

DOI: 10.3901/JME.2008.09.200

# 微型高过载加速度传感器的加工与测试\*

石云波 祁晓瑾 刘俊 孟美玉

(中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 针对特殊场合的测试要求, 设计了四端全固支的高过载梁岛结构加速度传感器, 结构中采用在质量块背部氢氧化钾腐蚀的方法, 减小质量块的质量, 及其与梁中性面的相对距离, 使梁岛式结构与平膜式结构的优点得到有效结合, 结构加工工艺简单可行。利用霍普金森冲击校准装置进行冲击加速度动态特性校准, 试验结果分析表明, 被测微加速度传感器的灵敏度为  $0.71 \mu\text{V/g}$ , 与理论值基本吻合。结构受到  $200\ 000g$  冲击后完好且输出信号正常, 能有效地满足高冲击、强烈振动场合的特殊测试要求。

**关键词:** 高过载 加速度传感器 测试

**中图分类号:** TP212.9

## Fabrication and Test of Micro High Overloading Acceleration Sensor

SHI Yunbo QI Xiaojin LIU Jun MENG Meiyu

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology,  
North University of China, Taiyuan 030051)

**Abstract:** Aiming at testing in special situation, a high-overload piezoresistive acceleration sensor with four-end fixed beam-island structure is designed. The mass of the tower and the distance between the center of tower and beam is decreased by KOH etch at the back of the mass, which combines the merits of beam-island structure and beam structure. The processing technique is simple and feasible. Hopkinson impact equipment is used to calibrate the dynamic characteristic of impact acceleration. The test result indicates that the sensitivity of the micro acceleration sensor is  $0.71\mu\text{V/g}$ , basically tallying with the theoretical value. The output signal is still normal when the structure has suffered an impact of  $200\ 000g$ , so it can satisfy the special test requirements in a high impact and intense vibration environment.

**Key words:** High overloading Acceleration sensor Test

## 0 前言

高过载加速度传感器设计用于苛刻的撞击、爆炸、冲击场合的加速度测试。目前, 国内外主要使用基于压阻原理的加速度传感器来实现大加速度的测量<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代, 美国 ENDEVCO 公司研制出了量程可达 20 万个重力加速度( $g$ )的高过载压阻式加速度传感器 7 270 A, 频响可达到 200 kHz。我国在高  $g$  传感器方面还是以压电结构为主。美国的 ADI 公司研制的 ADXL50 型加速度传感器, 采用压阻原理进行设计, 已成功地应用于炮弹引信中。电子工业部 13 所研制的电容式高量程加速度传感器, 采用标准体硅溶片工艺制作, 通过测量传感器承受加速度时的电容变化得到加速度信号, 最大量

程可以达到 10 万  $g$ 。北京大学微电子所研制的压阻式高  $g$  值加速度传感器, 量程为 5 万  $g$ 。典型的压阻式加速度传感器结构主要分为梁岛式和平膜式。梁岛式结构灵敏度较高, 但固有频率较难提高, 且由于质量块质心与梁的中性面位于不同平面, 抗冲击能力较差, 尤其当结构承受横向加速度时, 结构会因受到较大的扭矩发生扭转, 造成结构损坏; 平膜式结构固有频率高, 能有效地提高抗冲击性能, 且能承受更高的横向加速度, 但由于没有相对质量块的存在, 应力集中区较小, 灵敏度相对较低, 且线性较差。本文设计了一种新型的压阻式结构, 经初步试验, 比较以往的结构有明显的改善。

## 1 加速度传感器结构设计

### 1.1 加速度传感器结构形状设计

图 1 是设计的高过载加速度传感器模型的断面

\* 山西省青年学术带头人和国家自然科学基金(50675212)资助项目。  
20071011 收到初稿, 20080311 收到修改稿

图<sup>[2]</sup>，量程为 150 000g，一阶固有频率可达 300 kHz。所设计的结构梁的宽度和质量块的长宽均一致，压阻对称放置于四梁根部，可以很好地抑制非对称性结构引起的沿梁长度方向横向加速度的影响。利用 KOH 溶液在质量块背部开槽腐蚀，减小质量块质量及其与梁中心面的距离，从而使梁岛式结构与平膜式结构的优点得到有效结合。

