

# 基于硅微加工工艺的微热板传热分析\*

余 隽<sup>1</sup> 唐祯安<sup>1</sup> 陈正豪<sup>2</sup> 魏广芬<sup>1</sup> 王立鼎<sup>1</sup> 闫桂贞<sup>3</sup>

(1 大连理工大学电子系 微系统研究中心, 大连 116024)

(2 香港科技大学电机与电子工程系, 香港)

(3 北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

**摘要:** 针对常压和真空两种环境, 通过三维有限元模拟分析了背面体硅加工型、正面体硅加工型和表面加工型三种微热板 (MHP) 的传热主渠道和加热功率. 制作了背面体硅加工型和表面加工型 MHP, 并对两者在常压及 13.3 Pa 气压下的加热功率进行了测试. 实验值与有限元分析结果一致, 表明虽然真空中表面加工型 MHP 热功耗小于背面体硅加工型 MHP, 但薄层空气导热使表面加工型 MHP 在大气中的功耗大幅增加, 并大于背面体硅加工型 MHP 的热功耗.

**关键词:** 微热板; 硅微加工工艺; 有限元; 热传导

**PACC:** 0720; 6670; 0710C

**中图分类号:** TP212      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2005)01-0192-05

## 1 引言

基于硅微加工技术的微热板 (MHP) 是微电子机械系统 (MEMS) 中常用的加热平台, 已广泛应用于微型气体传感器<sup>[1]</sup>、薄膜量热卡计<sup>[2]</sup>、微加速度计<sup>[3]</sup>以及气压计<sup>[4]</sup>等微器件. 微热板的基本结构包括悬空介质薄膜以及薄膜电阻条. 当电流通过薄膜电阻条时, 电阻产生的焦耳热一部分用于加热微热板, 另一部分以传导、对流和辐射的方式耗散于周围环境中. 悬空结构使微热板具有非常小的热惯性和非常高的电 (光) 热耦合效率, 毫瓦级热功率就能使其中心温区在几毫秒内迅速升温<sup>[5,6]</sup>.

加热功率是微热板设计的重要指标之一. 为了减小器件的加热功率, 要求微热板准绝热, 即尽量减小微热板的热耗散. 缩小尺寸或选用热导率低的材料可以减小微热板的散热损失. 但是, 即使采用同样的尺寸和材料, 由不同微加工工艺制作的微热板的微结构仍有很大差异, 使得微热板与周围环境之间的换热主渠道有所不同.

微热板的加工工艺主要有背面体硅加工<sup>[7]</sup>、正面体硅加工<sup>[8]</sup>和表面加工<sup>[9]</sup>三大类. 本文采用有限元方法模拟了三种工艺结构的微热板在常压或真空

的加热功率和温度分布. 制作了背面体硅加工和表面加工两种结构的微热板, 并对常压及 13.3 Pa 气压下的加热功率进行了测试. 实验结果与模拟结果一致, 说明体硅加工型的微热板主要由介质薄膜导热, 而表面加工型微热板在常压下的热耗散主要来自于空气导热. 根据研究结果, 讨论了如何针对实际测试环境及测试要求选用恰当的加工工艺.

## 2 微热板的加工工艺和结构

采用的微热板结构如图 1 所示. 微热板的有效加热面积位于环形多晶硅加热电阻的包围之中, 中间有 S 形多晶硅测温电阻. 采用背面体硅加工方法的微热板结构示意图见图 1(a). 当完成支撑薄膜和加热电阻等主要结构的工艺后, 在硅片两面淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  作为硅腐蚀的掩膜, 然后通过双面对准光刻在硅片背面开腐蚀窗, 用 TMAH 腐蚀液腐蚀体硅. 这种加工方法获得的微热板, 由平板结构的支撑膜连接微热板的有效加热区和周围的体硅. 从剖面看, 悬空膜下的体硅被完全腐蚀掉了. 另一种加工方法是正面体硅加工法, 与背面体硅加工法不同的是, 腐蚀窗开在硅片的正面, 也就是器件所在的面. 加工成的微热板结构如图 1(b) 所示. 支撑膜为桥式结构

\* 国家自然科学基金 (批准号: 59995550-5, 90207003), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2003AA404180), 香港科技大学 RCC (批准号: 6065/99E, HIA98/99EC06) 资助项目

余 隽 女, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事微机电器件中薄膜热物性的研究.

2003-11-22 收到, 2004-04-24 定稿

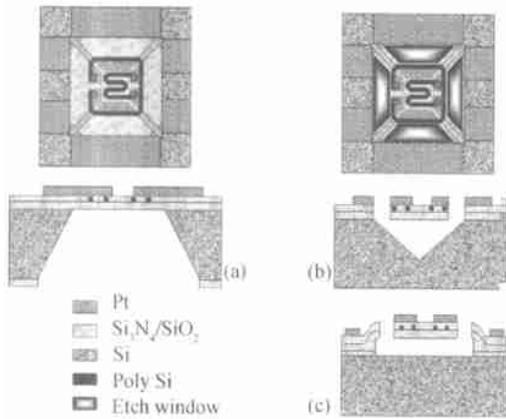


图 1 微热板顶视图及剖面图 (a) 背面体硅加工型;(b) 正面体硅加工型;(c) 表面加工型

Fig.1 Layout and cross section of MHPs (a) Back-side bulk Si etched;(b) Front-side bulk Si etched;(c) Surface micro-machined

(或悬臂结构),膜下的硅腐蚀坑由于湿法的各向异性而为倒金字塔型.第三种加工方法是表面加工法,这种方法首先在器件下方预埋了牺牲层.受工艺的限制,通常牺牲层为几百纳米到几微米厚.在牺牲层上做好器件后,从正面开腐蚀窗,腐蚀牺牲层使器件悬空.这种方法不涉及体硅的加工.从顶视图看,其结构与正面体加工型微热板的结构十分相似;从剖面看,悬空的微热板与下面的体硅之间仅仅隔着几个微米的空气间隙,见图 1(c).

### 3 微热板导热模型的有限元分析

利用 ANSYS 软件对上述微热板做 3 维有限元模拟.整个悬空部分的边长为 234 $\mu\text{m}$ .中心有效加热区域为边长 100 $\mu\text{m}$ 的正方形.在桥式微热板结构中,有效面积由 4 条长 60 $\mu\text{m}$ 、宽 34 $\mu\text{m}$ 的桥支撑.模拟中对各种微热板取相同的层次结构,如图 2 所示.根据微热板的应用情况,我们分别模拟了常压和绝对真空环境下各微热板的耗热及温度分布.根据结构的对称性,仅对微热板的四分之一部分进行模拟,就可以说明整个微热板的温度分布情况.

微热板和外界的热通道包括介质薄膜及金属导线的热传导、热辐射、与周围空气的热对流和热传导.假设环境温度和硅衬底温度为 300K.受材料可靠性及稳定性的限制,微热板的温度通常低于 723K.当微热板中心温度达到 700K,有效加热区域的表面热辐射功率可以由 Stefan-Boltzmann 定律估算得到,约为 0.23mW,可忽略不计.假设悬空微热板

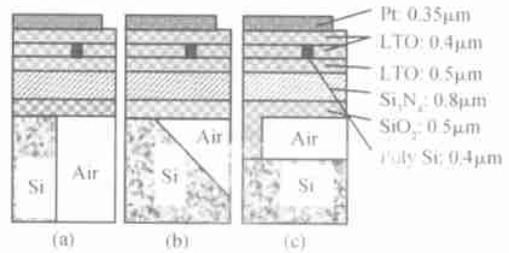


图 2 微热板的剖面模型 (a) 背面体硅加工型;(b) 正面体硅加工型;(c) 表面加工型

Fig.2 Cross section models of MHPs (a) Back-side bulk Si etched;(b) Front-side bulk Si etched;(c) Surface micro-machined

的自然对流换热系数为 30W/(m<sup>2</sup>·K),估算得到微热板在 700K 时对流消耗的热功率约为 0.24mW,也可以忽略不计.这样微热板的热模拟简化为仅考虑介质膜、金属引线和板下空气的热传导.微热板的加热功率来自于多晶硅加热电阻的焦耳热,模拟中此边界条件通过改变多晶硅电阻条的体积生热率来实现.绝对真空环境在模拟中处理为仅考虑微热板的介质薄膜及金属引线的热传导.模拟时使用的各材料参数列于表 1 中.

表 1 模拟所用主要材料参数<sup>[10]</sup>

Table 1 Material parameters

材料	热导率 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	比热 C <sub>p</sub> /(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )
Si	141.2	703	2330
SiO <sub>2</sub>	1.4	710	2201
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	30	712	3187
Pt	73.4	133	21440
Air	0.03	1030	1.1

### 4 有限元模拟结果

表 2 列出了各种类型微热板在常压或绝对真空环境中有效面积的平均温度达到 573K 时所需要加热功率的有限元模拟结果.其中,表面加工型微热板的牺牲层高度为 2 $\mu\text{m}$ .在真空情况下,正面体硅加工型和表面加工型微热板的加热功率基本相同,而背面体硅加工型微热板约为它们的 3.5 倍左右.可见桥式结构大大缩减了介质薄膜的传热,使微热板热功耗减小.对比常压和绝对真空两种情况下的热功耗值,背面体硅加工的微热板需要的加热功率在常压下仅增加了 3.53mW,正面体硅加工的微热板增加了 4.62mW,而表面加工型微热板的加热功率大

幅增加了 86.6mW,是绝对真空情况下热功率的 5.5 倍.根据傅里叶定律,热量  $Q = -A \cdot T/d$ ,其中  $A$  为导热面积,为材料热导率, $T$  为温度差, $d$  为材料厚度.空气的热导率很小,在空气层厚度  $d$  较大的体硅腐蚀型微热板中,由空气导热带走的热量很少,薄膜导热是主要的热耗散渠道.而在表面加工结构微热板中,空气层厚度仅为几微米,比体硅腐蚀型小了约 100 倍,则导热面积一定时空气导热热流量就增大了约 100 倍.此时空气导热远大于薄膜导热,成为了微热板的主要散热途径.图 3 显示了三种微热板在常压下的温度分布图.显然,空气导热大幅降低了表面加工型微热板中心区域温度分布的均匀性.

表 2 微热板在常压下与在绝对真空中加热到 573K 时热功耗的有限元模拟结果

Table 2 FEA results on MHPs' power consumption when they are heating up to 573K in atmosphere and vacuum

微热板类型	常压功耗/mW	绝对真空功耗/mW
背面体硅加工	69.89	66.36
正面体硅加工	22.68	18.06
表面加工(2 $\mu$ m 间隙)	105.92	19.32

由于空气的导热,表面加工型微热板的常压加热功率受到空气层厚度的影响很大.如图 4 所示,微热板有效面积上的平均温度一定时,当空气间隙大于 10 $\mu$ m 时,微热板常压加热功率随间隙高度的增加变化缓慢,并逐渐趋近于真空下的加热功率.背面体硅加工的微热板就属于这个区域,它的板下空气厚度大于 400 $\mu$ m,因此加热功率受空气的影响很小.当牺牲层厚度小于 4 $\mu$ m 时,微热板的加热功率与空气厚度成反比而迅速增加,空气导热成为微热板散热的最主要途径.如果空气间隙进一步减小到 50nm 以下,热辐射的微尺度效应将大大强化,使器件功耗大幅增加<sup>[11]</sup>.在目前的硅表面加工技术水平下,空气间隙厚度一般在几百纳米到几微米,因而可以不考虑热辐射的微尺度效应问题.此时,牺牲层的厚度主要影响气体导热热流量,对微热板的加热功率起着决定性的作用.

## 5 实验结果

虽然从模拟结果来看,正面体加工型微热板在常压和真空中耗热都最少,但这种工艺的成品率较低.悬空后的微热板难以承受光刻等常见工艺,而且

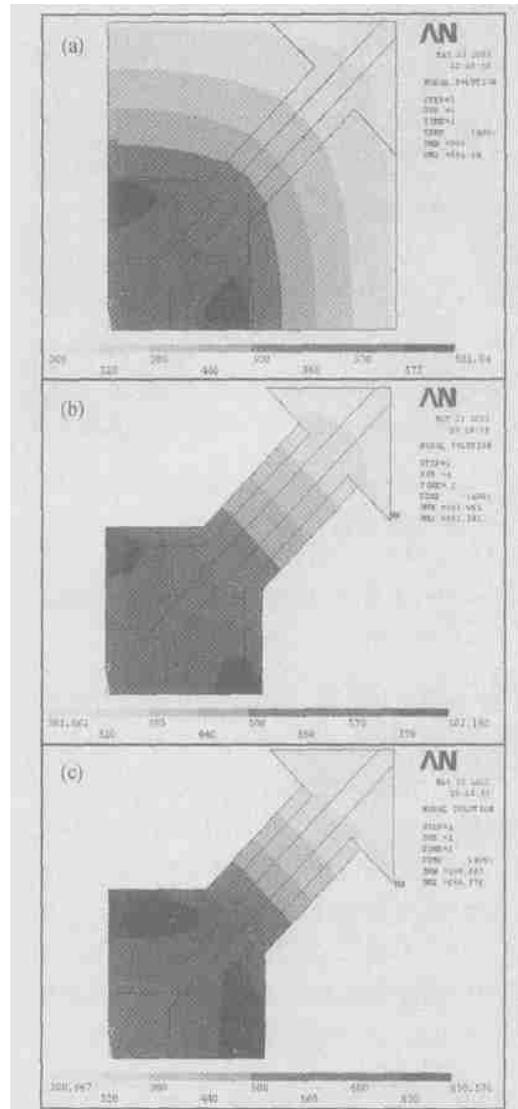


图 3 三种结构微热板的温度分布图 (a) 背面体硅加工型; (b) 正面体硅加工型; (c) 表面加工型

Fig. 3 Temperature distribution on MHPs (a) Back-side bulk Si etched; (b) Front-side bulk Si etched; (c) Surface micro-machined

很容易在后续的冲洗甩干过程中断裂.在背面体硅加工和表面加工工艺的成品率则较高,在微热板悬空后还可以根据实际需要安排薄膜沉积和光刻等常规工艺.我们分别采用背面体硅加工和表面加工工艺制作了两种微热板,如图 5 所示.氧化硅/氮化硅多层膜采用 LPCVD 工艺制作.在背面体硅加工型微热板的制作中,由于双面对准光刻工艺的对准精度受工艺设备的限制有 10 $\mu$ m 左右的对准误差,因此实际设计的腐蚀窗比原定微热板悬空面积大,实际悬空部分的边长约为 300 $\mu$ m.表面加工型微热板则

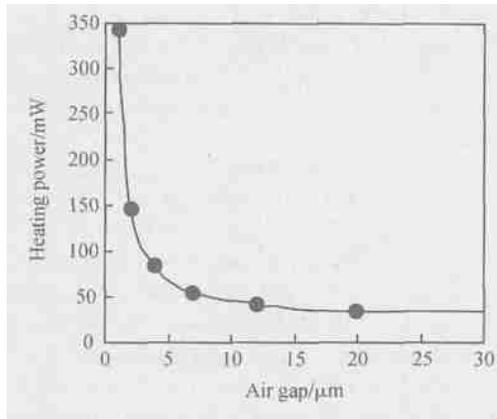


图 4 表面加工型微热板有效面积平均温度达 600K 需要的加热功率随空气间隙高度的变化曲线

Fig. 4 Heating power versus air gap (when active area of surface micro-machined MHP is heated up to 600K)

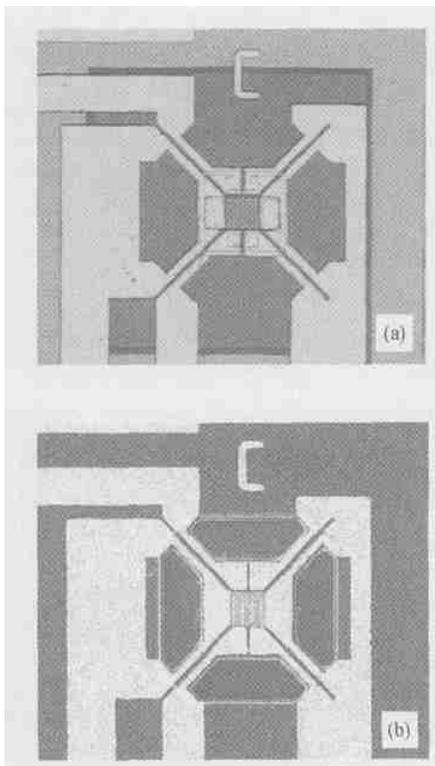


图 5 微热板的显微图片 (a) 背面体硅腐蚀型; (b) 表面加工型

Fig. 5 Micrograph of MHPs (a) Back-side bulk Si etching; (b) Surface micro-machined

可以方便地按照设计的尺寸形状来加工,空气间隙高度约 2μm.

在微热板的加热电阻两端施加一定的电压,并利用串联电阻来获得加热电阻上的电流,可以计算出加热器焦耳热功率.待微热板达到热平衡后,测量

板上的测温电阻,根据测温电阻的温阻特性曲线可获得微热板有效加热区的平均温度.两种微热板在常压及 13.3Pa 真空环境中测量温度达到 573K 时的热功耗情况见表 3.真空中的实验数据表明,表面加工的桥型微热板由于与外部基片的连接面积小,因此支撑膜导热引入的热耗散功率较小,仅为背面体硅加工型微热板的一半左右.背面体硅加工型的微热板在大气中的热功耗仅比真空中增加约 4.8mW.而表面加工型的微热板在常压下加热到 573K 需要的加热功率比 13.3Pa 时的 6.3mW 剧增了 48mW.可见,表面加工型微热板在常压下的热功耗大部分以空气导热形式散失.

表 3 微热板在常压下与在 13.3Pa 低真空中加热到 573K 的热功耗对比

Table 3 MHP's power consumption when they are heating up to 573K in atmosphere and 13.3Pa

微热板类型	常压功耗/mW	13.332Pa 功耗/mW
背面体硅加工型	17.3	12.5
表面加工型	54.3	6.3

### 6 结论

根据有限元模拟结果,表面加工型微热板在常压下的功耗大于体硅加工型微热板,其主要原因是微热板下方的微米级厚度的间隙中的空气通过热传导带走了大量热量.空气间隙厚度与加热功率的关系图进一步说明了当空气间隙厚度小于 4μm 时,空气导热是微热板的主要散热通道.另一方面,如果让微热板在真空下工作,消除了空气导热的影响,则表面加工型微热板的功耗小于背面体硅加工型微热板的功耗,这是因为桥式微热板大幅减小了支撑膜的面积,从而减小了支撑膜引入的导热耗散.实验测试值与有限元模拟结果基本一致,即常压下体加工型微热板热功耗较小,而真空下表面加工型微热板功耗较小.实验数据表明通过抽真空削弱空气的影响后,有效面积的温度达到 573K 时表面加工型微热板所需加热功率减小了约 88%,从而证实了模拟的结论,即其常压热功耗主要来自于空气.根据模拟推测,正面体硅加工型微热板在常压和真空条件下的耗热都最小,然而,实际加工时正面体硅加工法成品率低,极大地限制了它的推广应用.有限元模拟预测的微热板加热功率与微热板实际需要的加热功率相比较,导致这个误差的主要因素有以下几点:一方面,器件中的各层薄膜的真实热学参数难以获得,它

们与模拟中所使用的材料常规热学参数有差异. 另一方面, 实际器件的尺寸与有限元模型也有差异, 而且模拟中为减小计算量采用了简化模型. 此外, 有效温区平均温度的测量也有一定误差.

根据上述讨论, 若将减小加热功耗、提高器件绝热性能作为微热板设计的主要目标, 当器件需要工作在常压环境中, 应考虑选择背面体硅加工法来制作微热板; 当器件需要工作在真空环境中, 应考虑选择表面加工法来制作微热板. 例如, 设计微量热卡计时, 选择表面加工型微热板在真空环境中进行测试, 能达到良好的绝热效果; 设计工作于大气中的微气体传感器时, 体硅加工结构的微热板更为节能.

### 参考文献

- [ 1 ] Semancik S, Cavicchi R E, Wheeler M C, et al. Microhotplate platforms for chemical sensor research. *Sensors and Actuators B*, 2001, 77:579
- [ 2 ] Denlinger D W, Abarra E N, Allen K, et al. Thin film microcalorimeter for heat capacity measurements from 1.5 to 800K. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(4):946
- [ 3 ] Li Lijie, Liang Chunguang. Micromachined convective accelerometer. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(4):465 (in Chinese) [ 李立杰, 梁春广. 微机械热对流加速度计. *半导体学报*, 2001, 22(4):465]
- [ 4 ] Robinson A M, Haswell P, Lawson R P W. A thermal conductivity microstructural pressure sensor fabricated in standard complementary metal-oxide semiconductor. *Rev Sci Instrum*, 1992, 63(3):2026
- [ 5 ] Tang Zhen'an, Li Xikui, Cheng Gengdong, et al. State of the art in microhotplate. *International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2000, 1:355
- [ 6 ] Yu Jun, Tang Zhen'an, Wei Guangfen, et al. Measurement of heat capacity of SnO<sub>2</sub> thin films using micro-hotplate. *Proceedings of SPIE: Micromachining and Microfabrication Process Technology and Devices*, 2001, 4601:181
- [ 7 ] Zhang M, Bfiremov M Y, Schiettekatte F, et al. Size-dependent melting point depression of nanostructures: nanocalorimetric measurements. *Phys Rev B*, 2000, 62(15):10548
- [ 8 ] Weng P K, Shie J S. Micro pirani vacuum gauge. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(2):492
- [ 9 ] Chan P C H, Yan Guizhen, Sheng Lieyi, et al. An integrated gas sensor technology using surface micro-machining. *Sensors and Actuators B*, 2002, 82:277
- [ 10 ] Shackelford J F, Alexander W. *Materials science and engineering handbook*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001
- [ 11 ] Han Maohua, Liang Xingang. Microscale effect of thermal radiation on micro gas sensors. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2003, 25:45 (in Chinese) [ 韩茂华, 梁新刚. 热辐射的微尺度效应对微结构气敏传感器的影响. *上海理工大学学报*, 2003, 25:45]

## Thermal Analysis of Silicon Micromachining Based Micro Hotplates<sup>\*</sup>

Yu Jun<sup>1</sup>, Tang Zhen'an<sup>1</sup>, Philip C. H. Chan<sup>2</sup>, Wei Guangfen<sup>1</sup>, Wang Liding<sup>1</sup>, and Yan Guizhen<sup>3</sup>

(1 Department of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2 Department of Electrical & Electronic Engineering, Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong, China)

(3 Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Thermal simulation of three types of MHPs (surface micro-machined, back-side bulk silicon micro-machined, and front-side bulk silicon micro-machined) working in atmosphere and vacuum is performed with 3D FEA. Their first two types of MHPs are fabricated and their experimental results are in agreement with the FEA. It is shown that power consumption of the surface micromachined MHP is smaller than the back-side bulk silicon micromachined MHP in vacuum; however, in atmosphere, thermal conduction of the thin air layer in the surface micro-machined MHP dramatically increases its power consumption, with is much larger than that of the backside bulk silicon micromachined MHP.

**Key words:** micro hotplate; silicon micromachining; finite element analysis; heat conduction

**PACC:** 0720; 6670; 0710C

**Article ID:** 0253-4177(2005)01-0192-05

<sup>\*</sup>Project supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 69682006, 59995550-5), National High Technology R&D Program of China (No. 2003AA404180), RGC of HKUST (Nos. 6065/99E, HIA98/99EG06)

Yu Jun female, was born in 1977, PhD candidate. Her research interest is thermophysical properties of thin films.

Received 22 November 2003, revised manuscript received 24 April 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics