

单片集成的高性能压阻式三轴高 g 加速度计的设计、制造和测试

董培涛^{1,2,†} 李昕欣² 张 颀² 吴学忠¹ 李圣怡¹ 封松林²

(1 国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

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

摘要: 设计、制造并测试了一种单片集成的压阻式高性能三轴高 g 加速度计, 量程可达 $10^5 g$. x 和 y 轴单元均采用一种带微梁的三梁-质量块结构, z 轴单元采用三梁-双岛结构. 与传统的单悬臂梁结构或者悬臂梁-质量块结构相比, 这两种结构均同时具有高灵敏度和高谐振频率的优点. 采用 ANSYS 软件进行了结构分析和优化设计. 中间结构层主要制作工艺包括压阻集成工艺和双面 Deep ICP 刻蚀, 并与玻璃衬底阳极键合和上层盖板 BCB 键合形成可以塑封的三层结构, 从而提高加速度计的可靠性. 封装以后的加速度计采用落杆方法进行测试, 三轴灵敏度分别为 2.28, 2.36 和 $2.52 \mu V/g$, 谐振频率分别为 309, 302 和 156 kHz. 利用东菱冲击试验台, 采用比较校准法测得 y 轴和 z 轴加速度计的非线性度分别为 1.4% 和 1.8%.

关键词: 硅微机械加工技术; 三轴加速度计; 压阻; 高 g ; 塑封

EEACC: 7230

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)09-1482-06

1 引言

基于硅微机械加工技术制作的加速度计具有体积小、重量轻、性能高和批量制作带来的成本低等优点, 现在已经应用在很多测试场合, 如汽车安全气囊、碰撞测试、消费类电子产品、地震波检测、军用惯性技术导航等^[1,2]. 爆炸、冲击测试以及侵彻弹引信是其中一种非常特殊的应用, 需要检测的加速度可以高达几万 g 甚至几十万 g ^[3~6], 要求加速度计不仅要具有高的灵敏度, 还要具有高的谐振频率和较大的带宽, 从而可以快速准确地响应被测冲击加速度.

许多应用也会要求进行三轴测试, 这可以通过两种途径来实现: 一是将 3 个独立的加速度计安装在互相垂直的 3 个方向上; 二是采用单片集成的三轴加速度计. 对于第一种方案, 不容易保证三轴之间的安装精度, 同时也存在体积大、成本高的缺点. 第二种方案则具有由光刻工艺所带来的很高的轴间位置精度, 单片集成的三轴加速度计也具有成本低和体积小的优点.

单片集成的三轴压阻式加速度计主要有两种实现结构: 单质量块结构^[7]和三质量块结构. 对于单质量块结构, 几组支撑梁连接到一个惯性质量块上, 在

不同的支撑梁或者支撑梁的不同位置扩散压阻器件, 分别实现不同轴向加速度的检测. 由于三轴的检测是通过一个质量块耦合在一起的, 因此存在较大的交叉轴灵敏度, 不容易对 3 个轴分别优化设计. 三质量块的结构则是通过 3 个不同的单元分别检测 3 个轴向的加速度, 这样就解决了轴间的耦合问题. 对这种结构来说, 3 个单元之间的工艺兼容性是需要重点考虑的问题.

除加速度计本身可动部件的断裂外, 封装结构损坏或者引线断裂也是造成高 g 加速度计失效的两个重要原因^[6]. 塑封和灌封是两种有效的封装形式, 可以大大增加可靠性, 提高加速度计的性能^[6,8]. 这就要求加速度计具有三层结构, 即上层盖板和下层衬底中间夹着结构层, 保护加速度计的可动部分, 使之与外部塑封或者灌封材料隔绝.

基于以上分析, 本文开发了一种单片集成的高性能压阻式三轴高 g 加速度计, 同时具有高灵敏度和高谐振频率的优点以及很小的非线性度, 具体的设计、制造和测试过程如下.

2 设计

如图 1 所示, 本文提出的三轴高 g 加速度计采用硅-硅-玻璃键合的三层结构. 加速度计的检测部

† 通信作者. Email: peitaodong@mail.sim.ac.cn

2007-04-09 收到

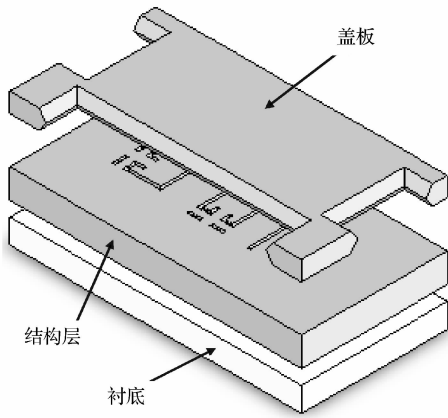


图 1 三轴高 g 加速度计整体结构示意图

Fig.1 Schematic of the triaxial high-g accelerometer

分制作在中间硅层上,底层玻璃衬底和上层硅盖板一起保护中间结构层.检测部分如图 2 所示, x, y 轴单元采用带微梁的三梁-质量块结构,互相垂直布置, z 轴单元采用三梁-双岛结构.与传统的悬臂梁结构或者悬臂梁-质量块结构相比,我们采用的这两种结构均具有高灵敏度、高谐振频率的优点.

2.1 x, y 轴检测单元

如图 2 所示, x 轴和 y 轴单元分别都由主悬臂梁、检测质量块、质量腿、压阻微梁和参考电阻组成.质量块由主悬臂梁连接在外围固定框架上,两组微梁和质量腿分别对称地布置在主悬臂梁两边.微梁上通过硼离子注入工艺形成检测用的压阻,在框架上制作了同样形状、同样大小的参考电阻,和检测压阻一起构成惠斯通电桥. x, y 轴单元的敏感方向在硅片平面内,当经受敏感方向上的加速度时,质量块会带动主悬臂梁产生弯曲.由于质量腿的存在,微梁末端的变形位移可以分为两个部分:随质量块的平

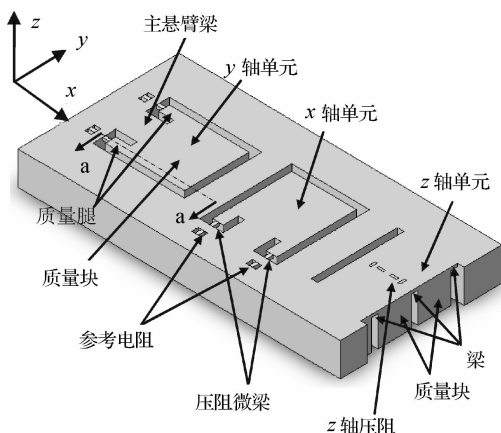


图 2 结构层示意图

Fig.2 Schematic of the structure layer

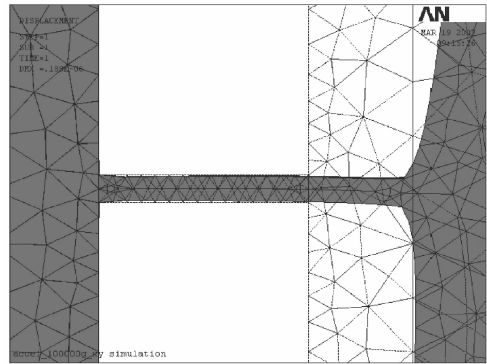


图 3 微梁轴向变形示意图

Fig.3 Axial stretched tiny beams

动位移和绕悬臂梁末端的反方向转动位移.优化微梁与主悬臂梁之间的距离,就可以使这两个变形位移互相抵消,从而使得微梁仅受轴向的拉伸或压缩变形.这样,检测用的两个压阻一个变大,一个变小,电桥的输出电压就反映了外部加速度的大小.微梁的尺寸很小,仅为 $4\mu\text{m} \times 30\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$,质量块的很小的位移就可以在微梁中产生很大的应力,因此这种结构的加速度计具有很高的灵敏度.同时,主悬臂梁刚度很大,保证了加速度计也同时具有很高的谐振频率.

图 3 所示为 ANSYS 仿真的在敏感方向上承受 $10^5 g$ 载荷时的微梁轴向拉伸变形示意图,此时在对称位置上的另一个微梁呈轴向压缩变形.图 4 所示为微梁内三个方向上的应力分布图.从图 4 中可以看出,微梁内的应力主要集中在轴向上,两个横向方向的应力都几乎为零.由于惠斯通电桥为半桥结构, x 轴和 y 轴单元加速度计灵敏度可以近似地表示为:

$$S_{x,y} = \frac{1}{4} \times \frac{\pi_{44} \sigma V_p}{a} \quad (1)$$

其中 π_{44} 为 p 型硅的压阻系数,由硼离子的掺杂浓度和加速度计使用温度决定.根据工艺条件,我们取

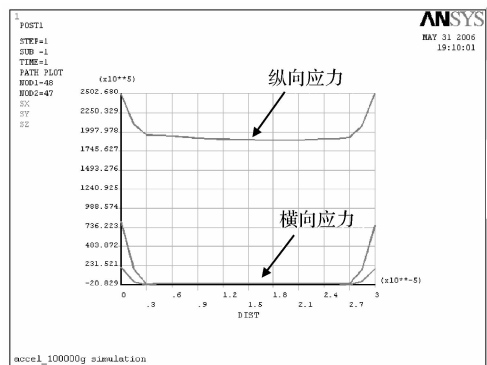


图 4 微梁上的应力分布

Fig.4 Stress distribution in tiny beams

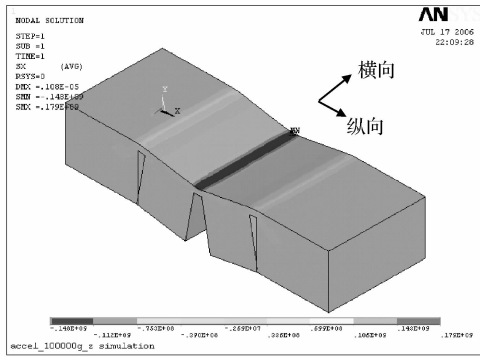


图 5 Z 轴单元变形及应力分布示意图

Fig.5 Deformation and stress distribution of Z axis element

为 $80 \times 10^{-11} / \text{Pa}$; σ 为微梁内的轴向应力; V_p 为电桥的输入电压, 根据实际使用条件, 我们取为 5V ; a 为外部加速度.

2.2 z 轴检测单元

z 轴单元采用三梁-双岛结构. 图 5 所示为在敏感方向上经受 $10^5 g$ 冲击加速度时, ANSYS 模拟分析得到的变形及应力分布图. 从图中可以看出, 中间梁上的应力比两端梁上的应力大且分布也更均匀, 所以我们把惠斯通电桥的四个压阻全部做在中间梁上, 以增大灵敏度, 或者说在保持灵敏度不变的条件 下提高 z 轴单元的谐振频率.

图 6 所示为中间梁上的应力分布曲线, 可以看出由于梁的横向尺寸比纵向尺寸大, 在计算灵敏度时, 不能再忽略横向应力的影响, 其表达式为:

$$S_z = \frac{1}{2} \times \frac{\pi_{44}(\sigma_1 - \sigma_t) V_p}{a} \quad (2)$$

式中 σ_1, σ_t 分别为中间梁上的纵向应力和横向应力.

为了保持加工工艺的一致性, x 轴、y 轴微梁与 z 轴的梁厚均设计为 $50\mu\text{m}$. 三轴灵敏度均为 $2\mu\text{V/g}$,

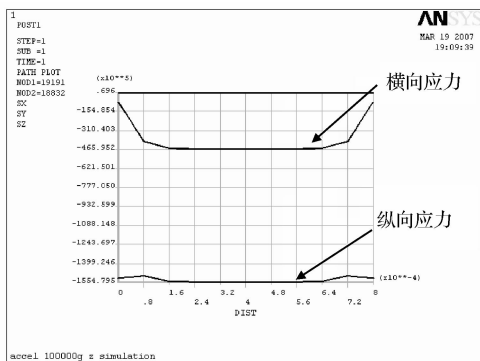


图 6 中间梁上的应力分布

Fig.6 Stress distribution in middle beam

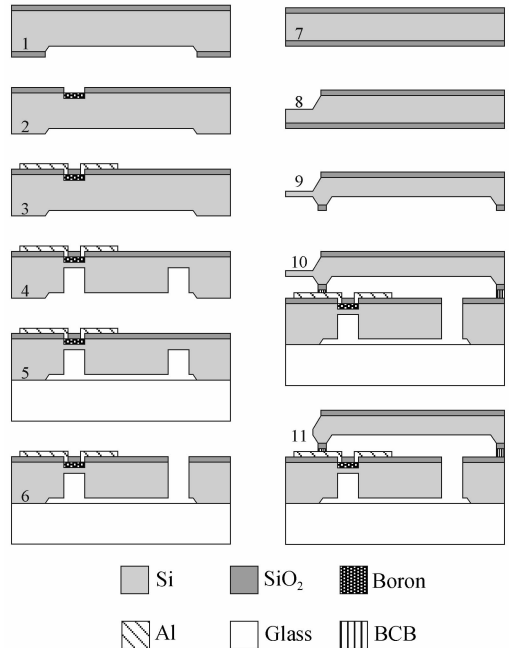


图 7 制作工艺

Fig.7 Fabrication process

通过 ANSYS 仿真, x, y 轴单元的谐振频率为 344kHz , z 轴单元的谐振频率为 164kHz .

3 工艺

本文所提出的三轴高 g 加速度计采用 $\phi 100\text{mm}$ n 型(100)双抛硅片制作, 厚度为 $445 \sim 450\mu\text{m}$, 电阻率为 $1 \sim 10\Omega \cdot \text{cm}$. 工艺流程如图 7 所示, 沿图 2 中“a-a”剖面: (1)中间结构层硅片氧化, 光刻并以 SiO_2 做掩模, 在 KOH 中腐蚀出 $4 \sim 5\mu\text{m}$ 的浅坑, 以使可动部分在结构释放以后可以自由运动; (2)硼离子注入, 并退火形成压阻区域; (3)溅射铝并光刻、腐蚀、合金化形成铝布线; (4)背面 ICP 刻蚀, 这一步工艺非常关键, x, y 轴微梁厚度和 z 轴三梁厚度就是在这一步形成的, 因此刻蚀深度必须精确控制; (5)结构层和衬底玻璃阳极键合; (6)结构层正面 ICP 刻蚀, 释放可动结构; (7)上层盖板氧化; (8)盖板光刻正面并 KOH 腐蚀, 这一部分为正对结构层上铝电极部分的区域; (9)盖板光刻反面并 KOH 腐蚀, 这一部分包括正对结构层上铝电极部分的区域和可动结构部分的区域; (10)上层盖板与结构层 BCB 键合; (11)ICP 刻蚀盖板, 露出铝电极区域; (12)划片、封装.

划完片后的芯片大小为 $5.8\text{mm} \times 2.8\text{mm} \times 1.3\text{mm}$. 图 8 所示为制作好的芯片的 SEM 照片, 其中(a)为整体结构照片; (b)为盖板键合前拍摄的 x 轴或 y 轴单元照片; (c)为盖板键合前拍摄的 z 轴单

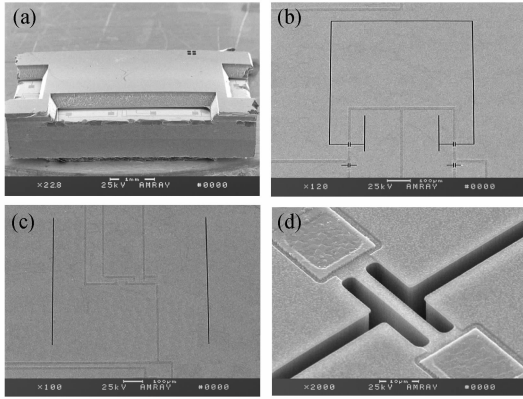


图 8 芯片扫描电镜照片
Fig.8 SEM photos of the chip

元照片；(d)为微梁照片。

4 测试

高 g 加速度计的测试是一个相对困难的问题。对于低量程的加速度计，可以利用激振器进行标定，但一般激振器的加速度只能从几个 g 到几十个 g，所以这种测试方法不适合于高 g 加速度计。国际上一般采用 Hopkinson 杆法进行高 g 加速度计的校准^[9]，这种方法可以测试高达 $10^5 g$ 以上的冲击加速度，但又存在设备昂贵的问题。当精度要求不是很高时，可以采用落杆法对高 g 加速度计的灵敏度进行校准。

测试系统如图 9 所示。被测的加速度计安装在一根钢杆上，从一定高度自由落体与钢砧碰撞后反弹，这一冲击过程中加速度计的输出经过数据采集系统输入到计算机中。

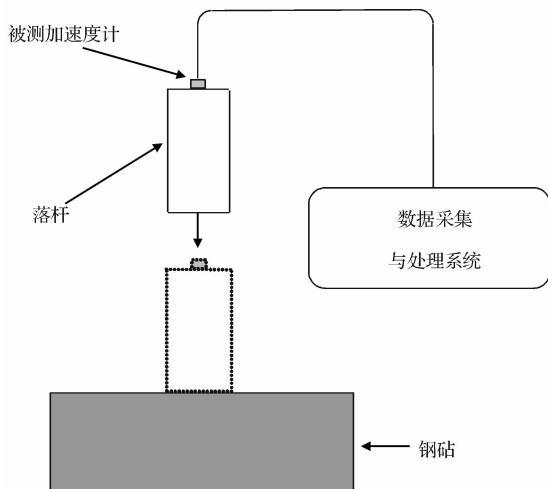


图 9 落杆校准法
Fig.9 Dropping bar calibration method

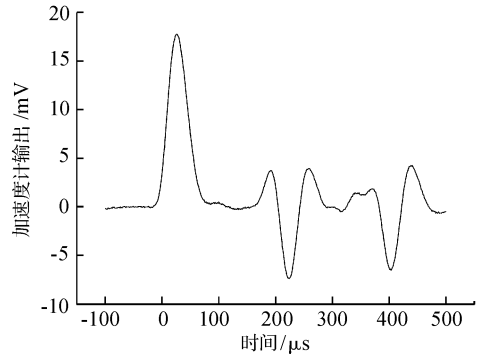


图 10 落杆测试加速度计输出波形
Fig.10 Wave response of the accelerometer on dropping bar test

设钢杆下落前的高度为 h_1 ，规定向上为正，则在钢杆与钢砧接触前的瞬间，钢杆的速度为 $v_1 = -\sqrt{2gh_1}$ ，设碰撞恢复系数为 k ，则反弹后的速度为 $v_2 = k\sqrt{2gh_1}$ ，因此，整个碰撞过程速度的改变为：

$$\Delta v = v_2 - v_1 = (1 + k)\sqrt{2gh_1} \quad (3)$$

定义碰撞起始时刻为 $t = 0$ ，设碰撞持续时间为 τ ，杆的下端面由于碰撞而经受的加速度为 $a(t)$ ，则速度的变化量又可以表示为：

$$\Delta v = \int_0^\tau a(t)dt \quad (4)$$

设加速度计的灵敏度为 S ，则加速度计的输出为：

$$u(t) = Sa(t) \quad (5)$$

所以，在整个碰撞持续过程中，加速度计输出的积分为：

$$U = S \int_0^\tau a(t)dt = S\Delta v \quad (6)$$

U 可以通过对计算机记录的加速度计波形输出积分得到，而 Δv 可以通过(1)式计算得出，所以加速度计的灵敏度为：

$$S = \frac{U}{\Delta v} \quad (7)$$

一般来说，落杆冲击形成的波形近似为半正弦，但上式对任意的碰撞波形都成立。

图 10 所示为一次典型的落杆测试波形。落杆高度为 15cm，脉宽 $68\mu s$ ，冲击加速度为 $7800g$ 左右，灵敏度 $2.28\mu V/g$ 。第一个波形为落杆冲击的主波形，后面的为加速度计对碰撞形成的应力波在杆中来回反射的响应。采用这种校准方法，三轴的灵敏度分别为 $2.28, 2.36$ 和 $2.52\mu V/g$ 。在进行数据采集与处理时，如果不加滤波，就可以在主波形上看到叠加的谐振波^[9]，从而可以得到三轴的谐振频率分别为 309, 302 和 156kHz。

对高 g 加速度计来说，非线性度也是一个非常

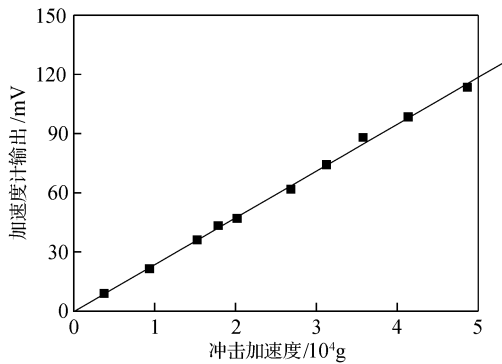


图 11 y 轴加速度计线性输出

Fig. 11 Linear output of y axial element

重要的性能参数. 落杆测试法所能达到的冲击加速度一般最高为 $20000g \sim 30000g$, 为了在更宽的量程范围内考察非线性度, 我们利用了苏州东菱振动试验仪器有限公司的冲击试验台. 具体测试系统和图 9 类似, 不同之处在于, 把一个校准过的标准高 g 加速度计和被测加速度计背靠背地安装在冲击试验台上, 通过标准加速度计的输出就可以知道冲击加速度的大小. 采用这种测试方法, 可以在 $0 \sim 50000g$ 的量程范围内对被测加速度计进行校准. 由于 x 轴和 y 轴结构及尺寸完全一致, 我们仅测试了 y 轴和 z 轴的非线性度. y 轴和 z 轴加速度计随冲击加速度

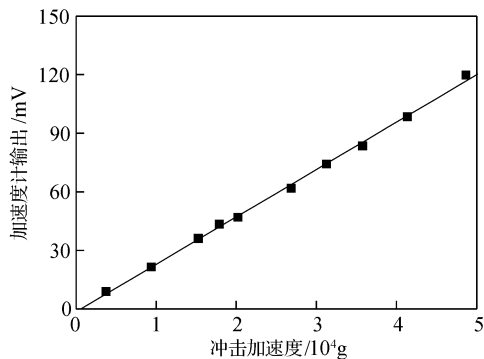


图 12 z 轴加速度计线性输出

Fig. 12 Linear output of z axial element

变化的线性输出分别示于图 11 和图 12 中, 从测试数据中可以计算得到 y 轴和 z 轴的非线性度分别为 1.4% 和 1.8%.

5 结论

本文设计、制作并测试了一种单片集成的压阻式高性能三轴高 g 加速度计, 该加速度计的三轴均同时具有高灵敏度与高谐振频率的优点, 可以满足爆炸、冲击以及侵彻弹引信对三轴高冲击测试的要求. 特别是 x 轴和 y 轴采用的带微梁的三梁-质量块结构, 可以独立出来构成一种单轴高 g 加速度计, 其性能也比国内目前已经研制的同类产品要好.

参考文献

- [1] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined inertial sensors. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1640
- [2] Najafi K, Chae J, Kulah H, et al. Micromachined silicon accelerometers and gyroscopes. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, 2003: 2353
- [3] Srikanth V, Senturia S. Reliability of micro-electro-mechanical systems (MEMS) in shock environments. *J Microelectromech Syst*, 2002, 11: 206
- [4] Ning Y, Loke Y, McKinnon G. Fabrication and characterization of high g -force, silicon piezoresistive accelerometers. *Sensors and Actuators*, 1995, A48: 55
- [5] Dong Jian, Li Xinxin, Wang Yuelin, et al. Silicon micromachined high-shock accelerometers with a curved-surfaced-application structure for over-range stop protection and free-mode resonance depression. *J Micromech Microeng*, 2002, 12: 742
- [6] Davies B, Barron C, Montague S, et al. High g MEMS integrated accelerometer. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3046: 52
- [7] Kwon K, Park S. Three axis piezoresistive accelerometer using polysilicon layer. *Transducers*, 1997: 1221
- [8] Huang Weidong, Cai Xia, Xu Bulu, et al. Package effects on the performances of MEMS for high- g accelerometer with double-cantilevers. *Sensors and Actuators A*, 2003, 102: 268
- [9] Togami T C, Baker W E, Forrestal M J. A split hopkinson bar technique to evaluate the performance of accelerometers. *J Appl Mechan*, 1996, 63: 353

Design, Fabrication, and Characterization of a High-Performance Monolithic Triaxial Piezoresistive High- g Accelerometer

Dong Peitao^{1,2,†}, Li Xinxin², Zhang Kun², Wu Xuezhong¹, Li Shengyi¹, and Feng Songlin²

(1 College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

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

Abstract: A silicon machined high-performance monolithic triaxial piezoresistive accelerometer is developed for measurements on the order of 100,000 g . A three-beam-mass scheme with tiny beams is developed for the x and y axial elements, and a three-beam-twin-mass structure is developed for the z axial element. Both of these structures feature high sensitivity and high resonance frequency compared with a conventional cantilever structure or cantilever-mass structure. ANSYS is used to analyze and optically design the accelerometer. The three sensing elements are monolithically integrated by micromachining techniques of double-sided deep etching combined with piezoresistive processes. The middle structure silicon layer is anodic bonded with glass substrate and BCB bonded with a top cap silicon layer for the purpose of plastic packaging to improve the reliability of the accelerometer. A dropping-bar system is used to characterize the accelerometer. The sensitivities in the x , y , and z axes are measured to be 2.28, 2.36, and 2.52 $\mu\text{V/g}$, respectively, while the corresponding resonant frequencies are 309, 302, and 156 kHz. Using a Dongling shock test machine, the nonlinearity is tested by comparison calibration and measured to be 1.4% and 1.8% for the y and z axial elements, respectively.

Key words: silicon micromachining technology; triaxial accelerometer; piezoresistive; high- g ; plastic package

EEACC: 7230

Article ID: 0253-4177(2007)09-1482-06

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

Received 9 April 2007