

文章编号 1004-924X(2008)07-1241-06

激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用

曾毅波¹, 蒋书森¹, 黄彩虹², 张玉龙¹, 张艳¹

(1. 厦门大学 萨本栋微机电研究中心, 福建 厦门 361005;

2. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究了激光共焦扫描显微镜(LSCM)在微结构分析中的应用, 综述了该项应用的优势。LSCM 的高分辨率和光强调节功能, 使其可用于大角度测量; 与图像处理系统相结合, 便于微结构的定性和定量分析; 而全自动样片台沿 X 轴和 Y 轴的自动扫描实现了图像的拼接功能。实验结果表明: 运用 LSCM 测量的斜面最大角度至少可以达到 50° ; 在悬臂梁的形貌分析中, 可获得清晰的三维形貌, 同时通过二维定量分析精确测得其形变为 $3.145 \mu\text{m}$; 在 $100\times$ 物镜下, 运用拼接功能获得 $384 \mu\text{m} \times 288 \mu\text{m}$ 的视场面积, 解决了高放大倍数下, 在单帧显微图像中无法获取所观测对象全貌的问题。LSCM 在微结构分析中的应用弥补了其它形貌分析设备测量功能上的不足, 提升了微机电系统的测试水平。

关键词: 激光共焦扫描显微镜; 微机电系统; 角度测量; 形貌分析; 图形拼接

中图分类号: TH742.64 文献标识码: A

Application of laser scanning confocal microscope in micro-electro-mechanical system

ZENG Yi-bo¹, JIANG Shu-sen¹, HUANG Cai-hong², ZHANG Yu-long¹, ZHANG Yan¹

(1. *Pen-Tung Sah Micro-electro-mechanical Systems Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China;*

2. *College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China*)

Abstract: An application of Laser Scanning Confocal Microscope (LSCM) in micro-structure analysis was discussed in order to enhance the analyzing and measuring levels of micro structure. LSCM could be used to measure large angle because of its high resolution and adjustable light intensity, and could analyze the micro structure by combining with picture disposal system qualitatively and quantitatively, also its full-automatic sample stand could automatically scan along X axis and Y axis to realize a picture mosaic. The experimental results indicate that the maximum slope angle measured by LSCM reaches at least 50° , and the clear three dimensional profile is obtained in the profile analysis of cantilever. Meanwhile, the deformation accurately measured by two dimensional quantitative analysis is $3.145 \mu\text{m}$, and the field area is $384 \mu\text{m} \times 288 \mu\text{m}$ in mosaic function equipped with LSCM in $100\times$ objective, which can solve the problem that the watched object's total shape in single frame micrographic

收稿日期: 2007-10-21; 修订日期: 2007-12-29.

基金项目: 厦门大学科技创新预研基金资助项目(No. Y07002)

image can not be obtained under high microscopic enlargement times. Experimental results show that the LSCM can make up for measuring functional deficiency of other profile analytic equipment and can improve the testing level of MEMS.

Key words: Laser Scanning Confocal Microscope (LSCM); Micro-electro-mechanical System (MEMS); angle measurement; profile analysis; picture mosaic

1 引言

微电子机械系统(MEMS)技术是建立在微纳米技术基础上的 21 世纪前沿技术,是指对微纳米材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术,它可将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成成为一个整体单元。微机电系统从设计到封装各个环节都要贯彻测试要求。其中,在微结构的设计与加工中,微结构三维形貌信息对评判加工工艺和研究微尺寸特性有着重要的指导意义。

本文介绍采用激光共聚焦扫描显微镜(LSCM)对三维微结构进行分析与测量的方法。LSCM 技术是 20 世纪 80 年代末、90 年代初兴起的一项新的光学显微测试方法,集显微技术、高速激光扫描和图像处理技术为一体,弥补了普通光学显微镜与扫描电子显微镜测量功能上的不足,在三维微结构分析与测量方面具有许多新的功能和优势。

2 LSCM 成像原理

图 1 为 LSCM 的成像原理图。

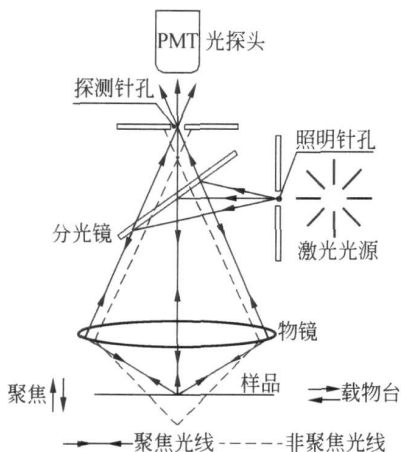


图 1 LSCM 成像原理

Fig.1 Imaging principle of LSCM

LSCM 采用激光束作为光源,激光束经照明针孔,由分光镜反射至物镜,并聚焦于样品上,对样品内焦平面上每一点进行扫描。然后,反映样品形貌的光信号经原来入射光路直接反向回到分光镜,通过探测针孔时先聚焦,聚焦后的光被光电倍增管(Photo Multiple Tube, PMT)收集,并将信号输送到计算机,在显示屏上显示图像。也就是说,焦平面就如同一把刀,以非破坏性的方式切割样品的三维曲面,得到不同二维切面图像,组合这些二维切面图像,可获得样品三维形貌。在此过程,只有焦平面上的光才能穿过探测针孔,焦平面以外区域射来的光线在探测针孔平面是离焦的,不能通过小孔。因此,非观察点的背景呈黑色,反差增加,成像清晰。由于照明针孔与探测针孔相对于物镜焦平面是共轭的,焦平面上的点同时聚焦于照明针孔和探测针孔,焦平面以外的点不会在探测针孔成像,即共聚焦。

3 LSCM 在 MEMS 中的应用

3.1 基本的测量功能

图 2 为 Olympus 公司生产的 OLS1200-FAR2 型 LSCM。该设备采用 He-Ne 激光束作为光源,波长为 633 nm,纵向扫描精度达 0.01 μm。LSCM 采集样品数据后,可测量线与面粗糙度、线宽、台阶、面积和体积等。



图 2 OLS1200-FAR2 型激光共聚焦扫描显微镜

Fig.2 OLS1200-FAR2 LSCM

图 3 是硅片在超声状态下进行湿法刻蚀后的表面粗糙度分析, 可以看出湿法刻蚀后的表面呈“橘皮”状, 对整体 1 和局部区域 2 进行表面粗糙度分析, 其值分别为 $Rq0.029 \mu\text{m}$ 和 $Rq0.027 \mu\text{m}$ 。

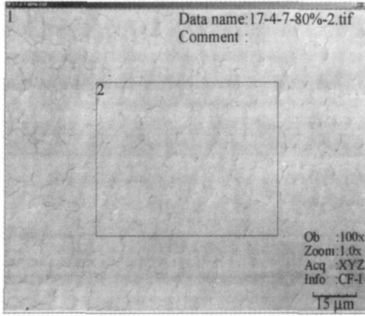
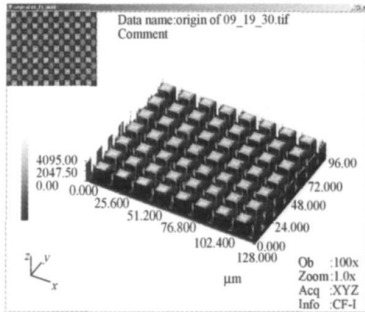


图 3 湿法刻蚀后的硅片表面粗糙度分析

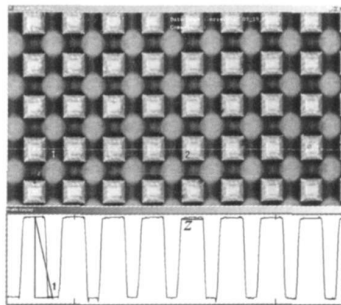
Fig. 3 Surface roughness analysis of wet etched wafer

图 4 是干法刻蚀后硅片的形貌分析。图 4 (a)表达刻蚀后硅片的三维形貌, 图 4(b)是在二维状态下, 分析台阶的高度和宽度。1 处台阶高度为 $26.508 \mu\text{m}$, 2 处台阶宽度为 $8.047 \mu\text{m}$ 。



(a) 三维形貌

(a) Three dimensional profile



(b) 二维形貌

(b) Two dimensional profile

图 4 干法刻蚀后的硅片形貌分析

Fig. 4 Profile analysis of dry etched wafer

3.2 角度测量

目前, 硅基微机械加工已经成为 MEMS 加工技术的主流。硅基微加工可分为表面微机械加工技术和体微机械加工技术。硅的各向异性腐蚀属于体微机械加工技术。如图 5 所示, $\langle 100 \rangle$ 硅片各向异性腐蚀后, $\langle 111 \rangle$ 晶面与 $\langle 100 \rangle$ 晶面成 54.74° 。

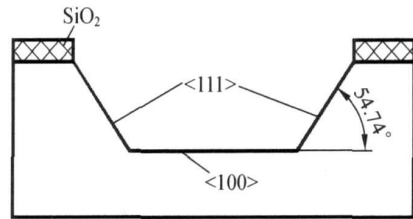


图 5 $\langle 100 \rangle$ 硅片各向异性腐蚀

Fig. 5 Anisotropic etching of $\langle 100 \rangle$ wafer

在 100×0.9 物镜下, 采用 LSCM 验证 $\langle 111 \rangle$ 晶面的倾斜角度, 结果如图 6 所示。所测量的晶面倾斜角度为 54.397° , 与 54.74° 理论角度基本一致。

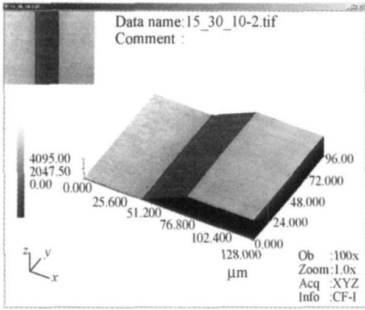
关于采用 LSCM 测量角度的问题, H-J Jordany 等认为^[1] LSCM 所能测量的最大角度主要取决于物镜的数值孔径 NA, 并提出如下关系式:

$$\theta_{\text{max}}^{\text{spec}} = 0.5 \arcsin \text{NA} \quad (1)$$

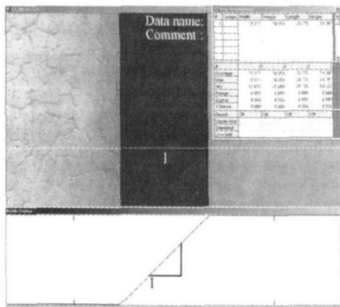
以 Leica PL 160×0.95 为例, 所能测量斜面的最大角度为 35.9° 。但此结论明显不符合图 6 的测量结果。

H-J Jordany 等提出的 LSCM 所能测量最大角度计算公式与普通光学显微镜孔径角的计算公式相一致^[2], 是基于普通光学显微镜成像原理来判定 LSCM 所能测量角度的范围。普通光学显微镜分辨率主要取决于光源波长和数值孔径, 其使用的是场光源, 不仅从焦平面上收集光量, 而且还收集来自焦平面上、下的光量, 使分辨率大大降低。根据 LSCM 成像原理, LSCM 的分辨率除了与光源波长有关外, 还取决于针孔直径与物镜数值孔径^[3-4]。由于有针孔的存在, 所用光源和光探头都是点状的, 只有来自焦平面的光可以参与成像, 而其它来自焦平面上、下的光由于不能进入针孔而不能参与成像, 使分辨率较普通光学显微镜大为提高, 显著改善了视野的广度和深度。此外, 由于纵向扫描装置的存在, 使得 LSCM 不但具有横向分辨率, 还具有纵向分辨率。不但增加了同

一平面两点间的分辨率,也使得各横断面的图像能够清晰显示^[5]。



(a) 三维形貌
(a) Three dimensional profile



(b) 二维形貌
(b) Two dimensional profile

图 6 角度测量

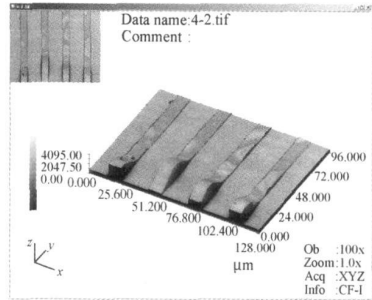
Fig. 6 Angle measurement

对于针孔尺寸的选择,针孔较大则共焦效果较差,但是通过针孔的亮度较强;相对的,针孔较小则共焦效果较好,但是通过针孔的亮度较低,不过后者可以在扫描过程中通过调节光源强度加以弥补,所以一般选择针孔越小越好。图 6 整个扫描过程中,上下两个表面设置的光强强度较低,而斜面设置的光强强度较高。光学系统在向被测表面逼近的过程中,光探头接收到的光强经历了一个从无到有、从弱到强、再变弱直到无的过程。这样,可根据判断光强的最大值来确定光探头在被测表面准确位置,从而准确描绘出整个斜面的形貌。

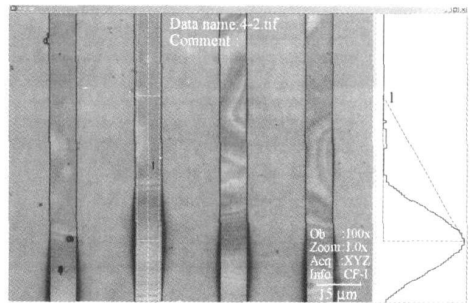
LSCM 特有的共聚焦成像,纵向扫描装置和扫描过程中的光强调节,使得即使采用同一型号的物镜, LSCM 也会比普通光学显微镜具有更高的分辨率和光强调节范围,从而使得 LSCM 可以进行大角度的测量。

3.3 悬臂梁形貌分析

在 MEMS 中, Si_3N_4 因具有良好的机械强度和力学特性而得到广泛应用。但无论是采用 PECVD 或 LPCVD 生长的 Si_3N_4 膜都存在着内应力的问题。内应力会严重影响器件的成品率和服役性能。如何通过控制 Si_3N_4 膜生长工艺过程,降低 Si_3N_4 膜在生长过程中的内应力,以获得大面积的自支撑膜,就成了 Si_3N_4 膜制备的主要问题。



(a) 三维形貌
(a) Three dimensional profile



(b) 二维形貌
(b) Two dimensional profile

图 7 悬臂梁形貌分析

Fig. 7 Profile analysis of cantilever

Si_3N_4 膜制成的悬臂梁因内应力的存在而使得梁发生翘曲变形。传统的方法是采用扫描电子显微镜(SEM)获得分辨率很高的梁三维形貌图,但存在着无法对形变程度进行测量的困难^[6]。如图 7 所示,采用 LSCM 可以获得清晰的悬臂梁三维形貌图, LSCM 结合强大图像处理系统,不仅可实现三维图像的平移、旋转、缩放、色彩设置等基本功能,而且可以把悬臂梁三维图像转化为二维图形,对梁翘曲程度进行精确的二维定量分析。以悬臂梁 1 为例,测得其形变为 $3.145 \mu\text{m}$ 。通过获得的形变高度,比较和判定不同工艺参数所制

备的 Si_3N_4 膜存在的内应力大小, 不仅为 Si_3N_4 材料的研究提供了具有较高参考价值的实验分析数据, 而且明确了 Si_3N_4 工艺参数的改进方向。

3.4 拼接功能

LSCM 所自带的拼接功能解决了在高放大倍数下, 在单帧显微图像中无法获取所观测对象全貌的问题。拼接过程是通过全自动样片台沿 X 轴和 Y 轴进行自动扫描, 把若干幅部分小图像拼接成一幅大的图像, 以得到全景信息。

图 8 是在 $100\times$ 物镜下, 图像电子放大为 1 倍时, 采用拼接功能对湿法刻蚀后硅片底面进行全景扫描的图像。没有采用拼接功能, 在 $100\times$ 物镜下, 图像电子放大为 1 倍时其视场面积为 $128\ \mu\text{m}\times 96\ \mu\text{m}$, 而采用拼接功能后, 其视场面积为 $384\ \mu\text{m}\times 288\ \mu\text{m}$, 这有利于从整体上快速直观地判断腐蚀后样品表面的质量。

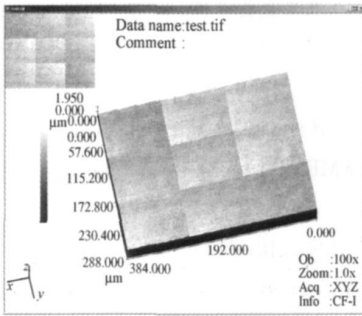


图 8 拼接图形

Fig. 8 Mosaic image

4 LSCM 测量功能上的优势和局限性

目前, 对微结构进行形貌测量的设备除了 LSCM 外, 还包括台阶仪、扫描电子显微镜 (SEM)、白光干涉仪等。每款设备在测量功能都有其优势, 但也存在着局限性。

LSCM 与台阶仪相比, 优势在于可以实现三维形貌分析, 并可实现非接触测量。台阶仪优势在于可以实现快速测量, 操作方便简单, 所得数据可信度高, 且设备价格远低于 LSCM, 但它存在有一定的触测力, 需要进行测头半径补偿, 而且测头容易划伤被测表面或被硬质表面划伤^[7]。

与 SEM 相比, LSCM 的优势为在获得样片三维形貌图的基础上, 可以进行二维定量分析。SEM 虽然可以用于微纳米量级结构的三维形貌

分析, 但它比较适合于定性分析。另外 LSCM 无须制样, 不需要对样品进行导电处理, 容许大尺寸样品直接观察。但是对类似于开口尺寸为 $5\ \mu\text{m}$, 深度为 $20\ \mu\text{m}$ 以上的开口小, 深宽比高的深槽, LSCM 无法获得其三维形貌图, 需要借助 SEM 高纵向和横向分辨率观察其深槽的截面形态。

LSCM 和白光干涉仪都属于光学显微镜。都具备三维、二维形貌分析功能和拼接功能, 并可实现非接触测量。LSCM 优势在于能够实现大角度的测量。白光干涉仪优势在于纵向分辨率达 $0.1\ \text{nm}$, 测量精度达纳米量级^[8], 适用于超光滑加工后样品表面粗糙度分析^[9-10], 薄膜生长后表面质量分析和小面积曲率半径分析。LSCM 纵向分辨率和测量精度低于白光干涉仪, LSCM 适用于体硅加工中湿法刻蚀后相对粗糙的表面粗糙度分析。

通过比较可知, LSCM 在 MEMS 中测量的优势在于能够实现三维形貌分析, 而且可以进行二维定量分析, 并可实现非接触测量, 无须制样, 同时能够进行大角度和刻蚀表面粗糙度值测量。其局限性在于不能够对纳米量级表面进行粗糙度测量, 不能对开口小, 深宽比大的深槽进行形貌分析。

5 结 论

(1) 使用 100×0.9 物镜, LSCM 测量的最大斜面角度至少可以达到 50° 。LSCM 特有的共聚焦成像, 纵向扫描装置和扫描过程中的光强调节, 使得即使采用同一型号的物镜, LSCM 会比普通光学显微镜具有更高的分辨率和光强调节范围, 从而可运用于大角度测量。这弥补了多数光学显微镜不能够进行大角度测量的不足;

(2) 运用 LSCM, 不仅可以获得清晰的悬臂梁三维形貌图, 同时可对形变进行精确的二维定量分析, 其值为 $3.145\ \mu\text{m}$ 。LSCM 的三维和二维形貌分析功能不仅可以表征微加工工艺, 而且为工艺的改进指明了方向;

(3) 运用 LSCM 所自带的图形拼接功能, 在 $100\times$ 物镜下, 其视场面积可达 $384\ \mu\text{m}\times 288\ \mu\text{m}$, 从而解决了在高放大倍数下, 在单帧显微图像中无法获取所观测对象全貌的问题, 有利于整体上快速直观地判断微结构的三维形态;

(4)明确了 LSCM 在 MEMS 中应用范围。LSCM 适用于台阶高度、宽度、相对粗糙的表面粗糙度、角度、形变达到 $0.1 \mu\text{m}$ 以上的薄膜翘曲程度的测量,不适用于纳米量级表面粗糙度测量,不能对开口 $< 5 \mu\text{m}$, 深宽比 $> 1:4$ 类似的深槽进行形貌分析。

目前, LSCM 主要应用于生物学领域,在 MEMS 方面的应用研究相对较少。基于此,本文对 LSCM 在 MEMS 中应用进行了初步的总结和探讨。相信 LSCM 技术的不断发展和完善,将推动 MEMS 测试技术水平的提升。

参考文献:

- [1] JORDANY H J, WEGNER M, TIZIANI H. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, 9: 1142-1151.
- [2] 孙业英. 光学显微分析 [M]. 北京: 清华大学出版, 2003.
SUN Y Y. *Optical Microscopic Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [3] DIASPRO A, ANNUNZIATA S, RAIMONDO M, *et al.*. A single - pinhole confocal laser scanning microscope for 3D imaging of bio-structures [J]. *IEEE Eng Med Biol.*, 1999, 18: 106-110.
- [4] BRAKENHOFF G J, BLOM P, BA RENDS P. Confocal scanning light microscopy with high aperture immersion lenses [J]. *J Microsc.*, 1979, 117: 219-232.
- [5] 霍霞, 吕建勋, 杨仁东, 等. 激光共聚焦显微镜与光学显微镜之比较 [J]. 激光生物学报, 2001, 10(1): 76-79.
HUO X, LV J X, YANG R D, *et al.*. Comparison of laser scanning confocal microscope with light microscope [J]. *Acta laser biology sinica*, 2001, 10(1): 76-79. (in Chinese)
- [6] 何日晖, 叶雄鹰, 周兆英. 微型机械材料残余应力的测量 [J]. 机械工程材料, 2001, 25(5): 29-32.
HE R H, YE X Y, ZHOU ZH Y. Measurement of residual stress of MEMS materials [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, 25(5): 29-32. (in Chinese)
- [7] 王富生, 谭久彬. 表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法 [J]. 光学 精密工程, 2000, 8(4): 309-315.
WANG F SH, TAN J B. Methods of high resolution optical measurement for surface profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4): 309-315. (in Chinese)
- [8] 张以谟, 井文才, 张红霞, 等. 数字化白光扫描干涉仪的研究 [J]. 光学 精密工程, 2004, 12(6): 560-565.
ZHANG Y M, JING W C, ZHANG H X, *et al.*. Computerized white light scanning interferometer and the application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 560-565. (in Chinese)
- [9] 项震, 侯晶, 聂传继, 等. 化学刻蚀的光学元件面形修复 [J]. 光学 精密工程, 2007, 15(7): 997-1001.
XIANG ZH, HOU J, NIE CH J, *et al.*. Form error of optical surface repaired by wet-etch figuring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 997-1001. (in Chinese)
- [10] 曹志强, 赵继, 陈德祥, 等. 硅晶片的液流悬浮超光滑加工机理与实验 [J]. 光学 精密工程, 2007, 15(7): 1084-1089.
CAO ZH Q, ZHAO J, CHEN D X, *et al.*. Theory and experiment on hydrodynamic suspension ultra-smooth machining for silicon wafers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1084-1089. (in Chinese)

作者简介: 曾毅波(1978—), 男, 助理工程师, 主要从事 MEMS 工艺开发和测试工作。E-mail: zyb2005@xmu.edu.cn