

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206108

多梁凹槽高 g 值加速度计的设计与分析^{*}

张 宇^{1,2} 许高斌^{1,2} 尹盛华^{1,2} 徐 琛^{1,2} 汪 洋^{1,2} 冯建国^{1,2}

(1. 合肥工业大学微电子学院 合肥 230009; 2. 安徽省 MEMS 工程技术研究中心 合肥 230009)

摘 要: 针对目前航空航天、车辆碰撞分析等领域对高 g 值加速度计的迫切需求,设计了一种新型多梁凹槽压阻式加速度计,该加速度计利用变截面梁作为敏感梁来放大质量块的等效惯性力,并通过辅助梁与背面凹槽的组合有效提高结构刚度,实现了高灵敏度输出和良好的频宽特性。建立了加速度计的力学模型,并通过 ANSYS 有限元软件仿真分析,优化获得了加速度计的结构和尺寸。利用敏感梁表面路径,分析总结其应力分布规律,确定压敏电阻位置。仿真实验结果表明,设计出的该加速度计量程为 150 000 g,灵敏度为 1.32 $\mu\text{V/g}$,固有频率约为 268 kHz。最后基于 SOI 技术设计了加速度计的工艺流程。

关键词: 压阻式;加速度计;变截面梁;辅助梁;凹槽;高 g 值

中图分类号: TP212; TN384 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.30

Design and analysis of multi-beam groove high g-value accelerometer

Zhang Yu^{1,2} Xu Gaobin^{1,2} Yin Shenghua^{1,2} Xu Chen^{1,2} Wang Yang^{1,2} Feng Jianguo^{1,2}

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Micro Electromechanical System Research Center of Engineering and Technology of Anhui Province, Hefei 230009, China)

Abstract: In response to the urgent demand for high g-value accelerometers in aerospace, vehicle collision analysis and other fields, a new multi-beam groove piezoresistive accelerometer was designed, which used variable section beams as sensitive beams to amplify the equivalent inertial force of the mass, and effectively improved the structural stiffness through the combination of auxiliary beam and back groove to achieve high sensitivity output and good bandwidth characteristics. The mechanical model of the accelerometer was established, and the structure and size of the accelerometer were optimized through ANSYS finite element software. Using the surface path of the sensitive beam, the stress distribution law was analyzed and summarized, and the varistor position was determined. The simulation results demonstrate that the designed sensor measurement range was 150 000 g, and the sensitivity was 1.32 $\mu\text{V/g}$, and the natural frequency was about 268 kHz. Based on SOI technology, the processing flow of the accelerometer was finally designed.

Keywords: piezoresistive; accelerometer; variable section beams; auxiliary beams; groove; high g-value

0 引 言

微机电系统 (micro electro mechanical systems, MEMS) 加速度计作为一种惯性测量器件,具有体积小、重量轻、工艺简单等优点^[1-3]。其中高 g 值加速度计具有广泛应用的前景,广泛应用于侵彻弹药引信在计划的层数起爆、武器研制过程中的高冲击测试过程、汽车的安全气囊、航空航天的惯性导航等,要求加速度计不仅有着较

高的灵敏度,还要具有较高的固有频率和较好的抗过载能力^[4-5]。按照工作原理 MEMS 加速度计可分为压电式、压阻式、电容式、谐振式、光学式等典型方式^[6]。目前,压阻式加速度计由于具有信号处理电路简单、输入阻抗低、抗电磁干扰性强、可靠性高以及工艺成熟等优点,被广泛应用于车辆碰撞分析、航空航天等领域^[7-8]。然而,其温度效应影响较大,结构的固有频率难提高,灵敏度低等缺点限制了压阻式加速度计的发展^[9-10]。

早期加拿大 Alberta 微电子中心研制了一种悬臂梁

收稿日期: 2022-12-12 Received Date: 2022-12-12

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2008901)、安徽省发改委研发创新 (JZ2021AFKJ0050) 项目资助

式硅微机械加速度计,可承受 1×10^5 g 的加速度高冲击,但因其结构没有质量块,灵敏度仅为 $0.72 \mu\text{V/g}^{[11]}$ 。2015年,中国国立台湾大学应用力学研究所的 Wung 等^[12]提出了一种垂直板式面内压阻式加速度计,通过惠斯通电桥将非敏感轴上的冲击信号进行抵消,尽管加速度计的交叉轴灵敏度和线性度较好,但输出灵敏度与谐振频率较低。2018年,中北大学 Shi 等^[13]设计了一种梁岛结构的高g值加速度计,量程为 1×10^5 g,固有频率约 408 kHz,理论灵敏度为 $0.488 \mu\text{V/g}$ 。2022年,陕西理工大学杨雨君等^[14]设计了一种复合八梁结构的加速度计,虽然灵敏度达到 $4 \mu\text{V/g}$ 以上,但是谐振频率仅 105 kHz 左右,结构灵敏度与固有频率的矛盾仍比较突出。

针对目前航空航天、车辆碰撞分析等领域对于高g值加速度计的紧迫需要以及现有加速度计的不足,基于 SOI 硅片的抗高温、抗辐射、隔离性能好、寄生参数小以及低功耗的优点,本文设计了一种新型多梁凹槽压阻式加速度计,敏感梁采用变截面梁的检测结构,同时引进辅助梁与背面凹槽,通过对结构仿真分析,优化结构性能,在不增大芯片尺寸的情况下,能够有效提高结构灵敏度,且具有固有频率高与抗过载能力强等优点。

1 加速度计的理论分析

1.1 力学模型

压阻式加速度计是基于压阻效应^[15],通过悬臂梁上的压敏电阻实现对外加加速度载荷的测量。如图1所示,可将加速度计等效为1个质量块-弹簧-阻尼系统^[16]。其中,弹簧等价于悬臂梁,弹性系数为 k , m 、 t 、 c 则分别表示为质量块质量、时间与气体阻尼。当对传感器施加加速度 a 时,在应力 F 的作用下质量块会产生位移 x ,则系统的力平衡方程为:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

式(1)在零初始条件下两边同时进行拉氏变换,可得:

$$s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2 x(s) = a(s) \quad (2)$$

则其力学传递函数为:

$$H(s) = \frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (3)$$

1.2 工作原理

本文设计的多梁凹槽压阻式加速度计如图2所示,主要由变截面梁、辅助梁、背面凹槽质量块和硅基框架组成,其中变截面梁由窄梁和宽梁组成。设计的加速度计利用变截面梁作为敏感梁放大质量块的惯性力,提高加速度计灵敏度。辅助梁位于短窄梁两侧,可很好地抑制

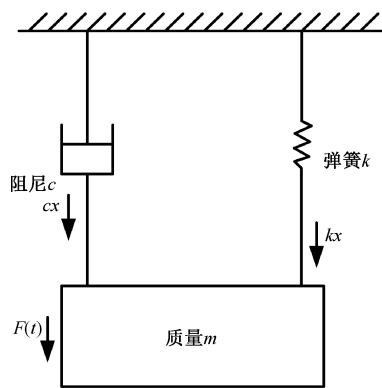


图1 加速度计的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of accelerometer

质量块因横轴加速度造成的扭转,增大敏感梁的刚度,提高结构的固有频率。同时质量块背部开槽腐蚀,使得梁质心与质量块质心的距离减小,提高结构的抗过载能力与可靠度。

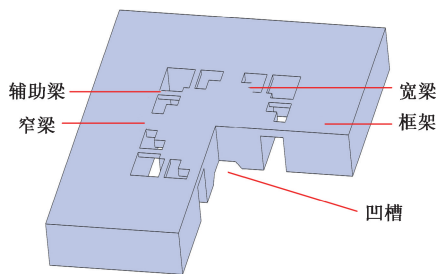


图2 加速度计结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the accelerometer structure

当加速度计受到Z轴向加速度载荷作用时,质量块会由于惯性力使得敏感梁发生形变,使得掺杂的压敏电阻阻值大小发生变化,通过测试压敏电阻阻值变化可得到加速度大小。由于阻值变化太小,难以用测阻表测量,所以通过惠斯通电桥将压敏电阻阻值变化转变为电压变化,通过电压变化判断加速度值^[17]。图3给出了惠斯通电桥测量示意图。

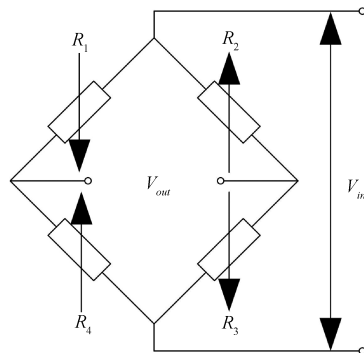


图3 惠斯通电桥测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Wheatstone bridge measurement

一般将压敏电阻按照图 3 所示对称放置,4 个压敏电阻初始阻值大小相等,均为 R_0 。当加速度计未受到加速度作用时,敏感梁上的 4 个压敏电阻阻值不变($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$),电桥输出电压为 0。当加速度计受到主轴加速度作用时,敏感梁发生弯曲而产生应力,压敏电阻 R_1 、 R_3 与 R_2 和 R_4 受到的应力方向相反^[18]。设 R_1 和 R_3 的阻值变化为 $R - \Delta R$, R_2 和 R_4 的阻值变化为 $R + \Delta R$, 则输出电压表示为:

$$V_{\text{out}} = \left(\frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) V_{\text{in}} = \frac{\Delta R}{R} V_{\text{in}} \quad (4)$$

压敏电阻阻值与应力之间的关系为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \quad (5)$$

式中: π_l 和 π_t 分别为纵向压阻系数与横向压阻系数; σ_l 和 σ_t 分别为电阻所受的纵向应力和横向应力; π_{44} 为 p 型单晶硅的剪切压阻系数。

灵敏度 S 定义为标准 V_{dd} 电压下,每单位输入加速度的作用下输出电压的变化^[19]。结合式(4)、(5)单轴加速度计的灵敏度可定义为:

$$S = \frac{V_{\text{out}}}{a} = \frac{\pi_{44}}{2a} (\sigma_l - \sigma_t) V_{\text{in}} \quad (6)$$

式中: V_{out} 为主轴满量程输出电压; a 为主轴满量程加速度。

2 加速度计的结构设计与仿真分析

2.1 敏感梁的设计

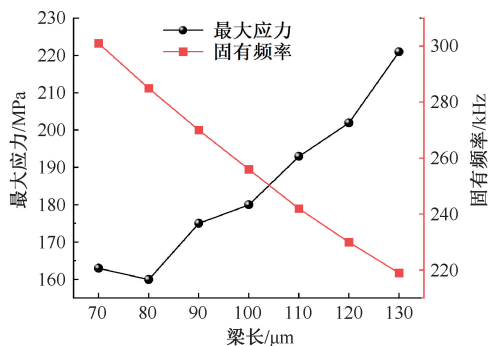
因为敏感梁结构参数会对加速度计的灵敏度、固有频率有显著的影响,在固定质量块尺寸、硅基框架尺寸的情况下,对敏感梁结构参数通过 ANSYS 进行优化分析。待加速度计结构尺寸确定后即进行静态、模态、谐响应与灵敏度分析。

敏感梁由窄梁和宽梁组成,窄梁的长、宽、厚分别为 100, 200, 50 μm , 宽梁长、宽、厚分别为 100, 400, 50 μm 。在不改变宽梁的结构参数下改变窄梁的长、宽、厚进行仿真优化,结果如图 4 所示。

由图 4 可以得出,敏感梁的最大应力随梁长的增加而增大,固有频率则与之相反。增大梁宽与梁厚可提高固有频率,但是会使得最大应力减小。出于对最大应力与固有频率的综合考虑,选取最大应力曲线与固有频率曲线的交点,得到敏感梁的结构尺寸。加速度计整体结构尺寸如表 1 所示。

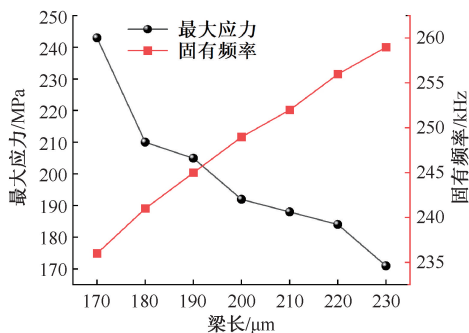
2.2 静力学仿真

静力学仿真用来计算在固定载荷作用下结构的应力、应变和位移,不考虑阻尼以及惯性的影响,也不考虑



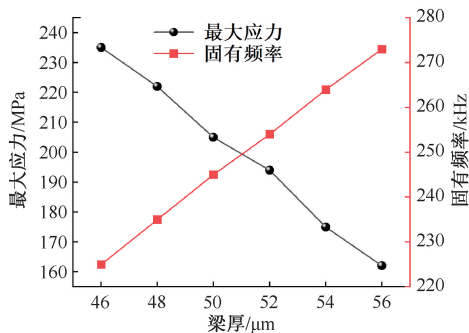
(a) 梁长不同(梁宽=200 μm , 梁厚=50 μm)

