

文章编号 1004-924X(2011)03-0620-08

用于低 g_n 值微惯性开关的 低刚度平面微弹簧设计与制作

王 超, 陈光焱, 吴嘉丽

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:针对低 g_n 值微惯性开关对微弹簧系统刚度的要求(0.1~1 N/m 数量级),设计了一种基于平面矩形螺旋梁结构的平面微弹簧。假设材料均匀、连续且具各向同性,根据材料力学的卡氏定理和线弹性理论,推导得到了微弹簧的弹性系数计算公式,并根据 ANSYS 有限元仿真分析结果对其进行了修正。基于多层高深宽比硅台阶蚀刻方法,采用 MEMS 体硅加工工艺,完成了微弹簧的制备,划片后微弹簧芯片尺寸为 7 mm×7 mm×0.3 mm。分析结果表明,完善后的弹性系数计算公式与 ANSYS 仿真结果更为接近,可直接应用于微弹簧的结构优化设计以简化设计过程。纳米压痕法的测试结果表明,微弹簧样品的弹性系数约为 0.554 N/m,满足设计要求。该微弹簧具有体积小、结构简单、加工容易实现等特点,其成功研制为实现低 g_n 值微惯性开关的工程实用化奠定了基础。

关键词:平面微弹簧;低刚度微弹簧;平面矩形螺旋梁;微惯性开关;微机电系统

中图分类号: TM564; TH703.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0620

Development of planar micro-spring with low stiffness in low- g_n micro inertial switch

WANG Chao, CHEN Guang-yan, Wu Jia-li

(*Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

Abstract: A planar micro-spring based on a planar rectangular helical spring was designed for a low- g_n micro inertial switch with the micro-spring in stiffness up to 0.1–1 N/m magnitude. The elastic coefficient formula of the micro-spring was derived with the Castigliano's theory and the linear elasticity theory based on the assumption that the material property was uniform, homogeneous and isotropic, and then it was modified by the ANSYS finite element method. The micro-spring was fabricated by using the MEMS bulk micromachining process based on the multi-step ICP etching method, and the bulk of chip was about 7 mm×7 mm×0.3 mm in size. The theoretic analysis shows that the results agree well with the ANSYS simulation results, which demonstrates that the optimized formula can be directly applied to the optimization design of the micro-spring to simplify the design process. The nanoindentation test results show that the elastic coefficient of the fabricated micro-spring is about 0.554 N/m. The planar micro-spring has the advantages of small size, simple structure and easy fab-

收稿日期:2010-05-24;修订日期:2010-09-15.

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(No. 2009B0403044)

rication, and it can lay the foundation for the engineering applications of low- g_n micro inertial switches.

Key words: planar micro-spring; low stiffness micro-spring; planar rectangular helical spring; Micro-electro-mechanical System(MEMS)

1 引言

惯性开关是一种感受惯性加速度,执行开关机械动作的精密惯性装置,低 g_n 值是指惯性开关闭合阈值为 $1\sim 30g_n$ (g_n 为标准重力加速度, $1g_n=9.8\text{ m/s}^2$),这种开关在汽车安全气囊、工业安全控制和航空航天等领域有着广泛的应用^[1]。惯性开关大多采用典型的“弹簧-质量-阻尼”结构,要求具有无源(只感知惯性作用力,无电或磁等作用力)、小体积、“机械滤波”等特点。所谓“机械滤波”是指对特定频率信号的响应,对低 g_n 值惯性开关而言,应该响应的信号是准静态的、频率近乎为零的加速度信号,试验中这种信号一般由离心机产生,因此这类开关也被称为准静态开关^[2]。除了这种应该响应的信号外,惯性开关工作环境中还必然存在一些高频的加速度信号,比如由冲击或振动产生的各种频率的干扰信号。要减小对这些干扰信号的响应,设计时,低 g_n 值惯性开关的“弹簧-质量”结构必须具备较低的固有频率,使其结构本身可“机械滤波”。根据“弹簧-质量”结构的固有频率公式,可以通过降低弹簧的刚度或增大质量块的质量降低固有频率。传统的低 g_n 值惯性开关一般采用精密机械加工方式完成生产、装配和调试,由于其质量块的质量能够达到 1 g 的数量级,其固有频率可减小到 100 Hz 以下,较好地实现了“机械滤波”,但仍存在体积大的缺点。因而采用MEMS微制造技术实现低 g_n 值惯性开关具有重要的研究价值。然而,MEMS技术的微型化使得质量块的质量最大只能达到 1 mg 数量级,因此研制一种系统刚度达到 $(0.1\sim 1)\text{ N/m}$ 数量级的微弹簧成为低 g_n 值微惯性开关设计的关键点。

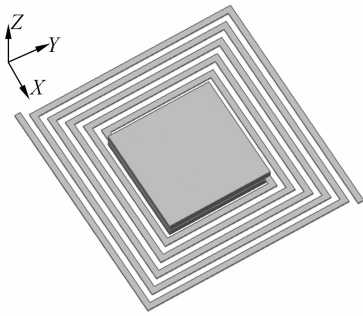
受微机械加工工艺特点的限制,MEMS微弹簧的形状大多以平面结构为主。文献[3]采用

LIGA加工工艺,设计加工了一种用于MEMS引信安全保险机构的“L型”微弹簧,其弹性系数为 $2\,995\text{ N/m}$ 。文献[4]采用MEMS体硅加工工艺,研制了一种类似“蛙脚”形状的硅弹簧,主要用于电磁型微驱动器中的运动部件,能够使其它微器件在垂直方向上运动或谐振,其弹性系数为 13.5 N/m 。类似的微弹簧结构还有“S型”、“W型”^[5-6],其弹性系数一般大于 10 N/m 。尽管可以通过优化结构参数进一步减小这些微弹簧的刚度,以满足低 g_n 值惯性开关的设计要求,但这同时也增加了工艺的复杂度和难度。文献[7]采用UV-LIGA工艺,成功研制了一种基于阿基米德螺旋线的低 g 值微惯性开关,但微电铸工艺制作的螺旋梁存在针孔和积瘤等缺陷,而且其结构的机械强度和内应力等问题亦使产品的成品率较低。本文结合MEMS体硅加工工艺的特点,开发了一种结构简单、容易加工的平面矩形螺旋线型的低刚度微弹簧。根据材料力学中的卡氏定理和线弹性理论,对微弹簧的弹性系数计算公式进行了推导,并根据ANSYS有限元仿真分析结果对计算公式进行了修正。通过结构优化设计,最终确定的结构参数满足设计要求。基于多层高深宽比硅台阶刻蚀方法,采用MEMS体硅加工工艺,成功完成了微弹簧的制作,并采用纳米压痕法测试了MEMS微弹簧的弹性系数。

2 结构设计

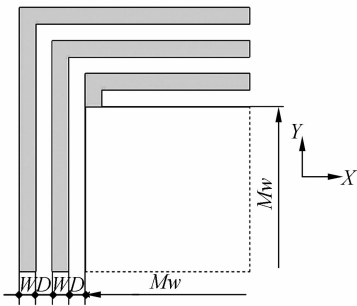
针对低 g_n 值惯性开关的应用需求,设计的微弹簧结构如图1所示。在 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 平面内,将长度为 $20\sim 30\text{ mm}$ 的两根梁弯折形成结构完全相同的平面微弹簧,用以支撑位于中心的质量块,三者构成“弹簧-质量”结构。螺旋梁位于质量块厚度方向上(Z 向)的中心平面内,其厚度远远小于质量块的厚度。考虑结构的加工工艺性,通

过增加螺旋梁的弯折圈数即螺旋梁的长度,有效地降低了微弹簧在 Z 向上的刚度。



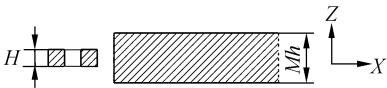
(a) 三维结构示意图

(a) 3D sketch of micro-spring



(b) 1/4 结构俯视图

(b) Top view of a quarter of micro-spring



(c) 1/4 结构剖视图

(c) Side view of a quarter of micro-spring

图 1 微弹簧结构示意图(5 mm×5 mm)

