

低温度敏感度谐振式压力传感器设计与仿真

李光贤^{1,2}, 黄晶^{1,2,3}, 袁宇鹏^{1,2,3}, 杨靖^{1,2,3},

李春洋^{1,2}, 张祖伟^{1,2,3}, 龙帅^{1,2}

(1. 中电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆 401332; 2. 国知创芯(重庆)科技有限公司, 重庆 401332;
3. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:为降低材料杨氏模量温度漂移和热应力对谐振式压力传感器温度漂移的影响, 该文设计了一种基于 Si-SiO₂ 复合 H 形谐振梁和双谐振器结构的低温度敏感度谐振压力传感器。通过有限元仿真软件 COMSOL 对传感器进行仿真验证。结果表明, 在 0~350 kPa 内传感器灵敏度可达 21.146 Hz/kPa, -50~125 °C 内零点温度漂移低至 0.2 Hz/°C。与全硅结构相比, 灵敏度温度漂移由 $339 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 降低至 $14.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 可适应工作温度范围较高的环境。

关键词:谐振式压力传感器; 温度漂移; 温度灵敏度漂移; 温度补偿

中图分类号: TN389; TP212 **文献标识码:** A

Design and Simulation of a Low-Temperature Sensitive Resonant Pressure Sensor

LI Guangxian^{1,2}, HUANG Jing^{1,2,3}, YUAN Yupeng^{1,2,3}, YANG Jing^{1,2,3},

LI Chunyang^{1,2}, ZHANG Zuwei^{1,2,3}, LONG Shuai^{1,2}

(1. CETC Academy of Chips Technology, Chongqing 401332, China;

2. NIICAS (Chongqing) Technology Co., Ltd, Chongqing 401332, China;

3. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: To reduce the influence of the change in Young's modulus with changes in temperature and thermal stress on the temperature drift of a resonant pressure sensor, a low-temperature-sensitivity resonant pressure sensor based on a Si-SiO₂ composite H-shaped resonant beam and double resonator structure was designed. The finite element simulation software COMSOL was used to simulate the sensor, and the results showed that the sensitivity of the sensor could reach 21.146 Hz/kPa in the range of 0–350 kPa, and the zero temperature drift in the range of -50 °C to +125 °C was as low as 0.2 Hz/°C. Compared with an all-silicon structure, the sensitivity temperature drift was reduced from $339 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ to $14.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, which could be adapted to an environment with a high operating temperature range.

Key words: resonant pressure sensor; temperature drift; sensitivity temperature drift; temperature compensation

0 引言

微机电系统(MEMS)压力传感器具有体积小, 分辨率高及成本低等优点, 被广泛应用于航空航天、生物医学、工业控制及能源化工等领域^[1]。根据检测机制, MEMS 压力传感器可分为电容式、压阻式、压电式和谐振式压力传感器。其中, 谐振式压力传感器采

用机械振动的工作原理, 精度通常比压阻式和电容式压力传感器高 1 个数量级, 同时输出信号易被数字化和远程传输, 其信噪比高, 抗干扰能力强^[2]。

MEMS 传感器易受环境温度影响。当环境温度改变时, 不仅材料的物理参数发生变化^[3], 不同材料间热膨胀系数不匹配将产生热应力, 造成传感器

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目“飞机 PHM 系统用传感器生产及批量测试平台”(2022YFB3206504)

作者简介: 李光贤(1998-), 男, 云南省曲靖市人, 硕士生。通信作者: 袁宇鹏(1989-), 男, 湖南省新化县人, 高级工程师, 硕士生导师, 博士。

温度漂移,影响测量的精度与灵敏度。因此,在精密测量场合使用时必须进行温度补偿^[4-6]。

国内外针对谐振式传感器的温度补偿结构研究较多^[7-13]。Renata等^[7-8]通过在Si谐振器表面制作SiO₂薄层,平衡抵消硅材料杨氏模量温度系数,改善谐振器的温度特性,使谐振器频率变化小于 $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。文献^[11-12]采用双谐振器结构协同敏感压力和温度,有效地降低了热应力造成的零点频率漂移。赵立波等^[13]通过引入热应力抵消杨氏模量温度漂移的方式,将传感器温漂降至 $0.46 \text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$ 。

为减小杨氏模量和热应力对谐振式压力传感器性能的影响,基于Renata等对硅谐振器频率温度漂移的研究,设计了Si-SiO₂复合谐振梁,降低传感器灵敏度温度漂移。同时,应用双谐振器抵消热应力的思想,设计了三膜-双谐振器结构,降低热应力引起的频率温度漂移。

1 工作原理与基本理论

1.1 工作原理

传感器芯片总体结构如图1所示。盖帽层、谐振层、感压层的材料都为硅,隔离基座为硼硅玻璃。

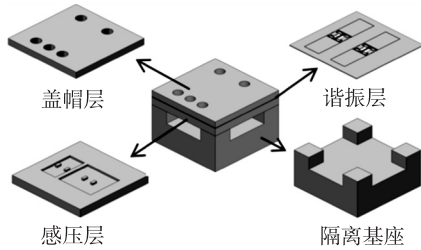


图1 传感器结构示意图

谐振层和感压层包含了H形谐振梁、硅岛和压力敏感膜3部分。H形谐振梁表面生长SiO₂薄层,以降低灵敏度漂移。同时,采用双谐振器结构,传感器工作时,压力作用在敏感膜上,通过硅岛分别转化为两个谐振梁上的轴向拉应力和压应力,使谐振梁频率发生变化,两者的差频输出可减小热应力的影响。

盖帽层与谐振层键合形成真空腔,为谐振器提供真空环境。隔离基座的设计参考了各类应力隔离结构研究^[14-15],采用热膨胀系数与单晶硅接近的硼硅玻璃,其上表面四周各凸起一个立方体,与感压层连接减小封装、组装的热应力,同时将敏感膜暴露在待测环境中。

1.2 H形谐振梁振动理论

硅谐振式压力传感器通常是基于谐振梁的弯

曲振动模态工作的,根据弹性力学理论^[16],H形双端固支梁固有谐振频率为

$$f_0 = \frac{\beta^2}{2\pi\sqrt{m}} \sqrt{\frac{B}{L^3}} \quad (1)$$

$$B = EI = E \frac{W^3 H}{12} \quad (2)$$

式中: β 为模态常数; m 为谐振梁质量; B 为谐振梁弯曲刚度; L 为谐振梁长度; E 为材料杨氏模量; I 为惯性矩; W 为谐振梁宽度; H 为谐振梁厚度。

谐振梁受轴向应力时,其固有频率为

$$f = f_0 \sqrt{1 + \frac{\sigma}{\sigma_c}} \quad (3)$$

式中: σ 为谐振器谐振梁上的轴向应力; σ_c 为临界欧拉应力。

当谐振梁轴向应力为小应力时,式(3)可近似为

$$f = f_0 \left(1 + \frac{\sigma}{2\sigma_c}\right) \quad (4)$$

此时,谐振梁灵敏度为

$$S = \frac{f_0}{2\sigma_c} \quad (5)$$

1.3 传感器温度补偿理论

硅谐振式压力传感器的温度漂移主要受材料杨氏模量温度漂移和热应力两方面影响。

在(100)晶圆的 $\langle 110 \rangle$ 晶向上,单晶硅的杨氏模量与温度的关系^[6,8]为:

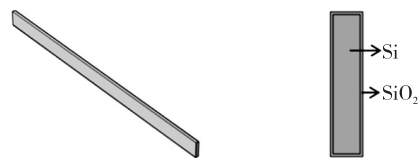
$$E = 169 - 64 \times 10^{-6} (T - T_0) - 52 \times 10^{-9} (T - T_0)^2 \quad (6)$$

式中 $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$ 。

根据式(1)、(5)、(6)可以发现,硅的杨氏模量随温度变化的特性会使谐振式压力传感器产生灵敏度漂移。基于Renata等^[7]提出的谐振器频率漂移补偿理论可对此进行补偿,如图2所示,Si-SiO₂复合谐振梁弯曲刚度为

$$B = B_{\text{Si}} + B_{\text{SiO}_2} \quad (7)$$

式中: B_{Si} 、 B_{SiO_2} 分别为Si、SiO₂的弯曲刚度。



(a) 谐振梁三维模型 (b) Si-SiO₂复合谐振梁横截面
图2 Si-SiO₂复合谐振梁示意图

将式(7)代入式(1)可得其固有谐振频率为

$$f_0 = \frac{\beta^2}{2\pi\sqrt{m}} \sqrt{\frac{B_{\text{Si}} + B_{\text{SiO}_2}}{L^3}} \quad (8)$$

式(8)对温度求导得到谐振梁的固有频率温度系数为

$$TCF \approx \frac{1}{2} \times \frac{rTCE_{\text{Si}} + TCE_{\text{SiO}_2}}{r+1} \quad (9)$$

由于硅的杨氏模量温度系数 TCE_{Si} 为负数,而氧化硅的杨氏模量温度系数为正数 ($TCE_{\text{SiO}_2} = 183 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$),当弯曲刚度比 $r = B_{\text{Si}}/B_{\text{SiO}_2} \approx 3$ 时, TCF 趋近于 0。通过在硅谐振梁表面生长厚度合适的氧化层,可调整谐振梁的弯曲刚度比,改善谐振梁的温度性能,降低其固有频率温度漂移。

在 MEMS 传感器的电极制备、真空封装、器件装配等过程中采用不同的材料,这些材料的热膨胀系数与硅存在差异,在谐振器谐振梁上将产生热应力 σ_T ,谐振梁所受的总应力变为

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_T \quad (10)$$

式中 σ_p 为压力作用下谐振梁上产生的轴向应力。

将式(10)代入式(4)可得:

$$f = f_0 \left(1 + \frac{\sigma_p + \sigma_T}{2\sigma_c} \right) \quad (11)$$

为降低热应力造成的频率漂移,本文采用双谐振器差分输出^[10],设计的三膜-双谐振器结构如图 3 所示。两个完全相同的谐振梁分别布置于敏感膜中央和两个敏感膜之间,当压力作用在敏感膜上时,敏感膜中央的谐振梁受到拉应力,频率增大,两个敏感膜之间的谐振梁受压应力,频率减小。

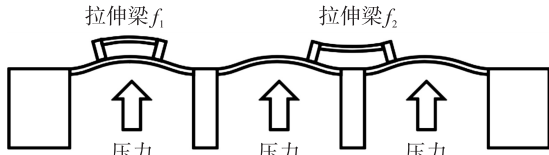


图3 三膜-双谐振器结构示意图

由于谐振器结构、尺寸完全相同,温度所致的轴向应力也相同,根据式(11),两者输出频率可表示为

$$f_1 = f_0 \left(1 + \frac{\sigma_{p1} + \sigma_T}{2\sigma_c} \right) \quad (12)$$

$$f_2 = f_0 \left(1 + \frac{\sigma_{p2} + \sigma_T}{2\sigma_c} \right) \quad (13)$$

两者之差为

$$f_1 - f_2 = f_0 \times \frac{\sigma_{p1} - \sigma_{p2}}{2\sigma_c} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,双谐振器差分输出可降低

热应力对传感器的影响。

2 器件设计

2.1 Si-SiO₂ 复合 H 形谐振梁设计

本文基于静电激励/电容检测原理^[14]设计了 H 形双端固定支谐振梁,参数如表 1 所示。谐振梁结构如图 4 所示,谐振梁由两根梁连接组成,梁外侧连接有梳齿,与芯片上的固定梳齿组合形成驱动和检测电容。工作时谐振梁在静电力作用振动,检测电容产生与之相同频率的输出信号。

表 1 H 形谐振梁尺寸参数

参数	(长×宽×厚)/mm
谐振梁	1 040×15×60
连接梁	600×20×60

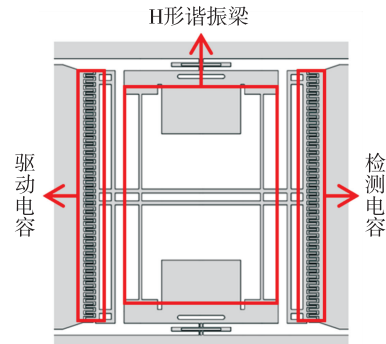


图4 H形双端固定支谐振梁结构示意图

根据第 2.2 节的 Si-SiO₂ 复合谐振梁温度补偿理论,通过 Matlab 软件计算得到当氧化层厚度约为硅谐振梁宽度的 0.1 倍时,弯曲刚度比 $r \approx 3$,此时谐振梁的频率温度系数 TCF 趋近于 0。

使用有限元仿真软件 COMSOL 对不同厚度氧化层的 Si-SiO₂ 复合谐振梁进行频率温度漂移仿真。如图 5 所示,在 $-50 \sim 125$ °C 区间内,随着氧化层厚度从 0.05W 增加到 0.2W,谐振梁频率变化率温度曲线的斜率从负数逐步增长为正数,与式(9)吻

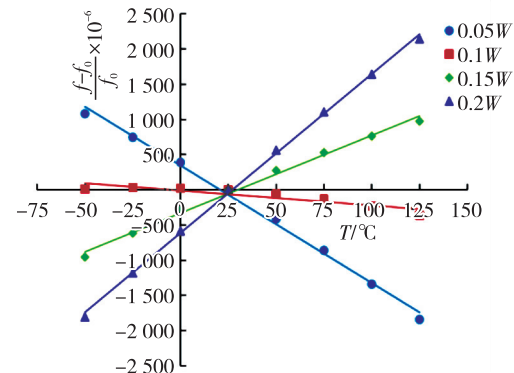


图5 谐振梁频率变化率温度曲线

合,当氧化层厚度为 0.1W 时,频率温度系数接近于 0,与 Matlab 计算结果接近。

根据式(2)、(8)可计算谐振梁一阶固有谐振频率约 35 kHz。进行特征频率仿真得到如图 6 所示的谐振器前 6 阶振动模式,一阶模式谐振频率为 34 830 Hz,由于理论计算中将谐振梁视为各项同性材料,因此与仿真值存在一定的偏差。此外,一阶工作模式与二阶模式频率(42 843 Hz)频率相差约 8 kHz,足以保证传感器工作时不受临近模式影响。

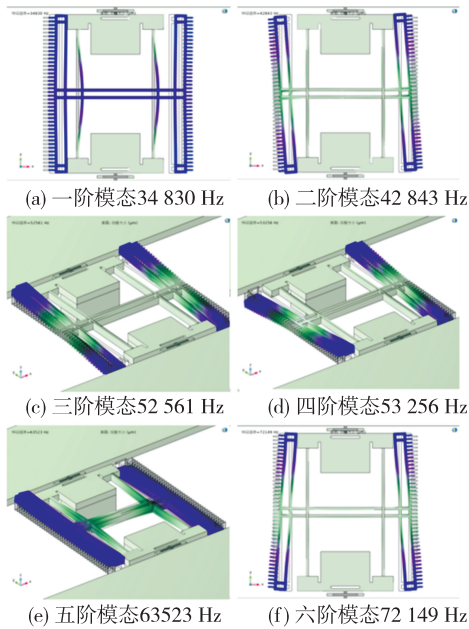


图 6 H 形谐振梁前 6 阶振动模式

2.2 压力敏感薄膜与硅岛设计

敏感膜采用尺寸为 $a \times 2a$ 的矩形压力敏感膜片^[17],提高传感器灵敏度。并将硅岛布置在 Y 方向相对位置 $\pm 0.6a$ 处,以获得最大的水平位移。根据谐振梁尺寸设计敏感膜和硅岛尺寸参数,如表 2 所示。

表 2 敏感膜与硅岛尺寸参数

(长×宽×厚)/ μm		硅岛位置(相对薄膜中心距离)/ μm	
敏感膜	硅岛		
2 800×1 400×65	400×200×165	±420	

3 传感器性能仿真分析

为验证所设计传感器芯片的综合性能和温度补偿效果,通过 COMSOL 对传感器的压力灵敏度、零点温度漂移和灵敏度温度漂移进行仿真。

在 25 °C、0~350 kPa 压力载荷下对传感器输出频率进行仿真,图 7 为输出特性曲线。由图可看出,

受拉应力的谐振梁输出灵敏度为 10.178 Hz/kPa,受压应力的谐振梁输出灵敏度为 -10.968 Hz/kPa,两者灵敏度匹配较好,差分输出灵敏度可以达到 21.146 Hz/kPa,且差分输出线性度较单个谐振器有一定提升。

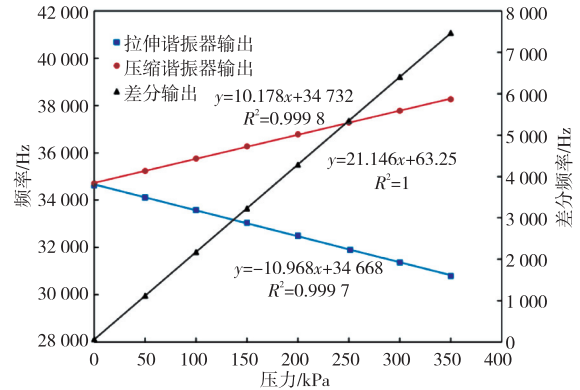


图 7 0~350 kPa 传感器输出频率特性

在压力载荷为 0 时,对 -50~125 °C 内进行零点温度输出特性进行仿真,结果如图 8 所示。受拉应力的谐振器温度灵敏度约为 0.83 Hz/°C,受压应力的谐振器温度灵敏度约为 0.63 Hz/°C,两者差分输出的温度灵敏度为 0.2 Hz/°C,以 25 °C 为基准计算得零点温度漂移约 $5.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

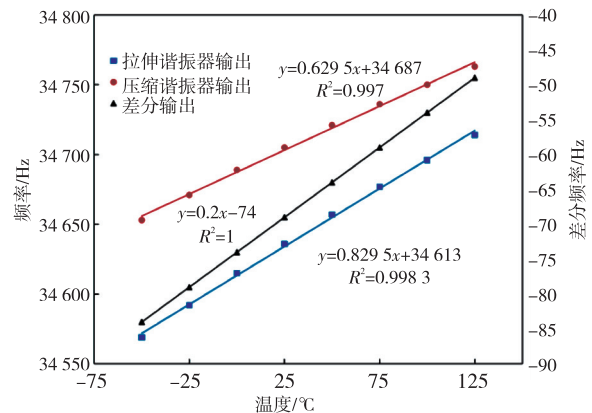


图 8 -50~125 °C 芯片零点温度输出特性

为验证 Si-SiO₂ 复合结构对传感器灵敏度温度漂移的补偿效果,分别建立 Si 和 Si-SiO₂ 复合谐振器模型。在 -50~125 °C 内进行灵敏度仿真计算,灵敏度随温度变化曲线如图 9 所示。Si 结构曲线斜率为 0.009 4,灵敏度温度系数约 $339 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$; Si-SiO₂ 复合结构曲线斜率为 0.000 3,灵敏度温度系数约 $14.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,较 Si 结构大幅降低。证明 Si-SiO₂ 复合谐振梁结构能有效降低传感器的灵敏度温度漂移,减小传感器输出误差。

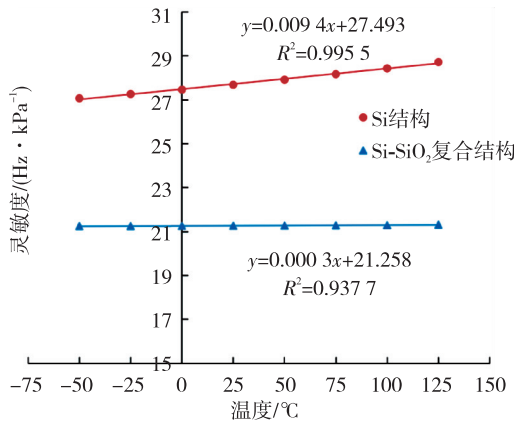


图9 Si结构与Si-SiO₂复合结构灵敏度随温度变化曲线

4 结束语

本文基于谐振式压力传感器温度漂移机理,设计了Si-SiO₂复合谐振梁结构和三膜-双谐振器结构,对杨氏模量温度漂移造成的灵敏度漂移和热应力造成的零点温度漂移进行补偿。通过仿真分析,得到传感器各项性能参数。在0~350 kPa量程范围内,芯片压力灵敏度达21.146 Hz/kPa,在-50~125 °C内零点温度漂移低至0.2 Hz/°C,灵敏度温度漂移由 $339 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 降低 $14.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。结果表明,Si-SiO₂复合谐振梁和三膜-双谐振器结构能够有效改善谐振式压力传感器温度漂移,使传感器能够在更宽的温度区间内工作,适应更广的工作环境。

参考文献:

[1] 王喆垚. 微系统设计与制造[M]. 北京:清华大学出版社,2015:220-221.

[2] GREENWOOD J, WRAY T. High accuracy pressure measurement with a silicon resonant sensor[J]. Sensors and Actuators A:Physical,1993,37/38:82-85.

[3] HOPCROFT M A, NIX W D, KENNY T W. What is the Young's modulus of silicon? [J]. Journal of Microelectromechanical Systems,2010,19(2):229-238.

[4] 杨敏,陈福彬,朱嘉林,等. 石英谐振加速度计低温漂移结构设计及温度补偿[J]. 压电与声光,2023,45(5):719-722.

YANG Min, CHEN Fubin, ZHU Jialin, et al. Low temperature drift structure design and temperature compensation of quartz resonant accelerometer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2023,45(5):719-722.

[5] 王音心,王露,李军,等. 颅内温度和压力传感器校准与补偿算法研究[J]. 压电与声光,2019,41(6):856-860.

WANG Yinxin, WANG Lu, LI Jun, et al. Calibration and compensation algorithms for intracranial temperature and pressure sensors[J]. Piezoelectrics & Acous-

tooptics,2019,41(6):856-860.

[6] 谭士杰,刘凯,代波. 压电式压力传感器温度补偿算法的研究[J]. 压电与声光,2019,41(3):445-447.

TAN Shijie, LIU Kai, DAI Bo. Study on temperature compensation algorithm of piezoelectric pressure sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2019,41(3):445-447.

[7] MELAMUD R, CHANDORKAR S A, KIM B, et al. Temperature-compensated high-stability silicon resonators[J]. Appl Phys Lett,2007,90(24):244107(1-3).

[8] MELAMUD R, KIM B S, CHANDORKAR S A, et al. Temperature-insensitive composite micromechanical resonators(Article)[J]. Journal of Microelectromechanical Systems,2009,Vol. 18(6):1409-1419.

[9] 郭欣榕,张永威,谭秋林,等. 新型声表面波三轴加速度传感器的设计仿真[J]. 压电与声光,2020,42(5):644-648.

GUO Xinrong, ZHANG Yongwei, TAN Qiulin. Design and simulation of a novel SAW triaxial acceleration sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2020,42(5):644-648.

[10] 岳虎虎,彭斌,李凌,等. 基于双SAW谐振器的温度传感器设计[J]. 压电与声光,2021,43(1):1-4.

YUE Huhu, PENG Bin, LI Ling, et al. Design of temperature sensor based on double SAW resonator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2021,43(1):1-4.

[11] 鲁毓岚. 静电激励/压阻检测式硅谐振压力传感器研究[D]. 北京:中国科学院大学,2021.

[12] LU Yulan, XIE Bo, LI Chuanhao, et al. An oil-filled MEMS resonant pressure sensor based on electrostatic stiffness modulation[J]. IEEE Electron Device Letters,2023,44(12):2027-2030

[13] ZHAO Libo, HAN Xiangguang, MAO Qi, et al. Temperature-insensitive silicon resonant pressure sensor by thermal stress control[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2021,322:112612.

[14] 任森. SOI基高精度微机械谐振式压力传感器技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.

[15] LI Yuxin, CHEN Deyong, WANG Junbo. Stress isolation used In MEMS resonant pressure sensor package [J]. Procedia Engineering,2011,25:455-458.

[16] WU Guoqiang, XU Jinghui, ELDWIN Jiaqiang, et al. MEMS resonators for frequency reference and timing applications [J]. Journal of Microelectromechanical Systems,2020,29(5):1137-1166.

[17] 杜晓辉. 三梁-双膜耦合的静电谐振气压传感器研究[D]. 厦门:厦门大学,2016.