

文章编号: 0253-2239(2005)06-803-6

## 微结构特性的光学测试平台\*

胡晓东 栗大超 郭彤 金翠云 胡春光 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:** 微结构是微机电系统的基本元件,其几何尺寸、运动特性、材料及力学特性直接影响微机电系统的整体性能。提出一种将计算机微视觉、米劳显微干涉、频闪成像和激光多普勒测振等技术充分融合的微结构静态和动态特性的光学测试平台,分别对微谐振器的平面和离面周期运动特性和微机械扭转镜的离面瞬时运动特性进行测试研究。实验结果表明,利用计算机微视觉和频闪成像技术能够实现微结构的平面位移、运动相位及谐振频率等周期运动参量的测试,位移的重复精度为 30 nm;利用显微干涉和频闪成像技术可实现微结构的离面位移及表面扭曲等周期运动参量的测试,位移的重复精度为 3 nm;激光多普勒测振技术具有在频域上对微结构瞬态运动进行分析的优点,是时域上周期运动测试的重要补充。

**关键词:** 光学测量; 微结构动态特性; 计算机微视觉; 米劳显微干涉; 频闪成像; 激光多普勒测振

中图分类号: TH741 文献标识码: A

## Optical Measurement Platform for Micro-Structures Characterization

Hu Xiaodong Li Dachao Guo Tong Jin Cuiyun Hu Chunguang Hu Xiaotang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Micro-structures are a few typical elements of micro-electromechanical system (MEMS). The physical dimensions, motion characteristics, material and mechanical properties have important influences on the system performance of MEMS device. An optical measurement platform for static and dynamic characteristics of micro-structures is put forward. Computer micro-vision, Mirau microscopic interferometry, stroboscopic photography and laser Doppler vibrator are integrated into this platform. In-plane and out-of-plane periodic motion characteristics of micro-resonator are measured, and out-of-plane transient motion of micro-mirror is analyzed. In-plane displacement, motion phase and resonance frequency can be measured by integrating computer micro-vision with stroboscopic photography, and the repeatable accuracy of in-plane displacement is 30 nm. Out-of-plane displacement and tolerance can be measured by integrating Mirau microscopic interferometry with stroboscopic photography, and the repeatable accuracy of out-of-plane displacement is 3 nm. Laser Doppler vibrator has an advantage of analyzing the motion in frequency domain, and it is the complementarity of measuring periodic motion in time domain.

**Key words:** optical measurement; micro-structure dynamic characteristics; computer micro-vision; Mirau microscopic interferometry; stroboscopic photography; laser Doppler vibrometer

### 1 引言

微机电系统(MEMS)属于多种学科交叉融合的前沿高技术领域,其特征尺寸为微米级,目前主要的形态分为器件、系统和工具。微机电系统近几年在基础理论研究、器件的设计制造、微系统的集成应用方面取得了一些重要的进展,但是距离大范围的批量化生产和规模化应用方面还具有一定的差距。究其原因,缺乏有效的测试手段是主要制约因素之一。

微机电系统测试技术是微机电系统设计、仿真、

制造及产品质量控制和性能评价的关键环节之一<sup>[1]</sup>。

由于微机电系统具有结构尺寸小、集成度高、运动频率高等特点,非光学测试方法一般都要求在被测结构上附加相应的传感换能元件,这会严重影响微结构的完整性和机械特性,将导致不可预计的测量误差。光学测试技术具有非接触、快速、高灵敏度、高精度、抗干扰能力强的优点,可实现大视场的测量,能够很好地满足微机电系统测试的要求。目前国际上有许多研究小组正致力于微机电系统光学测试技术研究,主要

\* 国家 863 计划(2004AA404042)资助课题。

作者简介: 胡晓东(1974~),男,博士,副教授,主要从事微纳测试与加工技术方面的研究。E-mail: xdhu@tju.edu.cn

收稿日期: 2004-09-20; 收到修改稿日期: 2004-11-05

有:利用激光多普勒测振技术实现微结构动力学特性测试<sup>[2]</sup>,利用计算机视觉和频闪成像获得结构的平面和离面运动信息和失效模式<sup>[3~5]</sup>,应用显微干涉和频闪成像测试微机电系统器件的三维运动和变形<sup>[6~8]</sup>,利用电子散斑干涉技术和数字全息干涉分别实现微机电系统动态测试<sup>[9~11]</sup>。

本文提出一种将计算机微视觉、米劳显微干涉、频闪成像和激光多普勒测振等技术充分融合的光学测试平台,可实现微机电系统微结构三维静态几何参量、周期运动特性和瞬时运动特性的综合测试,为微结构的材料和力学特性的分析提供了数据基础。

## 2 微结构特性的测试要求与方法

### 2.1 微结构特性的测试要求

微结构的特性主要包括:几何参量、机械参量、材料特性及力学特性等,直接影响微机电系统的整体性能。本文所述的微结构特性的光学测试平台可直接进行微结构平面几何参量、平面周期运动参量、离面几何参量、离面周期运动参量和离面瞬态运动参量的测量,如果将以上测试数据与微结构设计模型结合,可进行微结构材料和力学相关参量的分析,实现间接的测量。

### 2.2 微结构特性的测试方法

本文所述的微结构特性光学测试平台包括静态和动态测试两部分。计算机微视觉技术可直接实现微结构平面几何参量的测量、米劳显微相移干涉技术可直接实现微结构离面几何参量的测量,两者与频闪成像和运动激励同步技术结合可分别实现微结构平面和离面周期运动参量的测量,激光多普勒测振技术可实现离面瞬态运动参量的测量。

#### 2.2.1 频闪成像与运动激励同步技术

由于微机电系统微结构几何尺寸一般在微米级,其工作或谐振频率一般在几十 kHz,为了获得其高速运动的状态,本文在对微机电系统微结构进行连续周期运动激励的同时,输出频闪同步信号,频闪需要经过若干个运动周期的重复,以保证摄像机能够获得足够成像的光强信息。由于频闪脉冲非常窄,可近似认为微结构在频闪时间内的位移可忽略,即可认为将微结构运动瞬间进行“冻结”,从而可得到其高速运动下的图像或干涉条纹。通过调整频闪脉冲信号和运动激励信号间的相对延迟,就能获得微结构在不同相位下的运动状态。图 1 所示为频闪成像与运动激励信号的时序图。

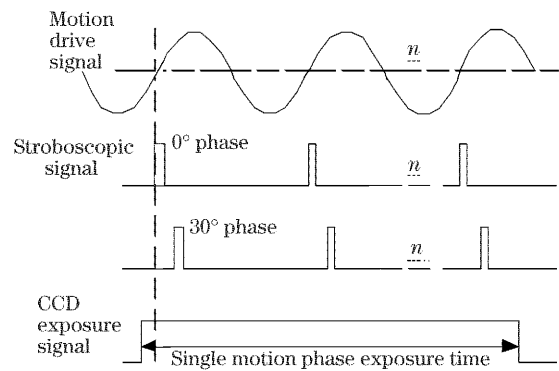


图 1 频闪成像与运动激励信号时序图

Fig. 1 Sequence chart of stroboscopic image and motion

#### 2.2.2 计算机微视觉技术

利用数字图像的边缘检测和亚像元定位分析技术可对微结构的平面几何参量进行精密测量,这同样也是平面运动参量测量的基础。本文采用美国标准技术研究院(NIST)认证的平面栅格进行视觉测试中图像校正和标定。

在频闪照明下,如前所述,可得到微结构周期运动的不同相位“准静态”图像序列,对该图像序列进行运动目标跟踪和定位就可实现平面运动参量的测量。本文采用了块匹配和相位相关的图像匹配方法。块匹配采用最小平均差值函数准则和对数搜索策略,具有计算量小且精度较高的特点;相位相关图像匹配算法可得到一个位于两幅图像偏移位置处的脉冲函数,可检出最大的位移偏移量为图像宽度的 1/2,对图像灰度的变化不敏感。另外,由于相关峰对旋转角度非常敏感,可用于检测微结构平面角度的变化。为了进一步精确提取出位移信息,本文在以上图像匹配的基础上采用基于二次曲面拟合的亚像元定位算法,可实现 1/20 像素的分辨力,在计算中采用多变量最小二乘回归法确定极值点的精确位置。

#### 2.2.3 米劳显微相移干涉技术

米劳显微相移干涉技术可获得微机电系统微结构的表面形貌,结合频闪成像和运动激励同步技术可获得微机电系统微结构周期运动下各时刻的形貌变化。本文采用 5 步相移方法,每次相移为  $\pi/2$ ,根据 5 幅相移干涉图计算微结构表面高度变化引起的包裹相位。考虑到测试速度问题和得到的干涉图像的质量较好的实际特点,本文采用了基于质量图导引的路径跟随算法,以获得解包裹后的真实连续相位。

利用频闪成像可以得到微结构周期运动的不同相位“准静态”表面形貌,但是该表面形貌为一相对值,为了获得离面运动幅度、运动相位及变形,必须

选择运动测量的基准点,最直接的方式是选择微结构表面的静止点,然而在一些测试场合下是难以选定该类静止点,为此本文提出沿时间轴和空间轴的双向相位展开的方法。该方法是先提取出相同相移条件下干涉图像序列中相同位置点的数据,组成一个在时间轴分布的一维数据序列,相移 5 步,得到 5 个一维数据序列,对该序列进行上述的相位提取和解包裹,就可计算出该点在时间轴上的高度变化,即为该点的离面运动信息,再与空间轴相位展开得到的表面形貌图像序列相关联,就可将图像中所有点的离面运动位移提取出。由于相移提取算法所计算出的相位都包裹在 $[-\pi, \pi]$ 区间内,为了避免信息的丢失,要求时间轴相邻点离面运动位移小于 $\lambda/4$ ,即满足相邻点相位变化小于 $\pi$ ,因此在选择进行时间轴相位展开的测量点时需要对其离面运动位移和

时间轴上的采样间隔进行综合考虑。

#### 2.2.4 激光多普勒测振技术

本文将德国 Polytec 公司的激光多普勒测振仪的测量光束耦合到光学显微镜的成像光路中,使得在 $50\times$ 物镜下照射在微结构表面的光斑直径小于 $1\ \mu\text{m}$ ,利用运动激励装置使该微结构产生离面运动,多普勒测振仪能够检测参考光与从运动结构表面反射的测量光之间的频率差来计算出该点的瞬时运动速度,对瞬时运动速度数字化,并通过积分、微分及频域分析可得到微结构的瞬时位移、加速度、运动谐波等信息,实现离面运动参数的测试。

### 3 光学测试平台构建

微机电系统微结构光学测试平台采用虚拟仪器的方式进行构建,系统框图如图 2 所示。

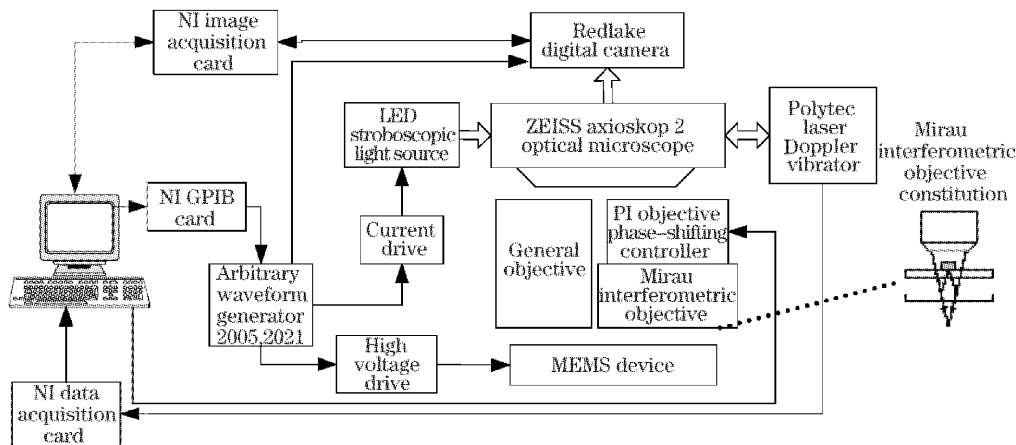


图 2 微结构光学测试平台系统框图

Fig. 2 The schematic diagram of micro-structure optical measurement platform

蔡司光学显微镜(普通物镜 $20\times$ )、Redlake 数字摄像机(像素 $1534\ \text{pixel}\times 1024\ \text{pixel}$ ,像素大小为 $9\ \mu\text{m}\times 9\ \mu\text{m}$ ,填充因子 $100\%$ )、NI 数字图像采集卡构成基于计算机微视觉技术的微机电系统微结构平面参量测试的基本框架,辅以频闪和运动激励装置,可实现微机电系统微结构的平面几何参量、周期运动参量的全视场检测;蔡司光学显微镜、米劳显微干涉物镜( $20\times$ )、PI 物镜相移控制器(闭环运动分辨力 $0.7\ \text{nm}$ )、Redlake 数字摄像机及 NI 数字图像采集卡构成基于显微干涉技术的微机电系统微结构离面参量测试的基本框架,同样辅以频闪和运动激励装置,可实现微机电系统微结构在离面的几何参量、周期运动参量的全视场检测。蔡司光学显微镜(普通物镜)、Polytec 激光多普勒测振仪、NI 数据采集卡和运动激励装置,构成基于激光多普勒技术的微

机电系统微结构离面瞬态运动参量单点测试的基本框架。计算机通过 GPIB 卡对两台级联的任意波形发生器控制,输出频闪、运动激励及摄像机曝光控制信号,频闪控制信号经过电流驱动控制准直的 LED ( $617\ \text{nm}$ )光源,最小有效频闪脉冲宽度和延迟时间间隔都为 $1\ \mu\text{s}$ ,可对 $100\ \text{kHz}$ 运动的一个周期进行 $10$ 次采样,运动激励信号经过高压放大后不仅可直接对静电型微机电系统器件进行驱动,而且可输入到压电驱动器以对微结构进行机械方式激励。对于以上所构建的光学测试平台,平面参量测试的分辨力主要与物镜的放大倍数相关,离面参量的测试则主要与光的波长、相移方法相关,分析表明相移器的移相误差、光强信号非正弦性误差为主要误差源,因此相移器采用电容传感器进行闭环控制,频闪光经准直和扩束后引入到显微镜光路中以实现均匀照明。

### 4 实验与分析

#### 4.1 微机电系统微结构平面周期运动的测试

本文选择美国北卡罗莱纳微电子中心(MCNC)制造的微谐振器作为测试器件,正弦波驱动,偏置电压 20 V,峰-峰值 20 V,频率从 20 kHz 开始,以 0.25 kHz 的步距(每次调整都在完成当前频率下周期运动测量后进行)逐步增加到 25 kHz,频闪脉冲宽度为 1 μs,每个运动周期采样点数为 16。图 3 左右分别为微谐振器静止时图像和某一运动相位下频闪得到的“准静态”图像,可看出图像中央的微梳齿结构存在明显的 y 向(上下)位移,对每幅图像都可利用边缘提取和亚像素定位的方法进行结构的尺寸和形位误差的测量,利用上述的图像匹配方法对图像序列进行分

析,就可提取出微梳齿结构的运动曲线,图 4 所示为驱动频率为 23.5 kHz 时微梳齿运动曲线,圆点表示 y 方向的位移,三角形点表示 x 方向的位移。通过运动激励频率的扫描,对各频率下最大运动幅度进行统计可得到如图 5(a)所示的运动幅度-频率曲线,对各频率下运动相位进行统计可得到如图 5(b)所示的运动相位-频率曲线,从图 5 中可得出微谐振器的谐振频率为 22.5 kHz,运动相位以谐振频率点为中心有 160° 的变化,这一点基本符合静电驱动二阶系统的动态特性。在相同实验条件下,对微谐振器的运动特性做 12 次重复测量,对其运动位移进行分析,测量位移的重复精度可达 30 nm。

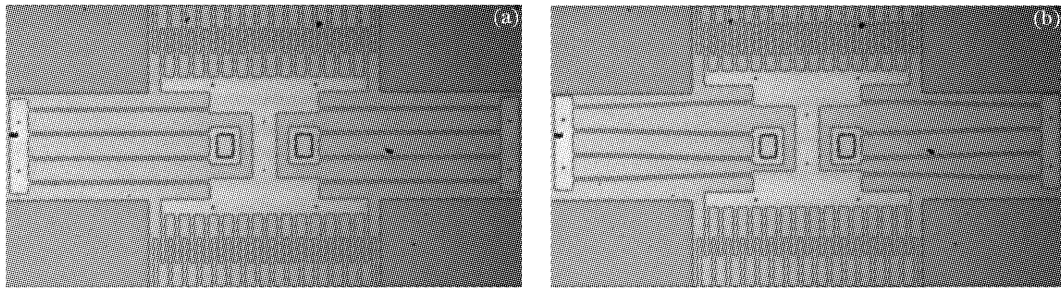


图 3 微谐振器静止状态的图像和运动状态下的准静态图像  
Fig. 3 Micro-resonator's static image and motion quasi-static image

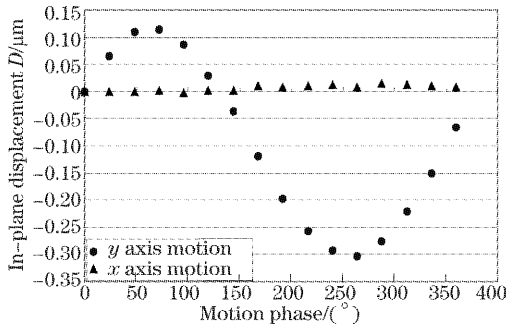


图 4 微结构平面运动曲线

Fig. 4 In-plane motion curves of micro-structure

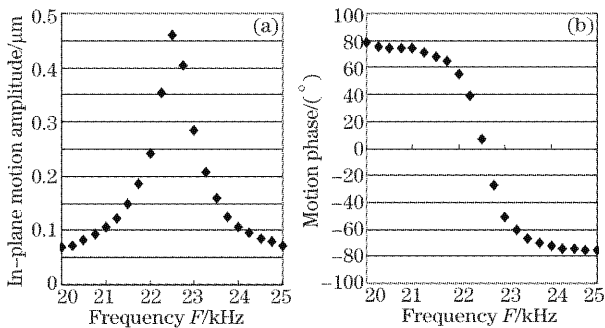


图 5 运动幅度、频率和相位的相互关系

Fig. 5 Relationship of motion amplitude, frequency and phase

#### 4.2 微机电系统微结构离面周期运动的测试

上述微谐振器的设计为 y 方向平移运动,但是由于光刻、离子注入、氧化、气相沉积、层释放等工艺过程都存在不定的影响因素,实际器件在平移运动的同时会在其它方向产生耦合运动。对于上述微梳齿结构的离面耦合运动,本文采用频闪显微相移干涉技术进行测试。微谐振器的运动激励信号与平面周期运动测试的实验相同,图 6 为微谐振器在某一运动相位下频闪得到的“准静态”干涉图像,从图中可看出该图像是在表面轮廓的基础上叠加了一定数量的干涉条

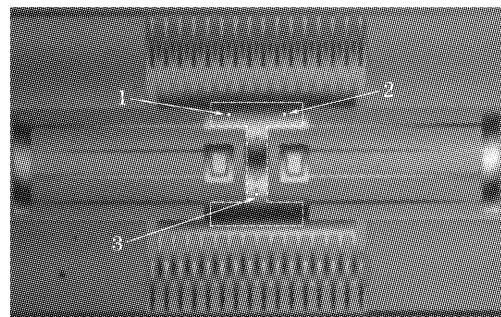


图 6 微谐振器的准静态干涉图像

Fig. 6 Micro-resonator's quasi-static interference pattern

纹。由于相位提取算法不能正确处理无干涉条纹的表面区域,因此在利用 5 幅相移干涉图像进行相位提取前需要对无干涉条纹的区域进行裁剪,本文采用边缘提取和跟踪的方法实现了该预处理。另一方面,由于微梳齿结构中位于边缘的梳齿阵列尺寸太小,干涉条纹容易受到外界的干扰而导致表面形貌计算的错误,因此本文的测试区域选择中央的主体区域。图 7 为图 6 中所选定的 3 个测试点的运动曲线,可看出中央微梳齿机构产生绕  $x$  轴的扭曲运动,边缘点的运动幅度大于中央点的运动幅度,在同一水平线上的测试点的运动曲线基本重合。图 8 所示为图 6 中所选定的“工”形区域在不同运动相位下的运动状态,“工”形区域颜色变化为表面形貌,同样可看出测量区域的绕  $x$  轴的扭转运动,表面形貌的变形很小。在相同实验

条件下,对微谐振器的离面运动特性做 12 次重复测量,对其离面运动位移进行分析,测量离面位移的重复精度可达 3 nm。

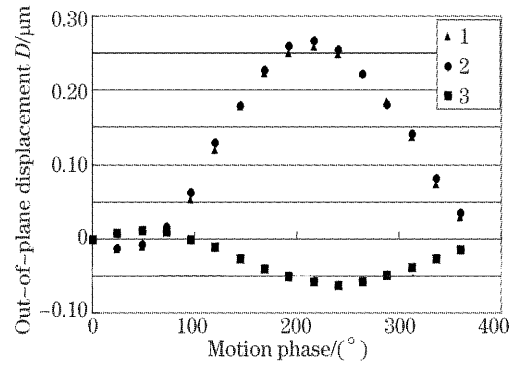


图 7 三个测试点的离面运动曲线  
Fig. 7 Out-plane motion curves of three dots

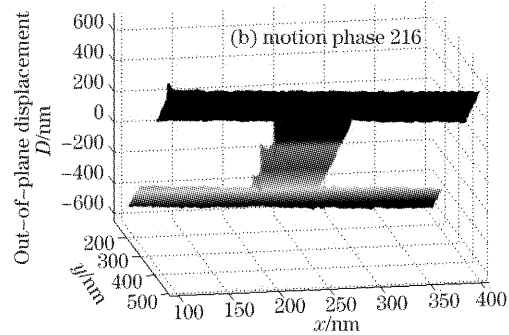
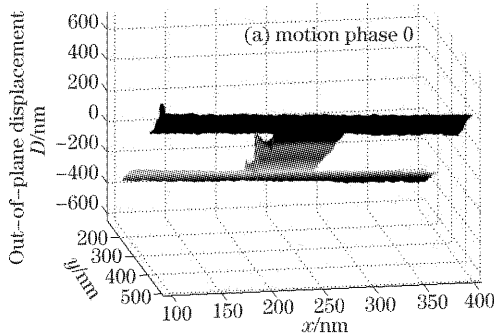


图 8 选择测量区域的离面运动情况

Fig. 8 Selected measurement zone out-plane motion with different motion phase

### 4.3 微机电系统微结构离面瞬态运动的测试

本文选择北京大学微电子学研究院制造的微机械扭转镜进行离面瞬态运动的测试,微镜被 11 kHz 的正弦波驱动,电压幅值为 120 V,这主要是考虑微镜表面设计了较密集的释放孔阵列,采用上述米劳干涉的方法在相位提取时因过多的相位陷阱而容易出现计算错误,导致测量误差。图 9(a)为微镜的表面结构,图 9(b)为对多普勒测振仪输出的速度信号

进行快速傅里叶变换的结果,从图中可看出在驱动频率 11kHz 的两侧存在运动谐波,这在利用频闪成像技术进行周期运动特性测试方法中是无法得到的。对驱动频率进行扫描,可得到不同频率下的功率谱,利用功率谱的分布特征同样可确定其谐振频率,与时域周期运动测试相比,该方法具有测试时间短的优点。另外,由于激光多普勒测振仪具有瞬态信息采集的特点,可利用自由衰减振动法,即对单个

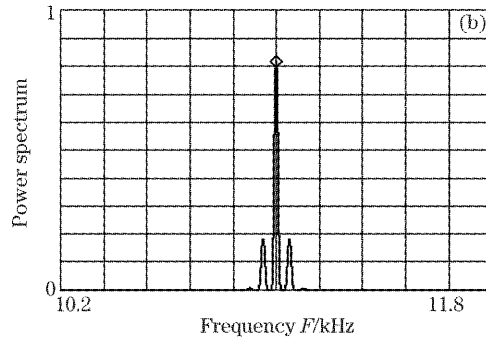
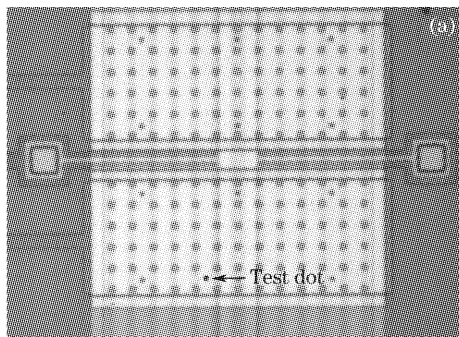


图 9 微镜的瞬态运动分析。(a)微镜(b)离面运动速度的快速傅里叶变换

Fig. 9 Transient motion analysis of the micro-mirror. (a) Micro-mirror, (b) FFT of out-plane motion velocity

脉冲激励下微结构的自由衰减全过程进行记录,进行更为快速的谐振频率测定,因无需频率扫描过程,不仅测量时间得到大大缩短,而且能避免微结构在谐振频率下进行测量所造成寿命的缩短甚至损坏。

## 5 结 论

本文所提出的一种将计算机微视觉、米劳显微干涉、频闪成像和激光多普勒测振等技术充分融合的光学测试平台,可实现微机电系统微结构平面和离面静态几何参量、周期运动特性和瞬时运动特性的综合测试,测试精度达到纳米级,其中平面运动测试重复精度达到 30 nm,离面运动测试重复精度达到 3 nm,各种测试方法相辅相成,能够满足不同微结构测试的要求,将为微机电系统设计和加工过程的分析提供可靠的依据。

### 参 考 文 献

- 1 Allyson Hartzell, David Woodilla. MEMS reliability, characterization, and test[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4558**: 1~5
- 2 James S. Burdess, Alun J. Harris, David Wood *et al.*. A system for the dynamic characterization of microstructures [J]. *J. Microelectromechan. System*, 1997, **6**(4): 322~328
- 3 C. Quentin Davis, Dennis M. Freeman. Using a light microscope to measure motions with nanometer accuracy[J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(4): 1299~1304
- 4 W. Hemmert, M. S. Mermelstein, D. M. Freeman. Nanometer resolution of three-dimensional motions using video interference microscopy[C]. *Proc. 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Orlando FL, USA, 1999. 302~308
- 5 S. Petitgrand, R. Yahiaoui, K. Danaie *et al.*. 3D measurement of micromechanical devices vibration mode shapes with a stroboscopic interferometric microscope [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2001, **36**(2): 77~101
- 6 Christian Rembe, Lilac Muller, Richard S. Muller *et al.*. Full three-dimensional motion characterization of a gimbaled electrostatic microactuator [C]. *Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium*, Orlando FL, USA, 2001. 91~98
- 7 Christian Rembe, Rishi Kant, Richard S. Muller. Optical measurement methods to study dynamic behavior in MEMS[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4400**: 127~137
- 8 Alain Bosseboeuf, Jean Paul Gilles, Kaman Danaie *et al.*. A versatile microscopic profilometer-vibrometer for static and dynamic characterization of micromechanical devices[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3825**: 123~133
- 9 Petra Aswendt, Claus-Dieter Schmidt, Dirk Zielke *et al.*. ESPI solution for non-contacting MEMS on wafer testing[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2003, **40**(5~6): 501~515
- 10 Petra Aswendt, Claus-Dieter Schmidt, Dirk Zielke *et al.*. Inspection system for MEMS characterization on wafer level using ESPI[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4400**: 43~50
- 11 Marc P. Geoges, Philippe C. Lemaire. Real-time stroboscopic holographic interferometry using sillenite crystals for the quantitative analysis of vibrations[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145** (1~6): 249~257