

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2002903

纳米压电梁谐振式加速度计*

许高斌 王亚洲 陈 兴 马渊明 张文晋
(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院 安徽省 MEMS 工程技术研究中心 合肥 230009)

摘 要:在现有的谐振式加速度计中,因具有较小的谐振频率和较低的灵敏度而无法应用于高精度制导和空中姿态微调等方面。为此,设计出了一种基于纳米压电梁的谐振式加速度计,采用上下双端音叉谐振器(谐振梁采用直径为 500 nm 的氧化锌)与中心质量块、左右支撑梁对称分布,实现了低交叉耦合和高灵敏度输出。分析并建立该加速度计结构的数学模型,在 ANSYS WORKBENCH 仿真平台下对其进行分析,上下谐振器的谐振频率分别为 2. 987 93 和 2. 987 29 MHz,在该谐振频率下,X 方向的位移要比另外 Y、Z 两个方向高两个数量级以上;在 2 000g 加速度载荷作用下,该加速度计最大应力为 241. 46 MPa;在±10g 的设计量程内,该结构的灵敏度为 1. 133 11 kHz/g。基于 SOI 技术,设计纳米压电梁谐振式加速度计的工艺流程以验证其正确性。
关键词:压电驱动及其检测;纳米压电梁;低交叉耦合;高灵敏度
中图分类号: TP212;TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 3030

Nano piezoelectric beam resonant accelerometer

Xu Gaobin Wang Yazhou Chen Xing Ma Yuanming Zhang Wenjin
(Micro Electromechanical System Research Center of Engineering and Technology of Anhui Province, School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:In the existing resonant accelerometer, it cannot be used in high-precision guidance and air attitude fine-tuning because of its small resonance frequency and low sensitivity. For this reason, a resonant accelerometer based on nano piezoelectric beam is designed, which uses the upper and lower tuning fork resonators (the resonant beam uses the zinc oxide with a diameter of 500 nm) to distribute symmetrically with the central mass block and the left and right support beams, thus realizing low cross coupling and high sensitivity output. The mathematical model of the accelerometer structure is analyzed and established in ANSYS. It is analyzed under the simulation platform of workbench: the resonance frequencies of the upper and lower resonators are 2. 987 93 and 2. 987 29 MHz respectively, and the displacement in the X direction under the resonance frequency is two orders of magnitude higher than that in the other Y and Z directions; the maximum stress of the accelerometer under the action of 2 000g acceleration load is 241. 46 MPa; in the design range of ±10g, the sensitivity of the structure is 1. 133 11 kHz/g. Based on SOI technology, the process flow of nano piezoelectric beam resonant accelerometer is designed to verify its correctness.
Keywords:piezoelectric drive and its detection; nano piezoelectric beam; low cross coupling; high sensitivity

0 引 言

微机械加速度计尺寸小、制造成本低,已经开发并广泛应用于汽车动力气囊、车辆稳定系统、导航和制导系统等中。基于传感原理,微机械加速度计可分为电容式、压

阻式和谐振式等。相比压阻式和电容式加速度计,谐振式加速度计可将加速度信号直接转换为频率的变化量,通过简化数字电路和消除模拟信号的干扰来提高输出精度以及可靠性^[1]。
谐振器是微机械谐振式加速度计的重要部件,根据谐振器的材料特性,可以分为两类:压电材料和非压电材

