

《MEMS 硅谐振式压力敏感元件设计 要求》 标准编制说明

MEMS 硅谐振式压力敏感元件设计要求标准起草组

2024 年 07 月 09 日

1、 标准范围。

本标准适用于 MEMS 硅谐振式压力敏感元件结构设计

2、 工作简况。

本标准由西安交通大学提出，在整个工作过程中按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草，合乎规范。

西安交通大学于 2024 年 2 月份成立标准编制小组，拟定标准编制的大纲。三四月份完成初稿的编写，之后在组内和组外广泛征求修改意见。最终在 2024 年 7 月份完成对初稿的修正，形成最终稿。

标准起草单位：西安交通大学

标准主要起草人：方续东，赵永超，卓文强

3、 标准编制原则和确定标准主要内容的依据：

本标准遵循以下原则：

——制定本标准遵循国家有关法律的要求；

——在标准范围所规定的界限内按照需要，力求完整；

——上下文始终保持一致，清晰，准确；

——充分考虑技术先进性、可操作性和应用需求，为传感器设计提供了框架；

——便于参加制定的有关人员的理解。

本标准在结构上按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求编写。本标准适用于硅谐振式压力传感器的设计。

本标准所涉及的术语引用自 GB/T 26111 微机电系统 (MEMS) 技术 术语和 JB/T 13359-2018 硅谐振式压力传感器

本标准在设计依据的选择上参考国内外传感器普遍使用的设计依据，同时结合传感器设计所需要的基本软硬件配置提出软硬件要求。

本标准在设计方案的制定中参考国内外此类传感器的设计经验，包含了主要的结构形式、激励拾振形式、封装形式、材料选择。本标准根据传感器的设计依据提出结构参数的具体设计要求。

本标准在工艺设计部分参照目前已有的工艺水平，结合可操作性，可靠性原则，提出了相关要求。

4、主要试验（或验证）的分析、综述报告。

MEMS 谐振式压力传感器是利用内部谐振器结构在受待测压力改变时其谐振频率发生变化这一原理进行设计的器件，是目前精度最高的压力传感器。**MEMS** 谐振式压力传感器的精度可达到 **0.01%FS**，相较于压阻式和电容式压力传感器而言有着明显的优势，其高出压阻式和电容式压力传感器一个数量级，同时还具有体积小、长期稳定性好，分辨率高、工作温区大和功耗低等优点。此外，传感器的性能主要由设计的谐振器机械结构决定，因此受电噪声的影响较小，具有极高的稳定性和综合精度，同时该传感器抗干扰能力强，输出信号为频率信号，与后续电路的连接不需要进行 **A/D** 转换，较为便捷。在缺点方面则存在着设计和加工较为困难等问题。在长期的实验验证和商

业使用中，谐振压力传感器成为世界范围内综合性能最好的压力传感器。

根据谐振式压力传感器谐振器结构不同，大致可以划分为以下两类传感器：第一类传感器是一种基于梁-膜复合的二次敏感结构，包含敏感膜、硅岛和谐振梁三部分。其工作原理为：当待测压力作用于敏感膜时，敏感膜发生一次敏感形变，并将形变通过两个硅岛传递给谐振梁，使得谐振梁发生二次敏感形变，此时谐振梁的轴向应力发生变化，进一步使得该谐振梁的固有频率发生改变，在一定压力范围内，外界待测压力与谐振梁的固有谐振频率之间呈良好的线性关系，因此通过检测谐振梁的固有频率从而间接实现对待测压力的测量。第二类是振动膜结构，其工作原理为：待测压力作用于振动膜，使得振动膜发生形变，通过检测振动膜的谐振频率从而间接实现对待测压力的测量。基于振动膜结构的谐振式压力传感器原理、结构更为简单，但由于振动膜两侧压力不对称，谐振时消耗能量较大，使得传感器的品质因子 Q 值较小，此外环境的诸多因素也容易对振动膜的工作产生消极作用，增大传感器的非线性。对于梁-膜复合结构的压力传感器而言，虽然其工艺结构较为复杂，但其可以通过二次敏感结构将待测压力转换、放大并作用于谐振梁，从而提高传感器的测量精度、品质因数 Q ，针对于该传感器存在的易受外界环境影响的问题，可以通过将传感器的谐振器层密封于真空环境之下加以解决，同时也提高了传感器的稳定性。随着反应离子刻蚀（Reactive Ion Etching, RIE）、深反应离子刻蚀（Deep Reactive Ion Etching, DRIE）、常/低压化学气相沉积（Atmospheric/Low Pressure Chemical Vapor Deposition, A/LPCVD）、光刻电铸法（Lithografie Galvanoformung Abformung, LIGA）、表面硅加工工艺、体硅加工工艺、表面牺牲层工艺、硅-硅键合工艺以及 SOI（Silicon on Insulator）微加工技术等 MEMS 工艺的发展以及一些性能较好的腐蚀剂的出现，为梁-膜复合结构谐振式压力传感器的设计制造提供了极大的便利，使得基于梁-膜复合结构的硅微谐振式压力传感器成为当今社会各科研机构 and 团体研究的主流。

