

硅热流量传感器封装的热模拟分析*

高冬晖 秦 明 黄庆安

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 针对硅热流量传感器的封装, 给出了其一维简化理论模型, 并采用有限元分析工具 ANSYS/FLOTRAN, 建立了该封装结构的热模型. 模拟结果显示, 该封装后的传感器的温度场与未封装传感器相似, 证明陶瓷封装结构是可行的; 同时比较了封装前后传感器性能的差异, 并进一步分析了传感器的热性能及其特征尺寸的关系. 该模型的建立, 可以减少大量的模拟分析过程, 减小计算量, 研究结果将为该传感器封装的进一步优化设计提供理论参考和依据.

关键词: 有限元分析; 硅热流量传感器; 封装; 热模拟

EEACC: 0290T; 2575D; 7230M

中图分类号: TP212.6 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)02-0368-05

1 引言

热流量传感器在现代社会的应用越来越广泛, 对于农业生产、气象、医学以及日常生活都有重要的意义. 国内外的很多科学家都在致力于该方面的研究, 尤其是对薄膜结构的硅热流量风速计的研究最为活跃^[1~3], 某些传感器即将投入商业化生产. 目前, 阻碍热流量传感器进一步发展的重要一环是其封装. 硅热流量传感器的封装, 要求传感器部分暴露在空气中或与环境有良好的热交换, 而其处理电路则应与环境隔离, 二者在封装要求上的矛盾, 加大了封装的难度. 国内外关于热流传感器及其封装的计算机模拟也不少^[4,5], 但由于模型建立的复杂性以及计算上的难度, 使得传感器的计算机模拟分析在一定程度上滞后于传感器的实际发展. 一个精确模型的建立和模拟会给设计者带来很大的方便, 其中包括可以缩短研发周期, 对器件设计进行优化, 而不用进行重复的试验, 最终降低器件的成本.

本文利用 ANSYS 中 FLOTRAN CFD 分析功能, 对封装之后的 MEMS 风速传感器进行建模和热

模拟; 给出其一维理论模型和 ANSYS 模拟结果, 从理论上验证了封装后传感器的工作原理依然成立; 最后, 分析了该传感器的热性能与几何尺寸的关系.

2 传感器结构及其封装

本文研究的热流传感器结构如图 1 所示. 采用 CMOS MEMS 工艺, 整个结构处于 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 形成的悬浮的绝热薄膜中. 结构的中间是测温二极管, 四周是 n^+ 扩散多晶硅加热条以及测温单元——热堆, 热堆由 15 个 n^+ 扩散的多晶硅条和铝条串连而成, 整个结构完全对称分布. 热堆的冷端位于硅衬底上, 和硅衬底保持同温 T_0 ; 热端位于悬浮的绝热膜内. 当风速 $v = 0$ 时, 由于整个结构对称分布, 故对边热堆的热端温度相等; 当风速 $v > 0$ 时, 温度分布不再对称, 该对边热端温差即为风速的函数.

该传感器的封装, 采用表面贴陶瓷片 (直径为 22mm, 厚度为 0.3mm, 热导率为 $20\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 方法, 其封装后的结构如图 2 所示. 传感器表面的压焊块等图形和陶瓷表面相应的厚膜图形接触, 并从陶瓷上引线接出, 同时陶瓷表面提供了一个和空气接

*江苏省自然科学基金资助项目 (批准号: BK2003052)

高冬晖 男, 1979 年出生, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 集成传感器的研究. Email: gdhp79@hotmail.com

秦 明 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 主要从事 MEMS 传感器和光 MEMS 器件的研究.

黄庆安 男, 1963 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事微电子技术及 MEMS 的教学与研究.

2004-01-09 收到, 2004-05-09 定稿

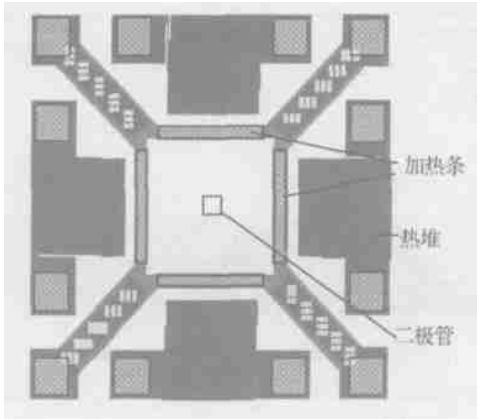


图 1 传感器结构表面示意图

Fig.1 Schematic structure of silicon sensor

触的平整界面. 封装后的传感器, 正面和空气有良好的热交换, 同时引线被保护, 满足了 MEMS 封装的要求. 进一步的封装也是需要的, 用来引导空气水平和传感器表面接触.

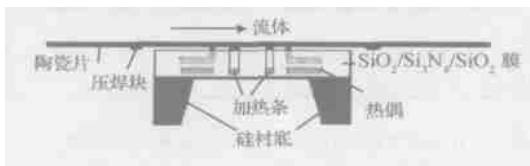


图 2 封装后的传感器的剖面结构图

Fig.2 Cross section of the packaged sensor

3 热学模型

该气体热流量传感器的有限元模型结构及其特征尺寸如图 3 所示. 其中, D , Gap 分别为整个传感器结构流体部分的长和宽, W 为陶瓷片厚度, L 为测温点距加热部分的距离, H 为加热条宽. 在模拟时, 采用恒温差工作模式^[1], 保持加热条的温度为 310 K, 并假设入口气体温度等于芯片衬底温度, 即 273 K.

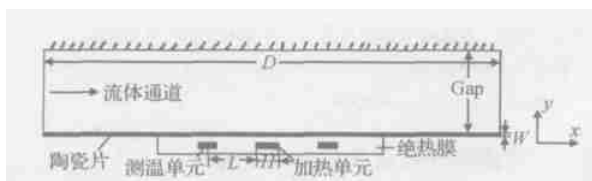


图 3 有限元模型结构示意图

Fig.3 Schematic structure of the FEA model

对该有限元的热分析, 我们采用了 ANSYS 中 FLOTTRAN CFD 的热-流体耦合单元 FLUID141, 建立二维固体和液体耦合模型. 在分析中, 流体速度小于 20m/s, 其雷诺系数 Re 满足层流的条件, 故不需要激发紊流模型. 同时, 为简化模型, 我们进行了如下的假设: (1) 该流体为不可压缩流且稳态的气体; (2) 假设流体的入口温度恒为 273 K; (3) 由于绝热膜热导率很小, 加热部分向周围绝热膜的热传导可以忽略, 而只考虑其向陶瓷热传导.

4 一维理论模型

正面贴陶瓷封装后的传感器, 横向热传导较大, 使得整个陶瓷面被加热. 在零风速下, 陶瓷面的温度以中心对称分布. 当陶瓷表面进行吹风时, 上游端热对流最大, 下游端热对流相对较小. 这会在陶瓷表面形成温度梯度.

考虑陶瓷表面的温度 T_s 分布情况, 为简化, 我们将陶瓷部分看作很薄的一维长方形, 空间坐标如图 3 所示. 假设流体只有 x 方向的速度, 且为层流, 其 x 方向速度随 y 线性变化. 由于 $W \ll D$, 故不考虑陶瓷厚度方向的温度梯度. 整个传感器满足瞬态热平衡^[6], 即

$$s_c s W \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s W \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \right) - q_f(x) + q_h(x)$$

其中 s, c_s, k_s 分别表示陶瓷材料的密度、比热容以及热导率. 等式右边第一项表示由于热导率引起的热分布, $q_f(x), q_h(x)$ 分别表示单位面积的热对流量和热产生量. 由于采用横温差 T_0 (芯片表面平均温度和流体初始温度差) 控制, 故传感器中没有热量的积累, 即存在

$$q_h(x) = \frac{1}{D} \int_0^D q_f(x) dx \tag{2}$$

对一个给定的流体, 对流传热 $q_f(x)$ 和陶瓷表面温度有关. 由于表面温度梯度比较小, 为简化起见, 我们将陶瓷表面假设为等温面, 则有^[7]

$$q_f = 0.5384 k_f T_0 \left(\frac{w}{\mu x} \right)^{1/3} \tag{3}$$

其中 x 为流体在陶瓷面上吹过的距离; k_f 为流体的热导率; w 为流体中切向力; μ 为流体粘制系数; 为流体热扩散率.

所以, 在稳态情况下, 通过对 (1) 式进行两次积分, 可以求出 T_s , 即

$$T_s(x) = T_s(0) + (k_s W)^{-1} \times \int_0^x \int_0^x q_f(x) dx dx - \frac{1}{2} q_h x^2 \quad (4)$$

将(2),(3)式代入(4)式,则陶瓷表面以中心对称的两点之间的温差 $T = T_s(D-x) - T_s(x)$ 可以计算得到

$$T/T_0 = C \frac{k_f D}{k_s W} (v_w D^2 / \mu)^{1/3} \quad (5)$$

其中 C 为常数,和测温点所处位置有关.由边界层理论, $w \propto v^{\frac{3}{2}}$,所以,输出 T 和流体速度关系有

$$T/T_0 = C \frac{k_f D}{k_s W} (D^2 / \mu)^{1/3} \sqrt{v} \quad (6)$$

可以看到,陶瓷封装后的传感器虽然横向热传导比较大,但其工作原理依然成立,且输出和流体速度仍然成一定的函数关系.

5 模拟结果分析

5.1 工作原理验证

图4表示了固定尺寸 ($D = 22\text{mm}$, $\text{Gap} = 4\text{mm}$, $W = 0.3\text{mm}$, $H = 30\mu\text{m}$),流体入口温度恒为 273K ,在有风、无风情况下,陶瓷片和流体部分的温度分布云图.云图分为两层,底层是陶瓷中的温度分布,上层则为流体的温度分布.可以看到,无气流通过时,整个温度对称分布;而当 $v = 1\text{m/s}$ 时,温度分布云图不再对称,略向下游方向倾斜.这是因为当有气流通过传感器表面时,将携带走一部分热量,在传感器表面形成一层热边界层,使整个温度分布不再对称.因此,陶瓷封装后的传感器,其工作原理仍然成立.

5.2 封装前后性能比较

图5表示了风速传感器 ($L = 117\mu\text{m}$, $\text{Gap} = 4\text{mm}$, $H = 30\mu\text{m}$) 封装前后的输出 T 随风速 v 变化的曲线比较.可以看到封装后传感器的灵敏度有一定程度的下降,但其所能测得的最大风速 v_{max} 有一定程度的提高.这是因为传感器封装前横向热传导较小,故灵敏度较高;但当风速增大到一定程度后,上游端的温度场基本不能建立,故量程较小;而陶瓷封装以后的传感器,由于其横向热传导较大,故灵敏度较低,但量程会有所提高.

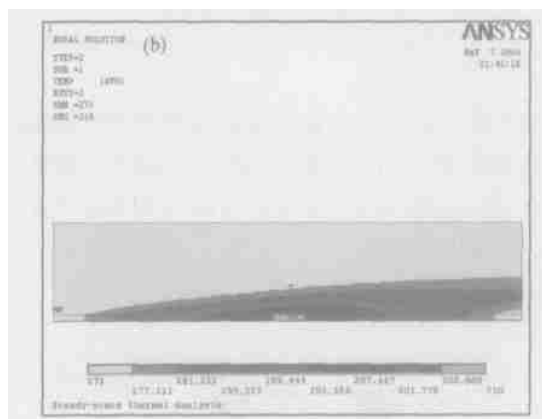
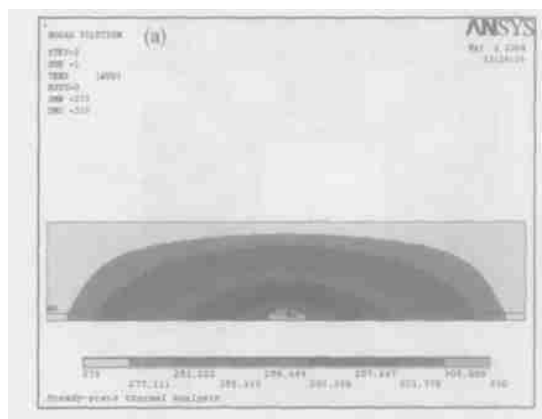


图4 有无风速时,陶瓷片和流体中温度分布云图 (a) $v = 0\text{m/s}$; (b) $v = 1\text{m/s}$

Fig. 4 Temperature distribution of the sensors (a) $v = 0\text{m/s}$; (b) $v = 1\text{m/s}$

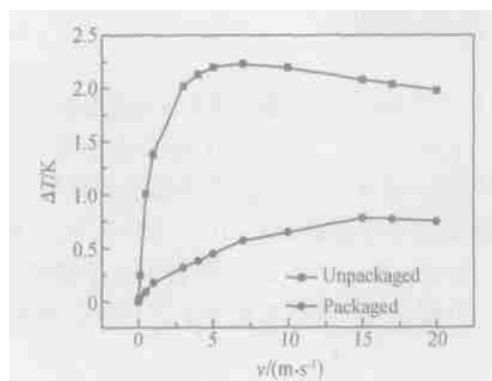


图5 封装前后传感器输出 T 随风速 v 的变化曲线
Fig. 5 Comparison of the output of the sensor before and after being packaged

5.3 传感器性能与其几何尺寸关系

改变传感器的尺寸分别进行模拟,观察传感器输出温度差 T 对应于尺寸的变化规律.传感器的加热部分和测温点的距离 L 变化范围为 $20 \sim$

350 μm , 流体通道 Gap 变化范围为 0.4 ~ 40mm, 流体速度 v 变化范围为 0 ~ 20m/s, 对上面的各种组合进行模拟. 图 6 (a), (b) 和 (c) 表示了在 Gap 一定的情况下, 对不同的 L , 传感器输出温差 T 随风速 v 的变化曲线. 这些曲线也显示了风速量程 v_{max} 的变化情况. 从这些曲线中, 我们可以看到对每个固定的 Gap 和 L , 都存在一个风速量程 v_{max} . 对固定的 Gap , 在 $v < v_{\text{max}}$ 内, L 越大, 输出 T 相对于风速 v 的灵敏度越高. 到达某个 L 值后, 输出灵敏度到达

最大值, 并开始下降. 随 Gap 的增加, 输出 $(T)_{\text{max}}$ 变大. 另外, 随 Gap 的增加, 输出灵敏度下降, 但大多数 L 处的风速量程 v_{max} 也在增加. 如对 $\text{Gap} = 0.4\text{mm}$, 大多数 L 处的 v_{max} 为 5m/s 左右; 而当 $\text{Gap} = 40\text{mm}$, 大多数 L 处的 v_{max} 则提高到 15m/s.

对于本文介绍的温差型热流量风速计, 风速量程 v_{max} 是一个比较重要的指标. 根据图 6, 对某一固定的 Gap , 在 L 的一定范围内, 随 L 的增加, 该点所能测得的风速量程 v_{max} 单调减小.

综上所述, 在固定 Gap 的情况下, 存在一个 L 值, 使传感器输出 T 最大. 同时, 在设计时要考虑版图面积的大小, 因为版图面积大小直接影响成本的大小. 因此, 综合考虑版图面积和传感器所需要的速度量程 v_{max} , 选择一个合适的 $(T)_{\text{max}}$, 就能得到一个最优化的传感器特征尺寸.

6 结论

本文根据 MEMS 风速传感器的结构和封装, 建立了其有限元热模型, 模拟并验证了封装后的硅热风速传感器工作原理仍然成立. 分析表明, 封装后的传感器相对于封装前, 其灵敏度有一定程度的下降, 但封装后的风速量程有所提高. 论文还进一步分析了该传感器热性能与其特征尺寸的关系. 研究结果将为该类传感器及其封装的优化设计提供有价值的参考.

参考文献

- [1] Makinwa K A A, Huijsing J H, Hagedoorn A. Industrial design of a solid-state wind sensor. Proceedings of the First ISA/ IEEE Conference, 2001 :68
- [2] Mayer F, Haberli A, Jacobs H, et al. Single-chip CMOS anemometer. Technical Digest of Electron Devices Meeting, 1997 :895
- [3] Kim S U, Kim S, Kim Y, et al. Design and fabrication of a flow sensor detecting flow direction and velocity. 12th International Conference on Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2003, 2:1927
- [4] Mayer F, Salis G, Funk J, et al. Scaling of thermal CMOS gas flow microsensors: experiment and simulation. Proceedings of An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, 1996:116
- [5] Matova S P, Huijsing J H. Three dimensional computer model of a smart wind sensor. Proceedings of SeSens, 2001 :834

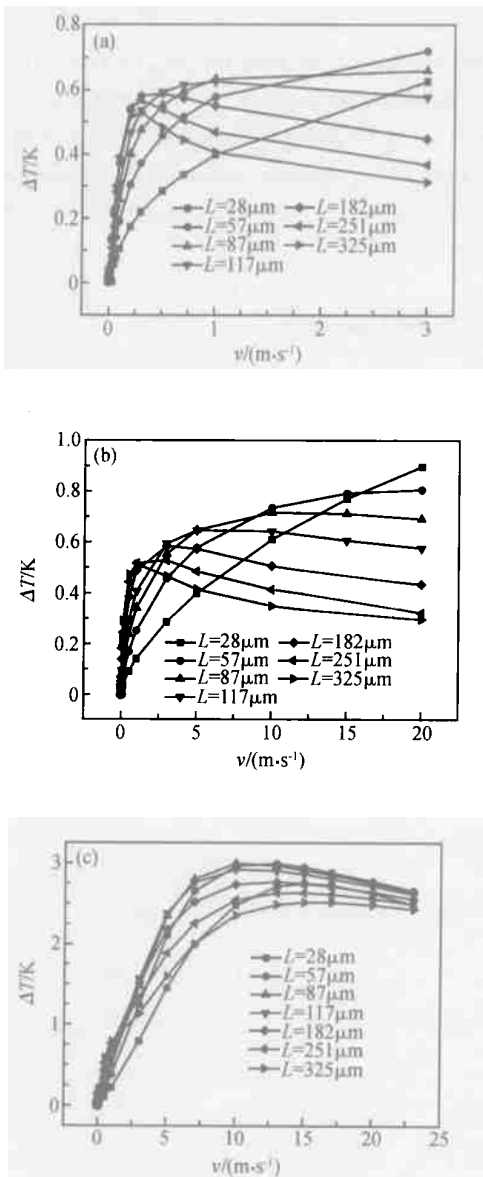


图 6 传感器输出温差 T 在不同的间距 Gap 下随风速 v 的变化关系曲线 (a) $\text{Gap} = 0.4\text{mm}$; (b) $\text{Gap} = 4\text{mm}$; (c) $\text{Gap} = 40\text{mm}$

Fig.6 Variation of T versus v (a) $\text{Gap} = 0.4\text{mm}$; (b) $\text{Gap} = 4\text{mm}$; (c) $\text{Gap} = 40\text{mm}$

- [6] Dai Guosheng. Thermal transfer (version 2). Beijing: Chinese Higher Education Press, 1999:128 [戴锅生. 传热学(第二版). 北京:高等教育出版社, 1999:128]
- [7] Van Oudheusden B W. The thermal modeling of a flow sensor based on differential convective heat transfer. Sensors and Actuators A, 1991, 29:93

Thermal Simulation of Silicon Gas Flow Sensor and Its Packaging *

Gao Donghui, Qin Ming, and Huang Qing'an

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

Abstract : Based on the packaging of a silicon gas flow sensor, a simplified one-dimensional analytical model is given. The FEA thermal model of the sensor is also built with ANSYS/ FLOTRAN. The simulation results show that the temperature field of the ceramic packaged sensor is similar to that of unpackaged one, which proves the feasibility of this packaging scheme. The performances of packaged and unpackaged sensor is compared and the influence of the structure parameters on the thermal performance of the sensor are also discussed in detail. The thermal model and its analysis provide a simple method for the optimization design of the packaging of the gas flow sensor.

Key words : finite element analysis; silicon gas flow sensor; packaging; thermal simulation

EEACC : 0290T; 2575D; 7230M

Article ID : 0253-4177(2005)02-0368-05

* Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2003052)

Gao Donghui male, was born in 1979, graduate student. He is engaged in the research on flow sensors. Email: gdhp79@hotmail.com

Qin Ming male, was born in 1967, professor. He is engaged in research on MEMS sensors.

Huang Qing'an male, was born in 1963, professor. He is engaged in the research on micro-electronic technologies and MEMS.

Received 9 January 2004, revised manuscript received 9 May 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics