

微热板式低气压传感器的研制*

张凤田 唐祯安 余隽 金仁成 高仁璟 江胜峰

(大连理工大学电子工程系, 微系统与微制造重点实验室, 大连 116024)

摘要: 研制了一种采用 CMOS 工艺和表面牺牲层技术加工的微热板式低气压传感器。该微热板为四臂支撑悬空矩形板, 其边长为 $75\mu\text{m}$, 支撑桥长为 $60\mu\text{m}$, 板下气隙高度为 $0.5\mu\text{m}$ 。采用经典傅里叶传热理论分析了恒电流工作方式下气压对微热板瞬态和稳态热特性的影响, 结果表明在低气压范围内微热板传热以支撑桥导热为主, 气压较高时以气体导热为主, 微热板加热功率随气压增加而减小; 传感器的热响应时间为毫秒量级并随气压增加而减小。传感器采用恒电流工作方式时, 测得其气压响应范围为 $1 \sim 10^5 \text{ Pa}$, 且加热功率与气压间关系的理论分析结果与实测值吻合得较好。

关键词: 微热板; 气压传感器; 微传感器; 传热; 恒电流

EEACC: 2575; 7230M; 7320V

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)07-1412-06

1 引言

加热式低气压传感器主要包括电阻真空计和热偶真空计, 利用气体热导率与气压间的关系进行工作, 由于结构简单、使用寿命长、量程较宽, 广泛应用于金属冶炼、食品加工、薄膜制备、电子封装等领域检测 $10^{-1} \sim 10^5 \text{ Pa}$ 范围的气压^[1]。但体积较大、热响应慢、功耗大等缺点, 限制了传统加热式低气压传感器的应用。随着微电子和微机械加工技术的发展, 研制尺寸小、重量轻、功耗低、响应快且易与其他器件集成的微加热式低气压传感器成为可能, 并受到重视^[2,3]。在国内, 对半导体固态压力传感器的研究已很深入^[4,5], 但对微加热式低气压传感器的研究还刚刚起步。

微热板是各种加热式微传感器普遍采用的一种微加热器形式^[6~8]。它具有较高的加热效率和较快的热响应速度, 热特性随气压变化灵敏, 非常适于研制微加热式低气压传感器。本文设计了一种微热板式低气压传感器, 并采用 CMOS 工艺和表面牺牲层技术成功实现了传感器的制备; 用龙格-库塔方法求

解了在恒电流工作方式下微热板瞬态热响应随气压的变化关系, 并根据瞬态分析的结果分析了稳态传热中各种传热途经所消耗的加热功率与气压的关系。最后, 采用恒电流测试电路对传感器进行了测试, 并对实验测试结果和理论计算结果进行了对比分析与讨论。

2 结构与制备工艺

研制的微热板式低气压传感器的扫描电镜图如图 1 所示。面积为 $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ 的微热板通过四个桥支撑悬空。桥长 $60\mu\text{m}$, 宽 $21\mu\text{m}$, 微热板下气隙高度为 $0.5\mu\text{m}$ 。为与 CMOS 工艺兼容, 微热板上的加热电阻(兼做测温元件)和制作在衬底上的温度补偿电阻均采用掺磷多晶硅, 电阻条线宽 $5\mu\text{m}$, 间距 $4\mu\text{m}$, 方块电阻 $20 \Omega/\square$ 。当周围气压改变时, 引起气体热导率变化, 从而改变微热板通过气体导热消耗的加热功率。这样, 若保持加热功率不变, 微热板温度必然发生变化, 引起多晶硅温敏电阻变化; 若保持微热板温度不变, 即加热电阻阻值不变, 必然改变加热功率。所以, 通过检测多晶硅电阻上电信号的变化

*国家自然科学基金资助项目(批准号:90207003, 59995550-5)

张凤田 男, 1976 年出生, 博士研究生, 主要研究领域为加热式微传感器、MEMS 等。

唐祯安 男, 1955 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为微电子、纳米电子、MEMS 等。

2004-10-15 收到, 2004-11-26 定稿

即可进行气压测量. 另外, 由于硅衬底具有很好的导热性, 补偿电阻的变化只受环境温度影响, 气压的影响可以忽略, 从而实现温度补偿功能.

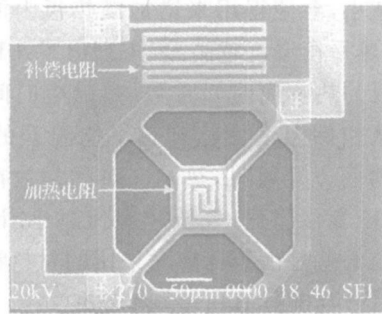


图 1 传感器扫描电镜图

Fig. 1 SEM picture of the fabricated sensor

传感器的制备采用了 CMOS 工艺和表面牺牲层技术. 为确保微热板悬空, 采用了 SiO₂-Si₃N₄-SiO₂ 复合结构. 这种结构不仅可以保证支撑桥足够的强度和刚度, 而且具有良好的绝热性. 主要工艺步骤如图 2 所示: (a) 硅片预氧化后淀积并刻蚀 0.5 μm LPCVD 多晶硅作为牺牲层; (b) 平坦化处理; (c) 淀积 SiO₂-Si₃N₄-SiO₂ 复合层及多晶硅电阻层; (d) 淀积 SiO₂ 隔离层及刻孔; (e) 铝金属化; (f) 钝化和刻焊盘; (g) 干法刻蚀腐蚀窗口; (h) TMAH 腐蚀牺牲层.

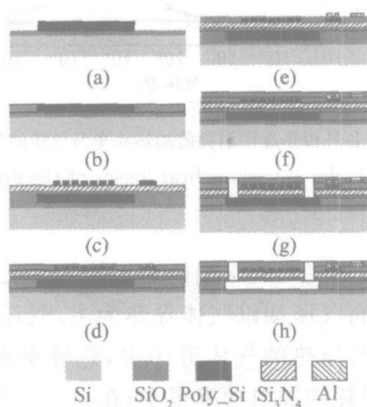


图 2 传感器的制备流程

Fig. 2 Device fabrication process flow

3 微热板传热分析

3.1 瞬态传热分析

在加热式低气压传感器中, 微热板主要通过支撑桥导热、微热板下气体的导热以及热辐射三种途

径消耗加热功率. 根据经典傅里叶传热理论, 微热板单位时间内的内能增量等于加热功率与三种传热途径所耗功率之差^[9]. 在恒电流工作方式有:

$$Vc \frac{dT_s}{dt} = I^2 R_s - (Q_s + Q_g + Q_r) \quad (1)$$

式中 T_s 为微热板的平均温度; I 为施加在加热电阻上的恒定电流; Q_s, Q_g, Q_r 分别为支撑桥导热、气体导热和热辐射消耗的加热功率; ρ 为微热板的等效密度; c 为微热板的等效比热容; V 为微热板的体积; R_s 为加热电阻阻值.

由于硅材料导热性能较好, 可以假设硅框、硅衬底的温度均为环境温度 T_a . 于是, 四个支撑桥的导热可以表示如下:

$$Q_s = G_s (T_s - T_a) = \frac{4 A_b - 2 A_3}{L} (T_s - T_a) \quad (2)$$

$$= (A_1 + A_2 + A_3) / (A_1 + A_2 + A_3) \quad (3)$$

$$A_b = A_1 + A_2 + A_3 \quad (4)$$

式中 G_s 为四个支撑桥的总热导; G_i 为支撑桥的等效导热系数; $A_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为支撑桥中二氧化硅、氮化硅、多晶硅电阻薄膜的导热系数和横截面积; L 为支撑桥长度.

微热板下气体导热与气压大小有关, 可以表示为^[10]:

$$Q_g = G_g (T_s - T_a) = K_g^{(0)} \frac{p p_{tr}}{p + p_{tr}} (T_s - T_a) \quad (5)$$

$$K_g^{(0)} = \frac{\phi}{2 - \phi} A_s \left(\frac{273.2}{T_a} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$= \frac{1.101}{M^{1/2}} \times \frac{+1}{-1} \quad (7)$$

其中 G_g 为气体热导^[2]; A_s 为微热板面积; ϕ 为气体调节系数; λ_0 为 273 K 时自由分子热导率; p 为气体压力; p_{tr} 为气体导热从自由分子流态向粘滞态过渡的气压值, 其大小与微热板下气隙高度成反比^[2]; M 为气体分子质量; γ 为气体的定压比热与定容比热的比值.

根据文献[11], 当气隙高度超过 0.5 μm 时微热板下微腔热辐射的微尺度效应不显著, 热辐射消耗的加热功率可由斯蒂芬-玻尔兹曼定律确定:

$$Q_r = 2 \epsilon_b A_s (T_s^4 - T_a^4) \quad (8)$$

式中 ϵ_b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; ϵ 为微热板黑度; 方程右边乘上系数 2 是因为微热板通过上下表面辐射热量.

把传感器放入恒温箱中,在 280 ~ 600 K 温度范围内,测试不同温度下加热电阻大小,结果显示多晶硅加热电阻与温度有很好的线性关系,其温阻系数大小为 0.12 %/K. 所以,加热电阻大小可以表示为:

$$R_s = R_a [1 + (T_s - T_a)] \quad (9)$$

其中 R_a 为环境温度下加热电阻阻值; α 为电阻温阻系数.

将(2),(5),(8),(9)式代入(1)式得,

$$V_c \frac{dT_s}{dt} = I^2 R_a [1 + (T_s - T_a)] - \{ G_s (T_s - T_a) + K_g^{(0)} \frac{pp_{tr}}{p + p_{tr}} (T_s - T_a) + 2 \sigma_b A_b (T_s^4 - T_a^4) \} \quad (10)$$

用四阶龙格-库塔方法对上式进行数值求解,得到微热板不同气压下的热响应曲线,如图 3 所示. 对于本文研制的传感器, i ($i = 1, 2, 3$) 分别为 1.4, 18.5 和 29 W/(m · K)^[12]; ϕ 为 0.9; σ 对于空气取 1.23 W/(m² · K · Pa)^[10]; p_{tr} 实测得 3×10^4 Pa; 取 0.8; ρ, c, V 分别为 2.5×10^3 kg/m³, 700 J/(kg · K), 1.2656×10^{-14} m³; T_a 为 295 K; I 为 0.8 mA; R_a 为 2687 .

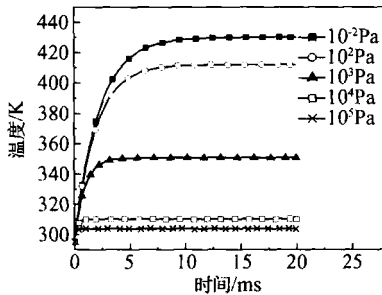


图 3 不同气压下微热板瞬态热响应曲线

Fig. 3 Transient response of MHP under different gas pressures

表 1 不同气压条件下微热板热响应时间常数

Table 1 Thermal response time constants of MHP under different pressures

气压/Pa	10 ⁻²	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
计算值/ms	2.4	1.9	0.95	0.25	0.15
实测值/ms	7.8	6.3	2.65	0.75	0.4

从图 3 可见,微热板瞬态热响应受气压影响较大. 气压越低,响应曲线上部分的斜率越大,微热板升温速度越快,但热平衡温度较高,达到热平衡所需时间越长. 这是因为气压较低时,在微热板平均温

度相同的条件下,气体导热消耗的加热功率减小,使得(10)式左端 dT_s/dt 增大,即微热板平均温度随时间的变化加快;另外,从(1)式可见,气体导热消耗的加热功率减小,会使得用来增加微热板内能的热量增加,因此热平衡温度越高. 表 1 列出了几种气压条件下微热板的热响应时间常数(热响应时间常数定义为物体从初始温度变化到热平衡温升的 63.2 % 所需要的时间^[9]). 可见,热响应时间常数在毫秒量级,且随气压变化明显,气压越高值越小. 计算值与实测值间的偏差是由于计算时采用的材料参数和结构的几何尺寸与实际有所差别引起的.

3.2 微热板稳态传热分析

从前面瞬态传热分析可以看出,若计算时间足够长,微热板传热将达到稳定状态,这样将瞬态分析中得到的热平衡温度和对应的气压代入(2),(5),(8)式,就可以计算出稳态条件下三种传热途径各自消耗的加热功率. 由计算结果可以绘制出如图 4 所示的各种途径消耗的加热功率与气压的关系曲线.

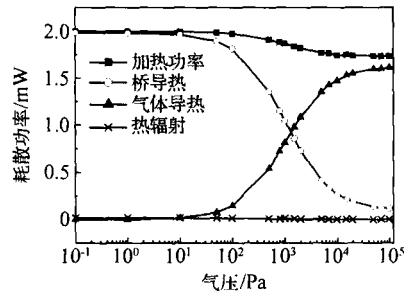


图 4 各种传热途径消耗的加热功率与气压的关系

Fig. 4 Calculated various heat losses of the device versus pressure

图 4 表明在低气压端微热板传热以支撑桥导热为主,而在高气压端以气体导热为主. 气压低于 1 Pa 时,由于参与导热的气体分子少,热导率太低,使得气体导热消耗的加热功率很小;在 $1 \sim 10^4$ Pa 气压范围内,气体热导率增大,气体导热随气压上升而增加;当超过 10^4 Pa 后,气体热导率随气压的变化减缓,气体导热消耗的加热功率趋于稳定. 支撑桥导热消耗的加热功率随气压变化的关系曲线与气体导热相反,在 $1 \sim 10^4$ Pa 气压范围内随气压上升而减小,而在该范围之外变化缓慢. 这主要是因为支撑桥导热与气压没有直接关系,只受微热板温度影响. 对于热辐射,由于微热板温升和面积都比较小,正如计算结果所示,在整个气压范围内热辐射消耗的加热功

率都很小.

4 测试与讨论

4.1 测试系统

测试系统主要由真空腔、机械泵、扩散泵及测试电路组成. 机械泵和扩散泵先后作用可以使真空腔内气压范围达到 $10^{-4} \sim 10^5$ Pa, 采用 ZI-52 T 型电阻规 ($10^{-1} \sim 10^5$ Pa) 和 ZI-27 抗氧化型电离真空传感器 ($10^{-5} \sim 10$ Pa) 检测腔内气压变化; 传感器封装后固定在真空腔内的工作平台上, 通过导线与腔外测试电路相连.

4.2 传感器响应曲线测试

图 5 是恒电流工作方式下传感器的测试电路. 其中, R_s 为传感器加热电阻, R_d 为制作在衬底上的多晶硅补偿电阻, 电阻 r 不随温度变化, 与可调电阻 R_h 串联后和电阻 R_d, R_s 组成电桥以实现对环境温度的补偿^[10], 电压跟随器 A1 消除放大电路对恒定电流 I 的影响. 测试时, 先将真空腔内气压抽到 10^{-2} Pa 以下, 调节 R_h 使运算放大器 A2 输出为零; 然后通过控制阀慢慢向真空腔中通入气体, 测试输出电压 V_o . 随气压的变化关系.

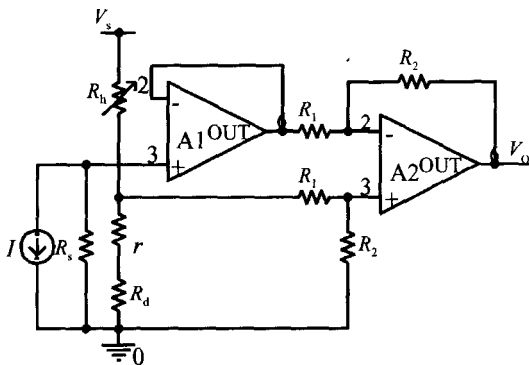


图 5 传感器测试电路

Fig. 5 Constant-current bridge circuit in the experiment

在环境温度为 295 K 的条件下调平电桥后, 测得环境温度为 295 K 和 280 K 时传感器输出电压随气压变化的响应曲线如图 6 所示. 其中, 电流 I 为 0.8 mA, 运算放大器 A2 增益为 10, 通入气体为空气. 从图中可以看出, 在两种温度条件下, 传感器响应曲线重合较好, 说明图 5 的测试电路可以有效实

现传感器的温度补偿. 传感器的响应范围为 $1 \sim 10^5$ Pa, 但是在 $10^4 \sim 10^5$ Pa 范围内输出电压斜率有所下降, 且在 10^5 Pa 附近变化缓慢, 这是由于气体热导率随气压变化缓慢的缘故. 传感器测量下限除了与传感器本身性能有关外, 还受测试仪器系统误差和测试电路调零时真空度的影响.

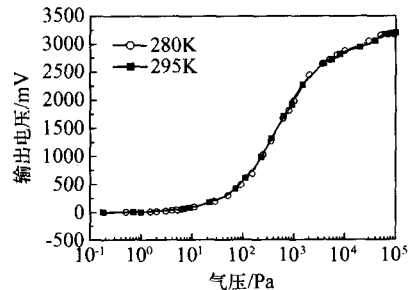


图 6 传感器输出电压随气压的变化关系

Fig. 6 Signal readout of the sensor versus gas pressure

4.3 微热板加热功率的测试

由于加热电流恒定, 所以只要测出加热电阻两端电压的大小即可得到微热板平均加热功率. 图 7 是理论计算和实测得到的微热板平均加热功率随气压变化的关系曲线. 可见, 在 $1 \sim 10^5$ Pa 范围内, 微热板平均加热功率随着气压的增加而减小, 而在该范围之外变化不明显; 气压从 10^5 Pa 降到 1 Pa, 平均加热功率增加了约 0.25 mW.

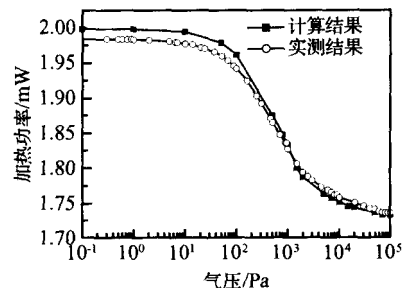


图 7 微热板平均加热功率随气压的变化关系

Fig. 7 Average heating power of MHP versus gas pressure

4.4 分析与讨论

从图 7 可见, 气压较高时, 理论计算和实测结果比较吻合, 但在低气压端, 理论计算结果偏高, 在 1 Pa 附近, 平均加热功率偏高约 0.025 mW. 从图 4 可以看出, 气压较低时, 微热板传热以支撑桥导热为主, 其大小主要由支撑桥尺寸和各层微尺度薄膜的材料参数决定, 而薄膜的材料参数与具体加工工艺

和薄膜厚度有关,所以,理论计算所选用的材料参数与实际材料参数的差别是引起计算结果和实测结果偏差的原因之一.而且,在气压较低时,微热板平均温度较高,忽略微腔热辐射导热微尺度效应产生的误差就更明显一些.另外,传感器几何参数误差、残余应力和热应力引起的力热耦合现象以及测试系统误差也是造成实测结果与理论分析产生一定偏差的原因.然而,从总体上看,理论计算与实测结果还是基本吻合的,这为此类传感器的设计提供了依据.

5 结论

采用 CMOS 工艺和表面牺牲层技术制备了微热板式低气压传感器.分析了在恒电流工作方式下微热板的瞬态传热特性,并利用瞬态传热分析中只要计算时间足够长,微热板就能达到热平衡进入稳态的特点,将瞬态分析的结果用于稳态分析,避免了在稳态传热分析中求解高次方程.分析结果表明,微热板瞬态热响应受气压影响较大,气压越低,微热板升温速度越快,但达到热平衡需要的时间越长,热平衡温度越高;稳态时,在 $1 \sim 10^4$ Pa 气压范围内,气体导热随气压增加而增加,而支撑桥导热随气压增加而减小;在低气压端微热板传热以支撑桥导热为主,而高气压端以气体导热为主,微热板平均加热功率随气压增加而减小.在恒电流工作方式下,测得传感器量程为 $1 \sim 10^5$ Pa,气压从 10^5 Pa 降到 1 Pa 时,微热板消耗的平均加热功率增加了约 0.25 mW.在整个气压测量范围内,平均加热功率均不足 2 mW,它随气压变化关系的实测结果与理论计算结果基本相符.

参考文献

- [1] Chou B C S, Chen Y M, Ouyang M, et al. A sensitive pirani vacuum sensor and the electrothermal SPICE modeling. *Sensors and Actuators A*, 1996, 53: 273
- [2] Shie J S, Chou B C S, Chen Y M. High performance pirani vacuum gauge. *J Vac Sci Technol A*, 1995, 13(6): 2972
- [3] Chou B C S, Shie J S. An innovative pirani pressure sensor. *Transducer '97, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, 1997: 1465
- [4] Huang Yiping, Zhu Shiyang, Li Aizhen, et al. High temperature pressure sensor fabricated with smart-cut SOI materials. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(7): 924 (in Chinese) [黄宜平,竺士扬,李爱珍,等.智能剥离 SOI 高温压力传感器. *半导体学报*, 2001, 22(7): 924]
- [5] Zhang Weixin, Mao Ganru, Qu Hongwei, et al. Study of novel integrated pressure sensor. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1996, 17(6): 435 (in Chinese) [张维新,毛赣如,曲宏伟,等.新型集成压力传感器的研究. *半导体学报*, 1996, 17(6): 435]
- [6] Cajda M A, Ahmed A. Applications of thermal silicon sensors on membranes. *Sensors and Actuators A*, 1995, 49: 1
- [7] Tang Zhenan, Fung S K H, Wong D T W, et al. An integrated gas sensor based on tin oxide thin-film and improved micro-hotplate. *Sensors and Actuators B*, 1998, 46: 174
- [8] Yu Jun, Tang Zhen'an, Chen P C H, et al. Thermal analysis 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.基于硅基微加工工艺的微热板传热分析. *半导体学报*, 2005, 26(1): 192]
- [9] Incropera F P, DeWitt D P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th edition. New York: John Wiley & Sons, 1996
- [10] Weng P K, Shie J S. Micro-pirani vacuum gauge. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(2): 492
- [11] Han Maohua, Liang Xingang. Microscale effect of thermal radiation on micro gas sensors. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2003, 23: 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, 23: 45]
- [12] Demirei T, Guney D, Bozkurt A, et al. Electro-thermal simulation and modeling of micromachined gas sensor. *Microelectromechanical Systems Conference*, 2001: 99
- [1] Chou B C S, Chen Y M, Ouyang M, et al. A sensitive pirani

Study and Fabrication of a Low Gas Pressure Sensor with Micro-Hotplate *

Zhang Fengtian, Tang Zhen'an, Yu Jun, Jin Rencheng, Gao Renjing, and Jiang Shengfeng

(Key Laboratory of Microsystem and Micro-Fabrication, Department of Electronic Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A low gas pressure sensor based on micro-hotplate (MHP) is designed and successfully fabricated by a standard CMOS process followed by surface micromachining. The MHP has dimensions of $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ and is suspended by four micro-bridges which form a $0.5\mu\text{m}$ air gap below it. The bridges are $21\mu\text{m}$ wide and $60\mu\text{m}$ long. A transient heat transfer equation of MHP with a constant-current operation mode is established based on the classical Fourier's analysis and solved numerically using the fourth-order Runge-Kutta scheme. The results of the transient analysis are used to analyze steady-state heat transfer. Results show that thermal response time is on the level of milliseconds and decreases if gas pressure increases. Thermal loss through the bridges is the main factor in the low-pressure range, while gaseous heat conduction dominates in the high-pressure range. The fabricated sensor shows a measurement range from 1 to 10^5 Pa. The measured relationship between the heating power and gas pressure is in agreement with theoretical results.

Key words: micro-hotplate; gas pressure sensor; microsensor; heat transfer; constant current

EEACC: 2575; 7230M; 7320V

Article ID: 0253-4177(2005)07-1412-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 90207003, 59995550-5)

Zhang Fengtian male, was born in 1976, PhD candidate. His interests focus on thermal microsensors.

Tang Zhen'an male, was born in 1955, professor, advisor of PhD candidates. His research interests include microelectronics, nanoelectronics and MEMS.

Received 15 October 2004, revised manuscript received 26 November 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics