

基于热学理论的微型真空检测器件的研究

刘 川¹ 汪学方² 罗小兵^{1,2}

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 华中科技大学武汉光电国家实验室 MOEMS 研究部, 湖北 武汉 430074)

摘 要 介绍了一种基于热学知识设计的表面薄膜微型 MEMS 皮拉尼计, 并将其用于圆片级真空封装腔体的真空度测量中。为了设计灵敏度较高的皮拉尼计, 对不同结构的皮拉尼计的热量分布进行了数值计算与分析, 并最终完成了加工。此皮拉尼计的结构和加工工艺比较简单, 能用于一般的 MEMS 真空封装中。实验结果显示该皮拉尼计可以测量 $1\sim 10^5$ Pa 的真空度, 并在 $1\sim 1000$ Pa 内有很好的线性度。

关键词 MEMS; 皮拉尼计; 圆片级真空封装; 真空度测试

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)09-1553-04

Research on Micro Vacuum Measurement Device Based on Heat Transfer Principle

LIU Chuan¹ WANG Xue-Fang² LUO Xiao-Bing^{1,2}

(1. School of Energy and Power, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. MOEMS Division, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A surface micro MEMS Pirani gauge based on heat transfer principle was introduced, which can be used for measuring vacuum pressure inside vacuum packaging in wafer level. In order to design a high sensitivity Pirani gauge, numerical evaluation and analysis were carried out with different structures, and the fabrication according to the analysis was conducted. Because of simplified processes and structure, this Pirani gauge can be used in general vacuum packaging. The experimental results show that the Pirani gauge is capable of measuring pressures from atmospheric value to 1 Pa and has a good linearity in the range from 1 Pa to 1000 Pa.

Key words MEMS; Pirani gauge; wafer level vacuum packaging; vacuum measurement

0 引 言

大多数 MEMS 器件都需要真空封装才能正常工作^[1], 如基于谐振结构的微陀螺仪、微加速度计、微生物分子质量检测仪等, 采用真空封装可以降低机械运动部件运动时气体的阻尼, 从而获得更高的品质因数和更高的灵敏度。基于热传导原理的非制冷红外探测与成像仪、流量计、微型色谱仪等器件需要真空封装来延长自由粒子的分子平均自由程, 从而提高器件的灵敏度。因此, 真空封装技术已成为严重影响这些 MEMS 器件性能的关键技术。

目前常用的 MEMS 器件真空度检测方法主要有惰性气体 He 值检测法、谐振器 Q 值检测法和薄膜变形法。He 值检测法需要非常精密的检测仪器, 成本较高, 测试精度较低, 而且不能对腔体内部的真空度变化进行实时在线检测。Q 值检测法主要采用测

量真空封装内 MEMS 器件的 Q 值, 再通过公式反推来估计真空封装腔内的真空度, 但反推公式误差较大, 而且还受到外围电路复杂以及低压下敏感度较低等缺点的限制^[2]。因此提出一种精度较高、加工工艺和测试都较为简单的真空检测器件——皮拉尼计^[3], 它是基于通以电流的热膜的温度会随真空(压力)变化, 而温度的改变又导致热膜电阻变化的原理, 通过测量电阻的变化来测量真空度。

本文提出一种薄膜电阻检测真空度的方法, 并将其应用于圆片级真空封装的真空度检测中。通过使用热学相关知识的数值计算与分析, 设计了一种薄膜弯曲状的皮拉尼计结构。这种皮拉尼计的结构和加工过程都比较简单, 而且经过实验测试灵敏度也较好。

收稿日期: 2011-01-09; 修订日期: 2011-08-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(No.2008 AA04Z307)

作者简介: 刘 川(1986-), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生, 主要从事微型传感器、流量计的研究。

1 设计与分析

皮拉尼计结构设计的主要参数有电阻条的宽度, 电阻条数和电阻条之间的间距。由皮拉尼计的工作原理可知, 发热的物体与周围空气的对流换热和腔体内的气体压强有关。当气体压强发生变化时, 发热物体与周围空气的对流换热就会不同, 而增大与周围空气的对流换热可以提高此结构的灵敏度, 因此需要综合考虑各种因素来设计一个灵敏度高的皮拉尼计。

通电后的电阻条的总发热量 G 由三部分组成, 即电阻条与周围空气的对流换热 G_g , 向基底的导热 G_s 和向周围空气的辐射换热 G_r 。每个部分的热量所占的比重由设计的结构和周围的环境条件所决定。

对于真空度测量, 最重要的是向周围空气的对流换热, 可以用下面的公式表示^[4,5]:

$$G_g = \frac{\varphi}{2-\varphi} G_a A_s P \left(\frac{P_{t1}}{P+P_{t1}} + \frac{P_{t2}}{P+P_{t2}} \right) \quad (1a)$$

和

$$G_a = A_0 \left(\frac{273.2}{T_a} \right)^{1/2} W / (\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1b)$$

其中, φ 是气体的调节系数, 与周围空气的性质有关; G_a , A_0 是自由分子分别在 T_a 和 273 K 下的电导率, A_0 取 $0.0164 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; A_s 是悬浮平板的面积, P 是周围大气的压力。 P_{t1} , P_{t2} 是在电阻条薄膜两侧的过渡压力, 分别与电阻条薄膜到两侧散热片之间的距离成反比。在本文中, φ , P_{t1} , P_{t2} 分别取 0.9, 19.72, 1.12^[4]。

固体的导热主要由电阻条与绝缘体的接触面积、绝缘体的几何特性和物性等决定, 由 Weng 和 Shie 推导的表达式可知^[4]:

$$G_s = \left(\frac{1}{4.2k_t d} \frac{B}{A} + 5 \times 10^4 \right)^{-1} \quad (\text{W}/^\circ\text{C}) \quad (2)$$

其中, k_t 是热导率, $0.0312 \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$, d 是皮拉尼计的厚度; 表达式右边的第一部分是薄膜引脚的热阻, 第二部分是引脚末端的扩散热阻。在结构设计时, 通过在基底绝缘层下面开一个槽, 减小电阻条与绝缘体的接触面积, 绝缘体的厚度以及选择导热率小的绝缘体材料等都可以减小固体导热所占的比重。

辐射散热在温度较低的情况下可以忽略, 表达式为^[4,6]:

$$G_r = 2\varepsilon\sigma A_s (T^2 + T_a^2) (T + T_a) \quad (3)$$

其中, ε 是发射率, σ 是波尔兹曼常数, 并假定环境温度 T_a 为 100°C 。

设计时电阻的阻值要做到 600Ω , 电阻的灵敏度要高。电阻公式如下^[7]:

$$R_0 = R_\Delta (L/W + n_1 K_1 + n_2 K_2) \quad (4)$$

式中, K_1 为端头因子, $K_1 = 0.65$; K_2 为拐角因子, $K_2 = 0.5$; L 为总电阻条长; W 为电阻条宽; R_Δ 为方块电阻。

设计时令电阻条宽 W 为 $10 \mu\text{m}$, 间距为 $20 \mu\text{m}$, 方块电阻为 1(经验值)。将不同的电阻条数值 n 代入式 (4) 中, 则可以得到不同结构的具体尺寸大小, 如表 1 所示。其中, L' 为单条电阻实际加工时的长度。

表 1 不同电阻条数下的结构尺寸

Table 1 Dimensions under different resistances

n	$L/\mu\text{m}$	R/Ω	$L'/\mu\text{m}$	$A \times B/\mu\text{m}^2$	$A_s/\mu\text{m}^2$
8	5900	598.3	720	100×720	240×720
10	5880	598.3	570	100×570	300×570
12	5860	598.3	470	100×470	360×470

将上表中设计的不同结构的尺寸代入公式 (1)~(3), 可以得到不同结构的热量分布图, 由于不同结构的热量分布图形基本类似, 因此选择 $n = 10$ 的热量分布图, 如图 1 所示。

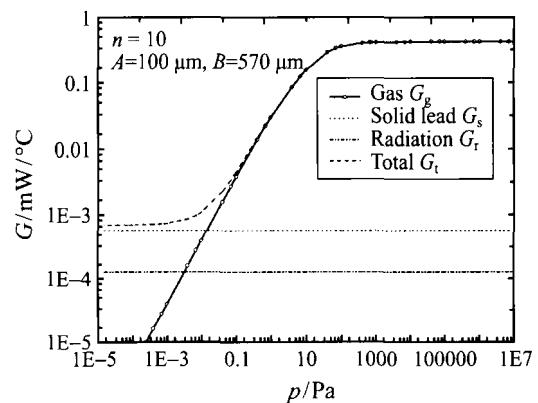


图 1 不同压力下的热量分布情况

Fig. 1 Heat distribution under different pressure

从图 1 可以看出, 随着电阻条数的增加, B/A 值减小, 皮拉尼结构的悬浮平板面积 A_s 逐渐减小, 同时从基底传导的热量 G_s 增大, 与空气的散热 G_g 和辐射散失的热量 G_r 都减小。同时可以发现, 从基底传导的热量 G_s 和辐射散失的热量 G_r 随着空气压力变化不大。在空气压力小于 10 Pa 时, G_g 随着空

气压力呈线性下降。由于空气压力在 100 Pa 以上时, 空气的散热 G_g 基本达到稳定, 因此取压强为 1000 Pa 时, 电阻条数不同时热量值如表 2 所示。

表 2 真空压力 1000 Pa 下的热量分布情况

Table 2 Heat distribution in the pressure of 1000 Pa

n	8	10	12
$G_g/\mu\text{W}\cdot\text{C}^{-1}$	0.4743	0.4694	0.4645
$G_s/\mu\text{W}\cdot\text{C}^{-1}$	4.4488	5.5869	6.7354
$G_r/\mu\text{W}\cdot\text{C}^{-1}$	1.2735	1.2603	1.247
$G/\mu\text{W}\cdot\text{C}^{-1}$	0.4749	0.4701	0.4653
$G_g \cdot G^{-1}$	99.85%	99.88%	99.83%
$G_s \cdot G^{-1}$	0.12%	0.094%	0.14%
$G_r \cdot G^{-1}$	0.03%	0.026%	0.03%

从表 2 中可以看出, 随着电阻条数 n 的增加, 从基底传导的热量 G_s 逐渐增加, 辐射散失的热量 G_r 逐渐减小, 且基底传导的热量 G_s 与辐射散失的热量 G_r 之间的比值逐渐增大 (3.5-4.4-5.4)。同时在气体压强为 1000 Pa 时, 与空气的对流换热量 G_g 占总热量的 99% 以上, 因此可以证明此设计方案是可行的。最后在综合考虑结构和工艺相互匹配的基础上, 选择电阻条数 n 为 10 时为最佳的设计方案。

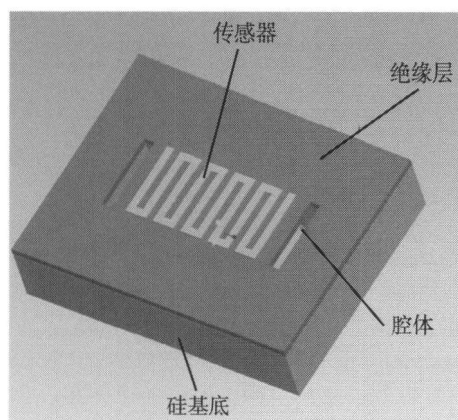


图 2 皮拉尼计器件结构

Fig. 2 Device structure of micro-Pirani sensor

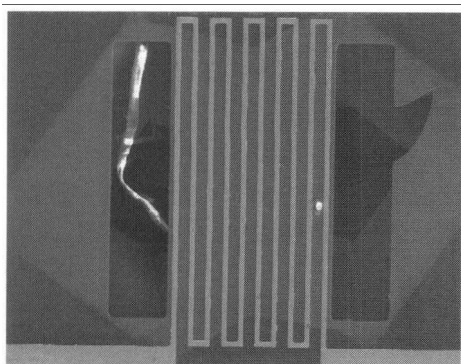


图 3 皮拉尼计 SEM 图

Fig. 3 SEM of the Pirani gauge

本文采用金属铂作为电阻条的材料, 并设计成有一定间隔的弯曲折叠形状, 其中电阻条的长度为 5897 μm 、宽度为 10 μm , 电阻条之间的间隔为 20 μm , 折数为 10。设计的结构和加工完成的皮拉尼计如图 2 和图 3 所示。

2 工艺流程

加工皮拉尼计的工艺流程图如图 4 所示。

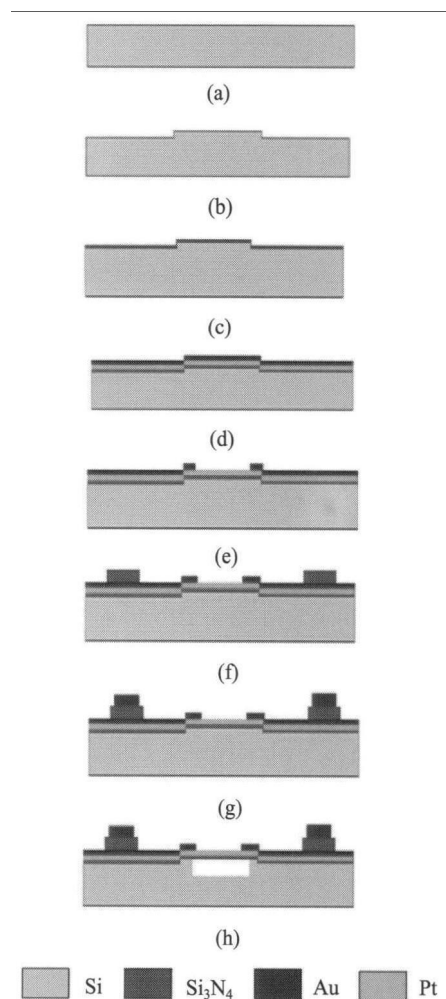


图 4 皮拉尼计加工流程图

Fig. 4 Processes for fabricating Pirani gauge

- (1) 准备经过清洗处理的硅片;
- (2) 在硅片上刻蚀出浅槽, 图形形状为金属电极和皮拉尼计的结构;
- (3) 用低应力氮化硅填充此浅槽;
- (4) 在氮化硅上依次溅射铂电阻和金属电极 (Au);
- (5) 腐蚀铂电阻上的金属电极 (Au), 使金属电极 (Au) 下的铂电阻结构暴露;
- (6) 在电极和铂电阻上面沉积一层氮化硅隔离

层,然后制作出图形;

(7) 接着用同样的方法制作键合层金属图形;

(8) 最后开槽释放出结构,得到皮拉尼计结构。通过以上工艺得到的皮拉尼计结构如图 5 所示。

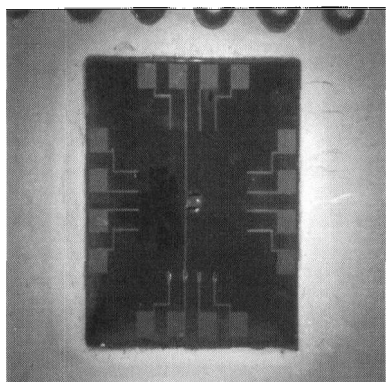


图 5 皮拉尼计结构图

Fig. 5 Microscope photograph of the structure

3 测试结果

我们将皮拉尼计置于真空腔内,在不同的真空度下对其进行标定测试。由皮拉尼计的原理可知,在不同真空度下的电阻条散热是不同的,使得电阻条的温度也就不同,由电阻率和温度的相关特性可知,电阻条的阻值也将不同,因此对应的惠更斯电桥电路中,输出的电压值也就不同。首先,将皮拉尼计接入惠更斯电桥回路中;然后,将电路放置在真空腔体中,在皮拉尼计的两端加上一定的电压;最后,改变真空腔体的真空度,观察电压表的读数。不同的真空度对应不同的电压值,

这样我们可以得到皮拉尼计输出的电压值与真

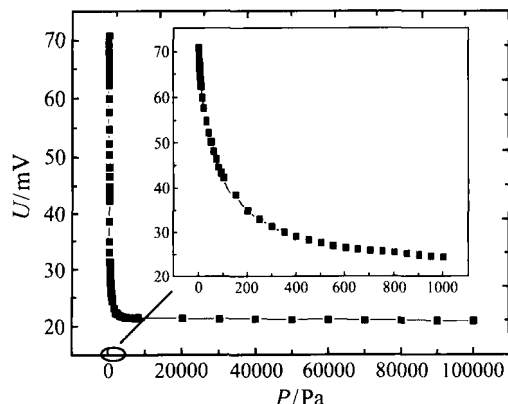


图 6 真空度与输出电压之间关系图

Fig. 6 Curve of the voltage versus vacuum

空度关系的标定曲线。在使用皮拉尼计测量真空度时,只需要将测试得到的数据与标定曲线相对应,就能得出真空封装体中的真空度情况。本文所述的皮拉尼计标定测试系统包括惠更斯电桥电路、真空系统、精细可调恒压源以及电压表。

真空度与输出电压值关系如图 6 所示。从图中可以看出,该皮拉尼计的检测范围为 $1 \sim 10^5$ Pa,输出的电压值随着真空度的增加而降低,在真空度 $1 \sim 100$ Pa 范围内二者有很好的线性度,因此更适合用于检测低真空度范围的腔体。

4 结 论

本文设计了一种表面薄膜微型 MEMS 皮拉尼计,可以用它来测量圆片级 MEMS 真空封装器件的真空度。从基本传热理论出发,得到了皮拉尼薄膜热敏电阻与皮拉尼的关键结构尺寸、气体压力的解析关系,对不同结构的皮拉尼计的热量分布进行了数值计算与分析,并最终完成了加工。实验结果显示,皮拉尼计能测量从 $1 \sim 10^5$ Pa 范围内的真空度,并且在真空度 $1 \sim 1000$ Pa 内有很好的线性关系。

参 考 文 献

- [1] Choa S H. Reliability of Vacuum Packaged MEMS Gyroscopes [J]. *Microelectronics Reliability*, 2005, (45): 361-369
- [2] 周吉龙, 陈肯乐, 张锦文, 等. 微型 MEMS 皮拉尼计研究 [J]. *传感技术学报*, 2008, 21(3): 513-516
ZHOU Jilong, CHEN Kenle, ZHANG Jinwen, et al. Research on Micromachined Pirani Gauge [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(3): 513-516
- [3] Chae J, Stark B H, Najafi K. A Micromachined Pirani Gauge with Dual Heat Sinks [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2005, 28(4): 619-625
- [4] Weng P K, Shie J S. Micro-Pirani Vacuum Gauge [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, 65(2): 492-499
- [5] Chou B C S, Chen Y M, Ou-Yang M. A Sensitive Pirani Vacuum Sensor and the Electrothermal SPICE Modelling [J]. *Sensors and Actuators A*, 1996, (53): 273-277
- [6] Shie J S, Chou B C S, Chen Y M, et al. Characterization and Modelling of Metal Film Microbolometer [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1996, 5(4): 298-306
- [7] 孙承松. 薄膜技术及研究 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998: 68-84; 153
SUN Chensong. *Thin Film Technology and Research* [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1998: 68-84; 153