

利用 Mirau 显微干涉仪测量微器件的纳米级运动*

郭 彤 胡春光 胡晓东 栗大超 金翠云 傅 星 胡小唐

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要 描述了一种用于微机电系统(MEMS)纳米级微运动测量的 Mirau 显微干涉系统. 该系统利用商业化的 Mirau 显微干涉仪, 它直接安装在光学显微镜上, 用于测量一个表面微加工水平谐振器的三维运动. 面内运动取决于亮场在最佳焦平面处的图像, 而离面运动则取决于频闪得到的干涉图像, 该图像在物镜纳米定位器的 8 个不同位置处得到. 实验结果表明了系统进行面内和离面运动测量的纳米级分辨力.

关键词 微机电系统; Mirau 显微干涉仪; 面内运动; 离面运动; 频闪照明

中图分类号 TH741.4 **文献标识码** A

0 引言

MEMS 设计和加工需要强大的测量工具来保证它们的性能和设计者的初衷相一致, 并且在工程开发中给设计和加工过程提供反馈信息. 这个反馈信息包括了器件的材料属性、三维结构、动态特性、表面形貌、可靠性估计等. 对于微谐振器、微陀螺、微加速度计、光开关等一些具有可动部件的 MEMS 器件, 其动态特性决定了 MEMS 器件的基本性能, 因此 MEMS 动态特性的测量在 MEMS 研发过程中具有极为重要的地位^[1~3].

视觉成像系统以前常用于测量 MEMS 器件的三维运动, 而干涉测量系统则提供了更好的离面运动解决方案^[4]. Mirau 显微干涉仪基于商业化的光

学系统, 由该仪器获得的数据显示有很好的离面干涉法与面内亮场计算机微视觉两者的结合, 从而较容易实现高精度三维测量^[5~7].

1 测试方法

1.1 显微干涉仪的选择

显微干涉仪是显微镜和干涉系统结合的产物, 与其它光学干涉技术相比, 它具有表面信息直观、测量精度高和全视场三维测量等优点. 特别是相移技术在显微干涉仪中的应用, 使得系统的测量精度大大提高, 离面测量的分辨力超过 0.1 nm. 常用的显微干涉仪主要有 Michelson 型、Mirau 型、Linnik 型三种, 它们的光学结构如图 1.

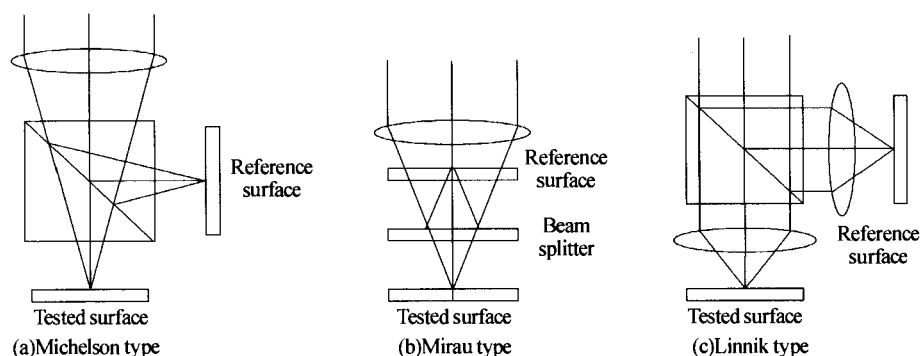


图 1 三种显微干涉仪的光学结构

Fig. 1 Optical structures of three kinds of microscopic interferometers

Michelson 型显微干涉仪如图 1(a). 来自照明系统的光束经显微物镜后被分光棱镜分为两束, 一束被参考面反射, 另一束由被测面反射, 两束光再次经过分光棱镜后会合发生干涉. 从干涉分光方式和光路结构看, Michelson 型显微干涉仪类似于经典

的 Michelson 干涉仪, 所不同的是, Michelson 干涉仪是一种宏观测量, 它测量的是表面形状或表面形状误差, 而 Michelson 显微干涉仪是一种显微放大测量, 测量的是物体表面的微观形貌.

Michelson 显微干涉仪的特点是测量光路与参考光路共同使用一个显微物镜, 因而在测量时两束干涉光不会因物镜的不同而引入附加的光程差. 此外, 由于测量光路与参考光路近似共路, 因此抗干扰

* 国家 863 计划资助项目 (2004AA404042)

Tel: 022-27402444 Email: guotong1977@hotmail.com

收稿日期: 2004-08-23

能力强. 但由于在物镜和被测表面之间需放置分光板, 因此只能使用工作距离较长的显微物镜, 致使显微物镜的数值孔径受到限制, 横向测量分辨力较低, 它的放大倍率一般只有 $1.5\times$, $2.5\times$ 和 $5\times$.

