

# 阵列式微机械悬臂梁的研制及其特性分析\*

于晓梅 张大成 李婷 王小宝 阮勇 杜先锋

(北京大学微电子学研究院, 北京 100871)

**摘要:** 在一个芯片上设计了六组不同规格的矩形压阻悬臂梁。采用 ANSYS 有限元分析系统对微压阻悬臂梁进行应力分析, 并对压阻悬臂梁的噪声、灵敏度以及最小可探测位移进行了研究。选用多晶硅为压阻材料, 以硅微机械加工技术为基础, 完成了阵列式压阻悬臂梁的制备。通过测量器件的噪声和灵敏度, 计算出在 6V 偏压和 1000Hz 测量带宽下, 多晶硅悬臂梁的最小可探测位移为 1nm。

**关键词:** 悬臂梁; 噪声; 灵敏度; 最小可探测位移

**PACC:** 0710C; 7270; 7220F

中图分类号: TH742 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2003)08-0861-05

## 1 引言

微机械悬臂梁技术在上个世纪 80 年代应用于扫描力显微镜(SFM), SFM 是众所周知的高灵敏度检测仪器。近年来, 将高灵敏度的微悬臂梁技术应用于生物、化学传感器成为传感器领域的研究热点<sup>[1~10]</sup>。微悬臂梁生物传感器通过在悬臂梁的一个表面固定特殊的生化敏感层, 当被测物质经扩散进入生化敏感层, 就会在悬臂梁表面发生物理吸附或生物化学反应并产生机械响应。悬臂梁的机械响应包括表面应力变化、热转换、质量变化等, 这些物理变化或化学反应的结果通过换能器被转换成电学信号记录下来。由于其独特的结构以及微小的几何尺寸, 微悬臂梁对其表面的应力、温度、质量等物理量的变化极为敏感, 可探测小到  $10^{-5}\text{N/m}$  的表面应力和 1pg 的质量变化, 尤其适合探测生化分子间的微弱相互作用。

被检测生化分子与敏感层分子间的作用力使悬臂梁产生微小弯曲, 悬臂梁的微小弯曲通常由光学或电学方法来记录。光学的检测方法虽然具有较高的灵敏度, 可获得小至 0.001nm 的垂直分辨率, 但庞大的光学测量系统及激光的精密校准限制了其广泛地应用, 如超高真空、低温、液态条件下和阵列式

悬臂梁测量中, 摆脱这一问题的方法是集成电容、压电或压阻器件于悬臂梁中的电学读出方法, 电学检测技术比光学方法更易于操作, 易于转向实用化。阵列式悬臂梁的设计在多功能生物传感器研究领域具有广泛的应用前景, 通过在不同悬臂梁表面固定不同的生物化学敏感层, 该传感器可用于多种生物化学分子的同时识别。

本文设计了两种尺寸矩形悬臂梁, 并在每种尺寸悬臂梁上分别设计了三种尺寸的力敏电阻。采用多晶硅为力敏材料, 基于硅微机械加工技术完成压阻悬臂梁的制备。通过测量压阻悬臂梁的噪声和灵敏度, 计算出微悬臂梁的 Hooge 因子、应变灵敏度系数和最小可探测位移。

## 2 理论分析

将 12 个矩形悬臂梁设计在同一个芯片上, 并对称排列在微槽的两侧, 矩形悬臂梁的设计尺寸分别为  $100\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$  和  $150\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$  两种。四个完全相同的力敏电阻组成对称 Wheatstone 电桥, 构成一个传感器。四个电阻中的两个位于衬底上, 另外两个分别位于两个悬臂梁上, 其中的一个悬臂梁作为测量悬臂梁, 另一个悬臂梁作为参考悬臂梁。参考电阻被设计在悬臂梁上而不是衬底上, 是考虑当外部

\* 国家自然科学基金(批准号: 90207013)、教育部留学回国人员科研启动资金和博士后基金资助项目

环境噪声及热机械震动噪声使悬臂梁形变时,这个附加的信号可通过参考悬臂梁过滤掉。

## 2.1 力敏电阻的噪声

在硅压阻悬臂梁传感器研究中,需要重点考虑三种噪声: Johnson 噪声、 $1/f$  噪声和热机械振动噪声。Johnson 噪声产生于电阻性电子材料中自由载流子在确定温度下的无规则热运动,这种运动源于即使在没有外电场的情况下电流或电压的起伏,它仅与材料的电阻和温度有关,不依赖于频率。Johnson 噪声电压功率可表示为

$$S_{VJ} = 4k_B T R \Delta f \quad (1)$$

其中  $k_B$  是 Boltzmann 常数;  $T$  为温度;  $R$  为电阻;  $\Delta f$  为测量带宽。

低频下,对于均匀的电阻材料,存在着一种与电导起伏相对应的噪声,在很宽的频率范围(1Hz~10kHz)内,具有  $f^{-1}$  形式的分布,因此称此噪声为  $1/f$  噪声。除频率外,  $1/f$  噪声还依赖电阻中总的自由载流子数和材料的性质。Hooge 在 1969 年提出了一个解释  $1/f$  噪声的经验公式,这个公式可表达为<sup>[11]</sup>

$$S_{VH} = \frac{\alpha}{fN} V_{bias}^2 \quad (2)$$

其中  $S_{VH}$  为相应于电压起伏的  $1/f$  噪声功率密度;  $V_{bias}$  是加在电阻  $R$  上的偏压;  $f$  为频率;  $N$  为总的自由载流子数;  $\alpha$  为 Hooge 因子,是一个与器件尺寸无关的常数,它依赖于晶格的质量,是一个判断材料  $1/f$  噪声大小的重要参数,通常介于  $10^{-7}$  到  $10^{-3}$  之间<sup>[12]</sup>。

热机械振动噪声是悬臂梁的另一噪声源,它产生于悬臂梁的物理振动<sup>[13]</sup>。通过设计与测量悬臂梁工作条件完全相同的参考悬臂梁,可减小热机械振动噪声的影响。

## 2.2 应力分析

采用 ANSYS 有限元分析系统对矩形悬臂梁进行应力分析,模拟结果如图 1 所示。模拟过程中,不考虑不同膜层材料的区别及材料的本征应力,认为悬臂梁由均匀的氧化硅材料组成,均匀载荷力加于悬臂梁的末端。显然,对矩形悬臂梁,最大应力发生在悬臂梁支点附近,但应力在这一区域内的分布不均匀,应力较大的区域约占悬臂梁总长度的三分之一。从减小噪声的角度考虑,力敏电阻的长度为悬臂

梁长度的三分之二时,热机械震动噪声最小<sup>[13]</sup>。综合噪声和灵敏度的分析,对两种几何尺寸的悬臂梁,均设计了三种尺寸的力敏电阻,分别为:  $30\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ;  $50\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  和  $70\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 。

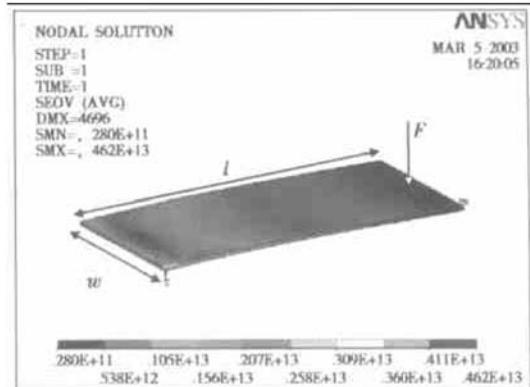


图 1 ANSYS 模拟悬臂梁的应力分析结果 标尺上标记的应力从左至右逐渐增大。

Fig. 1 Simulation result of cantilever stress by FEA simulator ANSYS™. The stress in the gauge increases from left to right.

在力  $F$  作用下,悬臂梁表面产生纵向应力和横向应力,如果仅考虑纵向应力对力敏电阻的影响,则悬臂梁的表面纵向应力可表示为

$$\sigma_l = \frac{6(l - L/2)}{wt^2} F \quad (3)$$

式中  $l$ 、 $w$  和  $t$  分别为悬臂梁的长度、宽度和厚度;  $L$  为力敏电阻的长度。

## 2.3 悬臂梁的分辨率

压阻悬臂梁的测量灵敏度定义为电阻的相对变化与悬臂梁端点垂直位移量的比。如果不考虑横向应力,依据硅的压阻效应,可得到电阻的相对变化随力的变化关系:  $\Delta R/R = \pi_l \eta_l$ 。根据虎克定律和弹性系数的定义,推出悬臂梁的测量灵敏度为

$$\frac{\Delta R}{R} \Delta z^{-1} = \frac{3\pi_l E t (l - L/2)}{2l^3} = \frac{3Kt(l - L/2)}{2l^3} \quad (4)$$

式中  $\pi_l$  是力敏电阻纵向压阻系数;  $E$  为杨氏模量;  $K = E\pi_l$  为力敏电阻的应变灵敏度系数;  $\Delta z$  为悬臂梁端点的垂直位移。

在压阻悬臂梁的研究中,通常用悬臂梁的最小可探测位移(MDD)评价其分辨率。MDD 定义为悬臂梁的信号噪声比(S/N)为 1:1 的条件下悬臂梁的垂直位移量,压阻悬臂梁的 MDD 除依赖测量灵敏

度, 还受力敏电阻噪声的制约。令 Wheatston 电桥输出电压信号  $V_0$  等于总噪声(此时  $S/N = 1:1$ ), 并根据悬臂梁测量灵敏度的结果, 得到压阻悬臂梁的 MDD。

$$\text{MDD} = \frac{4}{V_{\text{bias}}} \left[ \frac{\alpha V_{\text{bias}}^2}{N} \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}} + 4k_B T R (f_{\max} - f_{\min}) \right]^{1/2} \div K \frac{3(l - \frac{1}{2}L)t}{2l^3} \quad (5)$$

上式的分子中, 括弧中的第一项对应着  $1/f$  噪声, 第二项对应着 Johnson 噪声。

### 3 实验

通过对工艺流程进行优化设计, 在微悬臂梁的制备中仅采用了三个掩膜板(力敏电阻掩膜板、悬臂梁及接触孔掩膜板、金属掩膜板)。相比其他压阻悬臂梁制备工艺, 本研究在悬臂梁制备工艺上进行了简化。图 2 为制备力敏悬臂梁的示意图。实验中采用单抛  $450\mu\text{m}$  厚 p 型硅片作为衬底材料, 硅片常规清洗后, 在  $1050^\circ\text{C}$  下生长  $300\text{nm}$  厚的湿氧热氧化层, 用于密封力敏电阻的底层。然后, 在硅烷流量为  $30\text{sccm}$ , 反应室压强  $30\text{Pa}$ ,  $610^\circ\text{C}$  条件下, 低压化学气相沉积(LPCVD)厚度为  $200\text{nm}$  的多晶硅作为力敏电阻层。硅片正面硼离子注入, 综合噪声和灵敏度的因素, 选择  $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$  的硼离子注入浓度对多晶硅进行掺杂, 注入能量为  $30\text{keV}$ 。采用掩膜板 1 进行力敏电阻的图形转换,  $\text{SF}_6$  反应离子刻蚀(RIE)力敏电阻, 刻蚀功率  $100\text{W}$ ,  $\text{SF}_6$  流量为  $30\text{sccm}$ ,  $\text{He}$  流量  $20\text{sccm}$ 。

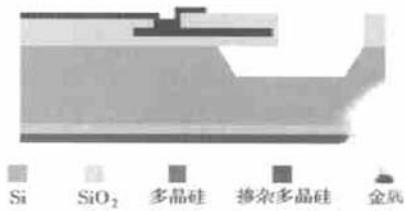


图 2 制备多晶硅压阻悬臂梁示意图

Fig. 2 Fabrication schematic diagram of piezoresistive cantilever

为完全密封力敏电阻, 将  $570\text{nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$  用 LPCVD 法淀积在硅片表面, 然后在  $\text{N}_2$  气氛中  $1050^\circ\text{C}$  条件下退火  $20\text{min}$ 。采用掩膜板 2 开接触孔, 同时定义微槽。氧化硅的刻蚀采用 RIE 干法刻蚀和

BHF 湿法腐蚀技术来完成。电子束沉积  $40/400\text{nm}$   $\text{Cr}/\text{Au}$  金属膜,  $\text{Cr}$  用来使金较好地附着在氧化硅表面, 采用金而不是铝是因为金可以抵抗 KOH 的湿法腐蚀。完成金属线的成形后, 在 KOH 腐蚀硅释放悬臂梁前划片, 以保证划片过程中不损坏悬臂梁。KOH 腐蚀硅释放悬臂梁, 此时腐蚀速率约为  $1.1\mu\text{m}/\text{min}$ , 腐蚀后的槽深  $65\mu\text{m}$ 。实验中发现, 在释放悬臂梁后, 悬臂梁由于  $\text{SiO}_2$  和多晶硅本征应力的作用而产生弯曲, 图 3 是完成后的多晶硅悬臂梁扫描电子显微镜的照片。由于 KOH 对  $\text{SiO}_2$  选择性较差, 在释放悬臂梁的过程中, 梁表面和背面的  $\text{SiO}_2$  层将被部分腐蚀掉, 根据  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  的选择比, 估算悬臂梁的厚度为  $500\text{nm}$ 。

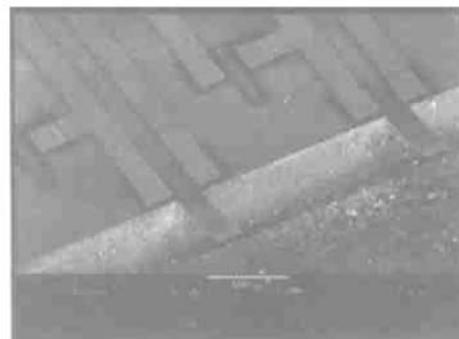


图 3 多晶硅悬臂梁的电子显微镜照片 悬臂梁的外形尺寸为  $100\mu\text{m} \times 40\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ , 力敏电阻的几何尺寸为  $30\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 。

Fig. 3 A SEM micrograph of a polysilicon piezoresistive cantilever. The cantilever size is  $100\mu\text{m} \times 40\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ , the piezoresistor dimension is  $30\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ .

室温、大气条件下, 采用 4396A 型 HP 谱分析仪测量力敏电阻的噪声, SR560 型低噪声信号放大器放大输出信号, 谱分析仪信号通过计算机记录并分析。为减小外界噪声的干扰, 采用金属箱屏蔽被测试器件和测量仪器, 测量带宽选择  $2\text{Hz} \sim 1000\text{Hz}$  和  $1000\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 。悬臂梁灵敏度测量是通过微探针施力于悬臂梁进行的, 螺旋尺控制探针垂直位移的大小, 力敏电阻的变化通过高灵敏度三用表读出, 测试系统的测量精度为  $5\mu\text{m}$ 。

### 4 结果和讨论

图 4 给出三种尺寸多晶硅力敏电阻噪声测量结果, 此时测量偏压为  $6\text{V}$ 。分析此图我们可以得出以

下几点重要结论: 低频下, 方程(2)给出的  $1/f$  噪声起主要作用, 拟合低频噪声曲线并计算拟合直线的斜率为 -0.5, 即低频下的噪声是  $1/f$  噪声。随着频率的增加,  $1/f$  噪声逐渐减小, 测量拐点频率 (Johnson 噪声与  $1/f$  噪声的交接频率) 为 10kHz。拐点频率以外, 仅观察到与频率无关的 Johnson 噪声, 且 Johnson 噪声能级的测量值与理论计算值基本一致, 为  $9 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 。计算相同频率下三种力敏电阻的  $1/f$  噪声, 结果证明力敏电阻的  $1/f$  噪声反比于力敏电阻的表面积。由  $1/f$  噪声测量结果、力敏电阻的几何参数以及掺杂浓度, 计算 LPCVD 多晶硅力敏电阻的 Hooge 因子  $\alpha$  为 0.003。相比单晶硅材料<sup>[14]</sup>, 多晶硅力敏电阻的 Hooge 因子较高, 多晶硅材料内的高  $1/f$  噪声源于材料内缺陷引起的晶格散射。

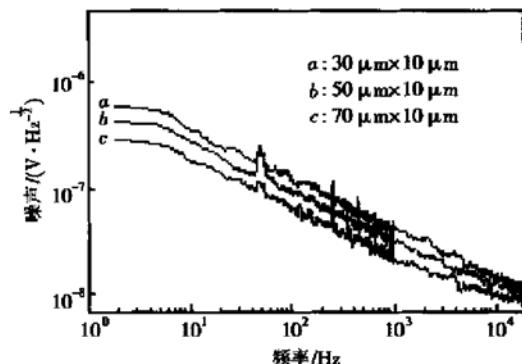


图 4 三种尺寸多晶硅力敏电阻噪声测量结果 力敏电阻几何尺寸分别为  $30\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ,  $70\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ; 掺杂浓度为  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。

Fig. 4 Noise measurement spectra of three polysilicon piezoresistors. The piezoresistor sizes are  $30\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ,  $70\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  respectively. The doping concentration is  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .

图 5 给出两种尺寸悬臂梁电阻随悬臂梁末端垂直接位移对比测量结果, 此时两种悬臂梁力敏电阻尺寸均为  $50\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 。显然力敏电阻相对变化随悬臂梁端点垂直接位移量增加线性增大, 分别拟合两组测量点, 得到两种悬臂梁的测量灵敏度, 分别为  $3.6 \times 10^{-7} \text{ nm}^{-1}$  和  $2.4 \times 10^{-7} \text{ nm}^{-1}$ , 短悬臂梁的灵敏度约为长悬臂梁的 1.5 倍。将灵敏度计算结果及悬臂梁的几何参数代入公式(4), 计算的压阻悬臂梁应变灵敏度系数  $K$  平均值为 26。比较相同尺寸悬臂梁在力敏电阻尺寸不同情况下的灵敏度测量结果发现, 力敏电阻最小的悬臂梁灵敏度最高, 力敏电阻尺

寸为  $50\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  的悬臂梁灵敏度略高于  $70\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  的悬臂梁, 这一结果与理论分析的趋势一致, 但测量结果并不完全与理论吻合, 这是由于悬臂梁在材料本征应力的作用下产生弯曲, 使测量产生误差。

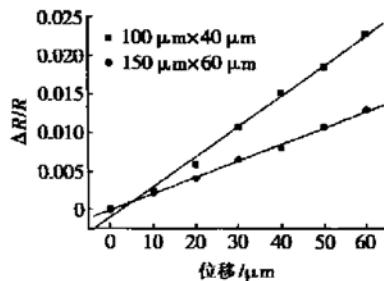


图 5 一组悬臂梁电阻的相对变化随悬臂梁末端垂直接位移的变化关系

Fig. 5 Comparison of relative resistance change for two cantilevers vs cantilever deflections

将计算的 Hooge 因子和应变灵敏度系数代入 MDD 计算公式, 计算在 6V 偏压, 1000Hz 测量带宽下, 悬臂梁的 MDD 为 1nm。计算中, 悬臂梁和力敏电阻的几何尺寸为  $l = 150\mu\text{m}$ ,  $L = 50\mu\text{m}$ ,  $t = 0.5\mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。与单晶硅悬臂梁的 MDD 相比, 多晶硅悬臂梁的 MDD 较大<sup>[15]</sup>, 但其分辨率也达到纳米量级。

## 5 结论

以多晶硅为力敏电阻材料, 设计并制备了几何尺寸为  $100\mu\text{m} \times 40\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$  和  $150\mu\text{m} \times 60\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$  的压阻悬臂梁。采用全对称 Wheatstone 电桥, 两个悬臂梁的差分信号可减小测试系统噪声和悬臂梁热机械震动噪声的干扰。三个掩膜板用于本工艺流程, 用 RIE 进行力敏图形转换, KOH 腐蚀硅释放悬臂梁。测量悬臂梁的噪声和灵敏度得到:  $1/f$  噪声是多晶硅力敏悬臂梁的主要噪声源, 多晶硅力敏悬臂梁的 Hooge 因子和应变灵敏度系数分别为 0.003 和 26。在 6V 偏压、1000Hz 测量带宽下, 多晶硅矩形悬臂梁的最小可探测位移为 1nm。

## 参考文献

- [1] Fritz J, Baller M K, Lang H P, et al. Translating biomolecular recognition into nanomechanics. Science, 2000, 288(5464): 316

- [ 2 ] Porter T L, Eastman M P, Pace D L, et al. Sensor based on piezoresistive microcantilever technology. *Sensors and Actuators A*, 2001, 88: 47
- [ 3 ] Battiston F M, Ramseyer J P, Lang H P, et al. A chemical sensor based on a microfabricated cantilever array with simultaneous resonance frequency and bending readout. *Sensors and Actuators B*, 2001, 77: 122
- [ 4 ] Maute M, Raible S, Prins F E, et al. Fabrication and application of polymer coated cantilever as gas sensors. *Microelectronic Engineering*, 1999, 46: 439
- [ 5 ] Baller M K, Lang H P, et al. A cantilever array-based artificial nose. *Ultramicroscopy*, 2000, 82: 1
- [ 6 ] Harley J A, Kenny T W. Design and process optimization of piezoresistive cantilevers. *IEEE Microelectromechanical Systems*, 2000, 9: 226
- [ 7 ] Gotszalk T, Grabiec P, et al. Piezoresistive sensors for scanning probe microscopy. *Ultramicroscopy*, 2000, 82: 39
- [ 8 ] Moulin A M, O' Shea S J, Welland M E. Microcantilever-based biosensor. *Ultramicroscopy*, 2000, 82: 23
- [ 9 ] Hooge F N. *Phys Lett A*, 1969, 29: 139
- [ 10 ] Chen Y, Salm C, Hooge F N, et al.  $1/f$  noise in polycrystalline SiGe analyzed in term of mobility fluctuations. *Solid-State Electron*, 1999, 43: 1715
- [ 11 ] Hansen O, Boisen A. Noise in piezoresistive atomic force microscopy. *Nanotechnology*, 1999, 10: 51
- [ 12 ] Yu Xiaomei, Jiang Xingliu, Thayesen J, et al.  $1/f$  noise in silicon-based piezoresistive microsensor. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(9): 1182(in Chinese) [ 于晓梅, 江兴流, Thayesen J, 等. 硅压阻输出微传感器的  $1/f$  噪声. 半导体学报, 2001, 22(9): 1182]
- [ 13 ] Yu Xiaomei, Thayesen J, Hansen O, et al. Optimization of sensitivity and noise in piezoresistive cantilever. *Appl Phys*, 2002, 92: 6296

## Fabrication and Analysis of Micromachined Cantilever Array<sup>\*</sup>

Yu Xiaomei, Zhang Dacheng, Li Ting, Wang Xiaobao, Ruan Yong and Du Xianfeng

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Six groups of piezoresistive cantilever with different sizes are designed on a chip. The stress of rectangle cantilever is simulated with a common FEA simulator ANSYS<sup>TM</sup>. The noise, the signal, and the minimum detectable deflection (MDD) of piezoresistive cantilever are studied. Based on the silicon micromachining technology, the piezoresistive cantilever is fabricated with polysilicon as the piezoresistive material. With the measurement results of noises and sensitivities, the MDD of piezoresistive cantilever is calculated to be 1nm at a 6V bias voltage and a 1000Hz measurement bandwidth.

**Key words:** cantilever; noise; sensitivity; minimum detectable deflection

**PACC:** 0710C; 7270; 7220F

**Article ID:** 0253-4177(2003)08-0861-05

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 90207013), Foundation of the Chinese Ministry of Education for Returned Scholars, and Postdoctoral Foundation