

微热板阵列的热干扰*

余 隽^{1,2,†} 唐祯安¹ 黄正兴¹ 陈正豪³

(1 大连理工大学电子系, 大连 116023)

(2 中国科学院传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050)

(3 香港科技大学电子系, 香港)

摘要: 针对微热板阵列建立了热路模型, 并对热干扰进行分析. 结果表明, 由于微热板悬空结构的热阻比硅芯片的热阻高 3 个数量级, 因此微热板阵列芯片的热干扰温度取决于封装对环境的热阻, 而芯片上器件的间距对热干扰温度的影响可以忽略. 研制了 3 种布局、TO5 和 DIP16 两种封装形式的微热板阵列, 并对阵列中的热干扰问题进行了实验测试. 测试数据验证了热路模型的结论. 因此, 减小微热板阵列或集成芯片的热干扰的关键在于, 尽可能增大微热板悬空结构的热阻以及选用热阻小的封装形式.

关键词: 微热板阵列; 热干扰; 热路模型; 封装

PACC: 0720; 6670; 0710C

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)08-1581-04

1 引言

微热板是一种制作在硅片上的微型加热器件, 其优点是尺寸小、功耗低、可迅速调节温度变化, 现已广泛用于多种 MEMS 器件中, 如微量热计^[1]、微气压传感器^[2]、微气体传感器^[3]等. 微热板的基本结构包括起机械支撑作用的悬空介质薄膜, 以及充当热源的热膜电阻条. 通过合理的工艺和结构设计, 可将多个微热板传感器制作在同一芯片上形成传感器阵列, 或者将微热板传感器与外围电路集成在同一芯片上, 从而提升器件性能并降低成本. 由于微热板传感器需要加热到一定的工作温度, 即使微热板的悬空膜片结构绝热性能较好, 在微热板阵列和集成微热板传感器中仍不可避免地存在热干扰现象, 即芯片上的一个微热板加热升温会引起附近区域的传感器或电路的温度升高^[4,5]. 由一个微热板引起的热干扰可能较小, 但当阵列中多个传感器都处在加热状态时, 它们之间的热干扰可能导致微热板的温度严重偏离设定的温度, 从而一定程度上影响传感器阵列的正常工作^[6~8]. 作者根据微热板阵列器件的结构建立了简化的热路模型, 分析了微热板阵列热干扰现象的主要影响因素, 并研制了 3 种布局、两种封装形式的表面加工型微热板阵列, 通过实验测试验证了热路模型的分析结论, 并指出了减小微热板阵列芯片热干扰的关键因素.

2 微热板阵列的热路模型

微热板的结构如图 1 所示. 中部悬空区域是边长为

100 μm 的 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 介质薄膜, 其上有环形多晶硅加热电阻, 中部是 s 形多晶硅测温电阻, 用于测量微热板上的平均温度. 该区域由长 60 μm 、宽 34 μm 的 4 条桥臂支撑 4 角, 整个微热板的边长为 234 μm .

热路模型用电路模型的方法描述系统的热量传递, 即将温度等效为电位, 热功率等效为电流, 热阻等效为电阻, 因此热阻定义为 $R_T = \Delta T/Q$. 建立一个热路模型来分析微热板阵列器件的热干扰现象, 如图 2 所示, 该模型中有两个微热板. 其中, Q_{MHP1} 是微热板 MHP1 加热产生的热功率, 相当于一个热流源, T_{MHP1} 为 MHP1 的温度, T_0 为环境温度, R_{T*} 为系统中的各种热阻. 当微热板热流源一定时, 该模型中各节点的温度取决于热阻的分布. 该热路模型的传热渠道可以分为 3 层. 微热板层中, 加热电阻产生热流源 Q_{MHP1} . 微热板与环境之间有等效热阻 R_{TA1} , 此热阻来自微热板表面的热辐射以及空气对流. 设 $T_0 = 293\text{K}$, $T_{\text{MHP1}} = 573\text{K}$, 则有:

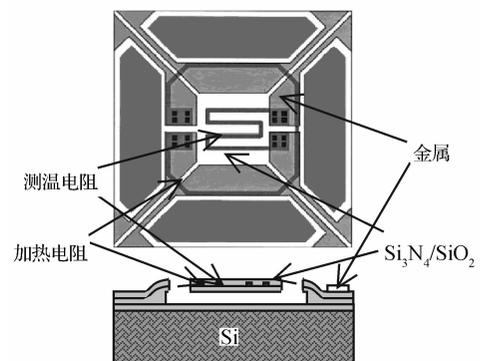


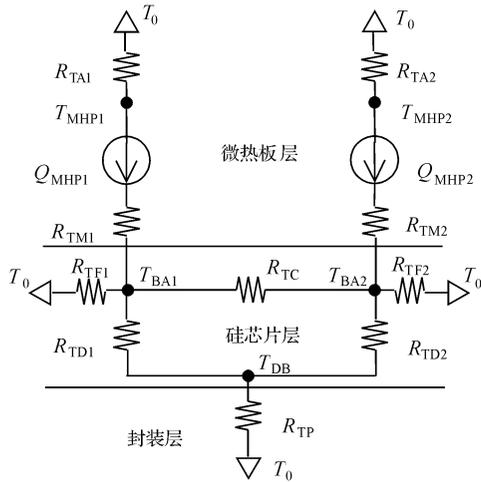
图 1 微热板结构示意图

Fig. 1 Structure of micro hotplate

* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号:2006AA040102,2006AA040106)

† 通信作者. Email: junyu@dlut.edu.cn

2008-01-21 收到



T_{MHPi} : MHP i 的温度; T_{BA} : 微热板下方的硅芯片表面温度; T_{DB} : 硅芯片底部温度; T_0 : 环境温度; R_{TA} : 微热板的表面与环境空气间的热阻; R_{TM} : 微热板与硅衬底表面间的热阻; R_{TF} : 硅芯片表面与环境空气间的热阻; R_{TC} : 两微热板之间沿硅衬底的横向热阻; R_{TD} : 芯片表面到底部的热阻; R_{TP} : 封装的热阻.

图 2 微热板阵列的热路模型

Fig. 2 Thermal circuit model of the MHP array

$$R_{TA1} = \frac{T_{MHP1} - T_0}{Q_r + Q_a} = \frac{T_{MHP1} - T_0}{\varepsilon\sigma A_s (T_{MHP1}^4 - T_0^4) + hA_s (T_{MHP1} - T_0)} \quad (1)$$

式中 Q_r 表示辐射散热量; Q_a 表示对流散热量; ε 为系统发射率, 取为 0.85; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; h 为 MHP 在空气中的自然对流换热系数, 取为 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, A_s 为 MHP 的表面积. 计算可得微热板与环境间热阻 R_{TA1} 为 $1.3 \times 10^6 \text{ K/W}$.

微热板层中的 R_{TM1} 为微热板到其下方硅衬底表面之间的等效热阻:

$$R_{TM1} = \frac{T_{MHP1} - T_{BA1}}{Q_m + Q_g} = \frac{1}{4kA_m/d_m + k_g A_s/d_g} \quad (2)$$

式中 Q_m 表示 4 条支撑桥的导热热量; Q_g 表示微热板与衬底间通过气体导热传递的热量; T_{BA1} 为 MHP1 下方硅表面的温度; k 为支撑桥的等效热导率, 由支撑桥内各层薄膜的热导率及横截面积共同决定; A_m 为支撑桥横截面积; d_m 为支撑桥厚度; k_g 为空气热导率, 为 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; d_g 为空气层厚度. 计算可得微热板到硅衬底间热阻 R_{TM1} 为 $4.3 \times 10^3 \text{ K/W}$.

Si 芯片层的传热包括 Si 衬底与悬空微热板、封装管座及环境之间的换热. R_{TC} 为两个微热板之间的等效热阻:

$$R_{TC} = \frac{T_{BA1} - T_{BA2}}{Q_c} = \frac{d_c}{k_c A_c} \quad (3)$$

式中 Q_c 表示两个微热板间通过硅芯片传递的热量; k_c 为硅的热导率; A_c 为芯片等效横截面积; d_c 为两微热板之间的距离, 在百微米数量级. R_{TC} 正比于 d_c , 当 d_c 为 $100 \mu\text{m}$ 时, 则两个微热板之间的热阻 R_{TC} 为 2.8 K/W .

R_{TD1} 为硅芯片上表面到底部之间的等效热阻:

表 1 不同封装热阻及传感器间距下各节点相对于室温升高的温度
Table 1 Temperature increase of MHP array with various R_{TP} and d_c

$R_{TP}/$ (K/W)	d_c / μm	Q_{MHP1} /mW	ΔT_{MHP1} /K	ΔT_{MHP2} /K	ΔT_{BA1} /K	ΔT_{BA2} /K	ΔT_{DB} /K
200.0	100	62.2	280.03	12.42	12.52	12.47	12.44
200.0	1000	62.2	280.02	12.40	12.54	12.44	12.43
200.0	10000	62.2	280.02	12.39	12.54	12.43	12.43
100.0	100	63.6	280.02	6.36	6.41	6.38	6.36
100.0	1000	63.6	280.01	6.34	6.46	6.36	6.36
100.0	10000	63.6	280.02	6.34	6.47	6.36	6.36
30.0	100	64.6	280.03	1.95	1.99	1.96	1.94
30.0	1000	64.6	280.02	1.94	2.04	1.94	1.94
30.0	10000	64.6	280.03	1.93	2.05	1.94	1.94
10.0	100	64.9	280.03	0.67	0.70	0.67	0.65
10.0	1000	64.9	280.03	0.65	0.75	0.66	0.65
10.0	10000	64.9	280.03	0.65	0.76	0.65	0.65

$$R_{TD1} = \frac{T_{BA1} - T_{DB}}{Q_D} = \frac{d_D}{k_c A_D} \quad (4)$$

式中 Q_c 表示沿芯片厚度方向的热流; T_{DB} 为硅芯片底部的温度; d_D 为芯片厚度; A_D 为垂直于厚度方向的有效横截面积. 计算可得 R_{TD1} 为 1.8 K/W .

R_{TF1} 为硅芯片表面因对流和热辐射产生的等效热阻:

$$R_{TF1} = \frac{T_{BA1} - T_0}{Q_{Fr} + Q_{Fa}} = \frac{T_{BA1} - T_0}{\varepsilon\sigma A_F (T_{BA1}^4 - T_0^4) + hA_F (T_{BA1} - T_0)} \quad (5)$$

式中 Q_{Fr} 表示芯片表面的辐射散热; Q_{Fa} 表示芯片表面的对流散热; A_F 为芯片表面积. 计算可得 R_{TF1} 为 $7.2 \times 10^3 \text{ K/W}$.

封装层的传热包括封装管座与硅衬底及环境之间的热交换. R_{TP} 为封装到环境空气的热阻, 取决于封装形式. 例如, DIP16 热阻约 100 K/W .

MHP2 的相关支路的热阻计算与 MHP1 相同.

考虑室温 293 K 时, 仅 MHP1 加热到 573 K (即温度升高 $\Delta T_{MHP1} = 280 \text{ K}$), 对不同封装以及不同的传感器间距下的芯片各节点相对于室温升高的温度进行了计算, 列于表 1 中. 显然, 封装的热阻 R_{TP} 决定了芯片的热干扰, 而阵列中传感器间的距离对热干扰温度影响非常小. 根据热路模型, 对比 T_{BA1} 到 T_0 的各热流支路, 由于 R_{TF} , R_{TM2} , R_{TA2} 比 R_{TD} , R_{TC} , R_{TP} 大了 3 到 6 个数量级, 因此 R_{TF} , R_{TM2} 和 R_{TA2} 所在支路可以忽略. 仅考虑 R_{TD} , R_{TC} 和 R_{TP} 支路, 它们与 R_{TM1} 串联. 本文的微热板结构中, 加热区域与硅衬底之间有约 $2 \mu\text{m}$ 厚的空气层, 支撑悬空的加热区域的 4 条悬臂主要由氧化硅/氮化硅介质薄膜组成, 且臂的长度与其横截面积的比值小, 使微热板悬空结构热阻非常大 (R_{TM1} 在 10^3 K/W 数量级), 而硅芯片垂直方向热阻很小 (R_{TD} 仅 1.8 K/W), 因此无论芯片上传感器之间距离多大, 均有 $\Delta T_{BA1} \approx \Delta T_{BA2} \approx \Delta T_{DB}$, 整个芯片基本处于等温状态. 即使芯片上两微热

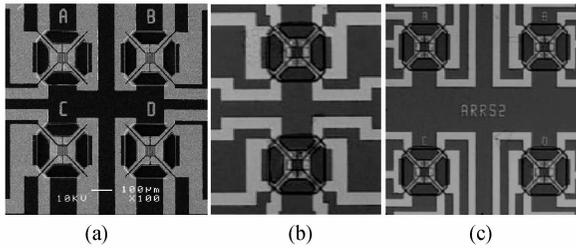


图 3 微热板阵列
Fig.3 MHP arrays

板传感器间距从 $100\mu\text{m}$ 变化到 1cm , MHP2 的温度变化只有约 0.02K . 显然, R_{TM1} 越大, 热干扰温度越小. 而当 R_{TM1} 一定时, ΔT_{DB} 取决于 R_{TP} , 即芯片的温度取决于封装的热阻. 此外, 由于 R_{TA2} 比 R_{TM2} 大 3 个数量级, 则 $\Delta T_{\text{MHP2}} \approx \Delta T_{\text{BA2}}$, 即微热板 MHP2 的热干扰温度约等于芯片的温升. 封装热阻越大, 芯片温度越高, 则阵列中其他微热板受到的温度干扰越大; 反之, 封装热阻越小, 芯片温度越低, 则阵列中其他微热板受到的温度干扰越小.

3 微热板阵列的设计与加工

微热板采用表面微加工工艺, 首先在微热板区域预埋 $2\mu\text{m}$ 厚的多晶 Si 牺牲层, 然后在牺牲层上做好微热板结构, 最后从器件正面开出腐蚀窗并将牺牲层腐蚀干净, 使微热板悬空^[9].

为了验证热路模型, 设计了 3 种布局的微热板阵列, 如图 3 所示, 不同布局的芯片上微热板传感器的间距不同. 阵列 I 中最近邻微热板间距为 $166\mu\text{m}$, 阵列 II 为 $240\mu\text{m}$, 阵列 III 中为 $406\mu\text{m}$. 阵列 II 为二传感器阵列, 阵列 I 和 III 为 4 传感器阵列, 则对角位置的微热板之间间距分别为 235 和 $574\mu\text{m}$.

进行测试之前, 需对传感器芯片进行引线焊接和封装. 先用银浆将芯片固定在封装上, 在 300°C 下烘烤半小时使银浆固化, 然后用铝丝焊接. 这里分别采用 DIP16 和 TO5 两种常用的传感器封装形式进行封装, 如图 4 所示.

4 微热板阵列热干扰温度测试

首先对 DIP16 封装的各类微热板阵列进行了实验测试, 考察传感器间距对微热板阵列热干扰的影响. 实

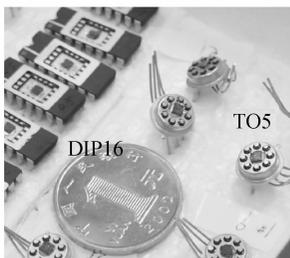


图 4 封装后的微热板阵列器件
Fig.4 Packaged MHP array devices

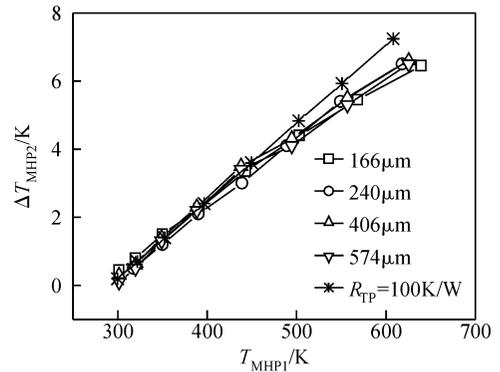


图 5 阵列中 MHP1 加热对 MHP2 的热干扰
Fig.5 Thermal crosstalk from MHP1 to MHP2 in MHP arrays

验中, 先对微热板的测温电阻进行温度标定, 获得它们的温阻特性, 微热板的平均温度则由测温电阻的阻值换算而得. 仅对阵列中的一个微热板 (MHP1) 通加热电流使之温度由室温升至一定温度, 其他微热板不加热, 进入稳态后测量 MHP1 周围的微热板 (MHP2) 的温度, 则 MHP2 的温度与室温的差值即为由 MHP1 引起的热干扰温度. 如图 5 曲线所示, 热干扰温度随 MHP1 的温度升高而线性升高. 图 5 中还标出了 MHP1 和 MHP2 的间距, 分别为 $166, 240, 406$ 和 $574\mu\text{m}$. 不同间距的微热板的热干扰温升曲线缠绕在一起, 并且测量曲线接近热路模型按 $R_{\text{TP}} = 100\text{K/W}$ 计算得到的曲线. 根据热路模型, 传感器间距的变化导致的热干扰温度变化小于 0.02K , 这个变化甚至低于测量系统的噪声. 因此实验数据验证了微热板阵列中传感器间距对热干扰温度的影响极小并可以忽略的结论. 当 MHP1 从室温加热到 573K 时, 其邻近的微热板受到的热干扰温度约 $5\sim 6\text{K}$, 接近热路模型按 $R_{\text{TP}} = 100\text{K/W}$ 计算得到的 6.36K .

对微热板阵列 I 采用 TO5 封装, 并进行了同样的实验测量, 与采用 DIP16 封装的实验结果对比, 如图 6 所示. 可见, 采用 TO5 封装形式时, 当 MHP1 加热至 573K , 相距 $166\mu\text{m}$ 的 MHP2 温度升高了 14K , 接近热路模型按 $R_{\text{TP}} = 200\text{K/W}$ 的计算值. 实验测试与热路分析结果一致表明, 采用热阻较高的 TO5 封装时, 微热板阵列的热干扰程度显著高于采用热阻较低 DIP16 封装的芯片.

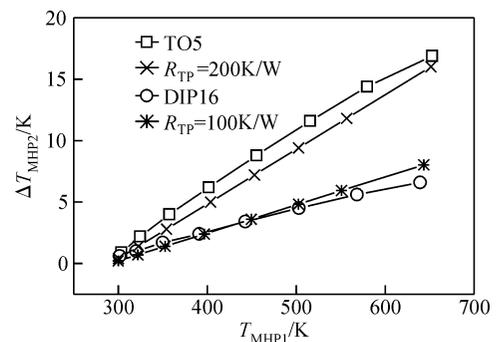


图 6 微热板阵列在两种封装形式下热干扰对比
Fig.6 Thermal crosstalk of MHP arrays with different packages

5 结 论

由于微热板结构的热阻比硅芯片的热阻大了3个数量级,使微热板阵列器件中的热干扰程度受微热板之间的距离的影响很小并可以忽略.微热板阵列器件中的热干扰程度取决于器件的封装热阻.采用绝热性能好、热阻大的封装,则微热板之间的热干扰较大;采用散热性好的封装,则微热板之间的热干扰较小.因此,减小微热板阵列或集成芯片的热干扰的关键,在于尽可能增大微热板悬空结构的热阻以及选用散热效果好热阻低的封装形式.

参 考 文 献

- [1] Denlinger D W, Abarra E N, Allen K, et al. Thin film microcalorimeter for heat capacity measurements from 1.5 to 800K. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(4): 946
- [2] Robinson A M, Haswell P, Lawson R P W. A thermal conductivity microstructural pressure sensor fabricated in standard complementary metal-oxide semiconductor. *Review of Scientific Instru-*

- ments, 1992, 63(3): 2026
- [3] Semancik S, Cavicchi R E, Wheeler M C, et al. Microhotplate platforms for chemical sensor research. *Sensors and Actuators B*, 2001, 77: 579
- [4] Chien D H, Lee C C. A study of chip thermal crosstalk in plastic VLSI packages. *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 1995: 37
- [5] Cerda B J, Puigcorbe J, Arbiol J. High-temperature low-power performing micromachined suspended micro-hotplate for gas sensing applications. *Sensors and Actuators B*, 2006, 114: 826
- [6] Sato K, Murakimi M. Experimental investigation of thermal crosstalk in a distributed feedback laser array. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1991, 3(6): 501
- [7] Schopf H, Ruppel W, Wurfel P. Integrated pyroelectric IR matrix sensor arrays. *Sensors and Actuators A*, 1991, 25~27: 401
- [8] Wheeler M C, Tiffany J E, Walton R M, et al. Chemical crosstalk between heated gas microsensor elements operating in close proximity. *Sensors and Actuator B*, 2001, 77(1/2): 167
- [9] Yu Jun, Tang Zhen'an, Chan P C H, et al. Thermal modeling of silicon micromachining based micro hotplates. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(1): 192 (in Chinese) [余隽, 唐祯安, 陈正豪, 等. 基于硅微加工工艺的微热板传热分析. *半导体学报*, 2005, 26(1): 192]

Thermal Crosstalk of Micro Hotplate Arrays*

Yu Jun^{1,2,†}, Tang Zhen'an¹, Huang Zhengxing¹, and Chen P C H³

(1 Department of Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

(2 State Key Laboratory of Transducer Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(3 Department of Electronics Engineering, Hongkong University of Technology, Hong Kong, China)

Abstract: In the chips of integrated micro hotplate (MHP) arrays, thermal crosstalk affects the accuracy of MHP temperature control. In silicon chips, thermal crosstalk effect is mainly dependant on the distance between the elements in the system and the thermal properties of the package. This paper constructs a thermal circuit for an MHP array and discusses the thermal crosstalk. The results show that the thermal resistance of the MHP structure is 3 magnitudes higher than the thermal resistance of the silicon substrate. Thus, the thermal crosstalk is not dependant on the distance between the MHPs but mainly depends on the thermal resistance of the package. Three MHP arrays with different layouts are fabricated and packaged in TO5 or DIP16. The experimental data support the results of the thermal circuit. Therefore, the key to reducing the thermal crosstalk of the integrated MHP systems is to use a low thermal resistance package and to enlarge the thermal resistance of the MHP structure as much as possible.

Key words: micro hotplate array; thermal crosstalk; thermal circuit; package

PACC: 0720; 6670; 0710C

Article ID: 0253-4177(2008)08-1581-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Nos. 2006AA040102, 2006AA040106)

† Corresponding author. Email: junyu@dlut.edu.cn

Received 21 January 2008