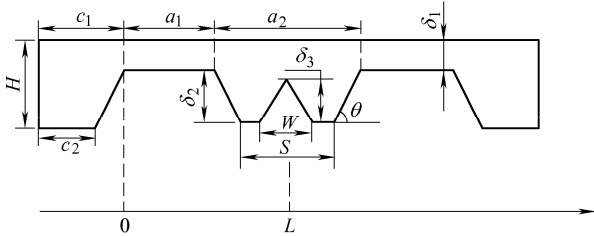


图 1 加速度传感器模型断面图

### 1.2 加速度传感器参数优化设计

针对高过载的加速度传感器，期望在得到较高可靠性的同时，尽可能灵敏度，同时为了保证结构稳定性，设计时还要保证足够的带宽和适当的阻尼比。根据设计指标要求确定以下性能约束<sup>[3-4]</sup>：

- ①  $\sigma_{max} \leq 200 \text{ MPa}$ ；
- ②  $f \geq 250 \text{ kHz}$ ；
- ③  $\xi \geq 0.707$ 。

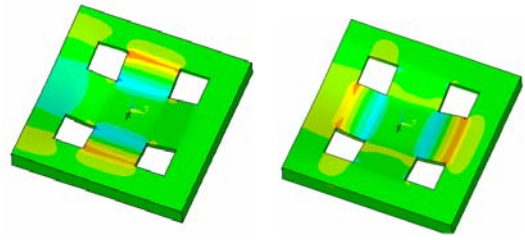
考虑在加工过程中选用的硅片厚度为 400  $\mu\text{m}$ ，在梁宽度与质量块宽度相等的前提下，为保证经 KOH 腐蚀后形成的质量块背部的完整性，质量块尺寸不易小于 1 000  $\mu\text{m}$ 。若质量块太小，由于 KOH 腐蚀的各向异性，经腐蚀深度越大，质量块背部越容易形成倒锥形，难以得到理想的质量块；若减小背腔腐蚀深度，则会使梁的厚度增大，对梁结构释放时的 ICP 刻蚀造成困难<sup>[5]</sup>。所以本设计首先从工艺优化角度出发，确定质量块尺寸，上表面边长为 1 050  $\mu\text{m}$ ，厚为 400  $\mu\text{m}$ 。在梁岛结构的加速度传感器设计中，考虑到参数对结构应力和频率的影响，利用 ANSYS 软件进行优化，下表为最终得到的一组优化参数。

表 加速度传感器结构优化参数表  $\mu\text{m}$

梁		质量块		底槽		阻尼间隙	
长度	宽度	厚度	边长	厚度	边长	深	
$a_1$	$a_2$	$\delta_1$	$a_2$	$\delta_2$	$w$	$\delta_3$	
600	1 050	80	1050	400	400	282	
							3

### 1.3 灵敏度分析

根据上表参数建立 ANSYS 实体模型，设定有限元的单元类型为 SOLID45；硅晶体材料的密度为 2 330  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，硅泊松比为 0.28；采用划分体单元时的网格大小为 240  $\mu\text{m}$ 。在支撑区底部加全约束，给整体结构施加 150 000 g 敏感方向的惯性载荷后经解算，可得到如图 2 所示应力分布图。



(a)纵向应力  $\sigma_x$  (b)横向应力  $\sigma_y$

图 2 结构表面应力分布

然后在加速度传感器结构上表面建立一条在 x 方向贯穿整体结构的路径。经 ANSYS 分析可以得到结构在该路径上所受的 x 方向应力  $\sigma_x$  及 y 方向应力  $\sigma_y$ ，并看出结构上表面的应力分布是基本对称的。进一步提取单梁上的应力曲线，如图 3 所示。压敏电阻在某一单梁上的位置正是以此为依据布置的。避开图 3 中曲线两端的非线性区域，根据结构上表面应力分布，将四个压阻放置在线性区域内，分别距梁根部 50  $\mu\text{m}$ 。

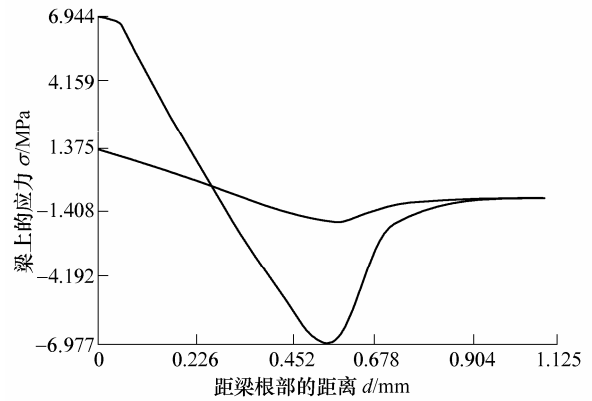


图 3 150 000 g 时单梁上的应力曲线

压阻布置连线情况如图 4 所示，取工作电压  $U_{in} = 5 \text{ V}$ ，当受 z 方向加速度时， $R_1$ 、 $R_3$  变化相同，均受拉应力(仿真结果为正值)； $R_2$ 、 $R_4$  变化相同，均受压应力(仿真结果为负值)。

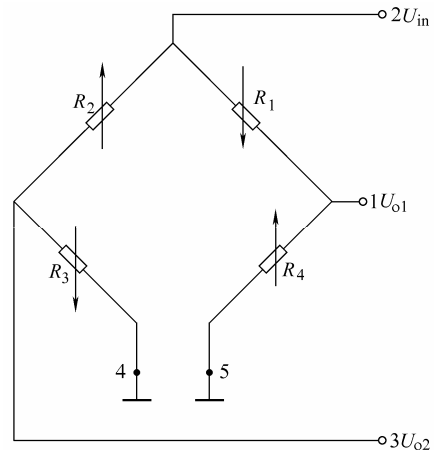


图 4 电阻连线图

结合图 2、3 可近似求得, 靠近梁根部的压阻 R1 所受纵向应力,  $\sigma_z = 49 \text{ Mpa}$ , 横向应力  $\sigma_h = 16 \text{ MPa}$ 。从而可以得到当器件受到  $150\,000 \text{ g}$  加速度时, 电桥输出

$$U_{\text{out}} = 5 \times \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_z - \sigma_h) = 110 \text{ mV} \quad (1)$$

则输出灵敏度为

$$S = \frac{U_{\text{out}}}{a} = \frac{110 \text{ mV}}{150\,000 \text{ g}} = 0.733 \text{ } \mu\text{V/g} \quad (2)$$

## 2 传感器工艺设计

本传感器采用北京大学微电子所的标准 MEMS 体硅工艺制作<sup>[6]</sup>, 采用 N(100)晶向、电阻率为  $2 \sim 4 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $400 \text{ } \mu\text{m} \pm 10 \text{ } \mu\text{m}$  的双面抛光硅片作为起始材料。实现步骤可以简单概括为: ① 压阻形成; ② 背腔腐蚀; ③ 金属连线形成; ④ ICP 释放结构; ⑤ 正面 Si/玻璃键合、划片、封装。在上面步骤中, 第①步和第⑤步中有高温过程, 金属连线可以选择 Al 或者 Au, 背腔腐蚀采用 KOH 湿法腐蚀。由于压阻形成时需要有离子推入过程, 温度在  $1\,100 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 键合时的温度大致为  $380 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 因而键合工艺放在离子推进之后进行。由于 Al 和 Si 的共融温度为  $400 \text{ } ^\circ\text{C}$  左右, 最终采用 Al 作为金属化的连线材料。而在背腔腐蚀中, 会因采用 KOH 湿法腐蚀而在硅片中引入  $\text{K}^+$  离子, 造成污染, 所以之后还要进行必要的去  $\text{K}^+$  清洗。该器件采用硅片和玻璃键合的方式, 以保护敏感结构, 所以要先进行 ICP 刻蚀穿通, 然后进行键合。最后进行划片和封装完成芯片的制作。加速度传感器工艺流程简图如图 5 所示。样片表面照片如图 6 所示。

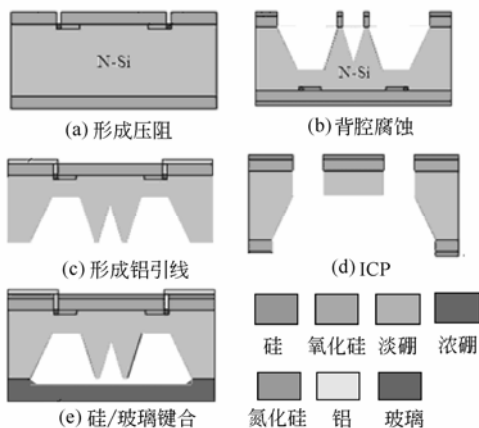


图 5 加速度传感器工艺流程图

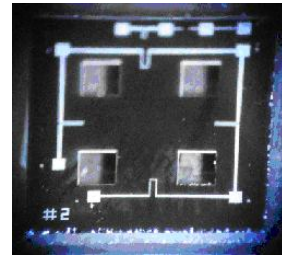


图 6 样片正表面照片

## 3 传感器测试

利用光栅激光干涉冲击校准装置对器件进行动态特性校准<sup>[7]</sup>。光栅激光干涉冲击校准装置如图 7 所示, 主要由霍普金森杆、差动式光栅激光干涉仪、数字示波器和计算机系统组成。霍普金森杆用于在校准端面获得波形良好、横向运动小的冲击过程。差动式激光干涉仪用于检测由于光栅运动产生的多普勒频移信号。数字示波器用来采集多普勒信号和记录被校加速度传感器输出信号, 用加速度传感器信号作触发信号, 并转换为数字信号。

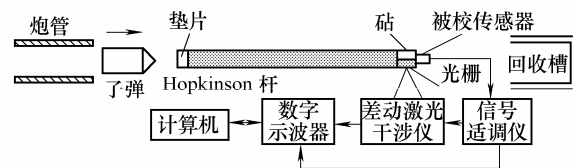


图 7 光栅激光干涉冲击校准系统原理图

光栅激光干涉冲击校准方法是根据激光多普勒原理, 利用衍射光栅作合作目标, 从而实现对加速度传感器的校准。由压缩空气发射弹体, 同轴撞击校准杆的起始端, 产生冲击加速度, 同时作用于光栅和被校加速度传感器, 被校加速度传感器所测得的信号经信号适调仪后被数字示波器采集记录。光栅位移通过差动激光干涉仪产生具有多普勒效应的调频信号, 同时被数字示波器采集; 通过对该调频信号的频率解调可获得作用于加速度传感器上的加速度值; 绝对复现的冲击加速度峰值  $a_p$  作为参考量值, 与被校加速度传感器输出的电量峰值  $U_p$  比较, 得到被校加速度传感器的冲击校准灵敏度

$$S_t = U_p / a_p \quad (3)$$

图 8 为试验中获得的被测传感器信号与激光多普勒干涉信号波形。冲击校准装置中, 激光波长  $\lambda = 0.632\,99 \text{ } \mu\text{m}$ ; 激光干涉中使用了二级衍射条纹, 则  $p=2, q=-2$ ; 光栅栅距  $d=1/150 \text{ mm}$ ; 冲击过程中激光多普勒干涉信号经解算, 可以得到冲击速度曲线; 将冲击速度曲线微分, 可以得到图 9 所示的冲击加速度曲线, 其峰值加速度为  $a_p=100\,000.8 \text{ g}$ , 脉宽为