二次敏感结构的硅谐振压力传感器经过多年发展形成了多种类

型，按照激励和检测方式区分，较为常用的有：静电激励/电容检测、静电激励/压阻检测、电磁激励/电磁检测、电磁激励/压阻检测、电热激励/压阻检测，此外还有逆压电激励/压电检测和光激励/光检测等，各激励和检测方式对应的传感器内部结构会有所不同。

静电激励/电容检测是在传感器内部两电容极板间施加交变电压，电容极板产生交变静电力并使得谐振器发生往复振动，通过调整电压频率从而使谐振器发生谐振，此时谐振器具有最大位移且检测电容极板间会产生周期性电容变化，通过后续电路完成频率信号提取。根据内部电容变化原理可分为平板电容变间距型和梳齿电容变面积型两种，其中平板电容变间距型加工较为简单，但存在较大的非线性输出，而梳齿电容变面积型则与之相反，因为具有较好的线性特性，所以成为研究主流。由于静电激励/电容检测为非接触式激励检测，因此使用寿命较长，此外，还具有体积小和响应快的优点。但也存在工艺复杂，加工较为困难和寄生电容引起的检测困难等问题。

电磁激励/电磁检测是指传感器在外部施加有恒定磁场（通过布置永磁铁实现），传感器内部谐振器通有交变电压，谐振器在受到电流和磁场产生交变安培力综合作用下发生往复振动，通过调整电压频率从而使谐振器发生谐振，此时有谐振器通过绝缘体和谐振器固连并发生同频振动，谐振器在切割磁感线时，内部会有交变电流产生，通过后续电路可以完成频率信号提取。电磁激励/电磁检测也为非接触式检测，存在寿命长，结构简单，和响应快等优点，但因为需要在传感器工装部分内置永磁铁，因此会对传感器的微型化构成阻碍，同时对于传感器的工作环境有所要求，在强磁环境下无法工作或信号较为微弱。

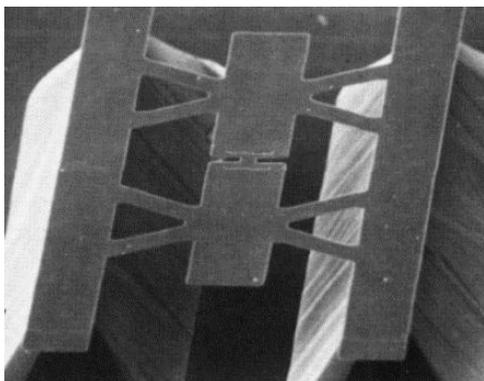
电热激励/压阻检测是在传感器内部的谐振器上布置有激励电阻，通过对激励电阻施加交变电压使得谐振器因热胀冷缩效应的热应力发生往复振动，通过调整电压频率从而使谐振器发生谐振，谐振器的往复振动转化为谐振器上压阻条的阻值变化，通过后续惠斯通电桥电路完成对阻值上电压频率信号的提取。电热激励/压阻检测为接触式激励检测，因为电阻的蠕变或对传感器的长期稳定性造成影响，因此

寿命较短，由于为电热激励，也存在功耗大，抗外界干扰能力弱，容易受到温度干扰等情况。但该类型传感器的结构简单，体积小，检测较为便捷。

本标准将结合硅谐振压力传感器的发展史，从 kPa 级和 MPa 级两个不同量程入手，对硅谐振压力传感器的研究现状进行总结。

1) kPa 级硅谐振压力传感器

1984 年，DRUCK 公司的 Greenwood 提出一种基于静电激励/电容检测的硅谐振压力传感器，如图 1 (a)。该传感器利用环氧树脂粘接在有固定电极的玻璃基板上，其中谐振器由 2 个相互连接的矩形板组成，通过 4 个“V”型梁支撑悬浮并与玻璃基板上的固定电极相距 $10\sim 20\mu\text{m}$ 并对正，分别构成激励电极和检测电极。该传感器的压力测量范围小于 100kPa ，在低于 0.133Pa 的真空中时其品质因子 Q 约为 10000，当高于 0.133kPa 时没有观察到共振，表明传感器在较高的压力下 Q 值很低。由于该传感器还存在一些缺陷，主要表现在两个矩形板在振动过程中存在比较大的压膜阻尼，此外该传感器没有进行真空封装。因此在 1955 年，将谐振器结构重新优化，如图 1 (b) 所示。通过在谐振器上开孔的方式降低了压膜阻尼对传感器的影响，还增加了玻璃管用于真空封装，此时传感器的最大量程 130kPa ，最高精度 $0.01\%\text{FS}$ ，温度范围 $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 。改进后的传感器在性能上有了很大提升，但是从结构而言，谐振器的振动方向与压力的施加方向平行，因此会造成垂直于敏感膜方向上的能量耦合，对传感器的检测精度造成影响。



(a) 矩形谐振结构

(b) 蝶形谐振结构

图 1 DRUCK 研发的两款谐振压力传感器

1995 年，THALES 公司的 Mandle 等人提出一种基于静电激励/电容检测的谐振压力传感器，其结构和实物如图 2 所示。从图可以看出，该传感器的下硅片为含压力敏感膜片的压力传递结构，中间硅片为核心敏感谐振结构，上硅片则用于真空封装并集成有温度传感器提供温度补偿。传感器最大压力量程 110 kPa，精度 0.01%FS，温度范围 -40~85 °C，可用于机载空气数据监测和航空发动机控制应用。但该传感器谐振梁的振动方向与施加待测压力方向平行，精度会因能量耦合而受到影响。

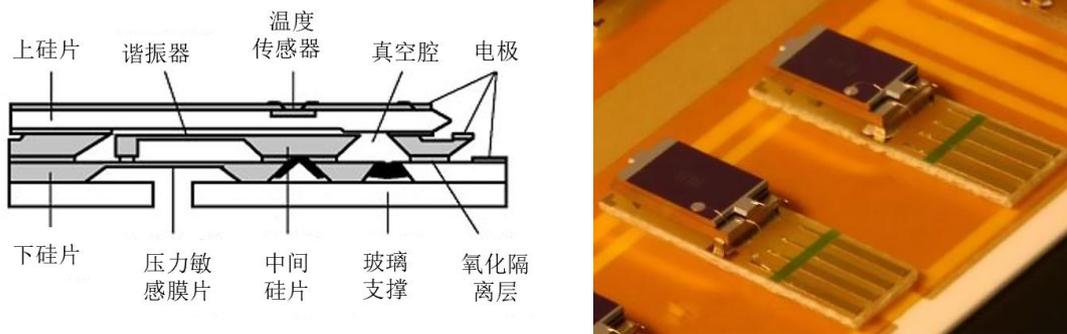


图 2 THALES 的传感器结构示意图和实物图

1999 年，TOKOGAWA 公司的 Harada 等人提出一种基于电磁激励/电磁检测的硅谐振压力传感器，其结构示意图如图 3 所示。该传感器内部有两个分别包裹在真空室的“H”型谐振器（振荡器），由于在压力敏感膜上布置的位置不同分别受到拉应力和压应力，使得两谐振器频率间产生差值。通过双谐振器差分的方法不仅可以增大传感器的灵敏度，还可以降低温漂。传感器最大压力量程 100 kPa，品质因子 Q 为 50000，精度 0.01%FS，温度系数 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

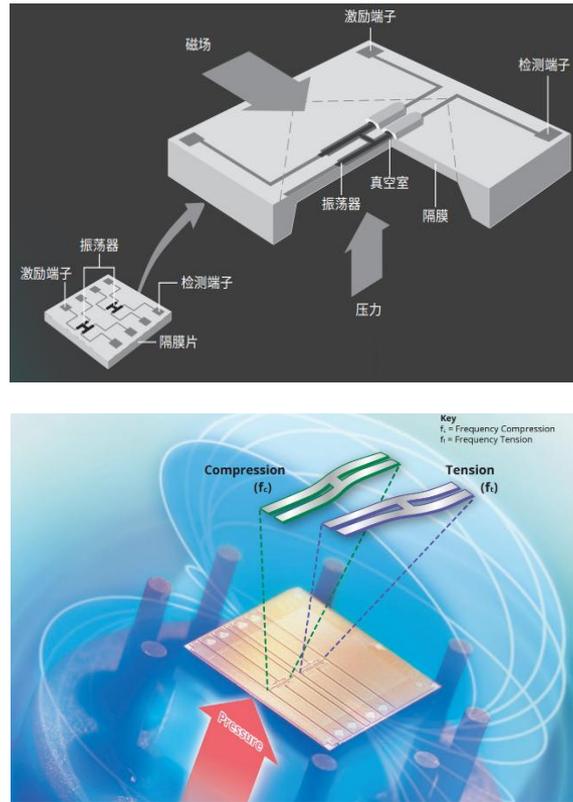


图3 差分传感器结构示意图

2000年，中科院电子研究所的陈德勇等人提出一种基于电热激励/压阻检测的硅谐振压力传感器，其结构如图4所示。传感器芯片包含两层硅片，上硅片制作有SiN谐振梁，梁的中间位置和端点分别布置有激励电阻和检测电阻，下硅片制作有敏感膜，芯片总体通过管帽进行真空封装。传感器最大压力量程400kPa，真空中品质因子Q大于17000，精度0.06%FS。该传感器的主要缺点是一方面能耗大且容易受到外界快速温变影响，另一方面则是谐振梁的振动方向与待测压力方向平行，精度受到能量耦合影响。

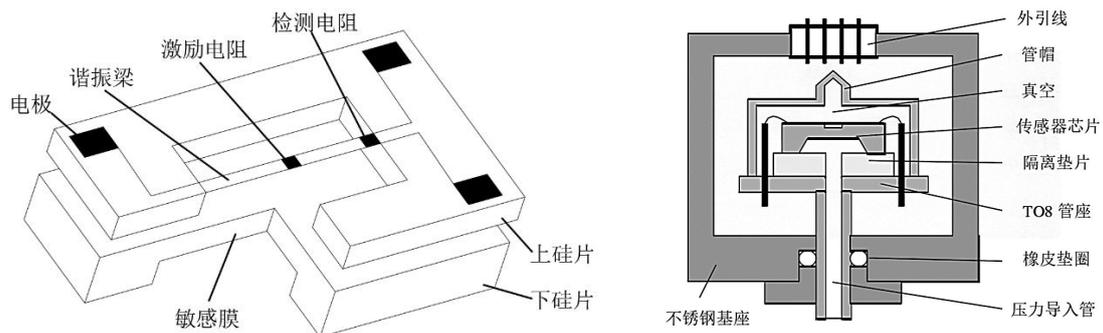


图4 中科院电子所研发的谐振压力传感器

2015年，西北工业大学的任森研发了一款基于静电激励/电容检测的硅谐振压力传感器，其结构如图5所示。该传感器采用SOI工艺制作，内部谐振器的振动方向与待测压力方向垂直，大幅度减小谐振器与外界环境压力之间的能量耦合。传感器采用桁架结构有效的降低了谐振器的面外位移，降低了传感器的激励和检测非线性。此外，相较于平板激励电容结构，该传感器的电容极板采用梳齿结构，并通过差分的方法提高了输出电压，有利于后期信号检测。传感器量程达到280 kPa，精度0.02%FS，灵敏度10.86 Hz/kPa，温度范围-20~60 °C。但该传感器采用常压封装，品质因子Q仅为999~1697。

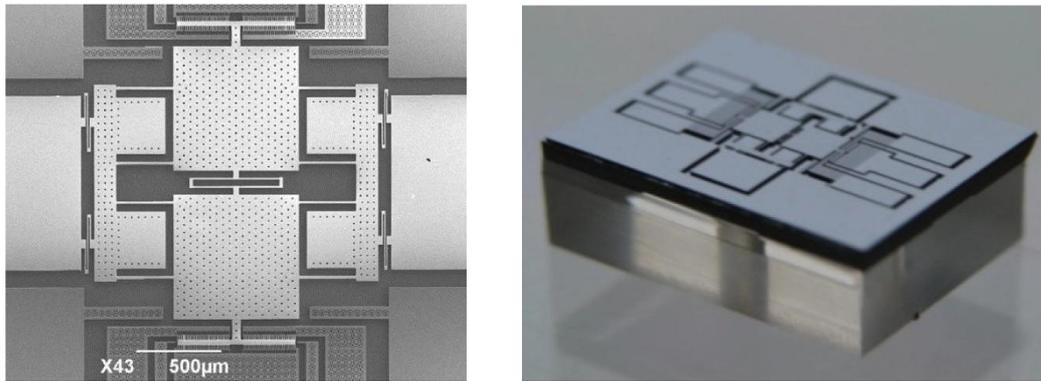


图5 西北工业大学研发的谐振压力传感器

2020年，西安交通大学的韩香广等人提出一种基于静电激励/电容检测的硅谐振压力传感器，其结构如图6所示。该压力传感器芯片采用干/湿法刻蚀、高温硅键合、离子注入、阳极键合等工艺制作。在两侧激励电极的作用下，中间谐振器发生平行反向振动，使得布置于耦合梁上的压阻条阻值发生变化。传感器最大量程200kPa，综合精度0.02%FS，品质因子Q大于25000，灵敏度19Hz/kPa，温度范围-40~80°C。但因该传感器的电阻需要掺杂，所以加工工艺较为复杂，此外没有闭环温度补偿电路。

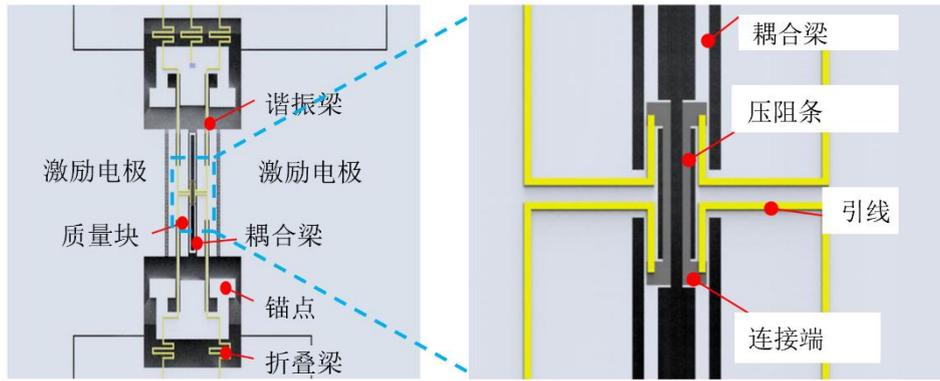


图 6 西安交通大学研发的谐振压力传感器

2) MPa 级硅谐振压力传感器

2009 年，DRUCK 公司的 Kinnell 等人提出一种基于静电激励/压阻检测的硅谐振压力传感器，如图 7 所示。该传感器有两种类型，虽然内部谐振器件相同，但存在有两种不同封装结构。A 为普通封装结构，外界待测压力可与敏感膜直接接触，压力介质通常为空气或者惰性气体；B 为充油封装结构，外界待测压力作用于波纹敏感膜片，波纹敏感膜片与芯片之间充有硅油，通过硅油将压力传递给谐振芯片，该封装结构可以有效避免敏感膜片与外界待测压力直接接触时发生腐蚀等因素引起的损坏。谐振器有两根谐振梁，谐振梁分别通过“H”型杆件与梳齿梁连接，梳齿梁两端与固定端上的压敏电阻相连，这有利于降低传感器在受压时梳齿梁的面外位移，减小非线性。该传感器已经开始量产，在文献中介绍的传感器最大压力量程达到 70MPa，但在 DRUCK 官网产品宣传页面中，RPS8000 系列传感器的最大量程为 20MPa，精度 0.01%FS，温度范围 -40~125 °C，年稳定性 100 ppm FS/年。

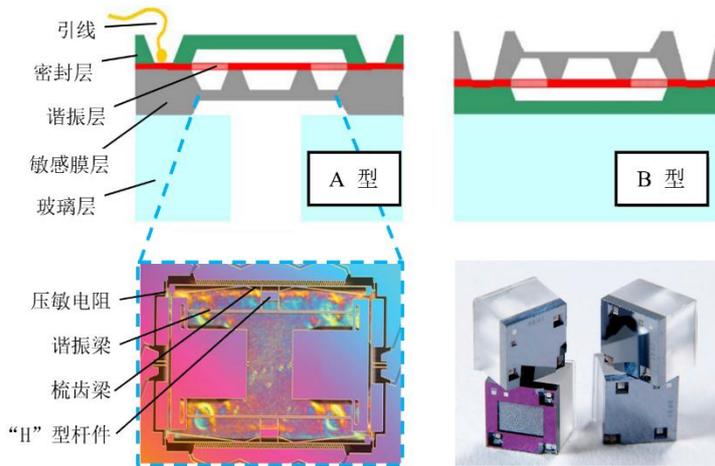
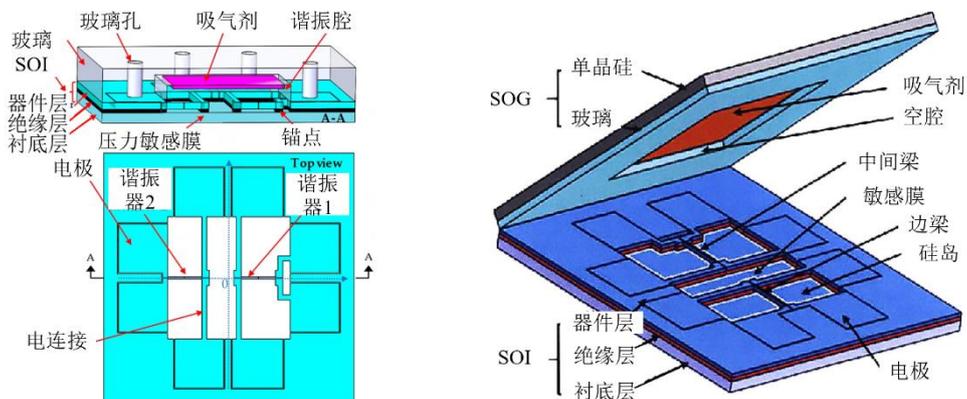


图 7 DRUCK 公司 Kinnell 等人研发的谐振压力传感器

2019 年，中国科学院空天信息创新研究院的鲁毓岚和严鹏程均对基于电磁激励/电磁检测的 MPa 级谐振压力传感器展开研究设计，分别如图 8 的 (a) 和 (b) 所示。这两款传感器均采用双谐振器差分方法进行检测，其中鲁毓岚采用 SOI 和玻璃盖板键合的方式完成传感器的制作，传感器最大压力量程 1MPa，拟合精度 0.01%FS，温度范围 -55~85℃，品质因子 Q 大于 25000。严鹏程研制的传感器通过 SOI 盖板和 SOG(Silicon—On—Glass)盖板的使用，减小了传感器的温度特性。该传感器最大压力量程 1MPa，温度范围 -40~80℃，温度灵敏度小于 1Hz/℃，压力灵敏度约 12Hz/kPa，综合精度优于 0.01%FS，品质因子 Q 大于 30000；这两款传感器在结构上区别不大，但封装时都需要永磁铁且裸芯尺寸均约为 1cm×1cm，不利于传感器的微型化，此外，双谐振器结构较为复杂，对传感器的加工制造和双谐振器灵敏度的一致性匹配造成不利影响。



(a) 鲁毓岚设计的传感器

(b) 严鹏程设计的传感器

设计的传感器

图 8 中科院研发的两款谐振压力传感器

2021 年，中国科学院空天信息创新研究院的尉洁等人研发了一款基于电磁激励/电磁检测的硅谐振压力传感器，其结构如图 9 所示。从图中可以看出，该传感器也采用双谐振器差分检测，但两个谐振器分别布置在两个谐振腔内，相较于鲁毓岚和严鹏程的双谐振器结构，大大减小了敏感膜的尺寸，从而提高了在线性范围内传感器的压力量程。四个圆形真空腔的采用有利于保持谐振器较高的真空度以提高品质因子 Q ，传感器仿真量程 70MPa，压力灵敏度为 0.243Hz/kPa，实物测试最大压力量程 6.5MPa，压力灵敏度为 0.268Hz/kPa，综合精度优于 0.02%FS，品质因子 Q 大于 32000。该传感器的实际测试过程中选用的量程仅为仿真量程的 9.28%，同时也存在诸如芯体尺寸大、结构复杂、加工困难等问题。

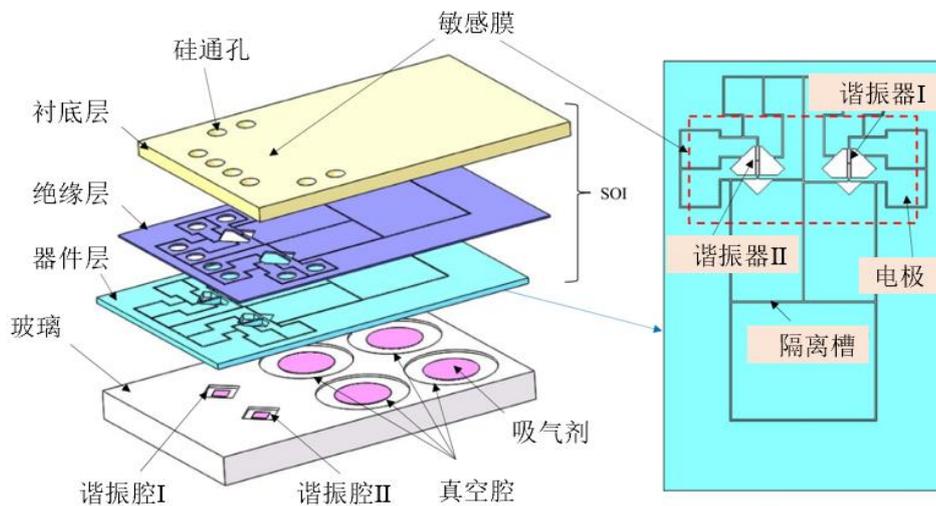


图 9 中科院研发的两款谐振压力传感器

综上所述，国内外都有大量学者对其 MEMS 谐振式压力传感器的谐振结构、激励检测方式等进行了大量的研究，并且国外有较为成熟的谐振压力传感器产品，而国内大多都处于样机阶段。一些公司生

产并制造了可应用于实际场景的硅谐振压力传感器，但相较于国外成熟产品而言，在综合精度和长期稳定性方面还存在较大差距。

硅谐振压力传感器是一类利用被测物理量改变谐振敏感结构谐振特性并直接输出频率信号的准数字式传感器。这类传感器工作于谐振敏感结构（也称为谐振子或谐振器）的机械谐振状态，其性能主要取决于传感器的结构，因此受外部电路参数变化影响较小。因此，设计出高性能的 MEMS 硅谐振式压力敏感元件应该从传感器结构、结构参数优化和等多方面着手。该标准从上述角度考虑，制定了 MEMS 硅谐振式压力敏感元件的设计要求。具体内容包括规定了一些术语以及定义；提出设计 MEMS 硅谐振式压力敏感元件的软硬件要求以及设计依据；提出设计 MEMS 硅谐振式压力敏感元件的步骤，具体包括敏感元件方案设计、敏感元件结构参数详细设计和工艺可行性设计。敏感元件方案设计又包括敏感结构形式的选择、激励检测方式的选择、封装的设计和材料的选用。敏感元件结构参数的设计主要是谐振梁的设计、谐振器的设计、压力敏感膜的设计、模态的设计、品质因数的设计以及环境适应性的设计。

5、标准在起草过程中遇到的问题及解决办法：重大分歧意见的处理经过和依据：有无重要技术问题需要说明。

标准在制定过程中皆按照预期目标完成，未遇到重大分歧，没有重要技术问题需要说明。

6、与国外标准的关系：包括：采用国际标准和国外先进标准的程度，与国外标准主要技术内容的差异（可引用标准前言的内容）：

本标准主要依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

内容部分主要引用：

GB/T 26111 微机电系统（MEMS）技术 术语

JB/T 13359-2018 硅谐振式压力传感器

未采用国外标准，且国外标准较少涉及此方面的内容。

- 7、修订标准时，说明与标准前一版本的重大技术变化，并列岀所涉及的新、旧版本的有关章条（可引用标准前言的内容）：废止/代替现行有关标准的建议：

此标准为制定标准，不属于修订标准，没有废止/代替现行有关标准的建议。

- 8、说明标准与其他标准或文件的关系（可引用标准前言的内容），特别是与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系：

本标准按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

标准中的内容和术语参照了以下标准所涉及的内容：

GB/T 26111 微机电系统（MEMS）技术 术语

JB/T 13359-2018 硅谐振式压力传感器

本标准与有关的现行法律、法规和强制性国家标准不冲突。

- 9、标准作为强制性标准或推荐性标准的建议：

建议作为推荐性标准

- 10、贯彻国家标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等内容）：标准发布后，对国内外业界可能产生的影响。

MEMS 硅谐振压力传感器在航空大气数据系统、航空发动机和舰船等关键装备上的压力测量以及气象监测系统中具有重要应用，可用于捕获飞机的高度及空速等信息，获得导弹的高度、攻击角

度及空速信息，以及采集高度等与气象有关的信息。在民用领域，MEMS 硅谐振压力传感器同样可以应用在民机大气数据系统中，另外，该传感器还能替代传统的硅压阻及电容式压力传感器，应用于气象监测、石油勘探、工业控制和汽车电子等领域。目前该传感器的采购主要依赖进口，国内尚无可替代的产品，且购买渠道日益受到限制。通过该标准的发布，为 MEMS 硅谐振压力传感器的设计提供了基本框架，有利于从业人员设计出更高性能的硅谐振压力传感器，推动高端谐振压力传感器的国产化替代，实现“卡脖子”技术的突破。

11、标准是否涉及知识产权的情况说明；如标准中含有自主知识产权，说明产品研发程度、产业化基础及进程。

不涉及知识产权

12、其他应予说明的事项。

无