Fig. 1 Structures of micro-spring

3 理论分析

在一定的设计条件下,所研究的 MEMS 微弹簧的变形在线弹性范围之内,因而可以运用材料力学中的卡氏定理求得微弹簧在力作用点的线性位移,进而根据线弹性理论得到微弹簧的弹性系数。

假设集中力 F 垂直于 XY 平面,作用于微弹簧结构的质心 A 点,弹簧主要受弯曲和扭转变形作用,如图 2 所示。微弹簧类似细长梁,其剪切应

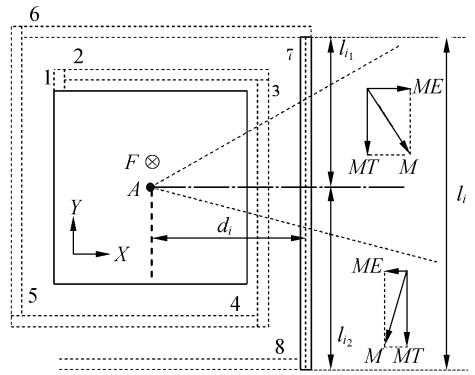


图 2 MEMS 平面微弹簧受力分析

Fig. 2 Force analysis of MEMS micro-spring

变能可以忽略不计。基于均匀、连续且各向同性材料的假设,根据卡氏定理^[8],微弹簧的结构变形能 U 和沿力 F 作用方向上的位移 δ 可以表示为:

$$U = \int \frac{MT(x)^2}{2G \cdot I_p} dx + \int \frac{ME(x)^2}{2E \cdot I_s} dx, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial F} = \int \frac{MT(x)}{G \cdot I_p} \frac{\partial MT(x)}{\partial F} dx + \int \frac{ME(x)}{E \cdot I_s} \frac{\partial ME(x)}{\partial F} dx, \quad (2)$$

其中, $MT(x)$ 、 $ME(x)$ 分别为作用于梁截面的扭矩和弯矩; $I_s = WH^3/12$ 、 $I_p = \alpha WH^3$ 分别梁矩形截面的惯性矩和极惯性矩; α 是与梁矩形截面边长比 W/H 有关的系数,可通过查表得到^[8]。 $G = E/2(1+\nu)$ 为切变模量; E 、 ν 分别为微弹簧结构材料(体硅)的杨氏模量和泊松比; $E = 130 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.22$ 。由于质量块厚度相对较大,可将其看作为一个不发生形变的刚体,因此式(2)只对梁进行积分。

由于结构的完全对称性,只需对其中一根螺旋梁进行受力分析。从质量块出发对梁的每一节顺序编号,如图 2 所示。力 F 作用点 A 到第 i 节梁的距离 d_i 可以表示为:

$$d_i = \begin{cases} Mw/2 - W/2 + \frac{i-1}{2} \cdot (W+D) & i \text{ 为奇数} \\ Mw/2 - W/2 + \frac{i}{2} \cdot (W+D) & i \text{ 为偶数} \end{cases}, \quad (3)$$

第 i 节梁的长度 l_i 可以表示为:

$$l_i = \begin{cases} W+D & i=1 \\ l_{i_1} + l_{i_2} = \left(M\tau w/2 - W + \left(\frac{i}{2} - 1 \right) \cdot (W+D) \right) + \left(M\tau w/2 + \frac{i}{2} \cdot (W+D) \right) & i \text{ 为偶数} \\ l_{i_1} + l_{i_2} = \left(M\tau w/2 + \frac{i+1}{2} \cdot (W+D) \right) + \left(M\tau w/2 + \frac{i-1}{2} \cdot (W+D) - W \right) & i \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (4)$$

分析在力 F 作用下沿力 F 方向的位移时,先

考虑第1节梁:

$$ME(x) = Fx, MT(x) = Fd_1,$$

$M\tau w/2 \leq x \leq M\tau w/2 + l_1$, 则

$$\delta_1 = \int \frac{MT(x)}{G \cdot I_p} \frac{\partial MT(x)}{\partial F} dx + \int \frac{ME(x)}{E \cdot I_s} \frac{\partial ME(x)}{\partial F} dx = \frac{Fd_1^2}{G \cdot I_p} l_1 + \frac{F}{3E \cdot I_s} [(l_1 + M\tau w/2)^3 - (M\tau w/2)^3]. \quad (5)$$

第 $i(i \geq 2)$ 节梁, 弯矩和扭矩作用包括 l_{i_1} 和

l_{i_2} 两部分:

$$l_{i_1}: ME(x) = -Fx, MT(x) = Fd_i, 0 \leq x \leq l_{i_1};$$

$$l_{i_2}: ME(x) = Fx, MT(x) = Fd_i, 0 \leq x \leq l_{i_2};$$

$$\delta_i = \int_0^{l_{i_1}} \frac{MT(x)}{G \cdot I_p} \frac{\partial MT(x)}{\partial F} dx + \int_0^{l_{i_1}} \frac{ME(x)}{E \cdot I_s} \frac{\partial ME(x)}{\partial F} dx + \int_0^{l_{i_2}} \frac{MT(x)}{G \cdot I_p} \frac{\partial MT(x)}{\partial F} dx + \int_0^{l_{i_2}} \frac{ME(x)}{E \cdot I_s} \frac{\partial ME(x)}{\partial F} dx = \frac{Fd_i^2}{G \cdot I_p} l_i + \frac{F}{3E \cdot I_s} (l_{i_1}^3 + l_{i_2}^3). \quad (6)$$

根据 ANSYS 对微弹簧的有限元仿真分析,

每一节梁两端(即,螺旋梁弯折处)的正应力迅速

减小为0,如图3(b)和图3(c)所示,说明该位置

存在长度为 Δ 的等效纯弯矩^[6]。通过分析,取 Δ

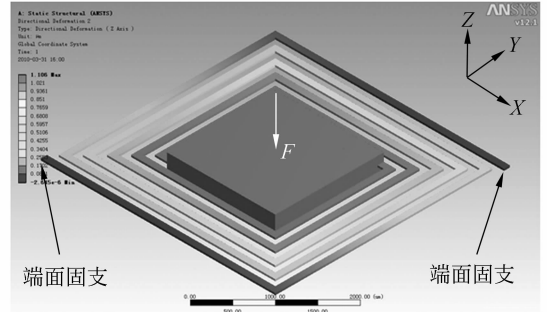
$= 2.25 \cdot W$, 对式(6)进行修正:

$$\delta_i = \int_{\Delta}^{l_{i_1}-\Delta} \frac{MT(x)}{G \cdot I_p} \frac{\partial MT(x)}{\partial F} dx + \int_0^{l_{i_1}} \frac{ME(x)}{E \cdot I_s} \frac{\partial ME(x)}{\partial F} dx + \int_{\Delta}^{l_{i_2}-\Delta} \frac{MT(x)}{G \cdot I_p} \frac{\partial MT(x)}{\partial F} dx + \int_0^{l_{i_2}} \frac{ME(x)}{E \cdot I_s} \frac{\partial ME(x)}{\partial F} dx = \frac{Fd_i^2}{G \cdot I_p} (l_i - 2 \cdot \Delta) + \frac{F}{3E \cdot I_s} (l_{i_1}^3 + l_{i_2}^3), \quad (7)$$

由于有两根结构完全相同的螺旋梁,则质量

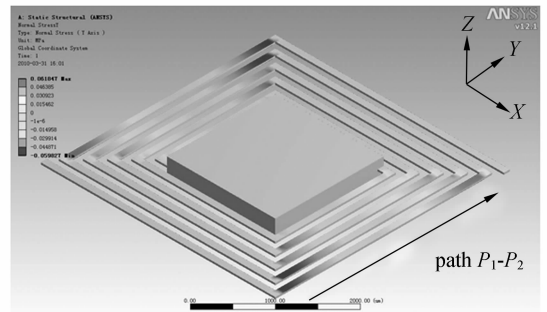
块沿力 F 作用方向上的位移为

$$\delta_s = 2 \sum_{i=1}^N \delta_i, \quad (8)$$



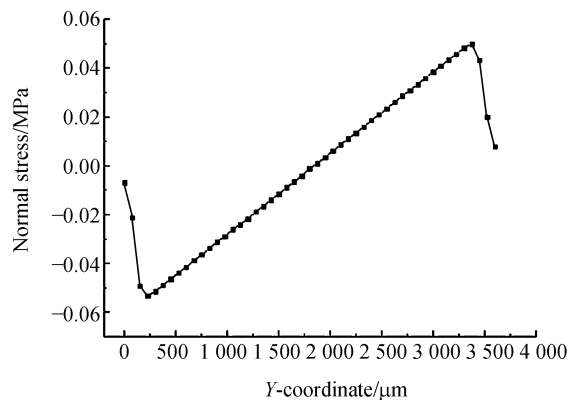
(a) Z 向位移云图

(a) Displacement on Z-axis direction



(b) Y 向正应力云图

(b) Normal stress on Y-axis direction



(c) 沿路径 P_1-P_2 的 Y 向正应力

(c) Normal stress on Y-axis direction along the path P_1-P_2

图3 MEMS 微弹簧 ANSYS 有限元仿真分析

Fig. 3 ANSYS simulation results of MEMS micro-spring with F in $1 \mu\text{N}$ force on Z-axis direction

其中 N 为梁的节数。根据线弹性理论^[8], 微弹簧的弹性系数为:

$$K = F/\delta_s, \quad (9)$$

K 是关于 (Mw, W, H, D, N) 的函数, 其解析表达式非常复杂。化简后可以表示为:

$$K = \frac{H^3 W}{\begin{pmatrix} A_1 Mw^3 + A_2 D^3 + A_3 W^3 + A_4 Mw^2 D + \\ A_5 Mw^2 W + A_6 Mw D^2 + A_7 D^2 W + \\ A_8 W^2 Mw + A_9 DW^2 + A_{10} Mw DW \end{pmatrix}}, \quad (10)$$

其中 $A_i (i=1, 2, \dots, 10)$ 是关于 (N, α, E, ν) 且大于 0 的系数。可以看出:

$$K \propto Mw^{-3}, K \propto W^{-2}, K \propto H^3, K \propto D^{-3}. \quad (11)$$

在一定的设计条件下, 由于 $H \ll (D \sim W) \ll Mw$, 4 种结构参数对微弹簧弹性系数 K 影响大小的顺序为 $H > D > W > Mw$ 。因此, 在允许的加工工艺条件下, 需严格控制螺旋梁厚度 H 的加工精度。

4 仿真计算

利用 ANSYS 软件对微弹簧进行了有限元仿真分析。两根螺旋梁端面固支, 大小为 $1 \mu\text{N}$ 的力垂直作用于质量块的上表面, 如图 3(a) 所示。读取质量块在 Z 方向上的最大位移, 然后根据公式(9)即可求得微弹簧的弹性系数。

对 4 组结构参数不同的 MEMS 微弹簧进行了仿真计算, 如表 1 所示。可以看出, 微弹簧的弹性系数在 $(0.1 \sim 1) \text{N/m}$ 数量级, 满足低 g_n 值惯性开关的设计要求。其次, 弹性系数的有限元解和解析解的相对误差小于 3%, 因此弹性系数计算公式(10)较为合理, 可用于此类微弹簧的结构优化设计。

表 1 MEMS 微弹簧弹性系数的解析解和有限元解比较

Tab. 1 Comparison between analytical and ANSYS simulation results of MEMS micro-springs' elastic coefficients

No.	Mw / μm	W / μm	H / μm	D / μm	N /节	$K_{\text{analytical}}$ / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	K_{ANSYS} / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	比值 ($K_{\text{analytical}}/K_{\text{ANSYS}}$)
1	1 800	100	30	100	11	0.894	0.909	0.983
2	1 500	100	35	100	15	0.816	0.806	1.01
3	1 500	100	30	100	13	0.782	0.764	1.02
4	1 800	100	35	100	13	0.914	0.923	0.991

5 制作工艺

基于多层高深宽比硅台阶深刻蚀方法^[9], 采用 MEMS 体硅加工工艺, 微弹簧的工艺流程如下:

(1) 采用双抛 (100) 单晶硅片, 厚度为 $300 \mu\text{m}$ 。常规清洗处理后, 热氧化生成厚度约为 $3 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 氧化层。双面光刻出图形, HF 溶液腐蚀去除图形区域的 SiO_2 氧化层。丙酮溶液去除光刻胶, 如图 4(a) 所示;

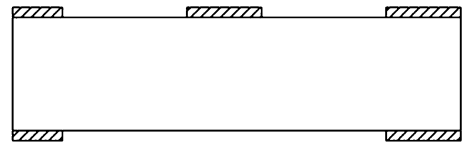
(2) 单面光刻出图形, 以光刻胶为掩模, ICP 刻蚀, 深度约 $30 \mu\text{m}$, 如图 4(b) 所示;

(3) 丙酮溶液去除光刻胶, 以 SiO_2 氧化层为掩模, ICP 刻蚀, 深度约 $135 \mu\text{m}$, 如图 4(c) 所示;

(4) 以 SiO_2 氧化层为掩模, 硅片背面 ICP 刻蚀穿透, 形成悬空的 MEMS 微弹簧, 如图 4(d) 所示。

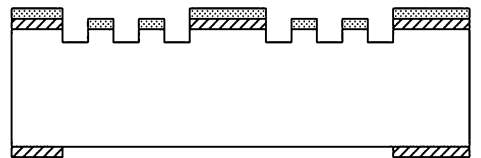
利用该工艺流程完成了 MEMS 微弹簧的加

工, 划片后芯片尺寸为 $7 \text{mm} \times 7 \text{mm} \times 0.3 \text{mm}$, 结构电镜照片如图 5 所示。



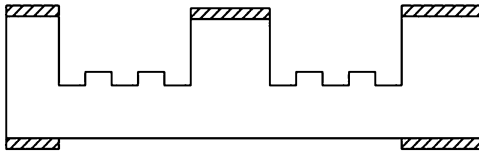
(a) 热氧化, 光刻

(a) Thermally dioxidation and patten

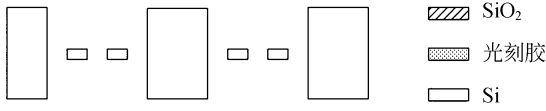


(b) 以光刻胶为掩模的 ICP 刻蚀

(b) ICP etching with photoresist as a mask



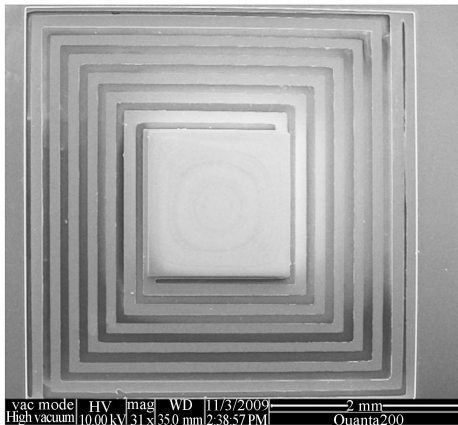
(c) 以 SiO₂ 为掩模的 ICP 刻蚀
(c) ICP etching with SiO₂ as a mask



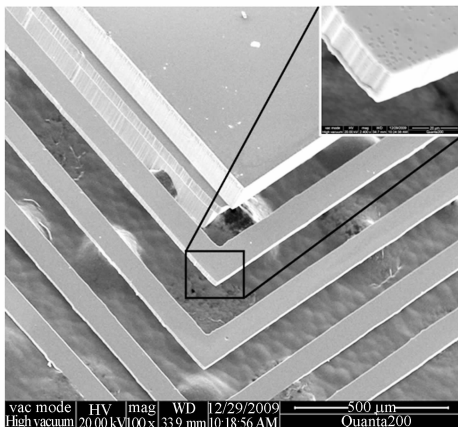
(d) 背面 ICP 刻蚀穿透
(d) ICP etching at backside

图 4 MEMS 微弹簧工艺流程

Fig. 4 Fabrication process of MEMS micro-spring



(a) MEMS 微弹簧 SEM 照片
(a) Top view of MEMS micro-spring



(b) MEMS 微弹簧局部 SEM 照片
(b) Local view of MEMS micro-spring

图 5 MEMS 微弹簧结构电镜照片

Fig. 5 SEM photos of MEMS micro-spring

6 刚度测试

纳米压痕法是用来测定材料硬度、弹性模量等机械性能的一种方法,其实验原理是基于将一定形状的压头压入被测材料,而后通过测量施加于压头上的力和压头位移的(即压头浸入材料的深度)关系来表征被测材料的机械性能^[10-11]。通过对纳米压痕实验得到的载荷-位移曲线进行分析,可以得到被测微结构的弹性系数,测试结果的精确度和准确度优于 10%^[12]。

针对表 1 中的第 3 号 MEMS 微弹簧样品,采用 Hysitron 公司的 Triboindenter 纳米压痕仪(有效载荷和位移的分辨率分别小于 2.5 nN 和 0.000 5 nm)进行了 3 次测试。压头垂直作用在质量块表面的中心,测试结果如图 6 所示。通过对加载部分载荷-位移曲线进行线性拟合,得到微弹簧的弹性系数。3 次测试的结果分别为 0.576 N/m,0.535 N/m 和 0.552 N/m,平均值为 0.554 N/m。

如前所述,螺旋梁厚度的加工精度对微弹簧的弹性系数影响较大。破坏该被测结构后,采用测量精度为 1 μm 的螺旋测微器测得螺旋梁的厚度约为 28 μm。由于其余结构参数对微弹簧的弹性系数影响相对很小,可假定满足设计要求。根据公式(10),得到该被测结构的理论弹性系数约为 0.635 N/m。

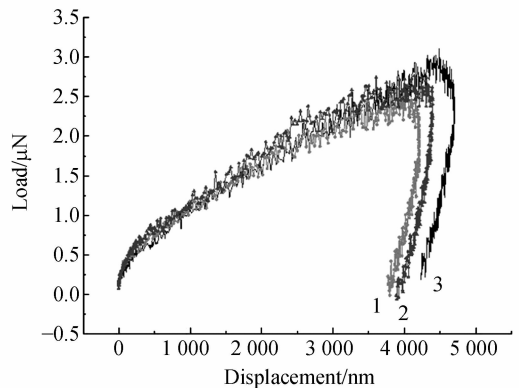


图 6 3 次纳米压痕测试得到的载荷-位移曲线
Fig. 6 Load-displacement curves of nanoindentation test

由图 6 可见,撤去力载荷时微弹簧样品仍有较大的位移,在加载和卸载作用之间存在残余应变,表现出典型的塑性形变特点。而硅材料被认

为理想的弹性材料^[13],在理论上弹性材料的卸载曲线和加载曲线非常接近。加工引入的结构残余应力是否有可能造成该现象的发生,需对微弹簧的力学特性开展进一步的实验和分析。

7 结 论

本文成功研制了用于低 g_n 值微惯性开关的平面矩形螺旋线型低刚度微弹簧,通过优化结构参数,其弹性系数能够达到 $(0.1 \sim 1) \text{ N/m}$ 数量级。以材料力学为基础推导得到了微弹簧的弹性系数计算公式,其结果和 ANSYS 有限元解的结果基本吻合。由于微弹簧建模过程繁杂,弹性系数计算公式可直接应用于结构的优化设计,从而简化设计过程,为实现微弹簧的工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 陈光焱,王超.微惯性开关设计技术综述[J].信息与电子工程,2009,7(5):439-442.
CHEN G Y, WANG C. Review of the design of micro inertial switch [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2009,7(5):439-442. (in Chinese)
- [2] 贾孟军,李昕欣,宋朝晖,等.开关点电可调节的 MEMS 冲击加速度锁定开关[J].半导体学报,2007,28(8):1295-1300.
JIA M J, LI X X, SONG Z H, *et al.*. MEMS shocking-acceleration switch with threshold modulating and on-state latching function [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(8): 1295-1300. (in Chinese)
- [3] 李华,石庚辰. MEMS 微弹簧应用模式分析[J]. 传感技术学报,2007,20(12):2709-2712.
LI H, SHI G C. Analysis of application pattern of MEMS microspring[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007,20(12):2709-2712. (in Chinese)
- [4] 李文军,赵小林,蔡炳初,等.一种新型微机械硅弹簧的设计与制作[J].微细加工技术,2001,4: 70-75.
LI W J, ZHAO X L, CAI B C, *et al.*. Design and

基于多层高深宽比硅台阶深刻蚀方法,采用 MEMS 体硅加工工艺,完成了微弹簧的制备,划片后芯片尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 。纳米压痕法测试微弹簧的弹性系数为 0.554 N/m ,满足低 g_n 值微惯性开关的设计要求。该微弹簧体积小、结构简单、容易加工实现。优化结构设计,完善工艺方案,提高结构尺寸的加工精度,是下一步工作的研究重点。

8 致 谢

感谢电子工程研究所传感器与执行器研究中心 MEMS 工艺组同志在加工工艺方面给予的支持。本文的纳米压痕测试在化工材料研究所材料物理与力学实验室完成,感谢蓝林刚助理研究员的帮助。

- Fabrication of a Novel MEMS Silicon Spring [J]. *Microfabrication Technology*, 2001, 4:70-75. (in Chinese)
- [5] 杨卓青,丁桂甫,蔡豪刚,等.用于 MEMS 惯性开关的微弹簧有限元动力学分析[J].机械强度,2008,30(4): 586-589.
YANG Z Q, DING G F, CAI H G, *et al.*. Finite element dynamics analysis of microspring in mems inertia switch [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2008,30(4): 586-589. (in Chinese)
- [6] 吴志亮,常娟,冯鹏洲,等.引信用 MEMS 平面微弹簧弹性系数分析[J].南京理工大学学报(自然科学版),2008,32(2):140-143.
WU Z L, CHANG J, FENG P Z, *et al.*. Elastic coefficient analysis of MEMS planar microsring used in fuse[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2008, 32(2):140-143. (in Chinese)
- [7] CHEN G Y, WU J L, ZHAO L, *et al.*. Low-g micro inertial switch based on Archimedes' spiral[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(6):1257-1261.
- [8] 单辉祖.材料力学[M].北京:高等教育出版社.
DAN Z H. *Material Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- [9] 王阳元,武国英,郝一龙,等.硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究[J].电子学报,2002,30(11):

1577-1584.

WANG Y Y, WU G Y, HAO Y L, *et al.*. Study of silicon-based MEMS technology and its standard process [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30 (11):1577-1584. (in Chinese)

[10] 闫永达,费维栋,胡振江,等.基于单片机的AFM纳米机械性能测试系统[J].光学精密工程,2008,16(7):1223-1229.

YAN Y D, FEI W D, HU Z J, *et al.*. SCM-based nanomechanical property measurement system of AFM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (7): 1223-1229. (in Chinese)

[11] 陈治,胡晓东,傅星,等.基于块匹配的MEMS平面

纳米精度运动测量[J].光学精密工程,2008,16(3):137-142.

CHEN Z, HU X D, FU X, *et al.*. Nanoscale measurement of MEMS in-plane motion based on block matching[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):137-142. (in Chinese)

[12] HOLBERY J D, EDEN V L. A comparison of scanning microscopy cantilever force constants determined using a nanoindentation testing apparatus [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2000,10:85-92.

[13] SENTURIA S D. *Microsystem Design* [M]. Berlin:Kluwer Academic Publishers. 2003.

作者简介:



王超(1985-)男,四川苍溪人,研究实习员,2008年于北京大学物理学院获得学士学位,主要从事MEMS惯性器件的设计和加工技术的研究。E-mail: wchao.lzms@gmail.com



吴嘉丽(1957-)女,安徽太和人,高级工程师,1980年于华南理工大学获学士学位,主要从事微电子、MEMS工艺技术的研究。E-mail: wujl1231@sina.com



陈光焱(1975-)男,四川泸县人,副研究员,1988年、2002年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,主要从事惯性传感器、微机电系统(MEMS)等方面的研究。E-mail: cgyiee@126.com