

应用双弹光级联差频调制的红外材料应力缺陷检测

李克武^{1,2,3}, 王爽^{2,3*}, 李孟委², 王志斌^{2,3*}

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051;

3. 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: 为了实现对 Si、Ge、GaAs 等红外材料应力缺陷检测, 采用两个工作在不同频率的光弹性调制器级联, 构成偏振测量系统。应力缺陷引入的双折射延迟量和快轴方位角两个参数, 被加载到偏振测量系统调制信号中; 利用数字锁相技术同时获取调制信号的基频项和差频项幅值, 然后完成两个应力参数求解。详细分析了检测原理, 并搭建了实验系统进行验证。实验结果表明, 该检测方法及实验系统实现了应力方向角标准偏差为 0.31° , 应力双折射延迟量标准偏差为 0.72 nm , 高速、高精度和高重复度的应力缺陷检测, 并且实现了 Ge 样品的应力缺陷方向和值大小分布测量, 可为红外材料质量测试分析和评估提供有效手段。

关键词: 应力缺陷; 弹光调制; 快轴方位角; 延迟量

中图分类号: O43

文献标识码: A

Research on the stress defect detection of infrared material using differential frequency modulation with cascaded dual photoelastic modulators

LI Ke-Wu^{1,2,3}, WANG Shuang^{2,3*}, LI Meng-Wei², WANG Zhi-Bin^{2,3*}

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Institute of Frontier Interdisciplinary Sciences, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-electric Information and Instrument, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to achieve the stress defect detection of infrared materials such as Si, Ge, and GaAs, two Photoelastic modulators working at different frequencies are cascaded to form a polarimetry system. The birefringence retardation and fast axis azimuth introduced by the stress defect are loaded into the modulation signals of the polarimetry system. The amplitudes of the fundamental and differential frequency terms were simultaneously obtained by using digital phase-locked technology, and then the two stress parameters are solved. A detailed analysis of the detection principle was conducted and an experimental system was established for verification. The experimental results show that this method has achieved stress defect detection with a standard deviation of 0.31° for stress direction angle and 0.72 nm for stress birefringence retardation. The high-speed, high-precision, and high repeatability stress defect detection are realized, and the measurement of stress defect distribution in a Ge samples are demonstrated. An effective method for infrared material quality testing, analysis, and evaluation is proposed.

Key words: stress defect, photoelastic modulation, fast axis azimuth, retardation

引言

Si、Ge、GaAs 等材料良好的透光范围分别为 $1.2\sim 7\ \mu\text{m}$ 、 $2\sim 14\ \mu\text{m}$ 、 $1\sim 14\ \mu\text{m}$, 透光范围覆盖短波

红外、中波红外和长波红外等波段, 被制作成窗口、透镜等光学元件, 广泛应用于夜视仪、热像仪等红外探测系统^[1-3]。与此同时, Si、Ge、GaAs 等红外材料还是优良的半导体材料, 广泛应用于二极管、三

收稿日期: 2023-08-06, 修回日期: 2023-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(62205309, 62205310)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62205309, 62205310)

作者简介 (Biography): 李克武 (1990—), 男, 云南文山山人, 副教授, 博士学位, 主要研究领域为光偏振调控及应用。E-mail: kewuli@nuc.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

Received date: 2023-08-06, Revised date: 2023-11-01

极管、微处理器和存储器等各种集成电路^[4]。

红外材料从晶体生长到加工成元件整个过程会引入应力,例如晶体生长过程中空位缺陷、位错缺陷等会产生结构应力,退火冷却过程的不均匀塑性变形或体积变化会产生残余应力,加工过程中的切割、磨削、抛光、装载夹持会产生机械应力。应力较大时,材料的机械强度和热稳定性降低,甚至引起材料及元件破裂;较小的应力也会降低折射率均匀性,使元件产生双折射,最终导致光电探测系统成像畸变和成像像散等危害^[5-6]。此外,半导体制造继续朝着更大的晶圆、更薄的薄膜和更小的封装方向发展,红外材料的应力缺陷会降低半导体器件性能和可靠性,甚至使器件失效。对红外材料及元件的应力缺陷进行测试分析,尽可能规避或消除应力缺陷,完成低缺陷红外材料生产和筛选,是确保高性能和高可靠红外光学系统、半导体集成电路研制和生产的关键。

目前,已经开发了多种应力分析方法用于应力缺陷测量。最常用的有X射线衍射方法和超声显微方法。X射线衍射方法以布拉格衍射角测量晶格间距的变化,实现应力缺陷测量^[7]。该方法灵敏度高,但x射线衍射测量耗时,且单点测量,不适合于大尺寸红外材料的实时检测。超声显微方法是一种全视野、非破坏性的应力缺陷检测技术^[8],测量速度快、成本低,但必须采用耦合液耦合超声波,不适用于实时在线检测,并且容易二次污染样品。实际上,当应力缺陷存在时,会产生双折射现象。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,使出射光产生一个附加的延迟量。根据应力双折射效应,国内外开展了大量红外材料应力缺陷的光学测量方法,其中最广泛研究的是偏振补偿法和偏振调制法。偏振补偿法主要基于Senarmont补偿原理,在样品和检偏器之间插入一个1/4波片,通过旋转检偏器观测偏振角度来实现应力测量^[9]。偏振补偿测量方法具有仪器结构简单,测量孔径大等优势。但通过机械旋转检偏器、波片的应力测量,无法满足高精度应力测量需求。偏振调制法基于法拉第旋光器、电光调制器、弹光调制器等。相较于其他偏振调制方法,弹光调制技术具有宽光谱范围、高调制频率、大通光孔径、高调制纯度、工作稳定等应用优势^[10-12]。Wang等采用弹光调制技术实现了应力双折射延迟量和快轴方向同时测量。测量灵敏

度高,速度快,但数据处理需配置多个锁相放大器,测量操作复杂,成本昂贵。然而,最为遗憾的是目前还没有解决同时满足Si、Ge、GaAs等红外材料应力缺陷测量技术方法。

综上,本文利用弹光偏振调制技术优势,将弹光调制器工作控制及测量数据的处理在同一个现场可编程逻辑门阵列(Field programmable gate array, FPGA)实现,开展双弹光级联的差频调制研究,并应用于红外材料应力缺陷快速、高精度测量。

1 测量原理

当红外材料存在应力缺陷时,应力缺陷会造成入射光的双折射现象。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,使出射光产生一个光程差^[13]。该光程差称之为应力双折射延迟量,描述为

$$R = Cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

其中, C 为红外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。通常将较小主应力方向设为快轴方向。由式(1)可知,当红外材料种类和厚度确定时,应力双折射延迟量与受到应力大小成正比。因此,应力双折射延迟量能够直接用来表征应力缺陷情况,快轴方向表征了应力缺陷的取向。将红外材料中应力双折射延迟量和快轴方位角进行测试,便能够对应力缺陷大小、方向等进行评估分析,为规避或消除应力缺陷,实现低缺陷红外材料生产和筛选提供有效手段。相较其他光学测量方法,本文利用弹光调制技术应用优势,设计应力双折射延迟量和快轴方位角同时测量方法,基本原理如图1所示。

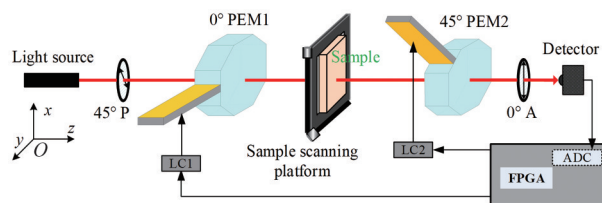


图1 应力缺陷测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of stress defect measurement system

如图1所示,检测光源依次经过起偏器(P),弹光调制器1(PEM1),待测样品,弹光调制器2(PEM2),再经过检偏器(A)出射被探测器探测。以PEM1和PEM2两个弹光调制器为核心级联工

作,构成偏振分析系统。起偏器透光轴方向、PEM调制快轴和检偏器透光轴方向依次设置相差 45° 。待测红外材料样品固定在二维电动扫描平移台上,通过扫描样品完成样品整个面上的应力缺陷分布测量。检测光信号采用Stokes矢量描述,起偏器、PEM、样品和检偏器等偏振传输特性采用Muller矩阵描述^[14]。检测光信号经整个检测系统到达探测器前的传输过程,采用Stokes矢量和Muller矩阵描述为

$$S_{\text{out}} = M_A M_{\text{PEM2}} M_{\text{sample}} M_{\text{PEM1}} M_P S_{\text{in}}, \quad (2)$$

其中, 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 $S_{\text{in}} = I_0 [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$,其中 I_0 入射总光强。 M_P 和 M_A 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。根据图1中,起偏器透光轴方向、PEM调制快轴和检偏器透光轴方向设置方位角度,它们的偏振传输特性的Muller矩阵可进一步表示为

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

上式中, ρ 表示为应力双折射的快轴方位角, X 为应力双折射相位延迟量,考虑检测光波长 λ ,结合式(1),相位延迟量 $X = 2\pi R/\lambda = 2\pi Cd(\sigma_1 - \sigma_2)/\lambda \Delta n = \lambda X/(2\pi d)$ 。将式(3)和式(4)表述的偏振器、PEM和样品的Muller矩阵,连同入射光的Stokes矢量代入式(2),并考虑探测器能够探测到的光强为Stokes矢量的第一个分量,求解获得探测器探输出的检测光强为

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \sin(4\rho) \sin^2(\frac{X}{2}) + \sin \delta_1 \sin \delta_2 \cos X + \cos \delta_1 \sin \delta_2 \cos(2\rho) \sin X + \sin \delta_1 \cos \delta_2 \sin(2\rho) \sin X) \quad (5)$$

两个PEM调制相位项 $\sin \delta_i = \sin(\delta_{i0} \sin \omega_i t)$ 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得: $\sin \delta_i = 2 \sum_{2k-1} J_{2k-1}(\delta_{i0}) \sin((2k-1)\omega_i t)$ 和

$$\left\{ \begin{array}{l} M_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{和} \\ M_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ M_{\text{PEM1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & 0 & -\sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \\ M_{\text{PEM2}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & 0 & -\sin \delta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \delta_2 & 0 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

其中 δ_1 和 δ_2 是PEM1和PEM2的调制相位,分别表示为 $\delta_1 = \delta_{10} \sin \omega_1 t$ 和 $\delta_2 = \delta_{20} \sin \omega_2 t$,其中 δ_{10} 和 δ_{20} 分别表示两个PEM的调制相位幅值, ω_1 和 ω_2 分别表示两个PEM的频率。为了能够同时实现应力双折射延迟量和快轴方位角的同时测量,两个级联工作的PEM谐振频率设置不一致($\omega_1 \neq \omega_2$),构成差频调制测量系统。同其他应力引入的双折射效应一样,红外材料存在应力缺陷时造成的双折射可以用Muller矩阵将其偏振传输特性描述为^[15]

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

$\cos \delta_i = J_0(\delta_{i0}) + \sum_{2k} 2J_{2k}(\delta_{i0}) \cos(2k\omega_i t)$, $k = 1, 2, \dots$ 为正整数, J_0 、 J_{2k-1} 和 J_{2k} 分别代表第0阶,第 $2k-1$ 阶,第 $2k$ 阶贝塞尔级数,PEM1和PEM2分别对应 $i=1$ 和2。取低阶贝塞尔级数,式(5)可改写为

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + (J_0(\delta_{10}) + 2J_2(\delta_{10}) \cos(2\omega_1 t)) \cdot (J_0(\delta_{20}) + 2J_2(\delta_{20}) \cdot \cos(2\omega_2 t)) \sin(4\rho) \sin^2(\frac{X}{2}) + 4J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos X + (J_0(\delta_{10}) + 2J_2(\delta_{10}) \cos(2\omega_1 t)) \cdot (2J_1(\delta_{20}) \sin(\omega_2 t)) \cdot \cos(2\rho) \sin X + (J_0(\delta_{20}) + 2J_2(\delta_{20}) \cos(2\omega_2 t)) \cdot (2J_1(\delta_{10}) \sin(\omega_1 t)) \sin(2\rho) \sin X) \quad (6)$$

由式(6)分析可知,和样品应力双折射相关项 $\sin(4\rho) \sin^2(X/2)$ 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 $\omega_2, 2\omega_1 + \omega_2$ 和 $2\omega_1 - \omega_2$ 等频率信号中,相关项 $\sin(2\rho)\sin X$ 包含在 $\omega_1, 2\omega_2 + \omega_1$ 和 $2\omega_2 - \omega_1$ 等频率信号中。

在本测量系统中,采用FPGA控制PEM工作,同时,通过FPGA控制AD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PEM的基频信号幅值 V_{ω_1} 和 V_{ω_2} , 和差频信号幅值 $V_{\omega_2 - \omega_1}$,

$$\begin{cases} V_{\omega_1} = I_0 J_0(\delta_{20}) J_1(\delta_{10}) \sin(2\rho) \sin X \\ V_{\omega_2} = I_0 J_0(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \cos(2\rho) \sin X \\ V_{\omega_2 - \omega_1} = I_0 J_1(\delta_{10}) J_1(\delta_{20}) \cos X \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)获得的不同频率信号幅值,定义两个比值 η_I 和 η_{II} 为

$$\begin{cases} \eta_I = \frac{V_{\omega_1} J_1(\delta_{20})}{V_{\omega_2 - \omega_1} J_0(\delta_{20})} = \sin(2\rho) \tan X \\ \eta_{II} = \frac{V_{\omega_2} J_1(\delta_{10})}{V_{\omega_2 - \omega_1} J_0(\delta_{10})} = \cos(2\rho) \tan X \end{cases} \quad (8)$$

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

$$\begin{cases} \rho = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\eta_I}{\eta_{II}}\right) \\ X = \arctan\left(\sqrt{\eta_I^2 + \eta_{II}^2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

通过两个PEM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 $V_{\omega_2 - \omega_1}$ 提取,能够有效消除光强波动影响,同时实现应力双折射相位延迟量和快轴方位角测量。考虑入射光波长 λ , 获得应力双折射延迟量 $R = \lambda X / 2\pi$ 。将红外材料的应力光学系数 C 、材料厚度 d 和延迟量 R 代入式(1), 进一步反演求解出红外材料中的应力缺陷。

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{R}{Cd} \quad (10)$$

2 实验

按照原理图1搭建了实验系统,检测光源选用PLASMA公司生产GNIK-3-2型氦氛激光器,波长 $3.39 \mu\text{m}$, 光功率 1.5 mW , 光斑尺寸为 2 mm ; 起偏器和检偏器选用福州美扬光电有限公司生产的洛匈偏振棱镜,消光比优于 $10^5:1$; 探测测器选用Thorlabs公司生产的PDAVJ5型碲镉汞光电探测器,响应波长范围为 $2.7\sim 5.0 \mu\text{m}$, 带宽为 1 MHz , 响应度为 1 A/W 。两个PEM均为我们自行研制的八角对称状结构PEM, 通光晶体选用熔融石英晶体, 压电驱动器为压

电石英晶体。PEM1和PEM2的熔融石英晶体尺寸分别为 $54.2 \text{ mm} \times 54.2 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 和 $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$, 谐振频率为 44.91 kHz 和 49.99 kHz 。样品扫描平台为武汉红星扬科技有限公司生产的精密二维电动扫描平移台, XY 行程 $150 \times 150 \text{ mm}$, 最大扫描速度 6 mm/s , 定位精度 $50 \mu\text{m}$ 。

PEM驱动控制及数据处理模块是以FPGA芯片为核心加工制作, FPGA芯片型号为Altera EPC IV。FPGA的DDS模块提供PEM谐振工作的方波源信号, 经电感电容(LC)谐振放大电路放大后驱动PEM正常工作。调制光信号经光电探测器探测, 采用12位ADC转换后输入FPGA数字锁相数据处理模块^[16-17], 基频信号幅值 V_{ω_1} 和 V_{ω_2} , 和差频信号幅值 $V_{\omega_2 - \omega_1}$ 信号经数字锁相数据处理后同时提取, 数字锁相周期设置为差频信号 $\omega_2 - \omega_1 = 5.08 \text{ kHz}$ 的1016个周期, 每间隔 200 ms 测量一个数据点。根据式(5)~式(7)分析可知, 为了使基频信号和差频信号强度较大, 提高测量信噪比和准确性, 第0和1阶贝塞尔级数 J_0 和 J_1 需同时取到较大值, 实验中将两个弹光调制器的驱动电压分别设置在 188 V 和 191 V 时, 两PEM的相位调制幅值 δ_{10} 和 δ_{20} 达到 1.435 rad 。

2.1 采用波片进行系统精度和重复性定标

首先, 验证和测试系统初始值。不放置任何样品, 实验系统正常工作, 样品扫描平台停止, 检测光信号受到两个PEM调制, 将调制光强信号进行数字锁相数据处理, 记录约 5 min 时长, 约 1500 组测量数据, 测量获得的基频信号幅值 V_{ω_1} 和 V_{ω_2} , 和差频信号幅值 $V_{\omega_2 - \omega_1}$ 记录如图2所示。

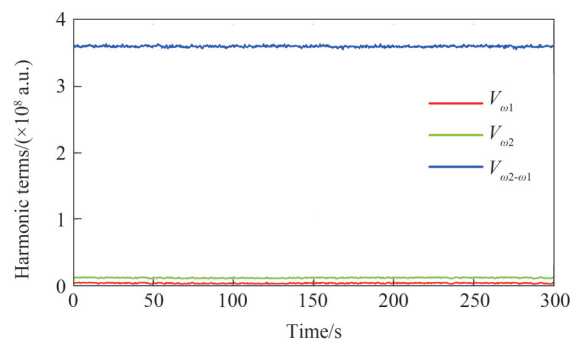


图2 调制光信号数字锁相结果(无样品)

Fig. 2 Digital phase lock result of modulation light signals (without sample)

无样品时, 两个弹光调制的基频信号幅值 V_{ω_1} ($\bar{V}_{\omega_1} = 3.5 \times 10^6 \text{ a.u.}$) 和 V_{ω_2} ($\bar{V}_{\omega_2} = 1.15 \times 10^7 \text{ a.u.}$)

数字锁相获取的差频信号幅值 $V_{\omega_2 - \omega_1}$ ($\bar{V}_{\omega_2 - \omega_1} = 3.599 \times 10^8$ a. u.), 差频信号幅值远大于基频信号幅值, 计算获得两个基频信号与差频信号分别为 $\bar{\eta}_I = 0.01$ 和 $\bar{\eta}_{II} = 0.03$, 比值较小。实际上, 无样品时, 两个比值应趋近于 0, 造成上述情况主要是两个 PEM 的自身存在微小剩余双折射造成的, 但本文通过优选 PEM 尽可能地减小 PEM 剩余双折射对测量结果造成的误差。另一方面, 为了能够实现样品较高精度的应力双折射测量, 本文将上述两个基频信号与差频信号比值当作系统初始偏移值处理, 在实际测量样品时, 获得的信号比值都需要减去系统初始偏移值, 尽可能减小或消除系统测量误差。

为了确定本文系统的测量精度和重复性, 论文首先选用一个工作波长为 3 400 nm 的中红外零级波片作为样品, 测试过程中实验室的温度设置为 23 °C, 整个实验过程实验室温度波动不超过 0.1 °C。中红外零级波片为武汉优光科技有限责任公司生产的 IRW-MgF2-WPO-3400-1/4 25.4 型中红外零级波片, 延迟量精度优于 $\lambda/100$ 。波片安装在武汉优光科技 APRO-25 偏振器调整架中, 角度旋转精度 0.5°。将安装在调整架中的波片放置在扫描平台中部位置, 让检测激光通过波片的中心位置, 并且将波片快轴方位角调节至 22.5°方位上。

系统测量信号经数字锁相获得的信号幅值记录如图 3 所示。

由图 3(a)可以看出, 差频信号幅值很小, 几乎为 0, 两个基频信号幅值 V_{ω_1} 和 V_{ω_2} 很大, 并且数值接近。将数字锁相获得的信号幅值代入式(8), 并减去无样品时系统初始偏移值, 获得的信号比值连同贝塞尔级数代入式(9), 进一步求解获得波片的快轴方位角和延迟量两个参数, 如图 3(b)和(c)。测试记录了约 2 h, 约 36 000 个测试数据点。

进一步计算获得 36 000 次测量数据的波片快轴方位角均值为 $\bar{\rho} = 22.55^\circ$, 标准偏差为 $\sigma_\rho = 0.31^\circ$, 波片延迟量均值为 $\bar{R} = 842.51$ nm, 标准偏差为 $\sigma_R = 0.72$ nm。波片延迟量值与理论值 ($3\,400/4=850$ nm) 偏差 7.49 nm, 满足生产厂商延迟精度 $\lambda/100$ (约 34 nm@ $\lambda=3\,390$ nm) 的出厂要求。此外, 方位角和延迟量测量标准偏差较小, 表明本文测量系统具有较好的稳定性和重复性。

2.2 Ge 晶体样品测试实验

为了进一步实验验证本文方案红外材料应力缺陷的测量可行性, 样品选用一块 Ge 晶体样品, 晶

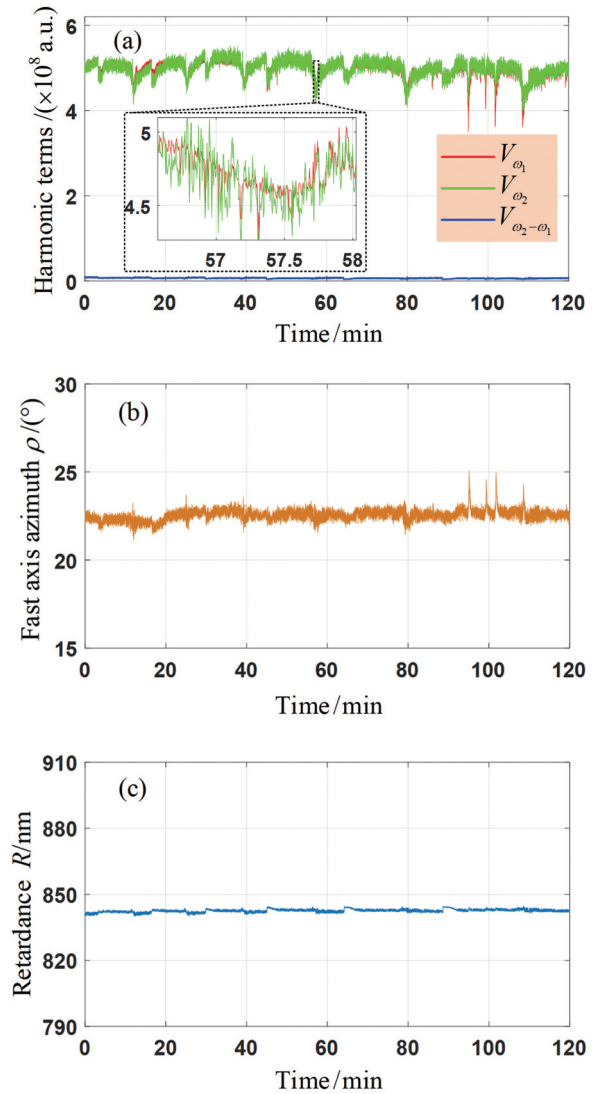


图 3 1/4 波片测试结果: (a) 倍频幅值; (b) 快轴方位角; (c) 延迟量

Fig. 3 Measurement results of 1/4 waveplate: (a) amplitude of the harmonic terms; (b) fast axis azimuth; (c) retardance

体切向为 (100) 方向, 晶体样品双面抛光, 样品的直径为 $\Phi 30$ mm, 厚度为 6 mm。

首先, Ge 晶体样品放置在样品夹持夹具上, 夹具刚好支撑住 Ge 晶体样品, 不产生过多的夹持力。初始时检测激光刚好从样品中心通过, 然后调节扫描平台扫描 30 mm \times 30 mm 区域, 并记录每次扫描空间点的测量数据。样品如图 4(a) 所示, 测量获得的应力双折射延迟量分布实验结果如图 4(b) 所示。

由实验结果能够看出, 整个 Ge 样品的应力双折射延迟量较小, 整个 30 mm 的孔径上应力双折射延迟量平均值为 16.71 nm, 其中样品有三个区域应力稍大, 在 (84, 62) mm 位置存在最大应力双折射延迟量为 25.92 nm。

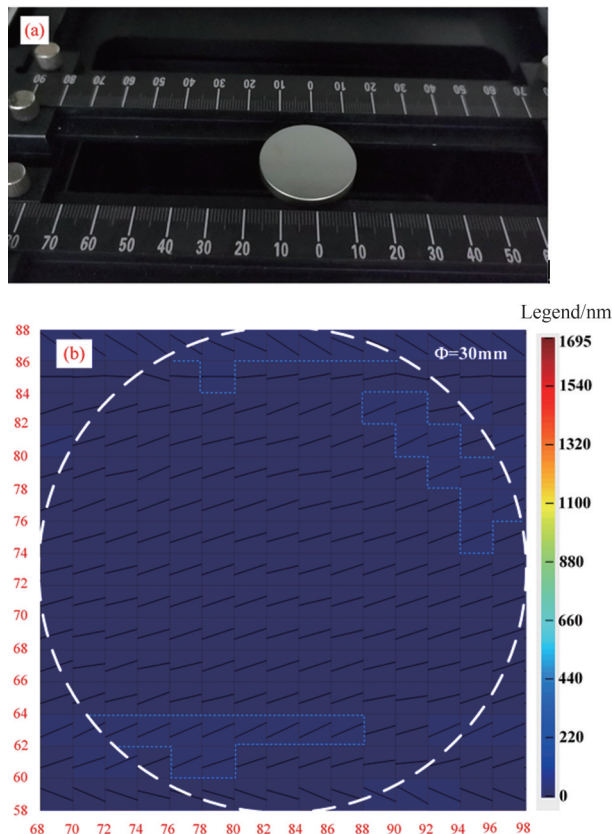


图4 Ge样品的应力双折射延迟量二维分布测试结果:(a) Ge样品;(b)应力双折射延迟量分布

Fig. 4 stress birefringence retardation two-dimensional distribution of Ge sample: (a) Ge sample; (b) results of stress birefringence retardation distribution

为了进一步观测明显的应力缺陷分布,本文设置了应力夹具,如图5(a)所示,通过夹具边缘的松紧螺钉给Ge样品施加力,施加一定力后其应力双折射延迟量分布测量结果如图5(b)所示。

由实验结果能够看出,通过松紧螺钉施加力后,Ge样品整个孔径上的应力双折射延迟量增加,且螺钉位置和夹具支撑位置处应力较大。从测量的应力双折射延迟量分布图还能看出应力朝向分布,施加力后,应力双折射的快轴方位角在施加力的轴线两侧对称分布,且在逐渐趋于垂直,最后在样品中部垂直与施加力的轴线。

3 实验结果与讨论

结合Ge样品的应力光学常数还能够进一步反演计算出应力大小,其中应力光学常数

$$C = \frac{1}{2} n_0^3 (q_{11} - q_{12}) \quad , \quad (11)$$

其中, n_0 为折射率, q_{11} 和 q_{12} 为压光系数,针对波长为

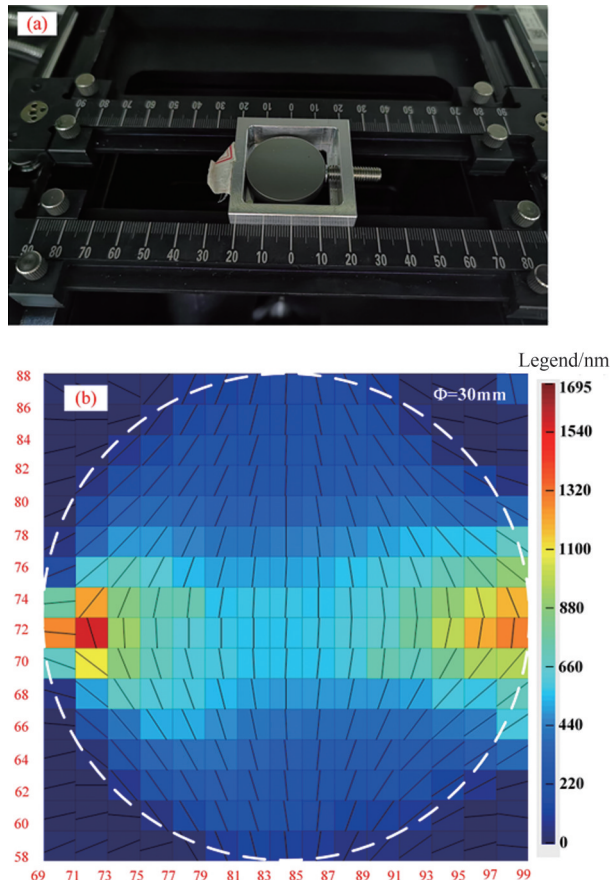


图5 施加力后的Ge样品的应力双折射延迟量二维分布测试结果:(a)Ge样品;(b)应力双折射延迟量分布

Fig. 5 stress birefringence retardation two-dimensional distribution of Ge sample after applying force: (a) Ge sample; (b) results of stress birefringence retardation distribution

3.39 μm 的检测激光波长,Ge的折射率为 $n_0 = 4.0347^{[18]}$,压光系数分别为 $q_{11} = -0.79 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$ 和 $q_{12} = -0.51 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$,代入式(11),计算获得 $C = -9.1952 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1[19]}$ 。

根据测量获得的应力双折射延迟量分布结果,能够进一步将位置数据,测量延迟量和快轴方位角数据提取出。如图5,将施加力后应力较集中的中部轴线位置30 mm \times 2 mm区域测量数据记录入表中,将延迟量、样品厚度和应力光学常数代入式(10),还能够进一步计算得出应力值。

由表1记录数据,结合图5能够看出,样品边缘和螺钉、夹具接触位置应力较大,并且由边缘至中心力的方向逐渐趋于同一方向,应力延迟量快轴方位方向垂直与施加力的方向。

4 结论

本文以两个频率不同的PEM为核心搭建了差

表 1 Ge 样品应力双折射延迟量测量数据

Table 1 Measurement data of stress birefringence retardation in Ge samples

位置坐标 (x, y)/mm	快轴方位角/(°)	应力双折射延 迟量 R/nm	应力 $\Delta\sigma$ / (MPa)
(69, 70)	174.04	1 243.51	22.54
(71, 70)	108.74	1 536.50	27.85
(73, 70)	93.49	908.93	16.47
(75, 70)	93.46	686.39	12.44
(77, 70)	92.64	609.45	11.05
(79, 70)	92.18	568.44	10.30
(81, 70)	91.53	550.57	9.98
(83, 70)	90.49	554.07	10.04
(85, 70)	89.66	571.88	10.37
(87, 70)	88.55	602.16	10.91
(89, 70)	87.25	654.49	11.86
(91, 70)	85.38	778.16	14.10
(93, 70)	81.55	978.35	17.73
(95, 70)	82.61	1 181.92	21.42
(97, 70)	85.74	1 270.75	23.03

频调制偏振分析测量系统,开展了红外材料的应力缺陷测量应用研究。红外材料应力缺陷引起的双折射,其延迟量和快轴方位角信息被加载到弹光调制信号中,利用数字锁相技术,完成了双 PEM 的差频信号和基频信号解调,最后完成了应力双折射两个参量测量,并且采用了二维电动扫描平移台推扫样品来实现应力分布测量。论文详细地分析了测量原理,按照原理分析研制了测试系统装置并完成了实验验证。实验完成了系统初始偏移值定标,有效地消除了 PEM 自身微小剩余双折射的影响;采用红外波片作为标准样品完成了测量系统测量精度和重复性测试,快轴方位角标准偏差为 $\sigma_p = 0.31^\circ$, 延迟量标准偏差为 $\sigma_R = 0.72 \text{ nm}$, 表明本文方案具有较好的稳定性和重复性。采用 Ge 样品进行了应力双折射延迟量二维分布测试,验证了本文方案的应力双折射二维分布测量能力。此外,本文方案单数据点测量时间在 ms 量级。本文方案实现了高速、高重复的应力缺陷双折射测量,可为 Si、Ge、GaAs 等材料的应力缺陷分析和评估提供有效手段。

References

[1] William J T, Michael E T, Paul K. Infrared optical materials [J]. *Proceedings of SPIE - Inorganic Optical Materials: A Critical Review*, 1996, **10286**: 102860A-1-33.
 [2] Joshua L L, Vlachos D G. Infrared spectroscopy data- and physics-driven machine learning for characterizing surface microstructure of complex materials [J]. *Nature communi-*

Cations, 2020, **11**(1): 1-12.

- [3] Pradhan J, Swain S K, Pattnaik S R, et al. Potentials of GaP as millimeter wave IMPATT diode with reference to Si, GaAs and GaN [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2019, **38** (4): 395-402.
 [4] Rodriguez J B, Cerutti L, Tournié E. GaSb-based, 2.2 μm type-I laser fabricated on GaAs substrate operating continuous wave at room temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(2): 1875.
 [5] Vidya G, Stephan S, Sergio C, et al. Infrared birefringence imaging of residual stress and bulk defects in multicrystalline silicon [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108** (6): 063528.
 [6] 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.
 [7] Tsai C J, Dommann A, Nicolet M A, et al. Self-consistent determination of the perpendicular strain profile of implanted Si by analysis of x-ray rocking curves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, **69**(4): 2076-2079.
 [8] Wang S K, Lee C C, Tsai C S. Nondestructive visualization and characterization of material joints using a scanning acoustic microscope [J]. *Ultrasonics Symposium*, 1977, 171-175.
 [9] Horn G, Lesniak J, Mackin T, et al. Infrared grey-field polariscope: A tool for rapid stress analysis in microelectronic materials and devices [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**(4): 045108-1-10.
 [10] 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*. (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.
 [11] Wang B, List J. Basic optical properties of the photoelastic modulator: Part I. Useful aperture and acceptance angle [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5888.
 [12] Wang S, Han X, Wang Y, et al. Dispersion of the retardation of a photoelastic modulator [J]. *Applied Sciences*. 2019, **9**(2): 341.
 [13] Scafidì M, Pitarresi G, et al. Review of photoelastic image analysis applied to structural birefringent materials: glass and polymers [J]. *Optical Engineering*, 2015, **54** (8): 081206.
 [14] Liao Yanbiao Polarization optics [M] Beijing: Science Press, (廖延彪. 偏振光学. 北京: 科学出版社), 2003: 51-62.
 [15] Zeng A, Li F, Zhu 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.
 [16] 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*. (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.

-
- [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] John H B, Simon G K, Eric S, *et al.* Refractive index measurements of Ge [J]. *Proceedings of SPIE – Infrared Sensors, Devices, and Applications*, 2016, 99740X.
- [19] Feldman A, Waxler R M, Horowitz D. Photoelastic constants of germanium [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, **49**(4): 2589–2590.