第 39 卷 第 5 期
2024 年 10 月

实 验 力 学
JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS

Vol. 39 No. 5
Oct. 2024

文章编号:1001-4888(2024)05-0647-12

基于双波长红外光弹的全场内部应力自动分析技术*

杜义涛[1],何全燕[1],王苗菁[1],仇巍[1,2]

(1. 天津大学 机械工程学院力学系,天津 300354;2. 天津市现代工程力学重点实验室,天津 300354)

摘要:红外光弹法能够实现半导体材料内部应力的无损、全场表征。现有的红外光弹去包裹方法都需要一些手动干预,这成为制约红外光弹法实用于半导体应力在线检测的关键因素。本文提出了一种基于双波长红外光弹的全场内部应力自动分析技术,即双波长种子点自动识别法。该技术根据样品各点在不同波长下的相位变化趋势,解析其中所包含真实相位值的符号和绝对值信息,自动识别出相位去包裹所需要的初始种子点,从而避免了图像分析过程中的人工介入。本文围绕所提出的技术研制了双波长红外光弹实验装置,并利用该装置开展了单晶硅样品内部应力场的实验测量。将实验结果与已有方法进行对比,验证了本文提出方法及装置用于全自动分析复杂应力全场分布的可靠性。

关键词:红外光弹;双波长;半导体;内部应力;自动光弹分析

中图分类号:O348.1 **文献标识码**:A DOI:10.7520/1001-4888-23-244

0 引言

以硅为代表的半导体材料是构成传统半导体器件以及无机柔性电子器件的重要组成部分。在半导体加工、封装和服役过程中,机械载荷、减材刻蚀、镀膜光刻等工艺均会在结构内部引入复杂的、时序相关的工艺残余应力,进而影响半导体器件的功能、可靠性及寿命[1]。因此,为了在制造流程中实现半导体结构力学性能的实时监测,需要发展适用于半导体材料内部应力表征的、高效全自动的实验方法及其装备。

红外光弹法基于应力双折射效应,并借助红外光在半导体材料中的高透射率,能够实现不透明半导体材料内部应力的全场、无损测量[2]。其中,相位提取是采用红外光弹法获取全场应力的必要环节,也是关系到该技术能否实现全自动分析的关键。半导体结构的光弹性条纹虽然整体上稀疏,但在局部区域密集,而这种局部区域上的相位梯度大的情况,给相位精准提取造成了困难[3]。为此,相关领域学者分别从图像分析算法与测试光路原理两方面入手,发展了多种适于光弹(特别是红外光弹)的方法与技术,提高了等倾角和等色相位的分辨率、精度和自动化程度[4-6]。

围绕图像分析算法的研究中,在相移技术方面,PRASATH 等[7]研究发现十步相移法相比六步相移法,其对红外光弹中低量级相位延迟的敏感度更低,在低应力下能够获得更高精度的等倾角。DING 等[8]和富东慧等[9]提出了多步相移拟合法,其应用实验证明该方法相比其他方法更适于分析小幅值、大梯度应力场。去包裹技术方面,自动(不需要人为干预)的相位去包裹是数字光弹法的研究重点之一。

* **收稿日期**:2023-11-22;**修回日期**:2024-01-25
基金项目:国家自然科学基金项目(12125203,12021002,12041201)
通信作者:仇巍(1978-),男,博士,教授。主要研究领域:实验固体力学。Email:qiuwei@tju.edu.cn

为此，相继发展了诸如RGB光弹[10]、三条纹光弹[11]以及彩色域相移[12]等利用光谱差异性(彩色信息)引导确认等色线条纹级数的方法。这些方法在以可见光为光源的光弹测量中展现出较好的效果，但并不适用于通常仅能够获得灰度图像的红外光弹，故而，采用路径算法的去包裹技术目前仍是红外光弹的主要相位提取手段[13]。例如，RAMJI等[14]和ASHOKAN等[15]提出了自适应的质量图引导路径算法，按照每个像素点的质量值指导去包裹的扫描路径，在分析复杂应力场的光弹图像中体现出较高的鲁棒性。然而，此类方法依赖于操作人员的人为干预，需根据先验知识或受力分析判断等倾角是否属于第一主应力，并在等倾图和等差图中指定相位去包裹的初始种子点，难以满足全自动相位提取的测量需求。

从测试光路原理层面入手，也是突破光弹图像自动化相位提取瓶颈的重要途径，其中多波长方法是一种重要的技术。例如，BUCKBERRY等[16]使用3个特定波长的单色光作为光源，从而改变了部分包裹相位值的符号，使得去包裹时更容易识别出相位突变的点。NURSE[17-18]使用白光光源和彩色CCD相机改进了BUCKBERRY等所提方法的实验装置，降低了噪声对去包裹的影响。PLOUZENNEC等[19]采用双波长的光路，通过对比2个波长下的等差图来识别零级条纹的位置，但该技术在无零级条纹时失效。CHEN[20]设计了一种双波长的探测方法，根据样品上同一点在不同波长下具有相同应力状态的特点，可直接得到等差线的全局条纹级数。KIHARA[21]分析了发展三波长方法的可行性，指出三波长的测量范围比双波长更大，同时在整数级条纹处得到的等倾角精度更高。YONEYAMA等[22]根据相位在不同波长下的大小关系，实现了含包裹等倾图的相位识别。

以上多波长方法在可见光光弹中取得了较好的应用效果，但应用于红外光弹时则遇到了困难。其主要原因是，现有方法的相位自动提取过程和结果对应力光学系数的标定精度具有较强的依赖性；同时，由于涉及多个波长下多幅光弹图像对应像素的逻辑运算，多波长方法对图像的原位性与噪声水平的需求均较为苛刻。然而，与可见光相比，红外光(通常是800nm～1500nm的近红外区间)相关的光学元件，其透射率、偏振性、色差、相差等关键技术指标难以达到可见光波段对应器件的水平，而红外相机的灵敏度、量子效率以及信噪比远低于可见光波段的工业相机。这些因素不仅导致红外光弹图像的原位性与噪声水平均较差，更使得不同波长标定的应力光学系数精度难以一致。基于上述分析可知，现有的红外光弹方法在相位处理阶段，特别是去包裹环节难以兼顾精度与自动化。

本文面向硅基半导体结构的全场内部应力自动分析，提出了基于红外光弹的双波长种子点自动识别法(Automatic Seeds Identification for Dual Wavelengths, ASIDW)，通过图像光强值关于材料条纹常数的变化率直接判断去包裹种子点的正确位置，在保证测量精度的基础上实现了红外光弹图像相位提取的全自动处理；并通过实验验证了所提方法的可行性及相关装置的可靠性。

1 材料与实验

本文围绕基于双波长红外光弹的应力自动分析方法，开展四点弯曲实验标定材料的应力光学系数，并通过三点弯曲实验验证方法的可行性。实验采用了广州方导半导体公司生产的双面抛光单晶硅样品，P型掺杂，晶面为(111)，厚度为0.525mm，电阻率大于0.02Ω·cm。在4英寸(约10.16cm)原片上切割出尺寸为48.0mm×5.0mm×0.525mm的硅片，尺寸公差为±0.1mm。四点弯曲和三点弯曲实验的加载装置如图1所示，矩形线框内为观测区域，H为样品高度，F为载荷大小，L_1、L_2分别为上压头之间的距离和下压头之间的距离。

本文设计并搭建了一套可以切换多个波长单色光的红外光弹实验装置，其光路组成和光机装配如图2所示。图中，定义起偏镜和检偏镜的偏振轴P轴相对于参考系x轴方向的角度分别为α和β；第一1/4波片和第二1/4波片的快轴F轴与x轴的夹角分别为γ和ξ；样品上任意一点的第一主应力方向与x轴的夹角为θ。将钨卤素灯作为光源，准直扩束器用于光束准直、光场尺寸调节，窄带滤光片用于形成单色光束。在圆偏振光场下，单色光束依次通过起偏镜、第一1/4波片、样品、第二1/4波片和检偏镜，最终经过镜头到达CCD相机。在平面偏振光场下，2个1/4波片均被移走。考虑到红外光在硅中的透过率以及CCD相机的光谱灵敏度，选用的窄带滤光片中心波长分别为1064nm和1156nm，半峰值带宽均为10nm，峰值透过率大于40%。起偏镜和检偏镜均选用适用波长为1050nm～1700nm的偏振片，2

种 1/4 波片的设计波长分别为 1064nm 和 1156nm，其相位延迟精度均为 λ/300（λ 为设计波长），所有光学元件均被放入笼式同轴系统中以保证光路的稳定性。显微镜筒使用的是 Navitar Zoom 6000 系列的连续变焦镜筒，工业相机使用的是 Baumer 公司的近红外增强 CCD 相机，型号为 TXG14NIR，其靶面尺寸为 2/3 英寸（约 1.69cm），分辨率为 1392pixel×1040pixel。

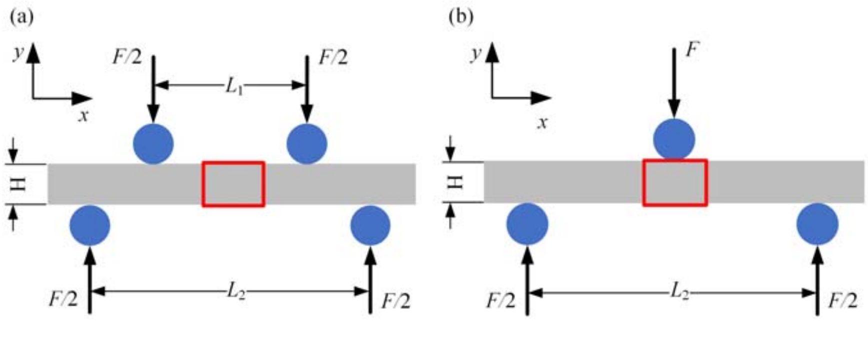

图 1　加载装置示意图：(a) 四点弯曲实验；(b) 三点弯曲实验

Fig. 1　Schematic diagram of loading apparatus: (a) four-point bending experiment; (b) three-point bending experiment

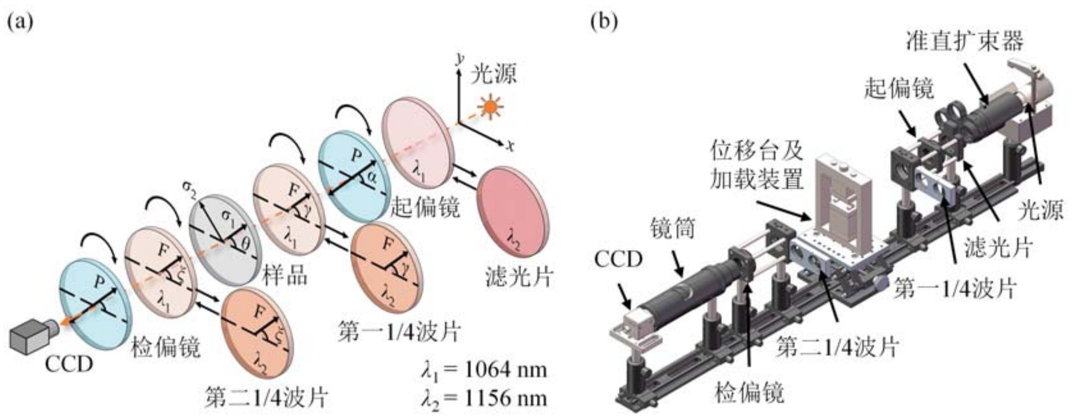

图 2　可切换多个波长的红外光弹实验装置：(a) 光路图；(b) 装配图

Fig. 2　Infrared photoelasticity experimental device with the ability to switch monochromatic lights of multiple wavelengths: (a) optical path diagram; (b) assembly diagram

如图 2 所示，在第一波长光学系统的设置下，光路中所有光学元件均适用于波长为 1064nm 的单色光；转换为第二波长时，首先旋转滤光片转轮切换窄带滤光片，随后更换装配有第二波长 1/4 波片的插条，此时光路中所有元件均适用于 1156nm。本文采用十步相移法[23]获取样品的光弹性参数，各光学元件的角度设置以及各步的光强等式见表 1。在四点弯曲标定实验中，首先采集 10 幅光弹图像，然后通过光弹性参数计算公式获得样品纯弯段各点的等色相位，再根据应力光学定律所描述的等色相位与主应力差的线性关系，得到材料在 2 个波长下的应力光学系数。在三点弯曲验证实验中，采用一致性方法[22]时，在 2 个波长单色光的设置下分别采集 10 幅图像；采用本文所提出的种子点自动识别方法时，在第二个波长设置下仅需采集 1 幅图像（即十步相移法中的第五步图像），减少了参与运算的图像数量。在 1064nm 和 1156nm 波长的单色光下，曝光时间分别设置为 0.2s 和 0.7s。

