

文章编号 1004-924X(2025)19-3021-11

运用频闪照明的弹光调制型双折射显微成像

董 业^{1,4}, 任书宣^{1,4}, 王志斌^{1,4}, 王 爽^{3,4}, 李克武^{2,4*}

- (1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030051;
4. 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051)

摘要:为实现高速、高精度的双折射显微测量,提出了一种基于弹光调制的双折射显微成像方案。利用弹光调制技术高调制频率、大调制纯度等偏振调制优势,实现了双折射显微成像测量,然后,运用频闪照明法解决了弹光调制器的“高频调制”与相机“低采集帧率”之间的矛盾。进行 0° , 30° , 90° 三个弹光调制相位下采集图像实验,以解算样品的双折射相位延迟量分布。最后,搭建实验系统并对波片和椴树茎切片样品进行了测量实验。实验结果表明,波片延迟量测量误差优于1%,延迟量精度满足 $\pm\lambda/300$,延迟量分布最大偏差不超过1.62 nm。椴树茎切片的不同延迟量分布区能够完成不同部位的区域识别,且单次测量时间小于3 ms。该方案实现了高速、高精度的双折射分布测量,且具备双折射相位延迟量分布测量能力,可为二维新材料、生物组织成像等研究提供先进技术手段。

关键词:显微成像;弹光调制;频闪照明;相位延迟量;双折射

中图分类号: O439; TH742 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253319.3021 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253319.3021

Birefringence microscopy imaging based on photoelastic modulation with stroboscopic illumination

DONG Ye^{1,4}, REN Shuxuan^{1,4}, WANG Zhibin^{1,4}, WANG Shuang^{3,4}, LI Kewu^{2,4*}

- (1. *Institute of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;*
2. *School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;*
3. *College of Computer Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;*
4. *Shanxi Provincial Engineering Technology Research Center for Optoelectronic*

Information and Instruments, Taiyuan 030051, China)

** Corresponding author, E-mail: kewuli@nuc.edu.cn*

Abstract: To achieve rapid and precise birefringence microscopy, a photoelastic-modulation-based imaging scheme is proposed. Leveraging the high modulation frequency and purity of photoelastic modulators, birefringence imaging measurements are realized. The disparity between the modulator's high-frequency operation and the camera's low frame rate is resolved via stroboscopic illumination. The sample's birefringence phase retardation distribution is retrieved from only three images acquired at photoelastic modulation

收稿日期: 2025-07-01; 修订日期: 2025-08-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 63305309, No. 62205310)

phases of 0° , 30° , and 90° . An experimental system was constructed and tested on a wave plate and linden stem sections. Results indicate a wave-plate retardation error below 1%, retardation accuracy within $\pm \lambda/300$, and a maximum retardation-distribution deviation not exceeding 1.62 nm. Distinct retardation regions in the linden stem sections enabled differentiation of anatomical parts, with single-measurement acquisition time under 3 ms. The method achieves high-speed, high-precision mapping of birefringence phase retardation and offers an advanced technical approach for studies of two-dimensional materials, biological tissue imaging, and related fields.

Key words: microscopy imaging; polarization modulation; stroboscopic illumination; phase retardation; birefringence

1 引言

双折射是各向异性样品特有的光学性质^[1-3]。在显微成像中加入双折射检测的方案,即可同步获取样品微观结构的双折射相位延迟量、快轴方位角等参数。该性质在二维新材料表征、生物组织特性分析等领域具有重要应用价值^[4-5]。

双折射成像作为偏振成像的重要分支,其核心在于材料双折射参数的精准测量。因此,机械旋转偏振元件、液晶调制等偏振检测技术被应用于显微成像领域^[6-7]。机械旋转法通常利用电机驱动波片或偏振片转动,虽结构简单、成本低,但机械运动误差大、稳定性不足,且受限于电机转速,单帧成像时间达秒量级^[8]。而液晶调制法通过电控液晶相位延迟器将成像速度提升至毫秒量级^[9],但受限于液晶材料温度依赖性及液晶分子转向延迟影响,难以满足高精度、快速双折射测量需求^[10]。针对以上问题,研究人员持续探索改进方案。2000年,Peterson等设计的偏振成像仪通过同步探测器积分时间与偏振片旋转时间,有效克服了机械旋转延时问题^[11]。2007年,Bigué团队设计了一种液晶调制型高速偏振仪,并于2010年进一步通过四电压控制实现全 Stokes 偏振探测,帧率达 200 frame/s,推动了技术在全面性与速度上的协同发展^[12-13]。

尽管相关技术在不断优化,但仍未能完全突破机械或液晶调制的固有局限。相比之下,弹光调制(Photo-elastic modulation, PEM)技术通过压电晶体驱动弹光晶体产生周期性双折射效应,调制频率可达数十千赫兹,兼具调制纯度高、通光

孔径大、光谱范围宽及工作稳定等优势,特别适用于高灵敏度、快速偏振检测^[14-17]。然而,常规相机帧率一般为几十至几百帧每秒,单次成像时间难以突破 1 ms,弹光调制的高频调制特性与相机的低帧率之间存在严重的速度不匹配问题,直接成像会导致相位信息混叠丢失^[7,18]。因此,弹光调制器的“高频调制”与相机“低采集帧率”之间的矛盾亟需解决。

本文提出运用频闪照明技术^[7,18]的弹光调制型双折射显微成像方案,通过现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)生成与 PEM 调制严格同步的触发脉冲,仅在调制周期的特定相位实施光脉冲曝光,分别在 0° , 30° 和 90° 3 个弹光调制相位频闪照明,便可实现千赫级调制下的高速、高精度双折射相位延迟量分布测量。该技术可应用于二维新材料的晶体应力分布表征、生物组织的无标记显微成像,为跨学科领域的微观物理特性原位分析提供了兼具速度与精度的先进技术手段。

2 原理

双折射显微成像技术通过解析样品对偏振光的调制效应,能够非侵入式表征生物组织和工程材料(如液晶、晶体)的微观结构与双折射相位延迟量分布^[19-20]。本文基于弹光调制技术,结合频闪照明技术,建立了双折射相位延迟量的测量方法,从而实现高精度、宽动态范围的双折射相位延迟量快速分布测量。测量原理如图 1 所示,光束依次通过 45° 起偏器、 0° 弹光调制器(0° PEM)、待测样品、 0° 消色差 $1/4$ 波片、 -45° 检

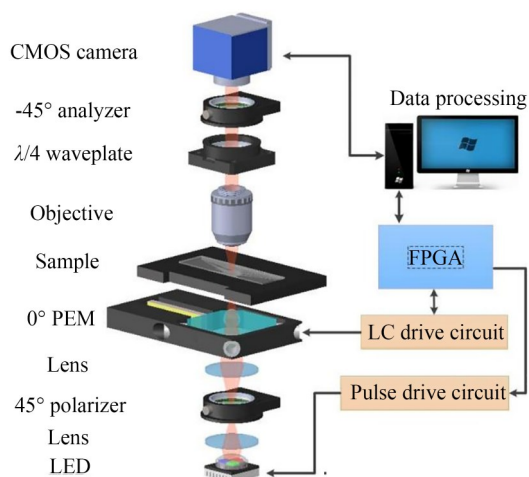


图 1 双折射显微成像系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of birefringence microscopy imaging system

偏器,最终被相机进行接收。线偏振光经过 PEM 后,其偏振态被周期性调制。PEM 通过压电效应驱动弹光晶体产生高频双折射变化,引入随时间周期性波动的相位调制。调制后的偏振

$$M_{\text{sample}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos X & \sin 2\theta \sin X & 0 \\ 0 & \cos 2\theta \sin 2\theta (1 - \cos X) & \sin 2\theta \cos X & 0 \\ 0 & \sin 2\theta \sin X & 0 & \cos X \end{bmatrix}$$

其中: X 表示待测样品的双折射相位延迟量, θ 表示待测样品的快轴方位角。通过计算可知,当入射光强为 I_0 时,出射光的 Stokes 矢量 S_{out} 中探测器或相机接收到的光强 I_{out} 可表示为:

$$I_{\text{out}} = \frac{I_0}{8} (1 + \cos X \sin \delta + \cos \delta \cos 2\theta \sin X). \quad (4)$$

然而,PEM 的“高频调制”特性与成像相机“低采集帧率”存在严重频率不兼容的矛盾,PEM 的调制频率一般为几十千赫,而成像相机的典型帧率一般为几十到几百帧。若直接连续成像,单帧图像将包含数百个调制周期的混叠信号,导致相位信息完全丢失。为解决这一问题,系统采用频闪照明技术,通过 FPGA 控制器生成与 PEM 调制信号严格同步的触发脉冲,仅在特定相位点(如 $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$)开启光脉冲并触发相机曝光,如图 2 所示。

图中, I_{out} 表示在持续照明条件下的接收光强度的归一化波形。通过控制 PEM 的驱动电压使得 PEM 的相位调制幅值等于 π ,此时 $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 3 个相位分别对应 PEM 的相位调制值分别为 0,

光穿过待测样品时,样品的双折射特性进一步改变出射光的偏振态,最终经过消色差 $\lambda/4$ 波片与检偏器转换为光强信号并被相机捕获。利用 Stokes 矢量和 Muller 矩阵对成像系统可以描述为:

$$S_{\text{out}} = M_{-45^\circ} M_{\lambda/4} M_{\text{sample}} M_{\text{PEM}} M_{45^\circ} S_{\text{in}}. \quad (1)$$

PEM 的相位调制可表示为: $\delta = \delta_0 \sin(2\pi f_0 t)$, δ_0 为相位调制幅值,通过调节驱动电压可精确控制其大小, f_0 表示 PEM 的谐振频率, t 为时间。这一动态调制过程能够替代传统机械旋转波片,避免运动误差并提升响应速度。式中 M_{PEM} 表示 0° PEM 的 Muller 矩阵,可表示为^[21]:

$$M_{\text{PEM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

待测样品存在双折射现象时,可将它视作相位延迟器件,为样品的 Muller 矩阵,可表示为^[22-23]:

$$M_{\text{sample}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta \sin 2\theta (1 - \cos X) & -\sin 2\theta \sin X & 0 \\ \sin 2\theta \sin X & \cos 2\theta \sin X & \cos X & 0 \\ 0 & -\cos 2\theta \sin X & 0 & \cos X \end{bmatrix}, \quad (3)$$

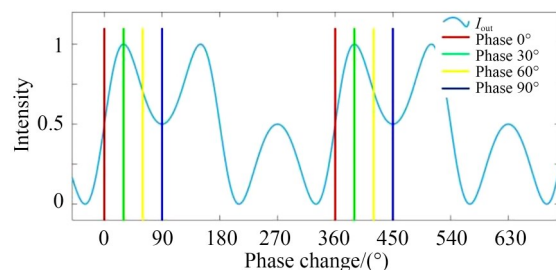


图 2 频闪照明示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stroboscopic lighting

$\pi/2, \pi$ 。将值代入 I_{out} 可得对应关系式:

$$\begin{cases} I_{0^\circ} = \frac{I_0}{8} (1 + \cos 2\theta \sin X) \\ I_{30^\circ} = \frac{I_0}{8} (1 + \cos X) \\ I_{90^\circ} = \frac{I_0}{8} (1 - \cos 2\theta \sin X) \end{cases}. \quad (5)$$

为消除入射光强对解算结果的影响,对式(5)进行比值计算,可得:

$$I_a = \frac{2I_{30^\circ}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}} = 1 + \cos X. \quad (6)$$

对式(6)进行解算即可得到待测样品的双折射相位延迟量:

$$X = \arccos(I_a - 1). \quad (7)$$

当入射光波长为 λ 时,样品的双折射相位延迟量对应的延迟量(即光程差)可以表示为:

$$\Delta = \lambda \cdot X / 2\pi. \quad (8)$$

选用以上3个相位点是因为PEM的相位调制呈现周期性变化, $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 3个相位点在周期内均匀分布,能够通过有限的相位采样覆盖调制周期的关键信息,避免因相位点稀疏导致的解算歧义。根据式(6)和式(7),当PEM的相位调制幅值固定为 π 时, $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 3个相位点对应的光强信号可构成闭合的方程组。通过这3个相位下的光强比值运算,能够直接消去入射光强等干扰项,解算过程简单,且解算结果具有唯一性。

结合以上原理,利用相机采集多幅特定相位下对应的强度图,即可对每一个像素点的延迟量进行解算,从而获取样品的整幅延迟量分布,实现弹光调制型双折射显微成像。然而,由于FPGA同频驱动的光脉冲相位与理论设定值存在偏移,导致测量误差。PEM与光源采用同一FPGA控制器,各相位点的触发偏差具有同源性,其误差特性表现为:对于 0° 与 $180^\circ, 30^\circ$ 与 $150^\circ, 90^\circ$ 与 270° 这3组对称相位点,其理论取值应保持一致性;当相位发生偏移时,同组相位点的测量值将呈现对称性误差(一增一减),如图3所示。

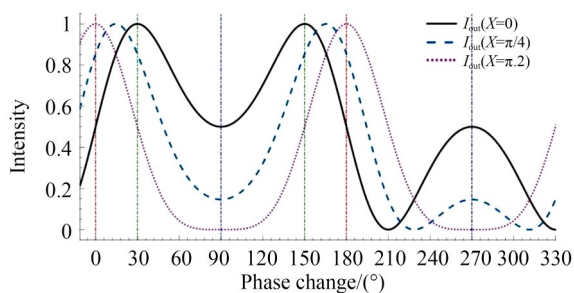


图3 接收光强波形

Fig. 3 Received light intensity waveform

图3分别显示了待测样品的双折射相位延迟量分别在 $0, \pi/4, \pi/2$ 情况下持续照明且快轴方位角都为 0° 时接收光强度的归一化波形。从图中可以看出,将对称相位点的测量值执行求和取平

均操作,即可以有效抵消相位偏差引起的系统误差,提升测量精度。

3 实验

为验证双折射显微成像系统对样品延迟量的测试性能,依据图2所示结构原理搭建实验测试系统,其光学配置如图4所示。检测光源采用深圳市博亚科技公司生产的LED光源,波长为631 nm,光功率为1 W;起偏器与检偏器选用晶萃光学公司生产的薄膜线性偏振片,消光比优于10 000:1;1/4波片采用同品牌石英消色差波片,工作波段覆盖400~700 nm,延迟量精度达到 $\pm \lambda/50$;PEM为课题组自研的二维八角对称结构器件,工作频率44.833 kHz;物镜配置为10倍无限远平场消色差物镜;图像采集使用大恒图像水星二代MERCURY2系列USB3.0黑白数字相机,帧率为168 frame/s,分辨率为1 920(H)×1 200(V),像元尺寸为 $5.86 \mu\text{m} \times 5.86 \mu\text{m}$ 。实验过程中,首先,将PEM的相位调制幅值调控至 π 附近,并通过光源脉冲控制实现相位同步。随后,在多个特定相位条件下分别触发CMOS相机进行图像采集。最终,通过相位解算重构待测样品的延迟量分布信息。

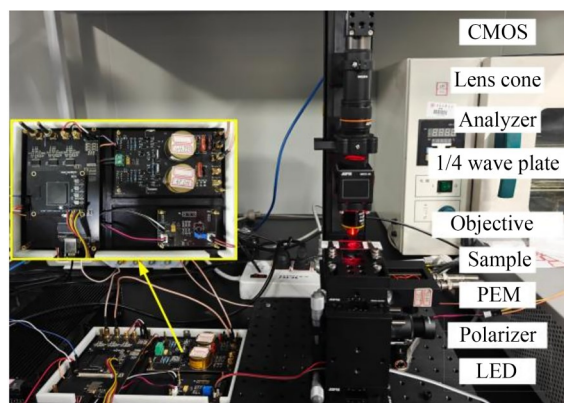


图4 双折射显微成像实验测试系统

Fig. 4 Experimental test system of birefringence microscopy imaging

3.1 初始偏移值校正

系统固有残余双折射(主要源于PEM及显微物镜的残余应力)与偏振元件装配偏差会导致测量误差,需通过系数校正实现补偿。值得注意

的是,这些系统误差在小相位延迟量下的影响尤为显著,其根本原因在于反余弦函数在 $X \rightarrow 0$ 时的灵敏度衰减特性。基于理论解算公式 $\cos X = k_1 \times [2 \times I_{30^\circ} / (k_2 \times (I_{0^\circ} + I_{90^\circ})) - 1]$, $X = k_3 \times \arccos(I_a - 1)$,当 X 趋近于0时,由于 $\cos X \approx 1$ 导致反余弦函数对输入误差的敏感性急剧下降 $\partial X / \partial(\cos X) \rightarrow \infty$,系统噪声与残余双折射会被显著放大。

为克服此物理误差与数学特性的耦合效应,采用双级校正策略。首先,通过 k_1, k_2 系数

调整提升小 X 值区域的 $\cos X$ 计算稳定性,但此操作会系统性低估大 X 值的真实解算结果,因此进一步引入 k_3 系数对大 X 值进行非线性补偿。该联立校正方法在维持 k_1, k_2 对小 X 值修正效果的同时,有效消除大 X 值的系统性偏差。为确定校正系数,在暗场无样品条件下,通过多次空采延迟量进行参数优化,最终确定最优校正参数: $k_1 = 1.0375$, $k_2 = 0.9907$, $k_3 = 1.005$ 。系统校正前后的延迟量分布对比如图5所示。

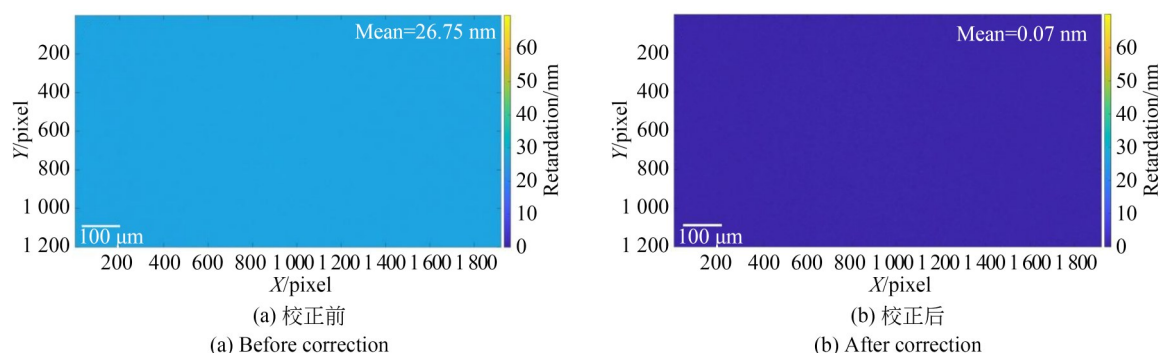


图5 系统校正前后空采结果对比

Fig. 5 Comparison of goAF results before and after system correction

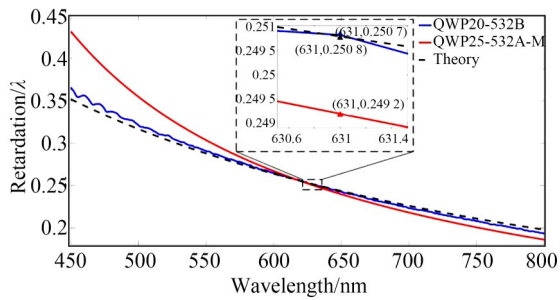
对校正前后实验结果进行分析可知,校正前系统延迟量均值为26.75 nm,该延迟量主要由残余双折射引起。经系数校正后,延迟量显著降至0.07 nm。实验数据表明,该校正系数法能够大幅降低系统噪声,使延迟量趋近于理论零值,对后续实验测试结果的影响可忽略不计,满足实验检测需求。

3.2 标准波片延迟量测量及分析

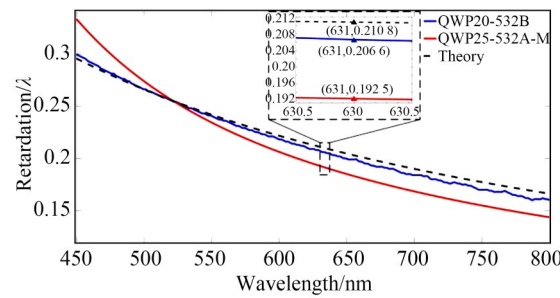
为验证系统双折射相位延迟量测量的准确性,本研究选用麓邦(LBTEK)公司生产的聚合物真零级和石英空气隙零级两类波片作为测试样品,测量其延迟量。由于波片延迟量与波长密切相关,这是由材料折射率随波长变化的色散特性决定的。理论上,波片在设计波长下能够提供准确的延迟量,而使用非设计波长光源测量时,实际延迟量会因色散效应偏离理论值。其中,聚合物材质波片对波长变化较为敏感,色散程度较高,当光源波长偏离中心波长时,延迟量会产生较大偏差。相比之下,石英空气隙波片因其特殊

设计结构,对波长变化不敏感,具有宽带宽、低色散特性,其延迟量在较宽波长范围内保持稳定。

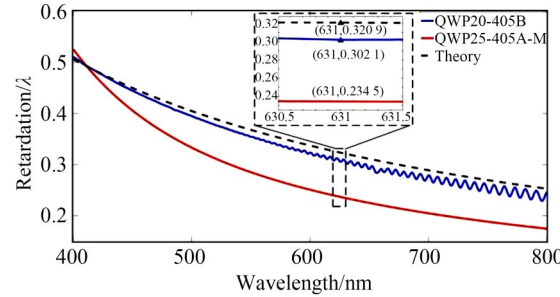
实验选取的聚合物材质波片型号分别为QWP25-633A-M, QWP25-532A-M, HWP25-405A-M, 石英空气隙材质波片型号分别为QWP20-633B, QWP20-532B, HWP20-405B。厂商已提供各型号波片在不同光源波长下的延迟量出厂测试数据。将同一设计波长的两类波片测试结果及理论值进行对比分析,具体数据如图6所示。当光源波长距设计波长较远时,受色散等因素影响,两类波片的出厂测量值相比理论值均出现一定偏移,其中聚合物材质波片的偏移值更为明显,而石英材质波片因其特殊结构的校正作用,相比聚合物材质波片与理论曲线的重合度更高。光源波长为631 nm时,633 nm的两类1/4波片延迟量出厂测试值分别为 0.2507λ 和 0.2492λ ,理论值为 0.2508λ ;532 nm的两类1/4波片延迟量出厂测试值分别为 0.2066λ 和 0.1925λ ,理论值为 0.2108λ ;405 nm的两类1/2



(a) 633 nm 的1/4波片延迟量对比
(a) Comparison of quarter-wave retardation at 633 nm



(b) 532 nm 的1/4波片延迟量对比
(b) Comparison of quarter-wave retardation at 532 nm



(c) 405 nm 的1/2波片延迟量对比
(c) Comparison chart of half-wave retardation at 405 nm

图 6 各类波片延迟量出厂测试与理论分布

Fig. 6 Factory test and theoretical distribution of retardation of various wave plates

波片延迟量出厂测试值分别为 0.302 1λ 和 0.234 5λ,理论值为 0.320 9λ。以出厂测试值为参照,首先对聚合物材质的 3 个波片进行测试,在快轴方位角分别为 0°,45°,90°,135°,180°的条件下测量其延迟量,测量结果的分布均值汇总于表 1。

分析数据可知,3 个不同设计波长的波片在各快轴方位角下测量的延迟量一致性良好,其中,633 nm 的 1/4 波片延迟量平均值为 0.247 9λ,误差为 0.52%;532 nm 的 1/4 波片延迟量平均值为 0.190 9λ,误差为 0.83%;405 nm 的 1/2 波片

表 1 聚合物真零级波片延迟量测试结果

Tab. 1 Test results of retardation of waveplates for polymer zero-order absorption

Angle of fast axis	Retardation/nm		
	QWP25-633A-M	QWP25-532A-M	HWP25-405A-M
0°	156.33	120.57	146.71
45°	156.55	120.39	146.64
90°	156.35	120.40	146.74
135°	156.54	120.38	146.69
180°	156.34	120.54	146.71
Mean/(°)	156.422	120.456	146.698
Portion of full wave/λ	0.247 9	0.190 9	0.232 5
Error/%	0.52	0.83	0.85

延迟量平均值为 0.232 5λ,误差为 0.85%。3 种波片延迟量测量值的误差均在 1% 以内,表明测量系统对聚合物材质波片延迟量的测量具有较高准确性。采用相同测量方法对石英空气隙材质的 3 个波片进行测试,测量数据见表 2。

表 2 空气隙零级波片延迟量测试结果

Tab. 2 Test results of retardation of zero-order wave plate in quartz air gap

Angle of fast axis	Retardation/nm		
	QWP20-633B	QWP20-532B	HWP20-405B
0°	158.41	129.86	190.14
45°	158.55	129.79	190.01
90°	158.36	130.06	190.11
135°	158.53	129.86	190.08
180°	158.40	130.07	190.13
Mean/(°)	158.45	129.928	190.094
Portion of full wave/λ	0.251 1	0.205 9	0.301 2
Error/%	0.12	0.34	0.30

分析结果显示,3 个不同设计波长的波片在各快轴方位角下测量的延迟量同样具有良好一致性。633 nm 的 1/4 波片延迟量平均值为 0.251 1λ,误差为 0.12%;532 nm 的 1/4 波片延迟量平均值为 0.205 9λ,误差为 0.34%;405 nm 的 1/2 波片延迟量平均值为 0.301 2λ,误差为 0.3%。3 种波片延迟量测量值测量误差均在 1% 以内,进一步验证了测量系统对石英材质波片延

迟量测量的准确性。

对比两类波片测量值与出厂标定值,最大误差处于可接受范围,充分验证了该测量系统的高精度特性。鉴于 633 nm 的 1/4 波片设计波长与光源波长 631 nm 较为接近,受色散影响较小,所以对该波长下两种材质的 1/4 波片在不同方位角下的延迟量进行深入分析,结果如图 7 所示。

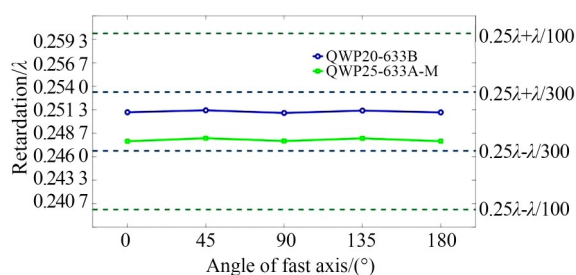


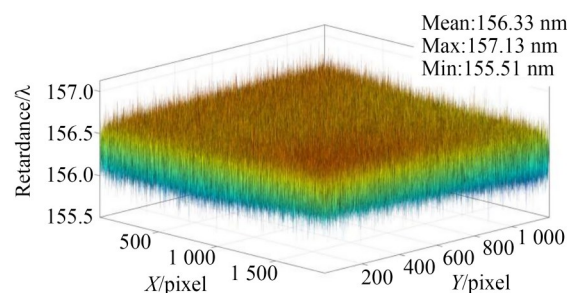
图 7 633 nm 的 1/4 波片各快轴方位角下延迟量的测试结果

Fig. 7 Test results of the retardation at each angle of fast axis for 633 nm quarter-wave plate

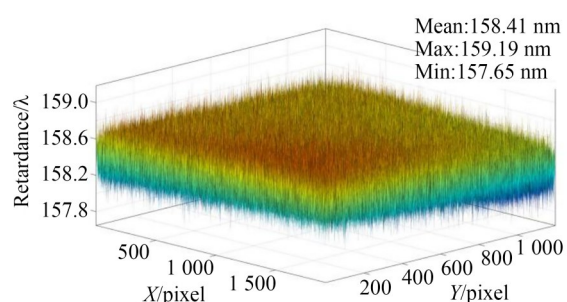
数据表明,聚合物材质与石英空气隙材 1/4 波片在各快轴方位角下的延迟量测量值均满足 $\pm\lambda/300$ 的延迟量精度要求,验证了系统在不同快轴方位角下测量的准确性与稳定性。为进一步探究成像面延迟量的空间分布特性,本研究选取上述两种材质 633 nm 的 1/4 波片在 0° 快轴方位角下的成像数据进行分析。通过对每个像素点的延迟量进行统计,获取整个成像面的延迟量分布特征,具体情况如图 8 所示。

分布结果显示,聚合物材质 1/4 波片在 0° 快轴方位角下,延迟量测量值最大值为 157.13 nm,最小值为 155.51 nm,平均值为 156.33 nm,极差为 1.62 nm。石英空气隙材质 1/4 波片对应测量值最大值为 159.19 nm,最小值为 157.65 nm,平均值为 158.41 nm,极差为 1.54 nm,均显著优于标称的 ± 5 nm 均匀性指标。该结果表明,测量系统不仅在延迟量精度上表现优异,在成像面的空间均匀性方面也达到较高水准。

以上实验从 3 个维度对测量系统进行验证。首先,通过不同快轴方位角下两类材质、3 种波长波片的测量,对比厂商出厂测试值,验证了系统测量的一致性,且误差均控制在 1% 以内。其次,针对受色散影响小的 633 nm 两类 1/4 波片,在不



(a) QWP25-633A-M



(b) QWP20-633B

图 8 0° 快轴方位角下 633 nm 的 1/4 波片延迟量分布
Fig. 8 Retardation distribution of quarter-wave plate at 633 nm with angle of fast axis of 0°

同快轴方位角下进行延迟量精度分析,确认测量结果满足 $\pm\lambda/300$ 的高精度要求。最后,通过观测 0° 快轴方位角下两类 633 nm 的 1/4 波片的延迟量分布图,验证了成像面测量值的均匀性。多维度、系统性的验证结果为生物样本的精确测量奠定了坚实基础,确保后续生物样本延迟量分析的可靠性与有效性。

3.3 植物组织样本双折射成像的应用

基于标准波片延迟量测试验证的系统准确性,本研究进一步将弹光调制型双折射显微成像技术应用于植物组织样本的双折射特性分析,通过延迟量分布表征其微观结构差异。以椴树茎横切面细胞为测试对象,其延迟量分布如图 9 所示。

实验结果显示,椴树茎细胞可通过双折射信号清晰划分为 3 个特征区域:区域 1 (韧皮部) 内虚线框选的韧皮射线区域因细胞壁显著增厚及木质素高富集,表现出强双折射特性,延迟量达

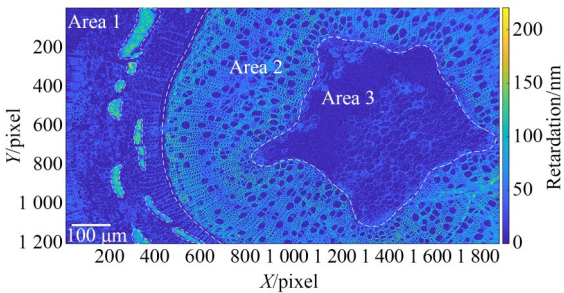


图9 椴树茎细胞的延迟量分布

Fig. 9 Retardation distribution of linden stem cells

全图最高值;区域2(木质部)的导管与管胞因厚壁分层木质化结构呈现中等延迟量,而木射线薄壁细胞则形成低延迟条纹;区域3(髓部)以无次生壁沉积的薄壁细胞为主,木质素含量极低,全域延迟量趋近于零。上述分布规律表明,延迟量差异可精确区分植物细胞壁结构(如次生加厚程度)及组分分布(如木质素浓度梯度)。该技术为生物细胞微观力学特性研究及病理状态下的结构异变分析提供了无标记、高灵敏的成像方法。

3.4 测量速度分析

实验选用的 PEM 工作频率为 44.833 kHz,

对应调制周期为 22.3 μs。为避免光脉冲宽度对相位测量精度的影响,光源脉宽被严格控制为调制周期的 1/100(即 223 ns),确保在单一调制周期内仅产生一个窄脉冲信号,从而精准锁定特定相位点的偏振态信息。

理论上,单帧图像采集需覆盖至少一个完整的 PEM 调制周期以保证相位信息的完整($\geq 22.3\text{ }\mu\text{s}$)。为抵消系统相位偏移误差,采用对称相位法,需采集 6 个相位点的图像。考虑相机曝光过程的开关响应时间,最快可在 200 μs 内完成单次双折射测量。

为进一步提升测量稳定性,避免单次光脉冲的偶然性噪声影响,实际实验中将单一相位的曝光时间设定为 400 μs,此时每帧图像包含约 17 个光脉冲($400\text{ }\mu\text{s}/22.3\text{ }\mu\text{s}\approx 17$),通过多脉冲积分降低光强波动带来的误差。在此设置下,6 个相位的总采集时间为 2.4 ms,结合后续数据解算时间,整个双折射测量过程可在 3 ms 内完成,充分满足高速动态测量需求。与传统技术相比,本系统的测量速度优势显著,具体对比见表 3。

表 3 不同调制技术的测量速度对比

Tab. 3 Comparison of measurement speeds for different modulation techniques

Modulation technology	Modulation frequency	Single-frame imaging time	Single measurement time	Technique
Mechanical rotation	$\leq 10\text{ Hz}$	$\geq 100\text{ ms}$	$> 1\text{ s}$	Ref. [11]
Liquid crystal modulation	$\leq 1\text{ kHz}$	$\geq 1\text{ ms}$	$\geq 5\text{ ms}$	Ref. [12]
Photoelastic modulation	44.833 kHz	22.3 μs	$< 3\text{ ms}$	This work

机械旋转型技术受限于电机转速,单帧成像时间达秒级,且易引入机械振动误差。液晶调制型虽将速度提升至毫秒级,但受材料响应延迟影响,帧率难以突破 1 kHz。而本研究基于 PEM 的高频调制与频闪同步策略,实现了微秒级的测量响应,为动态双折射过程(如生物组织的瞬态应力变化、液晶材料的动态响应)的观测提供了可行性。

4 讨论

本研究通过标准波片实验验证了系统的高

精度测量特性,并成功实现了椴树茎细胞双折射相位延迟量分布的观测,且单次测量耗时可控制在 3 ms 以内,充分体现了系统在双折射相位延迟量测量领域的高速与高精度优势。然而,当前系统仍存在一定局限性,需在未来工作中进一步优化改进。

4.1 参数测量范围的限制

受单 PEM 调制模式的制约,现有解算模型对快轴方位角的测量范围局限于 $0\sim\pi/2$,无法覆盖 $0\sim\pi$ 的全角度范围。这一局限源于单 PEM 相位调制的对称性,导致方位角解算存在歧义。为突破这一限制,下一步将采用双 PEM 级联调制方

案,利用差频调制原理构建全角度解算模型,实现双折射相位延迟量与快轴方位角的同步测量,从而扩展系统对各向异性材料的全面表征能力。

4.2 色散效应的影响

本系统采用 631 nm 单波长光源,当测量样品(如波片)的设计波长与光源波长偏差较大时,材料的色散特性会导致延迟量测量值与理论值产生偏差。针对这一问题,未来计划将光源升级为多波长可调谐光源,并结合色散补偿算法,根据不同材质样品(如聚合物、石英等)的色散特性进行波长自适应校正,以提升系统在跨波段测量中的准确性。

此外,后续研究将搭建动态样品平台,验证系统对动态双折射过程的捕捉能力,进一步拓展其在动态应力监测、生物细胞力学响应分析等领域的应用场景。

5 结 论

本研究提出基于弹光调制的双折射显微成像方案,并运用频闪照明技术有效克服了 PEM

高频调制(44.833 kHz)与相机低帧率(168 frame/s)的频率不兼容问题,通过 FPGA 精准同步控制实现时序匹配,利用 $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 3 相位强度解算模型,实现样品双折射相位延迟量的高速定量测量。实验表明,该系统对聚合物和石英波片的延迟量测量误差优于 1%,精度达 $\pm \lambda/300$,成像面延迟量分布偏差 ≤ 1.62 nm。对榉树茎切片的测量可清晰区分韧皮部、木质部及髓部的双折射差异,验证了其在生物组织无标记成像中的有效性,单次测量时间小于 3 ms。该技术具备高速成像与高精度测量的显著优势,可为二维新材料应力表征与生物医学微观结构分析提供兼具速度与精度的先进手段,展现出重要的应用价值与发展潜力。

作者贡献声明:

董业:测量方法提出,论文构思和撰写;
任书宣:测量实验设计及数据整理和分析;
王志斌:实验资源提供及研究指导;
王爽:测量实验数据分析。
李克武:论文审核与编辑。

参考文献:

- [1] 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): 208-215.
LI K W, WANG L M, WANG ZH B, *et al.* Measurement of residual birefringence combined photoelastic modulation with electro-optic modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 208-215. (in Chinese)
- [2] 李克武,王爽,刘梓良,等. 双弹光级联的差频调制型应力双折射测量[J]. 光学学报, 2023, 43(4): 83-92.
LI K W, WANG SH, LIU Z L, *et al.* Stress birefringence measurement based on double cascaded photoelastic modulation with differential frequencies[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(4): 83-92. (in Chinese)
- [3] 王杰. 基于分焦平面偏振成像的双折射测量研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
WANG J. *Research on Birefringence Measurement Based on Split Focal Plane Polarization Imaging* [D]. Taiyuan: North University of China, 2024. (in Chinese)
- [4] LI K W, WANG SH, WANG L M, *et al.* Stress birefringence measurement using the multi-harmonic terms of dual cascade photoelastic modulation[J]. *Journal of Instrumentation*, 2025, 20(3): P03033.
- [5] 李克武,邱元芳,崔志英,等. 基于双弹光级联差频调制的应力双折射二维分布测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(18): 2647-2655.
LI K W, QIU Y F, CUI ZH Y, *et al.* Measurement of two-dimensional distribution of stress birefringence based on dual photoelastic modulators cascade difference frequency modulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(18): 2647-2655. (in Chinese)
- [6] WANG Y, SU Y Q, SUN X Y, *et al.* Principle and implementation of stokes vector polarization imaging technology[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6613.
- [7] 刘坤. 基于弹光调制的偏振显微成像研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
LIU K. *Research on Polarization Microscopy Imaging Based on Photoelastic Modulation* [D]. Taiyuan: North University of China, 2024. (in Chinese)

- [8] 张俊超, 伍彩云, 罗毅东, 等. 分焦平面偏振超分辨成像技术的研究现状与展望(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(7): 205-218.
ZHANG J CH, WU C Y, LUO Y D, *et al.* Research status and prospects on super-resolution imaging technology for division-of-focal-plane polarimeters (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(7): 205-218. (in Chinese)
- [9] 刘卫平. 纳米散射场光子偏振状态测量和成像及其生物应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
LIU W P. *Research on Photon Polarization State Measurement, Imaging in Nanoscale Scattering Fields and Their Biological Applications*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] 侯俊峰, 邓元勇, 王东光, 等. 液晶调制技术在太阳磁场探测中的应用及展望[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 296-304.
HOU J F, DENG Y Y, WANG D G, *et al.* Application and prospect of liquid crystal modulation technology in solar magnetic field detection [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(3): 296-304. (in Chinese)
- [11] PETERSON J Q, JENSEN G L, KRISTL J A, *et al.* Polarimetric imaging using a continuously spinning polarizer element[C]. *Optics + Photonics SPIE*, 2013.
- [12] GENDRE L, FOULONNEAU A, BIGUÉ L. Imaging linear polarimetry using a single ferroelectric liquid crystal modulator[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): 4687-4699.
- [13] 李智渊, 翟爱平, 冀莹泽, 等. 光学偏振成像技术的研究、应用与进展[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 298-313.
LI ZH Y, ZHAI A P, JI Y Z, *et al.* Research, application and progress of optical polarization imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(9): 298-313. (in Chinese)
- [14] 李克武. 基于快轴可调弹光调制的椭圆偏振测量技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
LI K W. *Research on Ellipsometry Measurement Technology Based on Fast-Axis Tunable Photoelastic Modulation*[D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [15] 王爽, 李克武. 双折射测量系统的弹光调制器原位定标及数据处理研究[J]. 激光杂志, 2025, 46(3): 76-83.
WANG SH, LI K W. *In-situ* calibration of photoelastic modulator and data processing in birefringence measurement system [J]. *Laser Journal*, 2025, 46(3): 76-83. (in Chinese)
- [16] 咎薛博, 李克武, 陈玉龙, 等. 弹光调制器延迟量幅值分布测量[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 404-411.
ZAN X B, LI K W, CHEN Y L, *et al.* Measurement of delay amplitude distribution of elastic light modulator [J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(2): 404-411. (in Chinese)
- [17] 郝婧蕾, 张蓓, 赵永强. 分焦平面偏振光谱成像技术研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 82-93.
HAO J L, ZHANG B, ZHAO Y Q. Research progress of division-of-focal-plane polarization spectral imaging technology [J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2025, 53(4): 82-93. (in Chinese)
- [18] FREUDENTHAL J, LEADBETTER A, WOLF J, *et al.* A photoelastic modulator-based birefringence imaging microscope for measuring biological specimens[C]. *Optics in Health Care and Biomedical Optics VI. Beijing, China*. SPIE, 2014: 92680C.
- [19] WANG SH, HAN X, LI K W. Snapshot multi-wavelength birefringence imaging [J]. *Sensors*, 2024, 24(16): 5174.
- [20] 张玉荣, 常颖, 高万荣. 偏振敏感光学相干层析成像系统中样品光偏振对样品双折射相位延迟测量的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 205-214.
ZHANG Y R, CHANG Y, GAO W R. Effect of light polarization state on phase delay measurement induced by tissue birefringence in polarization-sensitive optical coherence tomography imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 205-214. (in Chinese)
- [21] 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): 211-216.
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): 211-216. (in Chinese)
- [22] LI K W, WANG SH, WANG Z B. Measurement

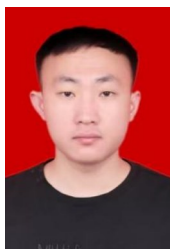
of waveplate parameters over entire clear aperture based on differential frequency modulation with dual photoelastic modulators [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(7): 4496.

- [23] 王爽, 崔志英, 冯华君, 等. 基于双弹光级联差频调制的波片参数测量研究[J]. 光子学报, 2023,

52(11): 189-198.

WANG SH, CUI ZH Y, FENG H J, *et al.* Waveplate parameter measurement based on dual photoelastic modulators cascade differential frequency modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(11): 189-198. (in Chinese)

作者简介:



董 业(1999—),男,山西大同人,硕士研究生,主要从事偏振探测及双折射成像方面的研究。E-mail: 17703432075@163.com

通讯作者:



李克武(1990—),男,云南文山山人,副教授,博士生导师,毕业于中北大学信息与通信工程专业,主要从事光偏振调制及应用方面的研究。E-mail: kewuli@nuc.edu.cn