

一种具有应力隔离结构的扭摆式电容加速度计

李 源^{1,2}, 陈 李^{1,2}, 田 颖^{1,2}, 赵 斌^{1,2}, 王亚运^{1,2}

(1. 重庆大学 新型微纳器件与系统技术重点学科实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:基于硅-玻璃键合工艺的扭摆式加速度计,其信号输出对扭转梁上的应力极敏感,而微加工过程中由于硅、玻璃两种材料热膨胀系数不匹配,会在扭转梁上引入较大的热应力,进而引起加速度计温度漂移。为此,提出一种具有应力隔离结构的扭摆式电容加速度计。通过缓冲折叠梁和内支撑框架的优化组合,使热应力难以传递到扭转梁上,从而有效降低加速度计的温度漂移。使用 ANSYS 软件对加速度计进行了模态和热应力分析,结果表明:工作模态的固有频率为 1 352 Hz,远小于其他干扰模态的频率;加速度计的灵敏度为 0.386 pF/g ($g=9.8 \text{ m/s}^2$);相同条件下,不带隔离结构的扭摆加速度计的热应力主要集中在扭转梁的末端,其最大应力约 100 MPa;具有应力隔离结构的加速度计,其热应力主要集中在缓冲折叠梁上,而扭转梁上的应力约为 1.7 MPa,仅为前者的 1.7%。采用硅-玻璃键合和电感耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺,完成了加速度计芯片的制作。

关键词:微机电系统;加速度计;温漂;隔离应力;ICP 刻蚀

中图分类号:TH824

文献标识码:A

A New Pendulous Capacitive Accelerometer With Stress Isolation Structure

LI Yuan^{1,2}, CHEN Li^{1,2}, TIAN Ying^{1,2}, ZHAO Bin^{1,2}, WANG Yayun^{1,2}

(1. Key Disciplines Lab of Novel Micro-nano Devices and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Key Lab. of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The output of pendulous accelerometer based on silicon-glass bonding is sensitive to the stress in the torsion beam. During the micromachining process, the large thermal stress can be generated due to the thermal expansion coefficient mismatch between the Si layer and glass substrate, which results in thermal drift of the accelerometer. Therefore, an accelerometer with stress isolation buffering structure is proposed in this paper. The buffering structure consists of folded-beam and inner suspension frame, which can limit the thermal stress in the torsion beam and reduce the thermal drift of the accelerometer effectively. The ANSYS software is adopted to analyze the natural frequencies and thermal stress distribution of the sensor. The result show that the natural frequency of the first mode is 1 352 Hz, which is much smaller than that of other disturbance modes. The sensitivity of the accelerometer is 0.386 pF/g ($g=9.8 \text{ m/s}^2$). The thermal stress of the accelerometer without stress isolation structure is about 100 MPa and mainly concentrates at the end of torsion beam. While the stress of the accelerometer with stress isolation structure mainly concentrates at the folded-beam, and the stress in torsion beam is about 1.7 MPa, which amounts to only 1.7% of the former. This accelerometer is fabricated by silicon-glass bonding and ICP etch processes.

Key words: MEMS; accelerometer; thermal drift; stress isolation; ICP etch

0 引言

温度漂移是影响电容式加速度计测量精度的关键因素之一,如何减小温漂一直是加速度计乃至其他微机电系统(MEMS)传感器的研究重点^[1]。基于硅-玻璃键合(SOG)和电感耦合等离子体(ICP)刻

蚀的体硅工艺是制作电容式加速度计的典型工艺,但由于硅、玻璃两种材料热膨胀系数不匹配,当外界温度变化时,会产生热应力,导致结构变形,进而引起加速度计输出漂移^[2]。

目前,减小加速度温漂的主要方法有优化芯片

收稿日期:2016-03-04

基金项目:中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室开放课题基金资助项目(KF130006);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120191120022)

作者简介:李源(1991-),男,河南人,硕士生,主要从事微纳器件结构设计与制备方向的研究。通信作者:陈李(1981-),副教授,主要从事微纳器件及系统、精密仪器的研究。E-mail: CL2009@cqu.edu.cn

结构或工艺、温度补偿、改进封装及精密温度控制等。法国航空航天实验室研制的具有应力隔离和振动隔离系统的加速度计,可以抑制温漂,提高加速度计稳定性,其零偏稳定性为 $70 \mu\text{g}$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$),零偏温度灵敏度为 $400 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$,标度因数温度灵敏度为 $60 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[3];徐哲等用曲面拟合法、SVM 模型、RVM 模型有效地预测了加速度计的温漂,经过补偿后,3 种方法分别将温漂由 60 mg 分别降到了 5 mg 、 10 mg 、 15 mg ,提高了加速度计的精度^[4];王帆等报道了一种“抗温漂耦合”结构和“半粘结封装”工艺,“抗温漂结构”将热应力和杨氏模量改变造成的温漂相互抵消,“半粘结封装”工艺隔离了封装管壳与微结构的应力耦合,从而降低了加速度计的温度漂移,提高了其零偏稳定性^[5];李慧武等设计了一种温度补偿电路,将 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内的温漂抑制在一定范围内,改善了加速度计的线性度,有效抑制了传感器外围电路的温度漂移^[6]。

本文针对扭摆式加速度计硅-玻璃键合热应力引起的温度漂移,设计了一种可以隔离热应力的加速度计结构。对其进行有限元仿真对比分析,验证了其应力隔离作用,使用硅-玻璃键合和 ICP 刻蚀工艺完成芯片的制作。

1 加速度计结构设计

1.1 扭摆式电容加速度计

扭摆式电容加速度计的敏感质量块由扭转梁支撑,扭转梁两侧的质量不对称,并与衬底上的两个金属电极形成差分电容。外部加速度的作用使得敏感质量块上产生力矩,进而使质量块发生偏转而改变电容间距。通过测量差分电容的变化,间接地测量加速度大小^[7]。扭摆式加速度计的数学模型为

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + b \frac{d\theta(t)}{dt} + k\theta(t) = K_a(a) \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量; b 为粘性阻尼; k 为转动弹性模量; K_a 为加速度的扭矩系数。由式(1)可得敏感质量块摆角 θ 与加速度 a 的关系为

$$\frac{\theta}{a} = \frac{K_a/J}{s^2 + 2\epsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中: s 为拉普拉斯变换算子; ω_n 为固有频率; ϵ 为阻尼比。

由式(2)可看出,加速度 a 的变化反映为质量块的摆角 θ 的变化。由于硅、玻璃两种材料热膨胀系数不匹配,温度变化时会在结构上会产生热应力,且

扭摆式结构的应力主要集中在扭转梁上,导致敏感质量块的摆角随温度变化发生漂移,从而引起加速度计的输出信号漂移。因此,有效抑制扭转梁上的热应力,是降低扭摆加速度计温度漂移的重要方法。

1.2 结构设计

本文提出一种带应力隔离结构的扭摆式电容加速度计,其结构示意图如图 1 所示。由图可见,敏感质量块通过扭转梁支撑在内支撑框架上;内支撑框架具有较大的刚度,并通过缓冲折叠梁与外支撑框架连接;外支撑框架与玻璃衬底键合在一起,以支撑整个硅结构。温度变化时,外支撑框架与玻璃衬底键合处会引入较大的热应力,并传递至缓冲折叠梁和内支撑框架上。由于内支撑框架刚度较大,难以发生应变,因此热应力难以传递到扭转梁上,主要通过缓冲折叠梁的变形得到释放。

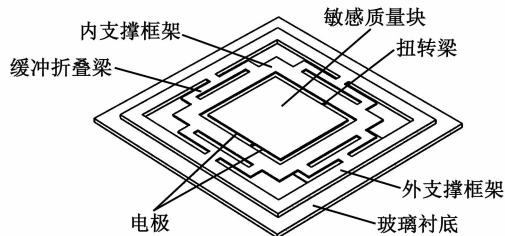


图 1 扭摆式差分电容加速度计结构示意图

经过优化得到加速度计的主要结构参数如表 1 所示。

表 1 加速度计结构参数

硅结构厚度/ μm	50
敏感质量块长/ μm	3 400
敏感质量块宽/ μm	3 000
扭转梁长/ μm	800
扭转梁宽/ μm	40
内支撑框架长/ μm	5 000
内支撑框架宽/ μm	600
缓冲折叠梁长/ μm	3 200
缓冲折叠梁宽/ μm	300
外支撑框架长/ μm	6 400
外支撑框架宽/ μm	400

2 仿真分析

2.1 材料属性

仿真分析中使用的硅材料参数为:弹性模量 160 GPa ,泊松比 0.278 ,密度 $2.34 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

2.2 模态分析

模态分析得到前3阶模态振型如图2所示,频率分别为1352 Hz、6423 Hz、7502 Hz。第一阶模态为敏感质量块绕扭转梁的摆动,是加速度计的工作模态;第二阶模态为敏感质量块沿 z 轴平动;第三阶模态为敏感质量块绕 z 轴转动。由此可见,2阶以上的干扰模态的频率远高于工作模态频率,加速度计具有较好的抗干扰振动能力。

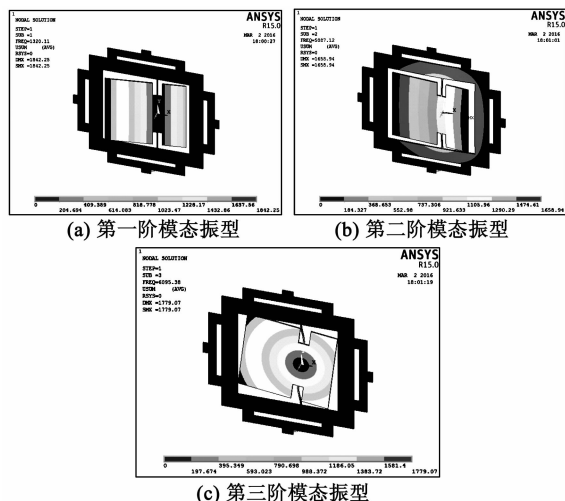


图2 前3阶模态振型

2.3 静力分析

为了获得加速度芯片的灵敏度,对其进行静力分析,仿真静态载荷作用下敏感质量块的位移^[8]。

在敏感结构的 z 方向上加载1g的加速度,质量块的平均位移变化为0.143 μm ,换算为电容变化得到该加速度计的灵敏度为0.386 pF/g。

2.4 热应力分析

用有限元分析软件ANSYS对不带隔离结构和带隔离结构的加速度计分别进行热应力仿真分析。结构温度从-20 $^{\circ}\text{C}$ 变化到70 $^{\circ}\text{C}$,观察热应力分布结果。不带隔离结构和具备隔离结构的仿真结果分别如图3、4所示。

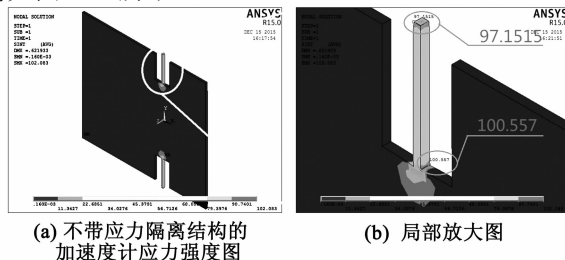


图3 不带应力隔离结构的加速度计应力强度及局部放大图

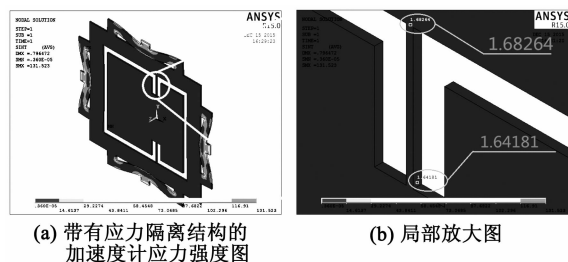


图4 带有应力隔离结构的加速度计应力强度及局部放大图

对比图3、4可知,不带应力隔离结构的加速度计,其热应力主要集中在扭转梁上,最大应力约100 MPa;带有缓冲结构的加速度计,其应力主要集中在缓冲折叠梁上,而扭转梁上的最大应力仅为1.7 MPa。由此可见,缓冲结构实现了热应力的释放和隔离,使得扭转梁上的应力降低至原来的1.7%。

3 工艺流程

采用硅-玻璃键合和ICP刻蚀工艺来进行芯片的加工^[9],工艺步骤如下:

- 在硅片的背面进行热氧化,生成一层二氧化硅(SiO_2)薄膜。
- 光刻,用HF溶液去除裸露的 SiO_2 薄膜。
- 使用KOH溶液刻蚀出浅槽,用HF去除剩余的 SiO_2 薄膜。
- 使用溅射工艺和剥离工艺在prexy7740玻璃上制作Au电极。
- 硅-玻璃键合。
- 使用KOH溶液将硅片减薄至50 μm 。
- 在硅片上进行光刻,采用ICP刻蚀释放结构,完成加速度计芯片的加工。

工艺流程和芯片照片分别如图5、6所示。

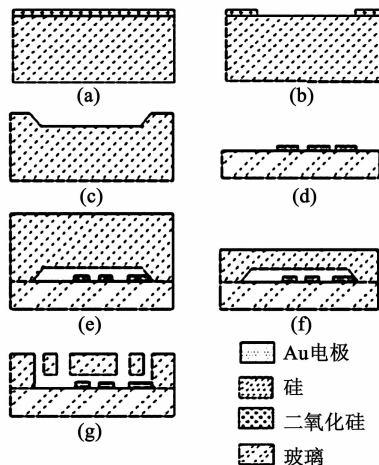


图5 加速度计的工艺流程

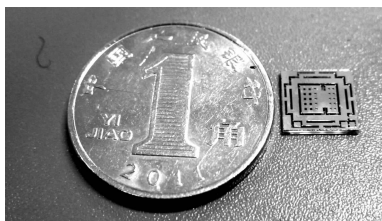


图 6 加速度计加工完成的芯片图

4 结束语

设计了一种具有应力隔离结构的扭摆式差分电容加速度计。为了抑制硅-玻璃键合工艺引入的热应力对加速度计输出的影响,设计了具有较大刚度的内支撑框架和缓冲折叠梁结构,当温度变化时,产生的热应力通过缓冲折叠梁的变形得到释放,进而实现对敏感结构的有效保护和应力隔离,降低加速度计温度漂移。有限元仿真分析证明了该结构对热应力的良好隔离作用。采用硅-玻璃键合和 ICP 刻蚀等工艺完成了加速度计芯片的加工。

参考文献:

- [1] 李世维,王群书,古仁红,等. 高 g 值微机械加速度传感器的现状与发展[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4):892-896.
LI Shiwei, WANG Qunshu, GU Renhong, et al. Situation and trend of high- g micromachined accelerometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(4):892-896.
- [2] BAHARI J, JONES J D, LEUNG A M. Sensitivity improvement of micromachined convective accelerometers[J]. Journal of Microelectromachined Systems, 2012, 21(3):646-655.
- [3] COMI C, CORIGLIANO A, LANGFELDER G, et al. A high sensitivity uniaxial resonant accelerometer [C]//Hongkong, China:2010 IEEE 23rd International Conference on Microelectromechanical Systems (MEMS), IEEE, 2010:260-263.
- [4] 徐哲,刘云峰,董景新. MEMS 加速度计温漂预测补偿模型[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(5):601-604.
XU Zhe, LIU Yunfeng, DONG Jingxin. Thermal drift prognosis and compensation model of MEMS accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(5):601-604.
- [5] 王帆,董景新,赵淑明,等. 硅微振梁式加速度计抗温漂的微结构及工艺设计[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(2):227-232.
WANG Fan, DONG Jingxin, ZHAO Shuming, et al. Temperature insensitive design of MEMS resonant accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(2):227-232.
- [6] 李慧武,刘文怡,马喜宏. 一种电容式加速度传感器的温度补偿电路[J]. 仪表技术与传感器, 2010(5):106-107.
LI Huiwu, LIU Wenyi, MA Xihong. Temperature compensation circuit of capacitive accelerometer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(5):106-107.
- [7] 宋萌,常洪龙,杜松杰,等. 一种低噪声 MEMS 加速度计设计与制作[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(9):88-91.
SONG Meng, CHANG Honglong, DU Songjie, et al. Design and fabrication of a low-noise MEMS accelerometer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(9):88-91.
- [8] BHALLA N, LI S S, CHUNG D W Y. Finite element analysis of MEMS square piezoresistive accelerometer designs with low crosstalk[C]//Sinaia, Romania:2011 IEEE International Semiconductor Conference(CAS), 2011:353-356.
- [9] 金桐,赵新,谭宜勇,等. 一种电容式微加速度计的结构设计和工艺仿真[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5):2177-2185.
JIN Tong, ZHAO Xin, TAN Yiyong, et al. Design and virtual fabrication process of a new kind of capacitive accelerometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5):2177-2185.