

文章编号: 0253-2239(2007)04-0668-5

垂直扫描白光干涉术用于微机电系统的尺寸表征*

郭 彤 胡春光 陈津平 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: 随着微机电系统的发展, 器件设计和加工过程中的表征成为一个主要问题。提出了将扫描白光干涉表面轮廓测量方法用于微结构和器件的几何特性检测上。测量系统采用了米劳显微干涉仪, 利用压电陶瓷物镜纳米定位器实现垂直方向 100 μm 范围内的精确扫描, 并通过傅里叶变换算法获取条纹包络峰的位置, 进而得到器件的整体集合尺寸信息, 与相移干涉方法相比大大提高了测量范围。通过测量纳米台阶对该系统进行了精度标定, 测量重复性在亚纳米量级。最后通过测量微谐振器和微压力传感器的几何尺寸说明了该方法的功能。

关键词: 光学测量; 微机电系统; 扫描白光干涉术; 包络峰探测算法; 尺寸表征

中图分类号: TH741.4 文献标识码: A

Vertical Scanning White-Light Interferometry for Dimensional Characterization of Microelectromechanical System Devices

Guo Tong Hu Chunguang Chen Jinping Fu Xing Hu Xiaotang

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

Abstract: As microelectromechanical systems developed rapidly, the issue of mechanical characterization had emerged as a major consideration in device design and fabrication. Scanning white-light interferometry surface profiling for geometrical characterization and device inspection was proposed. The measurement system was based on a Mirau microscopic interferometer, using a piezo objective nano-positioner to realize accurate scanning in vertical direction in the range of 100 μm . The envelope peak position was extracted by fast Fourier transform processing method, and the whole information of device was obtained. Compared with phase shifting interferometry, it had a large measurement range. The measurement accuracy of the system is calibrated by a step height standard, then measuring repeatability was sub-nanometers level. A micro resonator and a micro pressure sensor are employed to illustrate the capabilities of scanning white-light interferometry as a measurement and process characterization tool.

Key words: optical measurement; microelectromechanical systems; scanning white-light interferometry; envelope peak detection algorithm; dimensional characterization

1 引 言

微机电系统(MEMS)是在半导体技术基础上发展而来的,但其涉及的材料、设计、加工、模拟、封装和测试技术比半导体技术复杂。早期微机电系统着重于设计和开发,现在着重于商品化,以提高产品的可靠性和降低成本和售价。因此,测试对于微机电系统越来越重要,可占到成本的 1/3^[1]。为提高产额和降低生产成本,制造商和研究机构都对微机电系统测试投入了相当的人力和物力,来解决从设计到封装全过程中的测试问题^[2,3]。

随着微机电系统器件趋向商业化,带来设计中关键部件测量的低公差要求,特别是几何量测量(例如薄膜厚度和空气间隙高度),它在最终器件的执行特性(谐振频率,转换电压等)中扮演一个重要的角色。例如:悬臂梁微延迟开关的工作电压依赖于梁和空气间隙厚度的 3/2 次幂,同时平行极板可变电容之间的静电力和空气间隙的平方成反比关系^[4]。很明显,对于大多数器件,工作特性很大程度上受到它们的尺寸特性的影响,这些特性中的很小误差就会导致器件的工作偏离它的预计行为范围。现在存

* 国家 863 计划(2006AA04Z327)、教育部高校博士点基金(20060056003)和精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 郭 彤(1977-),男,天津人,博士,副教授,主要从事微纳测试技术与精密测控技术的研究。

E-mail: guotong@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-05-31; 收到修改稿日期: 2006-08-07

在多种测量方法进行这些测量,但是都有各自的缺点:扫描电子显微镜是一种最为普遍的测量工具,但几乎所有的非导电样品在利用该方法测量时都需要在表面镀一层很薄的导电材料,将导致器件的弯曲和变形,特别是对于自由结构,例如悬臂梁,并且扫描电子显微镜测试十分耗时,并不适合大生产的环境;原子力显微镜和扫描电子显微镜一样,分析过程也很慢(大约每个器件 20 min),它的范围($100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$, Veeco 多功能型)说明了它不适合观察大的样品或是离面器件,另外使用它很难测量封装了的器件;机械式触针轮廓仪可以以很高的精度测量台阶高度,但不适合测量自由结构,因为触针会损坏测试器件。

当微机电系统器件进入到大规模生产阶段时,对测试有了更高的要求,首先测量精度要高,测试成本要低,要易于在晶片上进行,还需无损测量,样品无需特殊制备和昂贵封装。光学干涉方法是解决这些问题的首选方法。本文采用了垂直扫描白光干涉术来进行微机电系统尺寸表征,该方法具有简单、快速、无损的特点,无需样品制备,也可在晶片上进行。

2 测试系统

测试系统采用了 Nikon 公司的米劳显微干涉物镜,有“ $10\times$ ”、“ $20\times$ ”和“ $50\times$ ”可供选择,装配在德国蔡司公司的光学显微镜上。照明光源有两种,一种是高性能的发光二极管(Luxeon 公司 Star/O 型,中心波长为 617 nm,光学带宽为 20 nm),用于相移干涉测量;另一种是自带的卤素灯,用于白光干涉测量,通过光路切换器进行选择。一个纳米定位器(PI P-721. CL, 电容反馈闭环控制,最小分辨率 0.7 nm),用来实现垂直方向的扫描,以亚纳米分辨率调整光程差。图像通过一个 CCD 摄像机(美国 Redlake 公司 Megaplus 1. 6i, $1534\ \text{pixel}\times 1024\ \text{pixel}$, 像素间距 $9\ \mu\text{m}$, 填充因子 100%, 10 位灰度值的分

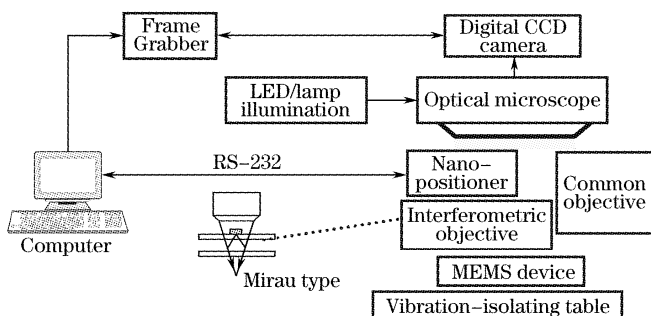


图 1 测量系统组成示意图

Fig. 1 Measurement system structure scheme

辨力)进行采集,然后传输给计算机进行后续处理。整套系统放置在一个隔振平台上,以减小外界振动对系统的影响。该系统的水平分辨率取决于使用的物镜,“ $50\times$ ”时为 560.9 nm。测试系统组成见图 1。

3 测量原理

3.1 基本原理

本文描述的光学轮廓测量方法是垂直扫描白光干涉术,其中由于参考光束和测量光束之间的光程差产生了亮暗相间的线条(干涉条纹)。入射光通过反射镜被分成两部分,一束入射到内部的参考表面,另一束入射到微机电系统样品上。在反射之后,光束在干涉仪内叠加,产生了增强和削弱的干涉现象,得到了代表测试样品表面形貌的亮暗条纹。

白光垂直扫描干涉法进行测量的理论根据是被测表面上各点深度不同所形成的干涉光强不同。在双光束干涉显微镜中,如果从分光镜到被测表面上某一点的距离等于从分光镜到参考面的距离,那么对应的两束干涉光的光程差为零,所形成的干涉光强最小(或最大)。这样用压电陶瓷等微位移驱动器沿光轴方向移动样品台或参考镜进行扫描,那么干涉图像上每一点的强度将随着变化,如图 2 所示。

在白光干涉中,光谱中各色光都有可能参加干涉,并将干涉光强叠加到最后形成的干涉图像上,因

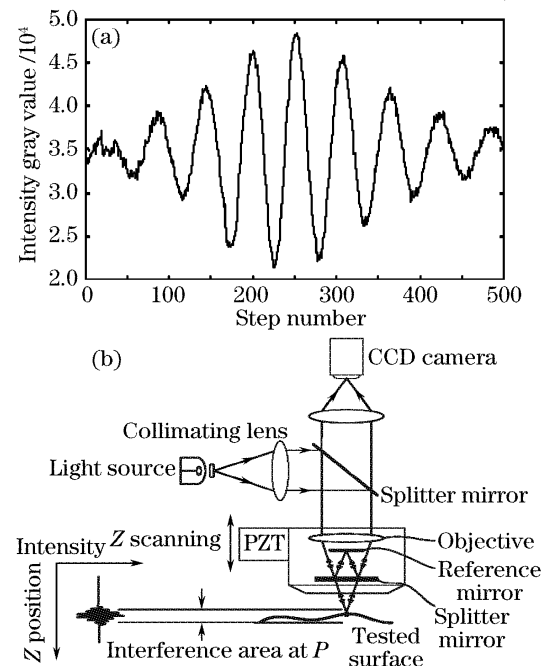


图 2 垂直扫描白光干涉方法(a)在测量中的强度变化和(b)测量系统装置

Fig. 2 (a) Intensity change during measurement and (b) measurement system steup of the vertical scanning white-light interferometry

此在表面形貌测量中白光干涉形成的干涉条纹是由各色光干涉图像叠加形成的。被测表面的深度不同,两束光的干涉光强不同,干涉条纹的衬比度不同,组成干涉条纹的光谱成分也不同。可见,在白光干涉表面形貌测量中,被测表面的深度信息被编码到干涉图像的强度、衬比度及光谱成分等信息中,因此可扩展深度测量范围。

垂直扫描白光干涉法利用包络峰探测算法来确定白光条纹的相干包络峰的位置^[5,6]。这既可以在空间域实现,也可以在频域完成。公认的好算法应该具备速度快、数据量小、精度高、抑制噪声、适用于不同采样间隔、实现容易、可靠性和重复性强。常用的包络峰探测算法包括了傅里叶变换方法、多项式插值方法、质心方法以及小波变换方法等^[7]。

3.2 包络峰探测的傅立叶变换方法

早在 1993 年 Peter de Groot 等^[8]就提出了频域分析测试原理,通过在频域内恢复各种波长的位相信息来获取表面高度分布。单频光源产生的干涉图的光强在空间呈现为空间频率 k (即波数),位相 ϕ 的正弦状条纹。波数、相位和两相干光束之间的光程差 Z 的关系:

$$\phi = kZ, \quad (1)$$

光程差 Z 也是波数的函数,除非干涉仪是理想的而没有色散。

白光干涉所形成的干涉图可以看成是许多单一频率光的干涉图的非相干叠加。每个频率对应的干涉图光强可表示

$$I = I_0[1 + \gamma \cos \phi], \quad (2)$$

其中 γ 为条纹对比度, I_0 为背景光强度。

综合考虑,白光作为光源,就有一系列的波数存在,每个波数形成的干涉图非相干叠加形成最后的白光干涉条纹。每幅干涉图的相对相位可以用在平均波数 k_0 处的泰勒展开进行表示:

$$\phi(k) = \phi_0 + (k - k_0) \frac{d\phi}{dk} \Big|_{k_0} + \frac{(k - k_0)^2}{2} \frac{d^2\phi}{dk^2} \Big|_{k_0} + \dots, \quad (3)$$

式中 ϕ_0 为 $k = k_0$ 时对应的相位:

$$\phi_0 = k_0 Z_0, \quad (4)$$

由于相速度 v 和群速度 v_g 之间的关系:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kv)}{dk} = v + k \frac{dv}{dk}, \quad (5)$$

由此得到群速光程差 G 与相速光程差 Z 的关系:

$$G = v_g t = vt + k \frac{d(vt)}{dk} = \frac{d(kvt)}{dk} =$$

$$Z + k \frac{dZ}{dk} = \frac{d(kZ)}{dk} = \frac{d\phi}{dk}, \quad (6)$$

因此(3)式第二项中相位对波数的一阶导数可表示为

$$\frac{d\phi}{dk} \Big|_{k_0} = Z_0 + k \frac{dZ}{dk} \Big|_{k_0} = G_0, \quad (7)$$

其中 G_0 为 $k = k_0$ 时对应的群速光程差,它只在干涉仪很好地补偿色散的情况下才与相速光程差 Z_0 相等。由(4)式和(7)式,(3)式可重新写成

$$\phi(k) = k_0 Z_0 + (k - k_0) G_0 + \frac{(k - k_0)^2}{2} \frac{dG}{dk} \Big|_{k_0} + \dots, \quad (8)$$

由(8)式可知,如果相位与波数 k (在平均波数 k_0 附近)之间的关系已知,就可以得到相速光程差 Z_0 ,群速光程差 G_0 ,一阶导数 dG/dk ,以及更高阶的导数项,不过这要根据所得数据的质量。因此,我们需要的是与波数对应的干涉相位,这些数据可以通过光强公式 $I(Z)$ 的傅里叶变换得到

$$P(k) = \int_{-\infty}^{\infty} I(Z) \exp(-ikZ) dZ, \quad (9)$$

相位值可以根据(10)式来计算:

$$\phi(k) = \arctan \left[\frac{\text{Im}\{P(k)\}}{\text{Re}\{P(k)\}} \right]. \quad (10)$$

采用傅里叶变换方法,编写程序自动完成白光扫描信号的包络峰探测的流程如图 3 所示,它可以用于欠采样的情况。通过测量视场中每个像素位置的包络峰位置,就可以得到器件上不同位置的相对高度,进而得到器件的整体几何尺寸信息。

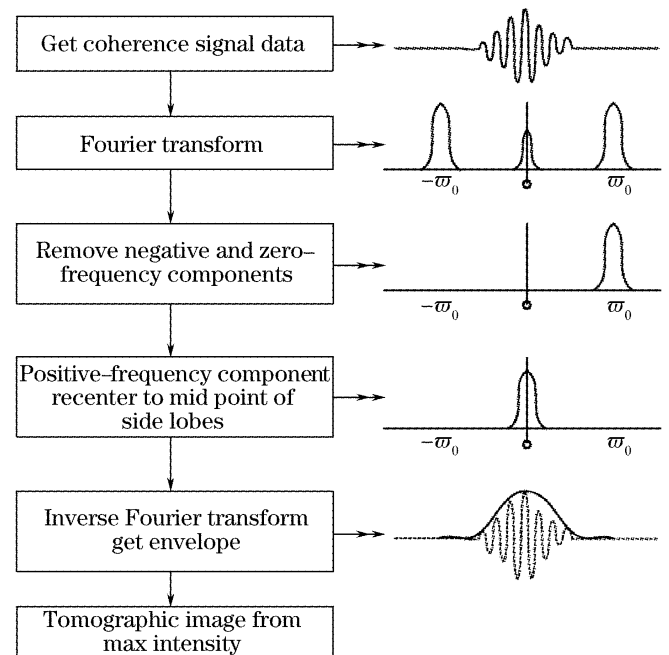


图 3 快速傅里叶变换处理方法

Fig. 3 Fast Fourier transform processing method

4 实验与结果分析

系统采用了光学显微镜的钨卤素灯作为照明光源,并在光路中添加一个绿色滤光片,其带宽为 50 nm,中心波长为 546 nm。白光扫描信号的包络峰位置的探测采用了基于快速傅里叶变换的数据处理方法。

4.1 纳米台阶的测量

实验首先以美国国家标准与技术研究院认证的 VLSI 公司制造的 44 nm 标准矩形台阶(标定值为 43.2 ± 0.6 nm)为测试对象,来说明系统的测量精

度。采用“20×”物镜,设定扫描步长为 40 nm,扫描步数为 50,扫描范围为 $2 \mu\text{m}$,CCD 摄像机工作在连续模式,曝光时间为 200 ms。测量结果见图 4。在相同条件下,进行了 10 次重复测量实验,测量结果见表 1,测量平均值为 44.14 nm,均方根值(RMS)为 0.36 nm。结果说明,利用垂直扫描白光干涉术的测量系统具有较好的测量精度和测量重复性,可以用于微机电系统中的微结构测量,和相移干涉术高精度测量相比,具有更大的测量范围^[9],其测量范围只受垂直扫描装置行程的限制,在本测量系统中,测量范围为 $100 \mu\text{m}$ 。

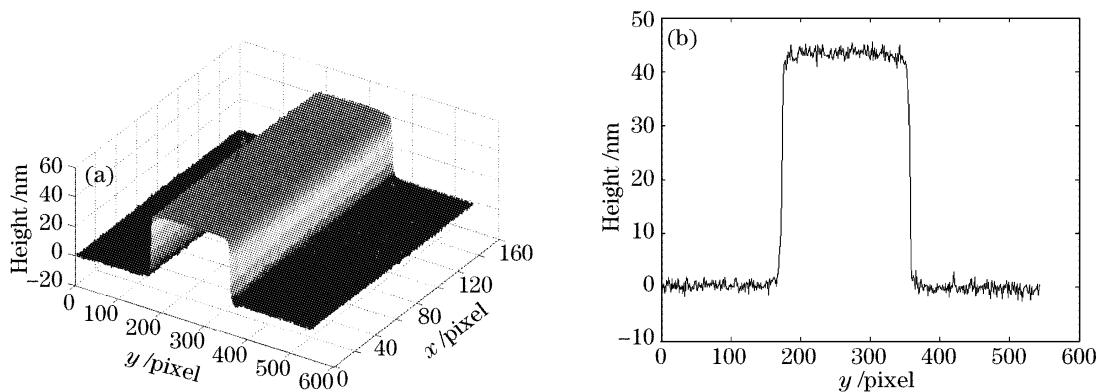


图 4 纳米台阶测量结果。(a)三维形貌,(b)轮廓

Fig. 4 Experimental results of the nanoscale step height. (a) Three-dimensional topographic image, (b) profile

表 1 10 次重复测量的结果

Table 1 Results of 10 measurements

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measurement value /nm	44.15	44.07	44.52	44.70	44.50	44.17	44.09	43.82	43.87	43.51
Mean value /nm	44.14									
RMS value /nm	0.36									

4.2 微谐振器的测量

实验设定扫描步长为 45 nm,扫描步数为 200,扫描范围为 $9 \mu\text{m}$,测量了来自美国北卡罗莱纳微电子中心的微谐振器器件^[10]。利用相移干涉方法只能得到微谐振器中质量块和梳尺部分的三维形貌,无法得到器件的整体结构,因为结构和基底之间的

距离大于 $\lambda/4$ (λ 为测量光源的波长)。图 5 是利用垂直扫描干涉法测量器件整体得到的三维图,从中可以得到器件各个关键部件间的相互位置关系。所有尺寸数据可以反馈给器件的设计者和加工者,用于分析设计过程和加工过程是否达到预期要求,进而修改器件设计结构或是改进加工工艺参量。

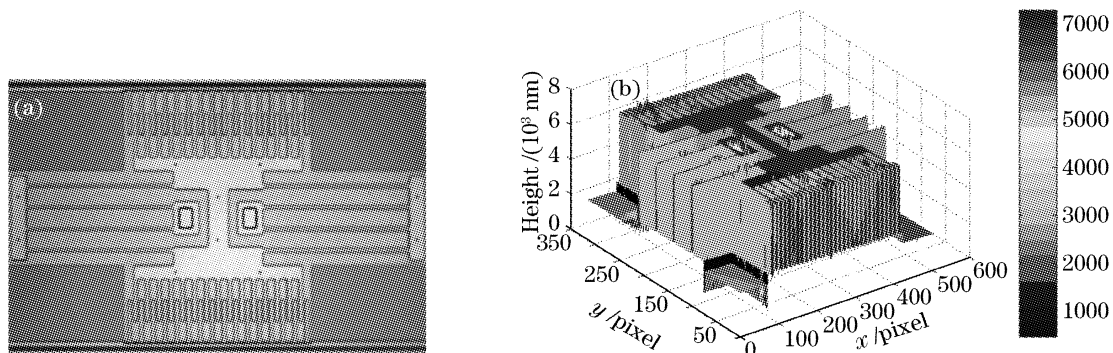


图 5 微谐振器测量结果。(a)明视场图像,(b)三维形貌

Fig. 5 Experimental results of the micro-resonator. (a) Bright field image, (b) three-dimensional topographic image

图 6 是微谐振器梳尺局部测量结果,器件结构和基底之间的距离大约为 $4\ \mu\text{m}$ 。

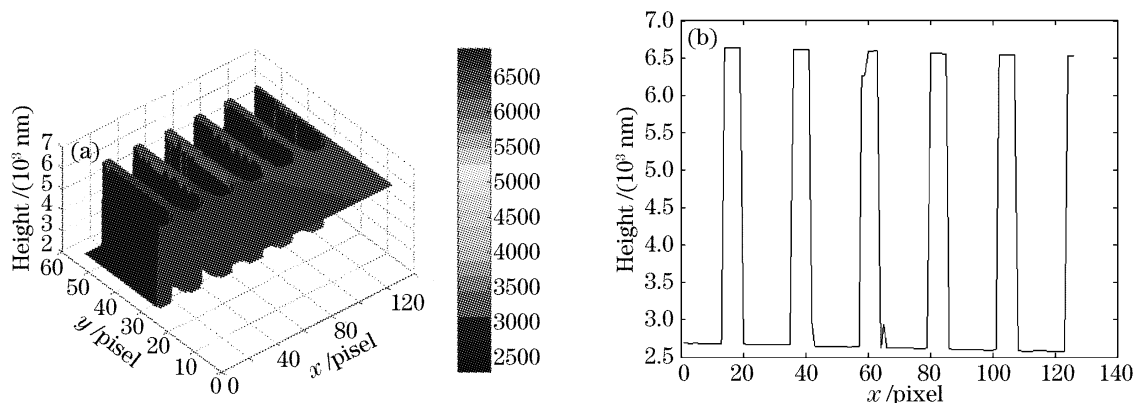


图 6 微谐振器局部梳尺测量结果。(a)三维形貌,(b)轮廓

Fig. 6 Experimental results of the local comb. (a) Three-dimensional topographic image, (b) profile

4.3 压力传感器薄膜的测量

实验设定扫描步长为 $40\ \text{nm}$,扫描步数为 50,扫描范围为 $2\ \mu\text{m}$,测量了压力传感器中的薄膜结构,

微薄膜是压力传感器中的重要传感元件,通过它的变形可以感知压力变化。图 7 给出了薄膜的三维形貌图和轮廓图。

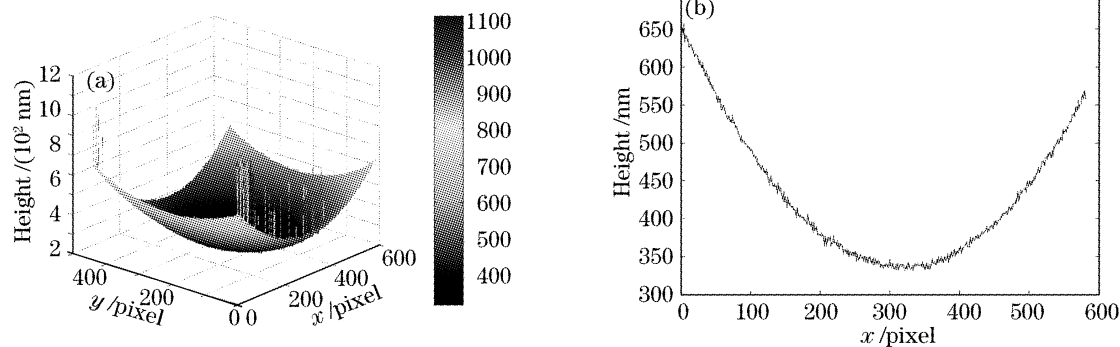


图 7 压力传感器薄膜测量结果。(a)三维形貌,(b)轮廓

Fig. 7 Experimental results of the pressure sensor film. (a) Three-dimensional topographic image, (b) profile

5 结 论

将垂直扫描白光干涉术用于微机电系统器件的尺寸表征,测量系统采用米劳显微干涉仪和高精度物镜纳米定位器,测量范围达到 $100\ \mu\text{m}$,采用傅里叶变换方法获取条纹包络峰位置,和相移干涉方法相比大大提高了测量范围。通过测量纳米台阶对系统进行了精度标定,10次重复测量结果说明了系统的测量精度在纳米量级,测量重复性在亚纳米量级,完全满足微机电系统器件尺寸表征的需要。该方法速度快、无损、非接触、易在晶片级进行,有亚微米级的水平分辨力,垂直分辨力在纳米量级,这些对于器件的大规模加工来说都是必需的。

参 考 文 献

- 1 Allyson Hartzell, David Woodilla. MEMS reliability, characterization, and test[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4558**: 1~5
- 2 Alain Bosseboeuf, Sylvain Petitgrand. Application of microscopic interferometry techniques in the MEMS field[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5145**: 1~16

- 3 Wang Xiaowei, Lin Rongming, Wang Zhe. Image measurement of geometrical size for three-dimensional microstructure of MEMS [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2003, **13**: 300~306
- 4 Conor O' Mahony, Martin Hill, Magali Brunet *et al.*. Characterization of micromechanical structures using white-light interferometry[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(10):1807~1814
- 5 Min-Cheol Park, Seung-Woo Kim. Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(4): 952~959
- 6 Kieran G. Larkin. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(4): 832~843
- 7 Rolf-Jürgen Recknagel, Gunther Notni. Analysis of white light interferograms using wavelet methods[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **148**: 122~128
- 8 Peter de Groot, Leslie Deck. Three-dimensional imaging by sub-nyquist sampling of white-light interferograms[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(17): 1462~1464
- 9 Guo Tong. *Study on the Dynamic Testing Methods and System of MEMS Based on Microscopic Interferometry* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005 (in Chinese)
郭彤. 基于显微干涉术的微机电系统动态测试方法与系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005
- 10 William C. Tang, Tu-Cuong H. Nguyen, Michael W. Judy *et al.*. Electrostatic-comb drive for lateral polysilicon resonators[J]. *Sensors & Actuators A*, 1990, **21**: 328~331