

双弹光级联的差频调制型应力双折射测量

李克武^{1,2*}, 王爽², 刘梓良², 王志斌^{2**}¹中北大学电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;²山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051

摘要 针对光学材料、光学元件的快速、高精度应力测试评估需求,提出了一种基于双弹光级联差频调制的应力双折射测量方案。应力双折射延迟量和快轴方位角信息被加载到差频弹光调制信号中,运用数字锁相技术同时提取弹光调制的差频信号和基频信号,进一步求解出应力双折射延迟量和快轴方位角。对该新方案的原理进行了分析,并搭建了实验系统,对系统初始偏移值进行了实验定标。采用 Soleil-Babinet 补偿器完成了测量精度和重复性测试,并完成了施加应力样品的应力双折射测试。实验结果表明,该系统的延迟量测量精度为 2.3%,延迟量测量重复性为 0.032 nm,双折射测量重复性为 0.17 nm/cm。此外,单数据点测量时间不超过 200 ms。

关键词 测量; 应用光学; 弹光调制; 应力双折射; 延迟量

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221495

1 引言

玻璃、光学晶体等光学材料在生长过程中因缺陷或物理化学变化会产生结构应力。退火冷却过程中因温度变化引起的不均匀塑性变形和体积变化会产生残余应力。元件加工过程中的切割、磨削和抛光,以及装夹持时的外力作用会产生机械应力:当应力较大时,容易引起材料和元件炸裂;当应力较小时,会造成折射率一致性变差,引起双折射,从而造成成像畸变和成像像散。光学材料、光学元器件的应力参数成为了评估光学系统的机械强度、热稳定性、成像质量和光束传输质量等的重要参数^[1-4]。国际标准(ISO10110-2)规定一般成像光学元器件的应力双折射应小于 20 nm/cm,偏振探测和干涉测量仪器中光学元件的应力双折射低至 2 nm/cm^[5]。对光学材料、光学元件进行应力测试分析,将应力控制在允许值范围内是高性能光学系统研制和生产的必要环节。

当光学材料、光学元件中存在应力时,最显著的光学效应是双折射现象。入射光沿两个应力主轴方向分解为振动方向互相垂直、传播速度不同的寻常光和非寻常光,出射光产生一个延迟量。单位厚度上的延迟量称为应力双折射^[6]。延迟量和应力双折射能够直接用来表征光学材料的应力情况。国内外开展了大量应力双折射测量研究。应力双折射测量方法主要有偏光干涉、偏振补偿、激光回馈和偏振调制等。偏光干涉法

检测光源依次通过起偏器、样品和检偏器发生干涉,通过观察偏振光干涉色序来获取应力大小和分布^[7]。偏振补偿法主要基于 Senarmont 补偿原理,在偏光干涉的基础上在样品和检偏器之间插入一个 1/4 波片,通过旋转波片或检偏器观测偏振角度来实现应力双折射测量^[8]。偏光干涉和偏振补偿测量方法具有仪器结构简单、测量孔径大等优势,实现了很好的商业化。然而,通过色序或机械旋转检偏器、波片的应力测量无法满足高精度应力测量需求。激光回馈法将待测样品加入激光回馈腔中,通过压电陶瓷驱动反射镜扫描回馈腔长,利用样品双折射引起的偏振跳变实现高精度测量^[9],但该方法的重复性取决于光强的稳定性,会受到环境温度和振动等干扰。近年来,随着微纳加工技术的发展,微米级偏振片被加工在成像探测器像元上。Sony 公司率先开发出阵列 CMOS 偏振成像探测器,该探测器被应用于应力双折射测量研究中^[10],实现了快速、大孔径的应力测量,但该类偏振成像探测器仅能够实现 0°、45°、90° 和 135° 4 个方向的线偏振光探测,进而限制了应力双折射的测量范围和精度。

弹光调制技术具有高调制频率、大通光孔径、高调制纯度和工作稳定等应用优势^[11-12],联合磁光调制、电光调制或多个弹光调制组合已经获得了多种偏振调制应力双折射测量方法。李春艳等^[13]提出了一种基于磁光调制和弹光调制组合的双调制法的玻璃内应力大小和方向测量方法,实现的双折射测量重复性为

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-08-16; 录用日期: 2022-08-31; 网络首发日期: 2022-09-10

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2013DFR10150)、国家自然科学基金(61505180)

通信作者: *kewuli@nuc.edu.cn; **wangzhibin@nuc.edu.cn

0.3 nm/cm, 单次测量时间为 15 s。李克武等^[6]将弹光调制和电光调制联合实现了双折射延迟量重复性为 1.2×10^{-3} rad (约 0.12 nm@633 nm), 单次测量时间降到了 1 s。Wang 等^[14]采用单个弹光调制和双探测器探测方法同时实现了双折射延迟量和快轴方向测量, 并成功被商业化, 开发的弹光调制型应力双折射测量系统 Exicor 150AT 是目前测量重复性最高的测量仪器。每 0.5 s 一个数据点的常规测量速度下, 测量结果的重复性高达 ± 0.01 nm, 快轴方位角重复性高达 $\pm 0.1^\circ$ 。然而, 这些测量方法均需要配置至少两个锁相放大器, 测量操作复杂, 成本昂贵, 且测量精度受到两个探测器和两个锁相放大器的响应一致性制约。

因此, 本文利用弹光调制技术的优势, 开展双弹光调制级联的差频调制及其应力双折射测量应用研究。

运用数字锁相技术在同一个现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 中同时完成弹光调制器 (PEM) 的工作控制和测量数据处理, 实现多个调制信号频率成分测量, 完成高精度应力双折射测量。

2 原理

当存在结构应力、残余应力或机械应力时, 光学材料、光学元件在应力作用下最显著的光学效应是双折射。如图 1 所示, 偏振光入射并沿两个应力主轴方向分解为振动方向互相垂直、传播速度不同的寻常光和非寻常光, 出射后会产生一个光程差。该光程差也被称为应力延迟量, 可描述为 $R = Cd(\sigma_1 - \sigma_2)$, 其中 C 为材料的应力光学系数, d 为材料厚度, σ_1 和 σ_2 为两个方向相互垂直的主应力。

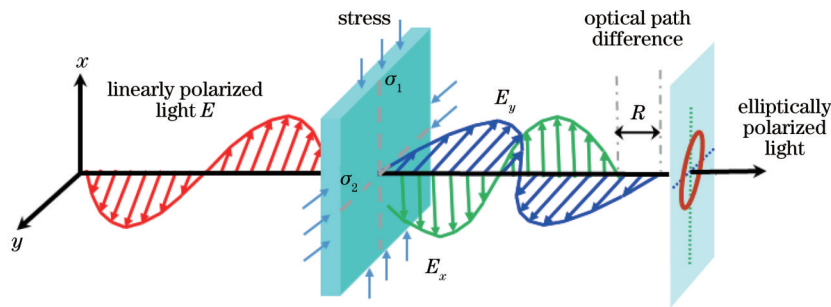


图 1 应力双折射原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stress birefringence principle

通常将单位厚度上的延迟量定义为应力双折射^[6,15], 可表述为

$$\Delta n = \frac{R}{d} = C(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

由式(1)可知, 当光学材料和元件的材料种类和厚度确定时, 应力延迟量和双折射仅与受到的应力大小有关。因此, 应力延迟量和双折射能够直接用来表征光学材料和元件受到的应力情况, 其中受到较小主应力的方向为快轴方向。偏振光入射到受到应力的光学元件上时, 偏振态会发生变化。采用偏光干涉、偏振补偿、激

光回馈和偏振调制等测量方法能够实现引起偏振态变化的相位差, 从而能够进一步测量出应力延迟量和双折射。

相较其他方法, 弹光调制技术具有调制频率高、调制效率高、抗震性能好、工作稳定等应用优势, 结合数字锁相数据处理技术在偏振调制及其应用方面展现出了巨大的潜力^[11-12, 16-17]。本文利用双弹光级联构建差频调制测量方法实现应力双折射和快轴方位角同时测量, 测量方案的基本原理如图 2 所示。

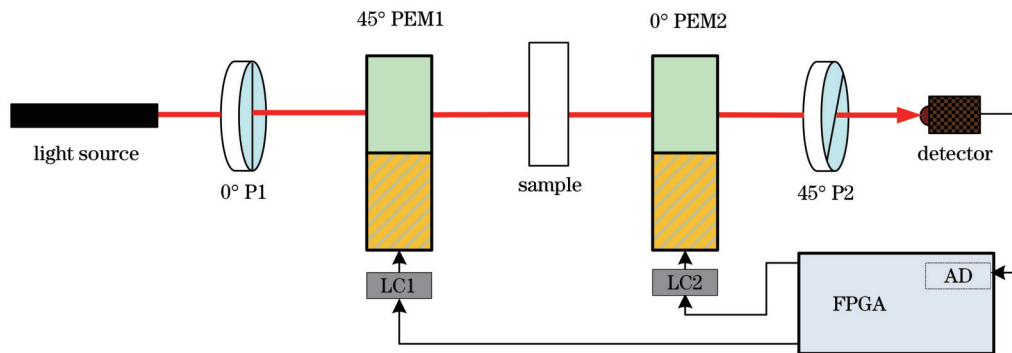


图 2 应力双折射测量系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of stress birefringence measurement system

如图 2 所示,检测光源依次经过起偏器(P1)、弹光调制器 1(PEM1)、待测样品、弹光调制器 2(PEM2),再经过检偏器(P2)出射并被探测器探测到,其中 LC 为电感电容谐振电路,AD 为模数转换电路。起偏器的透光轴方向、弹光调制器的调制快轴方向和检偏器的透光轴方向依次设置相差 45°。PEM1 和 PEM2 级联工作,且它们的谐振频率不同,构成差频调制测量系统。光信号采用 Stokes 矢量描述,经过偏振器、弹光调制器和样品的偏振传输特性采用 Muller 矩阵描述^[18-19]。检测光信号经整个检测系统到达探测器的过程采用 Stokes 矢量和 Muller 矩阵描述为

$$S_{out} = M_{P2} M_{PEM2} M_{sample} M_{PEM1} M_{P1} S_{in}, \quad (2)$$

式中: S_{out} 、 S_{in} 分别代表出射光和入射光的 Stokes 矢量,入射光 Stokes 矢量通常表示为 $S_{in} = I_0 [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$,其中 I_0 入射总光强; M_{P1} 和 M_{P2} 分别表示起偏器和检偏器的 Muller 矩阵; M_{PEM1} 和 M_{PEM2} 分别表示 PEM1 和 PEM2 的 Muller 矩阵; M_{sample} 表示样品的 Muller 矩阵。根据图 2 中偏振器透光轴方向和弹光调制器快轴方位角的设置,可以将它们的 Muller 矩阵表示为

$$\begin{cases} M_{P1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ M_{P2} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} M_{PEM1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_1 & 0 & -\sin \delta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \delta_1 & 0 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \\ M_{PEM2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_2 & \sin \delta_2 \\ 0 & 0 & -\sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: δ_1 和 δ_2 是 PEM1 和 PEM2 的相位调制,分别可表示为 $\delta_1 = \delta_{10} \sin \omega_1 t$ 和 $\delta_2 = \delta_{20} \sin \omega_2 t$,其中 ω_1 和 ω_2 分别表示两个弹光调制器的频率($\omega_1 \neq \omega_2$), δ_{10} 和 δ_{20} 分别表示两个弹光调制器的相位调制幅值。

样品中应力双折射会使检测光产生延迟量,如图 1 所示,对应的相位延迟为 $X = 2\pi R/\lambda$,其中 λ 为波长。因此,样品应力双折射的偏振传输特性可以用 Muller 矩阵^[18,20]描述为

$$M_{sample} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\rho) + \sin^2(2\rho) \cdot \cos X & \sin(4\rho) \cdot \sin^2(X/2) & -\sin(2\rho) \sin X \\ 0 & \sin(4\rho) \cdot \sin^2(X/2) & \sin^2(2\rho) + \cos^2(2\rho) \cdot \cos X & \cos(2\rho) \sin X \\ 0 & \sin(2\rho) \sin X & -\cos(2\rho) \sin X & \cos X \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: ρ 表示应力双折射的快轴方位角。将式(4)和式(5)表述的偏振器、弹光调制器和样品的 Muller 矩阵,连同入射光的 Stokes 矢量代入式(2)中,并考虑探测器能够探测到的光强为 Stokes 矢量的第一个分量,求解获得探测器输出的检测光强为

$$I = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \sin(4\rho) \sin^2(X/2) + \sin \delta_1 \sin \delta_2 \cos X + \cos \delta_1 \sin \delta_2 \cos(2\rho) \sin X + \sin \delta_1 \cos \delta_2 \sin(2\rho) \sin X \right], \quad (6)$$

式中:两个弹光调制器调制项 $\sin \delta_i = \sin(\delta_{i0} \sin \omega_i t)$ 和 $\cos \delta_i = \cos(\delta_{i0} \sin \omega_i t)$ 可以采用第一类贝塞尔函数展开成 $\sin \delta_i = 2 \sum_{2k-1} J_{2k-1}(\delta_{i0}) \sin[(2k-1)\omega_i t]$ 和 $\cos \delta_i = J_0(\delta_{i0}) + \sum_{2k} 2J_{2k}(\delta_{i0}) \cos(2k\omega_i t)$,其中 $k=1, 2, \dots$ 为正整数, J_0 、 J_{2k-1} 和 J_{2k} 分别代表第 0 阶、第 $2k-1$ 阶和第 $2k$ 阶贝塞尔级数,PEM1 和 PEM2 分别对应 $i=1$ 和 $i=2$ 。取低阶贝塞尔级数,式(6)可改写为

$$I = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 + [J_0(\delta_{10}) + 2J_2(\delta_{10}) \cos(2\omega_1 t)] \cdot [J_0(\delta_{20}) + 2J_2(\delta_{20}) \cos(2\omega_2 t)] \sin(4\rho) \sin^2(X/2) + 4J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos X + [J_0(\delta_{10}) + 2J_2(\delta_{10}) \cos(2\omega_1 t)] \cdot [2J_1(\delta_{20}) \sin(\omega_2 t)] \cdot \cos(2\rho) \sin X + [J_0(\delta_{20}) + 2J_2(\delta_{20}) \cos(2\omega_2 t)] \cdot [2J_1(\delta_{10}) \sin(\omega_1 t)] \sin(2\rho) \sin X \right\}, \quad (7)$$

由式(7)分析可知:样品应力双折射的相关项 $\sin(4\rho) \sin^2(X/2)$ 包含在 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 、 $2\omega_1 + 2\omega_2$ 和 $2\omega_2 - 2\omega_1$ 等频率信号中;相关项 $\cos X$ 包含在 $\omega_1 + \omega_2$ 和

$\omega_2 - \omega_1$ 等频率信号中;相关项 $\cos(2\rho) \sin X$ 包含在 ω_2 、 $2\omega_1 + \omega_2$ 和 $2\omega_1 - \omega_2$ 等频率信号中;相关项 $\sin(2\rho) \sin X$ 包含在 ω_1 、 $2\omega_2 + \omega_1$ 和 $2\omega_2 - \omega_1$ 等频率

信号中。

在本测量系统中,采用 FPGA 产生弹光调制器的驱动方波源信号,然后通过 LC 谐振电路将信号放大来驱动弹光调制器工作^[21]。同时,通过 FPGA 控制 AD 的采样频率,将 AD 转换后的检测光强数字信号序列输入 FPGA 中,采用数字锁相数据处理同时获取两个弹光调制器的基频信号幅值(V_{ω_1} 、 V_{ω_2})和差频信号幅值 $V_{\omega_2-\omega_1}$ ^[16-17],相应计算公式为

$$\begin{cases} V_{\omega_1} = I_0 J_0(\delta_{20}) J_1(\delta_{20}) \sin(2\rho) \sin X \\ V_{\omega_2} = I_0 J_0(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \cos(2\rho) \sin X, \\ V_{\omega_2-\omega_1} = I_0 J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \cos X \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)获得不同频率信号的幅值,定义两个比值 r_I 和 r_{II} 为

$$\begin{cases} r_I = \frac{V_{\omega_1} J_1(\delta_{20})}{V_{\omega_2-\omega_1} J_0(\delta_{20})} = \sin(2\rho) \tan X \\ r_{II} = \frac{V_{\omega_2} J_1(\delta_{10})}{V_{\omega_2-\omega_1} J_0(\delta_{10})} = \cos(2\rho) \tan X \end{cases}, \quad (9)$$

利用上述比值能够同时求解出待测样品的相位延迟量 X 与快轴方位角 ρ ,即

$$\begin{cases} X = \arctan \sqrt{r_I^2 + r_{II}^2} \\ \rho = \frac{1}{2} \arctan \frac{r_I}{r_{II}} \end{cases}, \quad (10)$$

通过两个弹光调制器差频调制同时完成基频信号幅值(V_{ω_1} 和 V_{ω_2})和差频信号幅值 $V_{\omega_2-\omega_1}$ 的提取,能够有效消除光强波动的影响,同时实现应力双折射相位延迟

量和快轴方位角的测量。基于式(1),根据检测光源波长 λ 和样品厚度 d ,能够进一步求解获得应力延迟量 $R = X\lambda/(2\pi)$ 和双折射 $\Delta n = \lambda X/(2\pi d)$ 。

3 实验分析

按照原理图图2搭建了实验系统,如图3所示。检测光源选用杭州新势力光电技术有限公司生产的氦氖激光器 NewOpto-633-2-P,波长为 632.8 nm,光功率为 2 mW。起偏器和检偏器选用福州美扬光电有限公司生产的格兰-泰勒偏振棱镜,消光比优于 $10^5:1$ 。探测器选用 Thorlabs 公司生产的硅光电探测器 (PDA10A),响应波长范围为 200~1100 nm,带宽为 150 MHz,响应度为 0.44 A/W。两个弹光调制器均为本团队自行研制的八角对称状结构弹光调制器,通光晶体选用熔融石英,压电驱动器为压电石英晶体。PEM1 和 PEM2 的熔融石英尺寸分别为 54.2 mm×54.2 mm×16 mm 和 48 mm×48 mm×16 mm,谐振频率分别为 50.286 kHz 和 56.056 kHz。

弹光调制器驱动控制及数据处理电路以 Altera EPC IV FPGA 芯片为核心加工制作。两个弹光调制器驱动信号源采用 FPGA 的 DDS 模块提供驱动方波信号,经 LC 谐振电路放大后驱动弹光调制器工作。调制光信号经光电探测器探测转换,采用 12 位高精度 ADC 采集并输入 FPGA 数字锁相数据处理模块中^[16-17],同时完成基频信号幅值(V_{ω_1} 和 V_{ω_2})和差频信号幅值 $V_{\omega_2-\omega_1}$ 信号的数据处理。

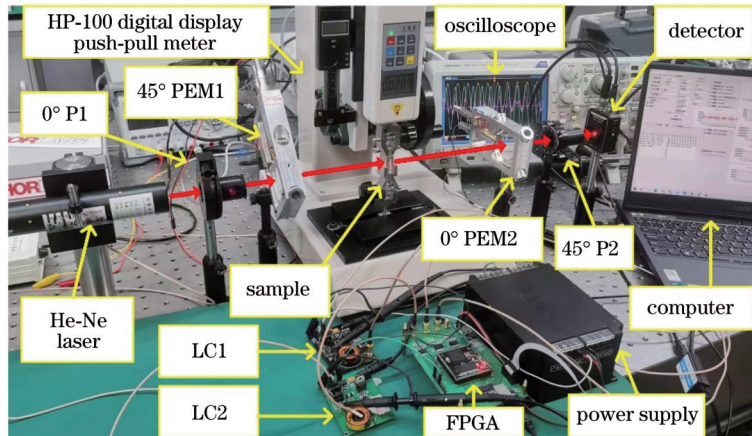


图3 实验系统

Fig. 3 Experimental setup

3.1 弹光调制器相位调制幅值设置及系统初始偏移值定标

弹光调制器是一类谐振光机电器件。对于加工制作好的弹光调制器,其相位调制幅值与驱动电压峰峰值成正比,相位调制幅值可通过驱动电压进行精确调节。由式(7)~(9)的理论分析可知,为了实现调制信号中数据处理的频率成分占主要成分,使基频信号幅

值(V_{ω_1} 和 V_{ω_2})和差频信号幅值 $V_{\omega_2-\omega_1}$ 较大,获得较好的信号信噪比,需合理设置弹光调制器相位调制幅值使第0阶和第1阶贝塞尔级数 J_0 和 J_1 取极大值。数值计算贝塞尔级数随弹光调制器相位调制幅值的变化规律,如图4所示。

由图4可知,当将两个弹光调制器的相位调制幅值 δ_{10} 和 δ_{20} 设置在 1.435 rad 附近时,式(8)中 $J_0 J_1$ 、 $J_1 J_1$

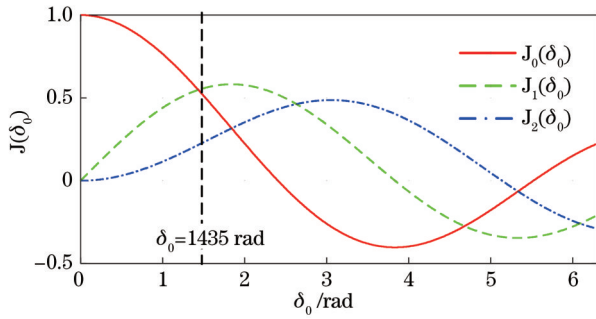


图 4 贝塞尔级数
Fig. 4 Bessel series

取极大值。在本文中,将两个弹光调制器的驱动电压 (V_{PEM1} 和 V_{PEM2}) 峰峰值分别设置为 195.6 V 和 188.4 V,使其相位调制幅值达到 1.435 rad。当不放置任何样品时,通过示波器 (Tektronix DPO3054) 观测驱动电压信号,探测器探测到的调制光强信号如图 5 所示。

由图 5 能够看出,光强信号受两个弹光调制器调

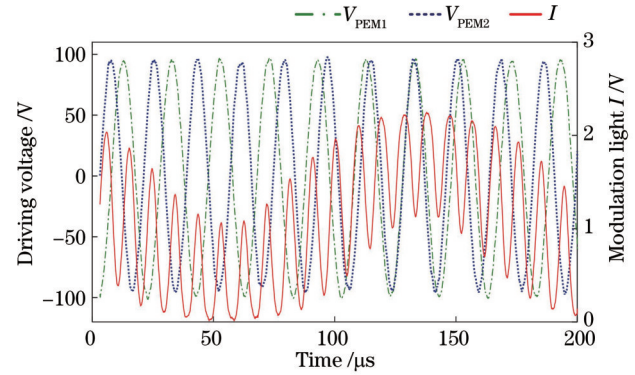


图 5 驱动电压信号和调制光信号

Fig. 5 Signals of driving voltage and modulation light

制,调制光强信号不仅包含两个弹光调制和频的高频成分,还包含差频的低频成分。将图 5 中的调制信号进行数字锁相数据处理,且将数字锁相周期设置为差频信号 $\omega_2 - \omega_1 = 5.77$ kHz 的 1155 个周期,每间隔 200 ms 测量一个数据点,提取的基频信号幅值 (V_{ω_1} 和 V_{ω_2}) 和差频信号幅值 $V_{\omega_2 - \omega_1}$ 如图 6 所示。

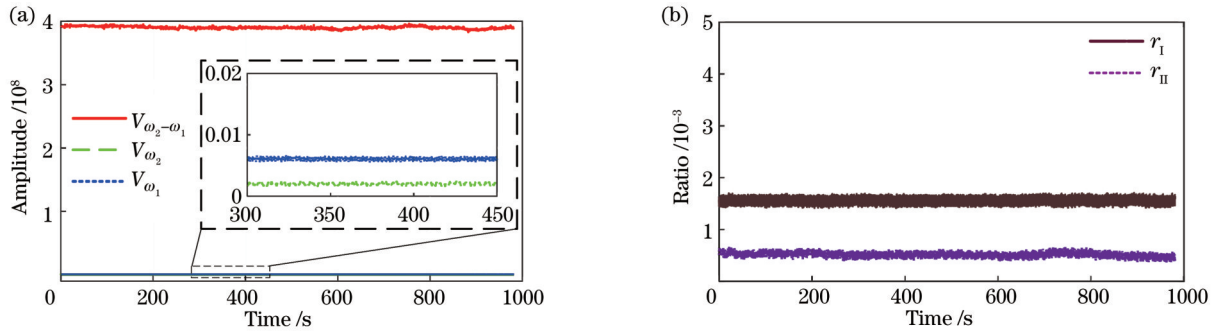


图 6 调制光信号数字锁相结果。(a) 倍频信号幅值;(b) 倍频信号比值

Fig. 6 Digital phase lock results of modulation light signals. (a) Amplitude of frequency multiplication terms; (b) ratio of frequency multiplication terms

当不放置任何样品时,数字锁相获取的差频信号幅值 $V_{\omega_2 - \omega_1}$ ($\bar{V}_{\omega_2 - \omega_1} = 3.886 \times 10^8$) 远大于两个弹光调制的基频信号幅值 V_{ω_1} ($\bar{V}_{\omega_1} = 1.754 \times 10^5$) 和 V_{ω_2} ($\bar{V}_{\omega_2} = 6.166 \times 10^5$),并且计算获得的两个基频信号与差频信号的比值较小 ($\bar{r}_I = 0.451 \times 10^{-3}$ 和 $\bar{r}_{II} = 1.587 \times 10^{-3}$)。上述情况主要是由两个弹光调制器的自身存在微小剩余双折射造成的。实际上,无样品时两个比值应趋近于 0,本文优选弹光调制器搭建的测试系统在无样品时基频信号与差频信号的比值较小 (不超过 10^{-3} 量级)。为了能够实现高精度的双折射测量,将上述两个非零比值视为系统初始偏移值,实际测量时获得的信号比值都需要减去系统初始偏移值,以尽可能减小或消除系统测量误差。

3.2 测量精度和重复性测试

为了确定所提方案的测量精度和重复性,在实验室环境下,选用 Soleil-Babinet 补偿器 (Thorlabs, SBC-VIS) 作为标准样品进行测试。Soleil-Babinet 补偿器

是一种连续可变的零级延迟器。补偿器由一块石英双折射长光楔和一块固定安装在补偿片上的石英光楔组成,通过精密千分尺调节双折射长光楔相对于固定光楔的位移,实现补偿器的延迟量调节,其延迟量^[22]可以表示为

$$R_{\text{SBC}} = \frac{x_i}{x_{\text{cal}}} \lambda_0, \quad (11)$$

式中: x_i 和 x_{cal} 分别为光楔的调节位移和全波延迟量定标位移; λ_0 为定标波长。在图 2 样品位置插入 Soleil-Babinet 补偿器。首先,采用消光法定标全波延迟量位移,两个弹光调制器不工作,检偏器旋转至 90° 与起偏器相互垂直,且调节 Soleil-Babinet 补偿器的快轴与起偏器成 45° 角,调节补偿器光楔位移,通过两次消光位置的位移差定标获得补偿器的全波延迟量定标位移为 $x_{\text{cal}} = 17.174$ mm。然后,采用系统测试补偿器不同延迟量的情况。如图 2 所示,测试实验中 Soleil-Babinet 补偿器的快轴旋转至 22.5° ,两个弹光调制器

的相位调制幅值设置在 1.435 rad, 正常驱动工作。从 0 开始, 以约 0.02 mm 为间隔调节补偿器光楔位移, 数

字锁相获得的信号幅值如图 7 所示, 其中 ρ_{SBC} 为 Soleil-Babinet 补偿器的快轴方位角。

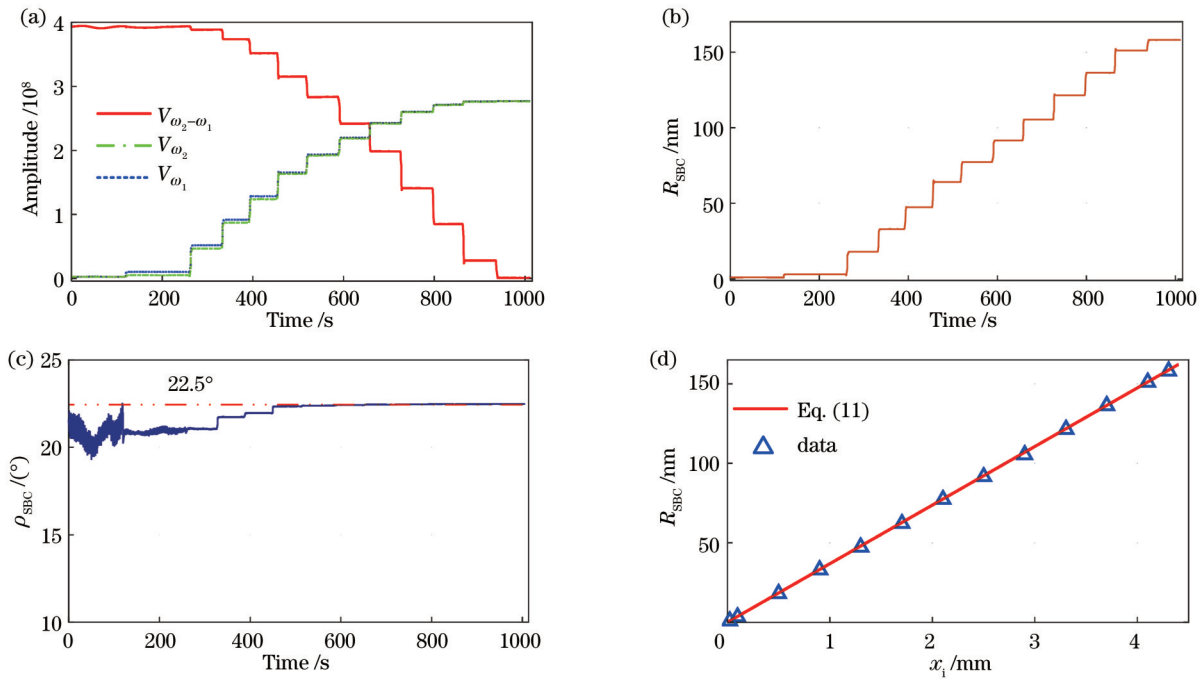


图 7 Soleil-Babinet 补偿器实验。(a) 倍频信号幅值; (b) 延迟量; (c) 快轴方位角; (d) 延迟量与调节位移关系

Fig. 7 Soleil-Babinet compensator experiment. (a) Amplitude of frequency multiplication terms; (b) retardation; (c) azimuth angle of fast axis; (d) relationship between retardation and adjustment displacement

从图 7(a) 可以看出, 随着调节位移的增加, 延迟量增大, 差频信号逐渐减小, 基频信号逐渐增大。将数字锁相获得的信号幅值连同贝塞尔级数代入式(9)和式(10)中, 进一步求解获得补偿器延迟量和快轴方位

角, 如图 7(b) 和图 7(c) 所示。每个位移下延迟量定标值和所设计系统测量延迟量的平均值如图 7(d) 所示, 延迟量定标值与测量值吻合得很好。将定标值、测量平均值和测量数据标准偏差等数据记入表 1 中。

表 1 Soleil-Babinet 补偿器实验数据

Table 1 Experimental data of Soleil-Babinet compensator

Adjustment displacement x_i /mm	Retardation of compensator /nm	Retardation /nm	Error /nm	Relative error /%	Standard deviation /nm
0.023	0.8480	0.853	0.005	0.6	0.031
0.100	3.6860	3.617	-0.069	-1.9	0.020
0.500	18.4290	18.001	-0.428	-2.3	0.018
0.901	33.2090	32.986	-0.223	-0.7	0.014
1.301	47.9520	47.354	-0.598	-1.3	0.013
1.704	62.8060	62.091	-0.715	-1.1	0.020
2.104	77.5490	77.262	-0.287	-0.4	0.020
2.501	92.1820	91.559	-0.623	-0.7	0.022
2.901	106.9250	105.397	-1.528	-1.4	0.022
3.303	121.7420	121.404	-0.338	-0.3	0.030
3.700	136.3750	136.300	-0.075	-0.1	0.029
4.100	151.1180	151.053	-0.065	-0.1	0.032
4.304	158.6378	158.017	-0.620	-0.4	0.031

由定标结果和系统测试结果能够看出: 当补偿器位移为 0.500 mm 时, 延迟量测量值与定标值存在的

最大相对误差为 2.3%, 表明了所提方案的延迟量测量精度; 当补偿器位移为 0.500 mm、延迟量为

151.118 nm 时,测量获得的最大标准偏差为 0.032 nm,表明了所提方案的测量重复性和灵敏度。

3.3 应力双折射测试

为了进一步确定所提方案的应力双折射测量能力,对样品进行施加压力实验。样品选用 20 mm×20 mm×3 mm 的 Bk7 玻璃样品,压力计选用艾德堡 HP-100 型数显推拉力计,压力值范围为 100 N,压力方

度值为 0.1 N。玻璃样品采用 U 型夹具夹持,夹具与样品的接触面积为 15 mm²,将样品放入图 2 所示的系统中,检测激光从样品中心垂直通过,施加应力的方向沿坐标轴 y 轴。测试了不同应力下数字锁相获得的信号幅值,进而求解出延迟量和快轴方位角,将延迟量和厚度一同代入式(1)中进一步求解获得样品的应力双折射情况,实验结果如图 8 所示。

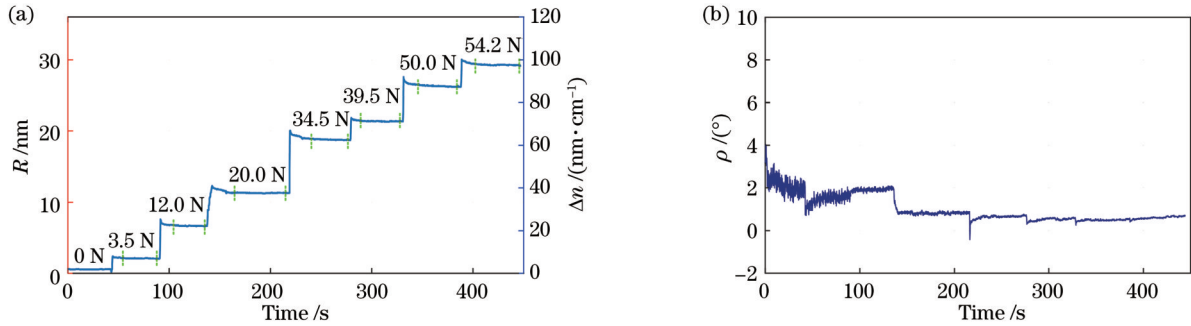


图 8 应力双折射测量实验。(a)延迟量和双折射;(b)快轴方位角

Fig. 8 Stress birefringence measurement experiment. (a) Retardation and birefringence; (b) azimuth angle of fast axis

由图 8 的实验结果可知,随着施加压力值的增大,玻璃样品中的应力不断增加,应力延迟量和双折射也随之增加。与此同时,样品中应力双折射的快轴方位

角始终接近于 0°(几乎沿 x 轴,垂直于施加应力的 y 轴)。将图 7 中施加应力的过程忽略,将施加应力后趋于稳定的实验数据记入表 2 中。

表 2 应力双折射测量实验数据

Table 2 Experimental data of stress birefringence measurement

Applied pressure value /N	Stress retardation R /nm	Standard deviation of retardation /nm	Stress birefringence Δn /($\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Standard deviation of stress birefringence /($\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}$)
0	0.558	0.023	1.86	0.08
3.5	2.108	0.030	7.03	0.10
12.0	6.677	0.036	22.26	0.12
20.0	11.291	0.034	37.64	0.11
34.5	18.803	0.039	62.68	0.13
39.5	21.360	0.038	71.20	0.13
50.0	26.262	0.050	87.54	0.17
54.2	29.275	0.037	97.58	0.12

实验结果显示,应力延迟量和应力双折射值与施加应力值的大小成正比。然而,不施加应力时样品的应力延迟量和应力双折射也并非 0,具有较小的延迟量和应力双折射值,这反映了样品生产过程造成的应力双折射,这是在实际光学元件生产中必须测试评估的缺陷。实验还进一步记录了不同压力下,应力延迟量和应力双折射的标准偏差,对比表 2 和表 1 中数据,能够看出施加应力后的延迟量标准偏差均大于静态样品的标准偏差,这主要是夹具施加应力过程中应力会有微弱变化造成的。当施加压力为 50 N 时,应力双折射标准偏差为 0.17 nm/cm。因此,所提应力双折射测量方案的应力双折射重复性和灵敏度优于 0.17 nm/cm。此外,上述实验中数据测量的时间间隔均设置在 200 ms,所采用的 FPGA 数字锁相数据处理

周期可以根据实际情况设置,在对重复性不严格要求的应用中,数据测量的速度最快可达每 10 ms 一个数据点。

4 结 论

提出了一种应用两个频率不同弹光调制器级联的差频调制型应力双折射测量方案,将应力双折射延迟量和快轴方位角信息加载到两个弹光调制器调制的差频信号和基频信号中,并在 FPGA 为核心的弹光调制器驱动控制及数据处理电路中完成了信号幅值的解调提取。同时,求解出了应力双折射延迟量和快轴方位角,结合样品厚度信息进一步计算获得样品的应力双折射。按照该新方案原理搭建了实验系统,完成了系统初始偏移值的定标实验,有效地消除了两个差频弹

光调制器自身微小剩余双折射的影响。采用 Soleil-Babinet 补偿器完成了所提方案的测量精度和重复性测试。完成了施加应力样品的应力双折射测试,其结果表明该系统的延迟量测量精度优于 2.3%,延迟量测量重复性为 0.032 nm,应力双折射测量重复性为 0.17 nm/cm。此外,所提方案单数据点测量时间在毫秒量级。所提方案实现了无需机械调节,高速、高精度和高重复度的延迟量和快轴方位角同时测量。

参 考 文 献

- [1] Ramesh K, Ramakrishnan V. Digital photoelasticity of glass: a comprehensive review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 59-74.
- [2] 陈辉宇, 钱敏, 唐景平, 等. 高功率激光钎玻璃椭圆片硬包边残余应力研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0903003.
Chen H Y, Qian M, Tang J P, et al. Investigation on residual stress in monolithic edge-cladding of elliptical Nd-doped phosphate laser glass for high-peak power solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0903003.
- [3] 刘志帆, 蔡燕民, 步扬, 等. 基于有限元分析方法的深紫外波段熔石英应力双折射分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1226001.
Liu Z F, Cai Y M, Bu Y, et al. Stress birefringence analysis in fused silica at deep ultraviolet waveband based on finite element simulation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1226001.
- [4] Su F, Li T H. Development of an infrared polarized microscope for evaluation of high gradient stress with a small distribution area on a silicon chip[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(6): 063108.
- [5] ISO. Optics and optical instruments-preparation of drawings for optical elements and systems-part 2: material imperfections-stress birefringence: ISO10110-2[S]. Switzerland: International Organization for Atandardization, 1996.
- [6] 李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 弹光调制和电光调制联合测剩余双折射[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0508003.
Li K W, Wang L M, Wang Z B, et al. Measurement of residual birefringence combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0508003.
- [7] Ramesh K, Sasikumar S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106186.
- [8] Hödemann S, Valdmann A, Anton J, et al. Gradient scattered light method for non-destructive stress profile determination in chemically strengthened glass[J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(12): 5962-5978.
- [9] Chen W X, Zhang S L, Long X W. Internal stress measurement by laser feedback method[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2433-2435.
- [10] Lane C, Rode D, Rösgen T. Two-dimensional birefringence measurement technique using a polarization camera[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(27): 8435-8444.
- [11] Wang B L, List J. Basic optical properties of the photoelastic modulator part I: useful aperture and acceptance angle[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5888: 58881I.
- [12] Wang S, Han X, Wang Y N, et al. Dispersion of the retardation of a photoelastic modulator[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 341.
- [13] 李春艳. 玻璃内应力高精度检测技术的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2014.
Li C Y. Study of high-precision glass stress testing technology [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [14] Wang B L, Oakberg T C. A new instrument for measuring both the magnitude and angle of low level linear birefringence[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(10): 3847-3854.
- [15] Scafidi M, Pitarresi G, Toscano A, et al. Review of photoelastic image analysis applied to structural birefringent materials: glass and polymers[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(8): 081206.
- [16] 王爽, 韩燮, 李晓, 等. 弹光调制测椭圆偏参量的数字锁相数据处理[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1314-1321.
Wang S, Han X, Li X, et al. Digital phase-locked data processing for ellipsometric parameter measurements based on photoelastic modulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(6): 1314-1321.
- [17] 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.
- [18] Yang K, Zeng A J, Wang X Z, et al. Method for rapid measuring retardation of a quarter-wave plate based on simultaneous phase shifting technique[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(9): 673-675.
- [19] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 51-62.
Liao Y B. Polarized light science[M]. Beijing: Science Press, 2003: 51-62.
- [20] 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.
- [21] 梁振坤, 李晓, 王志斌, 等. 基于驱动电压自适应调节的弹光调制[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1104001.
Liang Z K, Li X, Wang Z B, et al. Photo-elastic modulation based on adaptive regulation of driving voltage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1104001.
- [22] SBC-VIS and SBC-IR soleil-Babinet compensator user guide [EB/OL]. (2018-09-14). <https://emin.com.mm/web/content/1172075?unique=408f1a6f89cce10862f2e725591ec6fdb9fcb3ec&download=true>.

Stress Birefringence Measurement Based on Double Cascaded Photoelastic Modulation with Differential Frequencies

Li Kewu^{1,2*}, Wang Shuang², Liu Ziliang², Wang Zhibin^{2**}

¹*School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

²*Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electric Information and Instrument,*

Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract

Objective The stress parameters of optical materials and optical components are important parameters to evaluate the mechanical strength, thermal stability, imaging quality and beam transmission quality of optical systems. During the growth of optical materials such as glass and optical crystal, structural stress will occur due to defects or physical and chemical changes. In the process of annealing and cooling, the uneven plastic deformation and uneven volume change caused by temperature change will produce residual stress. Cutting, grinding and polishing during the processing of components, as well as external forces during loading and clamping, will generate mechanical stress. When the stress is large, it is easy to cause the materials and components to explode. Even a small stress can cause poor refractive index and birefringence consistency, resulting in imaging distortion and astigmatism. Therefore, it is necessary for the development and production of high-performance optical system to measure the stress of optical materials and optical elements, and the stress should be controlled within the allowable range. Stress induced birefringence become the main index of stress defect evaluation in optical materials and components. Now, methods are applied to research the measurement of stress birefringence, such as polarization interference, polarization compensation, laser feedback, polarization modulation and polarization imaging. Nevertheless, measurement speed and accuracy still need to be further improved. For the needs of rapid and high-precision stress testing and evaluation of optical materials and optical components, a stress birefringence measurement scheme based on double cascaded photoelastic modulation with differential frequencies is proposed in this paper.

Methods Considering the application advantages of photoelastic modulation, such as high modulation frequency, large optical aperture, high modulation purity and stable operation, a novel measurement method using photoelastic modulation is proposed. A simple polarimetry is constructed based on two photoelastic modulators with differential modulation frequencies. The stress birefringence retardation and fast axis azimuth angle are loaded into the differential frequency photoelastic modulation signals, and the digital phase-locked technology is used to extract the differential frequency signals and fundamental frequency signals of photoelastic modulation at the same time, so as to further solve the stress birefringence retardation and fast axis azimuth angle. The principle of the new scheme is analyzed, and an experimental system is built. The initial offset value of the system is calibrated experimentally without any sample. After that, the measurement accuracy and repeatability are measured by using a Soleil-Babinet compensator as standard sample. Finally, a BK7 glass specimen is loaded different stresses, and the measurement of stress birefringence is completed.

Results and Discussions After the system is built, and the initial calibration is completed, Soleil-Babinet compensator is regarded as a standard sample to be determined. Adjust the displacement of the optical wedge of the compensator from 0 with an interval of about 0.02 mm, the signal amplitude is obtained by digital phase-locked technique, and the retardation and fast axis azimuth angle of the compensator are further solved. The calibration values of retardation are in good agreement with the measured values (Fig. 7), and there is a maximum relative error of 2.3% between the measured value and the calibrated value, which indicates that the measurement accuracy of retardation in this scheme. When the compensator displacement is at 0.500 mm, and the retardation is 151.118 nm, the maximum standard deviation is 0.032 nm, which indicates that the measurement repeatability and sensitivity of this scheme (Table 1). Stress birefringence experiment is carried out by using the BK7 glass specimen. The experimental results show that the stress retardation and birefringence are increased with the increase of the applied pressure (Fig. 8). When the applied pressure is 50.0 N, the standard deviation of stress birefringence is 0.17 nm/cm, which indicates that the measurement repeatability and sensitivity of the stress birefringence (Table 2). We also find that the stress retardation and birefringence of BK7 glass are not zero, when no pressure is applied at the beginning. The small retardation and birefringence values are 0.558 nm and 1.86 nm/cm respectively, which is induced during the production process. This is a defect that must be tested and evaluated in the optical element production. Moreover, the time interval of data measurement in the above experiments is set at 200 ms. The time can be set according to the actual situation via the FPGA digital phase-locked data processing

cycle. In the application with no strict requirements on repeatability, the fastest data measurement rate can reach one data point each 10 ms.

Conclusions In present study, a novel stress birefringence measurement method based on differential frequency modulation with double photoelastic modulators is demonstrated. The principle of the new scheme is analyzed, and an experimental system is built. The initial offset value of the system is calibrated experimentally, and the measurement accuracy and repeatability are measured by using a Soleil-Babinet compensator, and the stress birefringence measurement for a BK7 glass specimen is carried out. The experimental results show that the accuracy of retardation measurement is 2.3%, the repeatability of retardation measurement is 0.032 nm, and the repeatability of birefringence measurement is 0.17 nm/cm. In addition, the measurement time of single data does not exceed 200 ms. Our study realizes simultaneous measurement of retardation and fast axis azimuth angle without any mechanical adjustment. This method has the application advantages of high measurement accuracy, high measurement repetition and fast measurement speed.

Key words measurement; applied optics; photoelastic modulation; stress birefringence; retardation