料^[2]。硅作为非压电材料,由于本身机械损耗较大,导致品质因数 Q 降低^[3];石英作为压电材料,制作成本较高,由于工艺难兼容的问题,导致其无法达到所匹配的精度,造成输出误差较大以及输出灵敏度较低^[4]。而氧化锌具有很高的谐振频率和良好的压电特性,有望将其应用于谐振器的材料^[5-6]。近年来,国内外基于碳纳米管、单晶硅等纳米材料研制的纳米梁谐振器受到广泛关注。2004 年 Sazonova 等制作了一种可调谐的碳纳米管谐振器,谐振子为一根长约 $1\ \mu\text{m}$ 、直径 $1\sim 4\ \text{nm}$ 的碳纳米管,其谐振频率为 $3\sim 200\ \text{MHz}$, Q 值为 $4\sim 200$,但难以应用于检测微小加速度的传感器中;2007~2008 年, Feng 等^[7]和 Yang 等^[8]制作了单晶硅纳米梁谐振器,其谐振频率为 $30\sim 200\ \text{MHz}$, Q 值达到了 $500\sim 2\ 500$,但面临着工艺复杂、难兼容的问题;2009 年,清华大学和中北大学设计了一种厚度为 $500\ \text{nm}$ 的纳米线谐振器,灵敏度在理论上可达到 $2.5\ \text{kHz/g}$ ^[9],由于其纳米线附在支撑梁上导致 Q 值较低并且该谐振器只停留在实验阶段,没能实现工程化应用。此外,由于国外在核心技术上存在垄断与封锁,因此,亟需高精度的谐振式加速度计。

本文对加速度计的整体结构进行优化设计,采用氧化锌作为谐振器材料,有效地提高了谐振器的谐振频率,具有频响高、信噪比大的特点;通过设计上下对称式分布实现差分式检测,不仅使灵敏度加倍,还降低温度共模以及非线性误差;通过设计左右两端支撑梁有效的降低交叉灵敏度,增强抗干扰能力^[10]。利用有限元仿真软件 ANSYS WORKBENCH 对关键结构进行仿真分析,明确了各部分结构对整体性能的影响程度,对高精度的惯性导航和导弹制导等国防领域具有指导意义和参考作用。

1 谐振器的理论分析

1.1 力学模型

谐振式加速度计的核心部件是谐振器,将外部施加的加速度转换成谐振器的谐振频率变化量。如图 1 所示,谐振式加速度计可以简化为一个等效的质量-弹簧-阻尼的二阶系统。其中, m 、 k 、 c 、 t 分别表示为等效质量、等效刚度、阻尼系数、时间。当对底部施加加速度 a 时,质量块产生位移 x ,此时对质量块进行受力分析,可建立其动力方程为:

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

对式(1)两边同时进行拉普拉斯变换,再进一步处理得到式(2)。

$$\frac{1}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} = \frac{x(s)}{a(s)} \quad (2)$$

式中: s 、 ω 、 ξ 为分别表示拉普拉斯算子、双端音叉谐振器

的谐振频率、阻尼比。分析式(2)可得,当外界施加一个加速度时,谐振式加速度计等效刚度 k 的改变会使加速度计中双端音叉谐振器的谐振频率改变,所以通过检测双端音叉的谐振频率变化值即能得到加速度值,从而得出灵敏度。

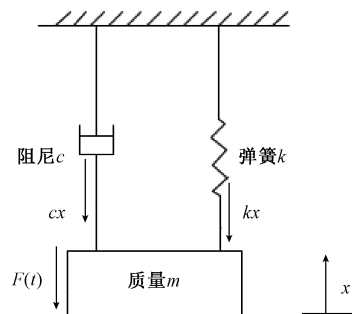


图 1 加速度计的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of accelerometer

1.2 工作原理

纳米压电梁谐振式加速度计整体结构如图 2(a) 所示,谐振器采用压电驱动及其检测方式,如图 2(b) 所示,谐振器上的驱动电极使氧化锌纳米压电梁呈面内对称模态,如图 2(c) 所示,可以平衡内应力和扭矩,提高 Q 值。工作原理为当在驱动电极上施加交流电压时,由于纳米压电谐振梁具有压电效应,纳米压电谐振梁产生横向应力使其振动,当交流电压的频率等于谐振梁的谐振频率时,谐振梁产生谐振。谐振器在谐振状态下工作时,质量块受到的加速度转换成等效惯性力,该等效惯性力会通过质量块传递到与之相连的双端音叉谐振器(DEF),上下两个 DEF 分别受到拉力或压力。其中,受到拉力的谐振梁谐振频率增大,受到压力的谐振梁谐振频率减小,通过检测电极进行压电检测,可得到 DEF 的谐振频率变化量,从而计算出施加加速度值的大小。

2 整体结构设计与分析

纳米压电梁谐振式加速度计总体结构如图 3 所示,核心部件包括上下两个基于氧化锌纳米压电梁的双端音叉谐振器、质量块、固定锚点、两个支撑梁以及外框。谐振器为单端固定即固定端与锚点相连,另一端与质量块相连。支撑梁两端分别和质量块、外框相连。 Y 轴为加速度计的敏感轴方向,而 X 轴为双端音叉的横向振动方向。在传统的微机械谐振式加速度计基础上,主要从激励/检测方式和改变刚度方式这两方面进行研究改进。氧化锌作为谐振梁的材料具有较高的 Q 值和压电特性,所以采用压电激励/压电检测的方式,并且通过轴向应力改变振梁的等效刚度。采用这种改变等效刚度方式的谐

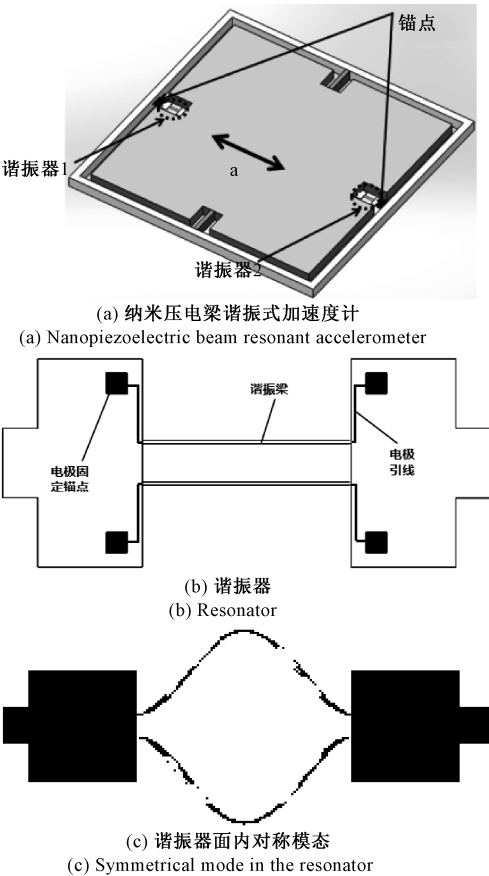


图 2 工作原理
Fig. 2 Working principle diagram

振式加速度计结构相对简单,但是 DETF 与质量块连接在一起,会造成引入的残余应力以及温度误差较大。

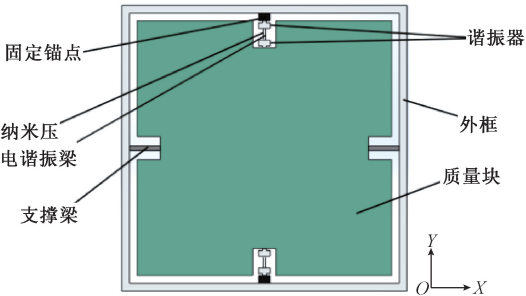


图 3 加速度计整体结构正面示意图
Fig. 3 Front view of overall structure of accelerometer

在所设计结构中,通过采取 DETF 上下对称分布来实现差频检测,从而有效的降低温度共模误差和提高纳米压电梁谐振式加速度计的结构灵敏度,DETF 谐振梁的谐振频率变化差值作为加速度计的最终输出。此外,双端音叉谐振器采用单端固定的等效刚度^[11]可定义为:

$$k = 198.473 \frac{EI}{L^3} + 4.878 \frac{F}{L}$$

(3)

式中: E 、 I 、 L 和 F 分别为杨氏模量、截面惯性矩、谐振梁的长度和双端音叉轴向受力的大小。从式(3)中可以看出,该等效刚度是与双端音叉轴向受力成正比关系,即受力可改变等效刚度,双端音叉谐振梁的谐振频率受影响。

在对双端音叉谐振器结构设计时,当谐振梁厚度分别为 0.1、0.5、1 μm 时,对纳米压电梁谐振式加速度计的灵敏度进行仿真分析,图 4 所示为灵敏度与谐振梁结构参数的关系。

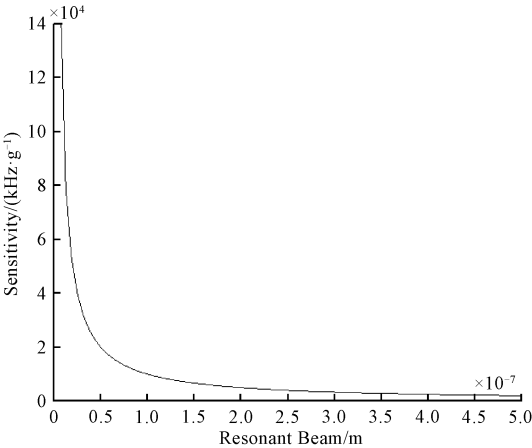


图 4 灵敏度与谐振梁结构参数

Fig. 4 Sensitivity and structural parameters of resonance beam

从图 4 可以看出,当谐振梁的厚度 $<500\text{ nm}$ 时,加速度计的灵敏度会随着谐振梁厚度的减小而显著提高。因此,理论分析选用 500 nm 的厚度。

在对纳米压电梁谐振式加速度计结构设计中,支撑梁的形状对其性能有着重要的影响。在加工工艺能实现以及结构简单的前提下,考虑支撑梁结构有利于总体器件的微型化这一点,采用支撑梁的形式为直梁。直梁在交叉方向即 X 轴方向的刚度系数为:

$$k = \frac{EW^3h}{L^3}$$

(4)

式中: E 表示为弹性模量; W 、 h 、 L 、分别表示为支撑梁的宽度、厚度、长度。

在设计支撑梁尺寸中,需要确保支撑梁在检测方向具有较软的刚度,其它方向具有很大的刚度。纳米压电梁谐振式加速度计需实现低交叉灵敏度、抗干扰能力强,而综合性能较好的直梁结构基本能达到以上要求。

综合上述,利用有限元分析软件 ANSYS 对纳米压电梁谐振式加速度计进行了建模和仿真,对结构参数进行了优化设计,加速度计结构参数如表 1 所示。

表 1 纳米压电梁谐振式加速度计结构的关键参数

Table 1 Title key parameters of nano piezoelectric beam resonant accelerometer

参数	数值
音叉谐振器长度/ μm	30
音叉谐振器直径/ μm	0.5
音叉谐振器间距/ μm	6
支撑梁长度/ μm	80
支撑梁宽度/ μm	30
支撑梁厚度/ μm	12
总体长度/ μm	740
总体宽度/ μm	740
氧化锌密度/ $(\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3})$	5 606
氧化锌杨氏模量/GPa	210
氧化锌泊松比	0.3

3 整体结构仿真与分析

3.1 无加速度载荷的模态分析

通过对加速度计进行无加速度载荷的模态分析,可确定结构的固有频率和相应的振动模态^[12-14]。在无加速度载荷的模态分析中,可得出谐振器工作模态的阶数及其固有频率,从而分析结构的振动平稳性。通过 ANSYS WORKBENCH 对谐振器的工作模态进行了分析,其中上双端音叉谐振器振动工作模态为第 38 阶模态(图 5(a)),下双端音叉谐振器振动工作模态为为第 37 阶(图 5(b))。原本完全对称的结构由于在仿真环境中网格划分不一等原因会导致谐振频率出现一定的误差。

