

热电薄膜型气体流量传感器的热模拟分析

张昭勇, 秦明, 黄庆安, 朱昊

(东南大学微电子中心 MEMS 教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 本文利用有限元分析工具 ANSYS/ FLOTTRAN, 模拟并分析了一个基于薄膜结构的热电型气体流量传感器的温度场. 并具体地分析了在气体流量通道入口处气体的流向角度对传感器输出信号以及气体流动状态的影响. 将最终的模拟计算结果与实验数据进行比较, 发现二者基本吻合. 利用此热学模型来模拟和分析此类传感器, 不但可以减少大量的模拟分析过程而且可以降低计算的复杂度, 同时也为该类传感器的进一步优化设计提供了一个非常简单而有效的方法.

关键词: 有限元分析; 热模拟; 计算流体动力学; 气体流量传感器

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 02-0189-03

Thermal Simulation of a Gas Flow Sensor Based on Thin-Film Thermopiles

ZHANG Zhao-yong, QIN Ming, HUANG Qing-An, ZHU Hao

(The Key Laboratory of MEMS of Education Ministry, Microelectronics Center, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Thermal simulations and calculations of a thermal gas flow sensor based on thin-film thermopiles are presented using the FEA tool ANSYS/ FLOTTRAN. The influence of inlet gas flow pitch angle on the sensor output and gas flow is investigated. The results of thermal simulation related to the response of the signal voltage to variations of flow velocity at constant gas temperature are compared with experimental data. The good agreement between calculated and experimental results confirms the proposed two-dimensional thermal model. The thermal model and simulation provide a simple method for the design optimization of gas flow sensors based on thin-film thermopiles.

Key words: FEA (Finite Element Analysis); thermal simulation; CFD (Computational Fluid Dynamics); gas flow sensors

1 引言

流量传感器在现代社会中的应用已愈加广泛, 它对于工农业生产、气象和医学以及我们的日常生活等都具有很重要的意义. 流量传感器的工作原理大致可以分为动量型和传输型. 硅热流量传感器属于热式传输型. 相对于其它流量传感器而言, 硅热流量传感器具有许多明显的优点^[1]. 它的主要工作原理是依靠被加热的传感器与流体间的对流换热现象. 当有流体经过被加热的传感器时, 传感器的温度分布将会随流体的流动状态的变化而改变. 其温度分布可以利用热敏感元件(如热敏电阻、二极管或者热电偶等)来实现测量. 按其具体的工作原理, 可以将热流量传感器分为三类: 热损耗型、热温差型和热脉冲型. 其中热温差型流量传感器的应用最为广泛. 在此类传感器中由热电堆(由热电偶串联而组成)所构成的热敏感元件则最为常见. 此类传感器以其易于集成、尺寸小、价格低和响应时间快等显著优点而倍受青睐. 近几年来, 国外(主要有瑞士、荷兰和美国等)正致力于此方面的研究^[2,3], 其中对于基于薄膜结构的热电型气体流量传感器(主要是利用 CMOS MEMS^[4] 技术来制作)的研究则最为活跃. 国外也开展了有关于此类传感器的计算机模拟和分析^[5-7], 但是由于模型建立的复杂性以及计算上的难度, 从而使此类传感器的模拟分析成为制约其进一步发展的障碍之一.

有限元分析 (FEA) 软件 ANSYS 目前已成为世界上很多工

程领域的必备 FEA 工具. ANSYS 中的 FLOTTRAN CFD 分析功能主要是一个用于分析二维或者三维流体流动场的强大工具, 它完全可以解决热流量传感器在流场中的温度分布问题. 基于本实验室所研制的一个一维热电型气体流量传感器(属于热温差型工作原理), 本文利用 ANSYS/ FLOTTRAN CFD 分析功能对此传感器进行建模以及热模拟分析, 并具体地分析入口处气体流向角度对传感器输出信号以及气体流动状态的影响. 由于此传感器采用 CMOS MEMS 技术, 因此可以将后处理电路同传感器共同集成在同一芯片上, 从而为此传感器输出

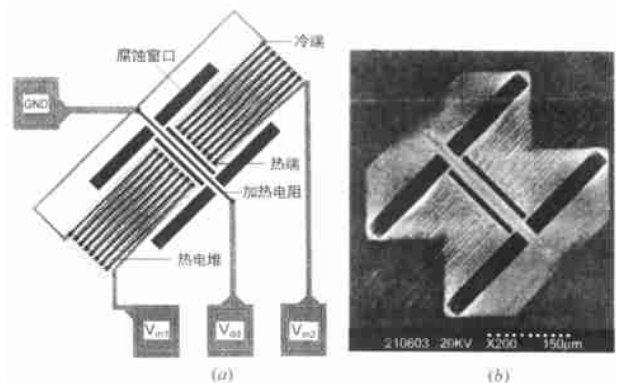


图1 传感器的布局图和 SEM 照片.
(a) 传感器的布局图; (b) 传感器的 SEM 照片

收稿日期: 2002-03-11; 修回日期: 2002-06-07

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才培养计划基金; 江苏省高新技术项目 (No. BG2001035); 863 项目 (No. 2002AA404540)

信号的进一步处理降低了难度、提高了可靠性。另外此传感器的热电堆与加热电阻之间的介质为空气(利用合理的传感器布局 and CMOS 工艺后的体硅各向异性腐蚀技术而获得),因此传感器的灵敏度要略高于其它同类传感器。其分析方法和结果对该类传感器的设计具有一定指导意义。

2 传感器的设计

本文所提到的一维气体流量传感器,其器件布局如图 1(a)所示。其中每个热电堆由八个串联的铝/p 型多晶硅热电偶所组成,热电堆的热端靠近加热电阻且处于悬浮的绝缘薄膜之中,冷端则位于体硅之上的绝缘薄膜之内。传感器的中间为一个多晶硅加热电阻,图中的四个腐蚀窗口为体硅的各向异性腐蚀窗口。整个热电堆和加热电阻都处于一个由 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 所组成的绝缘薄膜之中。为了提高衬底的体硅腐蚀速率,也是为了能够达到预期的悬浮薄膜结构,所以将传感器的结构布局旋转了 45° 。图 1(b)为传感器腐蚀后的 SEM 照片。由此图可见,最后的传感器悬浮薄膜结构可以满足测试的需要。

此气体流量传感器采用 $2\mu\text{m}$ P 阱 CMOS 工艺加工制备而成,然后无需光刻,即可进行正面体硅的各向异性腐蚀。此传感器加热器部分的宽度为 $30\mu\text{m}$,加热器距离热电堆热端的距离为 $25\mu\text{m}$ 。每个热电堆的长度为 $300\mu\text{m}$,宽度为 $180\mu\text{m}$ 。由铝/p 型多晶硅所组成的热电偶,其 Seebeck 系数约为 $127\mu\text{V}/\text{K}^{[9]}$ 。为了测量的需要,此芯片直接压焊在一块 PCB(Printed Circuit Board 即印制线路板)板上。然后经过特殊的封装并将其与外部信号处理电路相连。

3 热学模型

气体流量传感器在气体流量通道中的布置及有限元分析模型的具体几何尺寸如图 2 所示。其中气体流量通道的直径 $D = 4\text{mm}$ 。在气体通道的入口处,假设气体的温度等于芯片衬

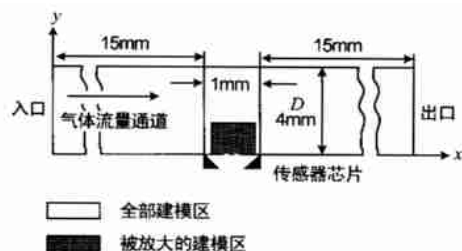


图 2 整个有限元分析模型的具体几何尺寸

底的温度。当传感器工作时,首先加热电阻会将传感器加热到一定温度(高于气体温度)。在没有气体流经芯片表面时,因为传感器的对称布局,所以它的温度也将呈对称分布(处于气流向上游的热电堆热端温度 T_U 等于下游的热电堆热端温度 T_D)。当气体以 v 的流速平行于气体流量通道流经芯片表面时,气体会携带走部分热量并在其表面形成一个较薄的热边界层。传感器的温度因此会呈一定的梯度分布(此时 $T_U < T_D$)。温度差 $T_S = T_D - T_U$ 是气体的平均流速和温度的函数。利用热电偶的 Seebeck 效应,两个热电堆之间的电压差变化即

直接地反映了这一温度差的变化。

在进行此流量传感器的有限元分析中,气体流速 v 的变化从 0m/s 到 1.5m/s 。对于最大气体流速 1.5m/s 而言,此时的雷诺数 $Re = vD/\mu_G$ (μ_G 为气体的粘滞度, ρ_G 为气体的密度)不大于 450,此值远远小于 2300。因此只要气体是平行于气体通道流入的,那么气体的流动状态就是层流态(因而不用考虑气体的紊流现象)。在模拟分析中,固定加热电阻的功率为 $N_H = 6.5\text{mW}$ 并假设传感器的衬底温度固定为 293K 。此传感器和气体流量通道的有限元分析模型采用 HLOTTRAN 中的 FLUID141 作为单元类型。此模型共使用了四种材料(所在区域分别为加热区、热电薄膜区和介于两者之间的区域以及气体流量通道区)。

传感器的加热区和热电薄膜区分别由不同结构的材料所组成,其各自的平均热传导率可以通过计算来求得^[10]。参照传感器的实验数据,取加热区的平均热传导率为 $15\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$,热电薄膜区的平均热传导率为 $20\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ 。另外传感器的敏感膜处于悬浮状态,在以上条件下其自然热对流换热系数约为 $h = 42\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ 。此自然对流换热作为表面载荷加载在传感器悬浮薄膜的下部(面对腐蚀坑的方向)。

4 有限元分析结果

当 $v = 0\text{m/s}$ 和环境温度为 293K 时,利用 ANSYS 软件中的 HLOTTRAN CFD 分析功能,分析得传感器的温度分析结果如图 3 所示(为图 2 中被放大的建模区部分)。从图中温度分布云图可见,整个温度分布非常对称。但是实际情况下,由于传感器的制作中所出现的工艺偏差,往往温度呈现略微的非对称性。当有气体流量载荷加载在气体流量通道入口处时,气体流经气体通道将会携带走一部分热量,从而使传感器的温度分布不再呈现对称性。当气体平均流速为 $v = 0.68\text{m/s}$ 时(平行于气体流量通道方向),传感器的温度分布情况如图 4 所示。

在实际情况下,有时气体流入气体通道的流向角度会有略微的偏转(不再平行于 x 轴,即流向与 x 轴正方向成一定的小角度 ϕ)。当气体流量通道的入口处气体流速的绝对值为 $|v| = 1.0\text{m/s}$ 时,通过有限元的热模拟分析,可以得到此气流流向角度 ($|\phi| < 20^\circ$) 对传感器输出电压的影响(如图 5 所示)。

由此图分析计算可知,当气体流向角度 $|\phi| < 15^\circ$ 时,传感器输出电压信号的偏差在 2% 以内,因此可以忽略此小角度对传感器输出电压信号的影响。但是如果气体流向角度 $|\phi| > 20^\circ$ 时,就必须要考虑它对传感器输出电压信号的影响。对于在其它流速情况下,气体流向角度对传感器输出电压信号的影响可以利用以上方法类似推导求得。即使气体的流速绝对值在层流态范围内,但是气体流向角度有可能会对气体流动状态产生影响。不过只要气体流向角度不是偏差很大(如气体流速绝对值为 $|v| = 1.0\text{m/s}$ 时,只要气体流向角度 $|\phi| < 15^\circ$,那么气体在流量通道中的流动状态仍为层流态。例如,当气体流速的绝对值 $|v| = 1.0\text{m/s}$ 流向角 $\phi = 10^\circ$ 时,处于传感器附近的气体流速矢量分析结果如图 6 所示。从此图可见,在传感器附近,其箭头水平指向同一方向,说明没有出现其他

方向的流向,所以在传感器附近气体的流动状态属于层流态,没有出现紊流.因此在模拟和分析处于不同的流速条件下的

此类传感器时,有必要研究一下气体流向角度对气体流动状态和传感器温度分布的影响.

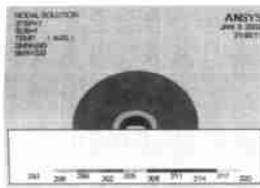


图 3 当 $v = 0\text{m/s}$ 时,经过悬浮薄膜的二维温度场分析结果



图 4 当气体平均流速 $v = 0.68\text{m/s}$ 时,经过悬浮薄膜的二维温度场分析结果

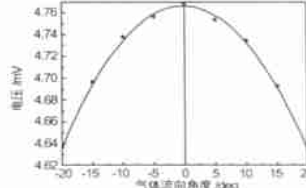


图 5 当入口处气体流速绝对值 $|v| = 1.0\text{m/s}$ 时,气体流向角度对传感器输出电压的影响

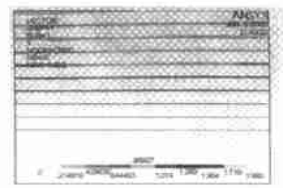


图 6 当入口处气体流速的绝对值 $|v| = 1.0\text{m/s}$ 、流向角 $\phi = 10^\circ$ 时,处于传感器附近的气体流速矢量分析结果

5 讨论

当气体温度与环境温度相同时,传感器热电堆测试所得的电压信号将是平均气体流速的函数,其电压值计算公式为 $U_s = 1.016\text{mVK}^{-1}(T_D - T_U)$. 图 7 为有限元模拟分析结果和实际测试结果的对比图.

从此图可见,有限元分析结果与实际测试结果基本吻合.从而可以证明,利用此有限元分析方法来模拟和计算此传感器的二维温度场分布是完全可行的.

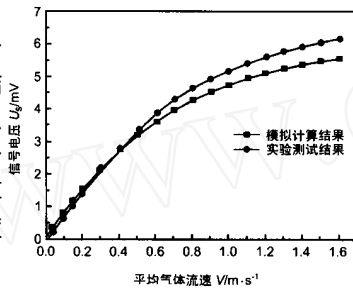


图 7 传感器的信号电压 U_s 与平均气体流速 v 的关系

在微小流速情况下,传感器的灵敏度约为 $0.96\text{VW}^{-1}\text{m}^{-1}\text{s}$,略高于其它同类传感器的灵敏度.

当流速过大的时候,由于理论模拟是按照加热电阻温度不变来模拟的,但是实际上当流速过大时,热损失不可以被忽略,所以曲线偏差会变大.

6 结论

本文利用有限元分析工具 ANSYS/HOTRAN,具体分析了一个基于薄膜结构的热电型气体流量传感器的温度场.并分析了在气体流量通道入口处气体流向角度对传感器输出信号以及气体流动状态的影响.将模拟分析所得的数据与实验数据比较,发现二者基本吻合,从而可以看出使用此二维热学有限元分析方法来描述热流量传感器的温度场分布是可行的.另外通过模拟分析可知,只要能够保证流向角度偏差尽量小,那么结果就不会超出实际的误差范围.综合而言,利用此热学模型来模拟和分析此类传感器,不但可以减少大量的模拟分析过程而且可以降低计算的复杂度.另外它也为此类传感器的进一步优化设计提供了一个非常简单而有效的方法.

参考文献:

[1] 张昭勇,秦明,黄庆安.硅热流量传感器的研究与发展[J].电子器件,2001,24(1):41-47.
 [2] Mayer F,Häberli A,Jacobs H,et al. Single-chip CMOS anemometer[J]. Proc. IEDM,1997,12:895-898.
 [3] Moser D,Baltes H. High sensitivity CMOS gas flow sensor on a thin di-

electric membrane[J]. Sensors and Actuators A,1993(37-38):33-37.
 [4] Rasmussen A,Zaghloul M E. In the flow with MEMS[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine,1998,14(4):12-25.
 [5] Moser D,Lenggenhager R,Wachutka G,et al. Fabrication and modelling of CMOS microbridge gas-flow sensors[J]. Sensors and Actuators B,1992(6):165-169.
 [6] Mayer F,Salis G,Funk J,et al. Scaling of thermal CMOS gas flow microsensors: experiment and simulation[A]. Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) [C]. USA: IEEE,1996. 116-121.
 [7] Rasmussen A,Mavriplis C,Zaghloul M E,et al. Simulation and optimization of a microfluidic flow sensor[J]. Sensors and Actuators A,2001,88(2):121-132.
 [8] 黄庆安.硅微机械加工技术[M].北京:科学出版社,1996.95-100.
 [9] Paul O,von Arx M,Baltes H. Process-dependent Thermophysical properties of CMOS IC thin films[A]. The 8th International Conference on Solid State Sensors and Actuators [C]. Stockholm, Sweden: ICSSA,1995.
 [10] Völklein F,Baltes H. Optimization tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors[J]. Sensors and Actuators A,1993,36(n1):65-71.

作者简介:

张昭勇 男,1973 年生于辽宁台安,1997 年获西安理工大学学士学位,现为东南大学微电子中心、MEMS 教育部重点实验室硕士研究生,主要从事 CMOS MEMS 集成流量传感器的研究,已发表学术论文数篇. Email: zyz. abc @sohu. com.

秦明 男,1967 年生,1997 年在东南大学获博士学位,1998 年在香港科技大学作博士后,现任东南大学教授、MEMS 教育部重点实验室副主任,目前,主要从事 CMOS MEMS 和光 MEMS 研究.

黄庆安 男,1963 年 1 月生于河南洛阳,1983 年获合肥工业大学学士学位,1987 年获西安电子科技大学硕士学位,1991 年获东南大学博士学位,1983-1985 年在原电子工业部 33 研究所工作,1996-1997 年在香港科技大学作访问学者,现为东南大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、MEMS 教育部重点实验室主任,主要从事微电子技术教学、MEMS 研究工作,已出版专著 1 部:硅微机械加工技术(科学出版社,1996),发表 SCI/EI 论文 60 余篇,获中国发明专利 2 项,现担任 IEEE Senior Member, J. Appl. Phys. 和 Appl. Phys. Lett. 等期刊审稿人,半导体学报编委,电子器件主编.