

T/ZOIA

中关村光电产业协会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

MEMS 硅谐振式压力敏感元件设计要求

Design requirements for MEMS silicon resonant pressure-sensitive components

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中关村光电产业协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	1
5 详细要求	1

前 言

本文件按照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。

本文件由西安交通大学提出。

本文件由中关村光电产业协会归口。

本文件起草单位：西安交通大学。

本文件主要起草人：方续东，赵永超，卓文强。

MEMS 硅谐振式压力敏感元件设计要求

1 范围

本标准规定了MEMS硅谐振式压力敏感元件设计的术语和定义、一般要求、详细要求。
本标准适用于MEMS硅谐振式压力敏感元件结构的设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

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

3 术语和定义

GB/T 26111及JB/T 13359-2018确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

敏感结构 sensing structure

用于敏感外界压力并将压力信号转换为电信号的芯片单元。

3.2

锚点 anchor

悬空结构与基底连接的点。

4 一般要求

4.1 软件和硬件要求

设计平台应具备基本的软件和硬件配置，能够进行MEMS硅谐振式压力敏感元件结构的静力学、热学、电学和耦合场特性分析。

4.2 设计依据

设计时应考虑MEMS硅谐振式压力敏感元件的结构形式、材料、结构参数、工艺等，MEMS硅谐振式压力敏感元件结构设计应满足MEMS硅谐振式压力敏感元件性能指标和环境适应性指标要求。MEMS硅谐振式压力敏感元件性能指标主要包括量程、非线性、灵敏度、稳定性、重复性、温度漂移，环境适应性指标主要包括振动、机械冲击、温度适应性等。各项性能指标与结构设计参数的关系见表1：

表1 MEMS硅谐振式压力敏感元件性能指标和结构设计参数的对应关系

MEMS硅谐振式压力敏感元件性能指标	影响性能指标的结构设计参数
量程与非线性	机械刚度、质量、品质因数、驱动力
灵敏度	工作模态频率、质量、品质因数、驱动力
稳定性与重复性	残余应力（受加工工艺影响）、寄生参数
温度漂移	残余应力（受加工工艺影响）、寄生参数
环境适应性	材料特性、机械刚度、封装形式

5 详细要求

5.1 MEMS硅谐振式压力敏感元件结构设计

MEMS硅谐振式压力敏感元件结构设计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。

5.2 敏感元件方案设计

5.2.1 通则

敏感元件方案设计主要包括敏感结构形式、激励检测方式、封装设计、材料选用。

5.2.2 敏感芯体结构形式

MEMS硅谐振式压力敏感元件芯体结构形式可以分为振动膜结构以及压力敏感膜片与谐振子复合结构结构，其中压力敏感膜片与谐振子复合结构又可分为单谐振器结构与多谐振器结构，多谐振器结构包括双谐振器、三谐振器等。谐振器工作方式分为面内振动与面外振动，即谐振方向与敏感膜平面方向平行与谐振方向与敏感膜平面方向垂直两种工作形式。设计敏感结构时应考虑如下因素：

- (a) 依据压力传感器的性能要求及系统设计要求选择敏感元件结构形式
- (b) 若无特殊要求，应优先采用面内振动的工作形式。；

5.2.3 激励拾振方式

MEMS硅谐振式压力敏感元件针对激励方式分为：静电激励、电磁激励、压电激励、电热激励、光激励等；针对拾振方式分为：静电拾振、电磁拾振、压电拾振、压阻拾振、电容拾振、光拾振等。设计时需根据器件性能要求、环境适应性要求选择合适的激励拾振方式。

5.2.4 封装形式

敏感元件封装形式的设计需考虑如下因素：

- (a) 依据设计的敏感结构选择封装的类型。封装工艺主要有三类：管壳级、芯片级、圆片级，工艺允许条件下优先采用圆片级封装；
- (b) MEMS硅谐振式压力敏感元件需优先采用真空封装，以保证谐振器工作在真空环境中的要求。

5.2.5 材料选用

依据制造工艺选择敏感结构材料、绝缘介质、基底材料、密封盖板材料、引线材料，需求如下：

- (a) 敏感结构材料：一般选用硅材料；
- (b) 绝缘介质：一般选择氧化硅；
- (c) 基底材料：一般选择与敏感结构相同的材料；
- (d) 密封盖板材料：一般选用玻璃；
- (e) 引线材料：一般选用金或铝。

5.3 敏感元件结构参数详细设计

5.3.1 通则

敏感元件结构参数详细设计主要包括谐振梁设计、谐振器设计、压力敏感膜设计，同时需考虑谐振器的刚度与质量、工作模态和频率、品质因数等参数。

5.3.2 谐振梁设计要求

敏感元件谐振梁设计要求如下：

- (a) MEMS硅谐振压力敏感元件的谐振梁一般可简化为双端固支梁模型和单端固支梁模型，分别如图1和图2所示。通过公式（1）、公式（2）可计算谐振梁在轴向应力作用下的结构刚度；
- (b) 敏感元件通常由多根谐振梁组成，可根据各梁之间的串联或并联关系计算其总的结构刚度；
- (c) 谐振梁的结构刚度应保证在加工与工作过程中不发生破坏和失效。

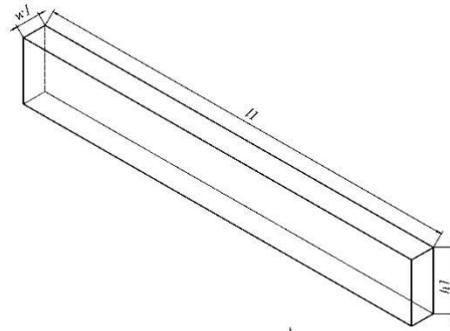


图1 双端固支梁模型示意图

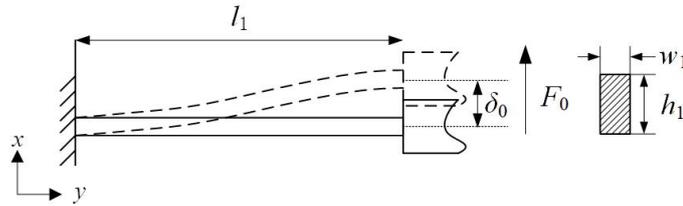


图2 单端固支梁模型示意图

$$k = \frac{4.73^4 E h_1 w_1^3}{12 l_1^3} \quad (1)$$

$$k = \frac{E h_1 w_1^3}{l_1^3} + \frac{6 N S}{5 l_1} \quad (2)$$

- k —— 谐振梁刚度 (N/m) ;
 E —— 材料杨氏模量 (Pa) ;
 N —— 谐振梁所受轴向应力 (Pa) ;
 S —— 谐振梁横截面积 (m^2) ;
 h_1 —— 谐振梁厚度 (m) ;
 l_1 —— 谐振梁长度 (m) ;
 w_1 —— 谐振梁宽度 (m) 。

5.3.3 谐振器设计要求

敏感元件谐振器设计要求如下:

- 谐振器的谐振频率可根据公式 (3) 计算, 谐振器频率需依据压力敏感元件的性能指标及后端处理电路要求进行设计;
- 谐振器的整体刚度应保证在加工和工作过程中不发生破坏和失效。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_E}{m_E}} \quad (3)$$

f —— 谐振器谐振频率/Hz;

k_E —— 谐振器等效刚度/ $N \cdot m^{-1}$;

m_E —— 谐振器等效质量/kg。

5.3.4 压力敏感膜设计要求

压力敏感膜设计要求如下:

- 压力敏感膜的设计应满足芯片尺寸设计要求;
- 压力敏感元件的敏感膜的变形应始终小于膜厚的1/5以满足小挠度变形条件[1];
- 压力敏感膜一般优选选择方形膜片, 结构如图3所示。敏感膜在外界均布压力载荷下, 敏感膜沿x向、y向和z向的位移变化规律可根据公式 (4)、公式 (5) 和公式 (6) 计算, 敏感膜上表面沿x向与y向的应力变化规律可根据公式 (7) 计算;

- (d) 压力敏感膜的厚度应符合传感器的性能要求；
 (e) 敏感元件锚点布置位置根据压力敏感膜位移分布与应力分布合理设计。

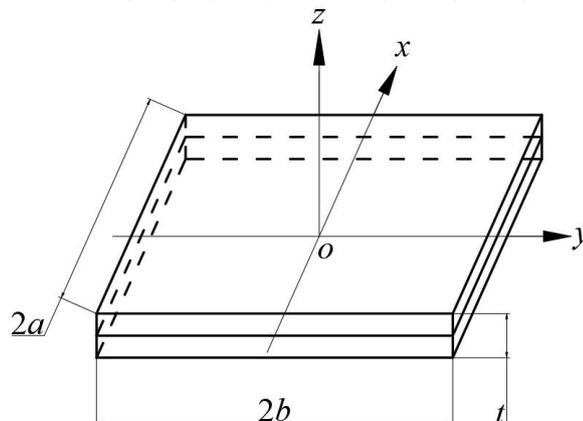


图3 压力敏感膜结构示意图

$$u_x = -\frac{4\omega_0 xz}{b^2} \left(\frac{x^2}{a^2} - 1 \right)^2 \left(\frac{y^2}{b^2} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

$$u_y = -\frac{4\omega_0 yz}{b^2} \left(\frac{x^2}{a^2} - 1 \right)^2 \left(\frac{y^2}{b^2} - 1 \right)^2 \quad (5)$$

$$u_z = \omega_0 \left(\frac{x^2}{a^2} - 1 \right)^2 \left(\frac{y^2}{b^2} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

- u_x —— x 向位移 (m)；
 u_y —— y 向位移 (m)；
 u_z —— z 向位移 (m)；
 ω_0 —— 敏感膜最大挠度 (m)；
 x —— x 方向到原点距离 (m)；
 y —— y 方向到原点距离 (m)；
 z —— z 方向到原点距离 (m)。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \nu \frac{E}{1-\nu^2} \\ \nu \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -z \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

- σ_x —— x 向应力 (Pa)；
 σ_y —— y 向应力 (Pa)；
 E —— 材料杨氏模量 (Pa)；
 ω —— 敏感膜最大挠度 (m)；
 x —— x 方向到原点距离 (m)；
 y —— y 方向到原点距离 (m)；
 z —— z 方向到原点距离 (m)。

5.3.5 工作模态和频率设计要求

工作模态和频率设计要求如下：

- (a) 工作模态应优先选择面内振动模态；
- (b) 谐振器工作模态与相邻模态的频率间隔大于工作振型频率的5%，以减少非工作模态的影响[2]；
- (c) 谐振器的工作频率需满足后端驱动检测电路的要求。

5.3.6 品质因数设计要求

品质因数设计要求如下：

- (a) 从能量的角度，谐振器的品质因数定义为谐振状态下的总振动储能与阻尼所导致的每个振动周期耗能之比，可根据公式（8）计算；
- (b) 传感器的品质因数应该足够高（大于）。

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} = \frac{m\omega}{c} = \frac{k}{c\omega} \quad (8)$$

W —— 谐振器的总振动储能；

ΔW —— 谐振器的每个振动周期耗能；

m —— 谐振器的等效质量；

ω —— 谐振器的振动角频率；

c —— 谐振器的阻尼系数；

k —— 谐振器的弹性系数。

5.3.7 环境适应性设计要求

环境适应性设计要求如下：

- (a) 压力敏感元件各结构层需进行材料热匹配设计；
- (b) 压力敏感元件需进行可靠性设计与抗冲击设计。

5.4 工艺可行性设计

5.4.1 制造工艺

依据MEMS硅谐振式压力敏感元件的敏感结构形式确定敏感结构芯片的制造工艺，制造工艺应考虑如下因素：

- (a) MEMS硅谐振式压力敏感元件一般选择体硅制造工艺；
- (b) 保证可制造性的前提下，应考虑应力释放工艺降低敏感结构残余应力；
- (c) 敏感结构设计应考虑工艺加工能力，依据结构设计和工艺加工能力合理确定版图尺寸，包括线宽、间隙等，以保证敏感结构的可加工性。

5.4.2 线宽

敏感结构的线宽设计要求如下：

- (a) 敏感结构的最小线宽应大于工艺最小线宽要求；
- (b) 关键部位的线宽应考虑工艺加工误差，工艺误差较大时应进行必要的补偿，如谐振梁宽度。

5.4.3 间隙

敏感结构的间隙设计要求如下：

- (a) 敏感结构间隙应大于工艺最小间隙要求；
- (b) 关键部位的间隙应考虑工艺加工误差，工艺误差较大时应进行必要的补偿。

5.4.4 其他要求

其他应考虑的工艺要求如下：

- (a) 锚点的尺寸应大于工艺键合要求的最小尺寸；
- (b) 敏感结构的设计均应与选用的工艺规则兼容；
- (c) 应该满足真空封装的要求；
- (d) 保证可加工的情况下，寄生参数应尽量小。

参 考 文 献

- [1] 胡海霖. 硅微谐振式压力传感器设计与分析[D]. 合肥工业大学, 2019.
- [2] 任森. SOI 基高精度微机械谐振式压力传感器技术研究[D]. 西北工业大学, 2015.