(a) Different beam lengths
(beam width=200 μm , beam thickness=50 μm)



(b) 梁宽不同(梁长=105 μm , 梁厚=50 μm)

(b) Different beam widths
(beam length=105 μm , beam thickness=50 μm)



(c) 梁厚不同(梁长=105 μm , 梁宽=190 μm)

(c) Different beam thicknesses
(beam length=105 μm , beam width=190 μm)

图 4 窄梁的不同尺寸下最大应力与固有频率关系曲线

Fig. 4 Curve of maximum stress vs. natural frequency under different sizes of narrow beams

载荷随时间的变化^[20]。通过 SOLIDWORKS 软件构建加速度计模型,利用 ANSYS 有限元仿真软件在主轴方向施加 150 000 g 的满量程加速度,同时对传感器结构施加完全约束,对传感器结构的应力与位移进行仿真分析。满量程加速度下传感器结构应力分布如图 5 所示,满量程加速度下传感器结构位移分布如图 6 所示。

从图 5 可得出,在满量程加速度下该加速度计结构的最大应力为 170.94 MPa,位于敏感梁根部,小于硅材料的断裂应力(硅的断裂应力为 340 MPa)。从图 6 可得出,结构的最大位移是 0.593 4 μm 。

表 1 加速度计的结构尺寸

Table 1 The structural dimensions of the accelerometer

结构名称	长/ μm	宽/ μm	厚(深)/ μm
宽梁	100	400	52
窄梁	105	190	52
辅助梁	205	50	31
质量块	800	800	300
凹槽	400	400	50

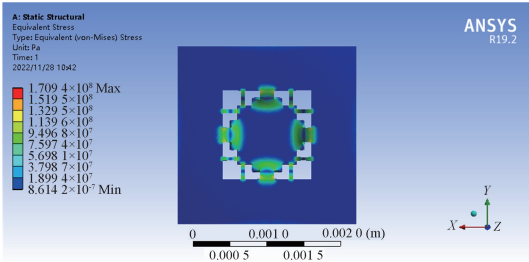


图 5 满量程加速度下应力分布

Fig. 5 Stress distribution at full-scale acceleration

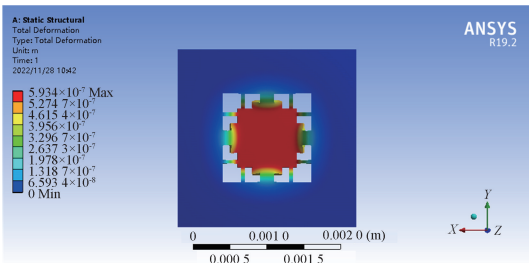


图 6 满量程加速度下位移分布

Fig. 6 Displacement distribution at full-scale acceleration

2.3 模态仿真与谐响应分析

固有频率是加速度计在结构设计中的一个重要参数。利用模态仿真可以确定传感器的固有频率、振型,同时也可以使设计的结构避免共振现象。利用 ANSYS 有限元仿真软件对该加速度计结构进行模态仿真,结果如图 7 所示,前四阶固有频率如表 2 所示。

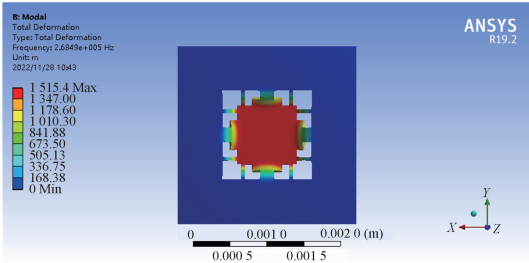


图 7 一阶模态仿真图

Fig. 7 First-order modal simulation diagram

表 2 模态分析结果

Table 2 Modal analysis results

模态	频率/ $(\times 10^5 \text{ Hz})$
一阶模态	2.684 9
二阶模态	3.620 6
三阶模态	3.621 2
四阶模态	10.286 0

根据表 2 可知,一阶固有频率约为 268 kHz,远低于其他高阶固有频率,所以设计的加速度计具有很好的频宽特性,能够有效地抗击环境的干扰,使得传感器稳定工作。同时,对传感器结构进行谐响应分析,在 ANSYS 对结构施加主轴方向的满量程加速度载荷,设置频率范围为 100~350 kHz。由图 8 可知,结构在 268 kHz 左右达到峰值,与模态仿真中的一阶固有频率基本一致,频响特性很好。

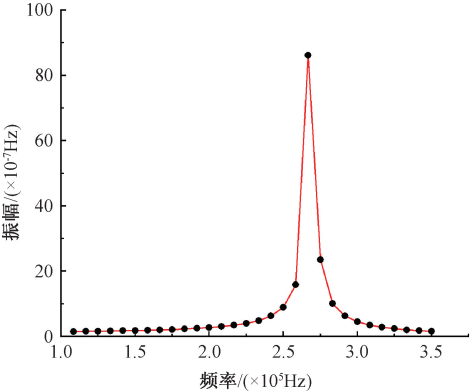


图 8 谐响应分析曲线

Fig. 8 Harmonic response analysis graph

2.4 压敏电阻设计

压敏电阻作为重要的信息捕获单元,是传感器中重要的组成部分,压敏电阻的位置关系到传感器灵敏度与横向灵敏度等重要参数^[21]。根据单晶硅的压阻效应,4 个压敏电阻均处于敏感梁根部位置。因为 U 型压敏电阻可以最大程度的利用敏感梁上的应力集中区,使得传感器的灵敏度得到提高。压敏电阻的具体阻值可通过式 (7) 确定。

$$R = R_s \frac{L}{W} \tag{7}$$

式中: R_s 是方块电阻阻值, L 是压敏电阻长度, W 是压敏电阻的宽度。

通过在敏感梁上设计路径可分析得到压敏电阻的长度与宽度,如图 9 所示。其中路径 A 是沿着压敏电阻长度方向,路径 B 沿着压敏电阻宽度方向。为了确保加速度计具有良好的线性度,需选取线性度较好的区域,如图 10,11 所示,其中 S_x 、 S_y 分别表示为结构在该路径上所受

的 X 向应力与 Y 向应力。确定将压敏电阻放置在距框架端 $10\text{ }\mu\text{m}$ 处,压阻长度为 $60\text{ }\mu\text{m}$,压阻宽度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

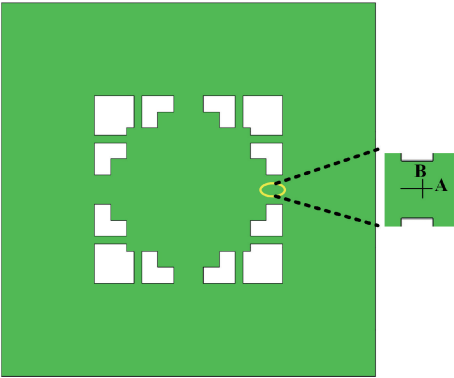


图 9 压敏电阻路径示意图

Fig. 9 Schematic of the varistor path

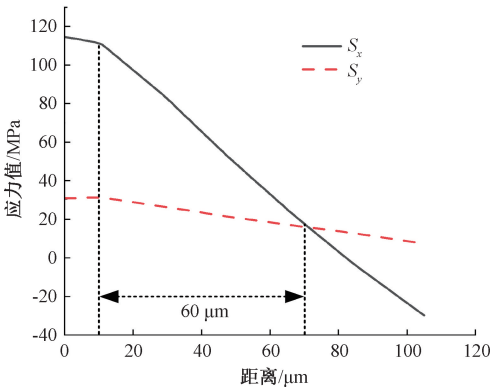


图 10 压敏电阻长度分析图

Fig. 10 Varistor length analysis diagram

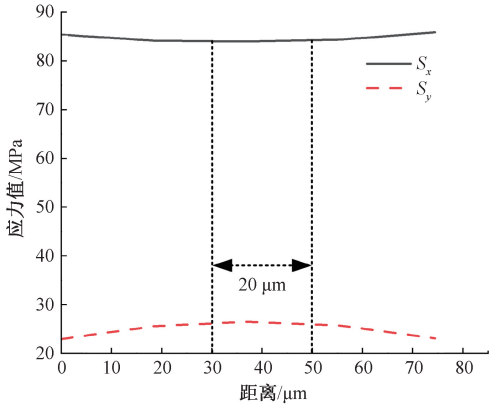


图 11 压敏电阻宽度分析图

Fig. 11 Varistor width analysis diagram

压敏电阻排布则如图 12 所示,当有外部冲击作用于加速度计时,质量块会在敏感轴方向上下移动,与敏感梁长度方向平行的压阻电桥臂 R_2 和 R_4 受拉,导致 R_2 和 R_4

的阻值增加;与敏感梁宽度方向平行的压阻电桥臂 R_1 和 R_3 受压,导致 R_1 和 R_3 的阻值减小。通过表面金属布线互连接形成惠斯通电桥,实现压敏电阻阻值变化转化为电压变化。

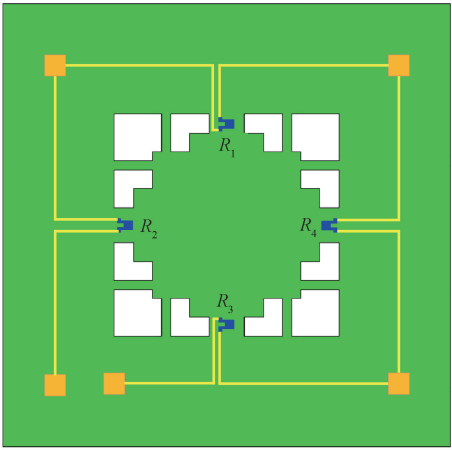


图 12 压敏电阻排布

Fig. 12 Varistor layout diagram

2.5 结构灵敏度分析

在传感器结构的主轴上施加不同的加速度载荷,利用 ANSYS 仿真得到的应力差计算得到输出电压,输出电压拟合曲线如图 13 所示,可得到设计的加速度计灵敏度为 $1.32\text{ }\mu\text{V/g}$ 。

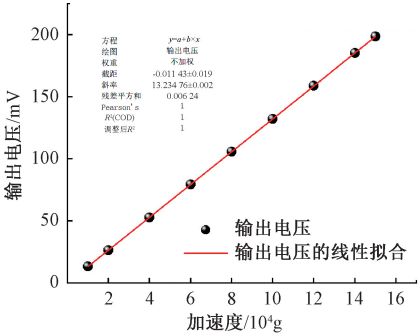


图 13 输出电压拟合曲线

Fig. 13 Output voltage fitting plot

目前,高 g 值压阻式加速度计应用十分广泛,国内外科研机构也开展了许多相关研究。结合部分产品与国内外科研成果,与文中的加速度计进行性能比较。如表 3 所示,本文设计的加速度计在整体性能上具有明显优势,在具有较高灵敏度的同时又有较高的固有频率。这表明在没有增加结构尺寸的情况下,可利用变截面梁有效提高灵敏度,同时通过辅助梁与背面凹槽的组合设计弥补了变截面梁刚度减小的不足,有效提升了加速度计的整体性能。

表3 加速度计性能指标比较

加速度计	量程/g	灵敏度/($\mu\cdot Vg^{-1}$)	固有频率/kHz
本文	150 000	1.32	268
文献[5]	100 000	0.54	445
文献[11]	100 000	0.72	107
文献[13]	100 000	0.488	408
文献[14]	150 000	X轴:4.37	105
		Y轴:4.44	

3 工艺流程设计

基于标准 MEMS 体微加工工艺设计了该加速度计的工艺流程,其中有离子注入、深硅刻蚀、阳极键合等工艺。考虑到高 g 值加速度计常应用于比较恶劣的环境,因此要有优良的可靠性,所以采用 SOI 晶圆进行设计加工。具体流程如图 14 所示。

1)对已无机清洗过的 SOI 晶圆进行热氧化生成 SiO₂ 层,作为后续工艺的保护层与停止层。

2)在步骤 1)的基础上刻蚀出压敏电阻条的位置,然后利用离子注入工艺进行硼掺杂,使顶层硅变为 p 型,掺杂浓度为 $1.4\times10^{18} cm^{-3}$ 。

3)在步骤 2)的基础上淀积一层 Si₃N₄ 薄膜,刻蚀出欧姆接触窗口,对其区域进行重掺杂,然后磁控溅射金属 Ti/Al/Au 和进行金属引线图案化工艺。

4)在步骤 3)的基础上利用反应离子刻蚀(reactive ion etching,RIE)正面刻蚀硅至埋氧层完成正面梁结构释放。

5)在步骤 4)的基础上进行背面加工,通过深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching,DRIE)刻蚀硅释放中心凹槽质量块。

6)在步骤 5)的基础上将背面的 SiO₂ 层去除后,将底层硅与高硼玻璃阳极键合。

4 结 论

本文基于 MEMS 技术设计了一种高性能多梁凹槽高 g 值压阻式加速度计,通过理论建模和仿真分析对结构性能参数进行优化。确定结构参数后通过 ANSYS 对加速度计进行仿真分析,分析结果如下:模态仿真分析确定固有频率约为 268 kHz,远低于其他高阶模态,具有良好的抗环境干扰能力;静力学仿真分析确定该结构在满量程下最大应力远低于硅的断裂应力,具有良好的可靠性;谐响应分析确定结构具有良好的频响特性;压敏电阻设计利用路径分析确保加速度计能够最大化的提高灵敏度以及具备良好的线性度;灵敏度分析确定在±150 000 g 的量程内该加速度计灵敏度高达 1.32 $\mu V/g$;最后设计

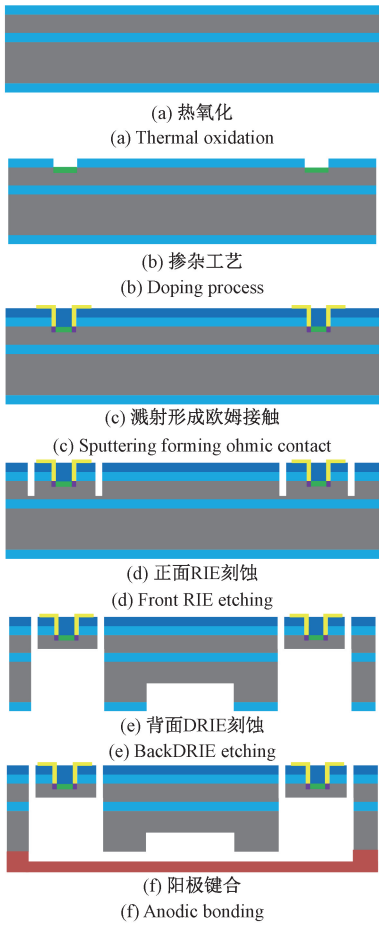


图 14 工艺流程图

Fig. 14 Processing flow diagram

了一套该加速度计的工艺制备流程,为下一步加速度计的制备提供了理论基础。从仿真结果来看该加速度计具有一定的性能优势,但缺乏实验结果支撑。后续将考虑流片验证,同时对压阻式加速度计灵敏度与固有频率相互制约的难题进行进一步研究。

参考文献

[1] HARI K, VERMA S K, PRAVEEN KRISHNA I R, et al. Out-of-plane dual flexure MEMS piezoresistive accelerometer with low cross axis sensitivity [J]. Microsystem Technologies, 2018, 24(5): 2437-2444.

[2] 杨宇新, 揣荣岩, 张冰, 等. 高固有频率压阻加速度敏感芯片的结构与特性分析[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 18-22.

YANG Y X, CHUAI R Y, ZHANG B, et al. Structure and characteristics analysis of high natural frequency piezoresistive acceleration sensitive chip[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(3): 18-22.

[3] 王岩, 赵剑, 刘蓬勃, 等. 基于 PZT 管支撑结构的三轴

- 加速度计设计及实验误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 91-98.
- WANG Y, ZHAO J, LIU P B, et al. Design and experimental error analysis of triaxial accelerometer based on PZT tube support structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 91-98.
- [4] 许高斌, 王亚洲, 陈兴, 等. 纳米压电梁谐振式加速度计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 149-155.
- XU G B, WANG Y ZH, CHEN X, et al. Nanopiezoelectric beam resonant accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 149-155.
- [5] JIA C, MAO Q, LUO G, et al. Novel high-performance piezoresistive shock accelerometer for ultra-high-g measurement utilizing self-support sensing beams[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(8): 085001.
- [6] 李开富, 蒋婷, 郭小伟, 等. 三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 193-201.
- LI K F, JIANG T, GUO X W, et al. Design of three-mass MEMS triaxial capacitive accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 193-201.
- [7] 许高斌, 花翔, 杜林云, 等. 新型高 g 值压阻式加速度计设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(10): 42-46, 83.
- XU G B, HUA X, DU L Y, et al. Design of new high g value piezoresistive accelerometer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(10): 42-46, 83.
- [8] HAN J, ZHAO Z, NIU W, et al. A low cross-axis sensitivity piezoresistive accelerometer fabricated by masked-maskless wet etching[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 283: 17-25.
- [9] XU Y, ZHAO L, JIANG Z, et al. Analysis and design of a novel piezoresistive accelerometer with axially stressed self-supporting sensing beams[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 247: 1-11.
- [10] 张顺星, 周吴, 卢鹏, 等. 考虑横向灵敏度的三轴加速度传感器标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 33-40.
- ZHANG SH X, ZHOU W, LU P, et al. Research on calibration method of triaxial accelerometer considering lateral sensitivity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 33-40.
- [11] 张华. MEMS 高 g 值加速度计的结构分析与电路设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- ZHANG H. Structural analysis and circuit design of MEMS high-g value accelerometer[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [12] WUNG T S, NING Y T, CHANG K H, et al. Vertical-plate-type microaccelerometer with high linearity and low cross-axis sensitivity [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 222: 284-292.
- [13] SHI Y B, ZHAO Y Q, FENG H ZH, et al. Design, fabrication and calibration of a high-g MEMS accelerometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 733-742.
- [14] 杨雨君, 王鹏, 陈曼龙, 等. 高 g 值压阻式加速度传感器仿真设计[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6): 78-81, 85.
- YANG Y J, WANG P, CHEN M L, et al. Simulation design of high g value piezoresistive accelerometer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(6): 78-81, 85.
- [15] 赵源. 压阻式加速度传感器的设计与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- ZHAO Y. Design and simulation of piezoresistive accelerometer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [16] 杨宇新. 高过载高固有频率压阻式加速度传感器芯片研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- YANG Y X. Research on piezoresistive accelerometer chip with high overload and high natural frequency[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [17] 林立娜, 梁庭, 李鑫, 等. 基于 SOI 的低横向灵敏度压阻式加速度计的设计[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(6): 466-472.
- LIN L N, LIANG T, LI X, et al. Design of low lateral sensitivity piezoresistive accelerometer based on SOI[J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(6): 466-472.
- [18] DONG C, YE Y, LIU X, et al. The sensitivity design of piezoresistive acceleration sensor in industrial IoT [J]. IEEE Access, 2019, 7: 16952-16963.
- [19] 赵思晗, 石云波, 赵永祺, 等. 一种低横向效应的压阻式加速度传感器设计[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(8): 577-582.
- ZHAO S H, SHI Y B, ZHAO Y Q, et al. Design of piezoresistive accelerometer with low transverse effect[J]. Micronano Electronics, 2018, 55(8): 577-582.
- [20] 陈军. 基于 ANSYS 的压电俘能器的优化设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- CHEN J. Research on optimal design of piezoelectric

energy trap based on ANSYS [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.

- [21] 肖威盛, 卞玉民. 一种高 g 值压阻式加速度传感器[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(4): 261-267, 284.

XIAO X SH, BIAN Y M. A high g value piezoresistive accelerometer [J]. Micronano Electronic Technology, 2017, 54(4): 261-267, 284.

作者简介



张宇, 2019 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 加速度计设计。

E-mail: zy15755123625@163.com

Zhang Yu received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2019.

Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes MEMS accelerometer design.



许高斌(通信作者), 1993 年于合肥工业大学获得学士学位, 2001 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2004 年于东南大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为 MEMS 传感器的设计、制造、封装与可靠性, 多传感模块集成与

信息融合技术。

E-mail: gbxu@huft.edu.cn

Xu Gaobin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1993, M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2001 and Ph. D. degree from Southeast University in 2004. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include MEMS sensor design, manufacturing, packaging and reliability, multi-sensor module integration and information fusion technology.