

一种具有“8 悬臂梁-质量块”结构的新型 硅微加速度计^{*}

王育才^{1,2} 焦继伟^{1,†} 段 飞^{1,2} 张 颖¹ 宓斌玮¹ 李金鹏^{1,2} 钱 清¹ 王跃林¹

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 提出了一种具有“8 悬臂梁-质量块”结构的新型三明治式硅微机械电容式加速度计,用微机械加工工艺在(111)硅片上制作出了具有信号输出的器件.该加速度计的惯性质量块由同一(111)硅片上下表面对称分布的 8 根悬臂梁支撑.这些悬臂梁是利用(111)硅在 KOH 溶液中的各向异性腐蚀特性结合深反应离子刻蚀(DRIE)实现的,其尺度精确可控,保证了结构的对称性.该加速度计的谐振频率为 2.08kHz,品质因子 Q 为 21.4,灵敏度为 93.7mV/g.

关键词: 微加速度计; 微机械加工; 各向异性腐蚀

EEACC: 7230; 8340

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)05-0783-06

1 引言

微机械加速度传感器是一种重要的惯性器件,在航空、航天、汽车等领域有着广泛的应用.按检测原理,微机械加速度传感器可分为压阻式、压电式和电容式等形式,其中电容式加速度传感器具有测量精度高、噪声特性好、漂移低、温度敏感性小、功耗低、结构简单等优点,逐渐成为微硅加速度传感器的发展主流.

电容式加速度计的敏感部分由一个检测质量块和支撑悬臂梁组成,悬臂梁的数目从一根到四根不等,通常这些悬臂梁都在一个平面上^[1,2].1994 年 Erickson^[3]利用多层硅-硅键合的方法实现了双层上下对称悬臂梁结构的 z 轴电容式加速度计,该加速度计的悬臂梁在两层不同的平面上,每一层具有四根悬臂梁.这种双层对称悬臂梁结构的加速度计具有较低的横向灵敏度,较低的噪声,低/可控的阻尼,低的温度敏感性和较高的灵敏度.但多层硅-硅键合会产生较大的寄生电容,给输出信号的检测带来困难.1997 年 Yazdi 等人^[4]利用浓硼扩散的方法在单一硅片上实现了具有上下对称悬臂梁结构的 z 轴电容式加速度计,避免了寄生电容问题,但浓硼扩散不可避免地引入了残余应力,可能导致潜在的漂移.

利用在 KOH 等碱性溶液对硅的各向异性腐蚀特性, Lee 等人^[5]提出了一种基于(111)硅片的新型工艺,以慢腐蚀速率的 {111} 面作为 KOH 腐蚀阻挡层,在(111)硅片上形成了具有大体积、高深宽比、大牺牲间隙和光滑平坦底面的结构,并用来制作高性能的传感器和执行器.

本文设计了一种具有上下双层对称悬臂梁结构的三明治式微机械加速度计,并在(111)硅片上制备了具有信号输出的器件.该加速度计的惯性质量块由在同一(111)硅片上下表面对称分布的 8 根悬臂梁支撑,每一表面有 4 根悬臂梁,这些悬臂梁利用(111)硅在 KOH 溶液中的各向异性腐蚀特性结合深反应离子刻蚀(DRIE)实现,其尺度精确可控,保证了结构的对称性.另外,由于整个硅片的厚度得到利用,该加速度计具有较大的检测质量块,有利于提高器件的信噪比.该加速度计的加工工艺流程相对简单,寄生电容和残余应力得到了有效抑制.

2 设计与模拟

2.1 器件结构设计

图 1 是该加速度计的悬臂梁-质量块结构简图,图 2 为加速度计的截面图.当在 z 方向有加速度加入时,检测质量块在惯性力作用下,沿 z 方向产生

^{*} 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号:2006AA04Z312)

[†] 通信作者. Email: jiaojw@mail.sim.ac.cn

2006-11-14 收到,2007-01-06 定稿

一个微小偏置 Δd , 导致质量块与上下两极板之间电容值一个减小, 一个增加. 通过检测电路测出电容差值差, 就可换算出加速度值. 该加速度计结构的主要特点是: (1) 采用关于检测质量块中心对称的 8 根悬臂梁支撑质量块, 支撑悬臂梁在两层上下对称的平面上, 每一层有四根悬臂梁; (2) 整个硅片的厚度得到利用, 获得了较大的检测质量块, 提高了信噪比; (3) 采用了三明治式结构, 适于闭环检测.

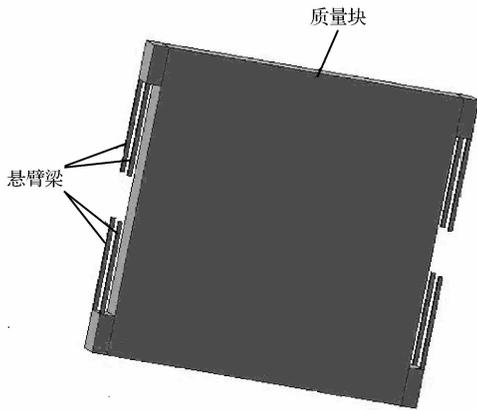


图 1 加速度计的悬臂梁-质量块结构简图

Fig. 1 Suspension beams-mass of the accelerometer

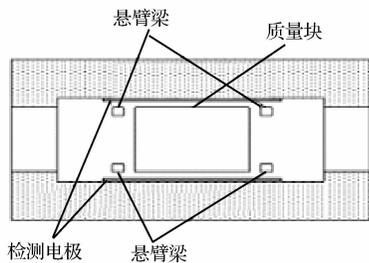


图 2 加速度计的截面图

Fig. 2 Cross-sectional view of the accelerometer

2.2 器件参数设计

2.2.1 检测质量块

为了增加器件的灵敏度和减小机械噪声, 质量块的质量应该越大越好, 本加速度计的质量块由 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 正方形外加 4 个 $200\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 的矩形组成, 以整个硅片的厚度 (约 $370\mu\text{m}$) 作为质量块的厚度, 质量块由 KOH 溶液各向异性腐蚀(111)硅以及 DRIE 释放得到.

2.2.2 悬臂梁

该加速度计的悬臂梁分为上下对称的两层, 每层包含 4 根梁, 8 根悬臂梁关于检测质量块中心对称. 每根梁的尺寸均为 $1200\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$, 根

据材料力学理论^[6], 单根梁沿 z 方向的弹性系数为:

$$k_z = \frac{Ew^3h}{l_b^3} \quad (1)$$

其中 E 是梁的杨氏模量; l_b 为梁的长度; w 是梁的宽度; h 是梁的厚度. 经计算得到单根梁的弹性系数为 368.9N/m .

2.2.3 阻尼孔

加速度计的性能不仅受悬臂梁弹性系数的影响, 也要受到存在于质量块与检测电极板间由气隙所引起的作用于检测质量块的阻尼力的影响. 阻尼力主要影响质量块运动的性质, 可以使加速度计处于阻尼振荡、自由振荡等状态. 为了减小空气阻尼, 可以在检测质量块上面设计一些均匀分布穿透质量块的阻尼孔, 此时阻尼系数 D (damping factor) 可以由下式给出^[4]:

$$D = 0.427N\mu \frac{L^4}{d^3}, \quad L = \sqrt{p^2 - a^2} \quad (2)$$

其中 N 为阻尼孔的数目; μ 为空气的黏滞系数; d 是质量块处于平衡位置时与上下电极板间的距离; L 是极板的有效长度, 与阻尼孔的尺寸 a 以及阻尼孔的间距 p 有关. 系统的品质因子 Q 由文献[7]给出.

通过分析计算优化设计, 最后选定在质量块上均匀开了 48×48 个边长为 $50\mu\text{m}$ 的正方形阻尼孔, d 取 $5\mu\text{m}$, 经计算得到阻尼系数 D 为 $2.2 \times 10^{-3}\text{Ns/m}$, Q 值为 45.5.

2.3 器件结构模拟

我们利用 ANSYS 软件对器件结构进行了有限元分析, 得到前 4 阶振动模式的谐振频率如表 1 所示.

表 1 前 4 阶的谐振频率

Table 1 Frequency of the first four models

模态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
频率/Hz	1726.5	2748.3	2853.5	8405.5

其中 1 阶模态是我们所需要的沿 z 方向振动的模态, 从模拟的结果来看, 1 阶谐振频率和后面 2, 3, 4 阶相差较大, 有利于提高加速度计的灵敏度和分辨率.

3 制作流程

我们采用 n 型(111)硅片来制作加速度计, 利用了(111)硅在 KOH 溶液中各向异性的腐蚀特性^[5,8], 硅片的电阻率为 $0.002\Omega \cdot \text{cm}$, 厚度约为 $370\mu\text{m}$, 主要的工艺流程如图 3 所示.

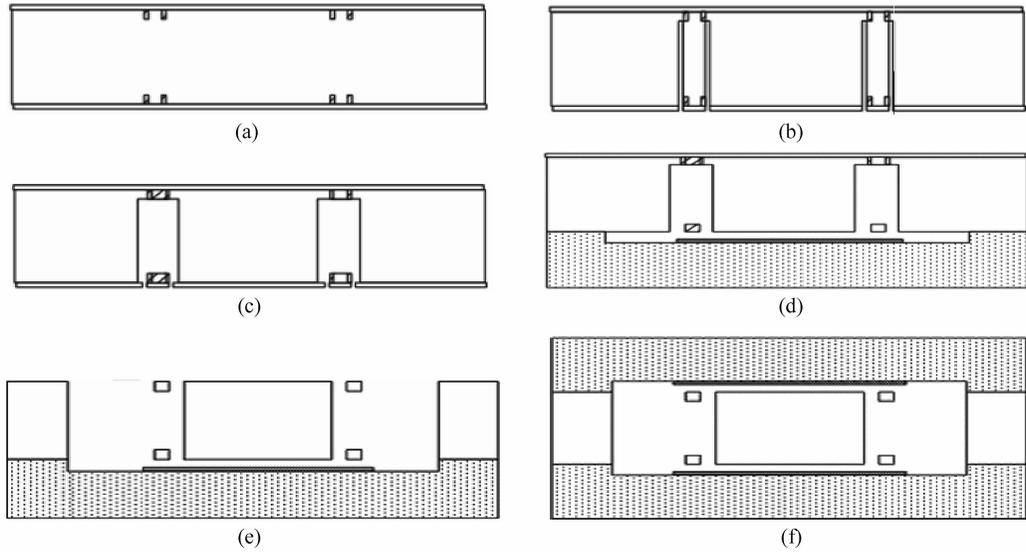


图 3 主要的工艺流程 (a) 限制沟槽对的形成及再填充;(b)刻蚀出深凹槽对;(c)KOH 腐蚀,形成下层梁;(d)与下层玻璃衬底键合;(e)DRIE 释放上层梁;(f)与上盖板键合

Fig.3 Main process flow (a) Limit trench pairs patterning and refilling;(b) Deep groove pairs etching;(c) KOH etching, forming bottom beams;(d) Bonding with glass substrate;(e) Releasing by DRIE patterning;(f) Bonding with cap wafer

(1)首先在硅片的正反两面进行反应离子刻蚀 (RIE),刻蚀出正反面对称的用来限定悬臂梁宽度的限制沟槽对,沟槽的宽度为 $2\mu\text{m}$,深度为 $30\mu\text{m}$,沟槽对中沟槽与沟槽之间的距离为 $50\mu\text{m}$,限制沟槽对的长度方向被特意设计成沿着 $\langle 110 \rangle$ 方向.然后将硅片做热氧化处理,使限制沟槽对被 SiO_2 填充,如图 3(a)所示.

(2)从硅片的反面,用深反应离子刻蚀的方法在限制沟槽对的外沿刻蚀出相对较宽的凹槽对,通过精确控制凹槽对的深度,使凹槽对的上端稍微越过硅片正面限制沟槽对的下端,凹槽的宽度为 $20\mu\text{m}$,深度为 $350\mu\text{m}$,如图 3(b)所示.

(3)将硅片放入 KOH 溶液中,使 KOH 溶液进入凹槽对,对凹槽的侧面进行腐蚀.凹槽的侧面实际上是 $\langle 110 \rangle$ 平面,KOH 对 $\langle 110 \rangle$ 面的腐蚀速率很快,对 SiO_2 和 $\langle 111 \rangle$ 面的腐蚀速率相对很慢,因此经过长时间的 KOH 腐蚀后,凹槽侧面没有受 SiO_2 保护的地方被 KOH 腐蚀掉,这样就释放了底部的悬臂梁.可以看出,(1)中限制沟槽的深度实际上决定了悬臂梁的厚度,限制沟槽的作用就是阻止悬臂梁区域的侧向腐蚀,从而精确决定了悬臂梁的厚度 ($30\mu\text{m}$)和宽度 ($50\mu\text{m}$),如图 3(c)所示.

(4)将硅片阳极键合到事先制作好的约 $5\mu\text{m}$ 键合凹坑的 Pyrex 玻璃衬底上,在键合凹坑的上表面有一层溅射的约 500nm 厚的铝金属薄膜作为下极板,如图 3(d)所示.

(5)从硅片的上表面,用 DRIE 工艺释放出上

部悬臂梁、质量块和阻尼孔,如图 3(e)所示.实际的释放过程比图示的要复杂一些,我们巧妙设计了掩模版图和工艺流程,利用 SiO_2 和光刻胶复合刻蚀掩模,使阻尼孔和上层悬臂梁几乎同时释放.释放过程中 DRIE 的腐蚀性气体与下层悬臂梁的接触时间得到有效控制,最大限度地减少下层梁损伤.

(6)硅片上表面与 Pyrex 玻璃上盖板进行阳极键合,形成三明治结构.这一步的 Pyrex 玻璃和第 4 步中的 Pyrex 玻璃一样,事先制作好了键合凹坑并在凹坑上溅射一层铝薄膜作为上极板,如图 3(f)所示.

图 4 是第 6 步键合上盖板之前的 SEM 俯视图,

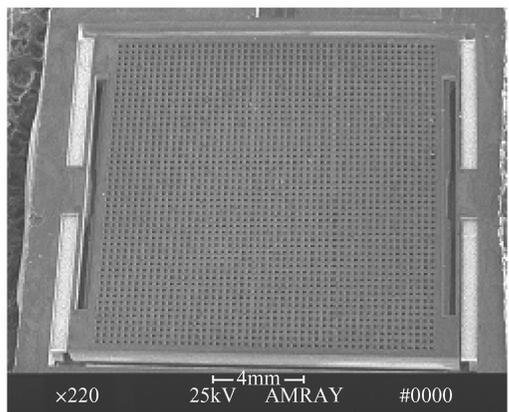


图 4 加速度计的俯视图

Fig.4 SEM top view of the accelerometer

图 5 是局部放大的 SEM 照片,从图中可以清楚地看到已经释放了的上、下层悬臂梁以及阻尼孔.经过上述工艺流程,我们成功地制作出了具有上下双层对称悬臂梁结构的电容式加速度计.

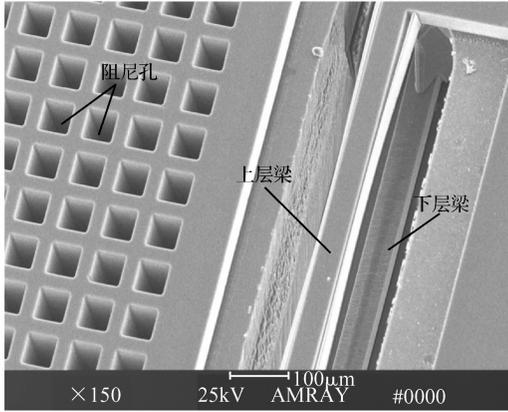


图 5 加速度计的局部放大图

Fig. 5 Close-up SEM view of the accelerometer

4 测试结果

将完成第 6 步的加速度计划片,非气密性封装,用 Westbond 747677E 三用丝焊机打上引线,引线示意图如图 6 所示.在硅的局部有 SiO₂ 作为绝缘层,SiO₂ 表面有一层 Al 电极,键合的时候这层 Al 和上盖板的 Al 接触,这样就可以把上盖板的电极从 SiO₂ 上的 Al 引出来.上层玻璃盖板的引线孔由氢氟酸腐蚀玻璃得到,引线孔大小为 1mm×1mm.

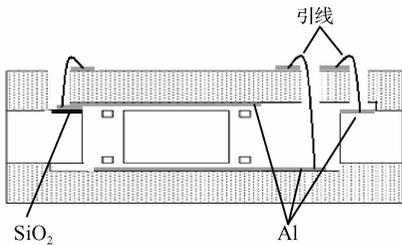


图 6 引线示意图

Fig. 6 Wire bonding schematic

在常压下对器件特性进行了初步测试,测得其谐振频率为 2.08kHz, *Q* 值为 21.4,如图 7 所示.利用 TIRA TV51075 型振动台对器件的输出特性进行测试,测得其灵敏度约为 93.7mV/g,非线性度为 3.1%,图 8 为加速度计的输入输出曲线.从测试结果看,器件工作正常,证明加速度计的设计正确,工艺流程可行.

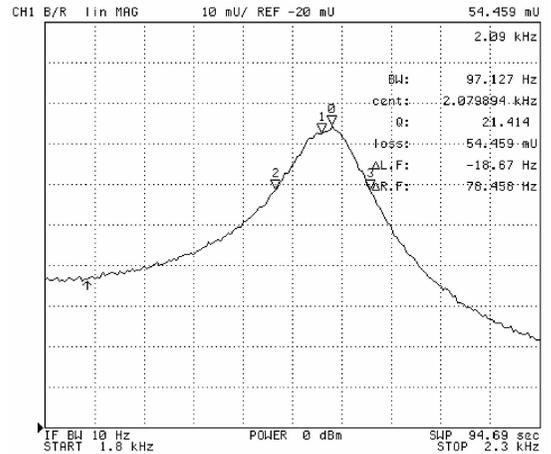


图 7 加速度计的谐振频率及 *Q* 值

Fig. 7 Resonance frequency and *Q* of the accelerometer

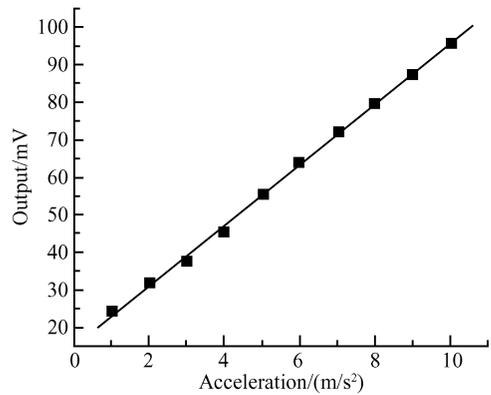


图 8 加速度计的输入输出曲线

Fig. 8 Output of the accelerometer

5 讨论

与设计 的 1.73kHz 的谐振频率以及 45.5 的 *Q* 值相比,测得的加速度计的谐振频率偏高,*Q* 值偏低,这有可能是由于加工偏差引起的.通过进一步改进加工工艺,加速度计的实际性能应该可以与设计性能更加接近.与文献[3,4]中的加工工艺相比,该加速度计的加工工艺相对简单.由于最后 DRIE 释放上层梁时硅片中心的刻蚀速率和边缘的刻蚀速率不一致,对成品率有一定影响,目前正在做进一步工艺改进,使工艺条件对器件的影响尽可能小,从而提高器件成品率.

下面我们将 8 悬臂梁-质量块结构的加速度计与传统的 4 悬臂梁-质量块结构的加速度计进行简单的比较.我们把 8 悬臂梁-质量块结构等效成单层 4 悬臂梁-质量块的结构,如图 9 所示,将双层悬臂梁沿 *z* 方向移动到质量块厚度的中心位置,等效成为厚度加倍的单层悬臂梁,其他的参数保持不变.利

用 ANSYS 软件对该 4 悬臂梁-质量块结构进行有限元分析,我们得到其前 4 阶振动模态的谐振频率如表 2 所示.

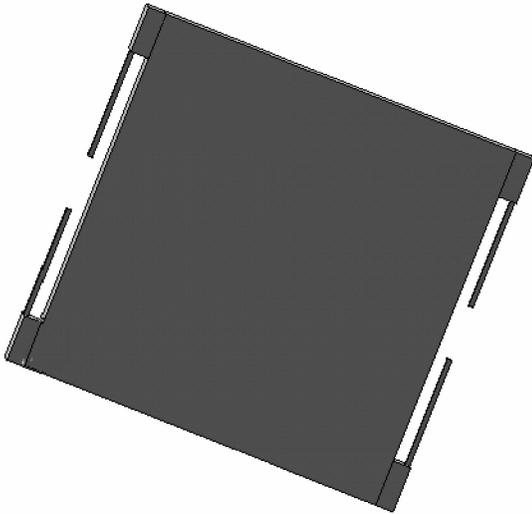


图 9 4 悬臂梁-质量块结构简图
Fig.9 4-beams/mass structure

表 2 4 悬臂梁-质量块结构前 4 阶的谐振频率

Table 2 Frequency of the first four models of the four suspension beams-mass structure

模态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
频率/Hz	2421.7	2876.8	3449.3	5407.1

其中第 3 阶模态是我们所需要的沿 z 方向振动的模态,它和第 2 阶模态相差不大,工作时容易受到 2 阶模态的干扰^[6].和表 1 相比,我们可以看见具有双层 8 悬臂梁-质量块结构的加速度计其敏感方向(z 方向)的谐振频率和非敏感方向的谐振频率差别比较大,工作时不易受到其他模态的干扰.

另外考虑到工艺因素,如硅片厚度不均匀以及加工偏差,质量块的质量分布很有可能不均匀,从而对加速度计的性能造成影响.Jiang 等人^[9]曾用动态有限元(dynamic finite element)的方法讨论了工艺偏差对微机械惯性器件中电容检测的影响,我们用 ANSYS 简单模拟了加速度计质量块质量分布不均对动态电容的影响.为简化起见,我们在质量块的局部增加 0.5%~2%的质量,其他参数不变,人为造成质量块的质量分布不均,用 ANSYS 分别对 8 悬臂梁-质量块结构和 4 悬臂梁-质量块结构进行模拟,得到质量块的质量变化和动态电容的变化关系如图 10 所示.在质量块局部增加相同质量的条件下,8 悬臂梁-质量块结构的动态电容变化小于 4 悬臂梁-质量块结构的动态电容变化,由此可见 8 悬臂梁-质量块结构对质量块的质量分布不均没有 4 悬臂梁-质量块结构敏感,即 8 悬臂梁-质量块结构加速度计的横向灵敏度相对较低.

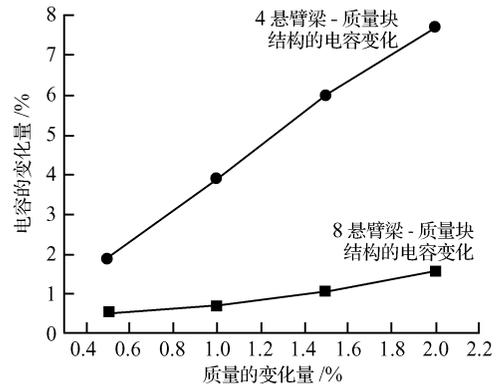


图 10 动态电容随质量块质量变化的趋势

Fig.10 Trend of dynamic capacitance-mass weight change

从以上讨论可以看出,8 悬臂梁-质量块结构的加速度计在模态特性和横向灵敏度特性方面优于传统的单层悬臂梁-质量块结构加速度计.

6 结论

本文提出了一种 8 悬臂梁-质量块结构的新型三明治式硅微机械电容式加速度计,在(111)硅片上制作出了具有信号输出的器件并进行了初步测试.器件测试结果与设计值比较一致,证明器件的设计正确,工艺流程可行.和传统单层悬臂梁-质量块结构的微机械电容式加速度计相比,该加速度计在模态特性和横向灵敏度特性方面具有明显的优越性.

参考文献

- [1] Chen Weiping, Huo Mingxue, Lin Yumin, et al. A novel z-axis capacitive accelerometer using sog structure. IEEE 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2005
- [2] Shan Guangbao, Ruan Xiaoming, Yao Jun, et al. Develop of cantilever micro-silicon accelerometer. Electronic Component & Materials, 2005, 24(5): 17 (in Chinese)[单光宝, 阮晓明, 姚军, 等. 悬臂梁式硅微加速度计的研制. 电子元件与材料, 2005, 24(5): 17]
- [3] Erickson R K. Method for fabricating suspension members for micromachined sensors. United States Patent, No. 5484073, 1996
- [4] Yazdi N, Najafi K. All-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process. J Microelectromech Syst, 2000, 9(4): 544
- [5] Lee S, Park S, Cho D I. The surface/bulk micromachining (SBM) process: a new method for fabricating released MEMS in single crystal silicon. J Microelectromech Syst, 1999, 8(4): 409
- [6] Ji Xunsheng, Wang Shourong. Analysis of characteristics on capacitive silicon micro-accelerometer system. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 446 (in Chinese)[吉训生, 王寿荣. 电

- 容式硅微机械加速度计系统的特性研究. 宇航学报, 2005, 26 (4): 446]
- [7] Bao Minhang. Analysis and design principles of MEMS devices. Elsevier, 2005: 92
- [8] Kim J, Cho D I, Muller R S. Why is (111) silicon a better mechanical material for MEMS. Transducers, 2001: 662
- [9] Jiang Tao, Wang Anlin, Jiao Jiwei, et al. Detection capacitance analysis method for tuning fork micromachined gyroscope based on elastic body model. Sensors and Actuators A, 2006, 128: 52

Design and Fabrication of an Accelerometer with Novel “8-Beams/Mass” Structure *

Wang Yucai^{1,2}, Jiao Jiwei^{1,†}, Duan Fei^{1,2}, Zhang Ying¹, Mi Binwei¹,
Li Jinpeng^{1,2}, Qian Qing¹, and Wang Yuelin¹

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

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new micro-silicon capacitive accelerometer with novel “8-beams/mass” structure was designed and fabricated by applying a micro-machining process to (111) silicon wafer. The proof mass of this accelerometer is supported by eight suspension beams located symmetrically on the top/bottom surface of a (111) silicon wafer. By using an extremely slow rate of Si (111) plane etching in anisotropic KOH, along with DRIE and other MEMS processes, the dimension of these beams can be accurately controlled, and the symmetry of the “8-beams/mass” structure can be achieved. The performance of the accelerometer is measured with a typical resonance frequency of 2.08kHz, quality factor of 21.4, and sensitivity of 93.7mV/g.

Key words: accelerometer; MEMS; anisotropic etching

EEACC: 7230; 8340

Article ID: 0253-4177(2007)05-0783-06

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA04Z312)

† Corresponding author. Email: jiaojw@mail.sim.ac.cn

Received 14 November 2007, revised manuscript received 6 January 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics