

文章编号: 2095-4980(2024)09-1038-06

与硅微器件集成的 MEMS 皮拉尼计

秦宜峰, 刘振华, 施志贵, 张青芝, 熊 壮*

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对圆片级真空封装现有的检测难、易泄漏等问题, 提出一种可与硅微器件工艺兼容、并行加工于同一腔体的皮拉尼(Pirani)计设计与加工方法, 用于圆片级真空封装后腔体的真空度检测。采用 SOI 硅片对皮拉尼计结构进行加工, 通过金硅键合方式对器件进行圆片级封装, 同时采用硅通孔(TSV)的纵向电极引出方式, 改善气密封装问题。测试结果表明, 皮拉尼计电阻在线性区间的温度系数为 $1.58 \Omega/\text{C}$, 检测敏感区间约为 $1\sim 100 \text{ Pa}$, 灵敏度达到 $61.67 \Omega/\ln(\text{Pa})$ 。提出的皮拉尼计可与硅微器件并行加工, 为圆片级真空封装腔体的真空度在片测试提供了一种简单可行的方案。

关键词: 真空检测; 皮拉尼计; 硅微器件; 圆片级真空封装

中图分类号: TN305

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022248

MEMS Pirani meter integrated with silicon micro devices

QIN Yifeng, LIU Zhenhua, SHI Zhigui, ZHANG Qingzhi, XIONG Zhuang*

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In response to the existing challenges of difficult detection and potential leakage in wafer level vacuum packaging, a Pirani gauge design and processing method that is compatible with silicon micro-device processes and can be processed in parallel within the same cavity is proposed for vacuum degree detection after wafer-level vacuum packaging. The Pirani gauge structure is processed using SOI silicon wafers, and the device is packaged at the wafer level through gold-silicon bonding. At the same time, the longitudinal electrode lead-out method of Through Silicon-Vias(TSV) is adopted to improve the gas sealing issue. Test results show that the temperature coefficient of the Pirani gauge resistance in the linear range is $1.58 \Omega/\text{C}$, the detection sensitivity range is about $1\sim 100 \text{ Pa}$, and the sensitivity reaches $61.67 \Omega/\ln(\text{Pa})$. The proposed Pirani gauge can be processed in parallel with silicon micro-devices, providing a simple and feasible solution for in-wafer testing of the vacuum degree in wafer-level vacuum packaging cavities.

Keywords: vacuum detection; Pirani meter; silicon micro device; wafer-level vacuum package

德国物理学家 Marcello Pirani 于 1906 年首先发明的皮拉尼(Pirani)真空计是众多真空气压计中的一种, 它利用低气压下发热电阻丝的散热速率与周围环境的大气压有关的原理, 使其周围的气压大小通过电阻丝的阻值间接反映出来, 这一原理成为 Pirani 真空计的最经典理论^[1-2]。微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)的出现使传统的 Pirani 真空计的小型化成为可能, 经过数十年的研究, 基于 MEMS 的皮拉尼计已广泛用于各个领域, 且效果显著^[3-8], 其特点是体积小, 功耗低, 工艺简单, 可批量制造。将 MEMS 皮拉尼计与其他半导体器件工艺集成, 形成高集成度、多功能化的测试测量系统已成为现阶段的热门研究方向^[9-10]。

根据传感器的结构特点, MEMS 皮拉尼计可分为 3 种类型: 微热桥式、微热板式和微热缝隙式。微热桥式皮拉尼真空计由传统皮拉尼计微型化后演化而来, 采用纵向传热方式, 结构简单, 只有一个线性桥式结构悬在衬底上方, 较易设计和建模, 容易求解温度分布问题。借助成熟的反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE)工艺, 微热桥与衬底之间的间隙间距可达到纳米级。Mastrangelo 的研究表明^[11], 减小微热桥与衬底之间的间隙间距,

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-02-15

*通信作者: 熊 壮 email:xiong.zhuang@caep.cn

有利于提高皮拉尼计在高气压的灵敏度。与微热桥式一样，微热板式皮拉尼计也采用纵向传热方式。传感元件转变为蛇形，有效增加了传感面积，提高了传感单元对低气压的灵敏度，但需要更多的支撑结构确保足够的结构强度。微热板的工艺与微热桥较为相似，但在结构建模、温度场仿真求解方面有一定的难度，需要使用有限元软件辅助求解^[12]。微热缝隙式皮拉尼计采用横向传热方法，利用干法蚀刻技术加工高深宽比的结构，微缝隙穿通整个硅片，加热体通常为蛇形，热沉均匀分布在加热体两侧，热量通过加热体结构间隙横向传到热沉，通常加热体和热沉由同一硅片并行加工而成。与前两种结构的皮拉尼计相比，微热缝隙型皮拉尼计加工工艺较为简单，没有复杂的腐蚀工艺，最少只需3层光刻板^[13]。3种结构类型的皮拉尼计中，微热缝隙式结构简单，工艺兼容性好及制备简单，对于真空腔体内的检测具有较好的研究价值。

微陀螺、谐振器等谐振式MEMS器件要求在真空环境下工作，本文针对目前圆片级真空封装技术存在检测难、易泄漏的主要问题，提出一种内置皮拉尼计的硅通孔圆片级真空封装方案。将皮拉尼计与硅微器件并行加工并集成于同一腔体，实现对腔室真空度的实时在片检测，同时采用硅通孔(TSV)的纵向电极引出方式，改善封装的气密性，为MEMS器件性能提升提供有益帮助。

1 设计与分析

1.1 皮拉尼计

皮拉尼计利用热丝的电阻值作为标记，根据气体分子热传导在不同气压下的关系原理制成。皮拉尼计一般包含暴露在被测量的气体环境中的加热体，通过恒定电流加热，并通过周围气体的散热使加热体得到冷却。若气压降低，气体散热速率降低，加热体的温度会上升；反之，加热体温度下降。通常加热体的电阻为温度的函数，要求其温度系数较大，加热体的电阻可以通过测量其两端的电压和流过的电流计算得到，然后求得其温度和对应的气压。这是皮拉尼计的基本原理。

本文采用横向导热结构的皮拉尼计，如图1所示，主要由加热体、热沉、锚点、玻璃衬底、金属引线等组成，其中硅结构由同一块低阻硅加工而成。加热体呈长方形，多拐弯悬空结构，两侧锚点接触玻璃衬底，对加热体起到支撑作用；热沉位于加热体两侧，呈对称的梳齿状分布，形成双热沉结构，并与加热体咬合在一起，保持若干微米的气隙间隙。热沉在加热体的两侧，与皮拉尼计在同一个腔室内与硅微器件并行加工整合，因此热沉和加热体的材料都选择了掺低阻硅，使金属引线与玻璃片上的压点部位形成了良好的欧姆接触，从而保证了加热体具有良好的电阻特性。

本文设计了3组5种不同参数的皮拉尼计，旨在研究物理尺寸改变对皮拉尼计特性的影响。所有皮拉尼计与谐振器并行加工，支撑层厚度为50 μm，悬空层厚度 h 为40 μm。皮拉尼计加热电阻两端支撑锚点大小为600 μm×600 μm，两侧用于散热的热沉不会有明显的温度改变，只需保证一定的强度即可。热沉条的宽度均为12 μm，与加热电阻之间的间隙均为4 μm。本文只改变加热电阻的长度 l_1 和宽度 w_1 做对比实验，标准组参数为31 250 μm×15 μm，电阻约1 833 Ω。长度对照组长度分别为20 900 μm和43 670 μm，电阻分别约1 358 Ω和2 402 Ω；宽度对照组宽度分别为10 μm和20 μm，电阻分别约2 549 Ω和1 475 Ω。

1.2 谐振器设计

采用简化的双端固支的单根谐振梁进行研究，其结构如图2所示。谐振器制备选用低阻硅片，与皮拉尼计工艺兼容，并行加工。在谐振器的梁和左右电极之间加载直流电压，由于静电场作用，梁会弯曲。此时若将一个交变的小信号电压与直流电压串联，由于静电力随时间的增强或减弱，谐振器的梁会产生一个与交流小信号变化同步的振动；同时，振动导致极板间距离变化，产生一个交流小信号。当激励信号达到谐振器的固有频率时，谐振器的梁振动幅度达到最大，输出的交变电流也达到最大值，从而起到选频作用。

本文只采用谐振器的一阶谐振模态，其谐振频率 f_0 为：

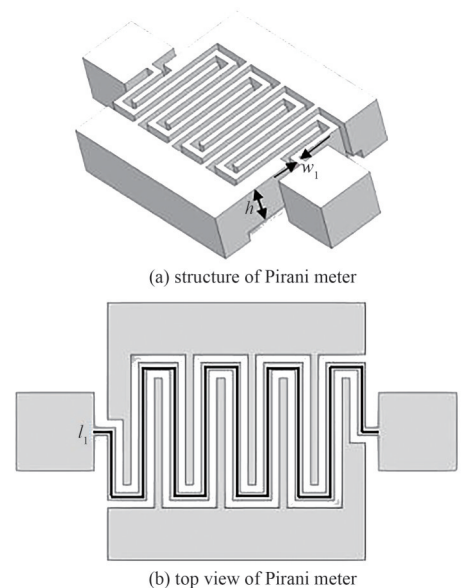


Fig.1 Structural diagram of Pirani meter

图1 皮拉尼计结构图

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \quad (1)$$

式中： k_r 为谐振器的等效刚度； m_r 为谐振器的等效质量。

理想情况下，一个矩形的双端固支梁本身的固有的一阶谐振频率简化后为：

$$f_0 = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left(\frac{h}{l^2}\right) \quad (2)$$

式中： E 和 ρ 分别为结构材料的杨氏模量和密度； h 和 l 分别为梁的厚度和长度。

本文设计了长度 l_2 分别为400 μm 、500 μm 、600 μm 的3种谐振器，其宽度 w_2 均为10 μm ，悬臂梁厚度 h 均为40 μm 。硅的杨氏模量和密度分别为170 GPa和2.33 g/cm^3 ，则可计算出谐振器的谐振频率分别为551.9 kHz、353.2 kHz、245.2 kHz。

使用Comsol多物理场仿真软件仿真了谐振器的一阶谐振频率以及不同激励幅值下的谐振振幅，由于只能检测几十纳米以上的振幅，针对不同长度的谐振器选择了适合其工作的交流激励幅值。图3标尺为谐振梁受到的应力。

1.3 封装整体与电极引出

腔室的封装整体示意图如图4所示，外侧键合墙保证各腔室之间的分隔以及外侧的封装效果。腔体内部集成了谐振器与皮拉尼计，电信号通过电极柱从盖板上的电极通孔引出，32个电极相互绝缘，所有电极都需保证良好的封装效果。

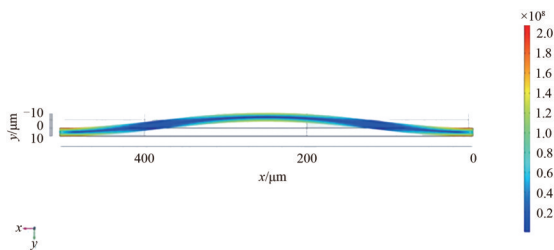


Fig.3 Comsol Simulation Resonator
图3 Comsol仿真谐振器

封装的截面示意图如图5所示，皮拉尼计和谐振器的电极通过底层的玻璃电极连接到相应的电极柱，保证了相互之间的良好隔离，盖片生长了氧化层，保证键合后各电极柱之间的隔离。电极柱上的硅与盖片的金属层进行金硅键合，键合只发生在电极柱边缘纯硅区域，中心的焊盘正对着盖片的氧化层，通过周围的金硅键合保证密封性，中间的部分在键合完成后进行穿通刻蚀，露出焊盘引线即可将内部的电信号导出。

2 器件加工

使用SOI硅片进行器件加工。SOI片结构层厚度为50 μm ，埋氧层厚度为2 μm ，基底层厚度为280 μm ，结构层单晶硅电阻率为0.002 75 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。工艺路线如图6所示。

详细工艺步骤为：

- 1) 在玻璃片(BF33)上溅射Au作为底电极；

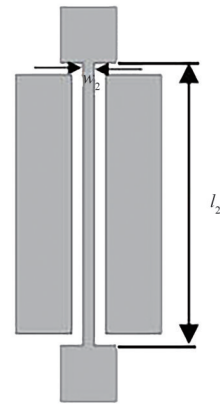
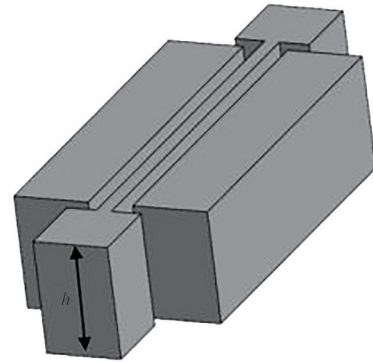


Fig.2 Structural diagram of resonant beam fixed at two ends
图2 双端固支谐振梁结构图

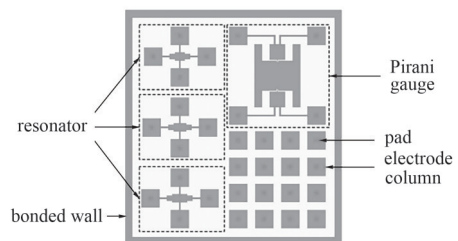


Fig.4 Overall diagram of chamber
图4 腔室整体示意图

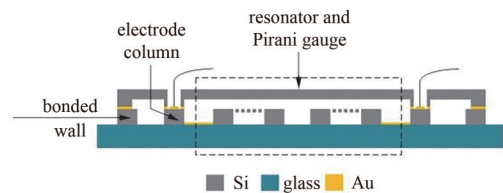


Fig.5 Sectional diagram of chamber
图5 腔室截面示意图

- 2) 在 SOI 结构层刻蚀出浅槽以及电极柱基底；
- 3) 将 SOI 片与玻璃片进行阳极键合；
- 4) 采用 KOH 腐蚀 SOI 片基底层，直至埋氧层露出，再使用 HF 去除埋氧层；
- 5) 在结构层溅射 Cr/Au，做出电极柱上的焊盘；
- 6) 对结构层进行贯通刻蚀，释放结构、电极柱和键合墙；
- 7) 采用硅片作为封装盖片，在表面刻蚀出浅槽；
- 8) 对盖片进行湿氧化，生长出 SiO₂ 绝缘层，厚度 2 μm；
- 9) 在盖片键合面溅射 Ti/Pt/Au，作为键合时的金属层；
- 10) 盖片和结构片在真空环境中进行金硅键合；
- 11) 盖片背面贯通刻蚀，直至露出电极柱上的焊盘。

3 测试方法

在封装之前，完成皮拉尼计和谐振器的真空度标定实验。标定实验在恒温干燥箱以及真空测试台中进行。皮拉尼计制作完成后，首先进行电阻特性测试。为消除接触电阻及引线电阻的影响，采用四线法测量电阻，原理如图 7 所示。端口 1 接地，端口 2 接恒流源输入端，端口 3、4 为高阻态，并记录 4 个端口的电压值 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 ，可得：

$$U_{d2} = U_2 - U_1, U_{d4} = U_4 - U_3 \quad (3)$$

式中： U_{d2} 为两线法所测得的电压，包括加热体电阻、接触电阻和引线电阻的电压降累加； U_{d4} 仅为加热体电阻的电压降，将其除以电流即为加热体的真实电阻值。

选出电阻特性较好的器件，其电压随电流线性变化，然后进行电阻温度特性测试。将皮拉尼真空计的电阻温度特性的测试范围设定为 20~150 °C，电阻随温度上升而升高。测试时，将制作有皮拉尼计的硅片置于恒温干燥箱内，每升温 5 °C，采用四线法测量一次电阻值，进而可得出皮拉尼真空计的电阻温度特性曲线。

随后进行真空度标定试验，将硅片放入真空测试台，2 路提供恒定的电流，另 2 路记录皮拉尼真空计电压随气压的变化。测试气压范围设定为 10⁻²~10⁴ Pa，根据电阻变化情况，每个气压数量级内取 8~10 个点，共取 60 个气压点。为避免热量在器件上的残留，测试顺序为从高气压到低气压。另外，硅电阻率随时间存在一定的漂移，因此尽量连续完成所有气压点测量。温度对电阻值有很大的影响，为避免因升温幅度不同对器件电阻的影响，需控制器件在测量范围内的升温幅度相同。在测量上限(5 000 Pa)时，气体热导很大，很难引起器件温度升高，因此器件温度取决于室温，即(20±2) °C；在测量下限(10⁻³ Pa)时，可通过设定合适的电流值，使各器件加热体的平均温度相同，其温度通过各器件的电阻温度特性曲线求得。

至此，皮拉尼计的真空度标定工作才算完成，图 8 为实物图。

键合完成后，由于电极通过通孔引出，在释放通孔时可能会导致电阻发生变化，需对皮拉尼计再进行一次电阻特性测试，并与键合前的电阻对比，调整后续比对参照。在真空测试台中，给皮拉尼计 2 路提供与标定时相同的恒定电流，记录另 2 路的电压，将所得电阻与标定时电阻气压曲线比对，得到腔室内的真空度。

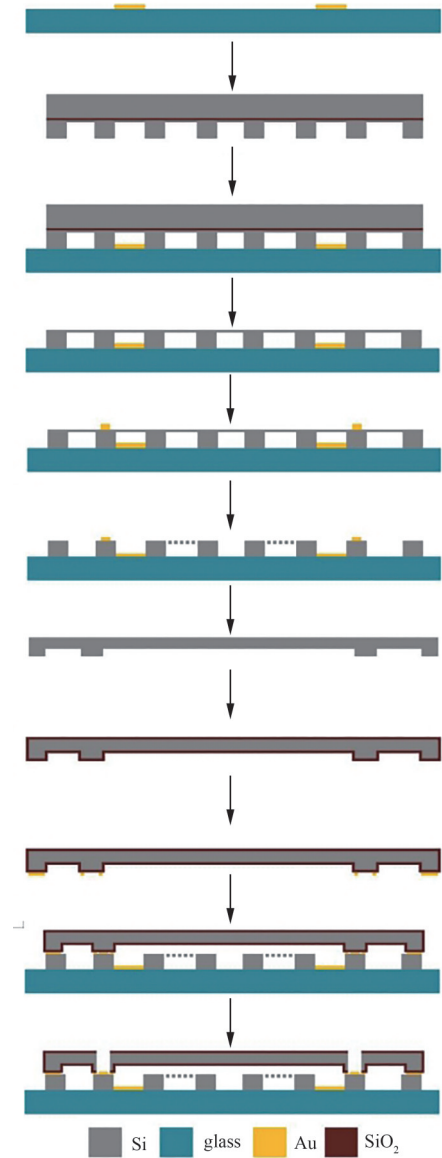


Fig.6 Process flow
图 6 工艺流程图

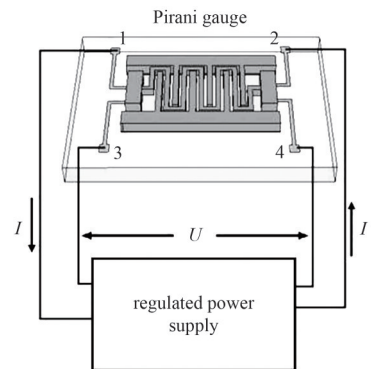


Fig.7 Resistance measurement by four-wire method
图 7 四线法测电阻

4 测试结果分析

皮拉尼计电阻特性测试结果如图 9 所示, 在恒流源激励为正负 5 mA 的范围内, 电压随电流线性变化, 说明皮拉尼计在此范围具有良好的电阻特性, 电阻约为 1 839 Ω 。

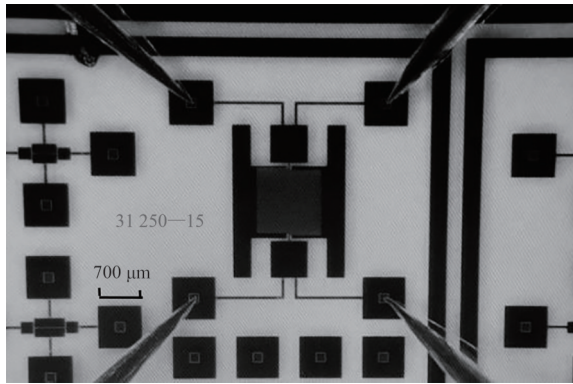


Fig.8 Picture for testing
图 8 皮拉尼计测试实物图

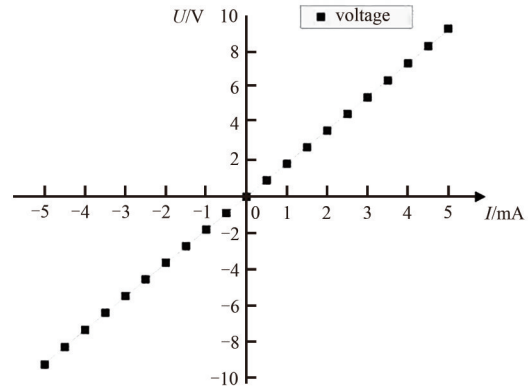


Fig.9 Resistance characteristic test of Pirani meter
图 9 皮拉尼计电阻特性测试

皮拉尼计电阻温度特性曲线如图 10 所示, 电阻随温度升高的变化在 20~150 $^{\circ}\text{C}$ 时具有较好的线性; 降温时曲线在升温拟合直线附近。降温曲线不为线性, 其原因是由于迅速升温至 150 $^{\circ}\text{C}$, 恒温箱内的热量并未稳定, 此时关闭加热, 温箱传感器和皮拉尼计温度均未稳定, 降温时会有热量残余, 故有一定差异。整个降温过程皮拉尼计电阻温度均在升温曲线附近, 皮拉尼计电阻从 1 836 Ω 变化到 2 042 Ω 。根据拟合结果, 皮拉尼计电阻在 20~150 $^{\circ}\text{C}$ 的温度系数为 1.58 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。

图 11 为皮拉尼计的真空特性曲线, 可以看出, 皮拉尼计电阻值随着气压降低而升高, 整条曲线是一个较为理想的皮拉尼计电阻随气压变化的曲线, 从高压的 1 833 Ω 变化到低气压的 2 130.1 Ω 。敏感区间在 1 Pa 到 100 Pa 附近, 电阻变化值达 284 Ω , 灵敏度达 61.67 $\Omega/\ln(\text{Pa})$ 。曲线在 0.1 Pa 附近有一个跳变, 其原因是复合真空计在 0.1 Pa 由电阻单元切换为电离单元, 而且该气压点分别是两单元的测量下限和上限, 在 0.1 Pa 附近, 复合真空计的气压测量存在较大的误差。

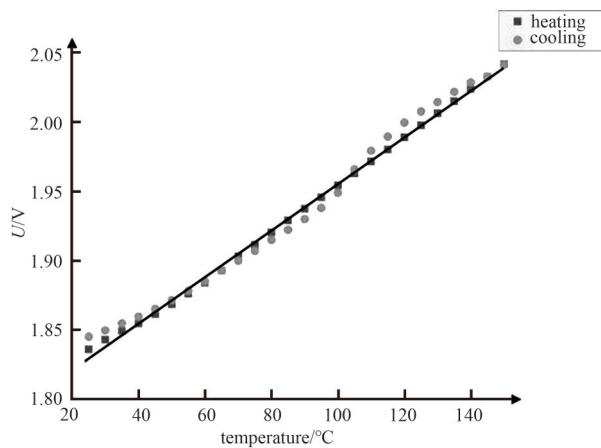


Fig.10 Resistance temperature characteristic test of Pirani meter
图 10 皮拉尼计电阻温度特性测试

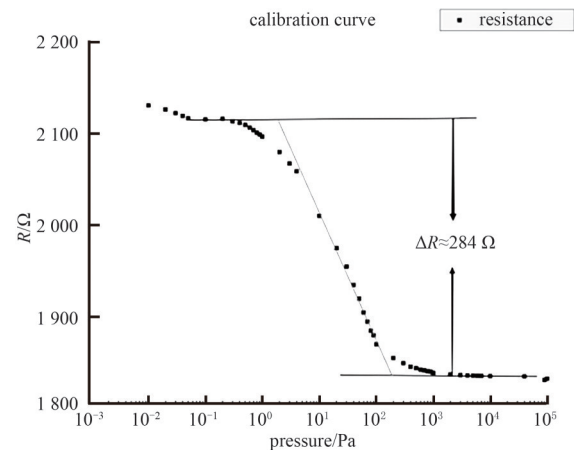


Fig.11 Vacuum characteristic test of Pirani meter
图 11 皮拉尼计真空特性测试

5 结论

本文提出一种将谐振器和真空检测器件集成于同一腔室的多电极圆片级真空封装技术, 可以实时检测腔室内谐振器的工作真空度, 实现在片测试。测试结果表明, 检测真空度的皮拉尼计具有良好的电阻特性, 可以对 1~100 Pa 的真空度进行检测, 灵敏度达 61.67 $\Omega/\ln(\text{Pa})$, 皮拉尼计电阻在 20~150 $^{\circ}\text{C}$ 的温度系数为 1.58 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。后续将进行谐振器的 Q 值测试, 并通过调整封装气压建立皮拉尼计输出与谐振器 Q 值间的关联, 验证集成皮拉尼计的测试有效性。

参考文献：

- [1] 刘川,汪学方,罗小兵. 基于热学理论的微型真空检测器件的研究[J]. 工程热物理学报, 2011,32(9):1553–1556. (LIU Chuan, WANG Xuefang, LUO Xiaobing. Research on micro vacuum measurement device based on heat transfer principle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011,32(9):1553–1556.) doi:CDSTIC.MJQK.2112382.
- [2] CHAE J, STARK H B, NAJAFI K, et al. A micromachined Pirani gauge with dual heat sinks[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2005,28(4):619–625. doi:10.1109/TADVP.2005.858316.
- [3] ZHANG Lemin, JIAO Binbin, YUN Shichang, et al. Investigation and optimization of Pirani vacuum gauges with monocrystal silicon heaters and heat sinks[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017,26(3):601–608. doi:10.1109/JMEMS.2017.2680738.
- [4] LEE Dongjin, NOH Y, PARK S, et al. Performance enhancement of Pirani gauge on silicon-on-insulator wafer with simple fabrication process[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2017(263):264–268. doi:10.1016/j.sna.2017.06.032.
- [5] XING Qian, LAI Junhua, YE Yuxin, et al. An improved physical model considering micro-nano scale effects for numerical simulation of Pirani vacuum gauges[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(11): 1985–1988. doi: 10.1109/LED. 2022. 3208840.
- [6] ZHANG Ming, LLASER N. Exploiting a micro Pirani gauge for beyond atmospheric pressure measurement[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II–Express Briefs, 2018,65(10):1450–1454. doi:10.1109/TCSII.2018.2859207.
- [7] GUO Song, FENG–LIU Haodong, CHEN Shuo, et al. Design of a high sensitivity Pirani gauge based on vanadium oxide film for high vacuum measurement[J]. Sensors, 2022,22(23):9275. doi:10.3390/s22239275.
- [8] MO Jiarui, MIDDELBURG L M, MORANA B, et al. Surface–micromachined silicon carbide Pirani gauges for harsh environments[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,21(2):1350–1358. doi:10.1109/JSEN.2020.3019711.
- [9] LAI Junhua, KONG Yanmei, JIAO Binbin, et al. Study on fusion mechanisms for sensitivity improvement and measurable pressure limit extension of Pirani vacuum gauges with multi heat sinks[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020,29(1):100–108. doi:10.1109/JMEMS.2019.2954155.
- [10] XU Wei, WANG Xiaoyi, PAN Xiaofang, et al. A wafer–level packaged CMOS MEMS Pirani vacuum gauge[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021,68(10):5155–5161. doi:10.1109/TED.2021.3103486.
- [11] MASTRANGELO C H, MULLER R S. Microfabricated thermal absolute–pressure sensor with on–chip digital front–end processor[J]. IEEE Journal of Solid–state Circuits, 1991,26(12):1998–2007. doi:10.1109/4.104194.
- [12] VIZVÁRY Z, FÜRJES P, BÁRSONY I. Thermomechanical analysis of hotplates by FEM[J]. Microelectronics Journal, 2001,32(10–11):833–837. doi:10.1016/S0026–2692(01)00070–2.
- [13] JIANG Wei, WANG Xin, ZHANG Jinwen. A single crystal silicon micro–Pirani vacuum gauge with high aspect ratio structure[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2010,163(1):159–163. doi:10.1016/j.sna.2010.08.015.

作者简介：

秦宜峰(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 圆片级真空封装 .email:879828652@qq.com.

刘振华(1983–), 男, 本科, 高级工, 主要研究方向为特种微电子器件制造.

施志贵(1972–), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为微电子器件工艺研究.

张青芝(1995–), 女, 学士, 工程师, 主要研究方向为特种微电子器件制造.

熊 壮(1984–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为惯性 MEMS 器件设计与工艺技术.