文章编号:1001-4888(2014)04-441-06

基于全场位移测量技术的 微悬臂梁面内弯曲性能测试^{*}

邵亚琪¹, 郇勇¹, 代玉静¹, 缪泓², 张泰华³

(1.中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室,北京 100190;
2.中国科学技术大学 中科院材料力学行为和设计重点实验室,合肥 230026;
3.浙江工业大学机械工程学院 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室,杭州 310014)

摘要:基于自制的微力试验机和全场位移光学测量仪,建立了微尺度力学性能原位测试系统。 其中微力试验机基于电磁驱动兼载荷计量原理设计,载荷量程和噪音分别为±1N和50μN。全 场位移光学测量仪基于白光数字散斑相关方法研制。采用该系统对 MEMS 单晶硅(001) 微悬臂 梁进行了面内弯曲力学性能原位测试,获得了微悬臂梁末梢施力点的力 – 位移关系曲线,以及 全场变形情况。结果显示,微悬臂梁表现出很好的弹性弯曲行为,最后在根部发生脆性断裂。 根据弹性弯曲理论计算出单晶硅弹性模量为123.8GPa(±3.2%)。该技术为研究 MEMS 微构 件的力学性能提供了一种有效的手段。

0 引言

硅悬臂梁是 MEMS(Micro-Electro Mechanical System) 加速度传感器、生化传感器、RF(Radio Frequency) 开关等器件中极为常见的弹性结构。目前对这种结构进行力学性能测试最为常用的仪器是纳 米压入仪和原子力显微镜。纳米压入仪是微尺度力学测试中应用较早的一种仪器,可以追溯到上世纪 80 年代^[1] ,此后随着仪器载荷测试能力的不断改善,纳米压入仪在微悬臂梁测试领域的应用也越来越 广^[2-5]。但是受自身悬浮弹簧刚度限制^[6-7] ,该仪器只能对刚度相对较大的微悬臂梁进行测试。对于 弯曲刚度小于纳米压入仪自身悬浮弹簧刚度的微悬臂梁,更适合采用原子力显微镜进行测试^[8-9]。以 上这些测试的共同点是: 微悬臂梁受垂直于基底方向的离面载荷的影响,其失效模式一般是悬臂梁根部 发生断裂。

而实际上 在很多 MEMS 器件中 微悬臂梁在服役工况中承受平行于基底方向的面内载荷 例如微 致动器、微陀螺仪等^[10-12]。这些微悬臂梁通过锚点键合在基底上 在锚点区域存在扭矩 ,其失效模式较 为复杂 ,锚点破坏、悬臂梁断裂、基底开裂等几种方式都可能出现^[13] ,因此其力学性能的测试更加必要。 但是 ,该测试面临两方面技术难题: 其一 ,由于该测试需要在悬臂梁末端施加平行于基底方向的载荷 ,而 悬臂梁和基底之间间隙一般只有几微米 ,不足以为纳米压入仪和原子力显微镜的探针总成提供充足的 工作空间 ,因此商业化仪器目前难以完成测试; 其二 ,微悬臂梁的变形很小 ,一般只有 10⁰μm 至 10¹μm ,

 ^{*} 收稿日期: 2013-10-28; 修订日期: 2014-03-25
 基金项目: 国家自然科学基金(11372323,11025212和11272318)和中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目资助
 通讯作者: 郇勇, 男, 高级工程师, 硕士生导师。主要研究领域: 微尺度力学实验技术。E-mail: huany@ lnm. imech. ac. cn

且在根部存在围绕锚点旋转的可能,变形比较复杂,实现精确测量必须借助于非接触式位移/形变测量 手段。

数字散斑相关方法(DSCM)^[14-16] 是 20 世纪 80 年代发展起来的一种非接触式位移/形变测量手段 具有测量光路简单,对环境要求较低,可进行全场、非接触测量等优点。尤其是近年来随着散斑颗粒 细化技术的发展,DSCM 在微尺度力学测试中已得到广泛应用。例如方竞等在 2005 年利用原子力显微 镜图像数字相关方法,对 MEMS 微结构变形进行了测量^[17];李喜德等在 2005 年通过激光电弧沉积法和 化学腐蚀法获得晶粒表面微纳米散斑颗粒,应用于多晶材料晶粒表面变形测量^[18];潘兵等在 2009 年将 DSCM 应用于聚合物薄膜的热变形检测^[19];Leslie 等在 2011 年利用 DSCM 研究了单晶硅微尺度试样的 泊松比和拉伸模量^[20];Thierry 等在 2011 年将金属纳米薄膜沉积在聚合物基底上,并利用 DSCM 研究了 柔性微电子材料的拉伸力学性能^[21]。以上应用以拉伸测试居多,而对于 MEMS 微构件面内弯曲性能测 试,目前应用 DSCM 的实例还较少。

针对上述商业化仪器的测试盲区 ,本文基于自制的电磁式微力试验机及全场位移光学测量仪 ,建立 了微尺度力学性能原位测试系统 ,对单晶硅(001) 微悬臂梁进行了面内弯曲力学性能测试。该测试系 统不仅具有加载方式灵活、载荷分辨率高等优点 ,而且可实现原位观察和全场位移测量 ,可为 MEMS 微 构件的设计及弯扭组合等复杂应力分析提供丰富的实验数据。

1 试样制备

选用键合在玻璃基底上的单晶硅(001) 微悬臂梁作为被测对象,见图1。试样由北京大学微电子学研究所提供。这种硅-玻璃键合悬臂梁是 MEMS 中典型的键合结构。具体工艺:首先 将硅片用 KOH 湿 法腐蚀来形成高度 4μm 的键合台阶,即硅台阶。为了产生良好的欧姆接触,减小接触电阻,在玻璃上溅 射 Ti/Pt/Au,厚度分别为 40nm/30nm/90nm,剥离形成金属图形。然后,硅-玻璃阳极键合,在电压 1200V、一个大气压、温度 380℃下完成。最后,用 KOH 减薄,在硅表面光刻溅射铝,用铝做掩膜,硅结构 ICP(Inductively Coupled Plasma) 刻蚀穿通释放,硅悬臂梁厚度实际剩余 76μm。



图 1 MEMS 微悬臂梁试样 (a) SEM 照片和(b) 结构示意图 Fig. 1 MEMS micro-cantilever specimen. (a) SEM photograph and (b) schematic illustration

2 实验

2.1 实验仪器

本文基于自制的微力试验机和全场位移光学测量仪 建立了一套微尺度力学性能原位测试系统。 该系统的力学测试功能由自制的微力试验机实现。该试验机采用电磁驱动兼载荷计量原理设计, 驱动和载荷计量合二为一。其基本原理是: 悬浮在均匀磁场中的通电线圈受安培力作用 ,力的大小与电 流成正比 通过计量和控制线圈中的电流来计量和控制微小力。载荷量程和噪音分别为 ±1N 和 50μN, 具体研制细节见文献[22]。通过更换不同夹具,该仪器可以实现拉伸、压缩、弯曲等多种测试。

该系统的位移测量功能由非接触式全场位移光学测量仪实现。该测量仪是一个基于白光数字散斑 相关技术的面内位移测量系统,由中国科学技术大学研制^[23],该系统主要由白光光源、观察显微镜、摄 像机、图像采集卡、图像采集和数据分析处理软件组成。试样在受力变形时,其表面形貌会随着力的变 化而发生变化,这种变化直接对应着试样的变形。用光学方法记录试样表面图像变化,并用数字散斑相 需要注意的是,该计算过程包含如下基本假设:

(1) 假设物体表面上的每一点在变形前后的灰度值是不变的;

(2)物体的变形为面内位移 忽略离面位移;

(3) 离面位移的导数比面内位移的导数要小得多。

本测量仪采用的相关算法中的像素算法是传统的相关 搜索方法^[25],亚像素位移采用了灰度微分算法^[26]。

2.2 实验步骤

在微力试验机的下夹具上安装探针,将微悬臂梁试样 用 502 胶固定在微力试验机的上夹具上,其位置由三维平 移台调节。通过计算机软件控制微力试验机施加线性增大 的载荷,驱动探针在微悬臂梁末端标记点(试样制备时刻蚀 而成)施加推力,如图2所示。用同轴白光照明微悬臂梁试 样,使用全场位移测量仪采集加载过程中微悬臂梁表面的 散斑图像,然后采用数字相关方法进行计算,得出悬臂梁全



图 2 实验装置及加载示意图 Fig. 2 Experimental setup

场变形细节。为避免摩擦 加载前需通过三维平移台调节试样位置以确保试样的玻璃基底和探针之间 不接触。

3 结果和讨论

被测微悬臂梁外形尺寸为 1700μm × 185μm,厚度为 76μm,实验对相同尺寸的 3 个试样进行了测 试。图 3 给出了由全场位移光学测量仪监测到的探针推动悬臂梁变形至破坏的整个过程,最终悬臂梁 在根部发生脆性断裂飞出视场。在图像上(2.8μm/pixel)肉眼很难观察出微悬臂梁的变形,但通过数字 散斑相关方法(软件计算界面见图 4),可以清晰地辨别出微悬臂梁表面全场位移大小。



图 3 全场位移光学测量仪监测的微悬臂梁受面内载荷加载变形至破坏的过程

(a) 探针未接触悬臂梁 (b) 探针开始推动悬臂梁 (c) 悬臂梁达到最大变形 (d) 悬臂梁在根部断裂飞出视场

Fig. 3 Photographs of micro-cantilever recorded by the optical whole-field displacement measuring instrument.

(a) probe didn't contact the micro-cantilever, (b) probe began to push the micro-cantilever,

(c) micro-cantilever achieved the maximum deformation , (d) micro-cantilever fractured at the root

图 5 给出了微力试验机测出的探针推力和全场位移光学测量仪测量的探针作用点位移的关系曲 线,可以看出,二者基本为线弹性关系,3 个试样的测试结果具有较好的重复性。该组试样的破坏载荷 为 56mN(±2%),探针作用点最大位移平均值 14μm(±3%)。

考虑探针推力在锚点处形成的扭矩效应 根据弹性弯曲理论 将微悬臂梁的变形分解为悬臂梁自身 的弯曲变形以及围绕锚点的旋转 这两部分变形引起的探针作用点处位移分别计算如下:

443

因悬臂梁弯曲引起的探针作用点处位移ω1:



物理尺寸为 1700μm × 185μm;

界面底部区域为计算得到的全场位移矢量图

Fig. 4 Software interface of the optical whole-field displacement measuring instrument. The dotted line area ($1700 \,\mu m \times 185 \,\mu m$) is selected for correlation calculation and the calculated displacement vector is displayed at the bottom of the software interface



Fig. 5 Relationship between the force obtained by micro-tester and the displacement obtained by optical whole-field displacement measuring instrument

因锚点旋转引起的探针作用点处位移 ω_2 :

a

$$\omega_2 = \varphi l = \frac{Tl'}{G\beta h' b^{\beta}} l = \frac{Fl^2 l'}{G\beta h' b^{\beta}} = \frac{2(1+\nu)Fl^2 l'}{E\beta h' l^{\beta}}$$
(2)

探针作用点处总位移ω:

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 = \frac{4Fl^3}{Ebh^3} + \frac{Fl^2l'}{G\beta h'b'^3} = \frac{4Fl^3}{Ebh^3} + \frac{2(1+\nu)Fl^2l'}{E\beta h'b'^3}$$
(3)

式中 *E* 为单晶硅弹性模量; *G* 为单晶硅剪切模量; ν 为泊松比,此处取 0. 23^[20]; *F* 为探针推力; *l* = 1530µm 为探针作用点至锚点中心的距离即力臂长度; *b* = 76µm 为悬臂梁厚度; *h* = 185µm 为悬臂梁宽度; *I* 为微悬臂梁惯性矩; *T* 为探针推力对锚点中心形成的扭矩; φ 为锚点的扭转角; *l* = 4µm 为键合台阶高度; *h* = *b* = 110µm 为键合台阶横截面边长; β = 0. 141 为矩形截面杆扭转系数。由式(3),根据实验数据可得到单晶硅弹性模量为 123.8GPa(±3.2%)。这一结果和用谐振法(121GPa)^[27]、拉伸法(131GPa)^[20]测得的弹性模量较为接近。

该实验中,可能的误差来源包括两方面:其一,试样制备中的尺寸误差,例如键合台阶设计高度 4μm,而实际腐蚀过程中可能会有偏差;其二,像素分辨率引起的误差。由于本文每像素代表物理尺寸 2.8μm 和探针作用点总位移14μm 相比不够精细,也会引起一定误差。

4 结论

基于自制的电磁式微力试验机和全场位移光学测量仪,建立了微尺度力学性能原位测试系统,对 MEMS 单晶硅(001) 微悬臂梁进行了面内弯曲力学性能测试,获得了微悬臂梁末梢施力点的力 – 位移 关系曲线以及全场变形情况。结果显示,微悬臂梁表现出很好的弹性弯曲行为,最后在根部发生脆性断 裂。通过弹性弯曲理论计算出单晶硅弹性模量为123.8 GPa(±3.2%),和文献值吻合较好。该技术 具有加载方式灵活、载荷分辨率高、变形测量数据丰富等优点,为研究 MEMS 微构件的力学性能提供了 一种有效的手段。 致谢:感谢北京大学张大成教授和阮勇博士提供试样。

参考文献:

- Weihs T P, Hong S, Bravman J C, et al. Mechanical deflection of cantilever microbeams: A new technique for testing the mechanical properties of thin films [J]. J. Mater. Res., 1988, 3(5): 931-942.
- [2] 张泰华,杨业敏. 纳米硬度技术的发展和应用 [J]. 力学进展, 2002, 32(3): 349 364 (Zhang Taihua, Yang Yemin. Developments and applications of nano-hardness techniques [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(3): 349 364 (in Chinese))
- [3] 苏才钧,吴昊,郭占社等. 微构件材料力学性能测试方法 [J]. 实验力学,2005,20(3):441-447 (Su Caijun, Wu Hao, Guo Zhanshe, et al. Mechanical testing methods of micro structures [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005,20(3):441-447 (in Chinese))
- [4] Kurt Matoy, Helmut Schönherr, Thomas Detzel, et al. A comparative micro-cantilever study of the mechanical behavior of silicon based passivation films [J]. Thin Solid Films, 2009, 518:247 – 256.
- [5] Changchun Hsu, Chingfu Tsou, Weileun Fang. Measuring thin film elastic modulus using a micromachined cantilever bending test by nanoindenter [J]. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, 2007, 6(3): 033011.
- [6] Yong Huan, Dongxu Liu, Rong Yang, Taihua Zhang. Analysis of the practical force accuracy of electromagnet-based nanoindenters [J]. Measurement, 2010, 43: 1090 – 1093.
- [7] 朱强,蒋庄德,赵则祥等.在纳米压入仪上进行悬臂梁法测量弹性模量的影响因素分析 [J].稀有金属材料与 工程,2005,34(11):1842-1845 (Zhu Qiang, Jiang Zhuangde, Zhao Zexiang, et al. Analysis of the influence factors on the measurement of elastic modulus using the microcantilever deflection on a nanoindenter [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(11):1842-1845 (in Chinese))
- [8] Methporn Mareanukroh, Eby R K, Scavuzzo R J, et al. Use of atomic force microscope as a nanoindenter to characterize elastomers [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 73(5):912-925.
- [9] 张向军,孟永钢,温诗铸. MEMS 微悬臂梁构件变形规律的 AFM 试验研究 [J]. 机械科学与技术,2005,24(8):
 966 968 (Zhang Xiangjun, Meng Yonggang, Wen Shizhu. Experiments on the deformation of MEMS Mciro-cantilever using AFM [J]. Mechanical Science and Technology, 2005,24(8): 966 968 (in Chinese))
- [10] Rob Legtenberg, Groeneveld A W, Elwenspoek M. Comb-drive actuators for large displacements [J]. J. Micromech. Microeng, 1996, 6: 320 - 329.
- [11] Li J, Liu A Q, Zhang Q X. Tolerance Analysis for comb-drive actuator using DRIE fabrication [J]. Sensors and Actuators A, 2006, 125: 494 – 503.
- [12] Sang Won Yoon, Sangwoo Lee, Khalil Najafi. Vibration-induced errors in MEMS tuning fork gyroscopes [J]. Sensors and Actuators A, 2012, 180: 32 – 44.
- [13] 郇勇,张泰华,杨业敏等. 微力学测试仪在 MEMS 键合强度测试中的应用 [J]. 机械强度,2005,27(3):331 334 (Huan Yong, Zhang Taihua, Yang Yemin, et al. Application of super-micro tester in MEMS bonding strength test [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005,27(3):331 334 (in Chinese))
- [14] Toshiyuki Tsuchiya, Atsuko Inoue, Jiro Sakata. Tensile testing of insulating thin films; humidity effect on tensile strength of SiO₂ film s [J]. Sensor s and Actuators, 2000, 82(1-3): 286 - 290.
- [15] 陈大庆,顾济华,姜锦虎. 斜光轴面内位移测量的数字散斑相关法研究[J]. 光学学报,2005,25(7):907-912 (Chen Daqing, Gu Jihua, Jiang Jinhu. Study on the digit al speckle correlation method for in-plane displacement measurement in the case of slant optical axis [J]. Acta Optica Sinica, 2005,25(7):907-912(in Chinese))
- [16] 何小元,康新,衡伟等. 微电子与微电子机械系统(MEMS)中的现代光学测试技术[J]. 机械强度,2001,23
 (4):447 451 (He Xiaoyuan, Kang Xin, Heng Wei, et al. Advanced optical measurement technology in the semiconductor and MEMS [J]. Journal of Mechanical Strength, 2001,23(4):447 451 (in Chinese))
- [17] Chang S , Wang C S , Xiong C Y , et al. Nanoscale in-plane displacement evaluation by AFM scanning and digital image correlation processing [J]. Nanotechnology , 2005 , 16: 344 – 349.
- [18] Li X, Yang Y, Wei C. Experimental investigation of polycrystalline material deformation based on a grain scale [J]. Chinese Physics Letter, 2005, 22:2553 - 2556.
- [19] Pan B, Xie H M, Hua T. Measurement of co efficient of thermal expansion of films using digital image correlation method

[J]. Polymer Testing , 2009 , 28:75 - 83.

- [20] Leslie Banks-Sills, Yael Hikri, Slava Krylov, et al. Measurement of Poisson's ratio by means of a direct tension test on micron-sized specimens [J]. Sensors and Actuators A, 2011, 169:98 – 114.
- [21] Thierry Roland, Steve Arscott, Laurent Sabatier, et al. Digital image correlation of metal nanofilms on SU-8 for flexible electronics and MEMS [J]. J. Micromech. Microeng, 2011, 21: 125005.
- [22] Huan Yong, Zhang Taihua, Yang Yemin. A moving-coil designed micro-mechanics tester with application on MEMS [J]. Meas. Sci. Technol , 2007, 18: 3612 – 3616.
- [23] 缪泓,张泰华,郇勇等. 微尺度位移、形貌测量系统及应用 [J]. 实验力学,2007,22(3-4):424-428 (Miao Hong, Zhang Taihua, Huan Yong, et al. Development of micro-scale displacement and profile measurement system and its applications [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(3-4):424-428 (in Chinese))
- [24] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展 [J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195 203 (Wang Huaiwen, Kang Yilan, Xie Heping. Advance in digital speckle correlation method and its application [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 195 203 (in Chinese))
- [25] 高建新,周辛庚.数字散斑相关方法的原理与应用 [J]. 力学学报,1995,27(6):724-731 (Gao Jianxin, Zhou Xingeng. Principle and applications of digital speckle correlation method [J]. Acta Mechanica Sinica, 1995,27(6): 724-731 (in Chinese))
- [26] Zhou P, Godson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. Opt. Eng., 2001, 40(8): 1613 – 1620.
- [27] Ye X Y, Zhou Z Y, Yang Y, et al. Determination of the mechanical properties of microstructures [J]. Sensors and Actuators A, 1996 54(1-3):750-754.

In-plane Bending Performance Test of Micro-Cantilever Based on Whole-Field Displacement Measuring Technique

SHAO Ya-qi¹, HUAN Yong¹, DAI Yu-jing¹, MIAO Hong², ZHANG Tai-hua³

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: An in-situ testing system for micro-scale mechanical performance was developed based on a homemade micro-force testing machine and an optical whole-field displacement measuring instrument. The microforce testing machine is designed based on principle of electromagnetic drive and load measurement with load range/noise of ± 1 N/50 μ N, respectively. The optical whole-field displacement measuring instrument was developed based on white light digital speckle correlation method with the specimen' topography acted as the generalized speckle. In-plane bending performance test of MEMS monocrystalline silicon (001) microcantilevers was performed by using this testing system. The force-displacement curve at the end of microcantilever was acquired, as well as the whole-field displacement. Results show that the micro-cantilever presents a good elastic bending behavior and finally fractures at the root. Young's modulus of monocrystalline silicon (001) is determined as 123.8GPa ($\pm 3.2\%$) based on the elastic bending theory. This technique provides a feasible approach for studying the mechanical properties of MEMS micro-structures.

Keywords: micro-scale; in-plane load; digital speckle correlation method (DSCM); micro-electromechanical systems (MEMS); micro-cantilever