

基于线激光锁相热成像的芯片裂纹成像检测

许颖^{1*}, 王青原¹, 罗聪聪¹, Hoon Sohn²

¹哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳市城市与土木工程防灾减灾重点实验室, 广东 深圳 518055;

²韩国科学技术院土木与环境工程系, 大田 34708, 韩国

摘要 提出一种用于半导体芯片表面裂纹瞬时成像检测的线激光锁相热成像新技术。该技术系统由线扫描激光源、高速红外照相机及控制计算机组成, 由线激光束扫描目标芯片表面并利用红外相机测量热波传播。提出新型无基线裂纹可视化算法, 裂纹可导致热波阻挡现象, 故被自动可视化和诊断, 不依赖由目标芯片原始状态所获得的基线数据。对芯片在制造过程中产生细微裂纹进行研究, 实验证明热成像新技术可对宽度为几十微米的裂纹进行可视化。

关键词 图像处理; 热成像; 无损检测; 表面缺陷检测

中图分类号 TG115.28

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.061018

Chip Crack Imaging Detection Based on Line Laser Phase-Locked Thermal Imaging

Xu Ying^{1*}, Wang Qingyuan¹, Luo Congcong¹, Hoon Sohn²

¹College of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen Key Lab of Urban & Civil Engineering Disaster Prevention & Reduction, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

²Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34708, Republic of Korea

Abstract This paper proposes a new linear laser phase-locked thermal imaging technology for surface crack instantaneous imaging detection of semiconductor chips. The technical system consists of a linear scanning laser source, a high-speed infrared camera, and a control computer. The surface of the target chip is scanned by a linear laser beam and the thermal wave propagation is measured by an infrared camera. A new visualization algorithm without baseline crack is proposed. Because cracks can cause thermal wave blocking, they can be visualized and diagnosed automatically, which is independent of baseline data obtained from the original state of the target chip. The microcracks of the chips generated in the manufacturing process are studied. The experiments demonstrate that the visualization of cracks with a width of tens of micrometers can be realized by the laser phase-locked thermal imaging technology.

Key words image processing; thermal imaging; nondestructive testing; surface crack detection

OCIS codes 100.6820; 120.4290; 170.0110

1 引言

20 世纪 60 年代以来半导体技术的进步改善了人们的生活, 使高性能电子设备得以发展, 如个人计算机和移动电话。智能手机的出现得益于超小型高性能半导体的发展, 更轻薄的手机的实现需要厂家

制造更小、更薄、更高性能的半导体芯片。半导体芯片的晶片变薄出现的主要问题是芯片表面出现裂纹, 由于表面裂纹会降低电子设备的性能和可靠度, 故对半导体芯片表面裂纹进行检查的需求不断增长^[1-3]。

至今已有多种半导体芯片检测技术被提出。刘金娜等^[4]提出用于检测单晶硅晶片内裂纹的冲击测

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-09-17; 录用日期: 2019-09-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778191)、深圳市科技计划(JCYJ20170307145853300)

* E-mail: cexyx@hotmail.com

试技术。这项技术仅需简单的测试设备且耗时短,但必须接触目标半导体才可进行,这会产生潜在的破坏。Sadler 等^[5]应用无接触涡流传感器来识别微裂纹,但是强涡流会对芯片性能产生不良影响,而且这项技术仅用于导电材料。

其他非接触检测技术如太赫兹成像技术^[6-7]、扫描式声波显微技术^[8]和光散射技术^[9-10]也有所发展。太赫兹成像技术具有相对较高的时间和空间分辨率,因此可检测到小裂纹,但穿透深度较浅,无法穿透金属层。扫描式声波显微技术虽比太赫兹波穿透深度深,但检测时间较长^[11],故不适用于在线检测,此外还要求目标芯片必须没入水中或用水滴覆盖,这也可能对芯片造成损坏。还有一些技术因表面污染和光照条件的变换导致误报。尽管至今已有许多用于芯片裂纹检测的技术被提出,但是仍然没有一项技术能解决上述问题并且应用于实际制造过程中。

本文提出的新型线激光锁相热成像技术能克服上述某些技术难题。线激光锁相热成像技术在芯片检测方面具有检测时无接触、无损伤和无侵入,无需任何历史状态热图像,以及裂纹检测能力显著提高的优势。通常来说,近距离观察肉眼可见的裂缝大小一般以 0.05 mm 为界(实际最佳视力可见裂缝大小为 0.02 mm)。大于 0.05 mm 的裂缝称为宏观裂缝,宏观裂缝是微观裂缝扩展的结果。而本文研究的裂缝为 29 μm ,属于微裂纹范畴,通过肉眼识别的方法无法准确判断裂纹大小。本文所采用的线激光是通过柱面透镜将点状脉冲激光束转变为线状激光束,能量从一个点平均到一条线。面激光则是能量由一个点激光通过透镜分散成为一个面,打到被测芯片表面的热能与线激光热能相比被大大削弱,且面激光还存在边缘热能不均匀等问题,形成的光斑一般面积较小^[12],故本文采用线激光进行实验。文中具体描述了线激光锁相热成像系统的硬件发展和工作原理,并提出无基线裂纹可视化算法,对半导体芯片进行实验,并给出结果。

2 线激光锁相热成像系统

由激励、感应和控制单元组成的线激光锁相热成像系统的整体结构图如图 1 所示,激励单元包括一个控制系统,控制系统包括一个任意波形产生器、一个连续波激光器,以及一个由柱面平凹透镜、一个检流计扫描器和一个平场聚焦透镜组成的线光束产生器。连续波激光器波长为 532 nm,最大功率为

15 W。实验中使用的激光功率峰值为 120 mW(激光功率密度为 3.183 mW/mm²),该激光功率密度可使半导体芯片表面温度比室温高出 6 °C。这个升温并不会危害半导体芯片,因为在制造过程中,如芯片键合、引线接合以及成型过程,半导体芯片表面温度可升至 175 °C。所述检流计扫描器的一般定位速度为 40 rad/s 以及容许扫描角度范围在 ± 0.38 rad 以内。平面聚焦透镜的焦距为 1 m,焦距处的光束宽度和长度分别为 1.3 mm 和 100 mm。感应单元和控制单元分别由带有特写镜头的红外(IR)照相机和控制计算机组成。本文使用的红外照相机(MWIR)采用非冷却微测热辐射计作为红外检测器。红外照相机的积分时间为 13 ms,温度分辨率为 0.03 K,图像分辨率为 640 pixel \times 480 pixel,采样速率为 50 Hz,以及光谱范围为 7.5~14 μm 。所述特写镜头焦距为 30 mm,相隔距离为 50 mm。数据采集和处理分别由安装在控制单元内的 LABVIEW 和 MATLAB 程序完成。

所述线激光锁相热成像系统的工作原理如下:首先将连续波激光器激光束调制为在激励单元内使用任意波形产生器产生的脉冲激光束,柱面透镜将点状脉冲激光束转变为线状激光束。此时控制单元发出控制信号至检流计扫描器,通过检流计扫描器和平场聚焦透镜将线激光束射向目标表面。随后,线激光束在所需激励处产生热波,横向和纵向扫描该目标表面,检测任意方向的裂纹。感应单元内的红外照相机可捕捉相应的热反应。激励单元和感应单元同时工作,故锁相幅度热反应可通过接下来的裂纹可视化算法精确计算。其次,检测到的热反应传输至控制单元存储。最后,测量的数据使用文中的裂纹可视化算法处理。

3 无基线裂纹可视化算法

本部分描述的是基于 Holder 指数分析^[13]和罗伯茨滤波工艺^[14]的无基线裂纹可视化算法。当励磁激光束照射在目标表面时,该目标表面上产生热波,并且该热波通过该表面传播。热导率和激光束诱导的温度梯度之间的关系可利用狄拉克函数的傅里叶方程的一维解表示^[15]:

$$T(z, t) = T_0 + Q / \sqrt{k\rho c_p \pi t} \times \exp(-z^2/4at), \quad (1)$$

式中:Q 代表表面吸收能力,单位为 J/m²;T₀ 为初始温度,单位为 K;t 为吸收能量之后的延时,单位为 s;z 为距热源的距离,单位为 m;k 为热导率,单

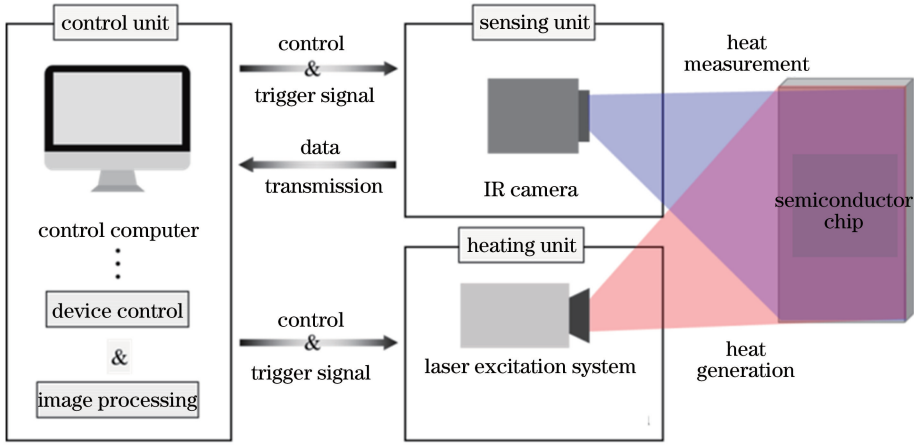


图 1 由激励、感应和控制单元组成的用于半导体芯片检测线激光锁相热成像系统的整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of linear laser phase-locked thermal imaging system for semiconductor chip detection consisting of excitation, sensing, and control units

位为 W/mK ; ρ 为密度, 单位为 kg/m^3 ; c_p 为热容量, 单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; α 为目标材料的热扩散率, 单位为 m^2/s 。当热波到达热物理性能相较周围完好区域突变的故障区域时, 热波传播模式随之改变。裂纹形成阻碍热波传播, 造成热波阻挡现象。接触热阻^[16]与表面完全接触相比, 增加了附加的热传导的传递阻力, 使得热波阻挡现象容易被理解。例如, 若铜材料产生裂纹, 则裂纹界面之间会形成空隙。通常情况下, 铜的热导率 ($380 W/mK$) 是空气热导率 ($0.025 W/mK$) 的 15200 倍。因此, 由于热导率突变, 大部分热波不能通过空隙传播。热成像的优势在于即使当裂纹的物理宽度太小以至其他检测技术如视觉系统都无法检测到时, 它可轻易可视

化热波阻挡现象。提出的算法独特之处在于它可以提取和可视化裂纹引起的热波阻挡现象, 并且无需芯片初始状态的任何基线图像。图 2 显示的是无基线裂纹可视化算法的整体流程图, 具体步骤描述如下。

1) 锁相幅度图像的计算

通过线激光锁相热成像技术在时域内收集与第 k 束垂直励磁线激光对应的热成像, 以此计算锁相幅度图像。当励磁线激光束射向目标表面, 该表面会受到反复加热和冷却, 如图 3 所示。此处所捕捉的热反应与任意波形发生器同步, 从而调制连续波激光强度。特定空间点 (x, y) 的锁相幅度值可表示为^[17]

$$A_k(x, y, T) = \sqrt{[R_k(x, y, 0) - R_k(x, y, \tau)]^2 + [R_k(x, y, \tau) - R_k(x, y, T)]^2}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中: τ 和 T 分别表示发生最大热响应的时间点和重复脉冲激励的周期; $R_k(x, y, t)$ 为第 k 束垂直激励线激光在空间点 (x, y) 和热反应达最大值的时间点 t (这里 t 取 τ 和 T) 处的热反应值 (热反应值即热响应, 表示由调制激光器在芯片表面扫描后产生的热响应); $A_k(x, y, T)$ 为相应锁相幅度值; n 为垂直线激励总量。(2) 式仅计算调制激光束引起的热梯度, 即仅计算与激励激光同步的热梯度, 而其他热源不与激励激光同步, 因此不影响 $A_k(x, y, T)$ 。

2) 不连续图像的成像

第 k 束垂直线激励的锁相幅度图像一旦成像, 便可利用 Holder 指数对相应的不连续图像每行每

列中的锁相幅度图像进行计算^[14]。首先将行向不连续图像的所有像素值 X^k 初始化为 0。此时计算第一行锁相幅度图像的小波变换, 可得^[18]

$$|Wf(x, s)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(u) (1/\sqrt{s}) \psi^* [(u-x)/s] du \right|, \quad (3)$$

式中: $Wf(x, s)$ 为空间平移 x 和频率刻度 s 的小波变换系数; $f(u)$ 为第一行锁相幅度图像; u 表示一个空间点; ψ^* 为 ψ 的共轭复数, ψ 为基础函数, 可表示为

$$\psi(u) = \begin{cases} 1 & 0 \leq u < 1/2, \\ -1 & 1/2 \leq u < 1. \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

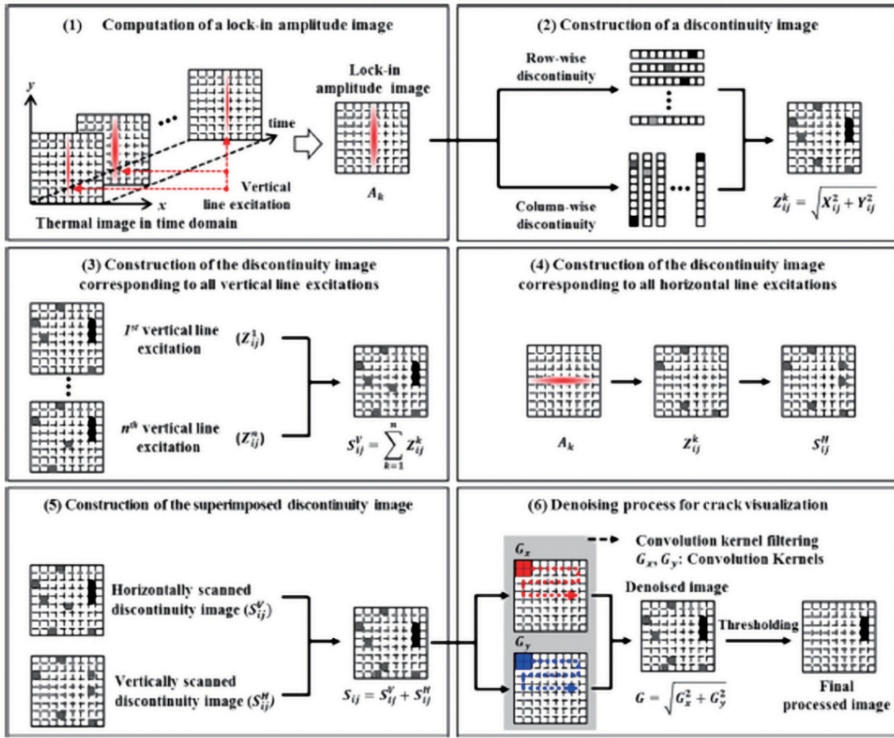


图 2 无基线裂纹可视化算法概况

Fig. 2 Overview of baseline-free crack visualization algorithm

由(3)式计算得出的小波变换系数为二维矩阵形式。矩阵的行、列分别表示不同的空间点(x)和频率刻度(s)。特定空间点 x 的Holder指数值可经过简单计算沿 s 轴的小波系数值的斜率计算得出。取所有空间点中最大Holder指数值并赋予行向不连续图片的相应像素点。应当注意,最大Holder指数值预计会出现空间不连续性。重复计算所有行向锁相幅度图像的最大Holder指数值,直至完成行向不连续图像 X^k 。重复上述步骤计算得到列向不连续图像 Y^k 。于是第 k 束垂直线励磁对应的不连续图像定义为

$$Z_{ij}^k = \sqrt{(X_{ij}^k)^2 + (Y_{ij}^k)^2}, \quad (5)$$

式中: X_{ij}^k 和 Y_{ij}^k 分别表示第 ij 个行向和列向不连续图像实体。

3) 对应所有垂直线励磁的不连续图像成像

通过水平扫描覆盖整个检查区域的垂直线激光束,重复先前的步骤1)和2) n 次。然后通过叠加来自所有垂直线激励的不连续图像获得不连续图像 S_{ij}^V :

$$S_{ij}^V = \sum_{k=1}^n Z_{ij}^k, \quad (6)$$

式中: S_{ij}^V 表示所有垂直线励磁水平扫描的不连续图像的第 ij 个实体。

4) 对应所有水平线励磁的不连续图像成像

同样地,通过水平线励磁激光束和垂直扫描重复步骤1)~3),获得不连续图像 S_{ij}^H 。

5) 叠加不连续图像的成像

叠加的不连续图像是通过叠加水平和垂直扫描的不连续图像获得:

$$S_{ij} = S_{ij}^V + S_{ij}^H. \quad (7)$$

6) 裂纹可视化的降噪过程

由于上述步骤所得的不连续图片仍然带有多余的噪声分量,因此需要额外的降噪处理去除噪声分量。首先利用罗伯茨交叉卷积核心计算二维空间梯度^[14]。图4所示包括一对 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 的罗伯茨交叉卷积核心用于通过算出最大空间梯度值提取对角边过程。注意,利用罗伯茨交叉卷积降噪主要是在空间域内改变强度。空间域内,利用罗伯茨交叉卷积核心过滤图像的像素值。卷积过程基于移动核心将每个核心值乘以叠加不连续图像(S)像素值,计算最后一张处理图像所给的像素值。每个内核在特定时间将像素移动到每一行和每一列的整个网格像素中。依靠每个方向的梯度分量如 $G_x(i, j)$ 和 $G_y(i, j)$,利用两个核心处理叠加的不连续图像以获得两分离图像。两分离图像合成具有绝对空间梯度值的降噪图片(G):

$$G = \sqrt{G_x^2(i, j) + G_y^2(i, j)}, \quad (8)$$

其中

$$G_x(i, j) = K_x(1, 1)S(i, j) + K_x(1, 2)S(i, j + 1) + K_x(2, 1)S(i + 1, j) + K_x(2, 2)S(i + 1, j + 1), \quad (9)$$

$$G_y(i, j) = K_y(1, 1)S(i, j) + K_y(1, 2)S(i, j + 1) + K_y(2, 1)S(i + 1, j) + K_y(2, 2)S(i + 1, j + 1), \quad (10)$$

式中： $S(i, j)$ 表示叠加的不连续图像的第 ij 个实

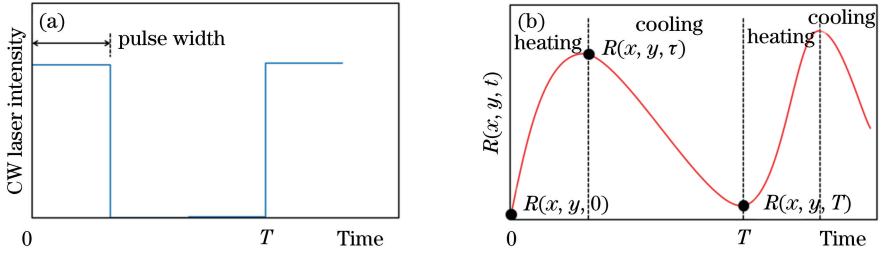


图 3 调制连续波激光束产生的热波和红外相机捕捉的相应热反应示意图。(a)调制连续波激励激光强度；(b)时域内相应热反应

Fig. 3 Diagrams of thermal wave generation by modulated CW laser beam and corresponding thermal response captured by IR camera. (a) Intensity of modulated CW excitation laser; (b) corresponding thermal response in time domain

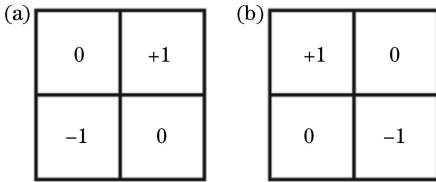


图 4 罗伯茨交叉卷积核心。(a)计算+45°的梯度边缘的 K_x ；(b)计算-45°的梯度边缘的 K_y

Fig. 4 Roberts cross convolution kernels. (a) Compute K_x of gradient edge at +45°; (b) compute K_y of gradient edge at -45°

体。当计算图像边缘的像素值时，一部分核心可能超出图像外。为了获得 G 的像素尺寸，可插入虚构的零行零列，基于裁剪滤波方法推出最后一行和一系列的像素^[19]。

随后，像素值 G 的概率密度分布函数可通过极值 III 型分布对非零像素值进行拟合得到^[20]，计算单面 97% 置信区间对应的阈值。最后只保留已处理图像超过阈值的像素值，以降低噪声。

4 实验验证

为了验证提出的线激光锁相热成像技术的性能，采用深圳市柏达斯科技有限公司制造的带有已知微裂纹的半导体芯片进行裂纹检验测试。

4.1 实验装置描述

图 5 所示为线激光锁相热成像系统的实验装置和半导体晶片。任意波形产生器(33220A, 安捷伦科技有限公司, 美国)产生脉冲信号, 频率为 2 Hz, 脉宽为 50 ms。用该脉冲信号调制连续波激光器

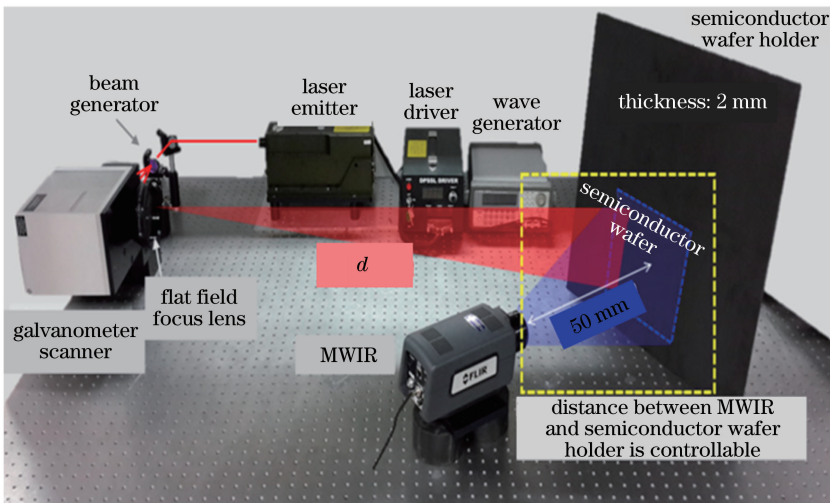
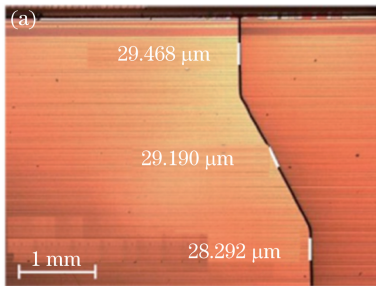


图 5 检测半导体芯片裂纹的线激光锁相热成像技术的实验装置

Fig. 5 Experimental setup of linear laser phase-locked thermal imaging technology for detecting crack of semiconductor chip

(TMA-532-15T, TMA 有限公司, 美国) 的功率密度。调制脉冲激光束的峰值功率强度设置为 3.183 mW/mm^2 , 防止烧蚀造成表面破坏^[21]。同时 3.183 mW/mm^2 的功率强度可将半导体芯片表面的温度仅提高 $6 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此不会产生表面烧蚀。随后线光束产生器将环形激光束转换为长度为 100 mm 、宽度为 1.3 mm 、焦距为 1 m 的线激光束。控制装置向检流计扫描器发送控制信号, 此时线激光束通过检流计扫描器和平场聚焦透镜射向半导体芯片指定位置。检流计扫描器前安装的平场聚焦透镜与目标半导体芯片之间的距离 d 为 2 m 。注意, 在晶片背面磨削过程中, 半导体芯片易受到裂纹破坏^[2], 本研究中的半导体芯片样本为固定在半导体晶片上的芯片。由于脉冲激光束产生的热波传递剖面具有高斯剖面, 两相邻线激光束之间的空间分辨率必须精确确定, 以防止两相邻线激光束之间缝隙的重叠和增大^[22]。因此, 在测试中以 1 mm 的空间分辨率水平和垂直扫描线激光束。同时红外照相机捕捉时域内对应热反应。红外照相机距离



目标晶片 50 mm , 采样频率为 50 Hz 。

4.2 半导体芯片样本描述

图 6 为半导体压制芯片样本, 压制芯片的大小为 $10.33 \text{ mm} \times 8.12 \text{ mm} \times 50 \text{ } \mu\text{m}$ 。由于芯片具有保密性, 因此并不知道芯片材料化合物和设计参数等详细信息。芯片类型为完整芯片和带裂纹芯片, 裂纹是在实际晶片背面磨削过程中形成的。图 7 为带有细微裂纹的测试样本的微观图。图 7(a)、(b) 中的压制芯片带有约 $29 \text{ } \mu\text{m}$ 宽的垂直和水平裂纹。

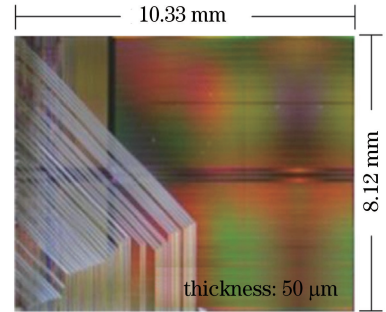


图 6 半导体压制芯片样本

Fig. 6 Semiconductor pressed chip specimens

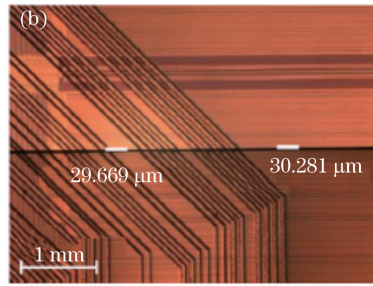


图 7 带裂纹的半导体芯片样本的微观图。(a) 压制芯片的垂直裂纹; (b) 压制芯片的水平裂纹

Fig. 7 Microscopic images of semiconductor chip specimens with cracks. (a) Vertical cracks of pressed chip;

(b) horizontal cracks of pressed chip

4.3 实验结果

图 8(a) 和 (b) 分别是垂直和水平扫描励磁线激光束的完好芯片的典型原始热像。原始热像中还显示了激光产生的热波和表面图案。图 8(c) 为励磁线激光束射向裂纹附近时捕捉的垂直裂纹压制芯片的快相。从图中可清晰得知热波传播受垂直裂纹阻挡。同样地, 水平线激光束励磁的热波受水平裂纹阻挡, 如图 8(d) 所示。然而表面图案的存在影响了裂纹可视化的精确性。

一旦获得原始热像, 也可随之计算出锁相幅度图像。图 9(a)、(b) 和 (c) 为相对图 8(a) 的完好芯片上某个垂直线励磁的 0 、 t 和 T 处对应的三张典型热像。基于这些热像, 图 8(a) 对应的锁相幅度图像可利用 (2) 式计算, 结果如图 10(a) 所示。同理, 如

果对图 8(b)、(c) 和 (d) 进行相同的计算便可获得相应的锁相幅度图像, 如图 10(b)、(c) 和 (d) 所示。与图 8 的原始热像相比, 锁相幅度图像抑制芯片的表面图案, 仅显示激光产生的热波。励磁激光束释放的热波一经移除, 可从图 10(c) 和 (d) 清晰观察到裂纹产生的热阻现象。

结合两张不连续图像和 (7) 式得出叠加的不连续图像, 图 11(a) 为由含有多余噪声分量的完好压制芯片得到的典型图像。噪声成因主要为测量误差和激光产生的热波场边缘不连续性。从图 11(b) 和 (c) 可清楚观察到热阻现象, 这是因为裂纹引发的不连续性远高于噪声水平。实际上, 由完好和裂纹芯片样本得到的图像显示相同的噪声水平。

为了去除图 11 内多余的噪声分量, 可将第 3 节

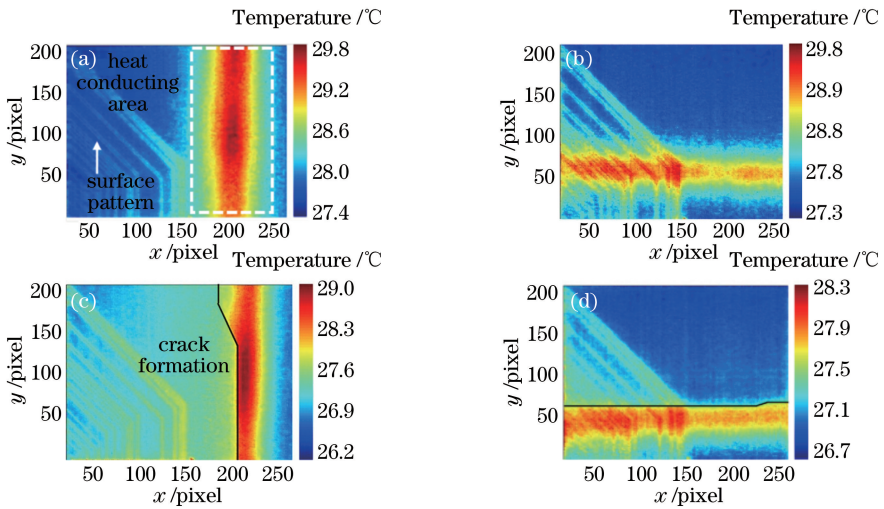


图 8 压制芯片的典型原始热像。(a)完好芯片的垂直线激励;(b)完好芯片的水平线激励;(c)垂直裂纹芯片上的垂直线激励;(d)水平裂纹芯片上的水平线激励

Fig. 8 Typical raw thermal images obtained from pressed chips. (a) Vertical line excitation on intact chip; (b) horizontal line excitation on intact chip; (c) vertical line excitation on vertically cracked chip; (d) horizontal line excitation on horizontally cracked chip

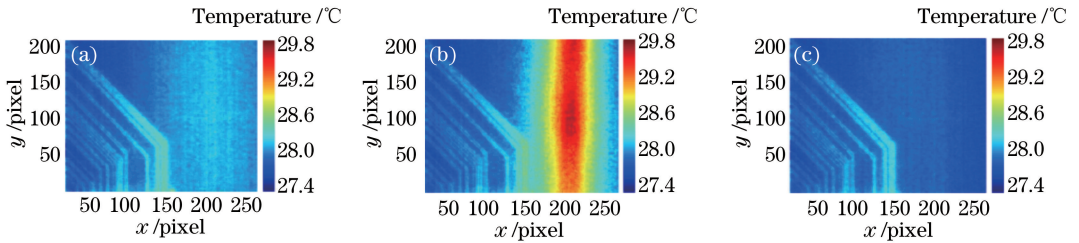


图 9 垂直线激励完好芯片获得的原始热像。(a) 0 ms; (b) t (50 ms); (c) T (500 ms)

Fig. 9 Raw thermal images obtained from intact chip with vertical line excitation.

(a) 0 ms; (b) t (50 ms); (c) T (500 ms)

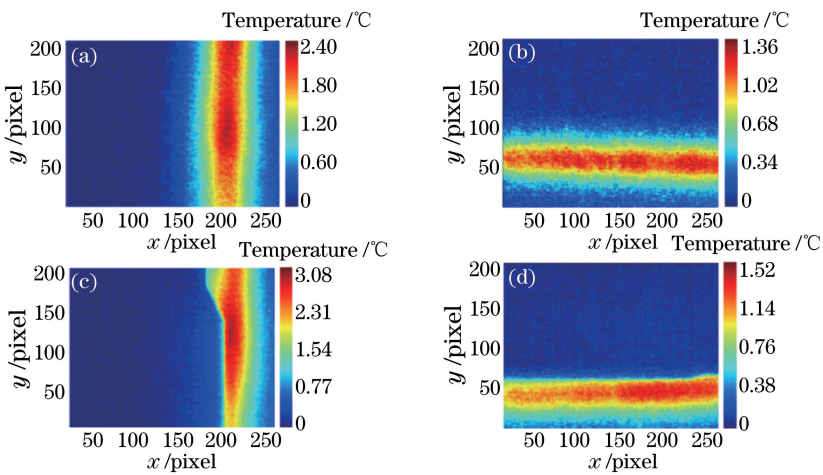


图 10 由图 8 所显示的原始热像得到的锁相幅度图像。(a)完整芯片垂直线激励;(b)完整芯片水平线激励;(c)垂直裂纹芯片上垂直线激励;(d)水平裂纹芯片上水平线激励

Fig. 10 Phase-locked amplitude images obtained from raw thermal images in Fig. 8. (a) Vertical line excitation on intact chip; (b) horizontal line excitation on intact chip; (c) vertical line excitation on vertically cracked chip; (d) horizontal line excitation on horizontally cracked chip

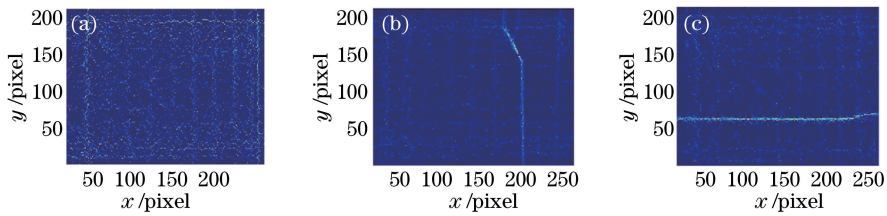


图 11 芯片所得的不连续图像。(a) 无裂纹；(b) 垂直裂纹；(c) 水平裂纹

Fig. 11 Discontinuous images obtained from chips. (a) Without crack; (b) with vertical crack; (c) with horizontal crack

步骤 6) 所描述的降噪过程应用于上述不连续图像。降噪后, 只有裂纹被成功可视化, 如图 12(b) 和 (c) 所示, 图 12(a) 无肯定错误警报发出。注意, 这里不

需要与图 12(a) 进行比较便可轻易确定图 12(b) 和 (c) 裂纹的存在和位置, 这证明了无任何专家介入的情况下, 仍然可能获得自动即时无基线裂纹诊断。

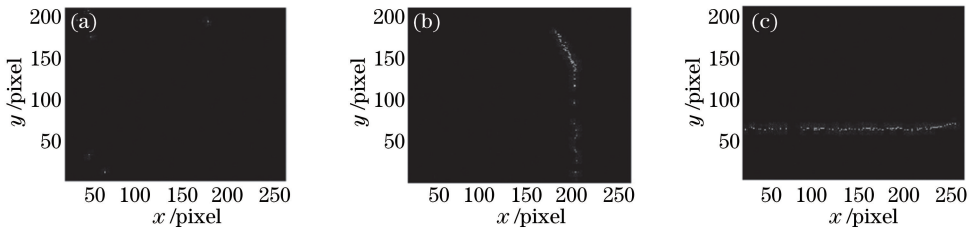


图 12 降噪后最终得到的图像。(a) 无裂纹；(b) 垂直裂纹；(c) 水平裂纹

Fig. 12 Final images obtained after de-noising process. (a) Without crack; (b) with vertical crack; (c) with horizontal crack

5 结 论

提出了一种新型线激光锁相热成像技术, 用于瞬时检测半导体芯片上的表面裂纹。线激光锁相热成像系统在即使表面图案和噪声分量存在的情况下仍然能提供清晰的激光产生的热波场图像, 因此提高了半导体芯片细微裂纹的可检测性。另外, 还提出了一种新型无基线裂纹可视化算法, 可在不使用基线数据的情况下进行裂纹可视化, 最大限度降低裂纹诊断的误差。本研究提出的线激光锁相热成像技术已通过可视化半导体压制芯片上真实的微裂纹成功验证, 可对宽度为几十微米的裂纹进行可视化。尽管所展示的实验仅对有限的半导体压制芯片样本和裂纹类型进行了处理, 但所提出的线激光锁相热成像技术可应用于不同类型的半导体芯片的纳米级裂纹检测。特别地, 裂缝方向为随机取向, 并且裂缝的检测性受到线扫描方向的影响, 可通过在不同线扫描方向下的多次扫描来解决该问题, 但是需要以增加检查时间为代价。另外, 尽管本研究所使用的激光加热水平并不会对芯片本身造成实际破坏, 利用线激光锁相热成像技术检测后最好对半导体芯片的实际损伤状态进行可靠性测试。

致谢 感谢韩国先进科学技术院、深圳市柏达斯科技有限公司以及深圳市首品科技有限公司对本研究

给予的支持。

参 考 文 献

- [1] Xu Z S, Shi T L, Lu X N, et al. Failures detection of flip-chip using active thermography method based on wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3233-3237.
徐振淞, 史铁林, 陆向宁, 等. 基于小波分析的倒装芯片主动红外缺陷检测[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3233-3237.
- [2] Yin J F, Bai Q, Li Y N, et al. Formation of subsurface cracks in silicon wafers by grinding [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2018, 1(3): 172-179.
- [3] Peacock C, Bolouri H, Habiger C. Cost-effective multichip module manufacture using passive substrate fault tolerance [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, 1997, 20(3): 320-326.
- [4] Liu J N, Xu B S, Wang H D, et al. Research progress of fatigue failure prediction methods and damage mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(20): 26-34.
刘金娜, 徐滨士, 王海斗, 等. 薄膜疲劳失效预测方法与损伤机制的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(20): 26-34.
- [5] Sadler D J, Ahn C H. On-chip eddy current sensor

- for proximity sensing and crack detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 91(3): 340-345.
- [6] Li Q, Yang Y F, Zhao Y P, et al. Measurement investigation of continuous wave terahertz back scattering characteristics in three kinds of background materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011201.
李琦, 杨永发, 赵永蓬, 等. 三种背景材料的连续太赫兹后向散射特性测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011201.
- [7] Zhang C L, Mu K J. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 023001.
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 023001.
- [8] Wang X S, Dai Q H, Jiao L C, et al. Developments and prospects of high-performance detection imaging and identification[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2016, 46(9): 1211-1235.
王雪松, 戴琼海, 焦李成, 等. 高性能探测成像与识别的研究进展及展望[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(9): 1211-1235.
- [9] Takahashi S, Miyoshi T, Takaya Y, et al. In-process measurement method for detection and discrimination of silicon wafer surface defects by laser scattered defect pattern[J]. *CIRP Annals*, 1998, 47(1): 459-462.
- [10] Takahashi S, Miyoshi T, Takaya Y, et al. New optical measurement technique for Si wafer surface defects using annular illumination with crossed nicols[C]//*Proceedings of the 17th American Society for Precision Engineering Annual Meeting*, 2002: 41-6.
- [11] Belyaev A, Polupan O, Ostapenko S, et al. Resonance ultrasonic vibration diagnostics of elastic stress in full-size silicon wafers [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, 21(3): 254-260.
- [12] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, et al. The principle of laser [M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 33-38.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. *激光原理*[M]. 7版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 33-38.
- [13] Pu Y F, Wang W X, Zhou J L, et al. Fractional differential detection of digital image texture details and implementation of fractional differential filter[J]. *Science in China (Series E: Information Sciences)*, 2008, 38(12): 2252-2272.
蒲亦非, 王卫星, 周激流, 等. 数字图像纹理细节的分数阶微分检测及其分数阶微分滤波器实现[J]. *中国科学(E辑: 信息科学)*, 2008, 38(12): 2252-2272.
- [14] Zhang Y H, Liu X H, Liu X X, et al. Edge thinning based on Robert operator in detection of ceramic substrates [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Science and Technology)*, 2009, 23(6): 93-96.
张元恒, 刘晓红, 刘雪香, 等. 陶瓷基片检测中 Robert 边缘细化算法[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 23(6): 93-96.
- [15] Lienhard J H. A heat transfer textbook[M]. 4th ed. Cambridge: Courier Corporation, 2011: 60-99.
- [16] Jaeger J C, Carslaw H S. Conduction of heat in solids [M]. Oxford: Clarendon Press, 1959: 25-44.
- [17] An Y K, Min Kim J, Sohn H. Laser lock-in thermography for detection of surface-breaking fatigue cracks on uncoated steel structures [J]. *NDT & E International*, 2014, 65: 54-63.
- [18] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(2): 617-643.
- [19] Huang Y, Lei T, Fan Y Y, et al. Adaptive decision-based unsymmetric trimmed median filter [J]. *Computer Science*, 2015, 42(1): 303-307.
黄燕, 雷涛, 樊养余, 等. 基于自适应窗口的裁剪中值滤波方法[J]. *计算机科学*, 2015, 42(1): 303-307.
- [20] Park H W, Sohn H. Parameter estimation of the generalized extreme value distribution for structural health monitoring [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2006, 21(4): 366-376.
- [21] Wu Y C, Qiu J H, Zhang C, et al. A method to improve the visibility of the damage-reflected wave [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0308001.
吴郁程, 裘进浩, 张超, 等. 一种损伤反射波波场可视化的改进方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0308001.
- [22] Chen P, Yang P, Feng X C, et al. Two improvements of laser single slit diffraction measurement experiment[J]. *Physical Experiment of College*, 2015, 28(5): 39-41.
陈鹏, 杨鹏, 冯学超, 等. 激光单缝衍射测量实验的两点改进[J]. *大学物理实验*, 2015, 28(5): 39-41.