

MEMS “三明治”倾角传感器的仿真分析和优化设计

高 旗, 陈青松, 杨 挺, 杨贵玉, 张洪涛, 张 皓
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 对 MEMS “三明治”式倾角传感器进行结构优化设计, 敏感元件采用双梁-质量块结构, 其中可动质量块通过双梁和周围框架相连, 可动质量块和上下盖板构成上下差分电容。外界给定某一加速度时, 上下间隙此消彼长, 从而导致电容容量发生变化。通过建立敏感元件的静力学模型, 获得敏感元件的关键尺寸与其性能参数的关系, 基于体硅工艺建立敏感元件的三维工艺模型, 并采用 ANSYS 有限元仿真对敏感元件的灵敏度、线性度、谐振频率等参数进行分析计算, 结果表明: 敏感结构的一阶谐振频率为 576.68 Hz, 灵敏度为 0.76 pF/g, $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 对应的线性度分别为 0.8‰、3‰, 均符合设计要求, 最后给出了倾角传感器敏感元件的加工流程。

关键词: MEMS 倾角传感器; 有限元仿真; 灵敏度; 线性度; 谐振频率; 体硅工艺

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)05-0120-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220125001

引用格式: 高旗, 陈青松, 杨挺, 等. MEMS “三明治”倾角传感器的仿真分析和优化设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 120–126.

Simulated analysis and optimization design of MEMS Sandwich inclinometer

GAO Qi, CHEN Qingsong, YANG Ting, YANG Guiyu, ZHANG Hongtao, ZHANG Hao
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: In this paper, the structure optimization design of MEMS "sandwich" inclinometer is mainly carried out. The sensing element adopts double beam-mass block structure, in which the movable mass block is connected with the surrounding frame through the double beam. The movable mass block, the top and the bottom plate constitute differential capacitance. When the external acceleration is loaded, the gap between the movable mass block and top-bottom plate will change which results in the changes of differential capacitance. The relationship between key performances and structure parameters is obtained by building up three-dimensional micromachining model of the sensing element based on bulk-micromachining process. The results from ANSYS FEA show that the sensitivity and the first-order resonant frequency are 0.76 pF/g and 576.68 Hz respectively with the linearity 0.8‰ and 3‰ for $\pm 30^\circ$ and $\pm 90^\circ$ measurement range, all of which meet the design requirements. In the end, the fabrication process of sensing element is also presented.

Key words: MEMS inclinometer; FEA; Sensitivity; Linearity; Resonant frequency; Bulk-micromachining process

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220125001

Citation: GAO Qi, CHEN Qingsong, YANG Ting, et al. Simulated analysis and optimization design of MEMS "Sandwich" inclinometer[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 120–126.

引 言

MEMS(Micro-electro-mechanical system)是指 $1\ \mu\text{m}$ ~ $1\ 000\ \mu\text{m}$ 尺寸内的集成电路技术或者机械元件, 该技术是集微传感器、微执行器、信号处理电路、通信接口等于一体的微型器件或系统。倾角是工程机械、楼宇桥梁、输电线塔、平台稳定等领域必须检测和控制的重要参数, 倾角传感器是专门用来测量倾角的器件, 所测的倾角参数具体是指所测平面与参考平面所成的夹角。一般工程中的参考平面选取是以地球重力场为基准, 对倾角传感器本身所受的重力矢量与地球重力场之间的夹角进行测量。随着 MEMS

技术的发展, MEMS 倾角传感器以其质量轻、体积小等优势快速占领建筑、汽车运输、消费电子、航空航天以及国防安全等领域, 并且占比逐年增加^[1]。

MEMS 倾角传感器本质上是一个小量程窄带宽 MEMS 加速度计, 测量原理如图 1 所示。基于地球重力场稳定且方向恒定不变, 当倾角传感器敏感芯片倾斜时, 地球重力场在敏感芯片上会产生重力加速度分量 A_x , 该加速度分量与倾斜角存在三角函数关系, 即 $A_x = g \sin \theta$, 通过对加速度分量求反三角函数即可获得倾角值 θ , 以此实现加速度和倾角之间的转换。

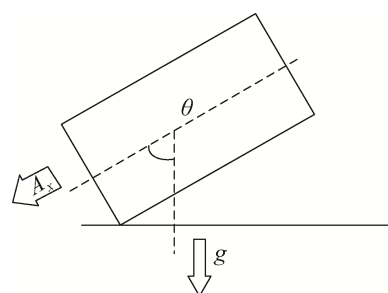


图 1 倾角测量原理图

Fig. 1 The schematic diagram of incline measurement

MEMS 倾角传感器按照工作原理不同可以分为电容式、谐振式、光电式等, 其中电容式原理以结构和制备工艺简单可靠、检测电路技术成熟、功耗低等优势, 一直以来是 MEMS 倾角传感器的主流方案。电容式 MEMS 倾角传感器按照敏感结构的具体形式又可以细分为三明治式和梳齿式, 其中梳齿式结构主要采用基于 DRIE 的表面微加工技术实现, 受刻蚀深宽比限制, 需要在电容间隙和质量块厚度之间进行取舍, 很难获得高灵敏度的敏感结构, 而三明治式结构主要采用湿法加工获得, 易于通过大敏感质量块和薄挠性梁结构实现高的电容-加速度灵敏度, 同时利用可动质量块与上下极板微小间隙的压膜阻尼实现过阻尼频带设计。

三明治加速度计在实际工作过程中, 敏感质量块的运动状态为平动和转动相结合, 而现有文献主要采用平动简化或者组合梁力学模型分析的方式。平动简化与质量块实际运动方式差异较大, 仅适合于进行定性分析; 组合梁力学模型考虑了转动的状态, 但将质量块和挠性梁完全当成规则平板结构处理, 未考虑工艺加工导致的各向异性腐蚀残余等误差, 计算结果仍然无法准确反映实际状态。本文首先建立了敏感元件的静力学模型, 获得了敏感元件的关键尺寸与其性能参数的关系, 基于实际体硅工艺获得的三维形貌建立了敏感元件的有限元模型, 利用节点路径计算获得敏感质量块的挠度和转角, 比经典组合梁模型更加准确, 基于该有限元分析结果进一步获得了敏感元件的灵敏度、非线性度等性能参数。该方法可以为三明治 MEMS 倾角传感器敏感元件设计提供参考。

1 敏感元件静力学模型

敏感元件采用体硅工艺进行制备, 整体采用“三明治”结构, 中间的可动部分为双梁摆锤式结构, 上下盖板作为固定极板, 三者组成差分电容, 整体的结构是变间隙式的工作原理。中间可动部分的静力学模型可简化为挠性梁结构, 如图 2 所示。当敏感元件倾斜时, 质量块在重力作用下发生摆动, 由于质量块和挠性梁相连, 挠性梁产生的弹性力将会抵消重力作用而使质量块恢复平衡状态^[2]。

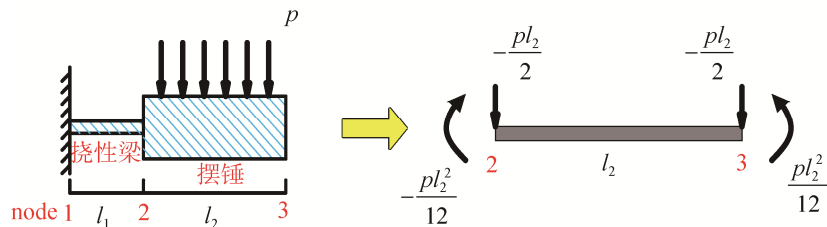


图 2 静力学模型

Fig. 2 Statics model

根据材料力学基本理论, 敏感元件受重力作用时的物理现象, 可以等效为均布力作用下组合梁的力学模型。将长度为 l_2 的质量块受到的均布力 p 进一步等效为作用于节点 2 和节点 3 上的集中力 (F_2 、 F_3) 和转矩 (M_2 、 M_3)。根据相关理论可以获得挠度和转角的矩阵为^[1]

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ \theta_2 \\ u_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho g b_2 h_2 l_1^2 l_2 (4l_1 + 3l_2)}{E b_1 h_1^3} \\ -\frac{6\rho g b_2 h_2 l_1 l_2 (l_1 + l_2)}{E b_1 h_1^3} \\ -\frac{\rho g l_2 (3b_1 h_1^3 l_2^3 + 2b_2 h_2^3 l_1 (4l_1^2 + 9l_1 l_2 + 6l_2^2))}{2E b_1 h_1^3 h_2^2} \\ -\frac{2\rho g l_2 (b_1 h_1^3 l_2^2 + 3b_2 h_2^3 l_1 (4l_1 + l_2))}{E b_1 h_1^3 h_2^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 ρ 为硅材料的密度, g 为加速度, E 为硅材料的弹性模量, b_1 为梁宽, l_1 为梁长, h_1 为梁厚, l_2 为质量块长度, b_2 为质量块宽度, h_2 为质量块厚度, u_3 为质量块前端节点 3 挠度, θ_3 为质量块前端节点 3 转动的角度, u_2 为质量块后端节点 2 的挠度, θ_2 为质量块后端节点 2 转动的角度。

实际上质量块沿长度方向各个位置与上下极板的间隙并非等距变化, 因此需要通过积分计算电容 C_1 和 C_2 , 如图 3 所示。

电容 C_1 和 C_2 及差分电容 C_{diff} 表达式为

$$C_1 = \int_{l_1}^{l_1+l_2} \frac{\varepsilon b_2}{d_0 + u_2 + \theta_2(x-l_1)} dx = \frac{\varepsilon b_2}{\theta_2} \ln \left(\frac{d_0 + u_2 + \theta_2 l_2}{d_0 + u_2} \right) \quad (2)$$

$$C_2 = \int_{l_1}^{l_1+l_2} \frac{\varepsilon b_2}{d_0 - u_2 - \theta_2(x-l_1)} dx = -\frac{\varepsilon b_2}{\theta_2} \ln \left(\frac{d_0 - u_2 - \theta_2 l_2}{d_0 - u_2} \right) \quad (3)$$

$$C_{\text{diff}} = C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon b_2}{\theta_2} \ln \left(\frac{d_0 + u_2 + \theta_2 l_2}{d_0 + u_2} \right) + \frac{\varepsilon b_2}{\theta_2} \ln \left(\frac{d_0 - u_2 - \theta_2 l_2}{d_0 - u_2} \right) \quad (4)$$

用无穷小等价并忽略高阶项可化简式 (4) 得到

$$C_{\text{diff}} = C_1 - C_2 = -C_0 \frac{2u_2 + l_2 \theta_2}{d_0} \left(1 + \frac{u_2^2}{d_0^2} \right) \quad (5)$$

其中, d_0 为平衡时上下极板的间隙, C_0 为无加速度时的静态电容, ε 为介电常数。

根据式 (5) 差分电容与转角和挠度之间的关系, 可以得出敏感元件的灵敏度 K_1 [2,3]。

$$K_1 = -C_0 \left(\frac{2u_2 + l_2 \theta_2}{d_0} \right) \quad (6)$$

一阶谐振频率 f 为

$$f = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{3E b_1 h_1^3 h_2^2 (l_1 + l_2) (2l_1 + l_2)}{\rho l_2 (h_2^2 + 4(3l_1^2 + 3l_1 l_2 + l_2^2)) (3b_1 h_1^3 l_2^3 + 2b_2 h_2^3 l_1 (4l_1^2 + 9l_1 l_2 + 6l_2^2))}} \quad (7)$$

2 敏感结构优化设计

根据高精度倾角传感器的应用需求及电容检测电路的水平, 敏感元件应满足灵敏度不低于 0.5 pF/g, ± 1 g 内非线性应优于 5%, 带宽应大于 50 Hz, 按照该指标开展了敏感元件的优化设计。

利用第 1 部分的理论模型, 通过改变梁的长度 l_1 、宽度 b_1 、厚度 h_1 等参数, 通过式 (1)~式 (7), 可以计算出灵敏度 K_1 与结构参数之间的关系, 从中找到最优解。图 4~图 9 分别给出了灵敏度 K_1 与梁的

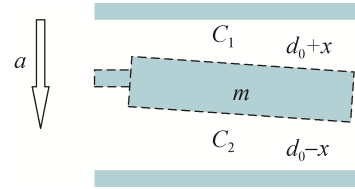


图 3 双梁-质量块式结构工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the working principle of double beam - mass structure

长度 l_1 、宽度 b_1 、厚度 h_1 的关系曲线。结果显示：灵敏度 K_1 与梁的厚度 h_1 和宽度 b_1 成反比，与梁的长度 l_1 成正比；谐振频率与梁的厚度 h_1 和宽度 b_1 成正比，与梁的长度 l_1 成反比^[4]。

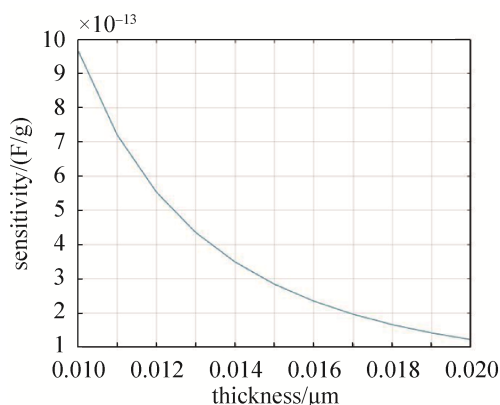


图 4 梁厚和灵敏度关系曲线图

Fig. 4 Curve of the relationship between thickness and sensitivity

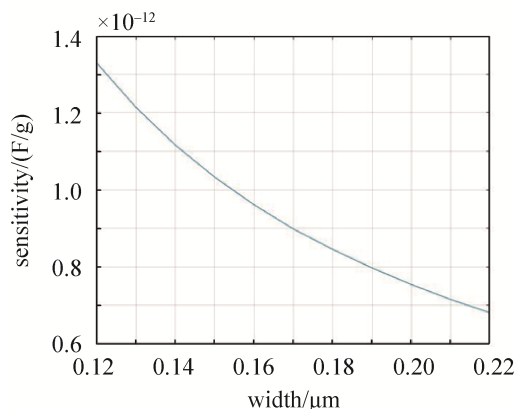


图 5 梁宽和灵敏度关系曲线图

Fig. 5 Curve of the relationship between width and sensitivity

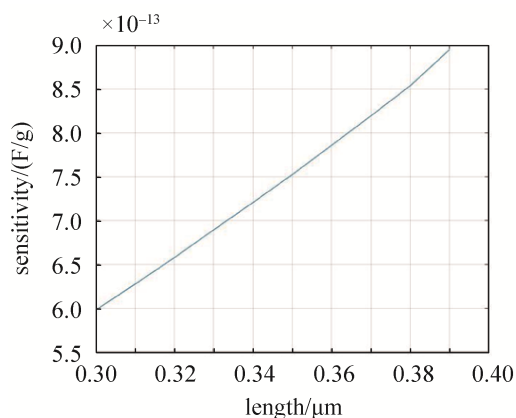


图 6 梁长和灵敏度关系示意图

Fig. 6 Curve of the relationship between length and sensitivity

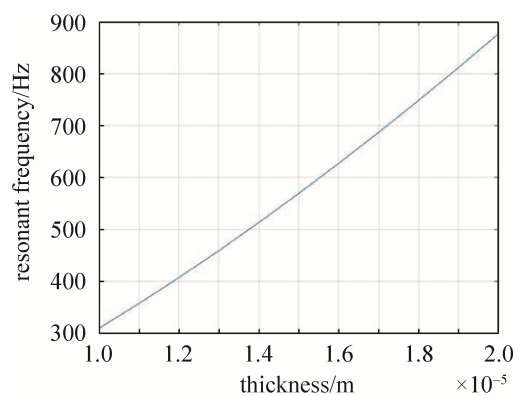


图 7 梁厚和谐振频率关系示意图

Fig. 7 Curve of the relationship between thickness and resonant frequency

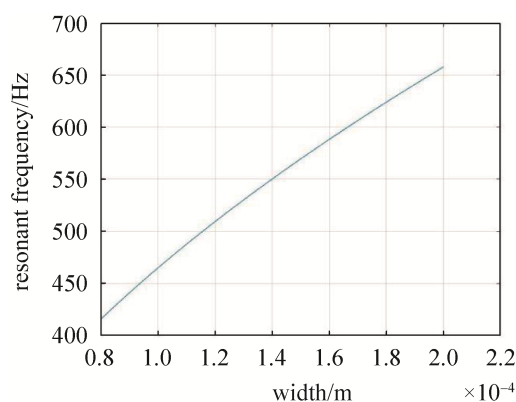


图 8 梁宽和谐振频率关系示意图

Fig. 8 Curve of the relationship between width and resonant frequency

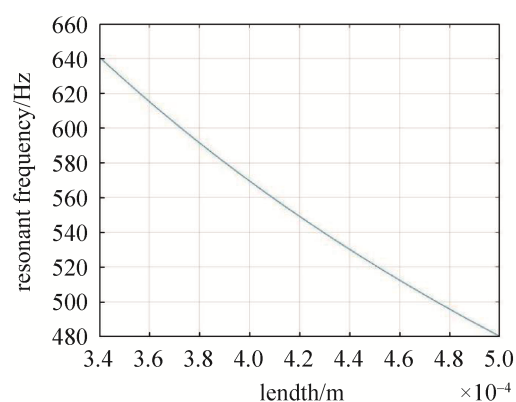


图 9 梁长和谐振频率关系示意图

Fig. 9 Curve of the relationship between length and resonant frequency

综合上述敏感元件的关键尺寸与灵敏度和一阶谐振频率的理论关系, 可以获得优化的尺寸参数, 基于硅的各向异性湿法腐蚀工艺进行三维工艺模型构建, 如图 10 所示, 并进行模态和静态分析。

通过模态分析可知, 该结构的一阶模态是质量块沿着敏感轴运动的摆态, 如图 11 所示; 二阶模态是质量块绕着梁扭转的扭态, 如图 12 所示, 其他更高阶则是非敏感方向振动模态; 一般一阶模态的固有频率与其他高阶模态的比值要尽可能小, 以减小交叉轴灵敏度误差。根据分析计算, 得出的前 6 阶模态固有频率见表 1, 其中一阶谐振频率为 576.68 Hz, 可以满足倾角传感器响应速度要求。

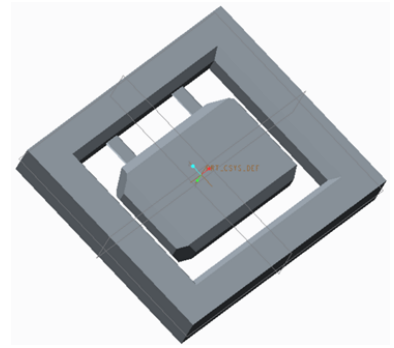


图 10 可动结构 3D 模型图

Fig. 10 3D model of the moving part

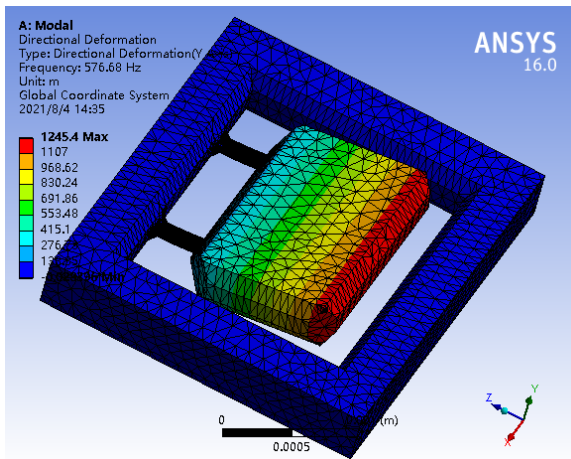


图 11 一阶模态图

Fig. 11 The diagram of first-order modal

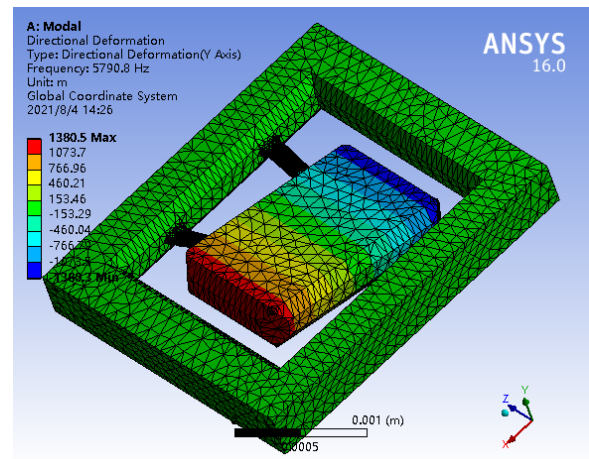


图 12 二阶模态图

Fig. 12 The diagram of second-order modal

表 1 敏感元件前六阶模态固有频率

Table 1 Natural frequency of the first six stage modal of sensitive components

阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率 (Hz)	576.68	5 790.8	14 076	48 116	143 750	148 710

进一步对敏感元件的三维模型进行静力学有限元仿真, 分别对 MEMS 倾角传感器在 $\pm 90^\circ$ ($\pm 1\text{ g}$) 和 $\pm 30^\circ$ ($\pm 0.5\text{ g}$) 量程范围内的变形量进行仿真, 在 $\pm 90^\circ$ 的量程范围内, 以 0.2 g 递增, 在其敏感方向给定 1 g 加速度, 设置计算路径, 如图 13 所示, 得到质量块两端的挠度, 根据式 (5) 计算出差分电容, 得到静态输入输出特性曲线, 如图 14 和图 15 所示。根据线性度 δ 的计算公式 (8), 计算出 $\pm 90^\circ$ ($\pm 1\text{ g}$) 量程的线性度为 3% , $\pm 30^\circ$ ($\pm 0.5\text{ g}$) 量程的线性度为 0.8% , 根据 $\pm 90^\circ$ ($\pm 1\text{ g}$) 输入输出曲线的斜率可以获得灵敏度约为 0.76 pF/g , 均符合设计要求。

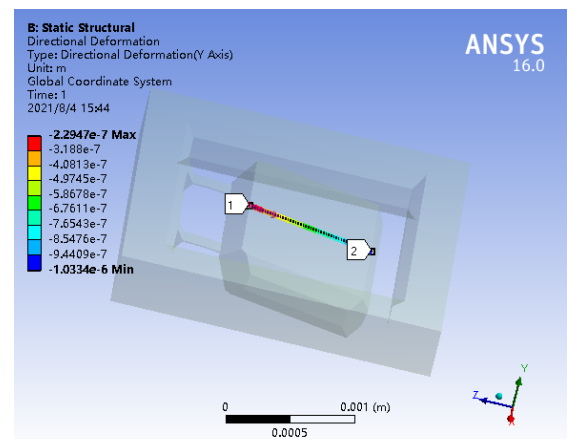


图 13 有限元计算路径图

Fig. 13 The diagram of finite element path

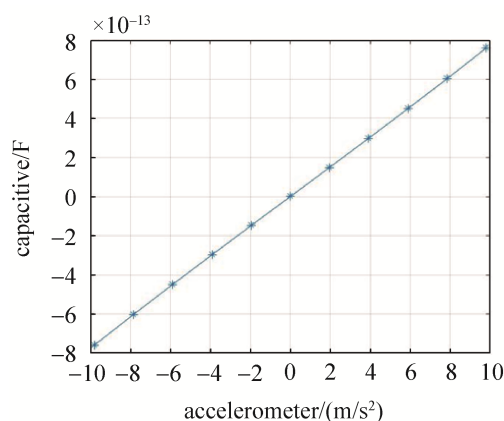


图 14 ±90°非线性度分析曲线

Fig. 14 The curve of ±90°nonlinear analysis

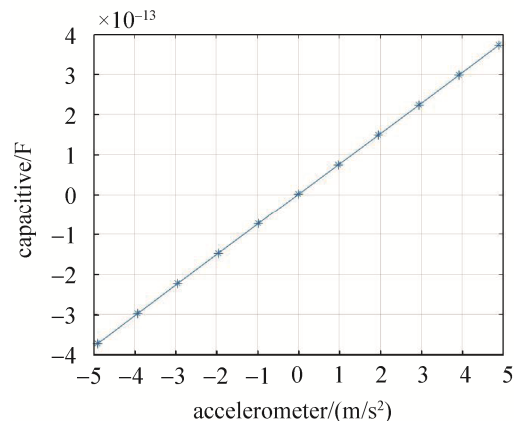


图 15 ±30°非线性度分析曲线图

Fig. 15 The curve of ±30°nonlinear analysis

$$\delta = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y} \times 100\% \quad (8)$$

其中, $\Delta Y_{\max}$ 为实际输出曲线与拟合直线的最大绝对偏差, Y 为整个测量范围内输出变化量。

4 敏感结构工艺制备

从结构设计方面, 敏感芯片包括中间敏感层结构和上下盖板结构, 敏感层为经典的质量块和双挠性梁结构。如图 16 所示, 中间可动结构的制备采用体硅工艺, 主要采用双面光刻和各向异性湿法腐蚀工艺。

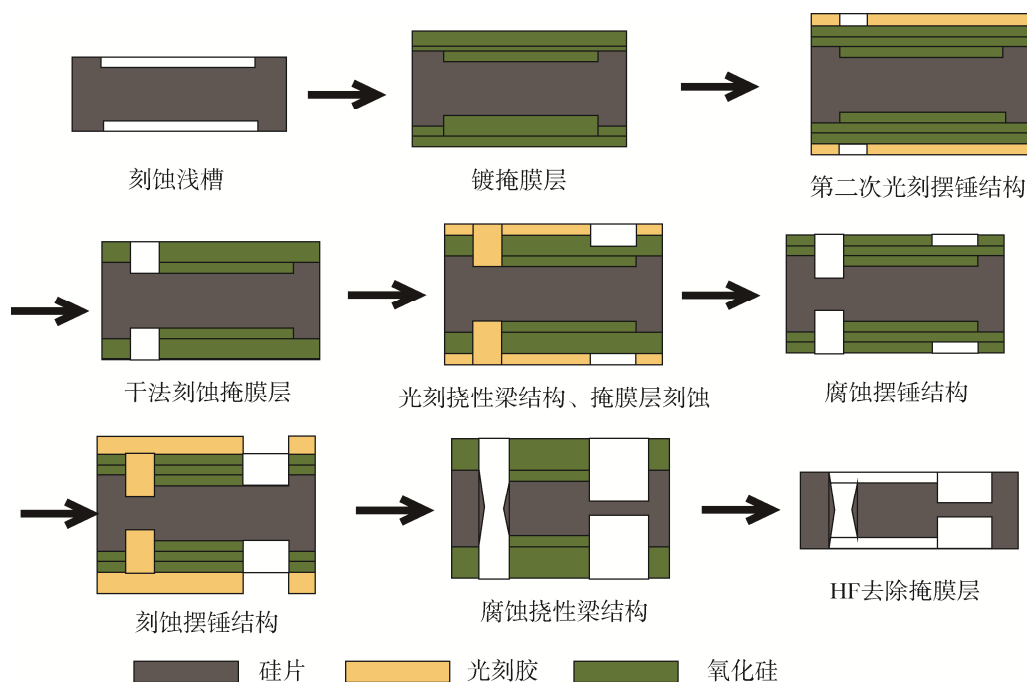


图 16 挠性梁-质量块工艺制备流程图

Fig. 16 The flow chart of beam-mass process

由于硅材料各向异性腐蚀特性, 通过凸角补偿可避免外角显著削减问题, 如图 17 所示, 同时通过改进腐蚀液参数, 最终采取 80 ℃、质量浓度为 10% 的 TMAH (四甲基氢氧化铵) 溶液进行湿法腐蚀, 获得了可动结构如图 18 所示^[5]。

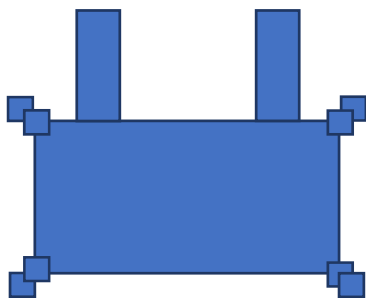


图 17 凸角补偿示意图

Fig. 17 The picture of convex-corner compensation

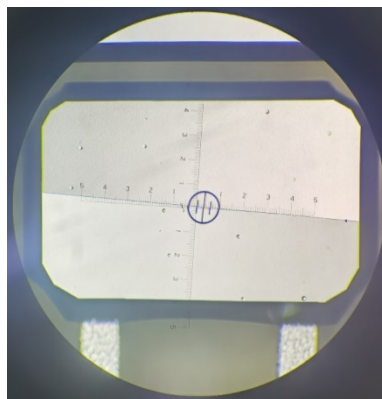


图 18 挠性梁-质量块实物图

Fig. 18 The picture of beam-mass structure

5 结束语

本文主要对基于三明治结构的 MEMS 倾角传感器敏感元件进行研究,建立了敏感元件的静力学模型,获得了敏感元件的关键结构尺寸与其灵敏度、谐振频率的对应关系,根据硅各向异性湿法腐蚀的规律建立了敏感元件的三维工艺模型,并利用有限元仿真对敏感元件的灵敏度、线性度、谐振频率等参数进行分析计算。结果表明,敏感结构的一阶谐振频率为 576.68 Hz,灵敏度为 0.76 pF/g,对应 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 的线性度分别为 0.8‰、3‰,符合设计要求,最后给出了敏感元件的工艺流程。本文可以为三明治 MEMS 倾角传感器敏感元件设计和制造提供参考。

参考文献

- [1] 格雷戈利 T.A.科瓦奇. 微传感器与微执行器全书[M]. 张文栋, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 邢朝洋. 高性能 MEMS 惯性器件工程化关键技术研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2017.
- [3] SHARMA K, MACWAN I, ZHANG L, et al. Design optimization of MEMS comb accelerometer[C]. ASEE, 2007.
- [4] BENMESSAOUD M, NASREDDINE M M. Optimization of MEMS capacitive accelerometer[J]. Microsystem technologies, 2013, 19(5): 713–720.
- [5] 任霄峰. TMAH 湿法腐蚀工艺制备微台面结构[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(7): 526–531.
REN Xiaofeng. Preparation of micro-mesa structure using TMAH wet etching process[J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(7): 526–531.

[作者简介]

- 高 旗 1996 年生, 硕士, 主要研究方向为 MEMS 惯性传感器研究。
 陈青松 1972 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为传感器技术研究和产品研制。
 杨 挺 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 MEMS 惯性传感器研制与开发。
 杨贵玉 1977 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 MEMS 加速度传感器开发与应用。
 张洪涛 1990 年生, 专科, 高级镀膜工, 主要研究方向为 MEMS 惯性传感器成膜与湿法刻蚀。
 张 皓 1990 年生, 本科, 高级研磨工, 主要研究方向为 MEMS 惯性传感器研磨抛光。

(本文编辑: 杨秀丽)