$t=180\ \mu\text{s}$ ; 图 10 为冲击过程中被测加速度传感器输出  $u(t)$  曲线, 从图 10 可得峰值  $U_p=7.1\ \text{V}$ 。由式(1)可得被校加速度传感器经测试电路的冲击校准灵敏度  $S_t=71\ \mu\text{V/g}$ 。测试电路后放大倍数为 100 倍, 则敏感元件在  $100\ 000\text{g}$  时的动态灵敏度为  $0.71\ \mu\text{V/g}$ , 与理论值  $0.733\ \mu\text{V/g}$  基本吻合。

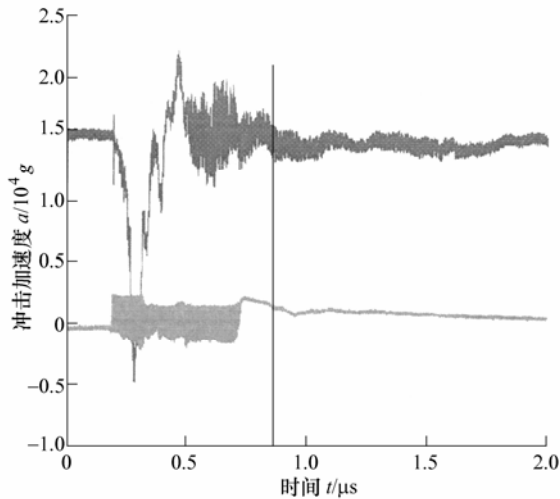


图 8 被测传感器信号与激光多普勒干涉信号对比

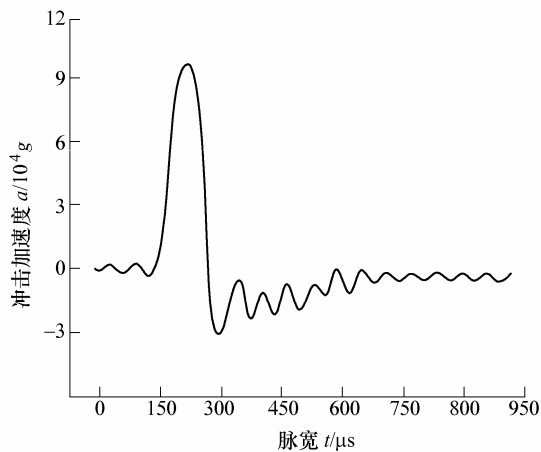


图 9 冲击过程中产生的加速度波形曲线

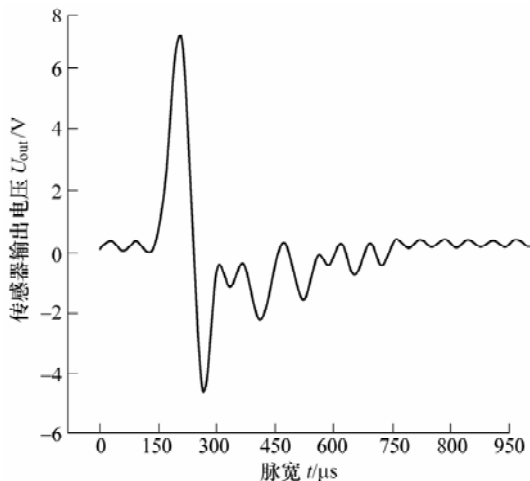


图 10 冲击过程中的加速度传感器输出波形曲线

## 4 结论

(1) 梁的宽度与质量块宽度相同, 因此结构更稳定。

(2) 通过在质量块背部开槽腐蚀掉一部分有效质量, 使结构的抗横向冲击性能提高。

(3) 制作工艺相对简单, 体积和质量相对较小。经霍普金森激光干涉冲击试验, 在  $100\ 000\ \text{g}$  冲击下被测传感器的动态灵敏度为  $0.71\ \mu\text{V/g}$ , 可见该传感器能够胜任冲击过程中加速度的测试。

