

微电子与微电子机械系统 (MEMS) 中的现代光学测试技术^{*}

ADVANCED OPTICAL MEASUREMENT TECHNOLOGY IN THE SEMICONDUCTOR AND MEMS

何小元^{1,2} 康新¹ 衡伟¹ 黄庆安¹

(1. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

(2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

HE Xiaoyuan^{1,2} KANG Xin¹ HENG Wei¹ HUANG Qinan¹

(1. Key Laboratory of MEMS of Education Ministry of China, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(2. LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100080, China)

摘要 介绍了微电子和微电子机械系统 (MEMS) 中几种常用的变形和形貌测量方法以及相关的测量设备。其中相移云纹干涉技术用于微电子器件的面内位移测量, 灵敏度可达到纳米量级。显微栅线投影技术用于 MEMS 的离面变形和形貌测量, 灵敏度可达 0.1 微米。

关键词 微电子机械系统 微电子 光测力学

Abstract Mechanical test of the materials and structures commonly used in micro-electro-mechanical systems (MEMS) is an essential step towards the achievement of optimal design and reliability of the micro mechanical components. The measurement of the occurring mechanical quantities, such as forces and deformations, requires the development of new testing procedures. Non-contact and whole-field optical measuring and inspection methods are a unique technology for the measurement of the shape and deformation of MEMS materials and components.

In recent years, substantial research has been carried out on micro-sensors, micro-mirrors, micro-motors, micro-pumps, micro-valves, micro-actuators, micro-lenses, and so on. The diameter of spherical lens is about 250 μm , the size of micro-motor is no more than 800 μm , an inlet port size is only 80 μm . Under Scanning Electronic Microscope (SEM) and Atomic Force Microscope (AFM) sub-micron displacement can be resolved. But, to loading on the sample is more difficult and the deformation measurement range is limited.

Optical methods are introduced for the small sample testing of MEMS materials and structures in this paper. The methods are based on the laser interferometry, phase shifting, digital image correlation and image processing etc. Using a LWDM (long working distance microscope) and digital speckle correlation method (DSCM) the stretching strain of a thin copper wire (diameter 0.1 mm) can be determined. The proposed technique is also applicable for measuring other MEMS materials that may be even smaller or thinner than that used in this paper. The interference of light beams of equal path difference is used for the measurement of the Young's modulus of a micro-beam. An optical wedge which consists of an optical plate and a micro-beam which forms part of a micro-accelerometer is illuminated by a collimated monochromatic sodium light beam. Loading on the micro-beam is accomplished by a loading-pin mounted on a 3-axis translation stage and the resulting interference fringe pattern is observed using a CCD camera connected to a computer. Loadings are recorded using a high sensitive load cell that measures loads of up to 200 g with a resolution of 0.01 g.

This paper also describes the use of optical fringe projection method for 3-D surface profile measurement of small objects. In this method, sinusoidal linear fringes are projected on the object surface by a sinusoidal grating phase shifting projector and a LWDM. The image of the fringe pattern is captured by another LWDM and a CCD camera and processed by phase-shifting techniques. A simple procedure is described which enables calibration of the optical set-up for subsequent quantitative measurement of unknown object shapes and deformations. The method developed can also be applied to the measurement of the warpage of a small component under thermal loading. This method is relatively simple and accurate, and is capable of conducting fully automated measurements. The deformation of a micromirror (100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$) driven by an electrostatic force is measured by comparing the profiles between deformed and undeformed. The maximum displacement of micro mirror is no more than 2 microns. Thus, the rotation angle of the micromirror is less than 2 degrees. Experimental results obtained demonstrate the feasibility of the proposed method to be used for evaluating the contouring of the microstructure.

Key words Micro-electro-mechanical system (MEMS); Micro electronics; Photo-mechanics

Correspondent: HE Xiaoyuan, E-mail: mmhxy@seu.edu.cn, Fax: +86-25-7712719

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10072017).

Manuscript received 20010928, in revised form 20011106.

* 20010928 收到初稿, 20011106 收到修改稿。国家自然科学基金资助项目 (10072017)。

1 引言

随着微电子工业的发展,大规模集成电路不仅广泛应用于计算机、通讯、汽车、工业控制等方面,而且也普遍应用于日常生活用品(如移动电话、摄像机、电视机、洗衣机甚至玩具等),这就要求集成电路进一步朝着小型化方向发展。应用领域对微电子器件提出的减小体积、减轻重量和降低器件成本的要求必将促进新的微电子封装技术的发展。由于集成度提高,体积减小引起散热不畅而导致微电子电路局部区域温度升高,成了影响微电子器件可靠性的一个重要因素。热变形的影响主要表现在两个方面,一是在工作状态下由于微电子器件自身发热和散热不畅,导致过大的温度梯度而产生的温度应力,长期运行会使结构发生疲劳破坏,导致电路不能正常工作。另一方面是由于所使用材料物理性质的差异,在不同的环境温度下,即使其内部温度均匀也可能产生很大的温度应力和翘曲变形,导致集成块或印刷电路板之间不能正常接触而影响封装过程。

光测力学方法是用于检测微电子器件热变形的有效手段,云纹干涉技术已经很好地解决了微电子器件被测截面上二维位移场的测量问题^[1],相移显微云纹干涉技术可以获得 10.4 纳米/线的高灵敏度二维位移分布^[2]。但是对大多数微电子器件甚至印刷电路板,受热后翘曲变形的测量还不能满足科研和生产的需要。这些翘曲变形大都在几百纳米到几十微米之间,传统的影像云纹方法由于受到光栅密度的限制而不易达到亚微米级的灵敏度,而传统的激光干涉技术又因量程限制而不能满足这一量级离面位移测量的需要。1998 年第 48 届 ECTC 会议上 K. Verma 等人提出用红外干涉技术测量微电子器件的翘曲变形,但由于激光功率过大和对环境要求较高,也难以满足工业测量操作安全性的要求^[3]。

微电子机械系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)的研究迫使平面印刷加工技术从加工静态结构(大规模集成电路)转向加工动态结构(MEMS),动态结构的封装远比静态结构要复杂得多。随着 MEMS 研究的深入,其在国防、医疗、航空航天、汽车等领域中的应用也日趋增多。人们已不再仅仅满足于这些系统的功能实现,而更多地注意研究 MEMS 结构工作的稳定性、可靠性和优化设计问题。为了保证 MEMS 结构在各种不同环境条件下运行的可靠性和稳定性,对于微机械结构的力学性能分析以及构成这些结构所用材料的破坏机理的研究成了人们关注的课题。特别是在军事、空间技术以及人体器官等的应用中,对微机械结构的力学特性将会提出更高的要求。目前,在 MEMS 结构(主要有微泵、微电机、微轴承、微阀和微型传感器等)

中所使用的材料大多以硅、陶瓷、薄膜和玻璃为主。从国内召开过的一些与 MEMS 有关的专题研讨会看,清华大学、上海交通大学、东南大学等高校和科研院所所在微加速度计、微电机、微泵等的设计和研制方面已取得很大的进展。但是,在 MEMS 材料和微结构的基本力学特性的研究方面还显得远远不够。由于 MEMS 结构不同于常规机械结构,不能引用常规条件下材料和结构的力学特性参数尤其是动力学特性参数进行设计。而目前也没有系统的方法对几何尺寸不到 1 mm 的材料试样或结构的力学特性,特别是动力学特性进行测试。笔者前年曾在美国韦恩州立大学访问研究,所在课题组最新研制的用于小试样材料力学性能(包括疲劳)测试的小型材料试验机,测力灵敏度可达 1 克,但变形测量尚不能令人满意。而对于微结构动力学特性的测试方法方面的报道至今尚不多见。

基于栅线投影法的微米级表面形貌测量技术已成功用于 Ball Grid Array (BGA) 在 240 \times 下的翘曲变形测量^[4],但其测量速度和灵敏度还远不能满足微电子器件测量的普遍要求。栅线投影法的灵敏度取决于图象采集系统的空间分辨率、栅线识别精度以及投影方向与观察方向之间的夹角,测量速度取决于栅线位置识别计算量的大小。提高图象系统的空间分辨率会大大增加系统成本,加大夹角会增加测量盲区,为提高速度而减小图象相关计算的样本图象又会影响测量精度。针对这些问题,本文将进一步介绍运用远距离显微成像技术、显微云纹干涉技术、投影栅线测量技术并结合相移技术和数字图象相关技术等,测量微电子器件和 MEMS 材料与结构的微小变形的的方法,通过如何合理选用栅线灰度分布和 CCD 的输出参数,以获得高信噪比的栅线图象;通过改进图象匹配算法,在保证计算精度的前提下提高测量速度;运用远距离显微成像技术,以满足微小区域形貌和离面位移测量的需要。

2 相移云纹干涉技术用于微电子器件的纳米级变形测量

将高密度光栅(通常为 1 200 线/mm)复制于试件的被测表面,采用图 1 所示的光路,可以测量试件表面的面内位移场。图 2 是根据该光路研制的显微云纹干涉测量仪。图 3 是用显微云纹干涉仪测得的 Chip Scale Packaging (CSP) 某一截面上的云纹干涉条纹图。该干涉条纹图代表被测截面上竖直方向的位移分布,每 2 级条纹间的位移差为 417 纳米。通过提高放大倍数可以研究单个焊锡球的变形分布,图 4 所示是经放大后单个焊锡球的干涉条纹图。由于放大后的干涉条纹比较稀疏,直接通过条纹还不能分析拐角局部的变形分布。采用 4 步相移技术可以对条纹进行细分。根据 4 幅位相差 90 $^\circ$ 的条纹图,可以获得图 5 所示的位相图。

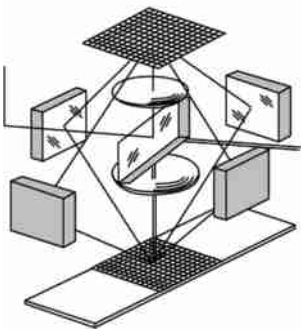


图 1 云纹干涉光路图
Fig. 1 Optical path of moiré interferometry



图 2 多功能显微云纹干涉仪
Fig. 2 Multi-function micro moiré interferometry



图 3 CSP 截面云纹干涉条纹
Fig. 3 Moiré fringe pattern of a CSP cross section

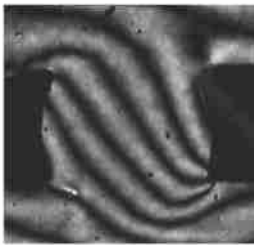


图 4 焊锡球截面云纹干涉条纹
Fig. 4 Moiré fringe pattern of a solder ball

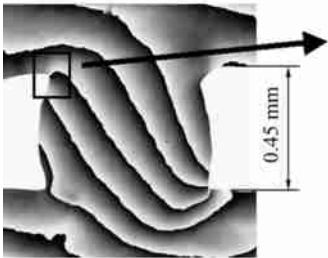
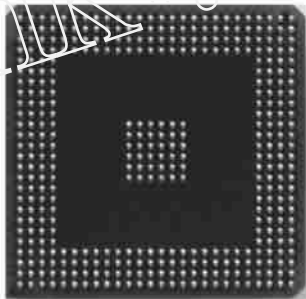


图 5 焊锡球截面上位相分布图
Fig. 5 Phase map of a solder ball



图 6 细化 40 倍的二值条纹图
Fig. 6 Thinning fringe of 40 multiplications



(a) 左摄像机摄得
(a) Captured by left camera



(b) 右摄像机摄得
(b) Captured by right camera

图 7 立体摄影系统拍得的 BGA 表面图

Fig. 7 The image of BGA surface captured by stereo capture system

对位相图进行数值细分可以使条纹加密到 40 倍以上。图 6 是加密 40 倍的位相条纹图,每 2 级条纹间的位移差为 10.4 纳米。

3 立体摄影与图象相关测量 Ball Grid Array (BGA) 焊锡球顶点的共面度

封装好的芯片需要通过图 7 所示的 BGA 或其他形式连接到印刷电路板上,在与印刷板焊接时要求所有焊锡球的顶点尽可能在同一平面上,通常误差不得超过 100 微米。利用图 8 所示的立体摄影系统摄得图 7 所示的 a、b2 幅分别由左摄像机和右摄像机摄得的

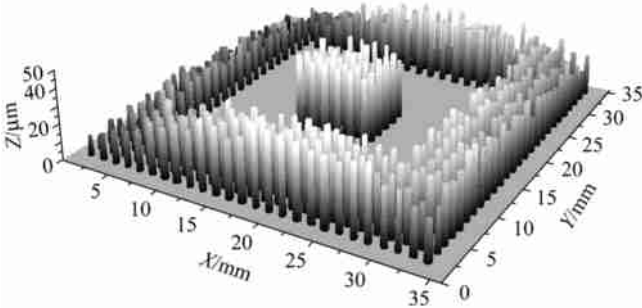


图 9 立体摄影系统测得的 BGA 焊锡球的高度差
Fig. 9 Experimental results of height difference of solder balls

图样。采用数字图象相关技术可以确定同一焊锡球在左右图象中位置的差异,根据位置差异可以计算出焊锡球之间的高度差如图 9 所示。

4 数字图象相关技术用于微小试样的力学性能测试

金属丝、薄膜和硅及陶瓷等是加工 MEMS 结构常用的材料,通常这些材料不可能加工成现行材料试验规范所规定尺寸的标准试样,即使可以加工成这样的试样,用这种试样所测得的材料参数也不能代表这种材料在 MEMS 尺度下的材料参数。因为研究结果表明:材料的力学特性将随结构尺寸的大小改变而发生变化。因此,必须采用新的测试方法进行 MEMS 材料的力学性能测试。具有非接触、全场性的光学测量方

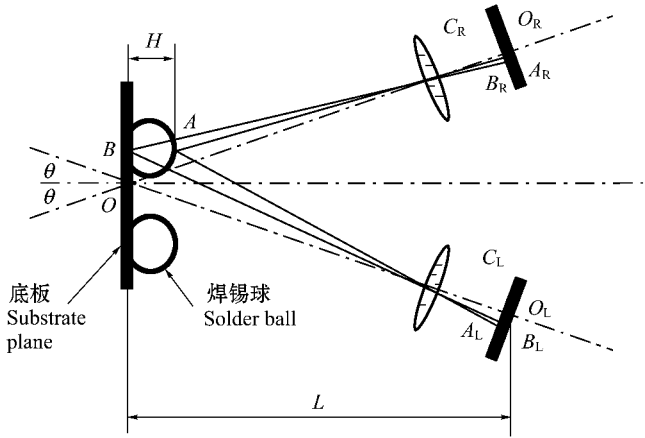


图 8 立体摄影光路图
Fig. 8 Optical path of stereo capture system

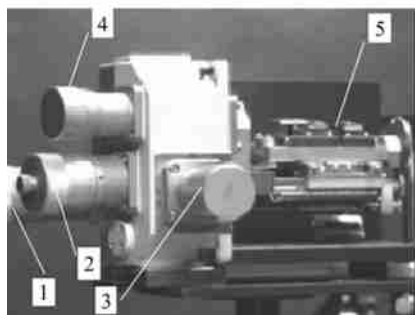


图 10 微小试样拉压弯试验台
Fig. 10 The loading stage for small specimen

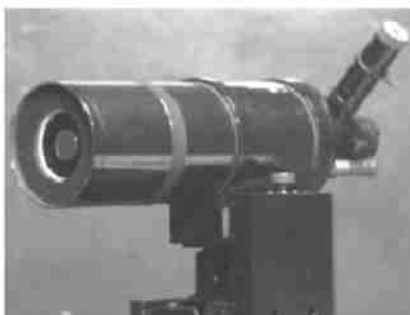


图 11 国产反射式远距离显微镜
Fig. 11 Long working distance microscope



图 12 不同荷载下金属丝(直径 100 μm)
表面图样
Fig. 12 The speckle patterns of a copper wire
($\varnothing 100 \mu\text{m}$) under different load

法是唯一有效的办法。数字散斑相关技术可用于分析物体表面的面内变形,对于测量拉伸试样的线应变是一种非常有效的手段。图 10 是用于微小试样加载的试验台,可用于金属丝、薄膜和试样尺度在 10 mm 左右的小试样的拉压和弯曲试验。图 11 是一台国产反射式远距离显微镜,该显微镜配有 5 倍和 10 倍目镜用于直接寻找和观察目标,其尾端也可以直接连接 CCD 摄像机,用于图象采集。图 12 是用该设备拍摄的不同荷载下金属丝表面图样。用数字图象相关分析技术可以计算出不同荷载作用下的表面应变,其应变分布如图 13 所示。

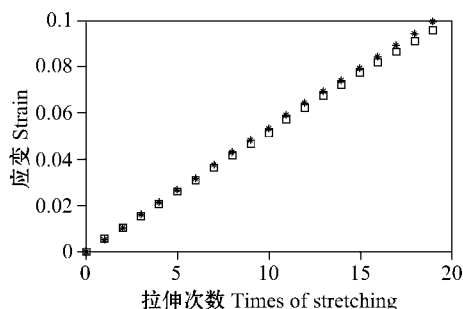


图 13 不同荷载下金属丝表面应变
Fig. 13 Strain distribution of a copper wire under different load

5 用于 MEMS 研究的纳米级三维形貌与变形测量技术

MEMS 结构的几何尺寸通常要比常规机械小 3 个数量级,因此用于常规力学性能测量的手段几乎都不

能直接用于 MEMS 力学性能的测量,必须采用显微技术。普通显微镜由于工作距离太短,而不能在试样与物镜之间加装任何其他装置来实施深度方向几何尺寸和变化的测量。远距离显微镜可以很好地解决这一问题。由于远距离显微镜的工作距离通常可达 100 mm 以上,因此可以在远距离显微镜镜头与试样之间加装必要的光学元件,用于测量试样表面的形貌和变形等。目前用于 MEMS 结构形貌与变形测量主要有以下两类方法。

1) 干涉测量技术

图 14 是在远距离显微镜下观察到的代表微镜表面变形的干涉条纹,根据干涉条纹图样和测量光路的设置,可以直接计算微镜表面的变形。同样,图 15 是移动电话上使用的麦克风振动膜的振型条纹图,在振动膜的电极上通电即可实时观察到干涉条纹的变化,并可定量计算出振动膜的振动。图 16 是荷载作用下微梁弯曲的干涉图样,据此可以计算材料的弹性模量。

2) 栅线投影技术

栅线投影法结合相移技术可以进行高精度的三维形貌测量。图 17 是基于这一测量技术所研制的高精度显微三维轮廓仪,图 18 是用于系统标定及放置样品的试验台。由于该系统可以测量微小样品的表面轮廓,因此比较不同状态下的轮廓之差,即可获得样品的表面变形。图 19 是在微镜表面投影的正弦栅线图样,用显微三维轮廓仪测得在电场作用下微镜的表面变形

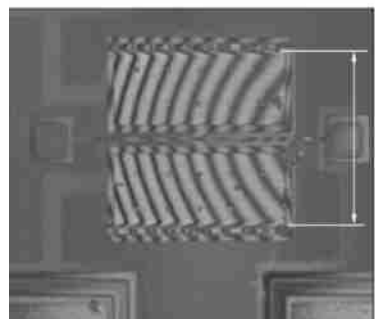


图 14 微镜表面形貌干涉条纹
Fig. 14 Interferometry fringe pattern on the surface of a micro mirror

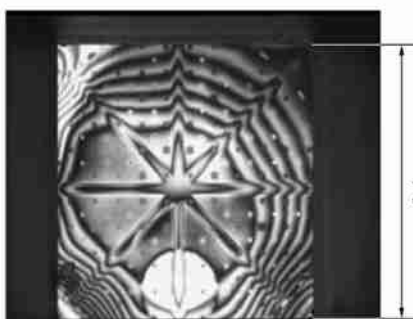


图 15 麦克风振动膜的振型条纹图
Fig. 15 Interferometry fringe pattern on the surface of a micro phone



图 16 微梁表面变形干涉条纹
Fig. 16 Interferometry fringe pattern on the surface of a micro beam



图 17 显微三维轮廓仪
Fig. 17 3 Dimension micro profiler

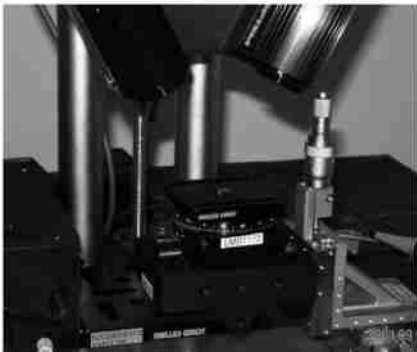


图 18 测试与标定移动台
Fig. 18 Testing and calibration stage

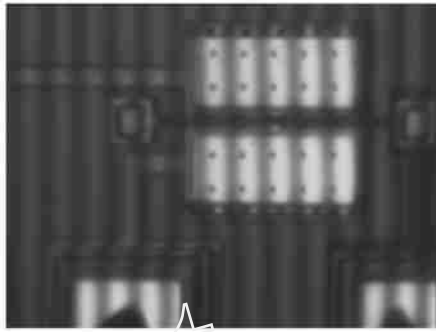


图 19 微镜表面正弦栅线图样
Fig. 19 Fringe pattern on the micro mirror

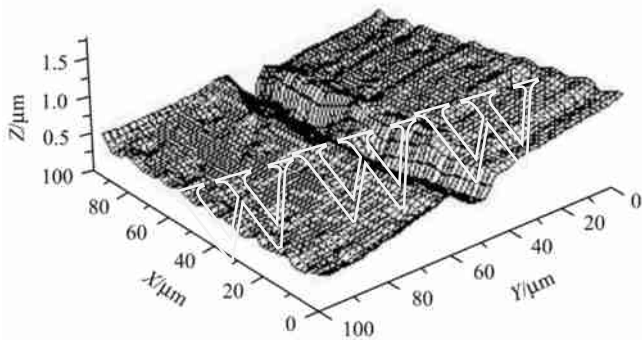


图 20 电场作用下微镜所发生的转动
Fig. 20 The rotation of micro mirror applied voltage

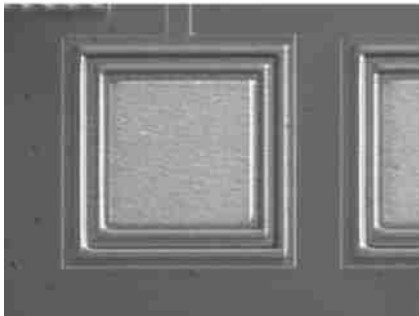


图 21 微镜电极板
Fig. 21 An electrode pad

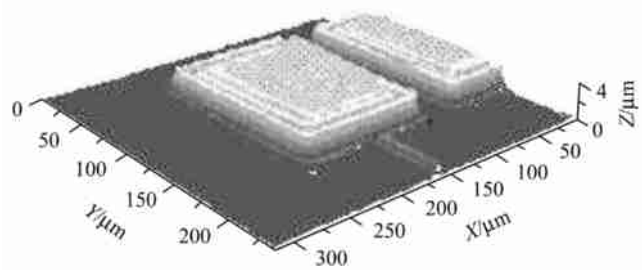


图 22 微镜电极板的三维形貌
Fig. 22 The profile of an electrode pad

如图 20 所示。该系统的高度测量分辨率为 0.1 微米，高度测量范围为 0.5 ~ 500 微米。被测样品的平面测量范围为 0.5 ~ 5 mm。可以用于 MEMS 结构变形和形貌测量。图 22 是图 21 所示微镜电极板三维形貌的测试结果。

6 结论

研究表明,光学显微测量技术是用于微电子和 MEMS 力学性能测试的非常有效的方法。结合激光干涉技术,它不仅可用于微器件的表面形貌测量和变形测量,而且结合一定的图象采集和处理技术,这类方法还可用于 MEMS 结构动力学特性的测量。

References

1 He X Y, Zou D, Liu S, et al. Phase-shifting analysis in moiré interferometry and its application in electronic packaging. *Optical Engineering*, 1998, 37 (5) : 1 410 ~ 1 419.

2 Quan C, Shang H M, Tay C J, et al. Holographic contouring using double-source technique and Fourier transform analysis. *Opt Laser Eng*, 1998, 30: 351 ~ 362.

3 Verma K, Columbus D, Han B, et al. Real-time warpage measurement of electronic components with variable sensitivity. *The Proceedings of 48th Electronic Components & Technology Conference*, IEEE, Seattle, 1998. 975 ~ 980.

4 Quan C, He X Y, Wang C F, et al. Shape measurement of small object using LCD fringe projection with phase shifting. *Optics Communications*, 2001, 189: 21 ~ 29.

作者简介

何小元,男,1956年9月生,江苏泰兴人,汉族。东南大学工程力学系教授,博士生导师,博士。主要从事光测试力学方法研究,在三维形貌和变形测量方面承担过三项国家自然科学基金项目。

HE Xiaoyuan was born in Jiangsu China, Han. He received his PhD degree from Institute of Mechanics, Southwest Jiaotong University. He is a professor in the Department of Engineering Mechanics, Southeast University. His research interests include 3-D shape and deformation measurement using optical methods and image processing techniques.

康新,女,1966年10月生,河北人,汉族。东南大学工程力学系博士研究生,主要从事光学测试技术研究。