

文章编号 1004-924X(2016)06-1345-07

微机械应力测试结构的温度特性和应力抑制方法

刘燕锋, 陈志勇*, 张 嵘

(清华大学 精密仪器系 导航工程中心, 北京 100084)

摘要:研究了典型微机械应力测试结构的温度特性及从源头上抑制热应力的方法。设计了一种可以代表微机械系统 (MEMS) 器件温度特性的应力测试结构, 并分析了温度对其固有频率的影响机理。指出了与材料弹性模量、结构尺寸变化相比, 轴向应力是影响该结构固有频率温度稳定性的主要因素, 同时设计了一种可以释放热应力以及加工残余应力的应力隔离结构。考虑硅的线膨胀系数随温度变化的特性, 通过建模仿真和实验测试获得了应力测试结构、应力隔离结构的轴向应力以及固有频率的温度特性。结果表明: 在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应力隔离结构将轴向热应力抑制到了应力测试结构的 2 个数量级以下, 固有频率-温度系数由 $5.0 \times 10^{-3}\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 左右降到了 $5.0 \times 10^{-5}\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 以下。结果显示: 设计的应力隔离结构具有非常良好的应力隔离效果, 从源头上抑制了主要的温度影响因素引入整个微机械系统, 可以应用于其它 MEMS 结构以获得良好的温度稳定性。

关键词:微机械系统; 应力测试结构; 应力隔离结构; 温度特性; 热应力

中图分类号:O348.3; TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162406.1345

Temperature characteristics of MEMS stress-testing structure and a stress-suppressing method

LIU Yan-feng, CHEN Zhi-yong*, ZHANG Rong

(*Engineering Research Center for Navigation Technology, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chendelta@mail.tsinghua.edu.cn*

Abstract: The temperature characteristics of typical stress-testing microstructures were studied, and a stress-suppressing method was proposed. A stress-testing structure to represent the temperature characteristics of MEMS (Micro-electro-mechanical Systems) devices was designed and the influence mechanism of temperature on its nature frequency was analyzed. It points out that the axial thermal stress is the main factor affecting temperature stability of the nature frequency as compared with the material elastic modulus and the changes of structure size. Meanwhile, a stress-suppressing structure was designed to release the thermal stress and the machining residual stress. As the linear expansion coefficient of silicon was affected by temperature, the temperature characteristics of the axial stress and nature frequency for the stress-testing structure and stress-suppressing structure were studied by simulations and experiences. The results indicate that the axial thermal stress in stress-suppressing

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-02-17.

基金项目: 总装备部预先研究资金资助项目 (No. 20114113013)

structure is suppressed to below two orders of that in stress-testing structure, and the frequency-temperature coefficient is reduced from about 5.0×10^{-3} ppm/ $^{\circ}\text{C}$ to below 5.0×10^{-5} ppm/ $^{\circ}\text{C}$ at -50°C $-$ $+85^{\circ}\text{C}$. It concludes that the stress-suppressing structure suppresses the stress effectively, and suppresses the temperature influence factors into the MEMS system at the source. Moreover, the stress-suppressing structure can be used for other MEMS systems and can offer good temperature stability.

Key words: Micro-electronic-mechanicap System(MEMS); stress-testing structure; stress-suppressing structure; temperature characteristic; thermal stress

1 引言

MEMS 技术自二十世纪八十年代开始受到广泛重视并迅速发展。MEMS 器件具有成本低、体积小、能耗低等优点,被广泛应用移动终端、汽车电子、医疗生物、物联网等民用领域,且在军事领域也具有广阔的应用前景。目前影响 MEMS 器件实际应用的主要瓶颈之一是其性能指标,例如惯性传感器的全温零偏变化和零偏稳定性^[1],国内 MEMS 陀螺的零偏稳定性约为 $10^{\circ}/\text{h}$,全温零偏变化增加到 $50 \sim 100^{\circ}/\text{h}$,惯性级陀螺对零偏稳定性的要求小于 $0.01^{\circ}/\text{h}$ ^[2]。

温度是影响 MEMS 器件性能指标的重要因素。Draper 实验室研究了微机械音叉陀螺标度因数的温度敏感性,在 $-10 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度内标度因数误差为 350ppm RMS^[3]。清华大学的研究结果显示,在 $30 \sim 48^{\circ}\text{C}$ 温度内,微机械加速度计的标度因数-温度系数高达 $1\ 223\ \text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ ^[4]。国内外已经对提高 MEMS 微谐振器温度稳定性的方法做了一系列研究,主要集中在直接建立性能指标的温度模型并进行温度补偿^[5-7],采用恒温腔进行温度控制^[8],采用新型材料来降低结构材料的温度敏感性^[9]等方法。但目前的研究缺乏温度对微机械结构工作参数的影响机理,缺乏从源头上抑制温度影响因素引入整个微机械系统的研究设计。

本文设计了一种可以代表 MEMS 器件温度特性的应力测试结构,分析并验证了温度对该结构主要工作参数的影响机理。设计了可抑制热应力的应力隔离结构,通过建模仿真和实验测试对比研究了应力测试结构、应力隔离结构工作参数的温度特性,结果显示应力隔离结构可以有效抑制热应力,具有良好的温度稳定性。

2 微机械应力测试结构

MEMS 器件的温度敏感性主要是由微结构的材料杨氏模量、结构尺寸和结构应力等因素易受温度影响发生变化造成的。MEMS 器件为了满足特定的测试功能,结构较为复杂,分析温度对器件的主要影响因素时,干扰因素较多。因此,需要设计一种可以代表 MEMS 器件温度特性且干扰因素少的结构。

2.1 应力测试结构设计

梁结构是多种微机械结构的重要组成部分,温度对梁结构的影响较大,双端音叉 (DETF) 结构是硅微加速度计和谐振式力传感器的基本测试结构,音叉固有频率和轴向力以及结构参数有关,其结构简单,性能良好,且其它干扰因素少,便于对温度影响进行定性定量的研究^[10]。应力测试结构以双端音叉结构为基础,结构示意图如图 1 所示。为了排除梳齿等附加结构对音叉梁固有频率、温度特性的影响,主体采用光音叉结构。驱动方式采用双边静电驱动,若内侧梳齿在两个音叉梁间直接和基底键合,由于键合锚点的尺寸较大,过大的音叉间隙会降低两根音叉梁的耦合程度,影响结构性能,所以音叉采用一端闭合一端开放的设计方式,内侧梳齿的键合锚点设计在音叉开

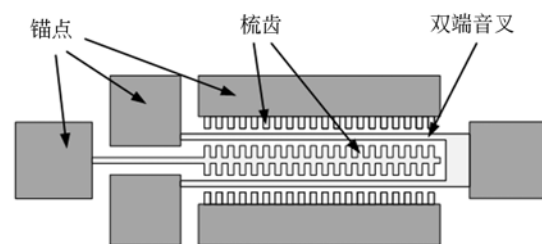


图 1 应力测试结构示意图

Fig. 1 Diagram of stress-testing structure

放段外侧,通过悬臂梁的形式伸入音叉间隙之间进行驱动。

2.2 应力测试结构工作原理

固有频率是应力测试结构的主要工作参数,不受轴向力影响的双端固定梁的固有频率为^[11]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_0}{M_0}} = \frac{4.73^2}{2\pi} \left(\frac{b}{l} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{Eh}{12M_0}}, \quad (1)$$

其中: K_0 和 M_0 分别为梁的等效刚度系数和等效质量, l 、 b 、 h 分别为梁的长、宽、高, E 为硅材料的弹性模量。

当梁受到轴向力 F 时,梁的等效刚度系数 K 发生了变化,双端固定梁的固有频率随之变化^[11]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_0}} = f_0 \sqrt{1 + k \frac{l^2}{EI} F} = \frac{4.73^2}{2\pi} \left(\frac{b}{l} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{Eh}{12M_0} \left[1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \frac{l^2}{EI} F \right]}. \quad (2)$$

应力测试结构的音叉梁的设计参数为长、宽、高分别为 $1\,200\ \mu\text{m}$ 、 $6.7\ \mu\text{m}$ 和 $60\ \mu\text{m}$,硅的密度为 $2.32 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$,弹性模量为 $1.3 \times 10^{11}\ \text{Pa}$ 。

根据设计参数,不受轴向力的梁的固有频率 f_0 的理论值为 $40\,819\ \text{Hz}$,受到轴向应力的梁的固有频率为:

$$f = 40\,819 \sqrt{1 + 5.77 \times 10^{-8} \sigma}. \quad (3)$$

3 应力测试结构的温度特性

当温度发生变化时,音叉梁的轴向应力、弹性模量、结构尺寸等参数会发生变化,影响梁的等效刚度,从而导致结构的固有频率发生变化。通过分析各影响因素对结构固有频率的影响,找出关键影响因素并进行抑制,对提高 MEMS 结构的温度稳定性具有重要意义。

由式(2)可知,结构固有频率的主要因素为材料弹性模量、结构尺寸和轴向应力。

3.1 弹性模量的影响

硅的弹性模量和温度呈线性关系:

$$E(T) = E_0 - E_0 \kappa_{ET} (T - T_0), \quad (4)$$

其中: $E(T)$ 、 E_0 分别是硅材料在温度 T 、 T_0 时的弹性模量; $T_0 = 300\ ^\circ\text{C}$; κ_{ET} 为硅的弹性模量温度变化系数,约为 60×10^{-6} 。

弹性模量变化引起的音叉梁固有频率-温度系数为:

$$\frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial T} (E) = \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial T} \approx -\frac{1}{2} \kappa_{ET} \approx -30\ \text{ppm}/^\circ\text{C}. \quad (5)$$

3.2 结构尺寸的影响

由于硅的线性膨胀系数不为 0,音叉梁的结构尺寸会随温度变化,从而改变音叉梁的固有频率。常温下,硅的线性膨胀系数 $\alpha_{s0} = 2.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

结构尺寸变化引起的音叉梁固有频率-温度系数分别为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial T} (\text{size}) &= \frac{1}{f_0} \left[\frac{\partial f_0}{\partial T} (b) + \frac{\partial f_0}{\partial T} (l) + \frac{\partial f_0}{\partial T} (h) \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[3 \frac{1}{b} \frac{\partial b}{\partial T} - 3 \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T} + \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial T} \right] \approx \\ &= \frac{1}{2} \alpha_{s0} \approx 1.3\ \text{ppm}/^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 轴向应力的影响

硅结构层和 Pyrex7740 玻璃基底通过阳极键合固定在一起,由于硅和玻璃的线性膨胀系数不同,当温度发生变化时,会在结构中引入热应力,导致音叉梁受到轴向力,从而改变梁的固有频率。图 2 所示为硅和 Pyrex7740 玻璃的线性膨胀系数图。其中,硅的线性膨胀系数与温度有关:

$$\alpha_s(t) = \{ 3.725 [1 - e^{-5.88 \times 10^{-3}(t-124)}] + 5.548 \times 10^{-4} t \} \times 10^{-6}/^\circ\text{C}, \quad (7)$$

其中: t 为绝对温度,单位为 K。

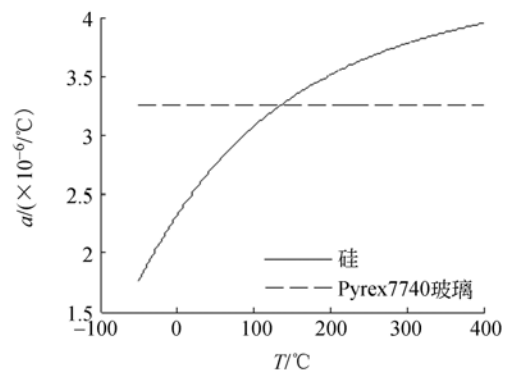


图 2 硅和 Pyrex7740 玻璃的线性膨胀系数

Fig. 2 Linear expansion coefficient of silicon and Pyrex7740

使用 ANSYS 有限元分析软件对应力测试结构进行热应力仿真,得到的轴向应力-温度系数可达 $0.1\ \text{MPa}/^\circ\text{C}$ 数量级,对应的轴向应力所引起的频率-温度系数可达 $100\ \text{Hz}/^\circ\text{C}$ 数量级。

由轴向热应力引起的音叉梁固有频率-温度

系数为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial T}(\sigma) &= \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} = \frac{1}{2} \frac{k \frac{l^2}{EI} A}{\sqrt{1+k \frac{l^2}{EI} A \sigma}} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \\ &\approx \frac{2.72 \times 10^{-8}}{\sqrt{1+5.77 \times 10^{-8} \sigma}} \frac{\partial \sigma}{\partial T}. \end{aligned} \quad (8)$$

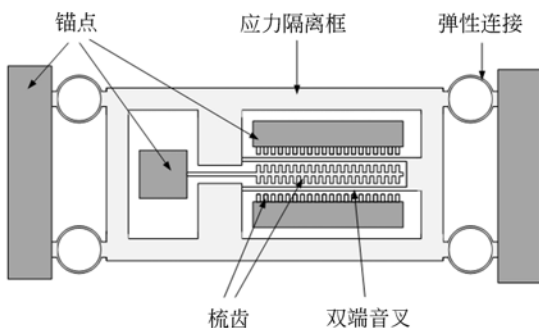
与材料弹性模量、结构尺寸引起的频率-温度系数对比可知,结构轴向热应力是影响应力测试结构固有频率温度稳定性的主要因素,影响量级比其它影响因素高 2 个数量级。

4 应力隔离结构

轴向热应力是造成结构固有频率随温度变化的主要因素,如果在结构上隔离热应力,结构的频率-温度系数可以降低 2 个数量级,有效提高微机械结构的温度稳定性。设计了包括应力隔离框和环形弹性连接的应力隔离结构,如图 3(a)所示。

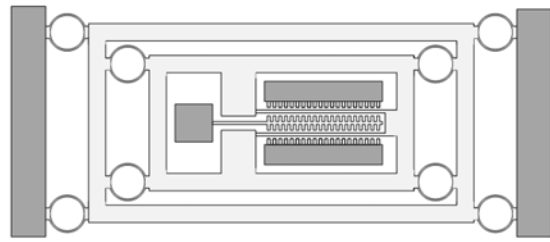
该应力隔离结构在应力测试结构的外侧增加应力隔离框,应力隔离框通过弹性连接结构与基底键合,由于应力隔离框的刚度远大于弹性连接,因此温度引起的结构热变形大部分发生在了弹性连接结构上,音叉梁中的轴向热应力较小,可以实现良好的应力隔离效果。

为了进一步验证应力隔离结构的应力隔离效果,同时设计了带有双层应力隔离框的结构,如图 3(b)所示。应力隔离结构中的音叉结构尺寸和应力测试结构的尺寸相同。



(a) 单层应力隔离框

(a) Single stress-suppressing frame



(b) 双层应力隔离框

(b) Double stress-suppressing frame

图 3 应力隔离结构示意图

Fig. 3 Diagram of stress-suppressing structure

5 温度仿真与实验

5.1 ANSYS 仿真

采用 ANSYS 有限元分析软件对应力测试结构和应力隔离结构进行热应力仿真和预应力模态仿真,得到不同温度下的热应力和固有频率,仿真温度为 $-50 \sim 85 \text{ } ^\circ\text{C}$,无应力参考温度为 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$,仿真温度点分别为 $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $-35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $-15 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $55 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $70 \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $85 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

在无应力的情况下 ($25 \text{ } ^\circ\text{C}$), $\langle 110 \rangle$ 晶向的应力测试结构和应力隔离结构的固有频率仿真值分别为 40.86 kHz 和 40.84 kHz 。

5.2 温度实验

应力测试结构和应力隔离结构均采用静电驱动和电容检测方式,通过开环扫频的方式得到结构的谐振频率。

测试不同温度下结构的谐振频率,温度实验包括一个完整的温度循环: $25 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 85 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow -50 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 25 \text{ } ^\circ\text{C}$,测试温度点和仿真温度点相同。将结构放入恒温箱,每达到一个测试温度,保持恒温 (45 min) 待输出信号稳定后,测试应力测试结构和应力隔离结构的谐振频率。

在常温下, $\langle 110 \rangle$ 晶向的应力测试结构和应力隔离结构的固有频率的测试值分别为 44.00 kHz 和 40.75 kHz 。两种结构的音叉结构的设计参数相同,但两种结构的固有频率不同,这主要是由加工误差和残余应力造成的。

5.3 仿真和实验结果分析

为了验证应力测试结构和应力隔离结构的温度特性的普遍性,分别研究了结构主方向为 $\langle 110 \rangle$ 晶向和 $\langle 100 \rangle$ 晶向结构的温度特性。表 1 所

示为应力测试结构和应力隔离结构的固有频率、应力的温度仿真和实验结果。

表 1 应力测试结构和应力隔离结构温度特性仿真与实验结果

Tab. 1 Simulation and experience results of stress-testing and stress-suppressing structures' temperature characteristics

		<110>晶向		<100>晶向	
		仿真结果	实验结果	仿真结果	实验结果
应力测试结构	常温下的固有频率(kHz)	40.86	44.10	35.95	34.81
	平均频率-温度系数(ppm/°C)	5 341	7 825	5 477	4 706
	平均应力-温度系数(MPa/°C)	0.143 2	0.227 0	0.112 0	0.147 8
应力隔离结构	常温下的固有频率(kHz)	40.84	40.75	35.92	35.91
	平均频率-温度系数(ppm/°C)	-8.524	-31.61	17.32	-44.97
	平均应力-温度系数(MPa/°C)	0.000 741 3	-	0.000 741 7	-
隔离效果	频率隔离比例(%)	0.16	0.41	0.32	0.96
	应力隔离比例(%)	0.52	-	0.66	-

5.3.1 固有频率的温度特性

图 4 所示为<110>晶向的应力测试和隔离结构的频率-温度仿真和实验结果图,相应的实验和仿真结果较为一致。由结果可知,应力测试结构的固有频率-温度系数呈明显的非线性,应力隔离结构的固有频率对温度的敏感性很低。在-50~+85 °C 温度内,实验得到的<110>晶向的应力测试结构、应力隔离结构的平均频率-温度系数分别为 7825 ppm/°C 和-32 ppm/°C,后者降为了前者的 0.41%,应力隔离结构的固有频率具有良好的温度稳定性。

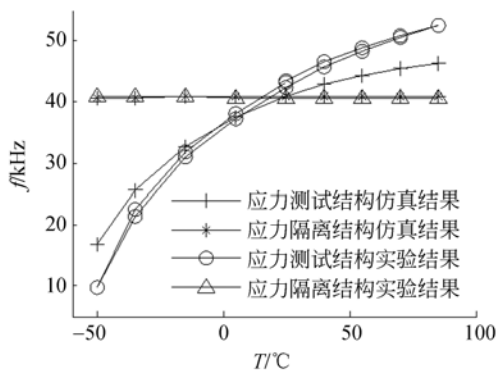


图 4 <110>晶向的应力测试和隔离结构的频率-温度图,包括仿真和实验结果

Fig. 4 Frequency-temperature diagram of <110> oriented stress-testing and stress-suppressing structures, including simulation and experience results

为了进一步验证应力隔离结构提高温度稳定性的效果,对比测试了单隔离框和双隔离框应力

隔离结构的固有频率的温度特性。图 5 所示为相应的<110>晶向结构的实验结果图,并以单隔离框结构的仿真结果为对比。常温下单框和双框的应力隔离结构的固有频率差值是由于结构加工误差造成的,两者的固有频率随温度变化的趋势一致。由式(5)和(8)可知,热应力引起的固有频率-温度系数为较大的正值,弹性模型引起的频率-温度系数约为-30 ppm/°C,实验得到的应力隔离结构的频率-温度系数约-31.61 ppm/°C。说明热应力已经不是温度影响结构固有频率的主要因素,结构热应力对固有频率的影响量级已经和材料弹性模量的影响量级相同,结构热应力已经被抑制到了应力测试结构的 2 个数量级以下,且单隔离框结构已经达到了良好的应力隔离效果。

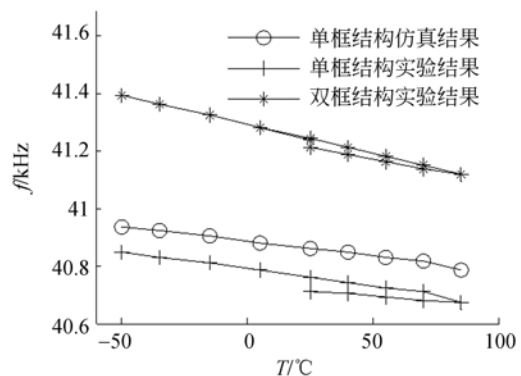


图 5 <110>晶向的应力隔离结构的频率-温度图,包括仿真和实验结果

Fig. 5 Frequency-temperature diagram of <110> oriented stress-suppressing structures, including simulation and experience results

5.3.2 应力的温度特性

图 6 所示为 $\langle 110 \rangle$ 晶向的应力测试结构和隔离结构的应力-温度仿真图。在 $-50 \sim +85\text{ }^\circ\text{C}$ 温度内,应力测试结构的轴向应力变化值约 19.3 MPa,而应力隔离结构仅为 0.1 MPa,后者的轴向热应力被抑制到了前者的 0.52%。由此可见,这种应力隔离结构对应力的隔离效果显著。

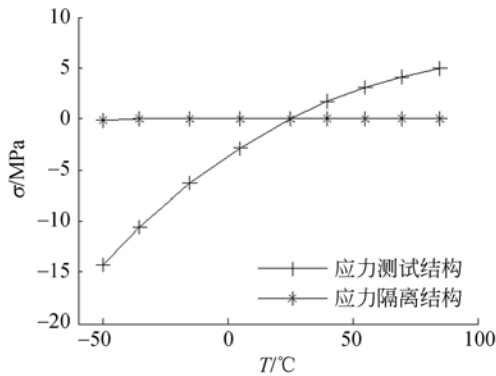


图 6 $\langle 110 \rangle$ 晶向的应力测试和隔离结构的应力-温度仿真图

Fig. 6 Stress-temperature simulation diagram of $\langle 110 \rangle$ oriented stress-testing and stress-suppressing structures

轴向应力是造成应力测试结构频率变化的最主要因素,可以根据式(2)由固有频率实验值计算得到对应的轴向应力。图 7 所示为 $\langle 110 \rangle$ 晶向的应力测试结构的应力-温度仿真和实验结果图,两者的变化趋势相互吻合,测试温度范围内的平均应力-温度系数的实验结果达到了 0.227 MPa/ $^\circ\text{C}$,和仿真结果 0.143 MPa/ $^\circ\text{C}$ 量级一致,且呈现明显的非线性,验证了硅的线性膨胀系数会随温度发生较大的变化。对于应力隔离结构,由于轴向应力对结构频率的影响和弹性模量的影响量级一致,难以由频率实验结果求出准确的轴向应力。但由测试得到的频率-温度系数知,热应力已经被抑制到了应力测试结构热应力的 2 个数量级以下。由此可知,热应力是影响结构温度稳定性的主要因素,应力隔离结构具有良好的应力隔离效果。

由 $\langle 100 \rangle$ 晶向的应力测试结构和应力隔离结构的温度仿真和实验结果得出的结论与 $\langle 110 \rangle$

参考文献:

[1] 赵阳,袁安萍,施芹,等. 硅微陀螺仪零偏稳定性的

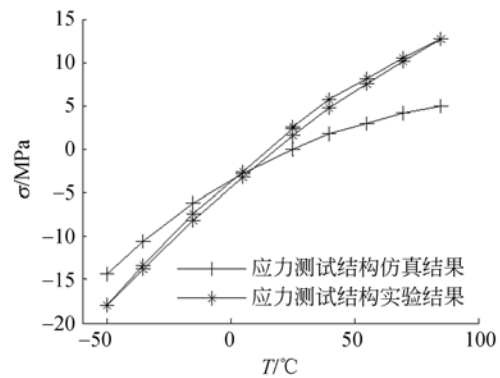


图 7 $\langle 110 \rangle$ 晶向的应力测试结构的应力-温度图,包括仿真和实验结果

Fig. 7 Stress-temperature diagram of the $\langle 110 \rangle$ oriented stress-testing structure, including simulation and experimental results

晶向结构的结论一致,具体仿真与实验数据如表 1 所示。

6 结 论

本文设计了一种应力测试结构和应力隔离结构,温度变化引起的结构热应力是导致应力测试结构固有频率变化的主要因素,通过仿真和实验验证了应力隔离结构对热应力具有良好的隔离作用,获得了较好的温度稳定性。

温度对 MEMS 应力测试结构的固有频率有很大的影响,其中,结构热应力引起的频率-温度系数比弹性模量引起的系数高约 2 个数量级,因此,抑制微结构的热应力可以有效提高结构的温度稳定性。并且,硅的线性膨胀系数随温度变化,因而引起的热应力呈明显的非线性,如果将硅的线性膨胀系数当做常量处理会造成较大误差。设计的应力隔离结构将温度引起的音叉梁的轴向应力减小了 2 个数量级,而且可以释放加工引入的残余应力,结构的频率-温度系数由 5000 ppm/ $^\circ\text{C}$ 左右降到了 50 ppm/ $^\circ\text{C}$ 以下。

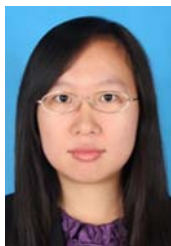
应力隔离结构具有非常好的应力隔离效果,从源头上抑制了温度影响因素引入整个微机械系统,可以应用在其它由于热应力对温度敏感的 MEMS 结构来提高其温度稳定性。

优化[J]. 光学 精密工程,2014,22(9):2381-2388.

ZHAO Y, QIU AN P, SHI Q, *et al.*. Optimization of bias stability for silicon microgyroscope[J].

- Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2381-2388. (in Chinese)
- [2] YAZDI N, AYAZI F, NAJAFI K. Micromachined inertial sensors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1640-1659.
- [3] KOUREPENIS A, BORENSTEIN J, CONNELLY J, *et al.*. Performance of MEMS inertial sensors [C]. *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 1998, Palm Springs, California IEEE, USA*: 1-8.
- [4] 翁彦雯,董景新,刘云峰. 微机械加速度计的温度特性实验研究[J]. *航空精密制造技术*, 2004(4): 37-40.
WEN Y W, DONG J X, LIU Y F. Experimental study on temperature characteristic of micro machine accelerometer[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2004(4): 37-40. (in Chinese)
- [5] 杨亮,苏岩,袁安萍,等. 高品质因数微机械陀螺的温度自补偿[J]. *光学精密工程*, 2013(11): 2870-2876.
YANG L, SU Y, QIU AN P, *et al.*. Self-temperature compensation for high quality micro-machined gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013(11): 2870-2876. (in Chinese)
- [6] 曹慧亮,李宏生,王寿荣,等. 硅微机械陀螺仪测控电路的温度补偿[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12): 3118-3125.
CAO H L, LI H SH, WANG SH R, *et al.*. Temperature compensation of monitoring circuit for silicon MEMS gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3118-3125. (in Chinese)
- [7] SALVIA J C, MELAMUD R, CHANDORKAR S A, *et al.*. Real-time temperature compensation of MEMS oscillators using an integrated micro-oven and a phase-locked loop [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(1): 192-201.
- [8] JHA C M, HOPCROFT M A, CHANDORKAR S A, *et al.*. Thermal isolation of encapsulated MEMS resonators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(1): 175-184.
- [9] SAMARAO A K, AYAZI F. Temperature compensation of silicon resonators via degenerate doping [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(1): 87-93.
- [10] ROESSIG T A, HOWE R T, PISANO A P, *et al.*. Surface-micromachined resonant accelerometer [C]. *Solid State Sensors and Actuators, IEEE, 1997, Chicago, USA*: 859-862 vol. 2.
- [11] 陈志勇,周斌,张嵘,等. 两端固定音叉的力-频率关系及其非线性[J]. *中国惯性技术学报*, 2008(3): 355-358.
CHEN ZH Y, ZHOU B, ZHANG R, *et al.*. Force-frequency relation and its nonlinearity of double-ended tuning fork [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008(3): 355-358. (in Chinese)

作者简介:



刘燕锋(1989—),女,山西晋中人,博士研究生,2011年于清华大学获得学士学位,主要从事MEMS惯性技术研究。
E-mail: liuyanfeng_good@163.com

导师简介:



张嵘(1969—),男,湖北汉川人,研究员,博士生导师,2007年于清华大学获得博士学位,主要从事高精度惯性仪表及系统技术和微机械惯性仪表及系统技术等方面的研究。
E-mail: rongzh@mail.tsinghua.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)