

基于侧壁压阻式的位移传感器研制及应用*

孙立宁¹ 王家畴^{1,2,†} 荣伟彬¹ 李欣昕²

(1 哈尔滨工业大学先进机器人与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点联合实验室, 上海 200050)

摘要: 为了提高面内运动位移检测的灵敏度和改善侧壁压阻工艺与其他工艺间的兼容性问题, 研究了一种可用于面内运动位移检测的传感器, 提出了利用离子注入工艺和深度反应离子刻蚀(DRIE)工艺相结合制作检测梁侧壁压阻的方法. 侧壁压阻式位移传感器的灵敏度比在检测梁表面制作压阻的传统位移传感器高近一倍. 同时把位移传感器集成到基于体硅工艺的纳米级定位平台上, 实验测试表明, 这种位移传感器加工技术可以很容易地与其他工艺相兼容, 位移传感器的灵敏度优于 $0.903\text{mV}/\mu\text{m}$, 线性度优于 0.814% , 分辨率优于 12.3nm .

关键词: 微机电系统; 侧壁压阻; 定位平台; 反应离子刻蚀; 位移传感器

PACC: 0670D; 2940T; 2940P

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)08-1589-06

1 引言

近年来, 随着微/纳操作技术的不断发展, 研究对象的越来越小型化, 操作过程中对定位平台的小型化和定位精度提出了更高的要求^[1]. 对于体硅工艺的定位平台, 为了进一步提高它的定位精度, 闭环控制是一项很好的选择, 它要求定位平台具有位移检测功能. 目前, 大多数基于硅工艺的定位平台多采用开环控制方式, 部分用于数据存储的定位平台采用电容检测方式实现闭环控制^[2], 还有就是依靠外加光学检测装置实现位移检测^[3]. 基于压阻原理的传感器由于其结构简单、信号稳定、后续处理方便等优点在位移检测和加速度检测方面得到广泛的应用. 但是定位平台属于面内运动, 因此, 为了提高位移检测的灵敏度最好把压阻制作在检测梁的侧壁. Kenny 等人^[4]通过倾斜离子注入在刻蚀侧壁制作压敏电阻, 为了简化工艺, Li 等人^[5]提出了在普通硅片的悬臂梁表面制作压阻的方法.

本文研制了一种基于面内侧壁压阻式的位移传感器, 并成功地将该位移传感器集成在硅工艺的纳米级定位平台上. 该传感器主要采用离子注入工艺结合反应离子刻蚀(DRIE)技术制作检测梁的侧壁压阻. 这种侧壁压阻制作技术兼容性强, 可以方便地和其他器件集成在一起. 实验结果表明作者研制的位移传感器灵敏度优于 $0.903\text{mV}/\mu\text{m}$, 分辨率优于 12.3nm .

2 基本结构

图 1 是位移传感器的结构及定位平台运动模式示意图. 图 1(a)中, 沿 $\langle 110 \rangle$ 晶向的两个弹性检测梁和与

该晶向垂直方向上的两个弹性检测梁分别组成两对位移传感器的弹性检测元件, 利用体硅工艺把压敏电阻分别制作在检测梁的外侧壁表面, 当检测梁沿 $\langle 110 \rangle$ 晶向变形时, 压敏电阻 R_{x1} 和 R_{x2} 受到压应力, 阻值变小, R_{x3} 和 R_{x4} 受到拉应力, 阻值增大, 从而组成惠斯通全桥检测电路. 图 1(b)是位移传感器集成到定位平台上的 3D 结构示意图, 定位平台采用侧向平动梳齿静电驱动结构. 图 1(c)是定位平台在静电力作用下沿 x 方向的运动示意图. 图 1(d)是定位平台在 x 和 y 方向静电力作用下分别沿 x 和 y 方向同时运动示意图.

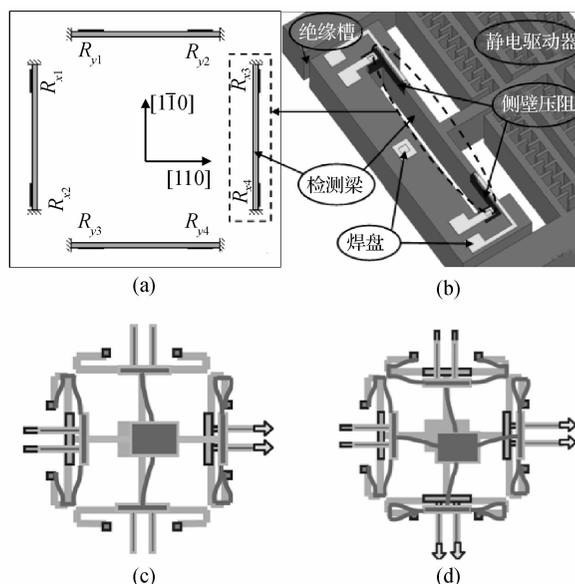


图 1 位移传感器及定位平台运动模式示意图

Fig. 1 Sketch of displacement sensor and driving mechanism of micro xy-stage

* 国家杰出青年基金(批准号:50725518), 国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA04Z315), 长江学者和创新团队发展计划资助项目

† 通信作者. Email: jiatao_wang@163.com

2008-03-24 收到, 2008-04-08 定稿

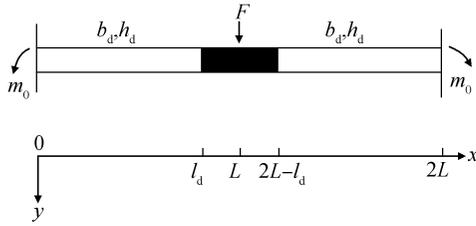


图2 检测梁结构示意图
Fig.2 Sketch of detecting beam

位移传感器弹性检测梁为两端固支结构,图2为其力学分析示意图。

由材料力学分析方法求得检测梁在外部载荷 F 作用下梁的应变变量 $w(x)$:

$$w(x) = \frac{F}{Eh_d b_d^3} x^2 \left(\frac{3}{2} l_d - x \right) \quad (1)$$

式中 l_d 为检测梁的长度; b_d 为检测梁的宽度; h_d 为检测梁的厚度; E 为硅的杨氏模量。

距离检测梁弯曲中心平面 b' 处的应力可以用公式(2)表示,图3为相应的应力曲线分布图。

$$T(x) = Eb'w''(x) = \frac{6Fb'}{h_d b_d^3} \left(\frac{1}{2} l_d - x \right) \quad (2)$$

压敏电阻条的灵敏度为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\int_0^{l_p} \frac{\pi_{44}}{2} T(x) dx}{l_p} = \frac{3\pi_{44} F b' (l_d - l_p)}{2 h_d b_d^3} \quad (3)$$

式中 π_{44} 为压阻系数; l_p 为压敏电阻部分的长度。

从图3可知,最大应力分别位于检测梁的两端。根据(2)式可得压敏压阻的最大应力为:

$$T_{\max} |_{x=0} = Eb'w''(0) = \frac{3Fl_d b'}{h_d b_d^3} \quad (4)$$

检测梁的结构灵敏度为:

$$S_d = \frac{T_{\max}}{F} = \frac{3l_d b'}{h_d b_d^3} \quad (5)$$

3 传感器关键性能分析

3.1 传感器的输出

由于压敏电阻和检测梁的长度方向都是沿 $\langle 110 \rangle$ 晶向,同时,对于采用新工艺加工的侧壁压敏电阻,可以取极限值 $b' = b_d/2$,此时,位移传感器的输出电压可以写成:

$$V_{\text{out}} = \frac{\Delta R}{R} V_{\text{supply}} \approx \frac{3\pi_{44} F (l_d - l_p)}{4 h_d b_d^2} V_{\text{supply}} \quad (6)$$

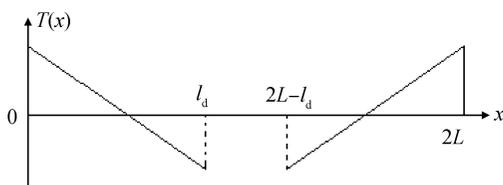


图3 检测梁轴向应力分布图
Fig.3 Distribution of detecting beam axial stress

3.2 传感器的灵敏度

传感器的位移灵敏度定义为弹性检测梁单位位移变化时,传感器所对应的输出电压变化量:

$$S = \frac{V_{\text{out}}}{w(l_d)} = \frac{3E\pi_{44} b_d (l_d - l_p)}{2l_d^3} V_{\text{supply}} \quad (7)$$

由于结构设计中, $l_d \gg l_p$, 所以(7)式可以简化成:

$$S = \frac{3E\pi_{44} b_d}{2l_d^2} V_{\text{supply}} \quad (8)$$

从上式可知,位移传感器的灵敏度跟检测梁的宽度以及传感器工作电压成正比,跟检测梁的长度平方成反比.检测梁的厚度不影响传感器的灵敏度。

3.3 传感器的分辨率

在硅半导体传感器设计中,传感器分辨率受半导体内在的4种噪声的影响,它们分别为Johnson噪声、Hooge噪声、Shot噪声和产生-复合噪声.其中,Johnson噪声和Hooge噪声起主要作用.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噪声功率可以表达为^[6]:

$$\overline{V}_{\text{Johnson}}^2 = \frac{4k_B T l_p}{N_p q \mu_p t_p b_p} (f_{\max} - f_{\min}) \quad (9)$$

式中 k_B 为波尔兹曼常数; T 是绝对温度; f_{\max} 和 f_{\min} 分别是测量带宽的上限和下限频率; N_p 是离子掺杂浓度; t_p , b_p 分别是压敏电阻厚度(从检测梁侧壁压阻表面沿检测梁宽度方向上的距离)和宽度; q 是载流子电荷; μ_p 是载流子迁移率。

Hooge噪声主要是由电阻中电流的流动而导致电阻系数或传导率的波动引起的,在很宽的频率范围(1Hz~10kHz)内,具有 f^{-1} 形式的分布,因此也称之为 $1/f$ 噪声,除了频率外,这种噪声还依赖电阻中总的自由载流子数和材料的性质.Hooge噪声功率可以表达为^[7,8]:

$$\overline{V}_{\text{Hooge}}^2 = \frac{\alpha V_{\text{supply}}^2}{N_p l_p t_p b_p} \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (10)$$

式中 α 为Hooge因子,是一个独立于器件尺寸,但与晶格质量与退火工艺参数有关的重要参数。

位移分辨率定义为机械总噪声与传感器灵敏度的比值,它不仅取决于传感器的灵敏度,还受压敏电阻噪声的制约.传感器的位移分辨率表达式可以写成:

$$y_{\min} = \frac{l_d^2 \sqrt{\frac{\alpha V_{\text{supply}}^2}{N_p l_p t_p b_p} \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}} + \frac{4k_B T l_p}{N_p q \mu_p t_p b_p} (f_{\max} - f_{\min})}}{3\pi_{44} b' E V_{\text{supply}}} \quad (11)$$

从(11)式可知,位移传感器的分辨率与压阻系数、温度、带宽、压阻工作电压、检测梁的长度和宽度、杨氏模量、压敏电阻条的结构尺寸以及离子掺杂浓度有关,与检测梁的厚度 h_d 无关。

4 参数优化

4.1 压敏电阻厚度

从(9)式可知减薄压敏电阻层的厚度 t_p 可以在垂直侧壁压阻的基础上进一步增大压敏电阻到检测梁弯曲中心平面的距离,提高传感器的灵敏度;同时会减少压敏电阻层中载流子的数目,增大压敏电阻的阻值,使得 Johnson 噪声加剧,从而降低传感器位移分辨率.因此存在一个最优的压敏电阻厚度层 t_p ,使得位移的分辨率最优.已知:

$$b' = \frac{1}{2}(b_d - t_p) \quad (12)$$

把上式代入(11)式得:

$$y_{\min} = \frac{2I_d^2 \sqrt{\frac{\alpha V_{\text{supply}}^2}{N_p l_p t_p b_p} \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}} + \frac{4k_B T l_p}{N_p q \mu_p t_p b_p} (f_{\max} - f_{\min})}}{3\pi_{44} (b_d - t_p) E V_{\text{supply}}} \quad (13)$$

令:

$$A = \frac{2I_d^2}{3\pi_{44} E V_{\text{supply}}}$$

$$B = \sqrt{\frac{\alpha V_{\text{supply}}^2}{N_p l_p t_p b_p} \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}} + \frac{4k_B T l_p}{N_p q \mu_p t_p b_p} (f_{\max} - f_{\min})}$$

(13)式可以改写成:

$$y_{\min} = AB \quad (14)$$

令(14)式对压敏电阻的厚度 t_p 微分等于零,则:

$$\frac{dy_{\min}}{dt_p} = A \left(\frac{1}{(b_d - t_p)^2} - \frac{(b_d - t_p)}{2(b_d - t_p)^2 t_p} \right) \sqrt{B} = 0 \quad (15)$$

由于实际加工过程中 $b_d > t_p$, $b_d - t_p > 0$, 且 $B > 0$, 所以上式可以化简为:

$$2t_p = b_d - t_p \quad (16)$$

由(16)式可以算出最优压敏电阻的厚度为:

$$t_p = \frac{b_d}{3} \quad (17)$$

4.2 压敏电阻长度

压敏电阻长度 l_p 对噪声有很大影响.增加压敏电阻的长度可以增加载流子数目,降低 Hooge 噪声,但同时增大压敏电阻的阻值,增大了 Johnson 噪声,因此,通过(11)式对 l_p 微分可以推导出最优的压敏电阻条的长度为:

$$l_p = \sqrt{\frac{\alpha V_{\text{supply}}^2 q \mu_p \ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}}}{4k_B T (f_{\max} - f_{\min})}} \quad (18)$$

从上式可知,压敏电阻条长度的最优值与载流子电荷、载流子迁移率、工作带宽、温度、工作电压、退火条件以及压敏电阻材料的特性有关,而与检测梁的结构尺寸没有关系.在实际设计压敏电阻条长度时,可以在其最优值附近进行选取.

表 1 定位平台和压敏电阻尺寸参数

Table 1 Designed geometric parameters for the xy-stage and piezoresistor

梳齿对数	2624/Dir	最小梳齿间隙	1.75 μm
折叠梁长度	1200 μm	折叠梁宽度	9.5 μm
柔性梁长度	1300 μm	柔性梁宽度	9.5 μm
检测梁宽度	12 μm	检测梁长度	1200 μm
压敏电阻长度	300 μm	压敏电阻宽度	1.6 μm
压敏电阻厚度	4 μm	器件厚度	45 μm

4.3 压敏电阻宽度

增大压敏电阻的宽度(侧壁宽度) b_p ,可以增加载流子的个数,减少压敏电阻的阻值,改善噪声对分辨率的影响,提高传感器位移分辨率,而对传感器的位移灵敏度没有影响.由于作者所设计的压敏电阻位于检测梁的侧壁,压敏电阻的宽度由离子注入能量和退火条件决定.注入能量越大,加工后压敏电阻的宽度就越大,但同时晶格受到离子轰击所造成的晶格损伤也越严重,虽然这些损伤可以通过后续的退火工艺来修复,但是由于退火过程中也伴随着注入离子重新再分布的过程,因此过高的退火温度、过长的退火时间会改变预先设计好的压敏电阻的侧壁形貌,增大压敏电阻的实际厚度,降低加工后传感器的分辨率和线性度.

4.4 定位平台及压敏电阻尺寸参数

作者所设计的定位平台及压敏电阻的具体结构尺寸参数如表 1 所示.

5 工艺流程

图 4 是用硅微加工技术制作上述位移传感器的主要工艺流程示意图.

工艺流程的解释如下:

(1)选取 n 型(100)硅片,电阻率为 $3 \sim 8 \Omega \cdot \text{cm}$,要求切边清楚,硅片打标,如图 4(a)所示.

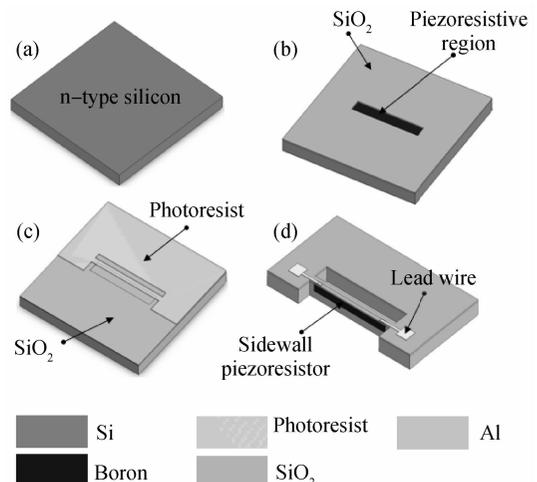


图 4 工艺流程示意图

Fig. 4 Fabrication process flow chart

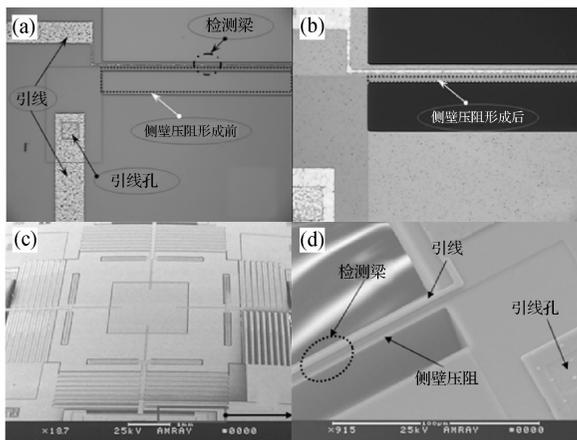


图 5 加工后定位平台及位移传感器实物照片

Fig.5 Photo of fabricated displacement sensor and positioning xy-stage

(2)氧化,并光刻出表面局部压阻注入区域,采用离子注入工艺在压阻区域注入硼离子,制作 p 型压阻.

(3)硼离子注入后的硅片退火,并在硅片表面生成一层 SiO₂ 绝缘薄膜,如图 4(b)所示.

(4)光刻引线孔,在 SiO₂ 上腐蚀出引线孔后溅射 Al 层,加工引线电极.

(5)光刻检测梁结构以及检测梁侧壁的部分压阻,如图 4(c)所示,以光刻胶做刻蚀掩膜,用离子束刻蚀 SiO₂ 后,最后利用 DRIE 技术释放检测梁结构同时“切出”梁的侧壁压阻,并利用 DRIE 的最后一次钝化保护实现在侧壁压阻表面形成一层保护层,如图 4(d)所示.

图 5(a)和(b)为加工过程中检测梁侧壁压阻形成前、后的实物图片,图 5(c)和(d)分别为集成侧壁压阻位移传感器的定位平台 SEM 图片和检测梁与侧壁压阻局部放大扫描电镜照片.

6 传感器性能测试

6.1 压阻电学特性测试

用 CASCADE 探针台对半导体电学特性进行测试.测试结果表明,加工后侧壁压阻的阻值为 5.4kΩ,方块电阻 90Ω/□左右.相邻压敏电阻之间的击穿电压优于 42.5V,而检测电路的工作电压最大 5.0V,所以压阻的电击穿电压满足设计要求.

6.2 传感器灵敏度及线形度

利用精密直流电源(GW Dual TRACKING with 5v Fixed)和精密电压检测装置(Agilent 34401A)对传感器的灵敏度进行标定实验.图 6 为标定后平台输出位移同位移传感器检测电压的实际测试曲线和采用最小二乘法拟合后的曲线.表 2 为传感器测试指标.

6.3 传感器分辨率

由于把位移传感器集成在定位平台中,因此,可以

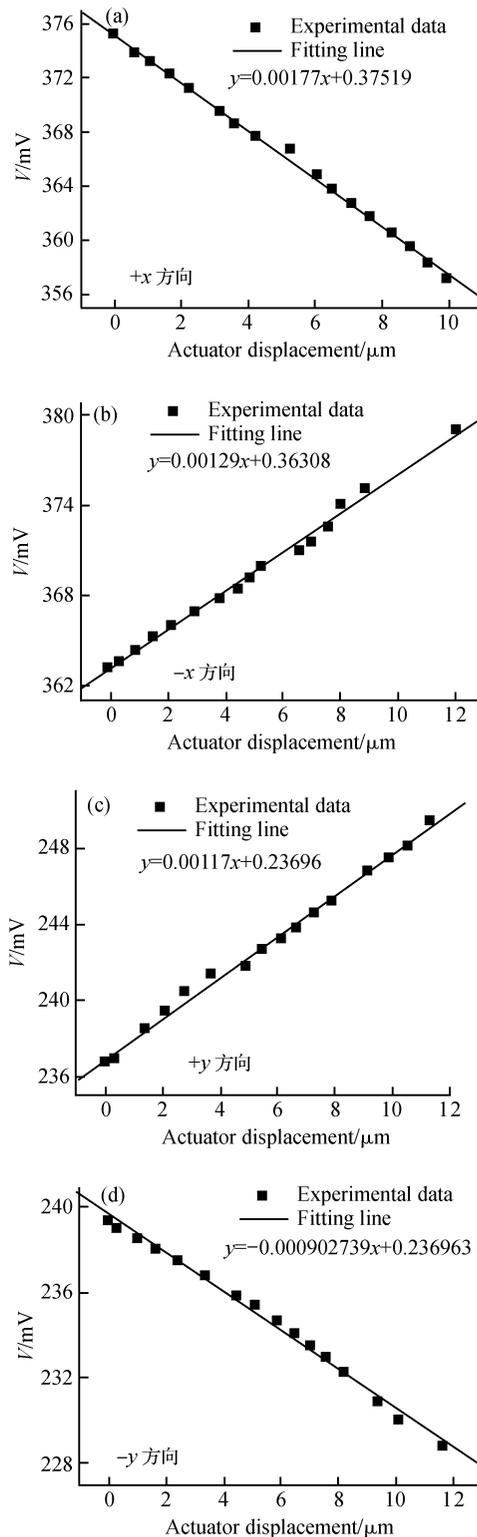


图 6 位移同检测电压关系曲线

Fig.6 Curve of the relation between displacement and testing voltage

表 2 位移传感器的灵敏度及线形度

Table 2 Displacement sensitivity and linearity of displacement sensor

指标名称	+ x	- x	+ y	- y
灵敏度/(mV/μm)	-1.77	1.29	1.17	-0.903
线形度/%	0.814	0.510	0.429	0.346

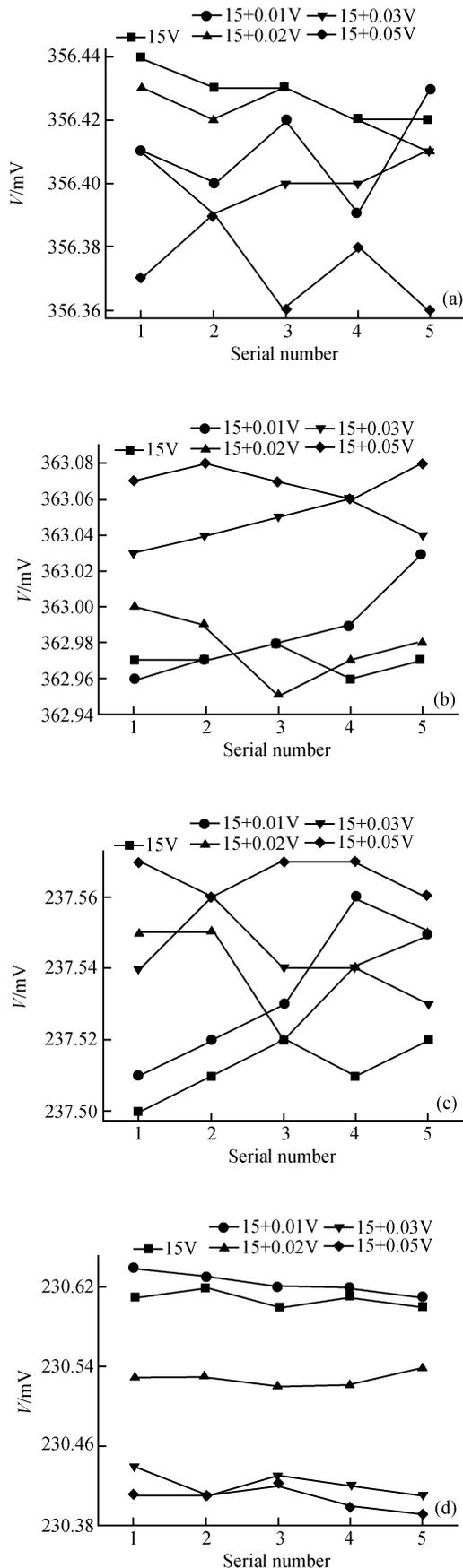


图 7 传感器位移分辨率测试曲线 (a) +x 分辨率测试曲线; (b) -x 分辨率测试曲线; (c) +y 分辨率测试曲线; (d) -y 分辨率测试曲线

Fig.7 Curve of the sensor displacement resolution

表 3 传感器位移分辨率

Table 3 Displacement resolution of the displacement sensor

指标名称	+x	-x	+y	-y
分辨率/nm	10.0	8.3	12.3	9.8

通过定位平台的输出位移来间接标定传感器的位移分辨率. 具体步骤如下: (1) 首先通过精密测量显微镜 (STM6) 标定出驱动电压同定位平台位移的关系曲线. 利用最小二乘法拟合标定曲线, 计算出梳齿静电驱动器输入增益; (2) 利用定位平台的微小位移变化量来标定出传感器可分辨的最小驱动电压增量. 具体做法如下: 选取任意驱动电压作为初始参考电压 V_{ref} ; 然后, 分别以参考电压 V_{ref} 为基准电压, 0.01V 驱动电压为步长, 分别标定出定位平台在该驱动电压作用下位移传感器的输出电压变化量. 标定曲线如图 7 所示; (3) 把标定出的位移传感器所能分辨的最小驱动电压增量代入 (19) 式计算出传感器的最小位移分辨率.

$$y_{min} = k_{elec} \{ (V_{ref} + \Delta V)^2 - V_{ref}^2 \} \quad (19)$$

式中 k_{elec} 为静电驱动器输入增益; V_{ref} 是标定过程中参考驱动电压.

从图 7 曲线关系可以看出, 当驱动电压为 15 + 0.01V 和 15 + 0.02V 时, 其所对应的检测电压最大值分别大于参考驱动电压 15V 所对应的检测电压最小值, 即当平台驱动电压分别从 15.00V 越到 15 + 0.01V 和 15 + 0.02V 情况下, 传感器无法分辨平台输出位移变化量. 驱动电压 15 + 0.03V 所对应曲线的最大值小于参考驱动电压 15V 所对应的曲线的最小值, 即定位平台在参考驱动电压 15V 下传感器输出的电压变化量同驱动电压为 15 + 0.03V 时传感器输出的电压变化量没有交点, 完全可以区分开来, 表明位移传感器可以分辨运动平台 +x 方向上驱动电压从 15.00V 越到 15 + 0.03V 时位移变化量. 同理可以标定出定位平台其他方向上的位移分辨率. 定位平台标定后的位移分辨率如表 3 所示.

7 结论

创新性地利用 DRIE 工艺结合离子注入工艺制作出了检测梁的侧壁压阻, 通过采用这种工艺技术研制出了面内侧壁压阻式位移传感器, 并把它集成到硅基纳米级定位平台中以检测定位平台的位移变化量. 由于检测压阻制作在检测梁侧壁的弯曲表面上, 使得传感器的位移灵敏度较将压敏电阻制作在检测梁上表面的器件高很多. 实验表明, 位移传感器的灵敏度优于 0.903mV/ μ m, 分辨率优于 12.3nm.

参考文献

[1] Christofer H. From micro-to nanosystems; mechanical sensor go nano. J Microelectromech Syst, 2004, 14: S1
 [2] Michael S C L, Gary K F. Position control of parallel-plate micro-actuators for probe-based data storage. J Microelectromech Syst, 2004, 13(5): 759

- [3] Borovic B, Liu A Q, Popa D, et al. Open-loop versus closed-loop control of MEMS devices: choices and issues. *J Micromech Microeng*, 2005, 15: 1917
- [4] Partridge A, Reynolds J K, Chui B W, et al. A high-performance planar piezoresistive accelerometer. *J Microelectromechan Syst*, 2000, 9(1): 58
- [5] Dong Jian, Li Xinxin, Wang Yuelin, et al. Silicon micromachined high-shock accelerometers with a curved-surface-application structure for over-range stop protection and free-mode-resonance depression. *J Micromech Microeng*, 2002, 12: 742
- [6] Jonah A H, Thomas W K. $1/f$ noise considerations for the design and process optimization of piezoresistive cantilevers. *J Microelectromechan Syst*, 2000, 9(2): 226
- [7] Ingo B, Lutz D, Erwin P. Piezoresistive cantilever as portable micro force calibration standard. *J Micromech Microeng*, 2003, 13: S171
- [8] Wang Zheyao, Yue Ruifeng, Zhang Ruoxin, et al. Design and optimization of laminated piezoresistive microcantilever sensors. *Sensors and Actuators A*, 2005, 120: 325

Development of a Displacement Sensor with a Sidewall Piezoresistor and Its Typical Application *

Sun Lining¹, Wang Jiachou^{1,2,†}, Rong Weibin¹, and Li Xinxin²

(1 State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2 State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 20050, China)

Abstract: For improving displacement sensor sensitivity to detect the motion in-plane and to improve the vertical sidewall surface, a new displacement sensor used for detecting motion in-plane is proposed. Piezoresistor technology is compatible with the other micromachining technology. This sensor can be integrated with other devices easily and fabricated with ion implantation technology combined with deep reactive ion etching technology. This design doubles the sensitivity compared with the conventional design because it puts the piezoresistor on the surface of the vertical sidewall of the detection beam. Besides using vertical sidewall piezoresistor technology, this displacement sensor has been applied to a micro xy -stage to detect the stage motion successfully. The experimental results verify that the sensitivity of the fabricated displacement sensors is better than $0.903\text{mV}/\mu\text{m}$, the linearity is better than 0.814% , and the displacement resolution is better than 12.3nm .

Key words: MEMS; sidewall piezoresistors; xy -stage; DRIE; displacement sensor

PACC: 0670D; 2940T; 2940P

Article ID: 0253-4177(2008)08-1589-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50725518), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2007AA04Z315), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University

† Corresponding author. Email: jiatao_wang@163.com

Received 24 March 2008, revised manuscript received 8 April 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics