

微机械热对流加速度计*

李立杰 梁春广

(河北半导体研究所, 石家庄 050051)

摘要: 介绍了基于流体运动的加速度计的原理和制作。它的原理是自然对流受到加速度信号而产生对流形变, 从而产生温度差, 由这个温度差感应了加速度、倾斜、位置变化。这种加速度计由一个充有流体的密闭腔体组成, 腔体中包含了一个加热元件和两个对称放置的温度敏感元件。为了实现这种加速度计, 采取了微机械制作方法中的前腐蚀工艺, 把加速度计和伺服电路集成并封装在一起, 测试了加速度效应。

关键词: 热对流; 加速度计; 微机械

EEACC: 7230; 8340

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 6253-4177(2001)04-0465-04

1 引言

各式各样的加速度计和倾斜仪运用于许多不同的领域, 诸如机器人、通讯、消费电子及玩具业和机械电子设备。测量加速度和倾斜主要应用压电、压阻、力平衡和电容加速度计, 但是这些都不能在高精度、小体积、低价位上同时满足用户的要求。压电加速度计主要应用于测量摆动而通常不用于测量恒定的加速度。压阻加速度计能测量恒定的高加速度, 价位适中, 但是只能在一定的温限之内工作, 而且随着环境温度的变化极容易发生变化。力平衡或者称反馈加速度计精度非常高, 但造价昂贵。电容加速度计的体积不容易做得很小。近几年来, 硅加工技术的飞速发展为微系统技术发展提供了有利条件, 一方面, 硅技术领域中业已成熟的生产过程为微系统技术所利用, 另一方面, 硅的微机械加工技术为微系统的发展开辟了道路。微机械技术和热对流机理给我们提供了新的设计思路。这种微机械热对流加速度计不仅可以测加速度, 同时也可以测倾斜, 它的结构紧密、重量轻、成本低。这种加速度计可以应用于惯性制导、车、船、坦克、自动控制、导航、GPS、汽车安全以及商业娱乐等大批量、低成本的领域。

2 器件结构和原理

热对流加速度计包含一个密闭的腔体, 腔体中充有流体, 其中有一个加热元件把腔体中加热元件周围的流体加热, 加热后的流体发生膨胀而密度下降, 在重力的作用下上升, 周围相对冷的流体填补到空位置上, 这样反复循环而造成热对流传导^[1]。加热元件和两个敏感元件都是悬空的, 结构如图 1 所示。

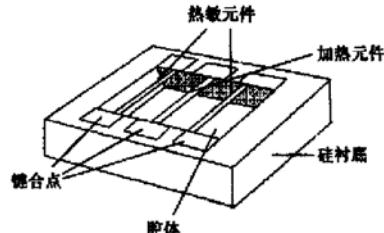


图 1 热对流微型加速度计的结构原理图

FIG. 1 Principle Structure of Convective Micro-Accelerometer

流体可以围绕它们做对流流动, 保证能够较好地传热。当除了重力加速度以外没有其它的加速度时, 流体的流动是在垂直于通过热源的平面上关于中间加热元件对称的, 两个热敏元件探测的温度是相等的。如果对这个密闭腔体加一个横向的加速度或者

* 国防预研基金资助项目(项目编号: 8.7.2.7).

2000-04-11 收到, 2000-11-09 定稿

产生一个倾斜,那么气体分子由于加速度或者倾斜的原因发生对流形式的变化,从而使对称的热敏元件的温度产生差异。如果热敏元件是电阻的话,那么用一个简单的 Wheatstone 电桥就可以把热敏元件产生的差值测量出来,这个差值和对它的加速度有一个比例关系。图 2 为静止状态下的温度曲线示意图,图 3 为有加速度情况下的温度曲线示意图。通过这个比例关系可以将加速度或倾斜角度信号测量出来。这种器件可以用来测量线速度、速度、方位的变化,也可以用来测量重力角的变化。这种器件在自动化领域有极宽的应用前景。

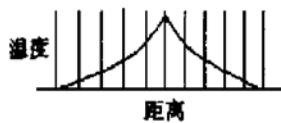


图 2 在静止状态下对称的温度曲线示意图

FIG. 2 Schematic Diagram of Symmetric Temperature Profile at Static State

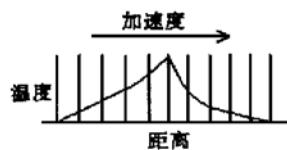


图 3 有加速度情况下不对称的温度曲线示意图
FIG. 3 Schematic Diagram of Unsymmetric Temperature Profile with Applied Acceleration

基于以上原理,我们在(100)硅衬底上做了一个实验。腔体尺寸大约为 $150\mu\text{m}$ 深,悬空的加热元件和对称于加热元件的两个敏感元件是用微机械技术来实现的,它们可以设计成与(100)晶向成 45° 方向的三明治结构,然后用各向异性腐蚀来实现。加速度计的工作原理是基于流体的自然对流效应,在重力场、离心力场或其它力场的作用下,由于流体的温度差或(和)浓度差形成密度差和浮升力,使流体产生流动的现象称作自然对流。表示自然对流的哥拉晓夫(Grashof)数^[2]说明了加速度对自然对流的影响。

$$Gr = \frac{a\rho^2 x^3 \beta (\Delta T)}{\mu^2} \quad (1)$$

式中 a 是加速度; ρ 是流体的密度; x 是到热源的距离; β 是热膨胀系数; μ 是粘性系数; ΔT 是热源和其周围温度差。哥拉晓夫数是与自然对流有关的无量纲数组。从物理意义上它可解释为浮升力与粘性力之比。从式(1)中可以看出 a 对自然对流的浮升力

起着决定性的作用。这种加速度计还可用来测量倾斜,即静止加速度。因为这种加速度计是由热传导决定的,所以它的响应频率比较低。我们设计了针对这个问题的信号处理电路,以用来对频率的补偿。通过这个频率补偿电路可以将几十 Hz 的响应频率提高到几百 Hz。如图 4 所示。从电路原理图可以看到,首先无加速度信号时将 Wheatstone 电桥调平(无电压差),由于加速度的影响而导致 Wheatstone 电桥产生压差,这个电压差由前级放大器放大,然后再经频率补偿电路,最后输出。

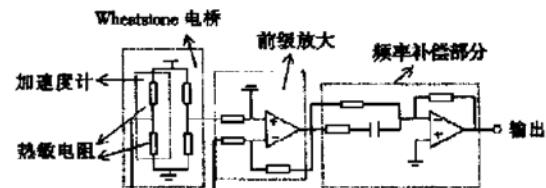


图 4 热对流加速度计信号处理电路原理图

FIG. 4 Schematic Servo-Circuit of Convective Accelerometer

3 器件制造

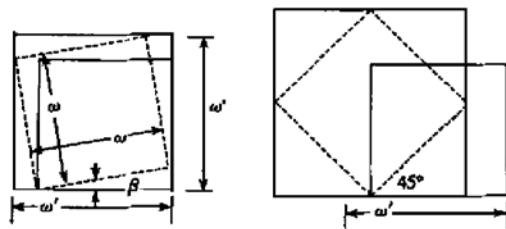
在器件制造过程中主要用(100)硅的各向异性腐蚀,各向异性腐蚀是微机械加工中的关键工艺。各向异性腐蚀剂腐蚀微结构的特点是^[3]:由于{111}面有极慢腐蚀速率,所以经过一段时间腐蚀后,所腐蚀出的边界就是{111}面,对 V 型槽,若在掩膜上刻出的正方形窗口不是精确地沿{110}方向,则腐蚀出的孔腔几何尺寸增大,设窗口边界偏离{110}方向角度为 β ,则最后腐蚀出的图形宽度为

$$w' = w(\sin\beta + \cos\beta) \quad (2)$$

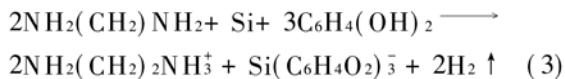
式中 w 是正方形窗口的边长。图 5 给出了这种情况下腐蚀出的几何尺寸增大示意图。当 $\beta=45^\circ$ 时,边界几何尺寸增大到极大值。

设计加速度计版图时,考虑到如果钻蚀最严重,则最容易形成悬臂梁。由上面所述的各向异性腐蚀的理论得出:当设计的窗口和{110}方向成 45° 时,腐蚀出的几何尺寸最大,也就是说钻蚀越严重,这时也就越符合设计的要求。

各向异性腐蚀剂比较常见的有 KOH+ H₂O 和 EPW 系统。因为 EPW 腐蚀 SiO₂ 的速率比 KOH+ H₂O 腐蚀 SiO₂ 的速率慢^[4],而我们用 SiO₂ 做包络保护层,所以采用 EPW 腐蚀系统比较合适。乙二胺

图 5 窗口边缘偏离 $\{100\}$ 方向时腐蚀出的几何尺寸FIG. 5 Etched Dimension when Window Edge Departing $\{111\}$ Orientation

($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$)、邻苯二酚($\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$)和水(H_2O), 简称 EPW. 整个反应过程可写为:



在式(3)中因为反应过程后生成氢气, 容易产生气泡, 造成腐蚀不均匀, 所以要用搅拌冷凝系统. 我们用的是 B 型 EPW 腐蚀液^[5], 其中, E: 7.5ml, P: 1.2g, W: 2.4ml, (或摩尔比 E:P:W = 43.8% : 4.2% : 52%). B 腐蚀剂在超过 100℃时, 表面无残留物, 且表面平整、光滑, 是最常用的一种腐蚀剂.

用 LPCVD 低压气相沉积技术沉积多晶硅, 然后用固态 B 源用典型的两步扩散法对多晶硅进行扩散, 采用两步扩散法较好地解决了表面浓度、结深与扩散温度、时间之间的矛盾, 使多晶硅电阻的浓度更加均匀, 这样就解决了多晶硅电阻加电产生热量不均匀而导致断裂的问题. 通过这种方法制作的方块电阻为 ($R_{\square} = 60 \pm 5 \Omega$).

整个工艺是在我所微机械专业部加工的, 工艺流程如图 6 所示: 首先在 $\{100\}$ Si 上热生长一层 SiO_2 (图 6(a)), 再沉积一层多晶硅(图 6(b)), 光刻出多晶硅(Poly-Si)图形(图 6(c)), 并对多晶硅进行 B 扩散, 形成电阻条, 然后再沉积一层氮化硅(SiN_x) (图 6(d)), 形成三明治结构的多晶硅热敏电阻和加热电阻(图 6(e)), 最后采用 EPW 各向异性腐蚀液腐蚀出悬臂梁结构(图 6(f)). 整个工艺流程为典型的前腐蚀工艺(front etching process)^[6], 这种工艺的特点是保护住了集成在同一硅片上的半导体电路, 便于和电路实现集成, 因而这是一种极为有前景的器件.

4 测试结果

器件的灵敏度是以重力加速度为单位, 认为重力加速度为恒定的常量, 作为一个参考. 转动加速度

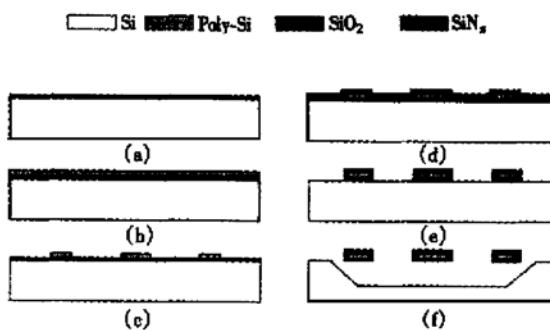


图 6 微机械热对流加速度计制作流程图

FIG. 6 Fabrication Process of Micromachined Convective Accelerometer

计, 改变加速度计中心轴和重力方向的角度, 这时加速度计就有不同的输出. 同时我们还考虑到加速度计的灵敏度同加热电阻的功率有关系, 因为功率越大, 热敏电阻的阻值变化范围也越大, 灵敏度也就越高, 针对这个问题我们关心这种关系是否为线性, 并且作了实验, 实验表明: 器件的灵敏度与加热功率成类线性关系. 图 7 表示了器件在不同加热功率下单位加速度的输出曲线. 器件内部结构的 SEM (扫描

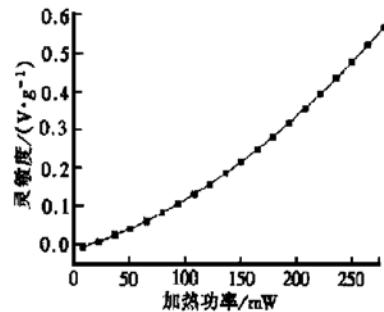


图 7 灵敏度随加热功率变化曲线

FIG. 7 Sensitivity Changes with Heat Power

电子显微镜)的照片如图 8 所示, 加热电阻的长度为 $1000\mu\text{m}$, 宽 $80\mu\text{m}$, 厚 $2\mu\text{m}$. 两个对称的敏感电阻距离加热电阻为 $1000\mu\text{m}$, 长为 $1000\mu\text{m}$, 宽 $40\mu\text{m}$, 厚 $2\mu\text{m}$. 经测量两个热敏电阻的温度系数为 $1800\text{ppm}/\text{°C}$. 最后将器件与伺服电路进行了混合集成, 电路元件为分立元件, 封装在 6 脚金属管壳内, 如图 9 所示, 封装后的热对流加速度计尺寸为 $30\text{mm} \times 15\text{mm} \times 5\text{mm}$.

5 结论

通过测试, 我们得出这种加速度计在加热功率

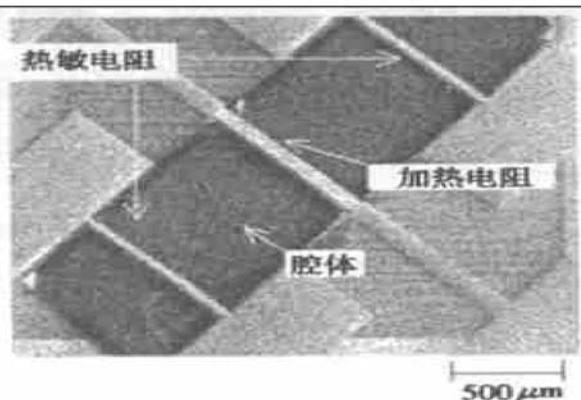


图 8 管芯结构的 SEM 照片

FIG. 8 SEM Photograph of Single Chip

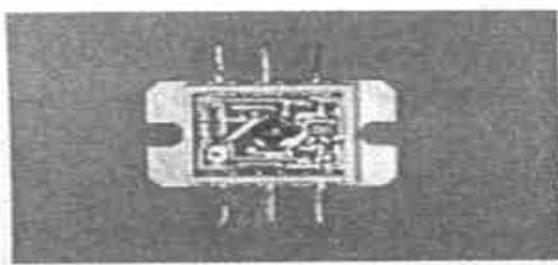


图 9 封装在管壳内的混合集成热对流加速度计照片

FIG. 9 Accelerometer Sealed with Integrated Circuit
为 200mW 时的灵敏度为 0.35V/g, 分辨率约为 1mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 抗冲击大于 100g。经过频率补偿后, 器件响应频率的带宽大约为 100Hz。通过以上分析和测试, 我们可以得出这种加速度计具有体积小、重量轻、成本低、性能优良等优点, 同时也看到它的频率

响应比较低。总之, 这个实验结果令人满意, 它在保证性能良好的同时大大降低了生产成本。我们相信, 微机械热对流加速度计具有巨大的研究潜力。

致谢 在器件研制过程中, 赵正平所长、杨克武副所长给予了大力支持。周荷秀高级工程师、赵彤高级工程师给予了技术上的指导。同时还感谢河北半导体研究所五专部二组全体同志的大力帮助。在此, 作者一并表示感谢。

参考文献

- [1] A. M. Leung, J. Jones, E. Czyzewska, J. Chen and B. Woods, Micromachined Accelerometer Based on Convection Heat Transfer, *IEEE MEMS*, 1998, 627—630.
- [2] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 3rd Edition, McGraw Hill, Inc. 1972.
- [3] HUANG Qingan, *Silicon Micromachined Process Technology*, Beijing: Science Press, 1996 [黄庆安, 硅微机械加工技术, 北京: 科学出版社, 1996].
- [4] Kurte Petersen, *Silicon as a Mechanical Material*, Proceedings of the IEEE, 1982, **70**(5): 427—457.
- [5] Ylva Backlund and Lars Rosengren, New Shapes in (100) Si Using KOH and EDP Etches, *J. Micromech. Microeng.*, 1992, **2**: 75—79.
- [6] F. Mayer, G. Salis, J. Funk, O. Paul and H. Baltes, Scaling of Thermal CMOS Gas Flow Microsensors: Experiment and Simulation, Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conf., San Diego, California, USA, February 1996, 116—121.

Micromachined Convective Accelerometer*

LI Li-jie and LIANG Chun-guang

(Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: A fluid-based accelerometer and inclinometer has been fabricated and tested with particular emphasis on the transducer, which can determine the acceleration, inclination, position or velocity on the basis of temperature differential caused by the effect of acceleration on the free or natural convection. This device consists of a sealed enclosure that contains a kind of gas, in which, there mounts a heater and two temperature sensing elements. The thermal sensors and temperature sensors can be produced by micromachining process, followed by the front silicon etching, with which bridge-based sensors are produced. This device can be easily integrated with servo-circuit.

Key words: convective; accelerometer; micromachine

EEACC: 7230; 8340

Article ID: 0253-4177(2001)04-0465-04

* Project Supported by Defence Advanced Research Program of China.

Received 11 April 2000, revised manuscript received 9 November 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics