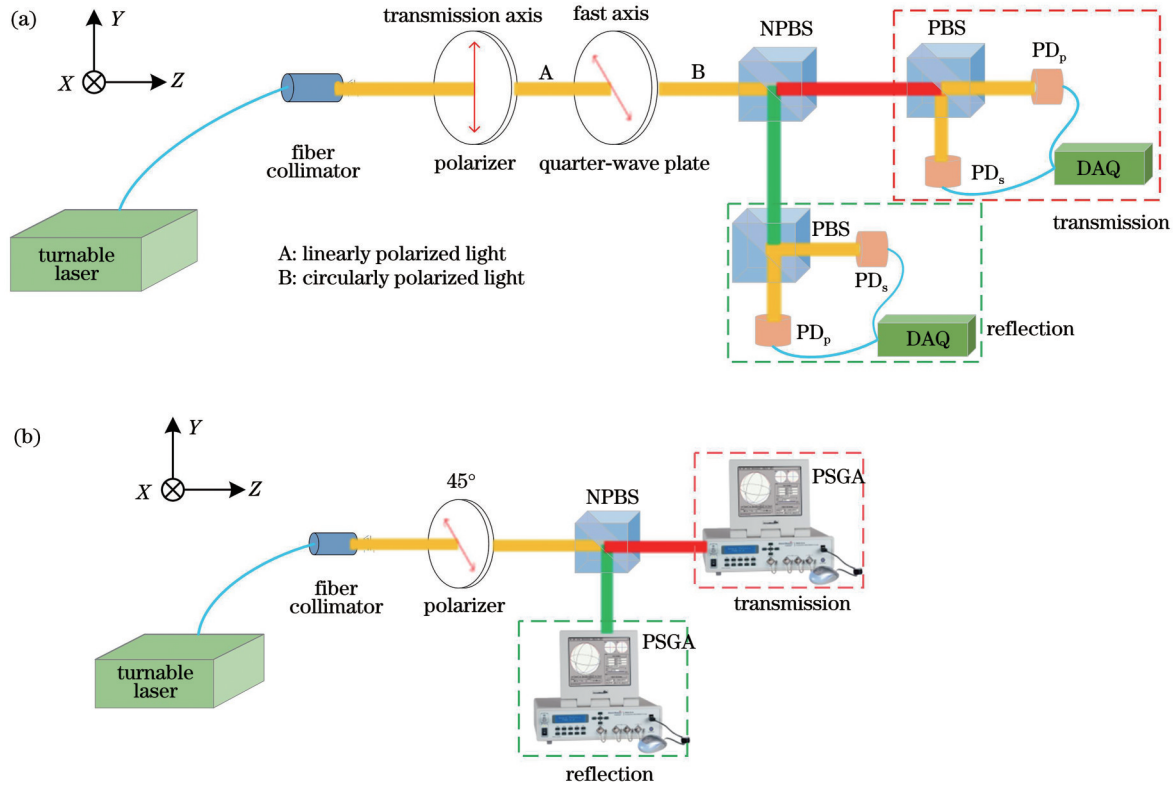


图 2 NPBS 偏振敏感度测量系统。(a)NPBS 透/反射比偏振敏感度测量系统;(b)NPBS 透/反射相位差偏振敏感度测量系统
 Fig. 2 NPBS polarization sensitivity measurement system. (a) NPBS transmittance/reflectance polarization sensitivity measurement system; (b) NPBS transmission/reflection phase difference polarization sensitivity measurement system

对于 NPBS 的透/反射比偏振敏感度测量系统来说, 会对测量结果产生影响的主要误差包括光源抖动、入射 NPBS 的光为非理想圆偏振光、PBS 对 p 光和 s 光的透/反射率不同等。当起偏器透射轴和 1/4 波片快轴的夹角与 45° 存在偏差, 以及 1/4 波片的相位延迟量与 90° 存在偏差时, 将导致入射至被测 NPBS 的光为非理想圆偏振光, 由此对 s 光和 p 光光强产生的误差系数分别为 σ_{Qs} 和 σ_{Qp} 。令 PBS 对 p 光、s 光的透射率和反射率分别为 T_p 和 R_s ($T_p \neq R_s$), 对 s 光和 p 光光强产生的误差系数分别为 σ_{Bs} (T_p, R_s) 和 σ_{Bp} (T_p, R_s), 则由琼斯矩阵推导可得

式中: I_{0s} 和 I_{0p} 表示测量系统中未放入 NPBS 时形成的理想圆偏振光经 PBS 出射后的 s 光和 p 光的光强, $I_{0s} = I_{0p} = \frac{1}{2} I_0$, I_0 表示入射光强。结合式 (6) 和式 (1) 可知光源的抖动能够通过两个垂直分量光强作比的方式抵消。

考虑到光电探测器的光电响应偏振敏感度以及起偏器和 PBS 的消光比、光电探测器暗电流以及电压信号处理电路引入的偏置量会对系统造成影响, 将光路中未加入 NPBS 时 s 光、p 光对应的两个光电探测器的输出电压 V_{0s} 、 V_{0p} , 以及加入 NPBS 后透/反射 s 光、p 光对应的两个光电探测器的输出电压 V_{Ts} 、 V_{Tp} 、 V_{Rs} 和 V_{Rp} 分别表示为

$$\begin{cases} I_{Is} = \sigma_{Qs} \sigma_{Bs} I_{0s}, I_{Ip} = \sigma_{Qp} \sigma_{Bp} I_{0p} \\ I_{Ts} = \sigma_{Qs} \sigma_{Bs} I_{0s} \eta_{Ts}, I_{Tp} = \sigma_{Qp} \sigma_{Bp} I_{0p} \eta_{Tp}, \\ I_{Rs} = \sigma_{Qs} \sigma_{Bs} I_{0s} \eta_{Rs}, I_{Rp} = \sigma_{Qs} \sigma_{Bs} I_{0p} \eta_{Rp} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} V_{0s} = \alpha I_{0s} + b_1 \\ V_{0p} = \beta I_{0p} + b_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} V_{Ts} = \alpha I_{0s} \eta_{Ts} + b_1 \\ V_{Tp} = \beta I_{0p} \eta_{Tp} + b_2' \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} V_{Rs} = \alpha I_{0s} \eta_{Rs} + b_1 \\ V_{Rp} = \beta I_{0p} \eta_{Rp} + b_2' \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\alpha = \sigma_{Qs} \sigma_{Bs} K_s$ ， K_s 表示 s 光对应的光电探测器 (PD_s) 采集的电压随光强变化的响应度； $\beta = \sigma_{Qp} \sigma_{Bp} K_p$ ， K_p 表示 p 光对应的光电探测器 (PD_p) 采集的电压值随光强变化的响应度； b_1 、 b_2 分别表示在 s 方向和 p 方向由起偏器和 PBS 的消光比、光电探测器暗电流以及电压信号处理电路引入的偏置量。由式(7)~(9)可以看出，由于上述误差的存在，在未放入 NPBS 时，两个光电探测器的输出电压不相等 ($V_{0s} \neq V_{0p}$)。因此，在对样品进行测量之前需要对两个光电探测器测量得到的电压值进行归一化处理 (归一化校正拟合曲线如图 3 所示)。归一化处理的具体实验步骤如下：光路中未加入 NPBS 时，测量光经过 1/4 波片后直接被 PBS 分成两束正交光，这两束正交光分别通过 PD_p 和 PD_s 进行光电转换，得到 p 光和 s 光的探测电压输出值。将激光器的光功率在 10~0.5 mW 范围内以 0.5 mW 的功率递减，每隔 60 s 改变一次光功率值，并在光电探测器采集的电压稳定后采集 30 s 的数据，取平均值，得到在该功率下两个光电探测器对应的电压值。分别对曲线进行线性拟合，结合式(7)~(9)得到两光电探测器归一化校正后的 V'_{0p} 的表达式为

$$V'_{0p} = \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) \cdot \left[V_{0p} - \left(\frac{b_2 - b_1}{\alpha - \beta} \cdot \beta + b_2 \right) \right] + \left(\frac{b_2 - b_1}{\alpha - \beta} \cdot \beta + b_2 \right) \quad (10)$$

式中： $\alpha = 0.53994$ ； $\beta = 0.55789$ ； $b_1 = 0.08439$ ； $b_2 = 0.08568$ 。此时 PD_s 测得的电压值 V_{0s} 与校正后的 PD_p 测得的电压值 V'_{0p} 相等，实现了光路中起偏器透射轴和 1/4 波片快轴的对轴误差、1/4 波片的相位延迟误差以及 PBS 的 p 光和 s 光透/反射率不同、光电探测器响应不一致性等误差的归一化处理，抑制了上述误差对测量结果的影响。校正后，NPBS 的 p 光和 s 光的透/反射比的测量误差将主要来源于系统 p 光和 s 光的归一化校正误差。随后，放入 NPBS，并用红光笔确保光从 NPBS 入射面中心入射，待两个光电探测器探测的电压值稳定后进行透射或反射光强的测量。最后，将透/反射后测得的 p 光的电压值 V_{Tp} 和 V_{Rp} 代入归一化校正公式得到 V'_{Tp} 和 V'_{Rp} ，再结合透/反射比的计算公式，得到 NPBS 的 p 光和 s 光的透/反射比为

$$\eta_T = \frac{\eta_{Ts}}{\eta_{Tp}} = \frac{V_{Ts} - b_1}{V'_{Tp} - b_1}, \quad \eta_R = \frac{\eta_{Rs}}{\eta_{Rp}} = \frac{V_{Rs} - b_1}{V'_{Rp} - b_1} \quad (11)$$

NPBS 的透射相位差和反射相位差测试系统如图 2(b) 所示。实验使用的是 General Photonics 公司生产的 PSGA-101-A 偏振测量系统，其对斯托克斯参量

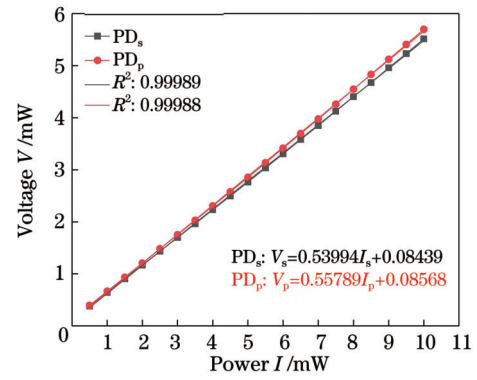


图 3 实验测量系统中 PD_s 和 PD_p 的归一化校正拟合曲线图
Fig. 3 PD_s and PD_p normalized calibration fitting curves in experimental measurement system

的测量精度为 $-0.5\% \sim +0.5\%$ 。使用的起偏器与透/反射比测量实验中使用的起偏器相同。激光器发出的光经光纤准直器出射后入射到起偏器 (起偏器的透射轴与 X 方向成 45° 夹角，以获得 45° 线偏振光)，再经过 NPBS 入射到偏振测量系统的偏振态分析器 (PSA) 入射端口。测量时，将 PSA 接口的光纤连接器 (FC) 接头取下，就可以使 PSA 入射端口获得的光强最大，从而可以进行空间光偏振特性的测量。偏振测量系统可以直接测量得到接收光的斯托克斯参量，再根据式(4)就可以获得入射、透射和反射时的相位差信息。在测量时，先不放入 NPBS，转动起偏器使其透射轴与 X 方向成 45° 夹角 [可通过观察偏振测量系统 (PSGA) 的 S_2 参数是否为 1 来确定起偏器的透射轴是否与 X 方向成 45° 角]，获得 45° 线偏振光，并记录此时的 S_2 和 S_3 值，再根据式(4)进行计算便可以得到 NPBS 入射的 s 光、p 光分量的相位差 $\Delta\varphi_1$ 。接着在起偏器和偏振测量系统之间放入 NPBS，用红光笔确保光从 NPBS 入射面中心入射，记录此时偏振测量系统测得的 S_2 和 S_3 参量，再由式(4)计算得到 s 光、p 光分量通过 NPBS 透/反射后产生的相位差 $\Delta\varphi_T$ 和 $\Delta\varphi_R$ 。最后将 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_T$ 和 $\Delta\varphi_R$ 代入式(5)，即可得到透射相位差 τ_T 和反射相位差 τ_R 。

接下来对 NPBS 偏振敏感度测量系统的测量准确性进行实验验证。首先进行透/反射比偏振敏感度测量准确度的实验验证。对未放入 NPBS 的空气空白进行 p 光、s 光透/反射比测量，验证系统的测量准确度。由理论分析可知，理想情况下未放入 NPBS 时，s 光、p 光的透射比为 1。对空气空白进行 10 次重复测量，透射比测量结果如图 4(a) 所示，其中实线为光电探测器归一化校正前的测量结果，虚线为校正后的测量结果。校正后测量结果的平均值为 1.0001，表明该系统对透/反射比偏振敏感度测量具有良好的准确性，误差为 0.01%。校正前，s 光、p 光分量透射比的 10 次测量均值为 1.0332，系统误差为 3.32%。这一结果佐证了光电探测器归一化对误差的校正效果。

接着进行透/反射相位差偏振敏感度测量准确度

的实验验证。光路中不放入 NPBS,对空气空白进行测量,并使用该系统对 Thorlabs 公司的 1/4 波片 (WPQ05ME-1550 nm) 进行测量,测量结果如图 4(b) 所示。图 4(b) 中的虚线表示未放入波片时空气空白的相位延迟,10 次测量结果为 $0.016^\circ \pm 0.006^\circ$,与理想值 0° 的偏差为 0.016° 。该偏差由测量系统中起偏器的偏振度和 PSGA 的测量误差引起,即 $\Delta\varphi_1=0.016^\circ$ 。加

入 1/4 波片后,对波片进行旋转,并观察 PSGA 中的 S_3 参数。当 $S_3=1$ 时,进行斯托克斯参量测量,然后将测得的斯托克斯参量代入式(4)和式(5),计算得到 1/4 波片相位延迟的相对值。重复上述操作 10 次的测量结果如图 4(b) 中的实线所示,10 次测量结果为 $89.91^\circ \pm 0.018^\circ$,与理论值 90° 的偏差为 0.09° 。这一偏差来源于被测器件 1/4 波片的加工误差。由此可见,上述测量实验系统能够对被测样品进行准确测量。

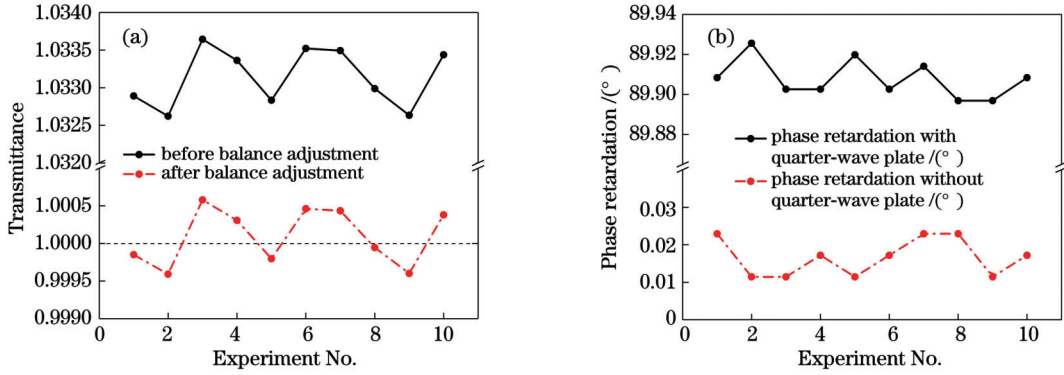


图 4 NPBS 偏振敏感度测量系统准确度验证实验。(a)NPBS 透/反射比偏振敏感度测量系统准确度验证实验测试结果;(b)NPBS 透/反射相位差偏振敏感度测量系统准确度验证实验测试结果

Fig. 4 Accuracy verification experiment of NPBS polarization sensitivity measurement system. (a) Test results of NPBS transmittance/reflectance polarization sensitivity measurement system accuracy verification experiment; (b) test results of NPBS transmission/reflection phase difference polarization sensitivity measurement system accuracy verification experiment

随后,利用上述实验系统对 3 个定制加工的宽带 NPBS(分光比为 50:50)进行测量实验,每个 NPBS 的透射比和反射比、透射相位差和反射相位差均重复测量 10 次。3 个 NPBS 样品的透/反射比和透/反射相位差的 10 次测试结果分别如图 5(a)和图 5(b)所示。由图 5(a)可以看出,3 个 NPBS 的 s 光与 p 光分量的透射比(由平均值 \pm 标准差的形式给出)分别为 0.9811 ± 0.0005 、 0.9761 ± 0.0006 、 0.9714 ± 0.0004 ,反射比分别为 1.0211 ± 0.0006 、 1.0239 ± 0.0004 、 1.0299 ± 0.0004 。可见,s 光与 p 光分量的透射比都略小于 1,而反射比

都略大于 1。3 个样品透/反射比的 10 次测量精度(用最大偏差与测量平均值的比值表示)为 $-0.08\% \sim +0.08\%$,测量重复性(用标准差和平均值的比值表示)优于 0.1% 。测量重复性是衡量测试方法稳定性的重要指标。由图 5(b)可以看出,3 个 NPBS 的透射相位差分别为 $2.33^\circ \pm 0.01^\circ$ 、 $2.03^\circ \pm 0.01^\circ$ 、 $2.12^\circ \pm 0.01^\circ$,反射相位差分别为 $20.16^\circ \pm 0.01^\circ$ 、 $22.18^\circ \pm 0.01^\circ$ 、 $21.32^\circ \pm 0.01^\circ$ 。3 个样品透/反射相位差的 10 次测量精度(用最大偏差与测量平均值的比值表示)为 $-0.84\% \sim +0.84\%$,测量重复性优于 1% 。由图 5(b)

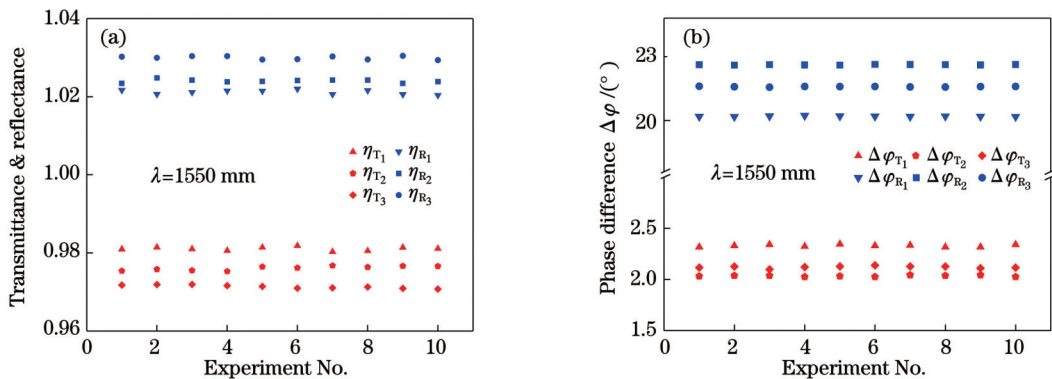


图 5 3 个 NPBS 样品透/反射比、透/反射相位差的 10 次重复测量结果。(a)透/反射比的 10 次重复测量结果;(b)透/反射相位差的 10 次重复测量结果

Fig. 5 Ten repeatable measurements of transmittance/reflectance and transmission/reflection phase difference of three NPBS samples. (a) Ten repeatable measurements of transmittance/reflectance; (b) ten repeatable measurements of transmission/reflection phase difference

可知反射相位差明显大于透射相位差。这是因为当光在两种具有不同折射率的各向同性均匀介质之间的界面(由光密介质射向光疏介质)上发生反射时,反射光中的s分量和p分量会产生相移,而相移的大小与入射介质材料的折射率、膜层介质材料的折射率以及膜层厚度有关^[19]。

此外,本课题组对NPBS在不同入射波长(1540~1560 nm)下的偏振敏感度进行了测试,以研究NPBS在不同波长下透/反射比和透/反射相位差的变化。实验过程中,每改变一次波长就对测试系统进行一次归

一化校正,以消除波长变化对测量系统的影响。实验结果如图6所示。由图6(a)可以看出:随着波长变化,透射比和反射比上下波动;在1540~1560 nm范围内,NPBS的透射比和反射比的变化都小于0.02。由图6(b)可以看出:在1540~1560 nm范围内,NPBS的s光与p光的透射相位差随着波长的增加而减小,从2.62°减小到了1.32°,透射相位差变化了1.30°;NPBS的s光与p光的反射相位差同样随着波长的增加而减小,反射相位变化了2.06°。反射相位差的变化大于透射相位差的变化,说明反射相位差对波长更为敏感。

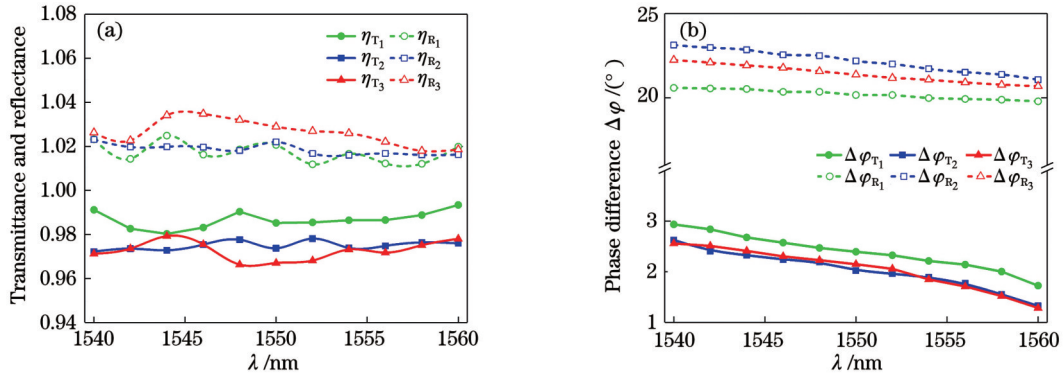


图6 不同入射波长下NPBS样品偏振敏感度测量实验结果。(a) NPBS透/反射比随入射波长的变化;(b) NPBS透/反射相位差随入射波长的变化

Fig. 6 Experimental results of polarization sensitivity measurement of NPBS samples at different incident wavelengths. (a) Variation of NPBS transmittance/reflectance with incident wavelength; (b) variation of NPBS transmission/reflection phase difference with incident wavelength

本课题组还对不同入射角度(偏摆角度为-5°~+5°)下的NPBS偏振敏感度进行了测试,以探究NPBS在不同入射角度情况下的透/反射比和透/反射相位差的变化,实验结果如图7所示。由图7(a)可以看出:随着入射角度从-5°增大到+5°,透射比和反射比上下波动,变化量小于0.025°。由图7(b)可以看出:随着入射角度从-5°增大到+5°,NPBS的s光与p光的透射相位差逐渐减小,透射相位差的变化为2.44°;

NPBS的s光与p光的反射相位差随着入射角度的增加而减小,反射相位差的变化为3.26°。反射相位差的变化大于透射相位差的变化,说明反射相位差对角度的变化更为敏感。造成这种变化的原因是当入射角度改变时,膜系消偏振的位置发生偏移,而产生消偏振位置偏移的原因是膜层相位厚度发生了改变,从而导致偏振敏感度发生变化。由此可知,在波长一定的情况下,通过改变入射角度可以对NPBS的透/反射相位差

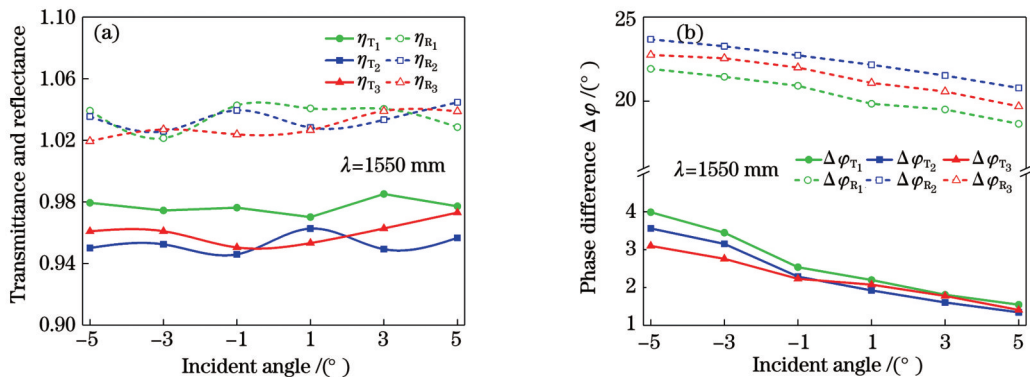


图7 不同入射角度下NPBS样品偏振敏感度测量实验结果。(a)NPBS透/反射比随入射角度的变化;(b)NPBS透/反射相位差随入射角度的变化

Fig. 7 Experimental results of polarization sensitivity measurement of NPBS samples at different incident angles. (a) Variation of NPBS transmittance/reflectance with incident angle; (b) variation of NPBS transmission/reflection phase difference with incident angle

进行一定优化。

4 结 论

针对 NPBS 的偏振敏感特性,本文提出了一种测量 NPBS 透/反射比和透/反射相位差的方法,用透射比、反射比、透射相位差和反射相位差共同表征偏振敏感。通过同步测量透/反射圆偏振光 s、p 偏振方向的强度来测量 NPBS 的 s 光分量与 p 光分量的透射比、反射比,并通过归一化校正消除了光源抖动、光路系统误差和光电探测器响应不一致性带来的误差。采用偏振测量系统测量透/反射光的斯托克斯分量 S_2 和 S_3 ,得出 NPBS 的透/反射相位差,然后用斯托克斯参量法计算相位差,消除了光强抖动带来的影响。实验结果表明,基于上述方法实现了 NPBS 的透/反射比测量精度为 $-0.08\% \sim +0.08\%$,重复性优于 0.1% ,NPBS 的透/反射相位差测量精度为 $-0.84\% \sim +0.84\%$,重复性优于 1% 。

所提 NPBS 偏振敏感特性测试方法具有结构简单、数据处理方便、重复性高等优点,而且能够消除光源抖动、光路系统误差和光电探测器响应不一致性的影响。NPBS 引入的附加相移和透/反射比对于干涉仪测量系统的非线性误差、偏振误差和测量精度等具有不可忽视的影响。所提测量方法在选择高质量 NPBS 以及分析 NPBS 对干涉仪系统造成的误差并对误差进行补偿等方面具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 于海娇,赵国罡.基于振动节点优化提高双频激光干涉仪的测量精度[J].激光与光电子学进展,2020,57(15):151202.
Yu H J, Zhao G G. Improving measurement accuracy of dual-frequency laser interferometer based on vibration node optimization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 151202.
- [4] Zhao S J, Wei H Y, Zhu M H, et al. Green laser interferometric metrology system with sub-nanometer periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2016, 55(11): 3006-3011.
- [5] 崔俊宁,李伟,边星元,等.面向大振幅、长周期振动校准的零差正交激光干涉测振方法[J].红外与激光工程,2021,50(6):20200329.
Cui J N, Li W, Bian X Y, et al. Homodyne quadrature laser interferometry measurement method for large amplitude, long cycle vibration calibration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 20200329.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Li K W, Zhang R, Jing N, et al. Fast and full range measurements of ellipsometric parameters using a 45° dual-drive symmetric photoelastic modulator[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5725-5733.
- [11] FitzGerald W R, Hore D K. Photoelastic modulator-based broadband mid-infrared stokes polarimeter[J]. Journal of Modern Optics, 2018, 65(1): 75-84.
- [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] 张瑞,陈媛媛,景宁,等.基于双弹光差频调制的中红外波片相位延迟高精度测量[J].光学学报,2019,39(3):0312002.
Zhang R, Chen Y Y, Jing N, et al. High-precision measurement of mid-infrared waveplate phase retardation based on dual photoelastic difference frequency modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0312002.
- [14] 黄书强,江秀美,冯元华.光谱编码型穆勒矩阵测量中的相位延迟量误差分析[J].激光与光电子学进展,2021,58(19):1926001.
Huang S Q, Jiang X M, Feng Y H. Analysis of phase error of retarders in spectrally encoded Mueller matrix measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1926001.
- [15] 张志勇,邓元勇,王东光,等.几种波片相位延迟测量方法的比较[J].光学精密工程,2007,15(11):1678-1685.
Zhang Z Y, Deng Y Y, Wang D G, et al. Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(11): 1678-1685.
- [16] 刘维新,魏志伟,赵文谦,等.光学波片相位延迟测量仪设计[J].红外与激光工程,2019,48(7):0718001.
Liu W X, Wei Z W, Zhao W Q, et al. Design of phase retardation measuring instrument for optical wave plate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 0718001.
- [17] 袁凯华,邓剑勋,刘超,等.一种快速同时测量波片相位延迟量和快轴方位角的方法[J].激光与光电子学进展,2018,55(2):021202.
Yuan K H, Deng J X, Liu C, et al. A fast and simultaneous method for measuring wave plate phase retardation and fast axis azimuth[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021202.
- [18] 郭忠义,康乾龙,彭志勇,等.基于超表面操控的偏振信息探测技术研究进展[J].红外与激光工程,2020,49(9):20201041.
Guo Z Y, Kang Q L, Peng Z Y, et al. Progress of polarization-information detection technology based on manipulations of metasurface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20201041.
- [19] 王政平,阮顺龄,孙伟民,等.单层介质膜反射棱镜式光学相位延迟器件研究[J].光子学报,1997,26(6):555-560.
Wang Z P, Ruan S L, Sun W M, et al. Reflecting prism-retarders with a single medium layer[J]. Acta Photonica Sinica, 1997, 26(6): 555-560.

Polarization Sensitivity Measurement Method for Non-Polarizing Beam Splitters

Meng Chen^{1,2}, Gao Shan^{1,2}, Yao X. Steve^{1,2}, Cui Shengwei^{1,2**}, Hao Peng^{1,2*}

¹Photonics Information Innovation Center, College of Physics and Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;

²Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China

Abstract

Objective A non-polarizing beam splitter (NPBS) is commonly used in interferometer systems. Ideally, the NPBS can ensure consistency between the polarization state of the outgoing light and that of the incident light. However, because of defects in the actual process, the birefringence effect of NPBS has a non-negligible impact on the nonlinear error, polarization error, and measurement accuracy of the interference system. Therefore, it is necessary to measure the polarization sensitivity of an NPBS to compensate for the birefringence error. At present, the general system structure used to measure polarization sensitivity is relatively complex, and some methods require a combination of spectrometers or modulators and additional circuitry for measurement, which is cumbersome with respect to data processing and inconvenient to operate. In this paper, we propose a different method to measure the polarization sensitivity of NPBS, which has the advantages of fast measurement speed, simple system structure, efficient data processing, high repeatability, and can eliminate the influence of light source jitter, optical path system error, and PD responsivity inconsistency. This method is significant for evaluating the NPBS error to provide high-quality NPBSs for use in interferometer systems.

Methods NPBS polarization sensitivity measurements include transmittance/reflectance measurement and transmission/reflection phase difference measurement. First, the measurement principles of the four characteristic parameters affecting the polarization sensitivity of NPBS are introduced. Regarding transmittance/reflectance measurements, circularly polarized light is incident to the NPBS, and the intensities of the s- and p-polarization directions in the transmitted/reflected light are measured synchronously. The voltage values corresponding to the light intensity of s light and p light are obtained by photodetector. The measurement results are then normalized to suppress the influence of light source jitter, optical path system error, and PD response inconsistency on the measurement results. Regarding the phase polarization sensitivity measurement, we use a polarization measurement system (PSGA) to measure the S_2 and S_3 Stokes components of the transmitted/reflected light. Using the Stokes parameter method to calculate the phase difference can eliminate the effect of light intensity jitter. The relative values of the transmission/reflection phase difference of the s light and p light of the NPBS are then obtained by the difference method to eliminate the influence of the optical path system error.

Results and Discussions The accuracy of the proposed NPBS polarization sensitivity measurement method was verified experimentally. In terms of the verification of the transmittance/reflectance polarization sensitivity measurement system, the blank transmittance in air without NPBS was measured, and the transmittance after normalization correction was 1.0001, indicating that the transmittance/reflectance polarization sensitivity measurement of the system has good accuracy (error of 0.01%). This is an improvement compared to the result before normalization correction (3.32%) and clearly demonstrates the error correction effect obtained by normalization correction (Fig. 4). To verify the transmission/reflection phase difference polarization sensitivity measurement system, the measurement system was used to measure the phase retardation of the quarter-wave plate, and the measurement result deviated by 0.09° from the theoretical value of 90° , indicating the high measurement accuracy of the measurement system (Fig. 4). The polarization sensitivities of three customized NPBS samples were measured ten times repeatedly using the proposed measurement method. The measurement accuracy of the NPBS transmittance/reflectance is $-0.08\% - +0.08\%$, and the repeatability is better than 0.1%. The measurement accuracy of the NPBS transmission/reflection phase difference is $-0.84\% - +0.84\%$, and the repeatability is better than 1% (Fig. 5). These results demonstrate that the proposed measurement method has the advantages of good measurement stability and high measurement accuracy. Furthermore, the polarization sensitivities of the NPBS samples were measured at different incident wavelengths and incident angles. Within the range of 1540 nm–1560 nm, the change in the transmittance/reflectance was less than 0.02, and the transmission/reflection phase difference between s light and p light decreased with increasing wavelength (Fig. 6). When the incident yaw angle changes from -5° to $+5^\circ$, the phase difference between s light and p light decreases (Fig. 7). The change in the NPBS reflection phase difference is larger than that in the NPBS transmission phase difference, indicating that the former is more sensitive to wavelength and angle changes.

Conclusions In this paper, a method for measuring the polarization sensitivity of NPBS is proposed. The transmittance and reflectance are measured by simultaneously measuring the intensities of the transmitted/reflected circularly polarized light in the s- and p-polarization directions. The light source jitter, optical path system error, and error caused by inconsistencies in the detector response are eliminated through normalization correction. By using a polarization measurement system to measure the S_2 and S_3

Stokes components of the transmitted/reflected light, the s light and p light transmission/reflection phase difference of the NPBS can be obtained. Based on the above method, the measurement accuracy for transmittance and reflectance is $-0.08\% - +0.08\%$ and the repeatability is better than 0.1% . The measurement accuracy of the transmission phase difference and reflection phase difference is $-0.84\% - +0.84\%$, and the repeatability is better than 1% . The proposed NPBS polarization sensitivity characteristic measurement method has the advantages of simple system structure, efficient data processing, high repeatability, and can eliminate the influence of light source jitter, optical path system error, and PD responsivity inconsistency. The method is significant for analyzing and compensating for the errors caused by an NPBS to obtain high-quality interferometer systems.

Key words measurement; non-polarization beam splitter; interferometer system; polarization sensitivity; phase difference