图 1(c) 为 Linnik 型显微干涉仪. 来自照明系统的光束经分光棱镜后形成两路, 一路经显微物镜聚焦在参考面上并反射回显微物镜还原成平行光, 另一路经过另一个显微物镜聚焦在被测表面上, 反射后经显微物镜还原成平行光, 两束反射光经过分光棱镜后重新会合并产生干涉.

在 Linnik 型显微干涉仪中, 测量光路与参考光路分成两路, 两光路采用完全相同的显微物镜, 因此系统要求两组物镜的波面应具有一致性. 由于在物镜与被测面之间没有其它光学元件, 它可以使用工作距离较短的物镜, 其数值孔径可高达 0.95, 因而横向分辨力较高. 物镜的放大倍率最高一般达 $100\times$, 甚至 $200\times$.

Mirau 型显微干涉仪如图 1(b). 从光源发出的光束经显微物镜后透过参考板, 被分光板上的半透半反膜分成两路. 一路透过分光板后透射到被测量面上, 反射后经分光板和参考板回到显微物镜, 另一路被分光板反射到参考板上表面的小镜面上, 从小镜面上反射回的光束再次被分光板反射, 然后穿过参考板到达显微物镜. 两束光在显微物镜视场中会合并发生干涉.

Mirau 型显微干涉仪的特点也是只使用了一个显微物镜. 由于测量光路和参考光路几乎共用一个光路, 物镜对参考光束和测量光束的影响相同, 因此在测量时不会引入附加光程误差. 另外, 参考光路和测量光路的工作条件较为接近, 可以排除很多干扰因素.

由于在物镜和被测表面之间安置了参考镜和分光镜, 因而 Mirau 显微干涉仪只能使用较长工作距离的显微物镜, 物镜的数值孔径被限制在 0.5 以下, 降低了系统的横向分辨力, 显微物镜的放大倍率为 $10\times$, $20\times$, $50\times$. 但 Mirau 显微干涉仪的抗干扰能力、横向测量分辨力都强于 Michelson 显微干涉仪, 在追求测量精度和抗干扰能力最佳组合的表面微观形貌和离面位移测量中有着很强的使用价值.

在本文构建的测试系统中, 选用了 Nikon 公司的 Mirau 显微干涉仪, 放大倍数 $20\times$, 数值孔径 0.4, 工作距离 4.7 mm, 视场范围 $690\times 460\ \mu\text{m}$. Mirau 显微干涉仪通过一个物镜纳米定位器 (PIP-721. CL, 电容反馈闭环控制) 连接到 Zeiss 光学显微镜上, 纳米定位器的运动改变测量臂和参考臂之间的光程差, 实现了相位改变, 如图 2. 干涉图像被一个数字

CCD 摄像机 (Redlake Megaplus 1.6i) 记录下来, 然后传输给 PC 机进行后续处理. 系统配有信号发生单元和高压放大单元, 用来产生高压信号和激励测试的 MEMS 器件. 整个系统装置放置在一个隔振平台上, 并且被封闭起来以使外界振动和空气气流对其干扰最小.

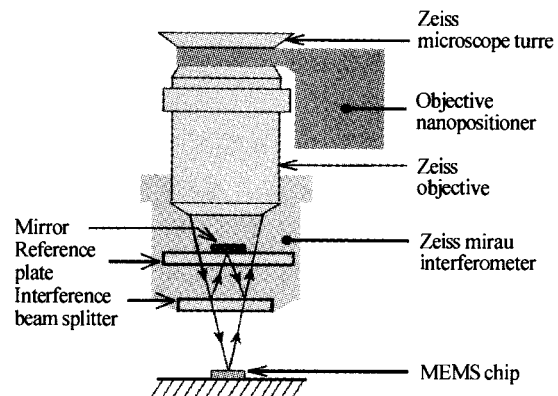


图 2 Mirau 显微干涉装置

Fig. 2 Schematic of Mirau microscopic interferometric apparatus

1.2 频闪照明系统

MEMS 动态测试系统的激励信号为正弦交流信号, 频闪照明光源有两种, 一个高亮度发光二极管 (LED) 用于面内测量, 和一个高功率激光二极管 (LD) 用于离面测量, 波长 658 nm. 频闪光源由一个占空比为 $1/16$ 的脉冲序列激励. 该脉冲序列与频闪照明物体时 16 个等间隔的相位同步. 光源的光学上升时间在几十 ns, 因此系统的分析频率可以达到几 MHz.

1.3 测试的微结构

为了说明可以检测三维运动的干涉测量系统, 实验选了一个北卡微电子中心 (MCNC) 制造的表面微加工水平谐振器^[8], 该器件由正弦电压激励 (峰值为 10 V 的交流电压加上 20 V 的直流偏压形成). 微谐振器连接到一个梳尺驱动器上, 再通过梭形块连接到基底上.

1.4 平面内运动的测量

对于每个激励频率, 亮场图像在正弦激励波形的 16 个等间隔的相位处采集得到. 连续图像间的位移利用梯度方法 (基于光流技术) 来确定^[9]. 位移波形由运动增量之和得到. 再通过傅里叶变换, 从位移波形中就可以计算出相位和幅值.

1.5 利用干涉图像测量离面运动

对于每个激励频率和频闪相位, 采集得到不同物镜纳米定位器位置 (z 向) 处的一系列干涉图像, 本实验采用了 8 步相移算法, 相移量为 $\pi/2$. 其中, 每个像素都采集到了在 z 向呈正弦规律变化的光强

值. 这个光强幅值与被测器件表面的反射率成正比. 从正弦光强变化的相位中就可以得到器件在离面的相对位置.

在每种激励条件下, 在 z 向等间隔 ($\pi/2$ 对应于 $\lambda/8$, 即 82.25 nm) 的 8 个位置上获得一组干涉图像. 对于每个像素, 和 z 向位置相关的亮度变化利用最小二乘技术被拟合成正弦曲线, 离面运动便可以由最佳拟合的正弦曲线确定.

1.6 噪声分析

当测量系统的数据采集完成后, 将激励系统关闭, 测量过程重复进行一次. 有激励和无激励时得到的数据相比较, 进行同样的分析. 再重复 5 次无激励的实验, 将得到的运动测量数据作标准方差 (RMS), 噪声层由此确定.

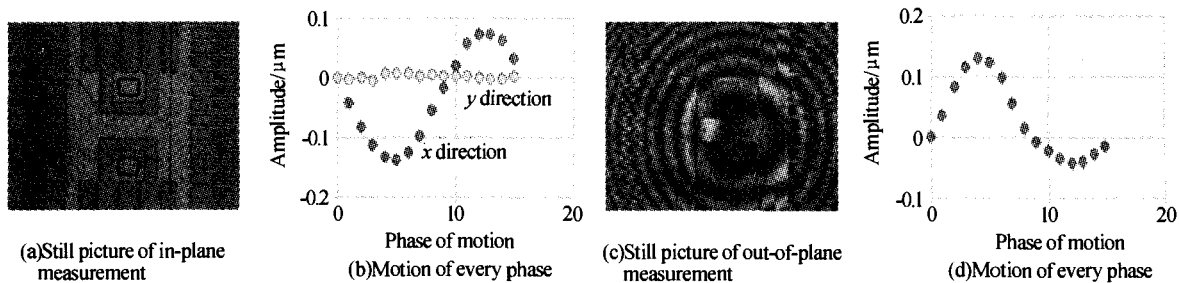


图 3 微谐振器的单频率测量结果

Fig. 3 Single frequency measurement results of micro resonator

对于面内运动, 相似的结果从 20 kHz 到 30 kHz 之间被采样 20 次. x 方向位移的幅值按照周期被显示出来 (图 4(a)、(b)). 这些结果可以拟合成一个二阶谐振系统, 该曲线在 22.6 kHz 处达到最大 (品质因数 $Q=22.95$), 运动幅值为 461.1 nm, 相位响应在谐振频率处有一个较大的跳变, 噪声层测得为 0.56 nm.

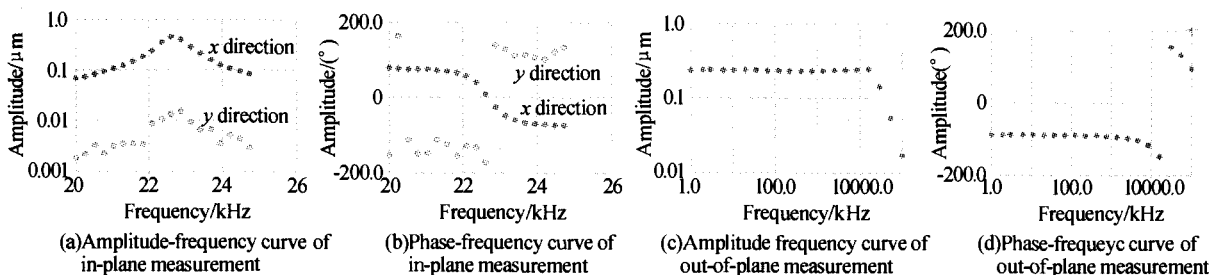


图 4 微谐振器的扫频测量结果

Fig. 4 Sweeping frequency measurement results of micro resonator

3 结论

本文描述了一个商业化的 Mirau 显微干涉仪, 它利用干涉图像实现了 MEMS 器件离面运动的高精度测量. 利用这个系统, 文中详细说明确了一个微谐振器面内和离面运动的具体测量方法, 其运动特性测量的噪音层在亚纳米量级. 本系统还可以用

2 实验及结果分析

在 21 kHz 的激励频率下, 实验分析了 16 个激励相位下的运动情况, 其中 8 个 z 轴位置上的频闪干涉图像和 1 个亮场图像 (在最佳焦平面), 结果在图 3 中显示. 方框内为用于计算的区域 (ROI). 对亮场图像 (图 3(a)) 进行分析便可以确定 x 、 y 方向的位移, 在 1 个激励周期内, 测量结果被绘制成曲线 (图 3(b)). 可以看出 x 方向位移的曲线近似于正弦曲线, y 方向基本上没有运动. 对干涉图像 (图 3(c)) 进行分析便可以确定 z 方向的位移. 在 1 个激励周期内, 测量结果被绘制成曲线 (图 3(d)). 可以看出 z 方向位移的曲线也近似于正弦曲线.

对于离面运动, 相似的结果从 1 Hz 到 100 kHz 之间被采样 20 次. z 向位移的幅值按照周期被显示出来 (图 4(c)、(d)). 这些结果可以拟合成一个二阶谐振系统, 该曲线在 16.2 kHz 处达到最大 (品质因数 $Q=0.87$), 运动幅值为 247.7 nm, 相位响应在谐振频率处有一个较大的跳变, 噪声层被测得为 0.48 nm.

来获得整个 MEMS 器件阵列的运动情况.

参考文献

- Burdess J S, Harris A J, Wood D, *et al.* A system for dynamic characterization of microstructures. *J Microelectroech Syst*, 1997, 6(4): 322~328
- Burns D J, Helbig H F. A system for automatic electrical and optical characterization of microelectromechanical devices. *J Microelectromech Syst*, 1999, 8(4): 473~482

- 3 李鸣明,王昭,贾书海,等. 光纤传感器在微机电系统振动测量中的应用. *光子学报*, 2001, **30**(4): 438~441
Li M M, Wang Z, Jia S H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 438~441
- 4 惠梅,牛憨笨,许谊,等. 表面微观形貌测量中数字图象处理的应用. *光子学报*, 2001, **30**(11): 1372~1375
Hui M, Niu H B, Xu Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1372~1375
- 5 Hart M R, Conant R A, Lau K Y, *et al.* Stroboscopic interferometer system for dynamic MEMS characterization. *J Microelectromech Syst*, 2000, **9**(4): 409~418
- 6 Krehl P, Engemann S, Rembe C, *et al.* High-speed visualization, a powerful diagnostic tool for microactuators - retrospect and prospect. *Microsystem Technologies*, 1999, **5**(3): 113~132
- 7 Rembe C, Muller R S. Measurement system for full three dimensional motion characterization of MEMS. *J Microelectromech Syst*, 2002, **11**(5): 479~488
- 8 Tang W C, Nguyen C H, Judy M W, *et al.* Electrostatic-comb drive for lateral polysilicon resonators. *Sensors & Actuators A*, 1990, **21**(2): 328~331
- 9 Davis C Q, Freeman D M. Using a light microscope to measure motions with nanometer accuracy. *Opt Eng*, 1998, **37**(4): 1299~1304

Measuring Nanoscale Motions of Microdevices Using a Mirau Interferometer

Guo Tong, Hu Chunguang, Hu Xiaodong, Li Dachao, Jin Cuiyun, Fu Xing, Hu Xiaotang
State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072

Received date: 2004-08-23

Abstract A Mirau microscopic interferometric system for measuring three-dimensional motions of microelectromechanical systems (MEMS) with nanometer resolution is demonstrated. The system utilizes a commercial Mirau microscopic interferometer, which mounts directly on a light microscope. The system was used for full three dimensional motion measurement of a surface micromachined lateral resonator. In-plane motions were determined from stop-action bright field images taken at the best plane of focus. Out-of-plane motions were determined from stroboscopic interferograms obtained at eight different positions of the objective nanopositioner. Experimental results demonstrate nanometer resolution for both in-plane and out-of plane motions.

Keywords Microelectromechanical systems (MEMS); Mirau microscopic interferometer; In-plane motion; Out-of-plane motion; Stroboscopic illumination



Guo Tong was born in 1977 in Jilin Province, China. He received the B. S. degree from Tianjin University in 1999, and received the M. S. degree from Tianjin University in 2002, and received the Ph. D. from Tianjin University in 2005. At present he is a postdoc in Tianjin University. His research interests include micro-and-nano fabrication and test and precise measurement and control.