

文章编号: 2095-4980(2015)01-0169-05

三明治型微加速度计温度漂移封装胶关系研究

戴 强^{1,2}, 苏 伟¹, 张 德¹, 彭 勃¹, 蒋 刚²

(1.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2.西南科技大学 制造过程测试技术省部共建教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 为探索三明治微加速度计温度漂移与封装胶的关系, 基于有限元分析方法, 结合微加速度计伺服反馈工作原理, 对温度漂移与封装胶关系展开了研究。研究表明: 封装胶厚度、杨氏模量和与封装胶相连的底部玻璃厚度改变均会影响温度漂移, 当封装胶厚度从 15 μm 增加到 35 μm 时, 温度漂移减小约 25%; 封装胶杨氏模量从 4 GPa 减小到 0.25 GPa 时, 温度漂移减小约 70%; 与封装胶相连的底部玻璃厚度从 400 μm 增大到 1 000 μm 时, 温度漂移减小约 37%。并且, 通过与实验结果对比, 表明封装胶所引起的温度漂移约为实测漂移的 1/4~1/3。研究为三明治微加速度计温度漂移与封装胶关系提供了参考。

关键词: 三明治微加速度计; 温度漂移; 封装胶

中图分类号: TN389; TH82 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201501.0169

Relationship between temperature drift and adhesive of sandwich type micro-accelerometers

DAI Qiang^{1,2}, SU Wei¹, ZHANG De¹, PENG Bo¹, JIANG Gang²

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;
2. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education, School of Manufacturing, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: The relationship between temperature drift and adhesive is investigated, based on the finite element approach and principle of servo feedback sandwich accelerometer, to cope with the temperature drift of sandwich type accelerometer. It is found that the temperature drift is changed with the changes of thickness, Young's modulus of adhesive and the thickness of glass. When the thickness of adhesive increases from 15 μm to 35 μm , the temperature drift decreases by about 25%. When the modulus of adhesive varies from 4 GPa to 0.25 GPa, the temperature drift decreases by about 25%. When the thickness of glass adjacent to adhesive increases from 400 μm to 1 000 μm , the temperature drift decreases by about 37%. Meanwhile, it is indicated, by the comparison between the experiment data and the drift brought by the adhesive, that the temperature drift induced by the adhesive is about 1/4 to 1/3 of the experiment data. The exploration might be helpful for the understanding of relationship between temperature drift and adhesive of sandwich type micro-accelerometers.

Key words: sandwich micro-accelerometer; temperature drift; adhesive

基于微机电系统(Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS)技术的三明治加速度计具有灵敏度高、功耗低、体积小等^[1-2]优点, 但其存在温度漂移, 严重制约了其在高性能场合的应用。传感器封装是引起温度漂移的原因之一, 文献[3-6]分别报道了封装中的界面热应力、集成传感器芯片的封装应力分析, 但均只分析了封装引起器件的应力与应变, 且研究目标主要是针对压阻式传感器, 而对电容式传感器需要的器件变形则报道较少。针对电容式传感器, 苏岩等^[7]研究了硅玻璃键合结构微机械陀螺陶瓷基底材料、封装胶厚度与尺寸对陀螺仪应力的热应力影响, 但该研究只分析了上述两个因素与陀螺仪中最大热应力的关系, 未指出器件应力的分布及该应力与器件性能的联系。Zhang 等^[8]分析了封装胶对 ADI 叉指式加速度计性能的影响, 对三明治型未有提及。

收稿日期: 2014-02-13; 修回日期: 2014-06-29

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(NSAF11176027)

本文针对硅玻璃键合结构三明治型微加速度计，采用有限元方法，对其结构进行力、热仿真，分析了由于温度变化通过封装引起的敏感质量块位置改变，结合微加速度计伺服反馈工作原理，得到了微加速度计输出漂移与封装的关系。

1 有限元仿真与输出漂移

典型的硅玻璃键合结构三明治微加速度计如图 1 所示。

针对图 1 所示结构，采用 ansys14.0 软件为仿真平台，进行热学和力学分析。首先进行热学仿真，利用热单元 solid90，在衬底部施加 20℃ 的温度约束，通过瞬态分析，观察到在 30 s 后整个器件已全部达到同一温度 20℃。因此，在接下来的热机械耦合仿真中，采用均一温度，设置参考初始温度为 0℃，在温度升高 20℃ 后观察器件各处的变形与应力，仿真单元采用 solid186。仿真结果硅芯结构部分在加速度敏感方向的变形如图 2 所示。

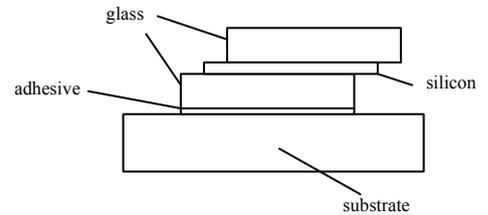
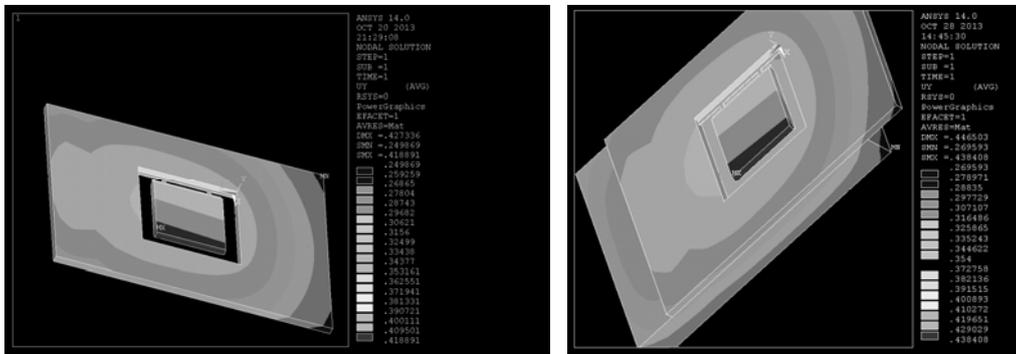


Fig.1 Schematic of the structure of sandwich type accelerometer
图 1 三明治微加速度计结构示意图



(a) deformation of silicon structure (b) deformation of silicon and glass structures
Fig.2 Deformation of a segment of accelerometer after temperature changing

图 2 温度变化后三明治结构局部变形图

由图 2 可知，在温度变化后，敏感质量块与上、下层玻璃均会产生变形，并且，敏感质量块位移呈绕弹性梁的摆动型，在摆片末端产生了比较大的位移。为得到上、下敏感电容的变化，在敏感质量块 1,2,3,4 点和上、下层玻璃 A,B,C,D 处分别观察温度改变后敏感质量摆片和玻璃在敏感方向 y 方向的变形，分别记为 y_1, y_2, y_3, y_4 和 y_A, y_B, y_C, y_D ，如图 3(a)所示。则摆片末端在温度变化后与底层玻璃距离发生的变化为

$$\Delta y_{\text{下}} = \frac{1}{2}[(y_1 - y_A) + (y_2 - y_B)] \tag{1}$$

摆片末端与上层玻璃距离变化：

$$\Delta y_{\text{上}} = \frac{1}{2}[(y_D - y_3) + (y_C - y_4)] \tag{2}$$

则由于温度变化引起摆片末端变化的平均距离为

$$\Delta y = \frac{1}{2}[|\Delta y_{\text{上}}| + |\Delta y_{\text{下}}|] \tag{3}$$

电容变化后，根据伺服反馈微加速度计的工作原理，敏感质量块将会在反馈静电力的作用下维持原上、下电容差值不变，从而回到原位置，如图 3(b)所示。该反馈静电力形成了微加速度计的输出漂移。

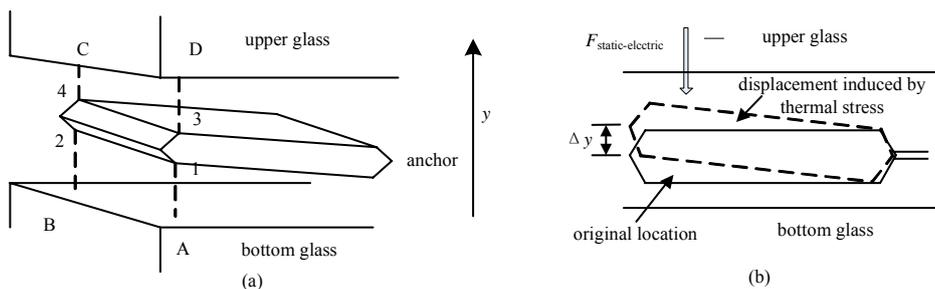


Fig.3 Schematic of the location alteration of proof mass
图 3 敏感质量块位置改变图

为估算使敏感质量块从 Δy 回到原位的静电力大小，经过力学分析可知其大小等于使敏感质量块从原位置移到 Δy 位置力的大小。因此，根据 Δy ，可知道静电力的大小，进一步依据静电力与输出电压的关系，得到微加速度计的漂移值。

2 封装胶与温度漂移

采用以上方法，本文分别就不同封装胶厚度、封装胶杨氏模量变化和与封装胶相连的底层玻璃厚度改变展开研究。

2.1 不同封装胶厚度产生的温度漂移

根据实验测试，实际微加速度计的封装胶厚度一般在 $20\ \mu\text{m}$ 左右。因此，基于前述仿真方法，封装胶厚度分别取 $15\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$, $25\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ 和 $35\ \mu\text{m}$ 。在温度变化后，得到不同封装胶厚度引起的敏感质量块相对玻璃的位置变化，再根据微加速度计工作原理，得到其引起的微加速度计漂移，如图 4 所示。

由图 4 可知， $15\ \mu\text{m}\sim 35\ \mu\text{m}$ 厚度封装胶在器件温度增加 $20\ \text{C}$ 的情况下，衬底通过封装胶耦合应力到微加速度计引起的温度漂移大约为 $(1.5\ \text{mV}\sim 2.5\ \text{mV})/20\ \text{C}$ ，即 $(0.06\ g_n\sim 0.1\ g_n)/20\ \text{C}$ 。而据文献[9]实验，采用本文所述结构的微加速度计实际温度漂移为 $(0.1\ g_n\sim 0.2\ g_n)/10\ \text{C}$ 。由此可见，衬底通过封装胶耦合应力到微加速度计引起的温度漂移约为实际漂移的 $1/4\sim 1/3$ ，因此，该因素可能为引起微加速度计漂移的重要原因。

同时，图 4 也表明，封装胶厚度越厚，在相同温度变化情况下引起的温度漂移越小。当封装胶厚为 $15\ \mu\text{m}$ ，温度变化 $20\ \text{C}$ 时，其引起的输出漂移为 $2.5\ \text{mV}$ ；当封装胶厚为 $35\ \mu\text{m}$ 时，其引起的输出漂移为 $1.875\ \text{mV}$ 。这可能是由于衬底陶瓷与玻璃的热膨胀系数不同，在温度变化后，衬底与玻璃的膨胀或缩小程度不同，而作为连接玻璃和衬底的胶相对较软，胶越厚，则衬底通过封装胶传导到玻璃的应力越小。从仿真结果察看与封装接触的玻璃底部的应力分布进一步印证了该猜想。

2.2 封装胶杨氏模量变化导致的温度漂移

由于封装胶杨氏模量会随温度产生变化^[8]，同时，湿度的变化也会引起杨氏模量改变。所以，本文对封装胶杨氏模量的变化进行研究。根据实验测定，采用前述仿真方法，将封装胶杨氏模量分别设定为 $0.25\ \text{GPa}$, $0.5\ \text{GPa}$, $1\ \text{GPa}$, $2\ \text{GPa}$, $3\ \text{GPa}$ 和 $4\ \text{GPa}$ ，在温度变化 $20\ \text{C}$ 后，得出微加速度计的输出漂移，如图 5 所示。

由图 5 可见，随着封装胶杨氏模量的减小，其所引起的温度漂移越小。当封装胶杨氏模量为 $4\ \text{GPa}$ 时，其引起的输出漂移约为 $0.025\ g_n/20\ \text{C}$ ，即 $0.63\ \text{mV}/20\ \text{C}$ ；而当封装胶杨氏模量为 $0.25\ \text{GPa}$ 时，其引起的输出漂移约为 $0.0074\ g_n/20\ \text{C}$ ，即 $0.19\ \text{mV}/20\ \text{C}$ 。尤其值得关注的是，封装胶杨氏模量小于 $2\ \text{GPa}$ 时，其所引起的输出变化量变化剧烈。因此，若由于湿度变化等外界原因引起封装胶在小于 $2\ \text{GPa}$ 的区间变动时，将引起显著的输出漂移。

2.3 不同底层玻璃厚度引起的温度漂移

由于在目前的工艺条件下，比较方便的是改变玻璃厚度，因此，本文取与封装胶相连的底层玻璃厚度 $400\ \mu\text{m}$, $600\ \mu\text{m}$, $800\ \mu\text{m}$ 和 $1000\ \mu\text{m}$ ，进行仿真，依据前述方法得到的温度漂移结果，如图 6 所示。

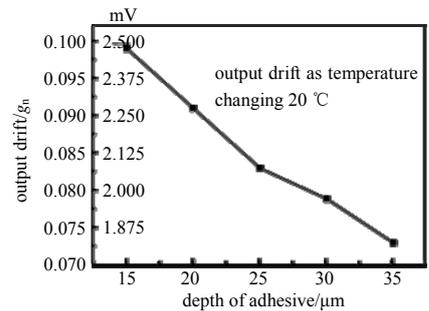


Fig.4 Temperature drift induced by adhesive with different depths

图 4 不同厚度封装胶所引起的温度漂移

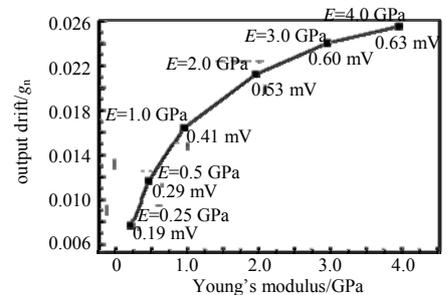


Fig.5 Temperature drift induced by adhesive with different modulus

图 5 封装胶杨氏模量变化导致的温度漂移

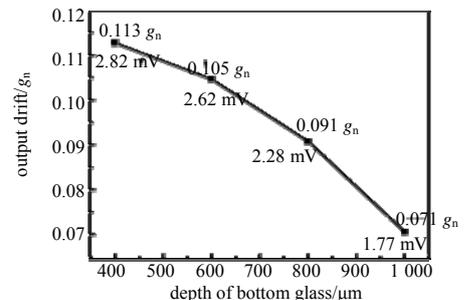


Fig.6 Temperature drift with different depths of glass adjacent to adhesive

图 6 与封装胶相连底层玻璃厚度变化产生的温度漂移

由图 6 可见,当底层玻璃厚度为 $400\ \mu\text{m}$ 时,温度漂移是 $0.113\ \text{g}_n/20^\circ\text{C}$,即 $2.82\ \text{mV}/20^\circ\text{C}$;而当底层玻璃厚度增大到 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 时,温度漂移为 $0.071\ \text{g}_n/20^\circ\text{C}$,即 $1.77\ \text{mV}/20^\circ\text{C}$,下降了约 37%。由此可见,底层玻璃厚度增大,可减小温度漂移。

事实上,三明治微加速度计在上电后,需 $20\ \text{min}\sim 30\ \text{min}$ 后输出才能基本稳定,这一方面可能是由于硅芯片上电后通电流生热,因此达到热平衡需要一定时间。另一方面可能是由于管壳衬底接触的 PCB 板在工作后达到温度平衡也需要一定时间,所以管壳底部的温度不是一个恒定值。

相比国内外相关研究结果,文献[4-6]研究了不同封装衬底,封装胶杨氏模量、厚度对封装胶上硅片应力和应变的影响,但在这些研究针对的是压阻式器件,应力和应变可直接转化为电阻的变化,而对由于应力和应变引起微机械部件位置改变,进一步导致电容变化的电容式传感器则未有研究。文献[7-8]虽然报道了封装胶对电容式微陀螺仪的影响,但只研究了封装对陀螺仪振动模态与最大应力的作用,对输出的影响则未研究。本文通过有限元仿真分析了三明治型电容式传感器中敏感质量块由于封装胶耦合应力引起的位置改变,结合微加速度计的伺服反馈原理,导出了微加速度计的温度漂移。

此外,本文仅通过有限元分析了三明治微加速度计温度漂移与封装胶关系,下一步,需建立管壳底部通过封装胶耦合应力到硅和玻璃部分变形的力热变形模型。该模型的建立,也将有助于硅玻璃键合结构的叉指式微加速度计、陀螺仪温度漂移的进一步研究。

3 结论

针对封装胶对三明治微加速度计温度漂移的影响,从封装胶厚度,杨氏模量变化以及与封装胶相连玻璃厚度改变 3 个方面研究了该关系。研究指出:当封装胶厚度从 $15\ \mu\text{m}$ 增加到 $35\ \mu\text{m}$ 时,温度漂移减小约 25%;封装胶杨氏模量从 $4\ \text{GPa}$ 减小到 $0.25\ \text{GPa}$ 时,温度漂移减小约 70%;与封装胶相连的底部玻璃厚度从 $400\ \mu\text{m}$ 增大到 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 时,温度漂移减小约 37%。通过与实验对比,发现封装胶所引起的温度漂移与实测漂移为同一个数量级,表明该因素是微加速度计温度漂移一个不可忽视的重要原因。

参考文献:

- [1] HU Qifang,GAO Chengchen,HAO Yilong,et al. Low cross-axis sensitivity micro-gravity micro electromechanical system sandwich capacitance accelerometer[J]. *Micro & Nano Letters*, 2011,6(7):510-514.
- [2] XIAO Fei, CHE Lufeng, FAN Kebin,et al. A new symmetrical beam-mass structure for accelerometers by anisotropic etching without convex corner compensation[C]// *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Sanya,China:IEEE, 2008:1059-1062.
- [3] 蒋长顺,谢扩军,许海峰,等. 封装中的界面热应力分析[J]. *电子与封装*, 2006,6(8):23-32. (JIANG Changshun,XIE Kuojun,XU Haifeng,et al. Interfacial thermal stress analysis in packaging[J]. *Electronics and Packaging*, 2006,6(8):23-32.)
- [4] 徐敬波,赵玉龙,蒋庄德,等. 集成传感器芯片的封装应力分析[J]. *西安交通大学学报*, 2006,40(11):1338-1342. (XU Jingbo,ZHAO Yulong,JIANG Zhuangde,et al. Residual stresses in monolithic multi-sensor package[J]. *Journal of Xi'An Jiaotong University*, 2006,40(11):1338-1342.)
- [5] Satyajit S Walwadkar,Junghyun Cho. Evaluation of die stress in MEMS packaging: experimental and theoretical approaches[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2006,29(4):735-742.
- [6] 孙志国. MEMS 封装中的残余应力演化及其相关可靠性研究[D]. 北京:中国科学院, 2002. (SUN Zhiguo. Research on the stability and the change of residual stress in the package of MEMS[D]. Beijing:Chinese Academy of Sciences, 2002.)
- [7] 施芹,苏岩,裘安萍,等. 硅微机械陀螺仪封装应力研究[J]. *电子器件*, 2007,30(6):2294-2296. (SHI Qin,SU Yan,QIU Anping,et al. Study on stress of silicon micromachined gyroscope[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007,30(6):2294-2296.)
- [8] Xin Zhang,Michael W Judy. Accurate assessment of packaging stress effects on MEMS sensors by measurement and sensor-package interaction simulations[J]. *Journal of Micro Electromechanical Systems*, 2007,16(3):639-649.
- [9] 戴强,苏伟,张德,等. 硅三明治型微机械加速度计温度漂移与敏感结构热膨胀关系研究[J]. *中国机械工程*, 2013,24(19):2602-2606. (DAI Qiang,SU Wei,ZHANG De,et al. Research on relationship between temperature drift and thermal expansion of sensing structure in sandwich micro-accelerometer[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013,24(19):2602-2606.)

作者简介：



戴 强(1974-), 男, 四川省乐山市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为微机械传感器.email:uestc_dai@163.com.

苏 伟(1964-), 男, 四川省射洪县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微电子机械系统、太赫兹技术及惯导技术.

蒋 刚(1981-), 男, 四川省绵阳市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为微电子机械系统、微机械传感器.

张 德(1971-), 男, 四川省三台县人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微电子机械系统、微机械传感器.

彭 勃(1967-), 男, 湖南省湘潭市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微电子机械系统、微机械传感器.

(上接第 134 页)

- [5] LIU Y P,WAN Q. Total difference based partial sparse LCMV beamformer[J]. Processing Electromagnetics Research Letters, 2010,18(1):97-103.
- [6] LIU Y P,WAN Q,CHU X L. A robust beamformer based on weighted sparse constraint[J]. Progressing Electromagnetics Research Letters, 2010,16:53-60.
- [7] LIU Y P,WAN Q. Sidelobe suppression for robust beamformer via the mixed norm constraint[J]. Wireless Personal Comm., 2012,65(4):825-832.
- [8] LIU Y P,WAN Q. Sidelobe suppression for robust Capon beamforming with mainlobe to sidelobe power ratio maximization[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012,11:1218-1221.
- [9] HUANG J,WANG P,WAN Q. Sidelobe suppression for blind adaptive beamforming with sparse constraint[J]. Communications Letters,IEEE, 2011,15(3):343-345.
- [10] LI Jun,XU Hongbo,XIA Hongxing,et al. Least squares constant modulus blind adaptive beamforming with sparse constraint[J]. IEICE Transactions on Communications, 2012,95(1):313-316.
- [11] LI Jun,XU Hongbo,LIU Fan,et al. Robust least squares constant modulus beamforming with sparse constraint[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2012,26(4):459-467.
- [12] Vorobyov S A,Gershman A B,LUO Z Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization:a solution to the signal mismatch problem [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003,51(2):313-324.

作者简介：



蒋曦曦(1991-), 男, 安徽省淮北市人, 硕士, 主要研究方向为阵列信号处理.email:jiang709586544@126.com.

吴 瑛(1960-), 女, 郑州市人, 教授, 主要研究方向为信号与信息处理、空间谱估计算法.