

DOI: 10.7652/xjtuxb201308006

多梁结构压阻式测振加速度传感器

刘岩, 赵玉龙, 孙禄, 张学锋, 蒋庄德

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为满足制造装备智能化发展对测振传感器的需求, 针对常见加速度传感器在性能、成本和微型化上的不足, 研制了一种基于微机电系统技术的多梁结构压阻式加速度传感器。通过将 2 根短小敏感梁引入传统双桥结构的方式, 在提升固有频率的同时, 保证了传感器仍具有较高的测量灵敏度。利用敏感梁上的最大应力和结构固有频率相乘的结果作为性能评价标准, 结合梁变形理论和实际工艺条件确定了传感器的结构尺寸。采用硅材料刻蚀、硼离子注入、溅射金属铝及阳极键合等工艺, 制作了传感器芯片。实验结果表明, 所研制的加速度传感器能够准确测量不同频率下的加速度信号, 在每 g 下的灵敏度达到了 0.544 mV , 满量程精度达到了 1.76% , 固有频率达到了 13.61 kHz , 相对于双桥结构传感器, 其综合性能提升了近 85% 。

关键词: 微机电系统; 加速度传感器; 固有频率; 灵敏度

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)08-0033-05

Multi-Flexure Piezoresistive Accelerometer for Vibration Detection

LIU Yan, ZHAO Yulong, SUN Lu, ZHANG Xuefeng, JIANG Zhuangde

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To meet the requirements for vibration detection sensor in intelligent manufacturing and overcome shortcomings in the existing accelerometers including unsatisfactory performances, higher cost and bulky volume, a multi-flexure piezoresistive accelerometer is developed based on micro-electro-mechanical system (MEMS) technology. The proposed accelerometer introduces two tiny beams into the conventional quad-beam structure, which enhances the accelerometer's natural frequency without decreasing the sensitivity. The product of natural frequency and sensitivity is regarded as the evaluation factor to determine the sensor structural dimensions, considering the constraints from analytical optimization and manufacturing process. The sensor chip is fabricated by silicon etching, boron implantation, Al sputtering and anodic bonding. The experimental results show that the developed accelerometer possesses a sensitivity of 0.544 mV per gravity acceleration, a full scale accuracy of 1.76% and natural frequency of 13.61 kHz , and can accurately acquire the acceleration signal with different frequencies. Compared with the conventional quad-beam sensor, the comprehensive property of the proposed multi-flexure accelerometer is improved by 85% .

Keywords: micro-electro-mechanical system; accelerometer; natural frequency; sensitivity

收稿日期: 2012-11-16。 作者简介: 刘岩(1987—), 男, 博士生; 赵玉龙(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724405); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1033); 国家自然科学基金资助项目(51275402)。

网络出版时间: 2013-06-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130621.1113.001.html>

目前,我国装备制造业依然停留在产业链的低端,智能制造装备基础薄弱,在新型传感器等关键智能装置方面仍依赖于国外进口^[1],这其中加速度传感器是装备状态监测和故障诊断的重要感知部件,其性能直接影响智能装备工艺决策与执行加工的效率。目前常用的压电式加速度传感器尽管在性能上能够满足振动测试的要求,但在微型化、集成化和低成本方面的不足限制了它在智能装备和无线检测等领域中的广泛应用^[2-3]。近年来,将具有微型化与大规模生产潜力的微机电系统(MEMS)技术引入加速度传感器的研发已成为引人瞩目的发展方向,出现了面向不同领域、性能各异的压阻式加速度传感器,如用于侵彻武器引信的超大量程加速度传感器^[4]、用于飞行器状态监测的高灵敏度加速度传感器^[5]等。由于各性能之间存在的制约关系,所研制的加速度传感器大多以牺牲非目标性能来换取某一目标性能的提升,而能够用于智能制造装备,同时又具有高固有频率与高测量灵敏度的 MEMS 加速度传感器则鲜有报道。

针对加速度传感器固有频率与测量灵敏度之间的制约关系,本文以小变形-大应力为敏感结构的设计方法,研制了一种 MEMS 多梁结构压阻式测振加速度传感器,给出了传感器的性能测试结果,并对该传感器的工作原理和结构设计进行了论述。

1 传感器设计

1.1 传感器的敏感原理

一般来说,压阻式加速度传感器由弹性体和压阻元件两部分组成。弹性体在惯性力的作用下发生与输入加速度成比例的变形,产生应力,这一应力引起布置在弹性体上的压阻元件的电阻值发生变化,进而破坏惠斯通电桥的平衡,输出电压,实现加速度信号到电信号的转换。弹性体是加速度感知部件,而压阻元件是信号转换部件, MEMS 传感器弹性体与压阻元件的组合方式为:①将 MEMS 压阻平膜芯片键合于弹性体上,可得到键合型传感器^[6];②直接在弹性体上用离子注入技术在敏感区域制作压阻元件,可得到注入型传感器。本文设计的传感器采用离子注入技术。

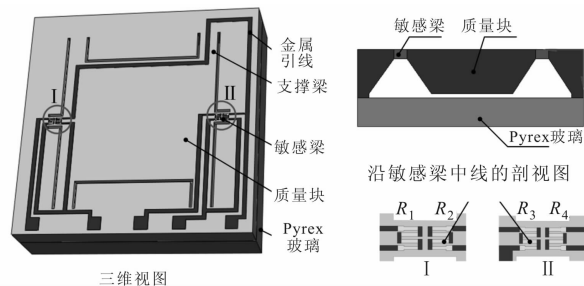
弹性体的固有频率和在加速度作用下产生的应力,直接决定了传感器的固有频率和测量灵敏度。弹性体在加速度 a 的作用下,与其惯性部件的静态位移 x 有如下关系^[7]

$$x/a = M/K = 1/\omega_0^2 \quad (1)$$

式中: K 为等效刚度; M 为等效质量; ω_0 为结构固有角频率。对于结构确定的弹性体,必须通过改变结构尺寸、减小质量块来提升固有频率,但这样会减小结构的静态变形,造成结构应力减小,降低传感器的灵敏度。反之,若提升传感器的测量灵敏度,也会造成传感器固有频率的下降。因此,在高频测振加速度传感器的弹性体设计过程中,需要寻求合适的弹性体结构来增加弹性体刚度,以提升传感器的固有频率,且使压阻元件所处区域能在较小变形下仍拥有足够大的应力,来保证传感器的测量灵敏度。

1.2 传感器的结构设计

如图 1 所示,传感器的质量块由支撑梁和敏感梁支撑,每根敏感梁上沿〈110〉晶向布置 2 个相同的注入式压阻元件,并由集成的金属引线连接成惠斯通全桥检测电路^[8]。由于在普通双桥结构中引入了短小敏感梁,因此增加了弹性体的支撑刚度,提升了传感器的固有频率。同时,由于敏感梁结构尺寸小于支撑梁,在变形相同的情况下,敏感梁上将产生更大的应力,因此保证了传感器具有较高的测量灵敏度。



I、II: 局部放大视图; $R_1 \sim R_4$: 敏感梁上的压阻元件

图 1 传感器芯片示意图

在多梁结构中,敏感梁和支撑梁的厚度 h 相同,根据梁微分方程和瑞利-里兹法计算,在加速度作用下多梁结构敏感梁上的最大应力 σ_m (表示传感器的测量灵敏度)和固有频率 f_m 分别为^[9-10]

$$\sigma_m = \frac{3a_1 a_2^3}{4a_1^3 b_2 h^2 + 2a_2^3 b_1 h^2} m a \quad (2)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2E}{m} \left(\frac{b_1 h^3}{a_1^3} + \frac{2b_2 h^3}{a_2^3} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 分别为敏感梁、支撑梁的长度; b_1 、 b_2 分别为敏感梁、支撑梁的宽度; m 为质量块质量; E 为弹性体的弹性模量。普通双桥结构梁与多梁结构支撑梁的长度、宽度和厚度相同,双桥结构梁上的最大应力和固有频率分别为

$$\sigma_q = \frac{3a_2}{4b_2 h^2} m a \quad (4)$$

$$f_q = \frac{1}{\pi} \left(\frac{Eb_2h^3}{ma_2^3} \right)^{1/2} \tag{5}$$

制造装备振动测试对传感器测量灵敏度和固有频率均有较高的要求,本文以传感器梁上的最大应力和固有频率的乘积作为评价传感器性能的标准,多梁结构、双桥结构传感器的性能因子分别为

$$P_m = \frac{3a}{4\pi} \left[\frac{2Ema_2^3}{a_1h(a_2^3b_1 + 2a_1^3b_2)} \right]^{1/2} \tag{6}$$

$$P_q = \frac{a}{\pi} \left(\frac{Em}{a_2b_2h} \right)^{1/2} \tag{7}$$

则

$$\frac{P_m}{P_q} = \left(\frac{2a_2^4b_2}{a_1a_2^3b_1 + 2a_1^4b_2} \right)^{1/2} \tag{8}$$

当 $P_m/P_q > 1$ 时,引入短小梁提升了传感器的性能,此时多梁结构的综合性能优于普通双桥结构;当 $P_m/P_q < 1$ 时,短小梁的引入未起到提升传感器性能的作用,多梁结构比普通双桥结构的综合性能差。当 $a_2 = 400 \mu\text{m}$ 、 $b_2 = 125 \mu\text{m}$ 时, P_m/P_q 随 a_1 、 b_1 变化的曲线如图 2 所示。从图中可以看出,多梁结构的综合性能随着 a_1 的增加而下降,当 a_1 超过特定阈值时,敏感梁将不再具有性能增强的作用。这是因为敏感梁长度的增加引起结构固有频率下降速度超过了敏感梁上应力的增加速度,进而降低了传感器的综合性能。当 $P_m/P_q = 1$ 时, a_1 的阈值取决于敏感梁的宽度 b_1 ,如图 3 所示。综合图 2、图 3,多梁结构中的敏感梁应尽量短且细,以提升传感器性能,但传感器尺寸不能仅以性能最大化作为标准,约束条件还应包括微加工工艺的能力和传感器线性度的要求等。例如,梁上压阻元件的尺寸、内部间隙和金属引线的尺寸等限制了敏感梁的最小长度和宽度,为保证传感器的输出线性度,敏感梁上最大应变绝对值应不超过 500×10^{-6} [11]。综合考虑传感器的性能、工艺及线性度等,得到的约束条件如下。

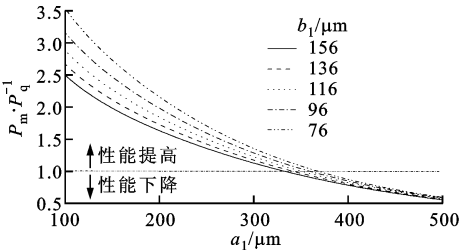


图 2 性能因子比值的变化曲线

(1)传感器的性能应满足振动测试的要求,即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &\geq 20 \text{ MPa} \\ f_m &\geq 10 \text{ kHz} \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

(2)关键尺寸应具有可加工性,即

$$\left. \begin{aligned} 200 \mu\text{m} &\leq a_1 \leq 1\,000 \mu\text{m} \\ b_1 &\geq 100 \mu\text{m} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

(3)敏感梁上最大应变不能超过 500×10^{-6} ,即

$$\max(\epsilon_l, \epsilon_t) \leq 500 \times 10^{-6} \tag{11}$$

式中: ϵ_l 、 ϵ_t 为结构敏感梁上的纵向和切向应变。由于传感器在封装、实验等过程中可能受到意外撞击,因此为保证传感器的可靠性,将传感器的设计量程定为 $100g$ [12]。由图 2 并结合各约束条件,确定在设计量程下的多梁结构尺寸:敏感梁为 $240 \mu\text{m} \times 116 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$;支撑梁为 $400 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$;质量块为棱台结构,其上表面与支撑梁连接的边长为 $3\,000 \mu\text{m}$,而另一边长为 $2\,500 \mu\text{m}$,厚度为 $390 \mu\text{m}$ 。该尺寸下的 $P_m/P_q = 1.565$,即多梁结构传感器比双桥结构传感器的综合性能提高了 1.565 倍。

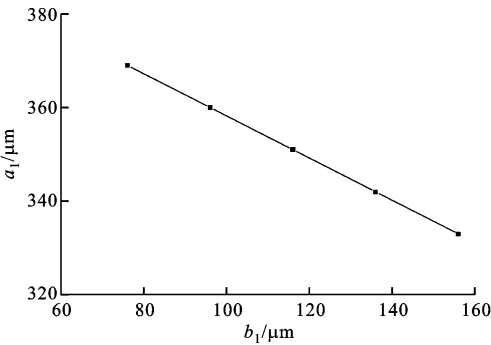


图 3 $P_m/F_q = 1$ 时 a_1 与 b_1 对应的阈值

2 传感器制作与测试

2.1 传感器芯片的制作

传感器芯片的原始坯料为 $400 \mu\text{m}$ 厚的 n 型 (100)晶面双抛单晶硅片,以及 $500 \mu\text{m}$ 厚的 Pyrex 7740 玻璃片,整个微加工过程需要 8 块掩模板,其中 7 块用于制作传感器的敏感结构和芯片上的金属引线,与焊盘,剩余 1 块用于制作 Pyrex 玻璃上的金属电极,以防止在传感器芯片加工或使用过程中出现静电吸附,导致传感器失效 [12]。传感器压阻元件采用温度系数小、压阻系数大的 p 型电阻,通过硼离子注入的方式加工,注入浓度为 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,得到每个压阻元件的阻值约为 $5.3 \text{ k}\Omega$ 。传感器芯片以单晶硅作为基底,主要加工工艺包括低压化学气相沉积(LPCVD)、KOH 背腔各向异性湿法腐蚀、正面感应耦合等离子(ICP)刻蚀等。芯片上集成的金属引线和连接焊盘采用溅射金属 Al 的方法制作,硅片背面的 Pyrex 玻璃通过阳极键合工艺与弹性体紧密粘 [13]。传感器芯片如图 4 所示,图中右上角为

传感器的局部版图,右下角为与之对应的局部芯片。

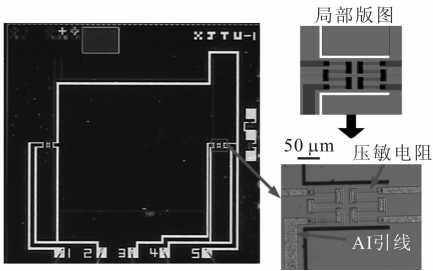


图 4 制作的传感器芯片(局部)

2.2 实验与结果

通过静态实验主要获得了传感器的静态输入输出特性,即灵敏度、精度等,而动态实验主要获得了传感器的固有频率和不同频率下的测量准确率,实验对象为同一批次加工的多梁结构传感器和双桥结构传感器。双桥结构传感器中梁的尺寸与多梁结构传感器中的支撑梁相同,但压阻元件需根据应力分布规律重新进行布置。

静态实验使用的主要设备仪器有 SY30-3 转盘式稳态加速度试验机(东菱振动,苏州)、IT6322 直流电源(ITECH,台湾)以及 8845A 台式万用表(FLUKE,美国)。为使传感器的敏感方向与转盘径向平行,将传感器样机用专用夹具固定在试验机的转盘上,传感器电桥由 3 V 直流电压激励,在 0~30g 加速度范围内以 3g 为间隔对传感器进行了 3 次加载、卸载循环测试,测得的实验数据经最小二乘拟合后得到的静态输入输出曲线如图 5 所示。根据实验数据计算得到多梁结构的传感器在每 g 下的测量灵敏度为 0.544 mV,满量程非线性度为 1.6%、满量程重复性误差为 0.54%、满量程迟滞误差为 0.5%,计算得到本文研制的传感器的满量程精度^[14]为 1.76%,同时测得普通双桥结构的传感器在每 g 下的测量灵敏度为 0.545 mV。

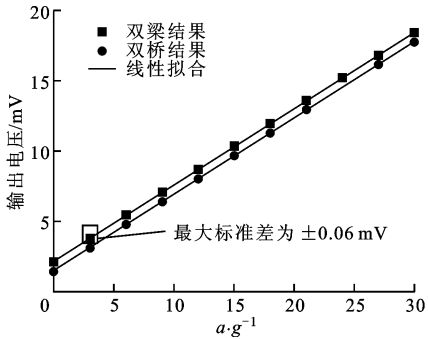


图 5 传感器的静态输入输出曲线

动态实验采用扫频测试的方式,由激振器向被测传感器和参考传感器施加扫频正弦加速度,并测

试 2 个传感器输出电压的比值,实验扫频范围为 0.15~16.5 kHz。当加速度频率等于或者接近被测传感器的固有频率时,传感器发生共振,输出电压的比值出现剧烈变化。实验测得多梁结构传感器的固有频率约为 13.61 kHz,而双桥结构传感器的固有频率仅为 7.35 kHz。为了检验传感器对不同频率加速度测试的准确性,在现有实验条件下,对传感器在 40、160、320 Hz 正弦加速度作用下的电压输出进行了测试,加载的加速度幅值 a 为 $\pm 20 \text{ m/s}^2$,所得实验结果如图 6 所示。在 40、160、320 Hz 时,传感器测得的 a 分别为 19.96、19.29 和 18.76 m/s^2 ,因此传感器准确识别出了所输入加速度的频率信息,且保持了较好的输出稳定性。

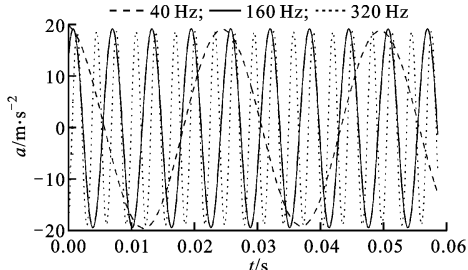


图 6 不同频率下测得的加速度曲线

以多梁结构传感器的性能参数作为参考,将另几种压阻式加速度传感器的性能参数进行归一化处理后进行对比,得到的结果如表 1 所示。表 1 中传感器的灵敏度结果均为将供电电压换算为 3 V 后的数据,可以看出,相对于其他传感器,本文设计的多梁结构传感器在综合性能上具有非常明显的优势。

表 1 传感器的性能对比

传感器	灵敏度	固有频率	性能因子
多梁结构	1.000	1.000	1.000
双桥结构	1.002	0.540	0.541
文献[2]	0.755	0.823	0.622
文献[15]	1.985	0.298	0.592

2.3 结果分析

由实验结果得到 $P_m/P_q = 1.848$,大于理论计算值 1.565,这主要是由实际灵敏度的偏差引起的。多梁结构传感器和双桥结构传感器的理论灵敏度的比值,通过传感器中敏感梁最大应力值的比值来计算,但双桥结构的敏感梁尺寸较大,从而导致梁上的有效应力未被压阻元件充分利用,使实际测得的灵敏度低于理论值,最终导致实验得到的 P_q 减小。

在传感器的诸多结构尺寸中,梁的厚度是最易

出现加工误差的参数。从式(6)、(7)可以看出,多梁结构和双桥结构传感器的性能因子均与 h 的平方根成反比。当梁的厚度增加10%时,尽管传感器的性能因子仅下降了4.88%,但梁上的最大应力却下降了17.4%,严重影响了传感器的测量灵敏度。反之,当梁的厚度减小时,虽然提高了传感器的测量灵敏度,但同时也对传感器的固有频率产生了影响,因此不利于在高频振动环境下使用。在传感器芯片微加工中,应通过严格控制工艺参数的方式来保证梁厚度的加工精度。

3 结 论

本文以小变形-大应力的设计思路,针对智能制造装备高频振动信号的测试需求,设计并制作了一种具有多梁结构的MEMS压阻式加速度传感器。通过在普通双桥结构的基础上引入短小敏感梁的方式,以微小的灵敏度损失换取了传感器固有频率的明显提升。将固有频率和测量灵敏度的乘积作为评价传感器性能的综合指标,从理论和实验的角度对比了多梁结构和双桥结构传感器的静态特性和固有频率。实验结果表明,多梁结构传感器的灵敏度和固有频率的乘积为双桥结构传感器的1.8倍,且能够准确获取不同频率的加速度信号。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国科学技术部. 智能制造科技发展十二五专项规划 [DB/OL]. [2012-10-15]. <http://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20120424/001e3741a474110045d901.pdf>.
- [2] VOGL A, WANG D T, STORÅS P, et al. Design process and characterisation of a high-performance vibration sensor for wireless condition monitoring [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2009, 153(2): 155-161.
- [3] ALBARBAR A, MEKID S, STARR A, et al. Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: an experimental study [J]. *Sensors*, 2008, 8(2): 784-799.
- [4] LIU Jun, SHI Yunbo, LI Ping, et al. Experimental study on the package of high-g accelerometer [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2012, 173(1): 1-8.
- [5] SANKAR A R, JENCY J G, DAS S. Design, fabrication and testing of a high performance silicon piezoresistive Z-axis accelerometer with proof mass-edge-aligned-flexures [J]. *Microsystem Technologies*, 2012, 18(1): 9-23.
- [6] 赵立波, 赵玉龙, 蒋庄德. 特种压阻式加速度传感器的研制 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(9): 1049-1052.
ZHAO Libo, ZHAO Yulong, JIANG Zhuangde. Research on special piezoresistive acceleration sensor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(9): 1049-1052.
- [7] YAZDI N, AYAZI F, NAJAFI K. Micromachined inertial sensors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1640-1659.
- [8] 吴迪, 谢贵久, 金忠, 等. SOI压力传感器的灵敏度优化设计 [J]. *传感技术学报*, 2012, 25(8): 1064-1068.
WU Di, XIE Guijiu, JIN Zhong, et al. Design optimization for the sensitivity of SOI pressure sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(8): 1064-1068.
- [9] 吴成军. 工程振动与控制 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 47-83.
- [10] BAO Minhang. Micro mechanical transducers: pressure sensors, accelerometers and gyroscopes [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2000: 295-306.
- [11] 赵立波, 赵玉龙, 方续东, 等. 耐高温硅隔离压阻力敏芯片的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 59-63.
ZHAO Libo, ZHAO Yulong, FANG Xudong, et al. High temperature silicon-on-insulator piezoresistive pressure sensitive chip [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(9): 59-63.
- [12] ZHAO Yulong, SUN Lu, LIU Yan, et al. Incorporation of the stress concentration slots into the flexures for a high-performance microaccelerometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(7): 0750021-0750027.
- [13] 秦会峰, 孟庆森, 宋永刚, 等. 硼硅玻璃与硅阳极键合界面形成机理分析 [J]. *功能材料*, 2006, 37(9): 1369-1371.
QIN Huifeng, MENG Qingsen, SONG Yonggang, et al. The mechanisms of anodic bonding between borosilicate glass and silicon [J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 37(9): 1369-1371.
- [14] 李科杰. 新编传感器技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 59-77.
- [15] LI Yuefa, ZHENG Qinglong, HU Yating, et al. Micromachined piezoresistive accelerometers based on an asymmetrically gapped cantilever [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(1): 83-94.

(编辑 管咏梅)