2　基于双波长种子点自动识别方法的红外光弹去包裹技术

2.1　单波长红外光弹应力分析方法

根据表 1 中所列出的十步相移法光强等式，可以通过式(1)和式(2)分别得到含包裹等倾角 θ_w 和含包裹等色相位 δ_w：

$$\theta_w = \frac{1}{4}\arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right) \tag{1}$$

$$\delta_w = \arctan\left[\frac{(I_9 - I_7)\sin 2\theta_r + (I_8 - I_{10})\cos 2\theta_r}{I_5 - I_6}\right] \tag{2}$$

式中:在计算含包裹等色相位 δ_w之前,应对含包裹等倾角 θ_w进行去包裹处理,获得去包裹等倾角 θ_r; $\theta_w \in [-\pi/4, \pi/4]$,$\theta_r \in [-\pi/2, \pi/2]$,$\delta_w \in [-\pi, \pi]$。含包裹等色相位 δ_w与去包裹处理后的等色相位 δ_r有以下关系:

$$\delta_r = \delta_w + 2\pi N \quad (N = 0,1,2,\cdots) \tag{3}$$

式中 N 为正整数。需要注意的是,由于式(1)的分子和分母同时存在 $\sin^2(\delta/2)$项,当等色相位为 2π的整数倍时,等倾值将计算错误。因此,去包裹等倾图需要经过多向平滑算法处理[24],以减轻等倾等差值耦合区域对测量精度的影响。

表 1 十步相移法各元件的角度设置以及各步的光强等式

Tab. 1 The rotation angle of each element and the corresponding light intensity expression of the ten-step phase-shift method

序号	α	γ	ξ	β	I
1	$\pi/2$	—	—	0	$I_1 = I_b + I_a\sin^2 2\theta\sin^2\frac{\delta}{2}$
2	$5\pi/8$	—	—	$\pi/8$	$I_2 = I_b + \frac{I_a}{2}(1-\sin 4\theta)\sin^2\frac{\delta}{2}$
3	$3\pi/4$	—	—	$\pi/4$	$I_3 = I_b + I_a\cos^2 2\theta\sin^2\frac{\delta}{2}$
4	$7\pi/8$	—	—	$3\pi/8$	$I_4 = I_b + \frac{I_a}{2}(1+\sin 4\theta)\sin^2\frac{\delta}{2}$
5	$\pi/2$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/2$	$I_5 = I_b + \frac{I_a}{2}(1+\cos\delta)$
6	$\pi/2$	$\pi/4$	$3\pi/4$	0	$I_6 = I_b + \frac{I_a}{2}(1-\cos\delta)$
7	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/2$	0	$I_7 = I_b + \frac{I_a}{2}(1-\sin 2\theta\sin\delta)$
8	$\pi/2$	$\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$I_8 = I_b + \frac{I_a}{2}(1+\cos 2\theta\sin\delta)$
9	$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi/2$	0	$I_9 = I_b + \frac{I_a}{2}(1+\sin 2\theta\sin\delta)$
10	$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$I_{10} = I_b + \frac{I_a}{2}(1-\cos 2\theta\sin\delta)$

根据应力光学定律,不同波长下等色相位与主应力差的关系为

$$2\pi t(\sigma_1 - \sigma_2) = \delta_r\frac{\lambda}{C} = \delta_r f \tag{4}$$

式中:t 为样品厚度;$(\sigma_1 - \sigma_2)$为平面应力状态下的主应力差;λ 为单色光的波长;C 为应力光学系数,其大小随入射光波长的变化而有所差异。光弹性材料条纹常数 $f=\lambda/C$,单位为 N/mm,其大小只与材料性质和入射光波长有关,常用于表示材料的光学灵敏度[25-26]。

单波长红外光弹图像相位去包裹处理的一般流程如图 3 所示。采用质量图引导路径算法能够抑制误差的累积和传播,但通常需要指定一个初始种子点作为路径的起点,算法将根据该点修正路径上其余点的相位,直至遍历全场[14]。在等倾图去包裹中,种子点的等倾角应表示第一主应力方向;在等差图去包裹中,种子点应为全场中等色相位最小的点。

2.2 双波长红外光弹应力自动分析方法

双波长一致性方法[22]不通过路径扫描算法处理含包裹等色相位 δ_w,从而避免了种子点的人为判断。根据式(4)可知,由于不同波长下样品应力状态保持不变,因此每个波长下的去包裹等色相位 δ_r与材料条纹常数 f 的乘积恒定。结合公式(3),定义误差函数 E 为

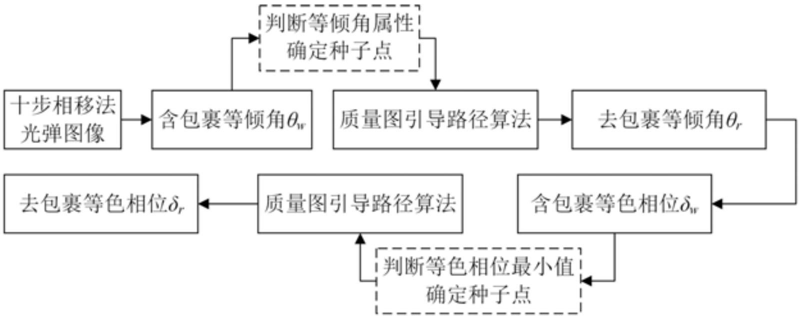

图 3　采用路径扫描算法进行相位去包裹处理流程图

Fig. 3　Flow chart of phase unwrapping by using the path algorithm

$$E=[(\delta_{w1}+2\pi N_1)f_1-(\delta_{w2}+2\pi N_2)f_2]^2 \tag{5}$$

式中，下标 1 和 2 分别表示对应的第一和第二波长。根据误差平方和最小准则可以自动搜索出 E 值最小时所对应的正整数值 N_1 和 N_2，实现等色相位的自动去包裹。

本文基于双波长的红外光弹提出了种子点自动识别方法，该方法通过质量图引导路径算法处理包裹相位，与单波长方法不同的是，种子点自动识别方法通过分析相位在不同波长下的变化趋势自动确定种子点的位置，实现了图 3 虚线框所示环节的自动实施，具体分析过程如下。

理论上，未包裹的等倾角范围为$[-\pi/2,\ \pi/2]$。利用式(1)计算等倾角时，由于涉及反正切函数运算，在$[\pi/4,\ \pi/2]$范围内的等倾角被包裹在$[-\pi/4,\ 0]$内，在$[-\pi/2,\ -\pi/4]$范围内的等倾角被包裹在$[0,\ \pi/4]$内，在$[-\pi/4,\ \pi/4]$范围内的等倾角则不会被包裹。因此，若将式(1)的结果 θ_w直接代入式(2)，并将结果标记为 δ_{w0}，则含包裹等倾角会导致式(2)分子的符号发生变化，进而导致 δ_{w0}与含包裹等色相位 δ_w的符号相反。若能检测到等色相位发生反号，即可识别出等倾值被包裹的点。

由表 1 可知，十步相移法中第五步图像上各点的理论光强值为

$$I_5(f)=I_b+\frac{I_a}{2}[1+\cos\delta_r(f)] \tag{6}$$

式中：I_b为实验环境的背景光强；I_a为从起偏镜出射的光矢量振幅的比例常数。当样品的应力状态不变时，光强值 $I_5(f)$仅与样品在不同波长下的材料条纹常数 f 有关。采用两点差分法(即利用函数在 2 个相邻点之间的斜率近似求解导数，并通过设定自变量增量或步长控制计算精度)计算光强函数 $I_5(f)$关于 f 的变化率 K：

$$K=\frac{I_5(f_{i+1})-I_5(f_i)}{f_{i+1}-f_i}\approx\frac{\mathrm{d}I_5(f)}{\mathrm{d}f}=\frac{I_a}{2}\cdot\frac{1}{f}\cdot\delta_r(f)\cdot\sin\delta_r(f) \tag{7}$$

式中，f_i为待测样品在第 i 个波长下的材料条纹常数。等色相位被包裹在$[-\pi,\ \pi]$范围内时，并不会影响其正弦值，即 δ_r变为含包裹等色相位 δ_w时，$\sin\delta_w(f)$与 $\sin\delta_r(f)$恒等。结合 $\delta_r(f)$恒为正可知，变化率 K 与 $\sin\delta_w(f)$、$\delta_w(f)$的符号相同，因此，将受含包裹等倾角影响的含包裹等色相位 $\delta_{w0}(f)$的符号与 K 的符号对比，若不相同则表明 $\delta_{w0}(f)$与 $\delta_w(f)$反号，该点的等倾值代表第二主应力方向，需要根据等倾值符号增/减 $\pi/2$，使其变为第一主应力方向；反之，则该点的等倾值无需去包裹处理。

在实际应用中，双波长对应材料条纹常数的差值即两点间的步长无法被精准控制，从而将影响变化率 K 的计算精度。假设 $f_1=56.0$N/mm，$f_2=57.8$N/mm，当第一个波长下的去包裹等色相位 $\delta_r(f_1)=\pi/4$，$\pi/2$ 和 π时，光强值 $I_5(f)$关于材料条纹常数 f 的变化趋势如图 4 所示。去包裹等色相位 $\delta_r(f_1)\approx m\pi$ ($m=0,\ 1,\ 2,\ \cdots$)时，$I_5(f)$关于 f 的变化表现为弱单调性，变化率 K 趋近于 0，此时 2 波长光强值的差值易受到分辨率限制和测量误差的影响，进而导致 K 的符号和大小均计算错误；与之相反，当 $\delta_r(f_1)=\pi/2+n\pi$ ($n=0,\ 1,\ 2,\ \cdots$)，即受含包裹等倾角影响的含包裹等色相位 $\delta_{w0}(f_1)=\pm\pi/2$时，$I_5(f)$关于 f 的单调性变化显著，光强值的局部波动对斜率的计算影响较小，因此两点差分结果的精度更高。综上可知，在等倾图去包裹种子点识别过程中，将搜索范围限制为满足 $\delta_{w0}(f_1)=\pm\pi/2$的点，可以有效降低光弹图像质量和材料条纹常数标定精度对种子点位置判断的影响。

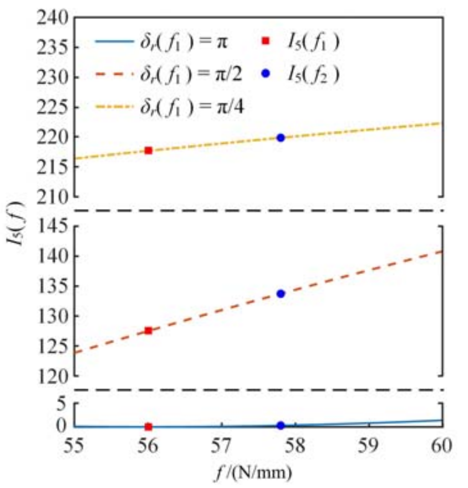

图 4 当 $\delta_r(f_1)$为 $\pi/4$,$\pi/2$ 和 π时,I_5 关于 f 的变化曲线

Fig. 4 The variation curve of I_5 with f when $\delta_r(f_1)$ is $\pi/4$, $\pi/2$ and π

等差图去包裹过程中,种子点为去包裹等色相位最小的点。根据式(7)可知,在第一个波长下,全场中 $\delta_r(f_1)=\pi/2+n\pi$ ($n=0,1,2,\cdots$)的点,其变化率 $K_{\pi/2}$为

$$K_{\pi/2}\approx\pm\frac{I_a}{2}\cdot\frac{1}{f_1}\cdot\delta_r(f_1) \tag{8}$$

式中,$K_{\pi/2}$的大小仅受第一个波长下去包裹等色相位 $\delta_r(f_1)$的影响,则 $K_{\pi/2}$绝对值最小的点,其等色相位也一定最小,可被确定为等差图去包裹的种子点。

根据本节分析内容可知,等倾图和等差图去包裹的种子点均在全场满足 $\delta_{w0}=\pm\pi/2$ 的点中产生,在实际应用中可以通过式(9)扩展该条件的范围:

$$\frac{\pi}{2}(1-R)\leqslant \mathrm{abs}[\delta_{w0}(x,y)]\leqslant\frac{\pi}{2}(1+R)$$
$$0\leqslant R<1 \tag{9}$$

式中,(x,y)表示图像中任意一点的坐标。设置 $R>0$ 以扩大种子点识别范围,可提高质量图引导路径算法的扫描效率。

本节所描述的 ASIDW 方法的流程图如图 5 所示,该方法可实现图 3 虚线框所示环节的自动化处理,进而实现红外光弹相位去包裹处理流程的全自动分析。

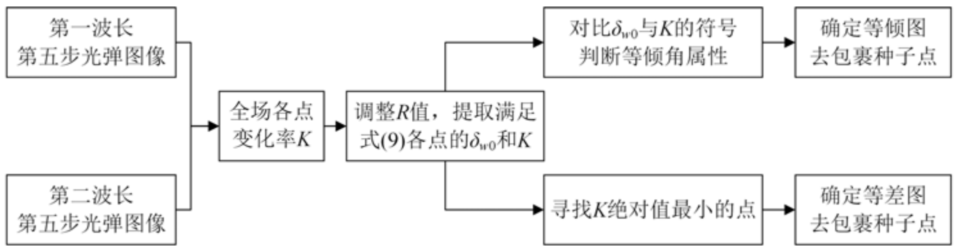

图 5 双波长种子点自动识别方法的流程图

Fig. 5 Flow chart of automatic seeds identification for dual wavelengths (ASIDW) method

3 结果与讨论

本文利用四点弯曲实验来标定样品的应力光学系数。四点弯曲实验中样品纯弯段的等色相位 δ_r与应力光学系数 C 的关系可以表示为[9]

$$\delta_r=\frac{6\pi yCF(L_2-L_1)}{\lambda H^3} \tag{10}$$

式中:y 为测点到中性轴的垂直距离;F 为载荷大小;H 为样品高度;L_1 为上压头之间的距离;L_2 为下压头之间的距离。

图 6 给出了 1064nm 和 1156nm 波长下四点弯曲实验观测区域内的等色相位测量结果。分别对 2 个波长下得到的等色相位随高度的变化进行线性拟合,拟合得到的直线如图 7 所示。2 根拟合直线斜率之间的差异表明,2 个波长下单晶硅样品的光弹性材料条纹常数不同。基于式(10)获得的应力光学系数标定结果见表 2,其中单晶硅样品在 1156nm 波长单色光下的材料条纹常数略微高于 1064nm 下的测定值。由于选用的 2 个波长差异较小,本文认为样品的材料条纹常数在 1064nm 至 1156nm 波长范围内呈单调递增变化。

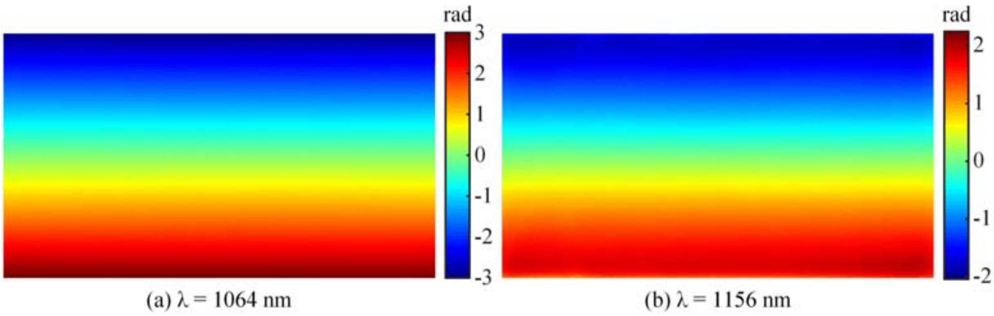

图 6　四点弯曲实验等色相位分布

Fig. 6　Isochromatic phase distributions of the four-point bending experiments

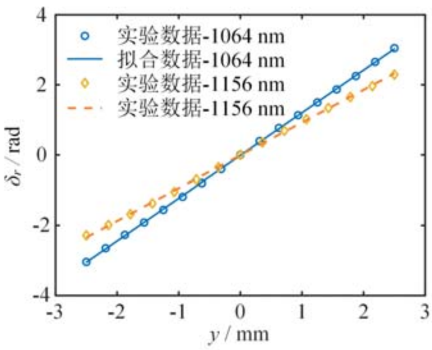

图 7　四点弯曲实验中沿高度方向变化的等色相位

Fig. 7　Isochromatic phase varying along height of the four-point bending experiment

表 2　单晶硅的应力光学系数标定结果

Tab. 2　Calibration results of stress-optical coefficient for single crystal silicon

波长 λ /nm	载荷 F/N	应力光学系数 C/Pa^{-1}	材料条纹常数 f/(N/mm)	拟合优度 R^2
1064	50	1.93×10^{-11}	55.13	0.9999
1156	47	1.96×10^{-11}	58.98	0.9997

本文采用三点弯曲实验来验证 ASIDW 方法的可行性。由于第一主应力方向的范围被定义为 $[-\pi/2,\ \pi/2]$，因此去包裹后的等倾图并不一定是连续的。在等倾值接近 $\pm\pi/2$ 的区域将出现差值为 π 的相位跳变，称为 π 跳区域[14]。由于三点弯曲样品的等倾图中存在典型的 π 跳区域以及主应力方向任意的各向同性点，因此三点弯曲实验被公认为是验证光弹图像去包裹方法可行性的有效手段之一。本文的三点弯曲实验中施加的载荷为 40N，采集的图像尺寸为 796pixel×1392pixel。利用 3×3 的窗口对图像进行均值滤波，以降低随机噪声的干扰。图 8 和图 9 分别给出了在 1064nm 和 1156nm 波长的单色光下通过十步相移法获得的红外光弹图像。通过式(1)和式(2)计算得到 1064nm 波长下的含包裹等倾图和含包裹等差图，如图 10 所示。

分别采用经典的单波长方法、双波长一致性方法和本文提出的双波长种子点自动识别方法来分析图 10 中的相位。首先，采用单波长方法去包裹求解相位时需要人工介入，根据先验知识在含包裹等倾图和含包裹等差图中分别选择种子点。在三点弯曲实验的含包裹等倾图中，包裹线下方区域内各点的等倾值属于第一主应力方向；在含包裹等差图中，中性轴附近的应力水平最低，其所对应的等色相位最小。因此，本文选择图 10 中的实心圆点为去包裹处理的种子点，得到的去包裹等倾图和主应力差分布分别如图 11(a)与图 12(b)所示。

由于双波长一致性方法不涉及等倾图去包裹过程，首先需采用单波长方法的处理方式得到图 11(a)所示的去包裹等倾图，随后，将去包裹等倾角代入式(2)计算 2 个波长下的含包裹等色相位，并

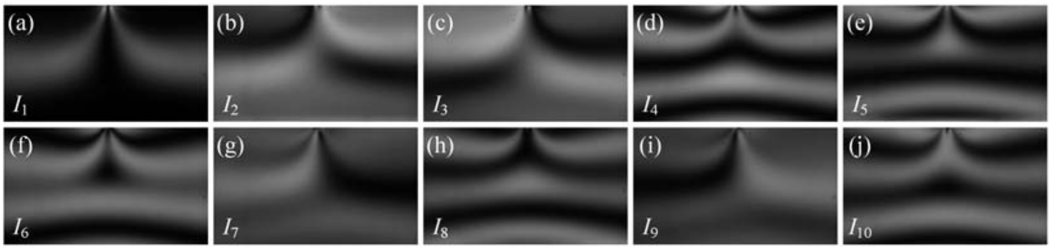

图 8 1064nm 波长下通过十步相移法获得的红外光弹图像

Fig. 8 Infrared photoelastic images obtained by ten-step phase-shift method at 1064nm wavelength

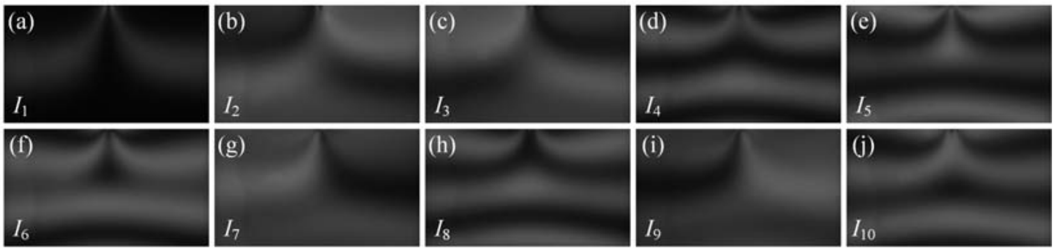

图 9 1156nm 波长下通过十步相移法获得的红外光弹图像

Fig. 9 Infrared photoelastic images obtained by ten-step phase-shift method at 1156nm wavelength

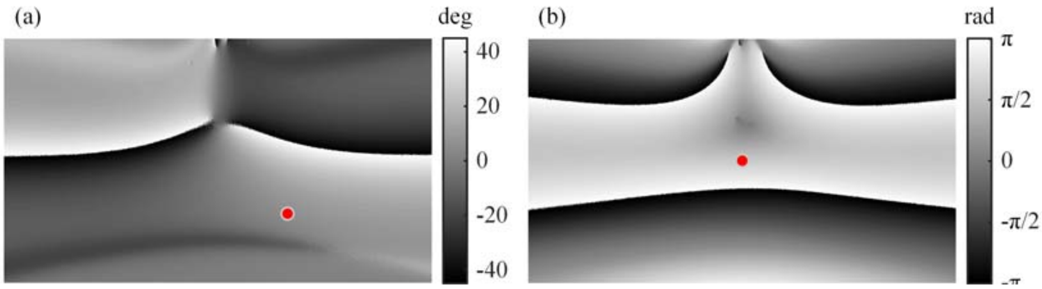

图 10 三点弯曲实验得到的(a)含包裹等倾图和(b)含包裹等差图

Fig. 10 (a)image of wrapped isoclinic phase and (b) image of wrapped isochromatic phase achieved by three-point bending experiments

根据式(5)自动确定全场各点去包裹等色相位所包含的正整数 N,最终得到的主应力差结果如图 12(c)所示。

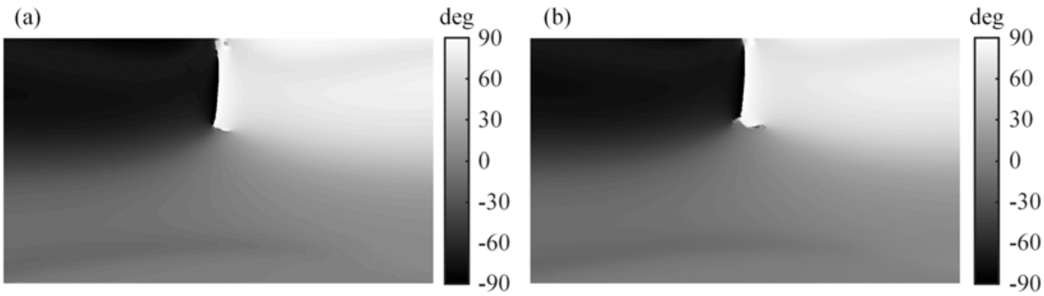

图 11 (a)单波长方法和(b)双波长种子点自动识别方法得到的去包裹等倾图

Fig. 11 Images of unwrapped isoclinic phase by (a) the single-wavelength method and (b) the ASIDW method

采用双波长种子点自动识别方法时,需设置参数 R 以提取满足式(9)的点进行分析。理论上,R 值越大,所提取到的待处理点数量越多,然而受到红外光弹图像噪声水平高的影响,待处理点中包含随机误差点的可能性也随之升高,这将导致随机误差点被错误地识别为种子点。因此在实际应用中,需要调整 R 值改变待处理点的数量,直至最终去包裹的结果不存在异常值。本文工作经过调试,得出在三点弯曲实验中设置 $R=0.01$ 时,可以避免将随机误差点选为种子点。在等倾图和等差图去包裹过程中分

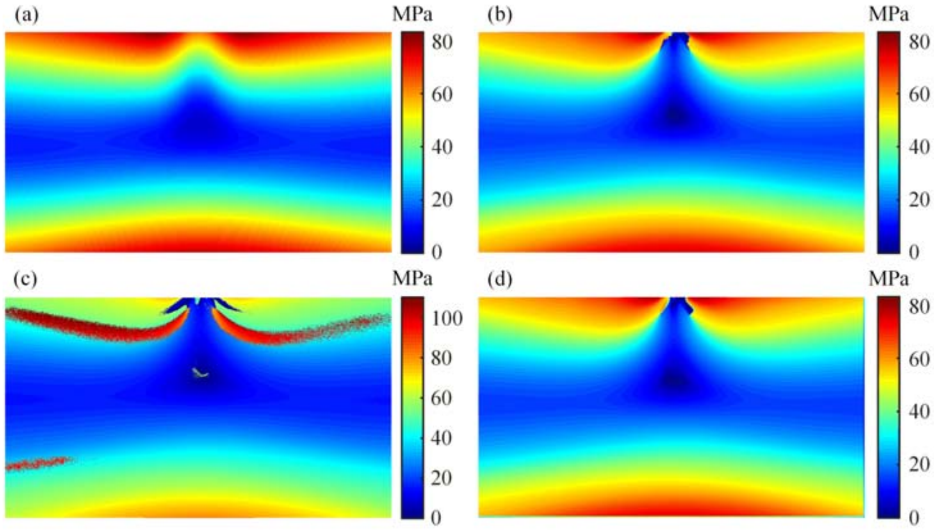

图 12　主应力差：(a) 数值模拟结果；(b) 单波长法；(c) 双波长一致性法；(d) 双波长种子点自动识别法

Fig. 12　Principal stress difference：(a) numerical simulation；(b) the single-wavelength method；(c) the dual-wavelength coincidence method；(d) the ASIDW method

别提取到 5992 个和 10 个种子点，其位置如图 13 所示。利用质量图引导路径方法从多种子点遍历至全场，去包裹后的等倾图以及主应力差分布如图 11(b)和图 12(d)所示。

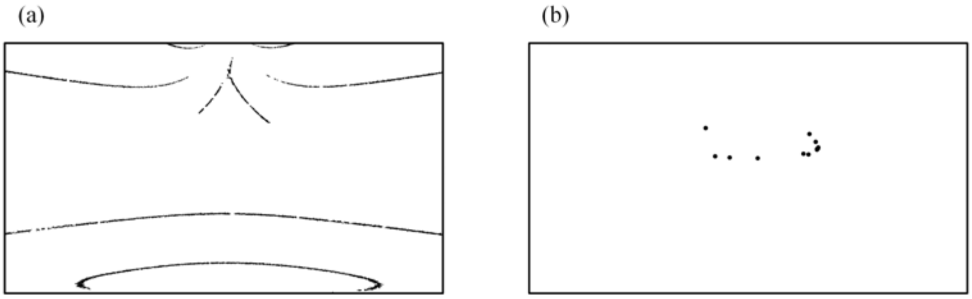

图 13　双波长种子点自动识别方法识别的(a)等倾图和(b)等差图去包裹种子点

Fig. 13　Seeds of (a) isoclinic phase unwrapping and (b) isochromatic phase unwrapping identified by ASIDW method

本文的双波长种子点自动识别方法中，以 1064nm 波长的图像为主要分析对象，1156nm 波长的图像用于辅助判断种子点的位置。由于不同波长的单色光在单晶硅材料中的透射率不同，并且光学元件和 CCD 相机对不同波长光的响应程度也不同，因此双波长下第五步图像的光强值 $I_5(f_1)$和 $I_5(f_2)$的比例常数 I_a和背景光强 I_b无法保持一致，这将导致部分点的变化率 K 出现错误。实际应用中，可以通过增强数字图像对比度来减少 I_a和 I_b对算法自动判断种子点的影响。此外，质量图引导路径方法中各点的质量值反映了相位梯度变化，不仅可以表示出条纹密集的低分辨率区域，还可以显示受随机误差影响的局部区域。因此，在已识别的种子点中再次根据质量值筛选，可以进一步保证种子点位置的准确性。

首先对比去包裹等倾图的结果。如图 11(a)和图 11(b)所示，双波长种子点自动识别方法与单波长人为指定种子点方法处理含包裹等倾图的结果基本一致。前者是根据先验知识进行人工干预得出的，无法实现自动分析；而后者则是在无人工干预的情况下全自动分析得出的。这表明，本文所提方法在保证精度的前提下具备了自动化分析的优势。此外，图像中心的各向同性点和加载点附近出现差异，这是由于该区域的质量值较低，初始种子点的数量和位置影响扫描路径末端区域导致的结果。

进一步对比主应力差结果。通过有限元方法得到的主应力差数值结果如图 12(a)所示，图 12(b)所示的单波长方法结果与其分布趋势基本一致，仅在沿载荷加载方向的区域受到加载点应力集中的影响

而表现出差异。通过对比图 12(b)、图 12(c)和图 12(d)可以发现,与单波长方法相比,双波长一致性方法在含包裹等差图条纹线和加载点等低分辨率区域内的结果存在明显错误,不一致点的数量达到 5766 个。这是由于相位梯度变化较大时,搜寻正整数 N 的过程需要双波长图像各点的位置精准对应,同时对材料条纹常数的标定精度也有较高的要求所致。与之不同,除靠近加载点附近应力集中的小部分区域外,种子点自动识别方法能够与单波长方法结果保持一致,不一致点数量仅为 989 个。其关键在于,自动识别过程只关注变化率 K 的符号以及绝对值的相对大小,且种子点不在低分辨率区域内产生,因此该方法对图像原位性和材料条纹常数的标定结果有更大的误差容许范围,在实际应用中比一致性方法更稳健。

理论上,无论采用一致性方法还是种子点自动识别方法,利用 3 个及以上波长的单色光均能更准确地获取相位在不同波长下的变化趋势。图 14 给出了使用 980nm、1064nm 和 1156nm 波长的实验结果。与双波长方法相比,三波长一致性方法的结果存在更大范围的异常值,三波长种子点自动识别方法由于选择了错误的种子点,导致其在路径末端(加载点附近)出现误差的扩散。可见,采用 3 个波长的实际效果和效率均降低了。这是因为,不同波长的单色光在单晶硅中的透射率,以及在 CCD 相机中的量子效率均不同。例如,CCD 相机对 980nm 单色光的量子效率更高,但 980nm 光在单晶硅中的透射能力显著降低,导致光弹图像的噪声明显增多;与之相反,1156nm 单色光虽更容易透过单晶硅,但 CCD 相机对 1156nm 光的低量子效率成为制约图像质量的主要因素。此外,在不同波长下开展实验时,调焦和设置曝光时间等操作会导致图像位置存在显著差异,因此使用更多波长的单色光在图像运算中将引入更多的误差,影响种子点的自动识别过程。综上所述,选用 2 个波长的单色光开展红外光弹实验,既能简化操作过程,又能高效、自动地完成内部应力分析。

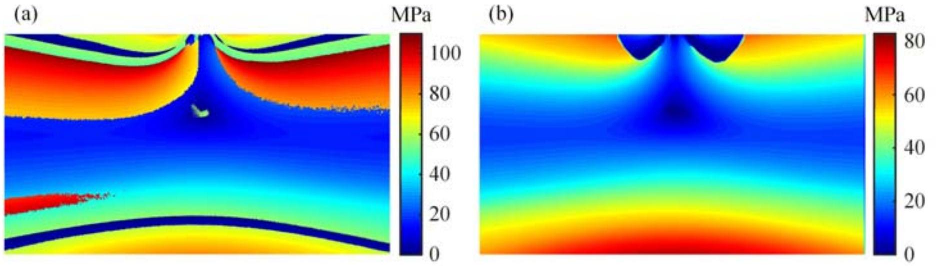

图 14 三波长方法结果:(a) 一致性方法;(b) 种子点自动识别法

Fig. 14 Results of three-wavelength method: (a) the coincidence method; (b) the automatic seeds-identification method