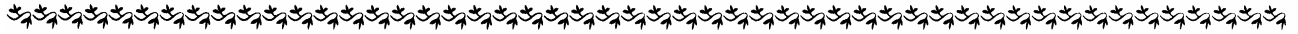
## 参 考 文 献

- [1] 张菁华, 石庚辰, 隋丽. 引信用微压阻式加速度传感器系统设计[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(3): 82-86. ZHANG Jinghua, SHI Gengchen, SUI Li. Design of micro piezoresistive accelerometer sensor based on fuze[J]. Transaction of Arming Command Technology College, 2005, 16(3): 82-86.
- [2] 石云波, 祈晓谨, 刘俊. 引信用 MEMS 加速度传感器敏感元件的设计[J]. 半导体技术, 2006, 31(7): 537-541. SHI Yunbo, QI Xiaojin, LIU Jun. Design of sensitivity component of MEMS accelerometer sensor based on fuze[J]. Semiconductor Technology, 2006, 31(7): 537-541.
- [3] 黄全平. 高量程微机械压阻式加速度传感器研究[D]. 上海: 上海微系统与信息技术研究所, 2002. HUANG Quanping. Research of micro piezoresistive accelerometer sensor with wider range[D]. Shanghai: Insititute of Microsystem and Infomation Technology, 2002.
- [4] ANDREW R A, ROBEM S O, KORNEGAY K T, et al. Fabrication and testing of bulk micromachined 6H-SiC high-g piezoresistive accelerometer[J]. Sensors and actuators A, 2003, 104: 11-18.
- [5] KAL S, DAS S, MAURYA D K, et al. CMOS compatible bulk micromachined silicon piezoresistive accelerometer with low off-axis sensitivity[J]. Microelectronics Journal, 2006, 37: 22-30.
- [6] 王钻开, 宗登刚, 陆德仁. 高量程加速度传感器的力学性能分析[J]. 机械强度, 2002, 24(4): 515-517. WANG Zhuankai, ZONG Denggang, LU Deren. Analyse of mechanics performance of accelerometer with widerrange[J]. Machine Intensity, 2002, 24(4): 515-517.

- [7] 梁志国, 李新良, 孙璟宇, 等. 激光干涉法一次冲击加速度传感器动态特性校准[J]. 测试技术学报, 2004, 18(2): 133-138.
- LIANG Zhiguo, LI Xinliang, SUN Jingyu. Dynamic-adjusting of accelerometer by laser interferometer [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18(2): 133-138.

作者简介: 石云波, 男, 1972 年出生, 讲师。主要从事 MEMS 领域中的微惯性器件的研制与应用方面的研究, 近年来先后参与国家 863 项目、国家自然科学基金、武器装备预研基金多项, 发表论文 15 篇, 参译《微纳技术潜在应用前景》, 参编《微惯性技术》与《微弱信号检测技术》。

E-mail: shiyunbo@nuc.edu.cn



(上接第 199 页)

- [6] 韩京清. 非线性 PID 控制器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487-490.
- HAN Jingqing. Nonlinear PID controller[J]. Acta Automatica Sinica, 1994, 20(4): 487-490.
- [7] BERNHARD Sprenger. Planar high speed linear direct drive with submicron precision[R]. Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich, Diss. ETH No. 13065, 1999.
- [8] 郭庆鼎, 王成元, 周美文, 等. 直线交流伺服系统的精密控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- GUO Qingding, WANG Chengyuan, ZHOU Meiwen, et al. Accurate control technology for linear AC servo

system[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

作者简介: 周振雄(通信作者), 男, 1970 年生, 博士研究生, 副教授。主要研究方向为交流伺服, 智能控制。

E-mail: zzx701111@126.com

杨建东, 男, 1957 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密加工。

E-mail: zxxzwp@126.com

曲永印, 男, 1959 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为交流伺服。

E-mail: qyy1217@yahoo.com.cn