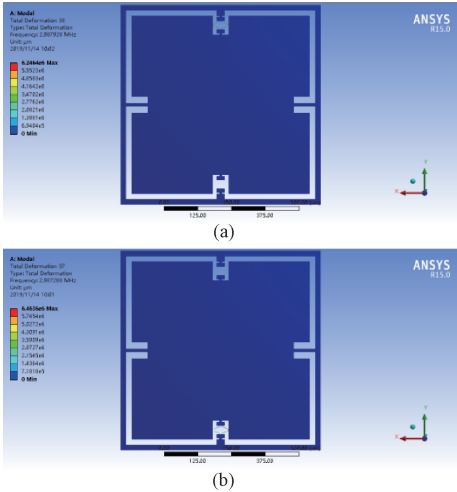


图 5 无加速度下整体结构的模态分析

Fig. 5 Modal analysis of the whole structure without acceleration

从图 5 可以看出,上双端音叉谐振器的工作频率为

2.987 93 MHz,下双端音叉谐振器的工作频率为 2.987 288 MHz,可以得出,纳米压电梁谐振式加速度计空载时的输出即上下谐振器谐振频率差为 640 Hz。所以,通过施加相同频率的驱动力在氧化锌纳米压电梁上,可保证双端音叉工作在振动工作模态上。

3.2 谐响应分析

谐响应分析是一种可确定结构在已知频率的正弦载荷作用下结构响应的时域分析方法,其响应主要包括位移、应力和应变,确保结构避免发生共振响应^[14-15]。在纳米压电梁谐振式加速度计的谐响应仿真中,分别在上下音叉谐振器施加沿 X 轴按正弦变化的力,设置该力的大小为 1 μN 是用以模拟实际的驱动力。对于上音叉谐振器,为了避免受其他模态的干扰,设置扫频范围为 2.5~4.5 MHz,该频率将上下谐振器的第 37 阶模态和第 38 阶工作模态的谐振频率包括在内,是为了更好地确定整体结构的稳态响应,此外,在仿真过程中观测和记录上谐振器分别沿 X、Y 和 Z 3 个方向的位移情况。如表 2 所示,当施加驱动力于上谐振器时,其在 X 方向的位移远大于 Y 和 Z 方向的位移,此时对应的频率和最大振幅分别为 2.9 MHz 和 $1.267\times10^{-2}\mu\text{m}$ 。同时,对下谐振器采取相同的方式进行谐响应分析,结果如表 3 所示,当施加驱动力于下谐振器时,其在 X 方向的位移远大于 Y 和 Z 方向的位移,此时对应的频率和最大振幅分别为 2.9 MHz 和 $1.2597\times10^{-2}\mu\text{m}$ 。

表 2 上谐振器结构谐响应幅频特性

Table 2 Title amplitude frequency characteristics of upper resonator structure harmonic response

驱动力施加位置	驱动力施加值/ μN	位移方向	最大幅值/ μm	f/MHz
上谐振器外侧	1	上谐振器 X 方向	1.267×10^{-2}	2.9
		上谐振器 Y 方向	9.541×10^{-8}	2.9
		上谐振器 Z 方向	9.007×10^{-5}	2.9
		下谐振器 X 方向	2.427×10^{-8}	2.9
		下谐振器 Y 方向	3.927×10^{-9}	2.9
		下谐振器 Z 方向	2.390×10^{-6}	2.9

表 3 下谐振器结构谐响应幅频特性

Table 2 Title amplitude frequency characteristics of lower resonator structure harmonic response

驱动力施加位置	驱动力施加值/ μN	位移方向	最大幅值/ μm	f/MHz
下谐振器外侧	1	上谐振器 X 方向	2.460×10^{-8}	2.9
		上谐振器 Y 方向	1.009×10^{-10}	2.9
		上谐振器 Z 方向	1.883×10^{-6}	2.9
		下谐振器 X 方向	1.260×10^{-2}	2.9
		下谐振器 Y 方向	1.251×10^{-7}	2.9
		下谐振器 Z 方向	6.318×10^{-5}	2.9

3.3 极限过载仿真与分析

由于纳米压电梁谐振式加速度计将应用于制导和空中姿态微调等方面,会处在高过载环境。为了验证该设计结构是否在高过载即极限加速度环境中具有抗过载能力,利用 ANSYS WORKBENCH 仿真平台做极限过载仿真与分析。在仿真过程中,对加速度计在 X、Y 和 Z 轴分别施加加速度载荷,其载荷大小为 2 000g,得出加速度计所受的最大应力大小以及受到最大应力的位置。应力分布图分别如图 6~8 所示,X、Y 和 Z 轴方向的最大应力分别为 1.401 241.46 和 44.891 MPa,均远小于硅和氧化锌材料的极限强度,最大应力分别发生在支撑梁和谐振梁的根部位置。因此,设计的纳米压电梁谐振式加速度计具有很高的抗过载能力。

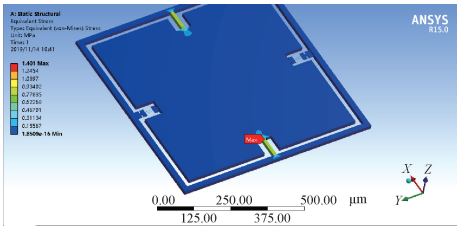


图 6 X 轴 2 000g 载荷下仿真结果

Fig. 6 Simulation results under X-axis 2 000g load

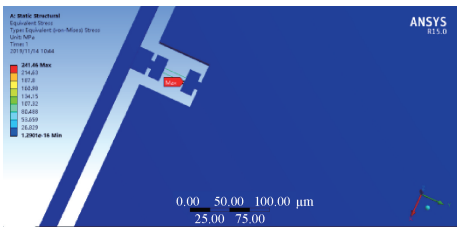


图 7 Y 轴 2 000g 载荷下仿真结果

Fig. 7 Simulation results under Y-axis 2 000g load

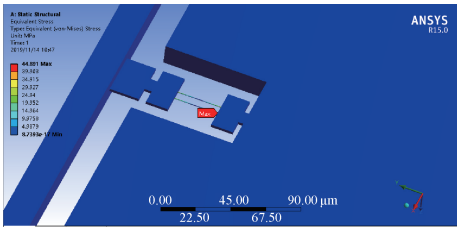


图 8 Z 轴 2 000g 载荷下仿真结果

Fig. 8 Simulation results under Z-axis 2 000g load

3.4 灵敏度仿真与分析

对谐振式加速度计施加不同的加速度值,加速度计的工作模式会随之发生变化。所以,在对加速度计进行灵敏度仿真时,先施加不同的加速度值(±10g 范围内)再进行模态分析。定义竖直向下为加速度的正方向,Δf 为

上下谐振器频率差,仿真结果对应的拟合直线如图 9 所示。

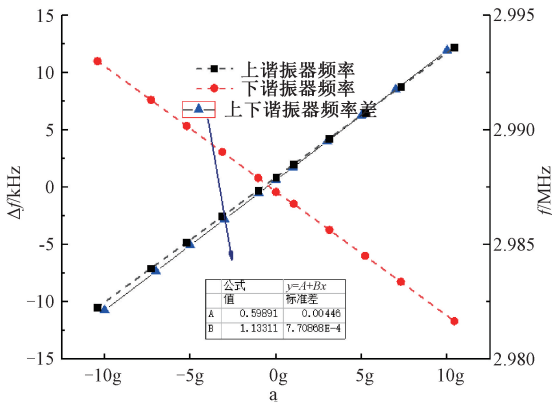


图 9 纳米压电梁谐振式加速度计标度因数拟合直线

Fig. 9 Scale factor fitting line of nano piezoelectric beam resonant accelerometer

图 9 中的拟合结果显示,加速度值分别与上谐振器谐振频率成正比例关系,与下谐振器谐振频率成反比例关系,差分输出的方式将加速度计的最终输出加倍;加速度值在±10g 的范围内,上、下谐振器谐振频率差 Δf 做为加速度计的最终输出,则加速度计的灵敏度为 1.133 11 kHz/g;验证出加速度计的空载频率为 640 Hz。另外,当加速度值从-1g 向 0g 递进时,会出现上、下谐振器的谐振频率值相等,说明此时两谐振器间容易出现相互耦合,但由于设计的结构中谐振器对称分布于质量块的上下两端,相隔较远,并且通过上述谐振的分析也可知结构出现耦合现象的几率很小,这也更加说明该结构设计的优势,进一步凸显结构的完善性。

4 制备工艺

设计了纳米压电梁谐振式加速度计加工工艺流程图,如图 10 所示。取一片双抛 SOI 硅片,对其表面进行光刻,显影暴露出质量块和谐振器区域,如图 10(a)所示;对上述硅片表面高温加热,使表面生长一层二氧化硅。使用光刻法对二氧化硅层进行图案化,然后采用湿法刻蚀二氧化硅形成绝缘层,如图 10(b)所示;在图 10(c)所示的步骤中,采用反应溅射的方式将氧化锌沉积在硅层表面,形成压电薄膜。将压电薄膜置于掩模版下光刻进行图案化,刻蚀形成谐振梁;在图 10(d)所示的步骤中,使用电子束沉积法在二氧化硅层表面沉积金属电极铂;再对双抛 SOI 硅片的衬底层整体减薄,并且刻蚀下方的二氧化硅层与硅结构层部分,最终形成谐振器,其中采用反应离子刻蚀二氧化硅,深反应离子刻蚀硅结构层。然后对上述硅片进行背面加工,利用垂



直蚀刻-深反应离子蚀刻系统刻硅,最终形成支撑梁,如图 10(e)所示。通过所示的加工工艺步骤完成纳米压电梁谐振式加速度计的制造。

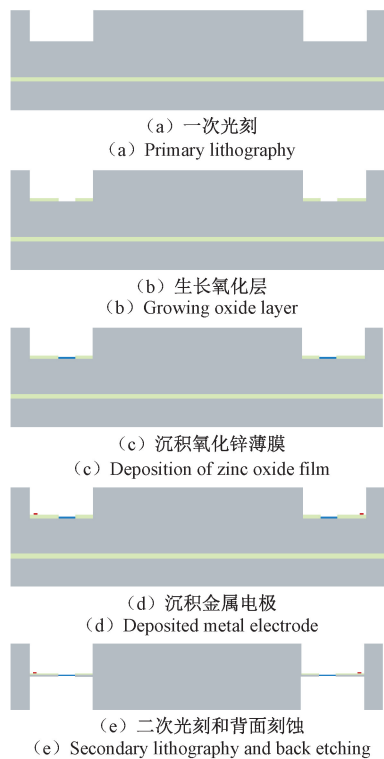


图 10 工艺流程
Fig. 10 Process flow chart

5 结 论

本文基于氧化锌纳米压电梁设计了一种应用于导弹等飞行器中制导和空中姿态微调等方面的高精度谐振式加速度计,通过理论建模和仿真分析对加速度计的参数进行设计。结合相关参数和利用有限元模型,分析结果如下:模态分析确定上下双端音叉谐振器工作模态的阶数及其谐振频率(38 阶,2.987 93 MHz 和 37 阶,2.987 29 MHz),并与主要干扰模态保持足够大的频率,以确保谐振器的正常工作;谐响应分析确定谐振梁驱动方向为 X 方向,其最大位移远大于 Y 和 Z 方向(两个数量级以上),具有优良的抗干扰能力;极限过载分析确定结构在 X 、 Y 和 Z 3 个方向分别施加 2 000g 的加速度载荷下的最大应力均小于硅以及氧化锌材料许用应力,具有抗冲击能力;灵敏度分析确定结构在 $\pm 10g$ 的量程内,该加速度计的灵敏度高达 1.133 11 kHz/g。并且,设计了一套纳米压电梁谐振式加速度计加工工艺流程图,为下一步的工作指明了方向。

参考文献

[1] 李晶,樊尚春,李成,等. 谐振式硅微机械加速度计研究进展[J]. 传感器与微系统,2011,30(12):4-7.
LI J, FAN SH CH, LI CH, et al. Research progress of silicon resonant MEMS accelerometer [J]. Transducer and Microsystem Technology, 2011, 30(12):4-7.

[2] 高杨,雷强,赵俊武,等. 微机械谐振式加速度计的研究现状及发展趋势[J]. 强激光与粒子束,2017,29(8):1-14.
GAO Y, LEI Q, ZHAO J W, et al. Research status and development trend of micro-mechanical resonance accelerometer [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(8):1-14.

[3] ALESSANDRO C, CLAUDIA C, ALBERTO C, et al. A differential resonant micro accelerometer for out-of-plane measurements [J] Procedia Engineering, 2014, 87: 640-643.

[4] 许高斌,李新,陈兴,等. 三轴电容式微加速度计接口 ASIC 设计[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7):978-987.
XU G B, LI X, CHEN X, et al. Design of interface ASIC for the capacitive 3-axis micro-accelerometer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7):978-987.

[5] WANG ZH L, SONG J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. Science, 2006, 312(5771):242-246.

[6] 刘赛赛,王立峰. 氧化锌纳米线振动问题研究[J]. 动力学与控制学报,2017,15(4):373-380.
LIU S S, WANG L F. Vibration of zinc oxide nanowires[J]. Journal of Dynamics and control, 2017, 15(4):373-380.

[7] FENG X L, HE R R, YANG P D, et al. Phase noise and frequency stability of very-high frequency silicon nanowire nanomechanical resonators [C]. Transducers 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007:327-330.

[8] YANG P D, FENG X L, HE R R, et al. Self-transducing silicon nanowire electromechanical systems at room temperature [J]. Nano Letters, 2008, 8 (6): 1756-1761.

[9] CHEN G W, ZHU R. Silicon micromachined resonant accelerometer based on ZnO nanowire [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(6):1279-1285.

[10] 段晓敏,撒子奇,闫捷,等. 左右分布式高灵敏硅微谐振加速度计结构设计[J]. 半导体技术,2018,43(3):171-176.
DUAN X M, HAN Z Q, YAN J, et al. Design of the high sensitivity silicon micro resonant accelerometer



- structure based on two-wing distribution method [J]. Semiconductor Technology, 2018, 43(3): 171-176.
- [11] 陈卫卫. 硅微谐振式加速度计结构设计与分析[D]. 江苏: 东南大学, 2012.
- CHEN W W. Structure design and analysis of micromechanical silicon resonant accelerometer [D]. Jiangsu: Southeast University, 2012.
- [12] 寇志伟, 刘俊, 曹慧亮, 等. MEMS 环形谐振陀螺的结构设计与振动特性分析[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(2): 275-280.
- KOU ZH W, LIU J, CAO H L, et al. Structure design and vibration characteristics analysis of MEMS vibrating ring gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(2): 275-280.
- [13] 樊尚春, 乔少杰, 张轩. 谐振式硅微结构压力传感器非线性振动特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1670-1673.
- FAN SH CH, QIAO SH J, ZHANG X. Investigation on nonlinear vibration characteristics of resonant silicon microstructure pressure sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1670-1673.
- [14] ZHAO L, DAI B, YANG B, et al. Design and simulations of a new biaxial silicon resonant micro-accelerometer [J]. Microsystem Technologies, 2016, 22(12): 2829-2834.
- [15] LI Y, GUO ZH SH, QU Y Y, et al. Design and simulations of a resonant accelerometer [J]. Microsystem

technologies, 2018, 24(3): 1631-1641.

作者简介



许高斌, 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 CMOSMEMS、MEMS/NEMS 器件与集成制备技术、微纳传感器与执行器及片上集成电路等。

E-mail: gbxu@hfut.edu.cn

Xu Gaobin 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 CMOS MEMS, MEMS devices and collections fabrication technology, micro nano sensors and actuators, on-chip integrated circuits, etc.



王亚洲, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为工业装备振动监控 MEMS 加速度传感器研发。

E-mail: 932765584@qq.com

Wang Yazhou is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include research and development of MEMS acceleration sensor for vibration monitoring of industrial equipment.