4 结束语

面向半导体材料复杂内部应力的在线检测需求,本文提出一种基于双波长红外光弹的应力自动分析方法,即双波长种子点自动识别方法。该方法根据相位在 2 个波长下的变化趋势,无需人工干预即可自动确定去包裹初始种子点的位置,实现了红外光弹图像等倾值与等色相位提取的全自动分析。本文通过开展单晶硅的三点弯曲实验,验证了双波长种子点自动识别方法具有较高的分析精度并能实现应力自动化分析。与已有的双波长一致性方法相比,本文所提出的方法对红外光弹图像原位性和噪声水平的要求更低,在实际工程结构内部应力的自动化分析中具有更高的可靠性。

参考文献:

[1] CHO D H, SEO S M, KIM J B, et al. A review on the fabrication and reliability of three-dimensional integration technologies for microelectronic packaging: through-Si-via and solder bumping process[J]. Metals, 2021, 11(10): 29.

[2] ZHENG T, DANYLUK S. Study of stresses in thin silicon wafers with near-infrared phase stepping photoelasticity[J]. Journal of Materials Research, 2002, 17(1):36-42.

[3] 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.

[4] 雷振坤，云大真，亢一澜，等. 数字光弹性法综述[J]. 实验力学，2004，19(4)：393－402 (LEI Zhenkun, YUN Dazhen, KANG Yilan, et al. A review of digital photoelasticity[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(4):393－402 (in Chinese))

[5] RAMESH K, KASIMAYAN T, SIMON B N. Digital photoelasticity－a comprehensive review[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2011, 46(4):245－266.

[6] RAMESH K, SASIKUMAR S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135:106186.

[7] PRASATH R G R, SKENES K, DANYLUK S. Comparison of phase shifting techniques for measuring in-plane residual stress in thin, flat silicon wafers[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(8):2478－2485.

[8] DING Q, WANG M J, XING H D, et al. Investigation of a fitting phase-shift method for stress analysis using infrared photoelasticity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 149:106787.

[9] 富东慧，丁琦，王苗菁，等. 基于多步相移拟合的显微红外光弹系统研制[J]. 实验力学，2022，37(2)：143－151 (FU Donghui, DING Qi, WANG Miaojing, et al. Instrument development of micro-infrared photoelasticity based on multistep phase-shift fitting[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(2):143－151 (in Chinese))

[10] AJOVALASIT A, PETRUCCI G, SCAFIDI M. Review of RGB photoelasticity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 68:58－73.

[11] RAMESH K, RAMAKRISHNAN V, RAMYA C. New initiatives in single-colour image-based fringe order estimation in digital photoelasticity[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2015, 50(7):488－504.

[12] LEI Z K, YUN D Z, YU W M. Whole-field determination of isoclinic parameter by five-step color phase shifting and its error analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 40(3):189－200.

[13] RAMJI M, NITHILA E, DEVVRATH K, et al. Assessment of autonomous phase unwrapping of isochromatic phase maps in digital photoelasticity[J]. Sadhana, 2008, 33(1):27－44.

[14] RAMJI M, RAMESH K. Adaptive quality guided phase unwrapping algorithm for whole-field digital photoelastic parameter estimation of complex models[J]. Strain, 2010, 46(2):184－194.

[15] ASHOKAN K, RAMESH K. An adaptive scanning scheme for effective whole field stress separation in digital photoelasticity[J]. Optics and Laser Technology, 2009, 41(1):25－31.

[16] BUCKBERRY C, TOWERS D. New approaches to the full-field analysis of photoelastic stress patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1996, 24(5):415－428.

[17] NURSE A D. Full-field automated photoelasticity by use of a three-wavelength approach to phase stepping[J]. Applied Optics, 1997, 36(23):5781－5786.

[18] NURSE A D. Automated photoelasticity: weighted least-squares determination of field stresses[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(5):353－370.

[19] PLOUZENNEC N, LAGARDE A. Two-wavelength method for full-field automated photoelasticity[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(4):274－277.

[20] CHEN T Y. Digital determination of photoelastic birefringence using two wavelengths[J]. Experimental Mechanics, 1997, 37(3):232－236.

[21] KIHARA T. An arctangent unwrapping technique of photoelasticity using linearly polarized light at three wavelengths[J]. Strain, 2003, 39(2):65－71.

[22] YONEYAMA S, NALAMURA K, KIKUTA H. Absolute phase analysis of isochromatics and isoclinics using arbitrary retarded retarders with tricolor images[J]. Optical Engineering, 2009, 48(12):123603.

[23] RAMJI M, RAMESH K. Whole field evaluation of stress components in digital photoelasticity－issues, implementation and application[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(3):257－271.

[24] RAMESH K, HARIPRASED M P, RAMAKRISHNAN V. Robust multidirectional smoothing of isoclinic parameter in digital photoelasticity[J]. Optical Engineering, 2015, 54(8):081205.

[25] LEI Z K, YUN H, KKANG Y L. Automatic evaluation of photoelastic fringe constant by the nonlinear least-

squares method[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(8):985-989.

[26] 雷振坤. 结构分析数字光测力学[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2012:1-48 (LEI Zhenkun. Digital photomechanics for structural analysis[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2012:1-48 (in Chinese))

Automatic full-field internal stress analysis technique based on dual-wavelength infrared photoelasticity

DU Yitao[1], HE Quanyan[1], WANG Miaojing[1], QIU Wei[1,2]

(1. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300354, China)

Abstract: Infrared photoelasticity method can achieve non-destructive and full-field characterization of internal stress in semiconductor materials. Most of the existing unwrapping method developed for infrared photoelasticity require some manual interventions. Lack of automated means without manual intervention is a key factor restricting the application of infrared photoelasticity to the on-line stress detection. This paper proposed an automatic full-field internal stress analysis technique based on dual-wavelength infrared photoelasticity, namely automatic seeds identification for dual wavelengths. According to the phase trend of each point in the sample at different wavelengths, the initial seeds required for phase unwrapping can be automatically identified by the symbol and absolute value of the real phase, and thus avoiding manual intervention in the whole process of photoelastic analysis. In this work, a dual-wavelength infrared photoelasticity device was developed based on the proposed technique. The results of application experiments were compared with those of other existing methods, which verified the reliability of the proposed method, and its device as well, for the automatic analysis of complex internal stress distribution.

Keywords: infrared photoelasticity; dual-wavelength; semiconductor; internal stress; automatic photoelastic analysis