

文章编号 1004-924X(2011)03-0612-08

# 微加热器热传导试验与计算

刘泽文<sup>1</sup>, 田昊<sup>2</sup>, 刘冲<sup>2</sup>

(1. 清华大学微电子学研究所, 北京 100084;

2. 大连理工大学辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了研究微加热膜下方的结构与微加热器性能的关系, 利用数值计算与有限元仿真, 研究了微加热膜下方空气隙厚度的变化对加热器性能的影响。首先, 通过微加热器试验确定了对流换热系数等关键热学计算参数, 建立了一维 Fourier 导热微分方程组, 计算了 Biot 数并以此为依据对模型进行了薄壁简化, 使用有限差分法对微分方程进行了数值计算。然后, 使用 ANSYS 有限元分析软件对模型进行了电热耦合仿真, 并对在对流换热边界下硅衬底(无空气隙), 100, 200, 300, 400  $\mu\text{m}$  气隙以及加热膜(完全贯通)6 种模型的瞬态温度响应及稳态热分布的结果进行了对比。计算结果表明, 相比硅衬底, 目前的微加热膜结构在同样边界条件下可以将最高温度提高约 17%。空气隙为 200  $\mu\text{m}$  时, 在 +5 V 驱动电压和空气对流边界条件下, 微加热器可以达到 390 K, 稳态功耗为 134 mW, 起到了改善最高温度性能, 降低功耗的作用。

**关键词:** 微加热器; Biot 数; Fourier 传热

**中图分类号:** O551.3; TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0612

## Experiment and thermal calculation of micro heater

LIU Ze-wen<sup>1</sup>, TIAN Hao<sup>2</sup>, LIU Chong<sup>2</sup>

(1. *Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

**Abstract:** By utilizing the numerical solution and Finite Element Analysis (FEA) approach, the effect of the air gap beneath a heating membrane on the performance of a micro heater was calculated and simulated. The thermal convection coefficient was acquired from a heating experiment. Then, a 1D Fourier heat transfer equation was derived. By using the Biot number calculated and the lumped-capacity solution, the model was simplified into a multi-layer thin slab one. Furthermore, the transient temperature response and stable thermal distribution of the air gap in thickness of 0 (pure Si substrate), 100, 200, 300, 400  $\mu\text{m}$  and completely through (heating membrane) were compared under the conditions of heat convection and heat transfer. Calculation results show the climax temperature has increased approximately 17% by utilizing the heating membrane structure. The results of steady state and transient thermal-electrical coupled field FEA reveal that 200  $\mu\text{m}$  air gap structure indeed enhances the climax temperature to 390 K and reduces the power consumption to 134 mW, which is coherent

收稿日期: 2010-04-06; 修订日期: 2010-06-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60576048); 国家重点基础研究发展计划资助项目(No. 2007CB310504)

with the numerical calculation results and experiences.

**Key words:** micro heater; Biot number; Fourier thermal transfer

## 1 引言

随着 MEMS 器件在各领域中广泛的应用,作为很多微传感器与执行器基础的微加热器,其体积、功耗与温度性能成为制约 MEMS 器件向小体积与低功耗发展的障碍。

目前,困扰微加热器性能提升的障碍是材料本身性能,为解决这一问题,国内外对微加热器的新材料展开了广泛研究以望其达到更高的温度。与常用的金属类加热丝的材料如 Pt,或者半导体材料如多晶硅等不同,近来为了达到更高的极限温度,大量使用了金属陶瓷材料,J. F. Creemer 等人<sup>[1]</sup>报道了一种 TiN 加热器,最高温度可达 1 000 K。

影响微加热器性能提升的另外一个主要瓶颈是效率问题,由于硅(Si)的导热性能优良,在微加热器的热损耗当中有很大一部分是通过硅衬底热传导流失的<sup>[2]</sup>。通常的解决方法是使用薄膜加热器,但是这种微加热器效率的提升是以损失温度均匀性为代价的。因此,K. L. Zhang 等人<sup>[3]</sup>提出使用 Pyrex 玻璃作为衬底,这样比加热膜可取得更好的热隔离和结构强度。

对微加热器加工方法的创新以及对温度电阻系数的研究,也是微加热器研究的重要内容。王少飞等人<sup>[4]</sup>利用激光微细熔覆制造了 1×4 微加热器阵列;闫卫平等人<sup>[5]</sup>探讨了热处理温度和时间对 Cr 薄膜电阻温度系数和电阻率的影响。这些研究为未来深入了解微加热器的工艺与性能奠定了良好的基础。

除了上述实验研究之外,从理论上对微加热器的性能进行分析,进而设计性能更优的器件也是研究的方向之一。其中,基于 Fourier 定律的分数值计算与有限元仿真是加热器性能分析最有力的工具。东南大学黎仁刚等人<sup>[6]</sup>使用节点分析法,建立了热执行器中梁单元的热电耦合模型,实现了高精度快速温度分布计算。上海大学罗伟栋<sup>[7]</sup>使用有限元分析软件 ANSYS 对不同微加热器的温度场进行了有限元分析,对比分析了它们的加热特性及温度分布,并对温度均匀性的影响因素进行了细致的分析。中科院吴雷等人<sup>[8]</sup>采用

ANSYS 对微加热器进行了分析,得到真空下环形加热电阻可以达到较好均温效果的结论。

本文从微加热器的结构出发,建立了热传导模型,通过试验确定了关键热学参数,并使用计算和仿真手段分析了不同空气层厚度下用于 PCR 加热器的升温速度,最高温度以及功耗差别,对未来加热器的设计和优化提供了一定的参照。

## 2 微加热器热传导与参数获取

### 2.1 一维稳态传热模型建立

为了深入了解微加热器的传热机理,首先要从能量(这里特指热流)的传递进行分析。以试验中用到的静态 PCR 反应微加热单元为例,如图 1 所示。这种“三明治”结构由上至下分为 5 层,左右绝热,顶层和底层分别施加空气对流换热边界。根据 Fourier 定律与能量守恒定律,在给定的边界条件下,导热现象可以唯一地描述为:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

式(1)为 Fourier 导热微分方程。 $\dot{q}$  为体发热强度, $k$  为导热系数。

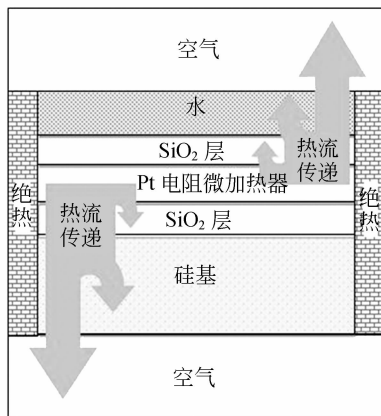


图 1 微加热器一维热传导模型

Fig. 1 One-dimensional micro heater model

根据牛顿冷却条件<sup>[9]</sup>:

$$q = h(T_{\text{body}} - T_{\infty}), \quad (2)$$

可以确定微加热器的对流换热边界条件。其中  $q$  为从单元流向外界的热流, $T_{\text{body}}$  为微加热器单元的温度; $T_{\infty}$  为环境温度; $h$  是对流换热系数,是需

要经过试验确定的参数。试验中选择将微加热器单元置于环境中自然冷却,这与一般采用半导体制冷块的主动冷却方式有所区别<sup>[10]</sup>。

根据能量守恒原理,单位时间内流入与流出界面热流的差等于该界面内能的变化,即:

$$Q_{\text{out}} - Q_{\text{in}} = Q_{\text{acc}}. \quad (3)$$

于是将 Fourier 定律写成积分形式:

$$-\int_S q ds + \int_V \dot{q} dV = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_S \rho c T dV. \quad (4)$$

为了减小计算规模,本文将模型抽象为一维热传导薄壁模型。在薄壁条件下,每层内部温度梯度为 0,于是式(1)  $\nabla^2 T$  项变为 0,继而  $T(x, \tau)$  变为  $T(\tau)$ ,从而使偏微分变成了常微分。对于常微分方程组,可以利用多种数学工具进行求解。对于模型简化的正确性,将通过测定 Biot (Bi) 数的实验进行验证。

## 2.2 $h$ 与 Biot 数测定试验

在建立了传热模型后,首先需要测定对流换热系数  $h$ ,用以确定后续计算工作的对流换热边界条件。实验采用了 Fluke 公司的 Ti 系列红外热成像仪,配备了定制的显微镜头,实验时在微加热器两端施加 +5 V 直流电压,在环境温度为 298 K 下连续拍摄 5 组加热器降温的红外影像,温度校正选择  $\text{SiO}_2$  的发射率。得到温度变化数据,如图 2 所示。然后,根据式(2)计算得到  $h$ ,如图 3 所示。

得到  $h$  之后,通过计算就可以得到 Bi 数。为了验证模型简化的合理性,还要利用 Bi 数进行验证。

Bi 数的物理意义是,对流换热边界上物体内部导热热阻与边界处对流换热热阻之比。文献<sup>[9]</sup>指出,当 Bi 数很小时,内部导热阻远比表面对流换热热阻小,因此温度降落主要表现在表面流体一侧。于是在对流换热边界条件下,若  $\text{Bi} < 0.1$ ,可认为物体为薄壁。

根据公式(5):

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-\frac{hS}{\rho c V} t}, \quad (5)$$

式中,  $T_i$  为初始温度,  $T_{\infty}$  为环境温度,  $S$  为对流换热表面积,  $\rho, c, V$  分别为密度、比热和体积。于是根据式(6)可以计算出 Bi:

$$\text{Bi} = \frac{hL}{k}. \quad (6)$$

式中,  $L$  为平板导热特征长度。

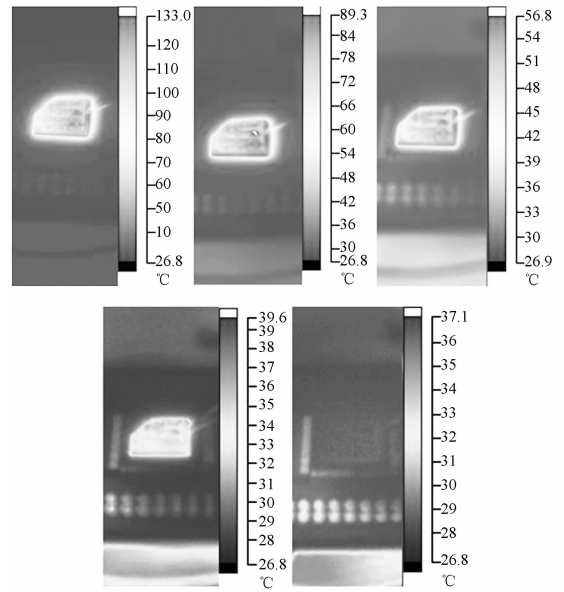


图 2 微加热器降温红外照片

Fig. 2 IR images of cooling down process

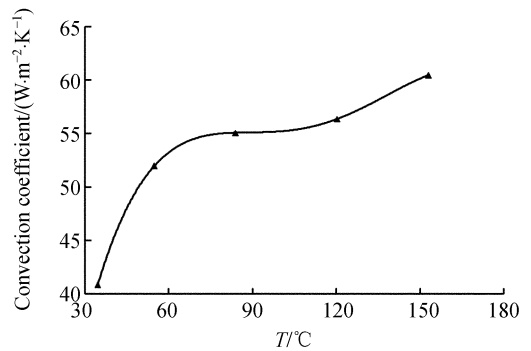


图 3 微加热器对流换热系数

Fig. 3 Calculated convection coefficient

经计算, Bi 数平均值为  $3 \times 10^{-3}$ , 远远小于 0.1, 可以认为微加热系统为薄壁, 验证了 2.1 简化为一维传热模型的合理性。

## 3 微加热器结构与热传导分析

在实验测定了  $h$  与薄壁模型简化的基础上, 更加直观地了解了微加热器结构对性能的影响。由于空气导热率低, 加热膜周围空气的作用是阻止热量快速传导, 因此提高了热效率; 而硅衬底高导热率对稳定升温速度以及温度的均衡分布有着积极作用<sup>[11]</sup>。

根据以上假设, 建立了 6 种加热膜下方具有空气隙的微加热器模型, 利用有限差分及有限元

分析研究了不同厚度空气隙对微加热器性能的影响,如图 4 所示。

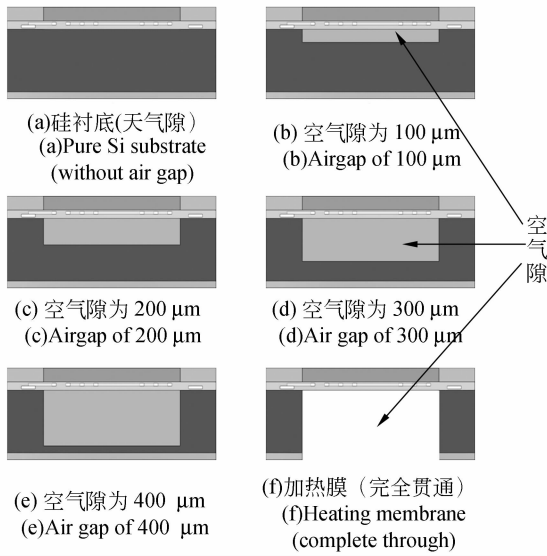


图 4 模型空气隙厚度改变示意

Fig. 4 Models with different thicknesses of air layer

图中(1)~(6)分别对应硅衬底(无空气隙)、100 μm、200 μm、300 μm、400 μm 气隙以及加热膜(完全贯通)6 种模型。

### 3.1 使用 Matlab 数值求解

导热问题数值求解的方法主要为有限元法和有限差分法,本文采用了向后差分法求解微加热器性能。差分的思想是将连续的时间离散化,使用离散的温度点去逼近连续的温度变化。在时间间隔  $\Delta t$  足够小的情况下,可以使用  $[T(t + \Delta t) - T(t)]/\Delta t$  来代替  $dT/dt$ ,于是式(4)可改写为如下所示的微分方程组(7)~(12)。

$$\rho_1 c_1 V_1 \frac{dT_1}{dt} = h_{12} S_1 (T_2 - T_1) - h_1 S_1 (T_1 - T_\infty), \quad (7)$$

$$\rho_2 c_2 V_2 \frac{dT_2}{dt} = -k_2 S \frac{(T_2 - T_3)}{l_2} - h_{12} S_1 (T_2 - T_1), \quad (8)$$

$$\rho_3 c_3 V_3 \frac{dT_3}{dt} = k_2 S \frac{(T_2 - T_3)}{l_2} + k_4 S \frac{(T_4 - T_3)}{l_4} + \dot{q} V_3, \quad (9)$$

$$\rho_4 c_4 V_4 \frac{dT_4}{dt} = -k_4 S \frac{(T_4 - T_3)}{l_4} + k_5 S \frac{(T_5 - T_4)}{l_5}, \quad (10)$$

$$\rho_5 c_5 V_5 \frac{dT_5}{dt} = -k_5 S \frac{(T_5 - T_4)}{l_5} - h_5 S (T_5 - T_\infty). \quad (11)$$

$$t = 0, T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_\infty. \quad (12)$$

式中,  $h_{12}$  为  $\text{SiO}_2$  层与水的对流换热系数,  $h_1$  为水与空气对流换热系数,  $l_x$  为  $x$  层厚的一半。其余参数见表 1。由于暂不考虑非 Fourier 传热以及尺寸效应的影响<sup>[12]</sup>, 计算中仍然使用体材料 (bulk) 情况下的参数。

表 1 材料在室温(300 K)的热学参数

Tab. 1 Thermal parameters of models at 300 K

编号	材料	导热率 $\kappa$ /( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	比热 $c$ /( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
1	水	0.66	4 183	998
2,4	$\text{SiO}_2$	1.5	700	2 634
3	Pt	71.6	132.77	21 450
5	Si	148	710	2 329
6	Au	318	229.1	19 300
7	空气	0.026 3	1 003.5	1.205

经过计算,得到微加热器温度响应曲线如图 5。

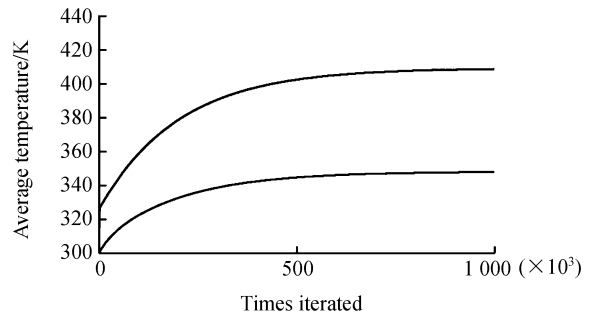


图 5 Matlab 有限差分计算结果

Fig. 5 Matlab finite differential result

差分法误差分析。根据差分法的结构,引入 Taylor 级数展开,其截断误差<sup>[13]</sup>  $\epsilon$  可以表示为:

$$\epsilon = \frac{T(t + \Delta t) - \dot{T}(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta t}{2!} \ddot{T}(\Delta t) - \frac{(\Delta t)^3}{2!} \ddot{T}(\Delta t) + \dots = O(\Delta t). \quad (13)$$

其中  $\Delta t$  在 Matlab 计算程序中被设置为  $10^{-6}$ , 而  $\ddot{T}(\Delta t)$  的数量级在  $10^3$ , 因此可以粗略的估算误差  $\epsilon$  在  $10^{-3}$  量级。

有限差分的计算结果初步验证了微加热器下方空气隙的作用,从图 5 可以看出加热膜的稳态温度相比硅基无气隙的值提高了 17%, 表明有更多的热量用于加热而没有从硅衬底中浪费掉, 提高了加热器性能。

### 3.2 三维电热耦合有限元仿真

为了对微加热器瞬态特性与稳态特性有更加直观的了解,这里采用 ANSYS10.0 对建立的模型进行分析。ANSYS 内置了电磁热力流体等多个模块,可以进行多物理场的瞬态稳态耦合分析。为了适应 MEMS 分析的具体情况,根据 ANSYS 用户手册,将 MKS 单位转换为  $\mu\text{MKS}$  单位。

#### 3.2.1 三维模型建立与网格划分

分析中采用了 SOLID69 电热耦合单元。对于网格的划分,由于模型结构是复杂的三维实体,如图 6 所示,于是在划分的时候对关键位置进行了控制,而其余位置则由软件的 smart meshing 功能来实现,由此取得了较好的网格划分效果。划分好网格的模型如图 7 所示。

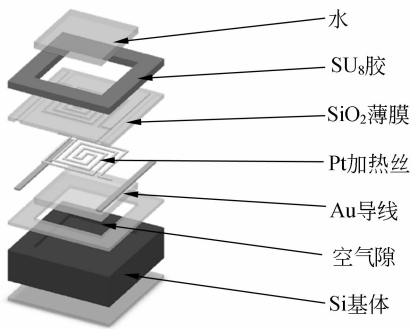


图 6 三维实体模型

Fig. 6 3D model

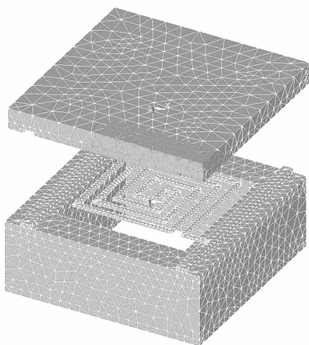


图 7 划分网格结果(加热膜结构)

Fig. 7 Mesh result

节点数与网格数如表 2 所示。

表 2 划分网格结果

Tab. 2 Element number

模型类型	无空气隙	微加热膜	空气隙/ $\mu\text{m}$			
			100	200	300	400
网格数	34 171	29 997	35 226	31 331	31 330	30 786

#### 3.2.2 材料参数的选取与载荷的施加

仿真中的材料参数,微加热器材料参数与数值计算中的相同,参见表 1。

仿真过程中所施加的载荷均为面载荷或体载荷。具体的载荷施加情况为:

- (1)模型各面分别施加对流边界条件;
- (2)模型初始温度为 300 K;
- (3)在 Au 导线两端施加 +5 V 电压。

#### 3.2.3 仿真结果

在仿真中,对模型中薄膜下方的空气隙的厚度进行了改变,分别对没有空气隙,以及空气隙为 100,200,300,400  $\mu\text{m}$  和完全贯通 6 种模型在 5 V 电压驱动以及空气对流条件下的温度响应以及稳态热分布进行仿真。瞬态结果如图 8,9 所示,稳态结果如图 10,11 所示。图中(1)~(6)分别对应硅衬底(无空气隙)、100,200,300,400  $\mu\text{m}$  气隙以及加热膜(完全贯通)6 种模型。

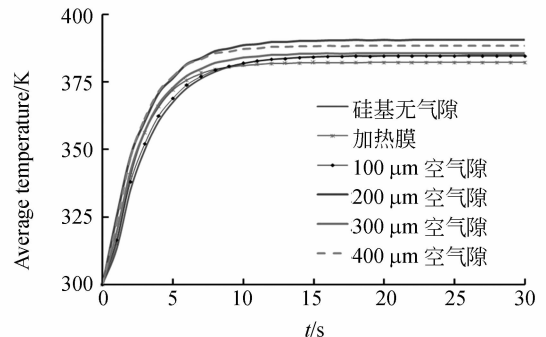


图 8 +5 V 对流边界温度瞬态响应曲线

Fig. 8 Transient thermal response at +5 V

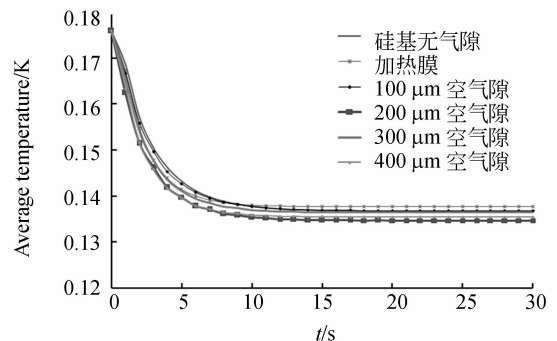


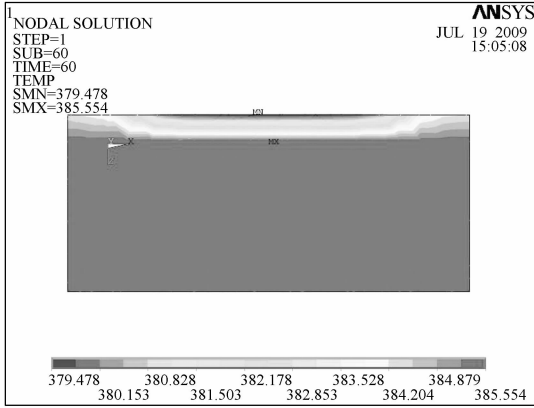
图 9 +5 V 对流边界总电功率

Fig. 9 Transient total power consumption at +5 V

从有限元仿真结果的升温曲线(图 8)可以看出,在空气对流换热和 5 V 直流电压驱动下,200  $\mu\text{m}$  组升温速度最快,约 8.7  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,最高温度为

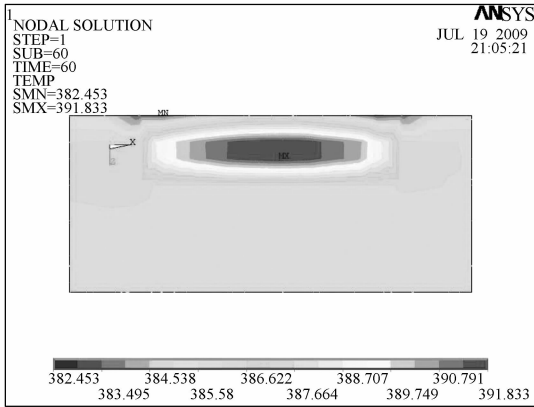
390 K。相比硅衬底,加热膜下方空气隙热阻增大,起到了减少热量流失的作用,而且从图 10 和 11 的稳态热分布的情况来看,由于空气隙的存在

也使得加热器中心位置与四周的温度相差 10 °C 左右,起到一定的温度隔离作用。在功耗方面,由图 9 可知,200 μm 组的功耗最低,约为 134 mW。



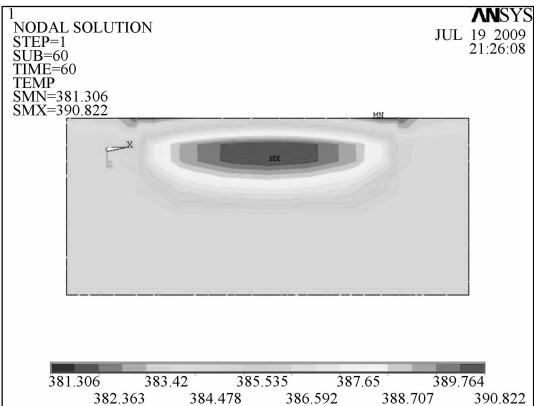
(a)硅衬底(无空气隙)

(a) Pure Si substrate (without air gap)



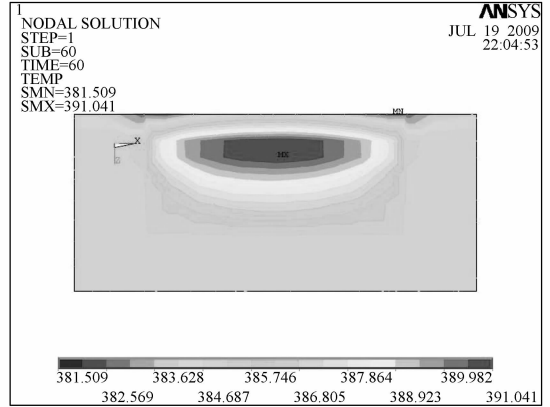
(b)空气隙为 100 μm

(b) Airgap of 100 μm



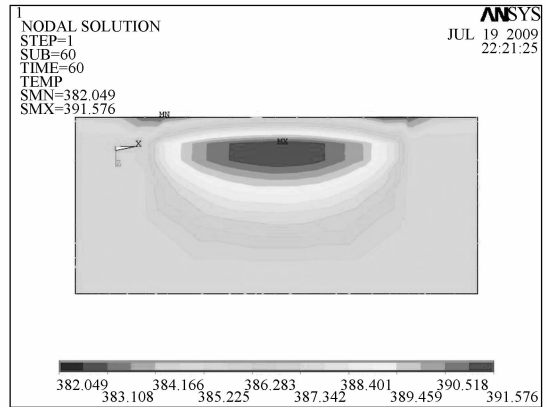
(c)空气隙为 200 μm

(c) Airgap of 200 μm



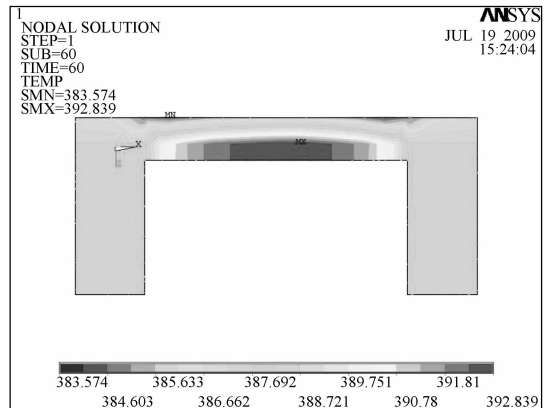
(d)空气隙为 300 μm

(d) Air gap of 300 μm



(e)空气隙为 400 μm

(e) Air gap of 400 μm



(f)加热膜(完全贯通)

(f) Heating membrane (complete through)

图 10 +5 V 对流边界稳态温度分布云图

Fig. 10 Steady state temperature distribution at +5 V

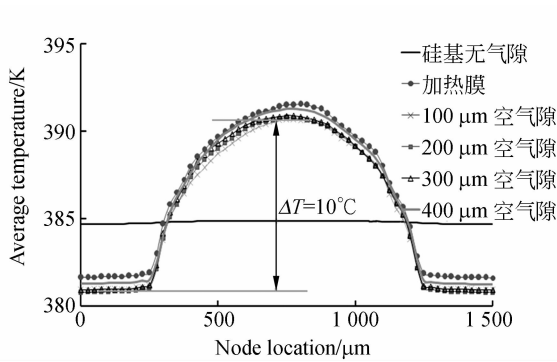


图 11 +5V 对流边界中间截面稳态热分布

Fig. 11 Steady state cross section temperature distribution at +5 V

## 4 结 论

本文首先从微加热器的 Fourier 传热原理出

发,提出了一种通过实验求得  $h$  与 Bi 数,利用 Bi 数对传热模型进行薄壁简化,通过有限差分 and 有限元分析微加热器性能的方法。其次,分析了微加热器传热机理以及空气隙与硅衬底对微加热器电热效率与温度均匀性的影响,最后提出一种带有空气隙的微加热器模型,并针对不同空气层厚度进行了计算与仿真,仿真结果表明在加热膜下方存在 200  $\mu\text{m}$  空气隙的条件下,微加热器的性能可以得到提高。

这种利用经典热学原理对微加热器的热传导机理进行探讨,获取关键热学参数,最终设计一种在电热效率与温度均匀性这对矛盾当中取得平衡的微加热器的思路,对未来微加热的研究有比较实际的意义。

## 参考文献:

- [1] CREEMER J F, BRIAND D, ZANDBERGEN H W, *et al.*. Microhotplates with TiN heaters[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 148 (2): 416-421.
- [2] TSAI JR H, LIN L. Transient thermal bubble formation on polysilicon micro-resistors[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(22): 375-382.
- [3] ZHANG K L, CHOU S K, ANG S S. Fabrication, modeling and testing of a thin Au/Ti microheater[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 46(6): 580-588.
- [4] 王少飞, 曹宇, 王小宝, 等. 激光微细熔覆快速制造微加热器阵列[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1567-1571.  
WANG S F, CAO Y, WANG X B, *et al.*. Microheater array fabrication by laser micro-cladding method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(11): 1567-1571. (in Chinese)
- [5] 闫卫平, 朱剑波, 马灵芝, 等. 金属薄膜加热器的研究[J]. *传感技术学报*, 2004, 4(17): 615-619.  
YAN W P, ZHU J B, MA L ZH, *et al.*. Research of metal membrane heater[J]. *Chinese Journal of Sen-*
- sors and Actuators*, 2004, 4(17): 615-619.
- [6] 黎仁刚, 黄庆安, 李伟华. 热电耦合微执行器温度分布的节点分析法[J]. *半导体学报*, 2005, 3(26): 562-567.  
LI R G, HUANG Q A, LI W H. A nodal analysis method for temperature distribution of thermo-electrical coupled thermal microactuators [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 3(26): 562-567. (in Chinese)
- [7] 罗伟栋. PCR 扩增芯片中微加热器结构优化分析[J]. *传感技术学报*, 2005, 3(18): 627-631.  
LUO W D. Analysis and optimization to the structure of micro-heater in PCR Chip[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 3(18): 627-631. (in Chinese)
- [8] 吴雷, 李铁, 王立春, 等. 微机械面型微加热器的热学分析[J]. *功能材料与器件学报*, 2005, 4(11): 466-475.  
WU L, LI T, WANG L CH, *et al.*. Thermal analysis of MEMS micro-hotplate with uniform temperature in large area[J]. *Journal of Functional Materials and Device*, 2005, 4(11): 466-475. (in Chinese)
- [9] JOHN H. LIENHARD IV. *A Heat Transfer Text-*

book[M]. Houston:Phlogiston Press,2008.

- [10] 贺永,傅建中,陈子辰. 热压成型装备精密温控研究[J]. 光学精密工程,2008,5(16):845-851.  
HE Y,FU J ZH,CHEN Z CH. Temperature precise control in hot embossing device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,5(16):845-851. (in Chinese)
- [11] 罗志涛,徐抒岩,陈立恒. 大功率焦平面器件的热控制[J]. 光学精密工程,2008,11(16):2187-2195.  
LUO ZH T,XU SH Y,CHEN L H. Thermal control of high-power focal plane apparatus[J]. *Opt. Preci-*

*sion Eng.*, 2008,11(16):2187-2195. (in Chinese)

- [12] 刘静. 微米/纳米尺度传热学[M]. 北京:科学出版社,2001.  
LIU J. *Micro/nano Scale Heat Transfer* [M]. Beijing: China Science Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 俞昌铭. 热传导及其数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,1981.  
YU CH M. *An Numerical Analysis of Heat Conduction* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1981. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘泽文(1960—),男,安徽肥东人,教授,博士生导师,1983年于中国科学技术大学获得学士学位,1997年于法国巴黎南大学获得博士学位,主要从事MEMS工艺技术,RFMEMS, BioMEMS,纳米谐振器,集成传感器等方面的研究。E-mail: liuzw@tsinghua.edu.cn



田昊(1985—),男,辽宁大连人,硕士,2008年于大连理工大学获得学士学位,主要从事MEMS微加热器的研究。E-mail: tianhao1985@mail.dlut.edu.cn

#### 导师简介:



刘冲(1963—),男,四川成都人,教授,博士生导师,1989年于华中科技大学获得硕士学位,1993年于华南理工大学获得博士学位,现为大连理工大学机械学院副院长,主要从事微机电工程、精密仪器及机械等方面的研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn