

带有静电自检测功能的高灵敏度加速度传感器

程保罗^{1,2} 李昕欣¹ 王跃林¹ 焦继伟¹ 车录锋¹ 杨 恒¹ 戈肖鸿¹ 宋朝晖¹

(1 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)

(2 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 研究了一种带有自检功能的在平面内自限制压阻式加速度传感器. 为实现该加速度传感器, 提出了一套新的体硅微机械工艺, 使用普通硅片取代 SOI 硅片来制作器件. 传感器采用在深槽侧壁(悬臂梁弯曲的表面)制作压阻的方法, 灵敏度比在硅表面上制作压阻的传统器件高近一倍. 传感器利用集成在内的静电驱动器, 实现电自检测功能.

关键词: 微机电系统; 加速度传感器; 自检功能; 静电驱动; 侧壁扩散; 绝缘工艺

EEACC: 7230; 2560Z

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)03-0547-07

1 引言

近年来, 在微机电系统(MEMS)领域, 由于深反应离子刻蚀(DRIE)技术的日益成熟^[1], 使用体硅微机械技术制作的在平面内自限制工作的压阻式加速度传感器, 越来越受到人们的关注. 为了提高此种结构加速度传感器的灵敏度, Kenny 等人通过倾斜离子注入在刻蚀侧壁制作压阻^[2]. 为了简化工艺, 并从成本考虑采用普通硅片而非 SOI 硅片制作此类器件, Li 等人在悬臂梁表面制作压阻^[3]. 此外, 安全系统中加速度传感器的自检测也是商品化 MEMS 加速度计迫切需要的一项重要功能^[4].

本文致力于研究一种全新的加速度传感器, 该器件采用基于 DRIE 技术的体硅工艺, 属于平面内自限制结构. 为了提高器件灵敏度, 采用侧面杂质扩散形成压阻敏感电阻的方法. 为了降低批量生产时的成本, 采用了一项全新的体硅微机械绝缘工艺. 利用侧壁杂质扩散与绝缘工艺, 形成电容驱动结构, 实现电自检测功能.

2 加速度传感器的设计

2.1 新型绝缘工艺的原理

本文提出的体硅绝缘工艺, 使用的是 pn 结绝

缘原理, 如图 1 所示. 对于体硅而言, 不可能将两个或者多个不同的电压施加于拓扑相连的侧壁. 这个工艺的思路, 就是用 $N(N > 1)$ 条 SiO_2 绝缘槽, 将扩硼的闭环侧壁变成开环结构, 分成 N 个部分, 可以在每个部分上分别施加不同的电压. 图中的 V_1, V_2 代表施加于器件侧壁的两个独立电压.

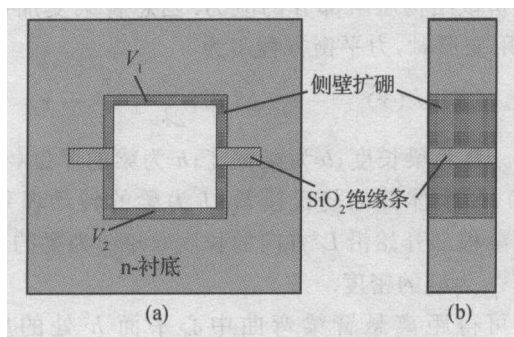


图 1 侧壁绝缘原理示意图

Fig. 1 Principle of sidewall isolation

2.2 加速度传感器结构设计

图 2 是加速度计悬臂梁的立体示意图. 该加速度计利用 DRIE 技术将硅体刻透, 形成可横向摆动的加速度敏感悬臂梁; 使用侧壁扩散技术, 在刻透的硅体深沟两侧壁同时淀积一层掺杂杂质, 并使用深沟绝缘槽将压阻部分独立置于悬臂梁侧壁; 同时利用该绝缘槽, 在外侧壁特定区域形成电绝缘区域, 从而便于施加独立电压, 利用电容极板间静电力的原

理驱动悬臂梁,达到自检目的.图中,1为横向摆动加速度敏感悬臂梁;2为梁的根部支撑框架;3为DRIE刻蚀的纵向深沟间隙;4为SiO₂填充电隔离绝缘条;5为侧壁扩散压阻敏感电阻;6为被电隔离的外侧壁杂质扩散区;7为表面重掺杂区.

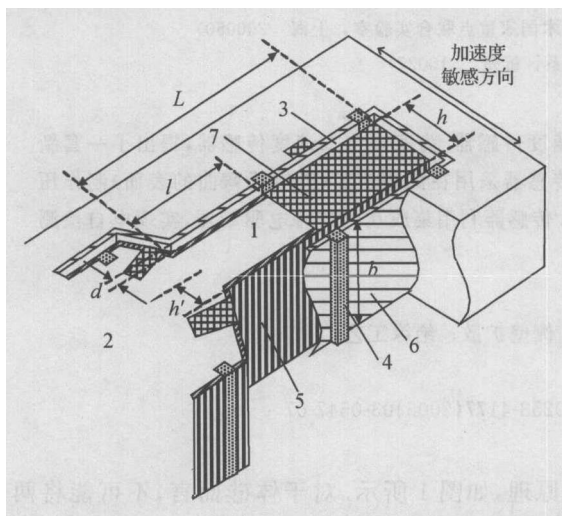


图 2 带有自检驱动功能的侧壁压敏电阻加速度计

Fig.2 Sidewall-piezoresistive accelerometer with self-test function

因为压阻效应由半导体内部应力产生,我们首先分析该结构压阻部分的应力.当悬臂梁受加速度 a 作用变形时,力平衡方程^[5]为

$$-EIw''(x) = -(Lbh)a\left(\frac{x^2}{2L} + \frac{L}{2} - x\right) \quad (1)$$

式中 L 为梁长度; b 为梁宽度; h 为梁的厚度(参见图2); E 为体硅的杨氏模量; I 为梁的转动惯量; x 为从梁根部开始沿 L 方向的长度; $w(x)$ 为梁的弯曲挠度; ρ 为硅的密度.

可得距离悬臂梁弯曲中心平面 h 处的应力为^[5]

$$T(x) = Eh w'(x) = \frac{6}{h^2} a(x-L)^2 \quad (2)$$

压阻条的灵敏度为^[5]

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\int_0^l -\frac{44}{2} T(x) dx}{l} = \frac{44}{h^2} a(l^2 - 3Ll + 3L^2) \quad (3)$$

式中 44 为压阻系数; l 为压阻部分的长度.

制作表面压阻时^[3],应考虑半导体光刻工艺的精度和两个压阻条的对称,压阻部分必须和两侧壁有一定的距离,而且压阻条也会有一定的宽度,故通常 $h = \frac{h}{4}$;而对于改进后的侧面扩散,可以取极限

值 $h = \frac{h}{2}$,此时的压阻灵敏度,也即全桥工作时器件的灵敏度为

$$S = \frac{R}{R_0} = \frac{44}{h^2} a(l^2 - 3Ll + 3L^2) \quad (4)$$

2.3 自检驱动

图2中的区域7为表面重掺杂区,在它上面引出电极,可以对悬臂梁前端施加电压;区域6为通过SiO₂电隔离深沟进行隔离的外侧壁,对称的两个侧壁都可以独立施加电压.于是,该结构类似于两个对称的平行平板电容,通过施加电压差,可以使悬臂梁在静电力的作用下偏折.该功能可以在需要的时候,检测加速度计是否正常工作,达到即时自检的目的^[4].因为本器件上有两个悬臂梁,因此从驱动梁的数量考虑,自检驱动可以分为单梁驱动和双梁驱动;而从驱动时所加的电压考虑,可以分为直流驱动和交流驱动.

由图2可知,执行自检功能时,近似相当于一个面积为 $(L-l)b$,间距为 d 的平行平板电容在外加驱动电压 V_{drive} 的作用下产生的静电力,作用于该悬臂梁的前端距离根部 $(L+l)/2$ 处.对于直流电驱动,该力的大小为

$$F = \frac{(L-l)bV_{drive}^2}{2d^2} \quad (5)$$

式中 ϵ_0 为空气中的介电常数.该力引起的应力为^[5]

$$T(x) = \frac{6E}{bh^2} \left(\frac{L+l}{2} - x\right) \quad (6)$$

如果使用单悬臂梁驱动方式,在外加测试电压为 V_{power} 时器件的测试输出为

$$V = \frac{R}{2R_0} V_{power} = \frac{3}{8} \frac{44L(L-l)V_{power}}{h^2 d^2} V_{drive}^2 \quad (7)$$

双悬臂梁驱动时,需考虑到其中一个悬臂梁上已经施加了 V_{power} ,故有输出电压

$$V = \frac{3}{8} \frac{44L(L-l)V_{power}}{h^2 d^2} \times [V_{drive}^2 + (-V_{drive} - V_{power})^2] \quad (8)$$

使用 Rayleigh-Ritz 法可得该结构敏感方向上悬臂梁的自由振动频率^[5]为

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = 1.015 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

如果施加交流驱动信号,在梁的两个外侧同时施加差动电压 $V_{drive} = -15 \pm 10 \cos t(V)$,当 $\omega = \omega_0$

时,梁在差动电压作用下谐振.

将 V_{drive} 代入 (7) 式,可得单梁驱动时的输出电压

$$V = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{3_{-44} L(L-l)V_0 V_1 V_{power}}{h^2 d^2} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2}{0}^2 + 4(\frac{m}{0})^2 (\frac{-}{0})^2}} \quad (10)$$

同样将 V_{drive} 代入 (8) 式有双梁驱动时的输出电压

$$V = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{3_{-44} L(L-l)(2V_0 + V_{power})V_1 V_{power}}{h^2 d^2} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2}{0}^2 + 4(\frac{m}{0})^2 (\frac{-}{0})^2}} \quad (11)$$

3 工艺流程

图 3 是用硅微加工技术制作上述加速度计的主要工艺流程示意图,其中 A-A 是正对刻蚀外侧壁的

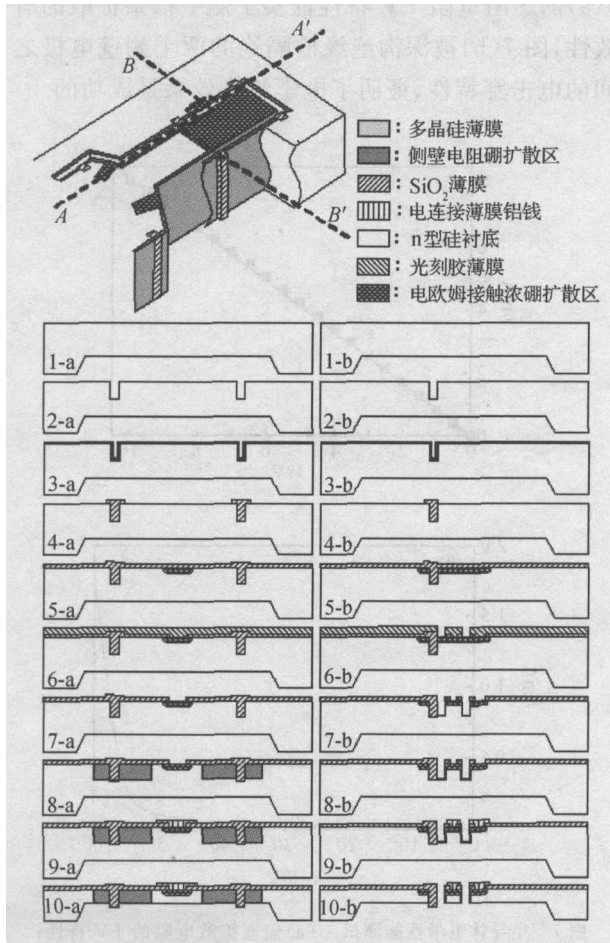


图 3 工艺流程示意图

Fig. 3 Fabrication process flow chart

视角, B-B 是将梁横向剖开的视角,具体解释如下:

- (1) n 型 (100) 硅片从背面湿法减薄;
- (2) 使用硅的深刻蚀形成绝缘槽,刻蚀深度超过器件的设计深度;
- (3) 在整个绝缘槽内腔形成一层 SiO_2 薄膜后,淀积一层多晶硅薄膜;
- (4) 将淀积的多晶硅薄膜氧化为 SiO_2 膜,从而把绝缘槽彻底填塞成为电绝缘的 SiO_2 条. 去除表面覆盖的 SiO_2 层前,在被填塞的缝隙上面预留一个保护盖;
- (5) 氧化,并光刻出表面局部浓硼扩散区域. 浓硼扩散,再分布时生成一层 SiO_2 绝缘薄膜;
- (6) 光刻出引线孔,在 SiO_2 上腐蚀出引线孔区域后,用光刻胶将其覆盖,再光刻出器件结构刻蚀区域;
- (7) 以前面步骤留下的光刻胶为掩膜,深刻蚀到器件的设计深度;
- (8) 以固态源扩散的方式进行硼扩散,在器件的侧壁形成所需浓度和结深的 p 型层;
- (9) 以剥离 (lift-off) 工艺形成铝导电薄膜;
- (10) 器件背面使用干法整体减薄,直至整个器件的梁被释放.

4 实验结果

图 4 是封装后未加保护盖板的加速度计成品照片.

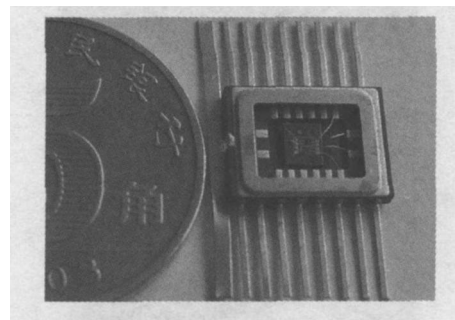


图 4 加速度计成品照片

Fig. 4 Photo of finished accelerometer

图 5 是使用上述流程制作的加速度计的 CCD 显微镜照片. 为了图形边缘清晰,使用了显微镜的背面透视光. 其中 (a) 为正面形貌, (b) 为背面形貌. 从两张照片可以发现,绝缘条有效地从侧面进行了隔绝.

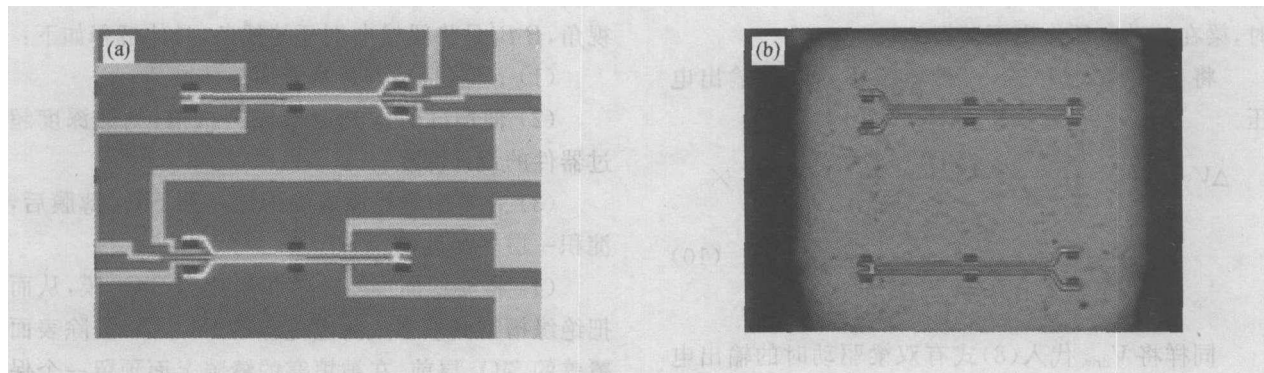


图 5 加速度计 CCD 显微镜照片

Fig. 5 CCD microscope photos of accelerometer

图 6 是使用扫描电镜 (SEM) 观测加速度计样品的照片. 其中图 (a) 为整体形貌, 图 (b) 为局部剖面图, 从图 (b) 可以清楚地看到, 多晶硅薄膜填充的 SiO_2 绝缘条比器件整体要厚, 且从上至下彻底将体硅的侧壁两边隔开.

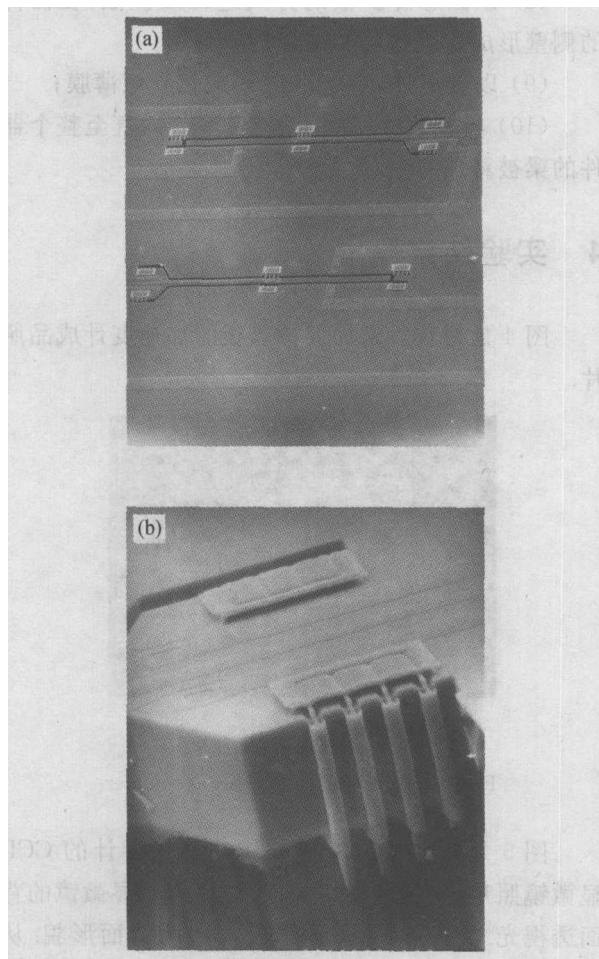


图 6 加速度计 SEM 照片

Fig. 6 SEM photos of accelerometer

5 测试和分析

5.1 半导体电学性能测试

该器件的半导体电学测试结果如图 7 所示. 图 7(a) 的压阻电阻 $I-V$ 特性证实了侧壁掺杂扩散的有效性, 图 7(b) 被深沟绝缘槽隔绝的两个侧壁电极之间的电击穿特性, 证明了电学绝缘效果是成功的.

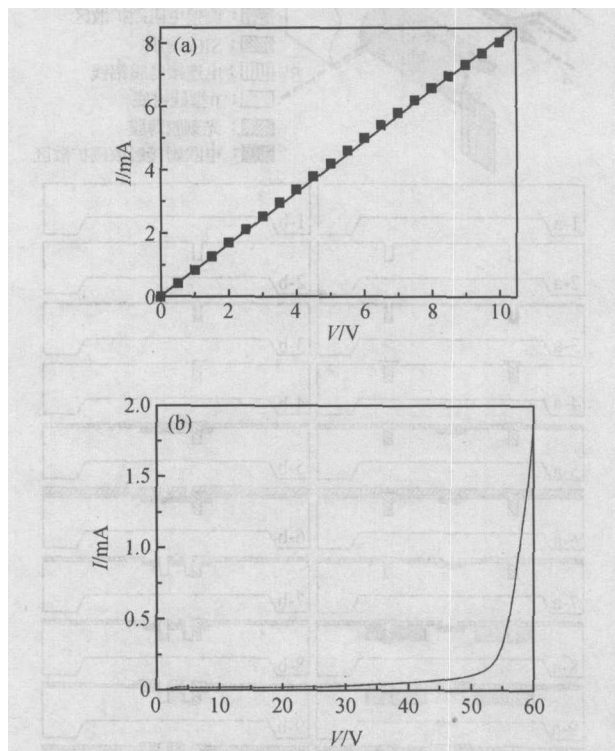
图 7 半导体电学性能测试 (a) 侧壁扩散电阻的 $I-V$ 特性; (b) 侧壁电极间电击穿

Fig. 7 Semiconductor electrical performance test

5.2 自检驱动测试

图 8 是对加速度计施加直流电压 V_{drive} 进行驱动自检的测试图,其中(a)为单梁测试,(b)为双梁测试.图中的虚线为根据公式(7),(8)画出的理论预测曲线,实线为根据实测数据所绘的曲线.由图可见,本测试理论与实测曲线基本一致,验证了自检测试的有效性和可行性.

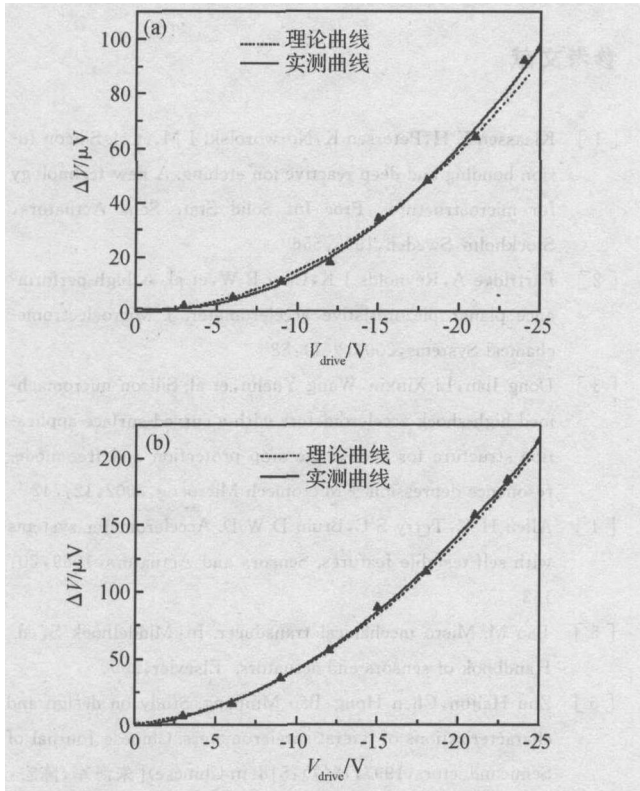


图 8 直流驱动测试 (a)单梁;(b)双梁
Fig. 8 DC drive test

图 9 是当加速度计在 $V_{drive} = -15 \pm 10\cos t$ (V)的作用下的频率和输出信号电压曲线,其中(a)为单梁测试,(b)为双梁测试.图中虚线是根据公式(10),(11)画出的理论预测曲线,实线为由测试数据所绘的曲线.本测试在谐振情况下的输出大约 3~7mV,证明了自检测试的可用性.

5.3 冲击测试

图 10 是对加速度计进行自由杆弹性碰撞冲击测试得到的输出电压-时间曲线.

实验中,冲击自由下落高度 $h = 0.35\text{m}$, $V_{power} = 3.3\text{V}$,具体的实验关键数据为:峰值输出 $V_{max} =$

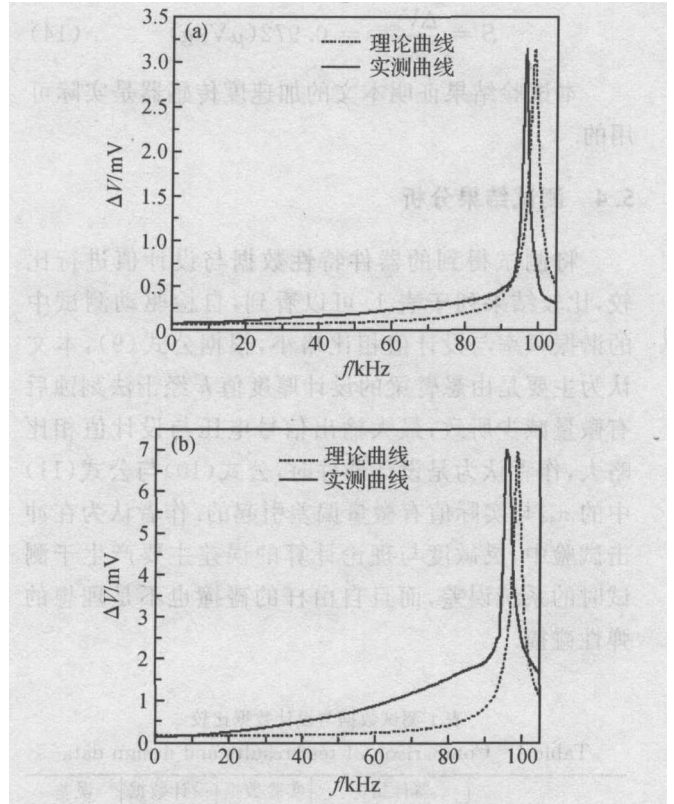


图 9 交流驱动测试 (a)单梁;(b)双梁
Fig. 9 AC driving test

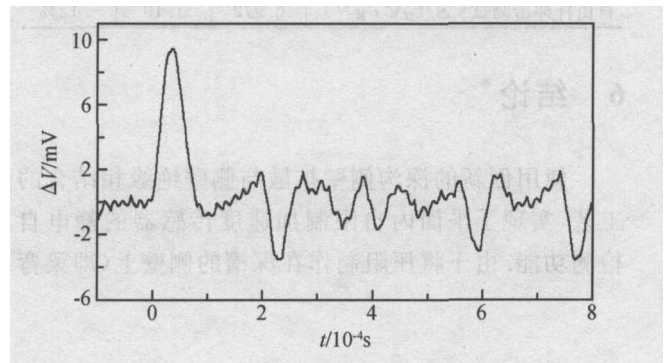


图 10 冲击测试输出
Fig. 10 Output of impact test

9.72mV,冲击输出的峰值正弦波半周期 $t = 8.4 \times 10^{-5}\text{s}$.假设器件灵敏度为 S ,可得

$$\int_0^t V(t) dt = S \int_0^t a(t) dt = S \int_0^t dv = 2S \sqrt{2gh} \quad (12)$$

又因为弹性碰撞的输出电压以正弦函数变化,因此有

$$a_{max} = \frac{\sqrt{2gh}}{t} = 9.796 \times 10^4 \text{ m/s}^2 \quad 10000\text{g} \quad (13)$$

$$S = \frac{V_{\max}}{a_{\max}} = 0.972 (\mu\text{V}/\text{g}) \quad (14)$$

本试验结果证明本文的加速度传感器是实际可用的。

5.4 测试结果分析

将测试得到的器件特性数据与设计值进行比较,比较结果列于表 1。可以看到,自检驱动测试中的谐振频率与设计值相比略小,根据公式(9),本文认为主要是由悬臂梁的设计厚度值 h 经干法刻蚀后有微量减少所致;最大输出信号电压与设计值相比略大,作者认为是设计器件时,公式(10)与公式(11)中的 a_0 与实际值有微量偏差引起的。作者认为在冲击试验中,灵敏度与理论计算的误差主要产生于测试时的系统误差,而且自由杆的碰撞也不是理想的弹性碰撞。

表 1 测试数据与设计数据比较

Table 1 Comparison of test results and design data

		器件指标	实验数据	设计数据	误差
自检驱动 测试	单梁	f_0/kHz	96.6	98.8	- 2.22 %
	驱动	V_{\max}/mV	3.17	3.15	+ 0.50 %
	双梁	f_0/kHz	96.4	98.8	- 2.43 %
	驱动	V_{\max}/mV	7.02	7.00	+ 0.29 %
自由杆冲击测试		$S/(\mu\text{V} \cdot \text{g}^{-1})$	0.972	1.10	- 12 %

6 结论

使用创新的深沟侧壁扩散与侧壁绝缘相结合的工艺,实现了平面内自限制加速度传感器的静电自检功能。由于将压阻制作在深槽的侧壁上(即梁弯

曲的表面上),使灵敏度较将压阻制作在硅片上表面的器件高很多。本实验室已经制作的压阻在硅片表面的传感器^[3],在采用与本器件相同的其他设计参数时,灵敏度仅为本器件的一半左右。可见该设计有提高加速度计灵敏度的作用。此外,与以往用各向异性腐蚀等传统微机械技术加工的横向运动的加速度传感器相比,本文提出的工艺技术具有更强的敏感性和驱动元件集成制作能力^[6]。

参考文献

- [1] Klaassen E H, Petersen K, Norworolski J M, et al. Silicon fusion bonding and deep reactive ion etching. A new technology for microstructures. Proc Int Solid State Sens Actuators, Stockholm, Sweden, 1995:556
- [2] Partridge A, Reynolds J K, Chui B W, et al. A high-performance planar piezoresistive accelerometer. J Microelectromechanical Systems, 2000, 9(1):58
- [3] 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
- [4] Allen H V, Terry S C, Bruin D W D. Accelerometer systems with self-testable features. Sensors and Actuators, 1989, 20:153
- [5] Bao M. Micro mechanical transducer. In: Middelhoeck S, ed. Handbook of sensors and actuators. Elsevier, 2000
- [6] Zhu Haijun, Chen Hong, Bao Minhang. Study on design and characterizations of lateral accelerometers. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(7):518(in Chinese) [朱海军, 陈宏, 鲍敏杭. 横向加速度传感器设计及特性研究. 半导体学报, 1997, 18(7):518]

High Performance Accelerometers with Advanced Bulk Micromachining Technology

Cheng Baoluo^{1,2}, Li Xinxin¹, Wang Yuelin¹, Jiao Jiwei¹, Che Lufeng¹,
Yang Heng¹, Ge Xiaohong¹, and Song Zhaohui¹

(1 *State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(2 *Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract : An in-plane sensitive piezoresistive accelerometer with self-test function is proposed. A set of new silicon bulk micromachining process is developed to fabricate the proposed device. With the developed fabrication technique, conventional silicon wafer can be used instead of expensive SOI wafer. This design doubles the sensitivity by putting the piezoresistor on the surface of the vertical sidewall of the cantilevers, compared with conventional design. Electrostatic self-test function of the accelerometer is also realized by integrated actuator.

Key words : MEMS; accelerometer; self-test function; electrostatic drive; sidewall diffusion; isolation technology

EEACC : 7230; 2560Z

Article ID : 0253-4177(2005)03-0547-07