

一种基于 MEMS 工艺的二维风速传感器的设计*

沈广平[†] 吴 剑 张 骅 秦 明 黄庆安

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 给出了一种基于 MEMS 工艺的二维热风速传感器的设计、制造以及测试结果. 该传感器采用恒功率工作方式, 利用热温差的方法测量风速和风向. 本传感器采用 MEMS 剥离工艺在玻璃衬底上同时加工出加热电阻和测温电阻, 利用简单可靠的加工工艺实现了热隔离和高灵敏度. 经过风洞风速风向测试, 得知传感器的风速量程超过 10m/s, 360° 范围内风向测量误差不超过 8°. 传感器的响应时间不超过 1s, 功耗为 10mW.

关键词: MEMS; 剥离工艺; 风速; 风向; 流量传感器

EEACC: 7230

中图分类号: TN305.94

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)11-1830-06

1 引言

风速风向测量在气象预报、环境监测与控制等方面有着重要的应用. 传统的测量方法主要应用风杯来测量风速, 风向标测量风向. 这些机械装置体积较大, 价格昂贵, 而且活动部件需要经常维护.

近 20 年来, 微电子机械系统(MEMS)的发展为流量传感器的发展带来了新的突破口. 与传统的流体测量装置相比, 热流量传感器具有体积小、成本低等优点, 是目前流体测量的发展方向. 荷兰 Delft 大学提出了基于分时的热 sigma-delta 调制技术的热风速风向传感器^[1], 并有产品问世. 瑞士 ETH Zurich 对于基于体硅腐蚀的风速计^[2]以及芯片倒装焊封装^[3]的研究, 密西根大学对于包括热风速计的多传感器集成研究^[4]等都对热风速风向传感器的发展起到了很大的作用. 围绕芯片气象站, 本实验室近年来在风速风向传感器的研究方面也做了很多工作^[5~8].

在目前见诸报道的热流量传感器中, 绝大部分都采用了标准 IC 工艺在硅衬底上加工. 然而, 众所周知, 硅具有很高的热导率, 从而利用体硅芯片实现的热温差风速风向传感器灵敏度不高. 利用 MEMS 后处理工艺, 包括正面腐蚀和背面腐蚀^[9], 可以提高灵敏度. 但是腐蚀后的薄膜和梁结构都比较脆弱, 这给封装等后道工序带来了不便.

为了提高传感器的灵敏度, 本文将如图 1 所示的传感器结构利用两步金属剥离工艺制作在玻璃衬底上. 芯片中央的加热电阻和四周的测温电阻都采

用圆形对称结构, 以提高风向测量的精度^[10]. 该传感器采用恒功率工作方式, 利用热温差的方法测量风速和风向. 与传统的硅基风速计相比, 该传感器结构健壮, 工艺简单, 灵敏度高, 对实现性能卓越的风速风向传感器具有现实意义.

2 工作原理

目前, 热流量传感器的工作原理主要有热损失型和热温差型. 前者通过测量流体流过时加热体的温度变化, 从而反应流速. 该种原理风速测量信号幅值大, 且没有量程限制, 其缺点是不能测量风向. 热温差型的工作原理是当流体流过加热体的时候, 上游的温度下降会比下游快, 从而导致加热体附近热场发生变化. 通过测量这个温度差可以同时反映风速和风向.

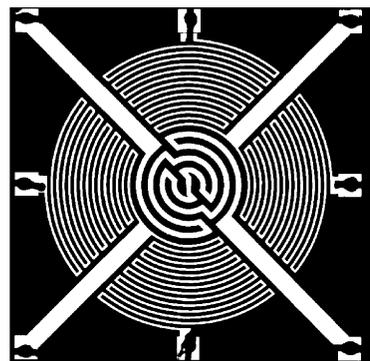


图 1 传感器芯片显微照片

Fig.1 Micro photograph of the sensor chip

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:90607002)

[†] 通信作者. Email:sgpapple@163.com

2007-05-16 收到, 2007-07-03 定稿

对于二维热温差型风速计芯片^[11],对流体感生的温度梯度进行分解,可以得到:

$$\delta T_{NS} = \delta T \cos \theta = sU \cos \theta$$

$$\delta T_{EW} = \delta T \sin \theta = sU \sin \theta$$

其中 T 为传感器温度; U 和 θ 分别为风速和风向; s 为温差对风速的灵敏度系数. 对于二维风速传感器,灵敏度系数 s 与芯片横向尺寸成正比,厚度成反比,与芯片的热导率成反比^[12]. 考虑到实际器件的厚度不能太薄,选用低热导率的衬底成为改善灵敏度的最佳方案.

对于阻值为 R ,温度系数为 α 的测温电阻,惠斯通电桥的输出电压分量为:

$$V_{NS} = \frac{\Delta R}{R} V = \frac{\alpha \delta T_{NS}}{R} V = \frac{\alpha \delta T}{R} V \cos \theta$$

$$V_{EW} = \frac{\Delta R}{R} V = \frac{\alpha \delta T_{EW}}{R} V = \frac{\alpha \delta T}{R} V \sin \theta$$

从而,风速和风向可以表示为:

$$U = \frac{R}{\alpha s V} \sqrt{V_{NS}^2 + V_{EW}^2}$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{V_{EW}}{V_{NS}}$$

热温差型风速计的最大优点在于其可以测量风向,且在小风速时具有较大的灵敏度;其缺点是当风速较大时,由于上风口不可能比环境温度更低,而下风口不可能比加热条温度更高,所以 δT 会饱和,在测量风速的时候量程受限^[13].

3 传感器有限元分析

为了缩短研发周期,优化器件的性能,对传感器的模拟与仿真真是必不可少的. 然而,风速风向传感器的模拟涉及到热域、流体域和电能域等的耦合,是传感器设计的难点之一. 在本文中,通过对恒功率和恒温差两种理想工作方式的假定,可以使得多耦合场模拟简化为流固耦合(FSI)情况下的温度模拟. 本文运用了全球最大的 CAE 仿真软件 ANSYS Workbench,通过设置耦合面的耦合条件,基本解决了这个多场耦合的难题,模拟得出了 MEMS 热风速计在不同风速及风向作用下的温度场分布情况,为传感器的设计提供了有效的参考.

3.1 有限元模型

为了便于实体建模,进行了一些简化:考虑到钛铂电阻的厚度很薄而且间隙很小,用薄膜代替,并采用等效热导率. 此外,压焊块的影响也被忽略. 图 2 为用 ANSYS 建立的热风速计模型. 芯片厚度为 $500 \mu\text{m}$,中央为半径 $450 \mu\text{m}$ 的加热电阻,四周的扇形测温电阻内径为 $500 \mu\text{m}$,外径为 $1200 \mu\text{m}$. 考虑到

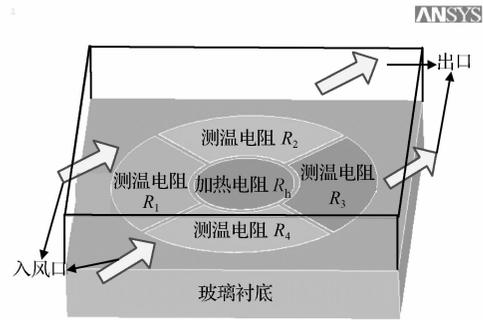


图 2 热风速传感器的 ANSYS 模型

Fig. 2 ANSYS model of the thermal wind sensor

风吹过芯片表面要符合层流边界条件,模型中空气层的厚度取为 $500 \mu\text{m}$.

为了获得理想的网格划分质量,本文利用模块(block)的方法进行网格划分^[14]. 在 ICFM CFD 中,对应于空气、加热电阻 R_h 、测温电阻 $R_1 \sim R_4$ 和玻璃衬底分别定义模块单元网格划分. 在进行网格划分之后,需要将结果导入 ANSYS CFX 进行计算与分析^[15]. 在 CFX-Pre 中,定义出流体域和固体域,并将空气与芯片接触面设置成流-固耦合面. 在入风口和出风口处加载风速边界条件,并设置加热电阻模块的加热功率,就可以模拟恒功率工作方式下的芯片表面温度分布. 计算参数设置为自动时间步长,收敛精度为 10^{-5} .

3.2 模拟结果

为了深入研究不同功率情况下,传感器输出与风速风向之间的关系,本文对不同功率、不同风速情况下的传感器表面温度分布进行了模拟. 图 3 为加热功率 50mW ,风向为 45° 时,在 2 和 10m/s 典型风速情况下的传感器表面温度分布云图. 随着风速的增加,流体在芯片表面带走热量越来越多,芯片表面的温度整体下降很快,同时迎风与背风面的温度差也越来越大. 如图 4 所示,随着风速不断增加,芯片内部的温度梯度不断增加,并在 20m/s 左右达到风速测量量程. 同时,由图 4 可以看出,传感器的温度梯度在 1K 左右较体硅芯片提高了 100 倍以上^[16],充分验证了本传感器设计思想的正确性.

本文对不同风向情况下的传感器表面温度分布进行了模拟. 图 5 为加热功率 50mW ,风速为 10m/s 时,风向为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 和 45° 情况下的传感器表面温度分布云图. 如图 6 所示,在 2, 5 和 10m/s 几种不同风速情况下,测温电阻之间温度差均随风向变化严格随正弦曲线变化. 同时,在量程范围内随着风速增加,在任何风向条件下温度差都会上升,这与前面的理论推导完全相符.

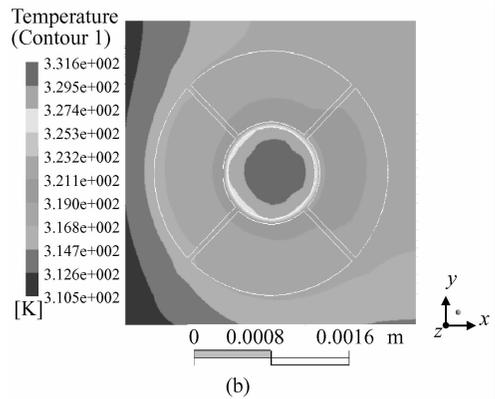
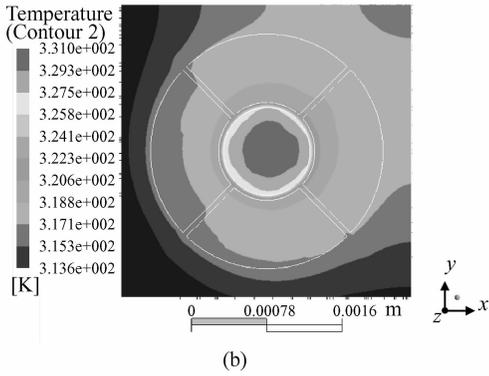
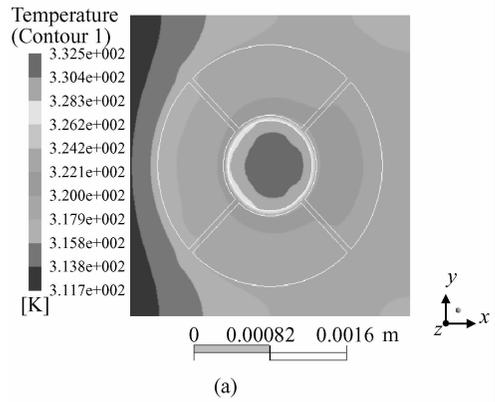
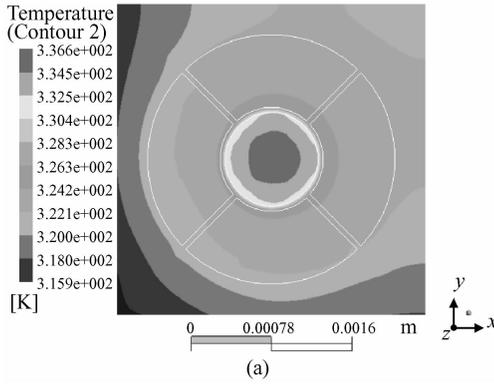


图 3 风速为 2(a)和 10m/s(b)时传感器表面温度分布云图
Fig.3 Temperature distribution of the sensor under 2 (a) and 10m/s (b)

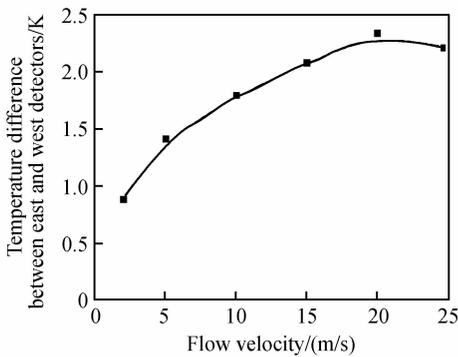


图 4 芯片内温度梯度随风速变化模拟曲线
Fig.4 Simulation curve of the temperature gradient versus wind speed

4 风速风向传感器的制备与封装

为了进行良好的热隔离,提高传感器的性能,传感器采用 PREX7740 玻璃作为衬底,其热导率仅为 1.2W/(m·K).传感器的加热电阻和测温电阻都采用物理特性稳定的 Pt 电阻,其可以直接与空气接触,耐各种腐蚀液侵蚀.

本传感器加工工艺简单,利用两步剥离工艺即可在玻璃衬底上完成芯片加工.首先,在 PREX 玻

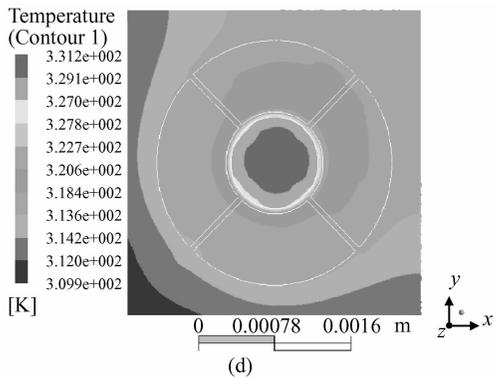
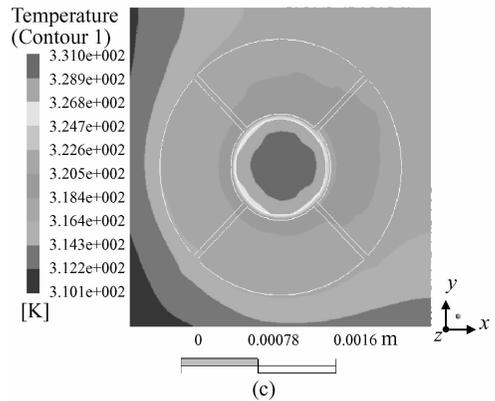


图 5 风向为 0°(a),15°(b),30°(c)和 45°(d)时传感器表面温度分布云图
Fig.5 Temperature distribution of the sensor with flow angle of 0°(a),15°(b),30°(c) and 45°(d)

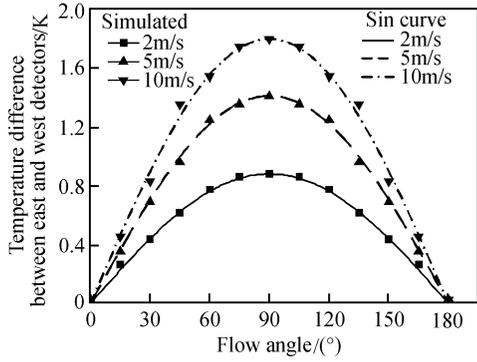


图 6 测温电阻温度差随风向变化模拟曲线

Fig.6 Simulation curves of the temperature distribution versus flow angle

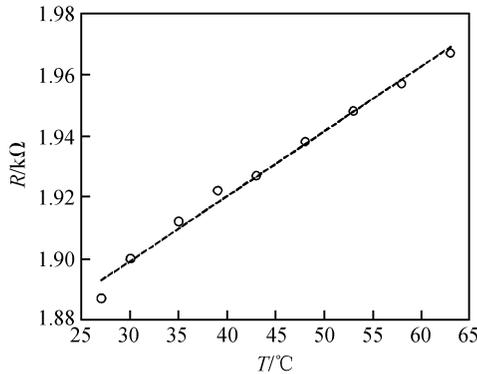


图 7 在 25~60°C 温度范围内,测温电阻的温度曲线

Fig.7 Resistance of the detector in the range from 25 to 60°C

璃上淀积 50nm 的钛和 200nm 的铂,利用金属剥离工艺形成加热电阻和测温电阻;然后,为了便于压焊,再次利用金属剥离工艺,在压焊块上淀积一层 200nm 的金层.在室温下,芯片加热条和测温电阻分别为 400Ω 和 2kΩ.如图 7 所示,在 25~60°C 温度范围内,测温电阻的温度系数为 1050ppm.

为了便于测试,如图 8 所示,作者对传感器进行了简易封装.考虑到该传感器的加热电阻和测温电

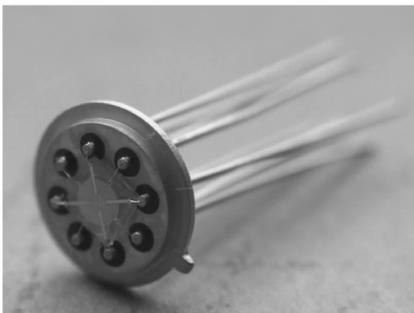


图 8 简易封装后的风速风向传感器

Fig.8 Photograph of the wind sensor after packaging

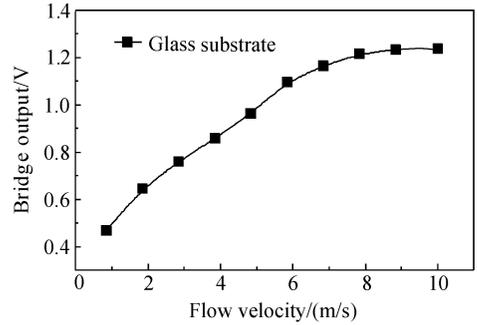


图 9 加热功率为 50mW,惠斯通电桥输出电压随风速变化曲线

Fig.9 Output voltage of Wheatstone bridge versus wind speed under heat power of 50mW

阻采用稳定的铂材料,可以经历恶劣的环境,因此采用直接引线键合至金属管座的封装方案.

5 结果与讨论

本文对简易封装后的传感器进行了风洞测试,主要测试其对应于不同风速和不同加热功率情况下传感器的输出随风向的变化.该传感器采用恒定电压加热来近似恒功率工作方式,具体采用可调节的恒压源对加热电阻加热.两组对边测温电阻分别接成惠斯通电桥,并利用可调电阻进行电压调零,然后利用仪器放大器进行放大输出.

首先在恒功率工作方式下,对传感器进行了风速风向测试.当加热功率为 50mW 时,在 0~10m/s 风速范围内对传感器进行了风速测试.如图 9 所示,随着风速的增大,惠斯通电桥的输出单调增加,这与图 4 所示的模拟曲线相当吻合.但是与有限元模拟相比,实际测量的风速量程有一定的减小,约为 10m/s.量程的减小可能是由于恒定功率工作方式下,随着风速的不断增大,芯片的整体温度下降很快并接近室温,使得传感器在大风速下的输出提前进入饱和.当加热功率为 10mW 时,在 2 和 5m/s 风速情况下,每间隔 15°改变一次风向,测量两路电桥输出电压.如图 10 所示,当风速一定时,两路输出电压随风向变化分别呈正弦和余弦变化,这与前面的理论完全相符.

对恒定风速,在加热功率不同的情况下,对传感器进行了风向测试.如图 11 所示,当风速为 2m/s,加热功率分别为 10 和 50mW 时,两路输出电压依然随风向变化呈正弦和余弦变化.当加热功率增加时,传感器的灵敏度有较大幅度的提高.对于低功耗产品,需要在灵敏度和功耗之间进行折中.

利用公式,进行反正切计算,可以得到测量的风向值.图 12 为三种情况下,测量值与实际值之间的误差分析.在这三种情况下,误差均不超过 8°.

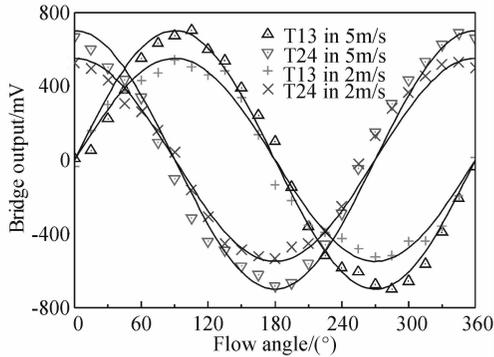


图 10 风速分别为 2 和 5m/s 时,输出电压随风向变化曲线
Fig. 10 Output versus flow angle with wind speed of 2 and 5m/s

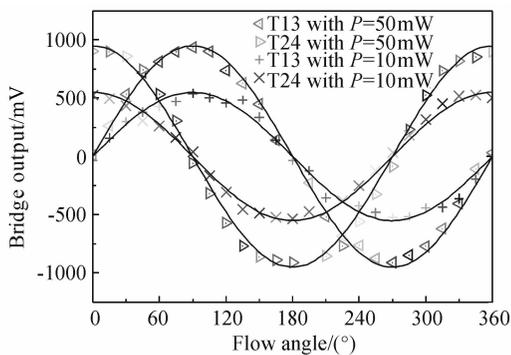


图 11 加热功率分别为 10 和 50mW 时,输出电压随风向变化曲线
Fig. 11 Output versus flow angle with heat power of 10 and 50mW

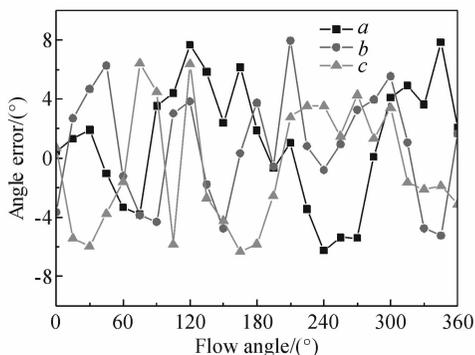


图 12 三种情况下的误差分析 a: 加热功率为 10mW, 风速为 5m/s; b: 加热功率为 10mW, 风速为 2m/s; c: 加热功率为 50mW, 风速为 2m/s

Fig. 12 Error analysis a: Heat power of 10mW and wind speed of 5m/s; b: Heat power of 10mW and wind speed of 2m/s; c: Heat power of 50mW and wind speed of 2m/s

6 结论

本文采用两步金属剥离工艺在玻璃衬底上制作了一种二维风速风向传感器,并采用 ANSYS 软件对不同风速及风向作用下的温度场分布情况进行了模拟.有限元分析结果表明,在量程范围内,本传感器的温度灵敏度达 $0.1\text{K}/(\text{m/s})$,较传统 Si 基风速传感器提高了 100 倍以上.此外,热温差测量的量程较文献[4,9]有较大的提高.风洞测试结果与理论模拟结果相符,风速测量的量程达到 10m/s ,风向测量的误差不超过 8° ,完全满足气象测量需要.为了进一步提高风速测量的量程,可以引入反馈,采用恒温差控制的方法.此外,该传感器具有低功耗灵敏度高和响应时间快的优点,而且传感器无需后处理,结构牢固,适合产业化生产.今后的工作主要集中在对于传感器的封装和传感器的恒温差控制电路上.

参考文献

- [1] Makinwa K K A. Flow sensing with thermal sigma-delta modulators. PhD Thesis, Delft University of Technology, 2004:95
- [2] Moser D, Balthes H. A high sensitivity CMOS gas flow sensor on a thin dielectric membrane. Sensors and Actuators A, 1993, 37/38:33
- [3] Mayer F, Haberli A, Jacobs H. Single-chip CMOS anemometer. Electron Devices Meeting, Hong Kong, 1997:895
- [4] Yoon E, Wise K D. An integrated mass flow sensor with on-chip CMOS interface circuitry. IEEE Trans Electron Devices, 1992, 39(6):1376
- [5] Huang Qing'an, Qin Ming, Zhang Zhongping, et al. Weather station on a chip. Proceedings of IEEE, 2003, 2:1106
- [6] Gao Donghui, Qin Ming, Chen Haiyang. A self-packaged thermal flow sensor by CMOS MEMS technology. Proceedings of IEEE, 2004:879
- [7] Sun Jianbo, Qin Ming, Huang Qing'an. Flip-chip packaging for a two-dimensional thermal flow sensor using a copper pillar bump technology. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(1):990
- [8] Shen Guangping, Qin Ming, Huang Qing'an. SPICE model with lumped circuit for thermal flow sensor. IEEE Sensors, 2006:1444
- [9] Mayer F, Salis G, Funk J, et al. Scaling of thermal CMOS gas flow microsensors: experiment and simulation. MEMS, 1996:116
- [10] Kim Seunghyun, Kim Sunghyun, Kim Yongduk. Design and fabrication of a flow sensor detecting flow direction and velocity. Transducers, Boston, 2003, 2:1927
- [11] Makinwa K A A, Huijsing J H. Constant power operation of a two-dimensional flow sensor. IEEE Trans Instrum Meas, 2002, 51(4):840
- [12] Oudheusden B W V. Silicon thermal flow sensor with a two dimensional direction sensitivity. Measurement Science Technology, 1990:565

- [13] Gao Donghui, Qin Ming, Huang Qing'an. Thermal simulate of a silicon gas flow sensor and its packaging. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26: 368 (in Chinese) [高冬晖, 秦明, 黄庆安. 硅热流量传感器封装的热模拟分析. *半导体学报*, 2005, 26: 368]
- [14] ANSYS ICEM CFD Help Navigator, 2006, 3.2.1
- [15] ANSYS CFX-Pre Release 10.0, 2006: 139
- [16] Makinwa K A A, Huijsing J H. A wind sensor with an integrated low-offset instrumentation amplifier. *The 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 2001: 1505

Design of a 2D Thermal Wind Sensor Based on MEMS Process*

Shen Guangping[†], Wu Jian, Zhang Hua, Qin Ming, and Huang Qing'an

(Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The design, fabrication, and test results of a 2D thermal wind sensor are presented. The wind sensor measures wind speed and direction by calorimetric principle in constant power mode. Heater and detector resistors are fabricated on glass substrate using a lift-off process. The fabrication is simple and reliable, and good thermal isolation and high sensitivity are achieved. The sensor can detect wind speed in the range of 10m/s and flow direction over 360° with an error of less than 8°. The response time of the sensor is less than 1s, and the heat power is 10mW.

Key words: MEMS; lift-off process; wind speed; wind direction; flow sensor

EEACC: 7230

Article ID: 0253-4177(2007)11-1830-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90607002)

[†] Corresponding author. Email: sgapple@163.com

Received 16 May 2007, revised manuscript received 3 July 2007