

文章编号 1004-924X(2012)10-2200-07

陶瓷微热板阵列式可燃气体传感器

薛严冰^{1,2*}, 唐祯安²

- (1. 大连交通大学 电气信息学院, 辽宁 大连 116028;
2. 大连理工大学 电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 设计了基于陶瓷基底的悬桥式微热板结构以解决硅微热板高温稳定性差的问题。分析了微热板的传热过程, 并通过有限元工具对其稳态热响应特性及微加热器电极结构进行了模拟。采用常规微电子技术结合激光微加工技术, 实际制作了基底厚度为 100 μm , 桥宽度为 2 mm 的微结构, 并对结构的加热功率-温度关系进行了测试。结果表明: 热板具有较好的高温稳定性, 1.5 W 加热功率可使板上平均温度达到 630 $^{\circ}\text{C}$ 。将桥式微热板作为阵列传感器的加热平台, Pd 掺杂原子数百分比为 0.2 % 和 10 % 的 SnO_2 纳米材料分别作为阵列中两只传感器的敏感膜材料, 设计并制作了阵列式气体传感器。传感器在恒电压加热方式下可实现 CO 或 CH_4 单一模式气体检测; 阵列传感器在高、低温脉冲电压加热模式下可实现对 CO 和 CH_4 两种混合气体的定量检测。

关键词: 陶瓷微热板; 气体阵列传感器; 一氧化碳; 甲烷; 工作温度

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2200

Gas sensor array based on ceramic micro-hotplate for flammable gas detection

XUE Yan-bing^{1,2*}, TANG Zhen-an²

- (1. School of Electrical and information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
 2. School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)
- * Corresponding author, E-mail: dlxyb@djtu.edu.cn

Abstract: A ceramic hotplate with the structure of suspending bridge was designed to improve the thermal stability of silicon micro hotplates. The heat transfer process of the hotplate was analyzed and the characteristics of steady-state thermal response and the electrode structure of a heater were simulated by using the finite element method. Combined the conventional microelectronic technology and laser micro processing technology, the microstructures with thickness of 100 μm and bridge width of 2 mm were produced actually and the property of power assumption verses the temperature was measured. The results show that the hotplate has good stability at high temperature, and the average temperature on the ceramic hot-plate can reach 630 $^{\circ}\text{C}$ when a 1.5 W heating power is applied. By taking the ceramic hotplate as heating platform and nano-scale SnO_2 materials with Pd doping concentration

收稿日期: 2012-05-23; 修订日期: 2012-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 61131004); 辽宁省企为博士后项目(No. 94392)

of 0.2 % and 10 % (atom number percentage) as sensitive membrane materials, respectively, the array with two sensors was designed and fabricated. Experiments show that when the sensor array works in the constant voltage heating mode, it can be used as a single sensor with good response to CO or CH₄ gases. When the sensor array works at pulse voltage heating mode with alternating high or low working temperatures, it can realize quantitative detection for mixed gases of CO and CH₄.

Key words: ceramic hot-plate; gas sensor array; carbon monoxide; methane; working temperature

1 引言

阵列式气体传感器是在混合气氛中实现对特定气体有效检测的常用方法之一。基于硅微加工技术的微热板阵列式气体传感器由于具有体积小、功耗小、易集成等优点,已得到广泛的研究和关注^[1-2]。如 Ivanov P 等将 4 种不同掺杂的 SnO₂、WO₃ 敏感材料制作在 4 个硅微热板上组成微系统,利用不同材料对气体响应特性的不同,通过主成分分析法,实现了对乙醇、乙烯、氨气的选择性检测。阵列传感器的关键问题是合理选择阵列中每一个传感器单元,要求单只器件对混合气氛中的各气体具有明显不同的响应特性,以便用简单的数据处理算法实现对混合气体的区分与定量检测^[3]。为有效提取阵列中各传感器动态响应的特征信息,温度调制技术是一种常用的方法^[4]。

受制作工艺影响,硅微热板结构存在一些问题。首先,为与标准 IC 工艺兼容,热板上的加热器多采用多晶硅电阻,高温下加热器阻值会漂移,温度稳定性差;其次,热板多采用氧化硅/氮化硅多层复合膜结构,由于各膜材料的热膨胀系数不同,难以承受热冲击,不适合应用于高低温频繁变化的温度调制场合;再次,制作工艺复杂,制作成本高。同硅材料相比,陶瓷具有极佳的热稳定性,但其难以用常规的微电子工艺加工,从而制约了陶瓷微热板在气体传感器中的应用。随着激光微加工技术的发展,陶瓷材料的微加工工艺变得方便与高效^[5],陶瓷微热板结构也引起了一些研究者的关注^[6-8]。最早的微热板采用低温陶瓷共烧结技术(LTCC)将微加热器和测试电极印在不同的陶瓷层上,层间通过通孔实现电连接,将所有层在 870 °C 下进行共烧处理,形成陶瓷结构体。俄罗斯的研究者^[9-10]在电火花氧化得到的 10~30 μm 的氧化铝薄膜上制作微加热器和电极,然后将膜结构固定在事先微加工好的氧化铝陶瓷底座

上,大大降低了微结构的热损耗。本课题小组在前期工作中,采用常规微电子工艺结合精密激光微加工技术,在单片氧化铝陶瓷上制作出悬梁式微热板结构,在热板的高温应用方面取得了较好的效果^[11-12]。

虽然陶瓷微热板的研究已取得了一定进展,但基于陶瓷微热板的阵列式气体传感器还鲜有成果报道。本文采用常规氧化铝陶瓷片,设计并制作了双传感器阵列微热板结构,通过涂覆不同浓度贵金属 Pd 掺杂的 SnO₂ 敏感材料,不需复杂的算法,即可实现对 CO 和 CH₄ 两种可燃气体的定量检测。

2 结构设计

2.1 微热板结构

微热板基底材料采用常规的 96% 的 Al₂O₃ 电子陶瓷,厚度为 0.1~0.5 mm。微热板采用桥式结构,如图 1 所示。其中 1,2 之间为微加热器,3 和 4,以及 5 和 6 分别为两对测试用叉指电极。通过改变微加热器的加热功率调节桥上的温度,在桥中央对称位置的叉指电极上涂覆不同材料的敏感膜,即可组成阵列式气体传感器。为实现结构的悬浮,采用了一种无内引线的封装方法^[11]。在简化工艺

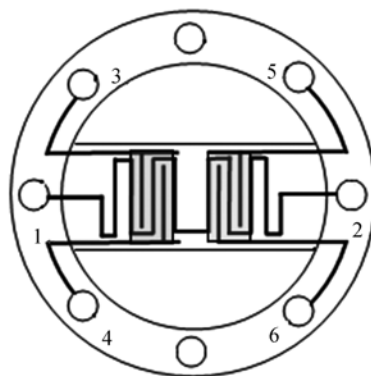


图 1 桥式微热板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hotplate on micro-bridge

的同时,增加了电气连接的可靠性。

2.2 传热过程分析

为减小加热器的加热功率,需对微热板的传热过程进行分析。热板上的热损失主要有支撑桥上的热传导、气体导热(包括气体的热传导和对流)、热辐射 3 种方式,可用式(1)表达^[13]:

$$Q_{total} = G_m \lambda_m (T_{hot} - T_{amb}) + G_{air} (h_f + \lambda_{air}) (T_{hot} - T_{amb}) + G_{rad} \sigma \epsilon (T_{hot}^4 - T_{amb}^4), \quad (1)$$

其中: λ_m 、 λ_{air} 是陶瓷和气体的热传导系数, h_f 是气体的对流系数, ϵ 是辐射发射率, σ 是波尔兹曼常数, G_m 、 G_{air} 、 G_{rad} 是与结构有关的几何因子。等式右边的第一项表示桥的传导导热,第二项表示气体的导热,第三项为辐射导热,后两项导热的几何因子均同导热面积成正比。因此,要减小传导导热,应增大桥的热阻,即减小基底厚度,减小桥宽度,或增加桥的长度。同时要减小桥区域的表面积,以降低对流和辐射造成的热损失。

考虑到器件最终采用 TO-5 封装,根据封装尺寸,选择基片外径为 6.4 mm,安装孔的孔心位置在直径 5.1 mm 的圆上,孔径为 0.7 mm。由公式(1)可知,基片内径应尽可能大,以增加桥长度,同时桥宽度要尽可能窄。为给陶瓷微加工留出一定的加工裕度及增加结构体的稳定性,最终选择陶瓷基底厚度为 0.1 mm,内径为 4 mm,桥宽度为 2 mm。

2.3 有限元模拟

利用 ANSYS 软件建立了上述陶瓷微热板结构,并对其进行了稳态热分析。加热方式采用恒功率加热。对瓷片表面施加对流和辐射载荷。空气自然对流换热系数为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,陶瓷表面辐射发射率为 0.5。边界条件设为环境温度 300 K。模拟用到的材料热导率见表 1^[14]。

表 1 材料热导率参数

Tab.1 Thermal conductivity of materials

材料	热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
陶瓷	24
Pt	73
引脚材料	81
空气	0.024

图 2 所示为加热功率为 500 mW 时微热板的稳态热响应模拟结果。可以看出在该加热功率

下,板上最高温度可达到 570 K,可为大多数半导体金属氧化物气体传感器提供适合的工作温度,相应的加热功率远小于陶瓷管烧结结构的传感器。热板上温度最高的区域在桥中央位置,温度沿着桥长度均匀降落。因此在制作气体传感器时,敏感材料应涂覆在桥的中心高温区域。

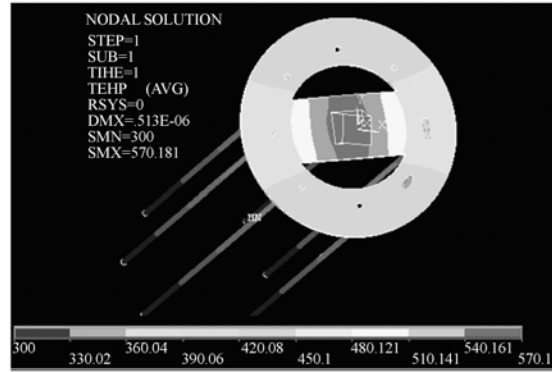
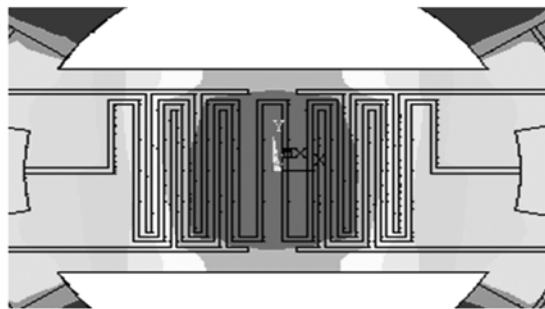
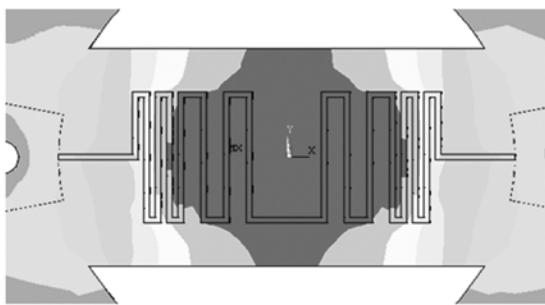


图 2 加热功率为 500 mW 时的稳态热响应
Fig.2 Thermal stable response of structure at heating power of 500 mW



(a) 加热器电阻均匀分布
(a) Heating resistance evenly spacing



(b) 加热器电阻不均匀分布
(b) Heating resistance unevenly spacing

图 3 微加热器有限元模拟结果

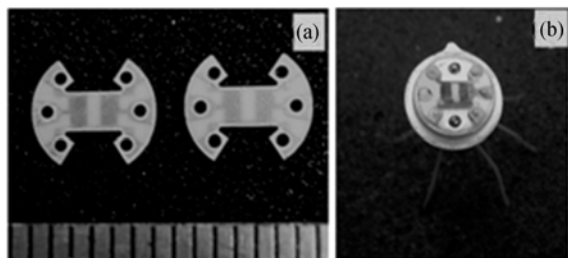
Fig.3 Simulation results of Pt heater

为研究微加热器结构对板上温度分布的影响,对微加热器进行了模拟研究。加热器采用蛇型加热电阻,线条宽度为 $50\ \mu\text{m}$ 。用 ANSYS 软件提供的电-热耦合单元,对不同结构的微加热器特性进行模拟,图 3 所示为 $8\ \text{V}$ 加热电压下热板中心区温度分布的模拟结果。板上的温度分布规律同恒功率加热模拟结果一致。将 2 对测试电极去掉后,温度分布不变,说明 Pt 薄膜电阻的导热效应可以忽略。改变加热器的长度,会改变加热器电阻值,但基本不影响相同功率下的稳态热响应。通过改变加热器线条间距和线条间的疏密程度,可在一定程度上改善中央桥区温度的均匀性。

3 实 验

3.1 微热板结构制作工艺

首先采用磁控溅射剥离的方法制作 Pt 加热器及电极。具体的工艺流程及参数见文献[11]。为增加 Pt 同陶瓷衬底的结合力,在溅射 Pt 之前,先溅射一薄层(约 $20\ \text{nm}$) Ti 过渡层。为增加 Pt 加热器的热稳定性,经 $600\ ^\circ\text{C}$ 氮气气氛下退火 2 h 处理,然后采用准分子激光来加工微桥结构、安装孔,分离出单个结构。为减小对流和辐射造成的热损失,将结构体上的多余面积切除。加工后的陶瓷微结构照片如图 4(a)所示。



(a) 激光加工后的陶瓷微结构 (b) 安装在 TO-5 封装座上
(a) Ceramic microstructure by laser processing (b) Mounting on TO-5 package

图 4 阵列式气体传感器照片

Fig. 4 Photos of array gas sensors

3.2 敏感材料的制备

SnO_2 纳米粉体采用溶胶-凝胶方法制备。阵列中 2 只传感器的敏感材料分别采用 0.2% 和 10% Pd 掺杂的 SnO_2 粉体。取少量粉体溶于去离子水中,并加入适量有机黏合剂,在玛瑙研钵中充

分研磨,形成气敏浆料。将气敏浆料分别涂敷到陶瓷热板的 2 对测试电极上,在 $80\ ^\circ\text{C}$ 下烘干, $600\ ^\circ\text{C}$ 退火 2 h,即得到涂敷敏感膜的陶瓷基片。最后将基片封装在 TO-5 底座上,即制作完成了阵列式气体传感器。器件在 $300\ ^\circ\text{C}$ 条件下老化 5 d 后,在自行搭建的气体测试平台上测试其对 CO 和 CH_4 气体的响应特性。

4 结果与讨论

4.1 加热功率同热板平均温度的测试曲线

为简化制作工艺,板上未设计专门的测温传感器,由 Pt 加热器兼做测温电阻。首先对器件的温度-电阻关系进行标定,获得 Pt 加热器电阻的温阻系数。然后对 Pt 加热器进行 V-I 特性测试,得到加热功率同电阻阻值的关系,结合温阻系数,即可得到加热功率同热板上平均温度的关系,测试结果如图 5 所示。 $500\ \text{mW}$ 加热功率下,实测温度约为 $230\ ^\circ\text{C}$,比模拟结果偏低。一方面由于是模拟得到的温度是板上的中心温度(最高温度),而实际测得的是平均温度,该温度低于器件中心温度,另一方面是模拟时使用的材料热物性参数同实际情况略有出入。从测试结果上还可以看出,热板可工作在高温下, $1.5\ \text{W}$ 的加热功率可使板上平均温度达到 $630\ ^\circ\text{C}$,硅基微热板很难达到这个温度,体现出陶瓷热板的优势。对 $600\ ^\circ\text{C}$ 下加热器的电阻值进行测试,90 d 内加热器电阻值的最大漂移不超过 1.5% ,说明 Pt 加热器具有良好的热稳定性。

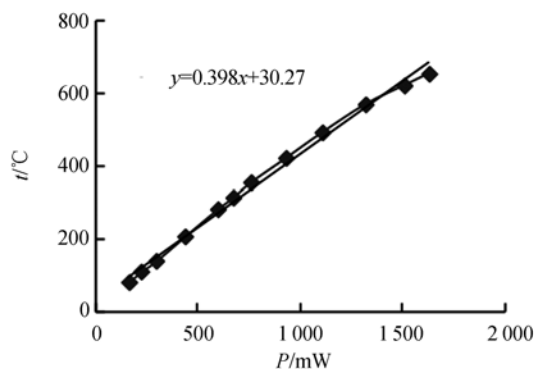


图 5 阵列传感器加热功率同平均工作温度的测试曲线

Fig. 5 Test curve of heating power with the average temperature of array sensor

4.2 传感器对 CO 的响应

合适的工作温度是提高气体传感器灵敏度和

选择性的有效方法之一。在 150~600 °C 内,测试了传感器对 100×10^{-6} 的 CO 的响应,确定检测 CO 的工作温度为 200 °C。图 6 是阵列中的 2 只传感器在 200 °C 时对 $20 \sim 150 \times 10^{-6}$ 浓度 CO 的灵敏度,其中灵敏度 S 采用电导灵敏度。2 只传感器的灵敏度均随 CO 浓度增加基本呈线性增加,但 0.2% 的 Pd 掺杂器件灵敏度明显优于 10% 的 Pd 掺杂器件。

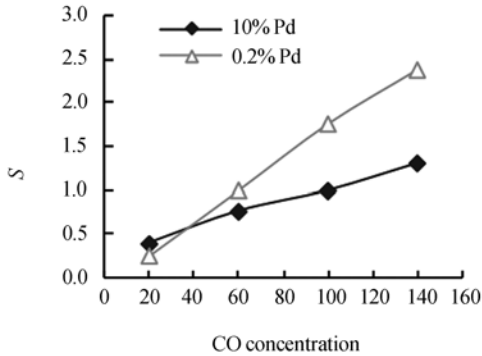


图 6 传感器在 200 °C 工作温度下对 $20 \sim 150 \times 10^{-6}$ 浓度 CO 的灵敏度

Fig. 6 Response of sensors to $20 \sim 150 \times 10^{-6}$ CO at working temperature of 200 °C

为考察阵列传感器对 CH_4 的选择性,选择 $3\,000 \times 10^{-6}$ 的 CH_4 作为干扰气。图 7 是两传感器在 200 °C 对 100×10^{-6} CO 和 $3\,000 \times 10^{-6}$ CH_4 的响应对比。两器件对甲烷无明显响应,表现出该工作温度下两传感器对 CO 均具有很高的选择性。从图中还可看出,10% Pd 掺杂器件的响应恢复时间大于 0.2% Pd 掺杂器件。综合评价,0.2% Pd 掺杂器件对 CO 具有更好的响应特性。

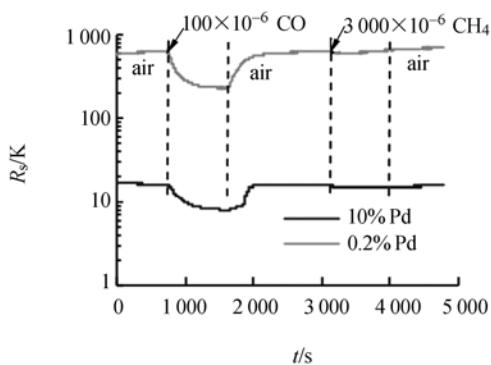


图 7 传感器对 100×10^{-6} CO 和 $3\,000 \times 10^{-6}$ CH_4 的响应
Fig. 7 Response of sensors to 100×10^{-6} CO and $3\,000 \times 10^{-6}$ CH_4

4.3 传感器对 CH_4 的响应

经实验确定检测 CH_4 的最佳工作温度为 500 °C。图 8 是阵列中的 2 只传感器在 500 °C 时对 $500 \sim 4\,000 \times 10^{-6}$ CH_4 的响应灵敏度。2 只传感器对 CH_4 气体均有较高灵敏度。10% 掺杂浓度的器件在 CH_4 浓度低于 $3\,000 \times 10^{-6}$ 时的响应特性优于 0.2% 的掺杂器件。

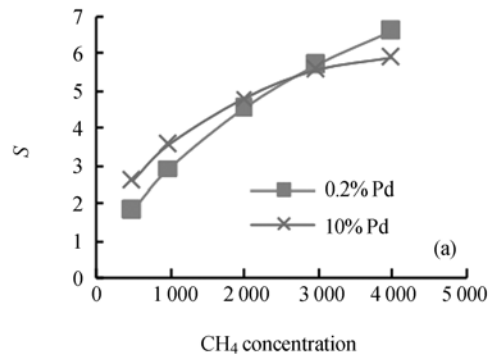


图 8 传感器在 500 °C 工作温度下对 CH_4 响应的灵敏度

Fig. 8 Sensitivity of sensors responding to CH_4 on working temperature of 500 °C

图 9 给出了传感器在 500 °C 工作温度下对 100×10^{-6} CO 和 $3\,000 \times 10^{-6}$ CH_4 的响应对比。传感器对 $3\,000 \times 10^{-6}$ CH_4 的响应明显大于 100×10^{-6} CO 的响应,且具有极快的响应速度。由图 9 可分别计算出两器件对被测气体响应的灵敏度 S_{CO} , S_{CH_4} , 定义灵敏度比值 $\text{Ratio} = S_{\text{CH}_4} / S_{\text{CO}}$, 其值越大说明传感器对 CH_4 的选择性越好。计算得到 0.2% Pd 掺杂器件和 10% Pd 掺杂器件的灵敏度比值分别为 13.49 和 31.68。说明 10% Pd 掺杂浓度的器件更利于实现 CH_4 的检测。除

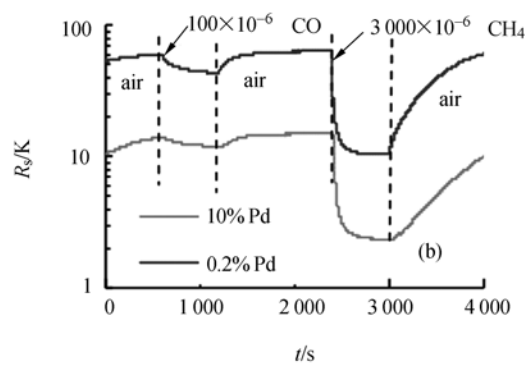


图 9 传感器对 100×10^{-6} CO 和 $3\,000 \times 10^{-6}$ CH_4 的响应
Fig. 9 Response of sensors to 100×10^{-6} CO and $3\,000 \times 10^{-6}$ CH_4

了可获得对 CH_4 的高灵敏度外,对 CO 基本无响应。

由上述测试结果可知,在不同的工作模式下,该阵列传感器可实现单一 CO 、 CH_4 测试或 CO 、 CH_4 两种混合气体的检测。检测单一 CO 气体时,将器件温度设在 $200\text{ }^\circ\text{C}$,测试数据从 0.2% 掺杂的一边读取,而检测单一 CH_4 气体时,将器件温度设在 $500\text{ }^\circ\text{C}$,测试数据从 10% 掺杂的一边读取。当检测 CO 和甲烷混合气时,可使传感器工作于高低温脉冲电压调制方式,低加热电压下 0.2% 掺杂器件的响应仅由 CO 气引起,高加热电压下 10% 掺杂器件的响应主要由 CH_4 引起,不需复杂的数据处理算法,即可实现两种混合气体的定量检测。

5 结 论

设计了基于陶瓷微热板的双阵列式传感器,

用有限元软件对微结构的传热特性及微加热器结构进行了仿真优化。采用常规微电子技术和激光微加工技术,成功地在陶瓷基板上制作了 Pt 微加热器及悬桥式微热板结构。测试了实际制作样品的加热功率-平均温度关系。结果显示,加热功率为 1.5 W 时,板上平均温度达到 $630\text{ }^\circ\text{C}$,保证了微热板在高温情况下的应用。

选择 0.2% Pd 掺杂和 10% Pd 掺杂的 SnO_2 材料分别作为阵列中 2 只传感器的敏感膜材料,制作了可同时检测 CO 和 CH_4 两种气体的阵列式传感器。当检测单一气体时,传感器工作在恒压加热方式下,气敏响应可从其中一只敏感电阻上获得。当检测 CO 和 CH_4 混合气时,传感器工作在高、低脉冲电压加热模式下,可实现对 CO 和 CH_4 两种气体的定量检测。接下来的研究工作将进一步优化阵列传感器结构,降低加热功率,减小热响应时间,使其具有较好的温度调制效果。

参考文献:

- [1] BARBRI N, MIRHISSE J, IONESCU R, *et al.*. An electronic nose system based on a micro-machined gas sensor array to assess the freshness of sardines [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, 141:538-543.
- [2] IVANOV P, LLOBET E, VERGARA A, *et al.*. Towards a micro-system for monitoring ethylene in warehouses [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, 111-112: 63-70.
- [3] SZECOWKA P M, SZCZUREK A, LICZNEKSKI B W. On reliability of neural network sensitivity analysis applied for sensor array optimization [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 157: 298-303.
- [4] MONTOLIU I, TAULER R, PADILLA M, *et al.*. Multivariate curve resolution applied to temperature-modulated metal oxide gas sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 145:464-473.
- [5] 吴东江,张强,郭东明. Al_2O_3 陶瓷薄片 CO_2 连续激光弯曲试验[J]. *光学精密工程*. 2009, 17(10): 2473-2478.
WU D J, ZHANG Q, GUO D M. Experiment on bending of Al_2O_3 ceramic slice with CO_2 CW-laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2473-2478. (in Chinese)
- [6] 施云芬,施云波,刘月华,等. 基于 MEMS 叠层微结构的 SO_2 毒气传感器[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6):1075-1081.
SHI Y F, SHI Y B, LIU Y H, *et al.*. Sulfur dioxide poison gas sensor based on MEMS laminated micro-structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1075-1081. (in Chinese)
- [7] PISARKIEWICZ T, SUTOR A, POTEMPA P, *et al.*. Micro sensor based on low temperature cofired ceramics and gas-sensitive thin film [J]. *Thin Solid films*, 2003(436):84-89.
- [8] RETTIG F, MOOS R. Ceramic meso-hotplates for gas sensors [J]. *Sensors and Actuators B*, 2004(103):91-97.
- [9] VASILIEV A A, PAVELKO R G, GOGISH S Y, *et al.*. Alumina MEMS platform for impulse semiconductor and IR optic gas sensors[J]. *Sensors and Actuators B*, 2008, 132:216-223.
- [10] VASILIEV A A, GOGISH S Y. The optimization of high-temperature sensor microhotplates based on thin alumina membranes [J]. *Euroensors XVII*, 2003:344-347.
- [11] 薛严冰,唐祯安.悬梁式陶瓷微热板的设计及热性能研究[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(6):725-729.
XUE Y B, TANG ZH A. The design and thermal property study of suspended hotplate based on ceramic substrate [J]. *Journal of Optoelectronics* .

Laser, 2009,20(6):725-729. (in Chinese)

- [12] 薛严冰,唐祯安. 基于陶瓷微热板的高温气体传感器研究[J]. 光电子·激光, 2011,22(7):976-979.
XUE Y B, TANG ZH A. The study of high-temperature working gas sensors based on ceramic hot-plate[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011,22(7):976-979. (in Chinese)
- [13] SIMON I, BARSAN N, BAUER M, *et al.*. Mi-

cromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001,73:1-26.

- [14] BAUER R, GOLONKA L J, KIRCHNER T, *et al.*. Optimization of thermal distribution in ceramics and LTCC structures applied to sensor elements [J]. *Microelectronics International*, 1998,15(2):34-38.

作者简介:



薛严冰 (1973—), 女, 山西交城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 1997 年于中北大学获得硕士学位, 2009 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学电子科学与技术学院博士后, 主要从事半导体气体传感器方面的研究。
E-mail: dlxyb@djtu.edu.cn



唐祯安 (1955—), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博士生导师。1982 年于西安电子科技大学获得学士学位, 2003 年于大连理工大学获得博士学位, 主要从事半导体传感器及其应用、集成电路与系统等方面的研究。E-mail: tangza@dlut.edu.cn

● 下期预告

全息光栅制作中光栅掩模槽形形状 随光刻胶特性曲线的变化规律

韩建^{1,2}, 巴音贺希格¹, 李文昊¹, 孔鹏^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

为分析光栅槽形形成的基本原理及槽形随光刻胶特性曲线的演化规律, 建立了显影过程中光栅掩模槽形形成的演化模型。基于光刻胶溶解速率在不同曝光量区间的变化, 将光刻胶特性曲线分成 3 个不同区域并分析各区域在光栅掩模槽形形成中的作用, 讨论不同光刻胶特性曲线条件下的槽形演化规律。结果表明: 当光刻胶非线性效应显著时掩模槽形易形成矩形或梯形, 此时槽深由原始胶厚决定; 当光刻胶线性效应较显著时, 槽形形成正弦型同时槽深有所减小。该模型正确反映了光栅槽形随光刻胶特性曲线变化的演化规律, 为通过控制光刻胶特性曲线制作多种掩模槽形提供了理论依据及方法。