

U 形阵列式微机械悬臂梁的研究*

于晓梅 张大成 王丛舜 李 婷 阮 勇

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

(2003 年 1 月 21 日收到, 2003 年 4 月 9 日收到修改稿)

为提高悬臂梁的分辨率, 实现悬臂梁的多功能性, 设计了一种 U 形阵列式压阻悬臂梁. 从理论上对悬臂梁的应力、噪声和灵敏度进行分析, 优化了悬臂梁及力敏电阻的几何尺寸. 选用多晶硅为力敏材料, 基于硅微机械加工技术, 制备 U 形阵列式悬臂梁. 测量悬臂梁的噪声及灵敏度, 得到多晶硅力敏材料的 Hooge 因子和应变灵敏度系数, 分别为 3×10^{-3} 和 27. 在 6V 偏压和 1000Hz 测量带宽条件下, 计算悬臂梁的最小可探测位移为 0.5nm. 同时对多晶硅力敏电阻噪声的产生机理进行了探讨.

关键词: 悬臂梁, 噪声, 灵敏度, 最小可探测位移

PACC: 0710C, 7270, 7220F

1. 引 言

扫描力显微镜 (SFM) 是众所周知的高灵敏度检测仪器. 它的工作原理是将探针固定在一个对微弱力非常敏感的微悬臂梁上, 并使探针与待测样品表面原子间存在力的相互作用, 作用在探针与样品间的力使悬臂梁发生形变, 悬臂梁形变情况可通过光学或电学的方法检测得出. 由于其独特的结构及极小的几何尺寸, 悬臂梁对微弱力的变化非常敏感, 因此可以高分辨率成像材料表面形貌. 微机械悬臂梁除应用于各种力显微镜外, 目前世界上一些研究机构在尝试着进行微悬臂梁式生物、化学传感器的研究. 微悬臂梁生化传感器通过在悬臂梁的一个表面固定特殊的生化敏感层, 被测物质经扩散进入生化敏感层, 在悬臂梁表面发生物理吸附或化学反应并产生机械响应. 微悬臂梁纳米量级的机械响应包括表面应力变化、热转换、质量变化等. 微悬臂梁可探测小到 10^{-5} N/m 的表面应力和皮克的质量变化, 尤其适用于探测微量、痕量生化分子. 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.

悬臂梁生化传感器研究工作开展最出色的是 IBM 苏黎世实验室, 该实验室的 Fritz 等人^[1]2000 年

发表在“Science”上的一篇文章引起生化传感器研究者的震动, 他们利用阵列式光学悬臂梁成功地检测出微量 16 链、12 链低核苷酸分子, 同时还对不同动物进行了免疫球蛋白测定. 英国剑桥大学的纳米科技组研制出用于检测低密度脂蛋白和脱氧低密度脂蛋白悬臂梁传感器, 此技术可用于早期动脉硬化的诊断^[2]. 德国 Tübingen 大学 Maute 小组^[3], IBM 苏黎世实验室的 Lang 等人^[4,5]致力于微悬臂梁气体传感器的研究, 实现了多种惰性气体、有机气体、芳香剂的微量检测. 丹麦技术大学微电子中心的生物探针组^[6], Stanford 大学^[7,8], Gotszalk 小组^[9], Harley 小组^[10]开展了压阻悬臂梁的研究, 并在原子力显微镜以及传感器的应用领域取得了一些研究成果.

悬臂梁表面应力的变化使悬臂梁产生弯曲, 悬臂梁的微小弯曲通常由光学或电学方法来记录, 光学的读数方法可获得小至 0.001nm 的垂直分辨率^[4,5]. 光学的检测方法虽然具有较高的灵敏度, 但庞大光学测量系统及激光的精密校准限制了其广泛的应用, 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、压电或压阻元件于悬臂梁中的电学读出方法, 基于电学检测技术的悬臂梁更易于操作, 易于转向实用化.

提高悬臂梁的测量灵敏度, 开展悬臂梁传感器

* 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的课题.

的应用研究是目前世界上微机电系统(MEMS)研究的一个热点.本工作采用集聚力敏电阻于悬臂梁中的电学在位读出方法,研制U形阵列式悬臂梁.研究首先采用ANSYS有限元分析系统对U形微悬臂梁进行应力、压力及其与特性参数间关系进行分析,完成了阵列式压阻悬臂梁的设计.采用多晶硅为力敏材料以及硅微机械加工技术制备微压阻悬臂梁.通过对压阻悬臂梁进行噪声和灵敏度的测量,给出悬臂梁的最小可探测位移.通过在悬臂梁表面固定化不同的生物、化学敏感层,该阵列式微悬臂梁传感器可高灵敏度、多功能地识别微量生物、化学分子.

2. 理论分析

传统的悬臂梁多设计成矩形,为了提高悬臂梁的测量灵敏度,本研究设计了一种U形阵列式悬臂梁,U形的梁通过两个臂连于固支点.悬臂梁的外形尺寸分别为 $150\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 和 $180\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$.从减小力敏电阻的电子噪声考虑,对应力敏电阻的长度分别设计为 $50\mu\text{m}$ 和 $70\mu\text{m}$ ^[11].U形力敏电阻设计位于U形悬臂梁两个臂上.四个相同的力敏电阻组成对称Wheatstone电桥,其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部分平衡掉.

2.1. 力敏电阻的噪声

在硅力敏悬臂梁传感器中,需要重点考虑两种噪声源——Johnson噪声和 $1/f$ 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

$$S_{V_j} = 4k_B TR\Delta f, \quad (1)$$

其中 k_B 是 Boltzmann 常数, T 为温度, Δf 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^[12]

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

其中 S_{VH} 为相应于电压起伏的 $1/f$ 噪声功率密度, V_{bias} 为加于电阻 R 上的偏压, f 为频率, N 为总的自由载流子数. α 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,因此是一个判断材料 $1/f$ 噪声大小的重要参数,通常介于 10^{-7} 到 10^{-3} 之间^[13].

2.2. 悬臂梁的灵敏度

采用ANSYS有限元分析系统对U形悬臂梁进行应力分析,模拟结果如图1.模拟过程中,不考虑材料的本征应力,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.由模拟结果看出,当力 F 作用在悬臂梁末端时,最大应力发生在U形悬臂梁的两个臂上,且应力在臂上分布均匀,因此设计悬臂梁力敏电阻的长度与U形梁臂的长度相同.从理论上推出此时悬臂梁臂上的纵向应力 σ 与悬臂梁端点的力 F 及垂直位移 Δz 的关系为

$$\sigma = \frac{9F(l_1 + l_2/2)}{wt^2} = \frac{9E(l_1 + l_2/2)t}{12l^3 - 8l_1^3} \Delta z, \quad (3)$$

其中 l 为悬臂梁的长度, l_1 为悬臂梁端点到U形臂末端的距离, l_2 为U形臂的长度, w 为悬臂梁的宽度, t 为悬臂梁的厚度, E 为杨氏模量.

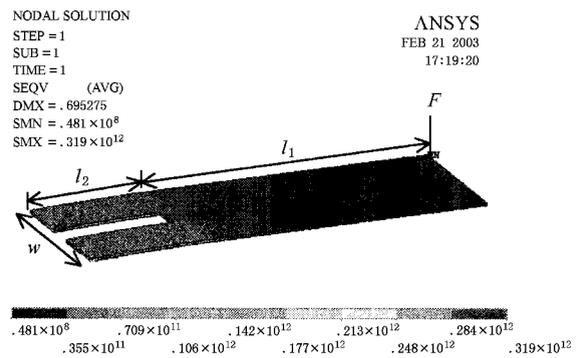


图1 ANSYS模拟U形悬臂梁的应力分析结果,标尺上标记的应力从左至右逐渐增大

如果仅考虑纵向应力,根据硅的压阻效应,在力 F 的作用下,力敏电阻的相对变化率 $\Delta R/R$ 可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma\pi, \quad (4)$$

其中 π 为材料的纵向压阻系数。

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,它是衡量悬臂梁特性的一个重要参数.将应力的分析结果代入(4)式,则可得测量灵敏度

$$\frac{\Delta R}{R} \Delta z^{-1} = \frac{9E\pi(l_1 + l_2/2)t}{12l^3 - 8l_1^3} = \frac{9K(l_1 + l_2/2)t}{12l^3 - 8l_1^3}, \quad (5)$$

式中 $K = E\pi$ 为应变灵敏度系数,是衡量材料压阻效应的参数。

悬臂梁的分辨率通常由悬臂梁的最小可探测位移(MDD)来标志,力敏悬臂梁的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,它不仅取决于悬臂梁的探测灵敏度,同时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 $S/N = 1:1$),并将测量灵敏度的结果代入Wheatston电桥的计算公式,并认为只有一个测量电阻产生应变,在偏压 V_{bias} 的作用下,悬臂梁的MDD即可表示为

$$\text{MDD} = \frac{16(3l^3 - 2l_1^3)}{9K(l_1 + l_2/2)tV_{bias}} \left[\frac{\alpha V_{bias}^2}{N} \ln \frac{f_{max}}{f_{min}} + 4k_B TR(f_{max} - f_{min}) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

式中括弧中的第一项对应着 $1/f$ 噪声,第二项对应着Johnson噪声($f_{max} - f_{min}$)为测量带宽。

3. 实 验

压阻悬臂梁的制备基于硅微机械加工技术,相比其他的制备工艺进行了一些简化,工艺流程仅采用三个掩膜板(力敏电阻掩膜板,悬臂梁及接触孔掩膜板,金属掩膜板).实验中采用单面抛光p型硅片作为衬底材料,硅片常规清洗后,在1050℃下生长300nm厚的热氧化层,用于密封力敏电阻的底层.然后,在硅烷流量为30sccm、反应室压强30Pa、610℃条件下,低压化学汽相淀积(LPCVD)190nm厚的多晶硅作为力敏电阻层.硅片正面硼离子注入,为了获得最大的信号噪声比,选择 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的离子注入浓度对多晶硅进行掺杂^[14,15],注入能量30keV.采用掩膜板1进行力敏电阻的图形转换,SF₆反应离子刻蚀(RIE)多晶硅,刻蚀功率100W,SF₆流量为30sccm,He流量为20sccm.

为完全密封力敏电阻,在硅片表面LPCVD 570nm的氧化层,然后在N₂气氛中、1050℃下退火

20 min.采用掩模板2开接触孔,同时定义微槽和悬臂梁.氧化硅刻蚀采用RIE干法刻蚀和BHF湿法腐蚀技术结合完成.电子束沉积40/400nm Cr/Au金属膜,选择金作为引线是因为金可以抵抗较长时间KOH的腐蚀.KOH腐蚀硅,释放悬臂梁,此时腐蚀速率约为1.1 μm/min,腐蚀后的槽深65 μm.实验中发现选择SiO₂作为力敏电阻的保护层,在释放悬臂梁后,悬臂梁由于SiO₂层的本征应力而产生弯曲.同时由于KOH对SiO₂的选择性较低,在完成梁的释放后,梁的剩余厚度约为0.5 μm.图2是完成后的多晶硅阵列式压阻悬臂梁的显微照片。



图2 U形阵列式悬臂梁的扫描电子显微镜(SEM)照片

采用4396A型HP频谱仪测量力敏电阻的噪声,力敏电阻的噪声电压信号在纳伏量级,所以采用SR560型低噪声信号放大器放大信号100或1000倍后,再将信号输入频谱分析仪,频谱仪信号通过计算机记录、分析.为减小外界噪声的干扰,采用金属屏蔽箱屏蔽被测器件和测量仪器,测量带宽选择2Hz—1000Hz和1000Hz—20kHz.悬臂梁的灵敏度的测量通过微探针施力于悬臂梁末端,螺旋测微器控制探针垂直位移的大小并读出悬臂梁的垂直位移量,测试系统的测量精度为5 μm.力敏电阻的变化通过高灵敏度数字式三用表读出。

4. 结果和讨论

测量几何尺寸为50 μm × 10 μm的力敏电阻在不同偏压下的噪声,结果如图3.首先检验高频下的Johnson噪声,根据(1)式计算该悬臂梁的理论Johnson噪声为 $7.4 \times 10^{-9} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$,实际测量零偏压时的Johnson噪声为 $8.2 \times 10^{-9} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$.随电压的增加,Johnson噪声略有提高,我们认为这是由于在一定偏

压下力敏电阻温度升高所致. 测量不同偏压下低频噪声曲线的斜率为 -0.5 , 证明低频下多晶硅力敏电阻的噪声为 $1/f$ 噪声. 计算噪声 $(S_{VH}f)^2$ 和拐点频率 (Johnson 噪声与 $1/f$ 噪声的交接频率) 随偏压的变化关系, 结果如图 4 和图 5. 由图 4 拟合直线看 $(S_{VH}f)^2$ 与 V 具有很好的线性关系, 由该直线斜率和 $1/f$ 噪声公式计算出多晶硅悬臂梁的 Hooge 因子 α 为 3×10^{-3} , 计算中总的自由载流子数 $N = 4pLW$, 式中 p 为离子注入浓度, L, W 分别为力敏电阻的长度和宽度. 由图 5 拟合的结果计算噪声的拐点频率正比于偏压的平方, 在 $3V$ 的偏压下拐点频率约为 $10kHz$. 多晶硅力敏电阻的 Hooge 因子和拐点频率较高, 说明多晶硅材料具有较高的噪声.

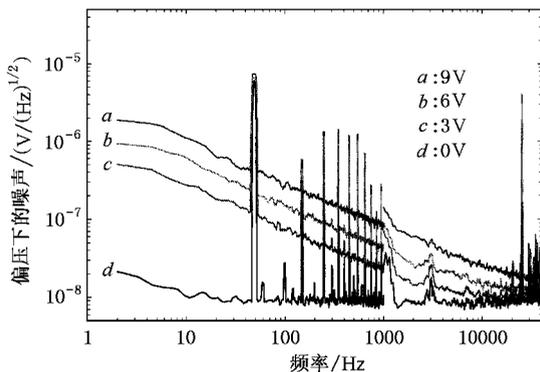


图 3 几何尺寸为 $50mm \times 10mm$ 的力敏电阻在不同偏压下的噪声测量结果

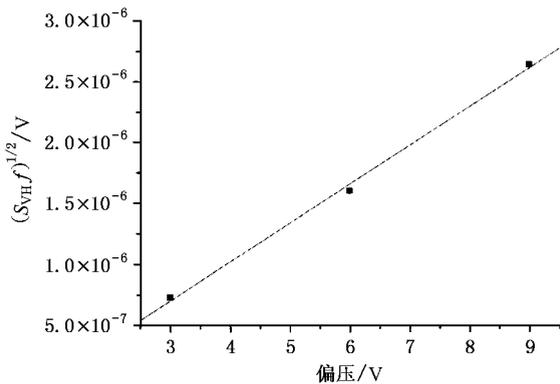


图 4 根据图 3 的噪声谱, 计算力敏电阻的 $(S_{VH}f)^2$ 随偏压的变化关系

$1/f$ 噪声源于材料的晶格散射, 在 LPCVD 硅材料中, 晶格散射源于大量晶粒的存在. 晶粒与晶粒间的界面是引起 $1/f$ 噪声的原因之一, 晶粒的界面有许多悬挂键形成无序的原子和缺陷, 从而像陷阱一

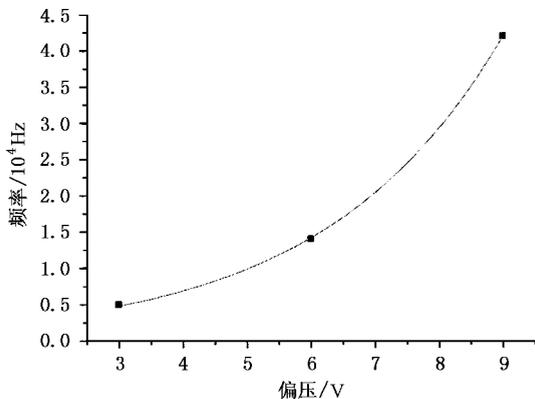


图 5 根据图 3 的噪声谱, 计算力敏电阻的拐点频率随偏压的变化关系

样俘获离化的粒子, 形成势垒, 使材料的 $1/f$ 噪声增大^[16, 17]. 源于晶粒本身的散射包括晶粒中性区的散射和耗尽区的散射. 晶粒中性区即为单晶硅区, 电导率很高, 不会产生很高的 $1/f$ 噪声, 因此散射应发生在晶粒的耗尽区. 晶粒的边界形状同样决定着 $1/f$ 噪声的大小^[18], Hooge 指出: $1/f$ 噪声取决于总的有效自由载流子数, 总的有效自由载流子数由 $N_{eff} = a^3 n$ 决定, 其中 a 为晶粒的半径, n 为载流子浓度, 显然接触面积决定了 N_{eff} 的大小, 小曲率半径的晶粒会引起大的 $1/f$ 噪声, 这就是所谓的接触噪声^[18].

图 6 给出了两个 U 形悬臂梁及一个矩形悬臂梁的灵敏度对比测量结果. 三种悬臂梁的外形尺寸均为 $150\mu m \times 50\mu m$, 力敏电阻的几何尺寸在图中给出. 三种悬臂梁的输出信号与悬臂梁末端的垂直位移均具有很好的线性关系, 分别拟合图 6 的三组测量数据, 得到三种悬臂梁的灵敏度, 分别为 $4.8 \times 10^{-7} 1/nm$; $4.5 \times 10^{-7} 1/nm$; $2.4 \times 10^{-7} 1/nm$. U 形悬臂梁的灵敏度几乎是矩形悬臂梁的二倍. 将悬臂梁灵敏度的计算结果和悬臂梁几何参数代入(6)式, 计算出悬臂梁的应变灵敏度系数 K 为 27.

将 Hooger 因子的计算结果和应变灵敏度系数的计算结果以及悬臂梁的几何尺寸代入最小可探测位移的计算公式, 计算出 U 形悬臂梁的 MDD 为 $0.5nm$, 在计算中测量带宽选择 $1kHz$, 测量偏压为 $6V$. 相比他人的计算, 本文在计算悬臂梁的 MDD 时, 即考虑了 Johnson 噪声, 又考虑了 $1/f$ 噪声的影响. 事实上 $1/f$ 噪声是低频条件下力敏电阻的主要噪声源, 对 MDD 的计算结果影响非常显著, 尤其是在小测量带宽、高测量偏压条件下. 高的操作电压可提高悬臂梁的测量灵敏度, 但并不提高悬臂梁的分

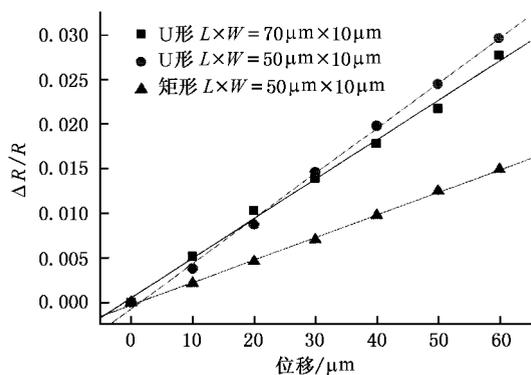


图 6 两个 U 形悬臂梁及一个矩形悬臂梁的灵敏度对比测量结果,三个悬臂梁的外形尺寸完全一致,力敏电阻尺寸在图中给出

分辨率.在低频条件下($< 10\text{kHz}$), $1/f$ 噪声起主要作用时,可忽略(7)式中的 Johnson 噪声,则 MDD 是一个与偏压无关参数.只有在大测量带宽条件下(Johnson 噪声起主要作用),MDD 随偏压的增加线性减小.

5. 结 论

以多晶硅为力敏电阻层,设计并制备了几何尺寸为 $150\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ 和 $180\mu\text{m} \times 60\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ 的 U 形阵列式悬臂梁.三个掩模板用于本工艺流程,选择 $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 浓度的硼对多晶硅力敏电阻进行离子注入,采用 RIE 进行力敏电阻图形的转换,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 因子为 3×10^{-3} .测量悬臂梁力敏电阻的相对变化和悬臂梁的垂直位移,计算多晶硅力敏电阻的应变灵敏度系数 K 为 27.在 6V 偏压、1000Hz 测量带宽下,悬臂梁的最小可探测位移为 0.5 nm.虽然单晶硅是首选的制备压阻悬臂梁的材料,但选择 LPCVD 多晶硅作为力敏材料制备悬臂梁同样可获得纳米级的分辨率,同时多晶硅具有明显的廉价性和易于集成性.

[1] Fritz J, Baller M K, Lang H P and Rothuizen H 2000 *Science* **288** 316
 [2] Moulin A M, O'Shea S J and Welland M E 2000 *Ultramicroscopy* **82** 23
 [3] Maute M, Raible S *et al* 1999 *Sensors and Actuators B* **58** 505
 [4] Lang H P, Baller M K *et al* 1999 *Analytica Chimica Acta* **393** 59
 [5] Battiston F M, Ramseyer J P, Lang H P *et al* 2001 *Sensors and Actuators B* **77** 122
 [6] Boisen A, Thaysen J, Jensenius H and Hansen O 2000 *Ultramicroscopy* **82** 11
 [7] Tortonesi M *et al* 1991 *The processing of Transducers* 91 *IEEE publication* **91** CH2817-5 448
 [8] Chui B W, Stowe T D, Ju Y S 1996 *Solid-State Sensor and Actuator Workshop* 219

[9] Gotszalk T, Piot Grabiec, Ivo W Rangelow 2000 *Ultramicroscopy* **82** 39
 [10] Harley J A, Kenny T W 2000 *IEEE J. Microelectromechanical Systems* **9** 226
 [11] Hansen O, Boisen A 1999 *Nanotechnology* **10** 51
 [12] Hooge F N 1969 *Phys Lett A* **29** 139
 [13] Chen X Y 1999 *Solid-State Electronics* **43** 1715
 [14] Yu X M *et al* 2002 *J. Applied Physics* **92** 6296
 [15] Yu Xiao-Mei, Jiang Xing-Liu 2001 *Chin. Phys.* **10** 918
 [16] Vandamme L K J *et al* 1986 *J. Appl Phys.* **59** 3169
 [17] Ijubisa Ristic, *Sensor Technology and devices*, Artech House Boston London
 [18] Hooge F N 2000 *1/f noise in semiconductor sensors*, 2nd Eurosensor school text book

A study of U-shaped micromachined cantilever array^{*}

Yu Xiao-Mei Zhang Da-Cheng Wang Cong-Shun Li Ting Ruan Yong

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

(Received 21 January 2003 ; revised manuscript received 9 April 2003)

Abstract

In order to increase the resolution and realize the versatility of cantilever , U-shaped piezoresistive cantilever array has been designed and fabricated in this research. The optimized geometries of cantilever and piezoresistor were determined by analyzing the stress , noise and sensitivity of piezoresistive cantilever from theory. Based on silicon micromachining technology , the piezoresistive cantilevers were fabricated by using polysilicon as the piezoresistive materials. With the measurement results of noise and sensitivity , the Hooge factor was calculated to be 3×10^{-3} , the gauge factor is 27 , and the minimum detectable deflection of piezoresistive cantilever was calculated to be 0.5nm at a 6V bias voltage and a 1000Hz measurement bandwidth. The noise sources of polysilicon piezoresistor are also discussed in this paper.

Keywords : cantilever , noise , sensitivity , minimum detectable deflection

PACC : 0710C , 7270 , 7220F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 90207013) and SRF for ROCS , SEM.