

文章编号 1004-924X(2010)10-2178-07

低温环境下 MEMS 微构件的动态特性及测试系统

余东生², 王晓东^{1,2}, 张习文², 王立鼎^{1,2}

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:研究了微机电系统(MEMS)微构件的谐振频率等动态特性在低温环境下的变化规律,从理论上分析了改变环境温度对微悬臂梁谐振频率的影响,并对低温环境下微构件的动态特性测试技术进行了研究。研制了低温环境下 MEMS 动态特性测试系统,采用半导体冷阱实现低温环境,利用压电陶瓷作为底座激励装置的驱动源,通过底座的冲击激励,使微悬臂梁处于自由衰减振动状态,使用激光多普勒测振仪对微悬臂梁的振动响应进行检测,从而获得微悬臂梁的谐振频率。利用研制的测试系统,在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~室温的环境下对单晶硅微悬臂的谐振频率进行了测试,结果表明,随着温度的降低,微悬臂梁的谐振频率略有增大,其谐振频率的温度变化率约为 -0.263 Hz/K ,与理论分析的结果基本一致。该测试装置能够有效地完成在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~室温环境下微构件的动态特性测试。

关键词:微机电系统;动态特性;低温;微悬臂梁;冲击激励

中图分类号:TH825;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101810.2178

Dynamic testing of MEMS micro-structure and its measurement system at low temperatures

SHE Dong-sheng², WANG Xiao-dong^{1,2}, ZHANG Xi-wen², WANG Li-ding^{1,2}

- (1. *Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China.*
2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian 116024, China)*

Abstract: To investigate the dynamic characteristics of micro-structure in a Micro-electro-mechanical System(MEMS) at a low temperature environment, a theoretical model was established and the effect of environmental temperatures on the resonant frequency of a micro-cantilever was researched. Then, a dynamic testing system for MEMS at low temperature was developed. In testing, a thermoelectric cooling refrigerator was utilized to generate the low temperature environment and the piezoelectric ceramic was used as the driving source to establish the base excitation device. Through the base impact excitation, the resonance frequencies were obtained by analyzing the impulse response signals and the frequency response of micro-cantilever was tested by using a laser Doppler vibrometer. The dynamic testing experiments for the silicon micro-cantilever were carried out from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to room temperature. Obtained results show that the resonance frequency slightly increases with the decreasing tem-

收稿日期:2009-12-08;修订日期:2010-03-10.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 50535030);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-06-0279)

perature, and it is consistent with that of the theoretical analysis. The temperature dependency of frequency is about -0.263 Hz/K , which is a little smaller than that of the theoretical results. The measurement device is very effective to carry out dynamic testing of microstructures from $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ to room temperature.

Key words: Micro-electro-mechanical System(MEMS); dynamic characteristics; low temperature environment; micro-cantilever; impact excitation

1 引言

MEMS 器件以其体积小、质量轻、功耗低等优点在工业、信息、国防、航空航天、航海、医疗、生物工程、农业、环境和家庭服务等领域都有着巨大的应用前景^[1-2],然而作为实际产品的 MEMS 器件,其稳定性和可靠性还不尽人意,从而限制了 MEMS 器件的应用范围^[3]。

目前,对 MEMS 稳定性和可靠性的研究主要集中在对特定器件或特定产品的性能测试上^[4-5],而对大多数 MEMS 器件来讲,如微谐振器、微加速度计等,它们的核心可动微构件的动态特性与器件的稳定性和可靠性直接相关,所以研究 MEMS 器件中可动微结构的动态特性,尤其是研究不同环境条件对 MEMS 微构件动态特性的影响,可以拓宽器件的应用范围,满足 MEMS 产品在恶劣环境下使用的需求^[6]。

国内外的一些研究机构已经对一些特定环境下微结构的动态特性进行了研究。法国勃艮第大学分别对微悬臂梁在 $10^{-2} \sim 10^6 \text{ Pa}$ 和 $290 \sim 390 \text{ K}$ 条件下的动态特性及测试技术进行了研究^[7];大连理工大学的王涛等人对高 g 值环境下 ($0 \sim 10\,000g$) 微悬臂梁的动态特性和测试方法进行了研究^[8];但对低温环境下微结构的动态特性以及相关的测试技术尚未见有报导。目前, MEMS 的动态特性测试技术在微结构激励方法和振动检测技术两方面都有了较大的进展^[9-10]。应用微结构激励进行 MEMS 动态特性测试的方法可分为 3 大类,即基于压电陶瓷的底座激励方法,嵌入驱动元件的激励方法和基于外部场能的激励方法,其中基于压电陶瓷的底座激励是最简单、实用的激励方法。基于振动检测技术进行 MEMS 动态特性测试的技术可分为 2 大类,即内嵌敏感元件的检测技术和非接触的光学测试技

术。内嵌敏感元件的检测技术由于需要在微结构内制作压阻或压电的传感单元,会改变微结构的动态特性,所以这种检测方法的准确性不高;非接触的光学测试技术主要包括频闪显微干涉测振技术,激光多普勒测振技术和电子散斑干涉测试技术等,其中激光多普勒测振技术在对离面运动检测时具有很高的测试精度。在设计 MEMS 动态特性测试装置时,需要根据实际的测试环境对所使用的激励方法和振动检测技术做出相应的改进。

本文首先对微悬臂梁在低温环境下谐振频率的温度特性进行了理论分析,随后对低温环境下微结构的激励方法和振动检测技术进行了研究。研制了一套低温环境下 MEMS 动态特性测试装置,采用压电陶瓷作为激励装置的激励源,激光多普勒测振仪作为振动检测装置,在 $-50 \text{ }^\circ\text{C} \sim$ 室温环境下对单晶硅微悬臂梁的动态特性进行了测试。通过与理论分析结果对比,得出了单晶硅微悬臂梁谐振频率随温度的变化规律。

2 理论分析

根据悬臂梁的弯曲振动方程可求出其一阶谐振频率。对于图 1 所示单层矩形截面微悬臂梁,其一阶谐振频率为^[11]

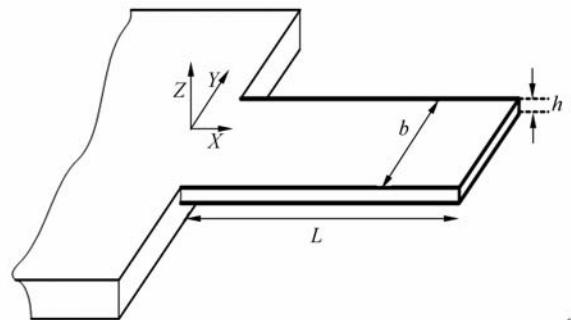


图 1 微悬臂梁结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-cantilever

$$f_1 = \frac{3.5156}{2\pi L^2} \sqrt{EI/\lambda} = \frac{0.162}{\sqrt{m}} \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot L^{-\frac{3}{2}} \cdot b^{\frac{1}{2}} \cdot E^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量, I 为惯性矩, λ 为线密度, h 为微悬臂梁厚度, L 为微悬臂梁长度, b 为微悬臂梁宽度。

对式(1)引入温度变量, 则有

$$f_1(T) = \frac{0.162}{\sqrt{m}} \cdot h(T)^{\frac{3}{2}} \cdot L(T)^{-\frac{3}{2}} \cdot b(T)^{\frac{1}{2}} \cdot E(T)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式(2)对温度求偏导, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1(T)}{\partial T} &= \frac{0.162}{\sqrt{m}} \cdot \frac{3}{2} \cdot h^{\frac{1}{2}}(T) L^{-\frac{3}{2}}(T) b^{\frac{1}{2}}(T) \cdot \\ &E^{\frac{1}{2}}(T) \frac{\partial h(T)}{\partial T} - \frac{0.162}{\sqrt{m}} \cdot \frac{3}{2} \cdot h^{\frac{3}{2}}(T) L^{-\frac{5}{2}}(T) \cdot \\ &b^{\frac{1}{2}}(T) E^{\frac{1}{2}}(T) \frac{\partial L(T)}{\partial T} + \frac{0.162}{\sqrt{m}} \cdot \frac{1}{2} \cdot h^{\frac{3}{2}}(T) L^{-\frac{3}{2}}(T) \cdot \\ &b^{-\frac{1}{2}}(T) E^{\frac{1}{2}}(T) \frac{\partial b(T)}{\partial T} + \frac{0.162}{\sqrt{m}} \cdot \frac{1}{2} \cdot h^{\frac{3}{2}}(T) \cdot \\ &L^{-\frac{3}{2}}(T) b^{-\frac{1}{2}}(T) E^{-\frac{1}{2}}(T) \frac{\partial E(T)}{\partial T}, \quad (3) \end{aligned}$$

设温度为 T_0 时, 微悬臂梁一阶谐振频率为 $f_1(T_0)$, 将式(3)除以 $f_1(T)$, 当 $T=T_0$ 时有

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_1(T_0)} \frac{\partial f_1(T)}{\partial T} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{h(T_0)} \frac{\partial h(T)}{\partial T} - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{L(T_0)} \cdot \\ &\frac{\partial L(T)}{\partial T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{b(T_0)} \frac{\partial b(T)}{\partial T} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E(T_0)} \frac{\partial E(T)}{\partial T}. \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)就是微悬臂梁谐振频率随温度变化的关系式, 可以看出微悬臂梁谐振频率随温度的变化是由于微悬臂梁材料弹性模量的变化和其结构尺寸

的变化引起的。

如果材料在各个方向上的热膨胀系数是相同的, 那么有:

$$\frac{1}{h(T_0)} \frac{\partial h(T)}{\partial T} = \frac{1}{L(T_0)} \frac{\partial L(T)}{\partial T} = \frac{1}{b(T_0)} \frac{\partial b(T)}{\partial T} = \alpha, \quad (5)$$

设弹性模量的温度相对变化率为:

$$\frac{1}{E(T_0)} \frac{\partial E(T)}{\partial T} = \beta, \quad (6)$$

那么微悬臂梁一阶谐振频率温度变化率为:

$$\frac{\partial f(T)}{\partial T} = \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cdot f_1(T_0). \quad (7)$$

对单晶硅材料来说, 其线膨胀系数^[12] $\alpha = 2.6 \times 10^{-6}/K$, 弹性模量的相对变化率^[13] $\beta = -52 \times 10^{-6}/K$, 其谐振频率 $f(T)$ 与温度 T 的变化关系式为:

$$f(T) = -24.7 \times 10^{-6} f_1(T_0) \cdot T + (1 + 24.7 \times 10^{-6} T_0) f_1(T_0), \quad (8)$$

可以看出, 由于热效应引起结构尺寸的改变对微悬臂梁谐振频率的影响相对很小, 所以可以近似地认为其谐振频率的改变是由于材料弹性模量的变化引起的, 并且, 谐振频率随着温度降低而增大。

3 低温环境微结构动态特性测试系统

低温环境微结构动态特性测试系统的工作原理如图 2 所示, 主要由低温环境单元、真空环境及微结构激励单元、计算机控制单元和激光多普勒测振单元组成。

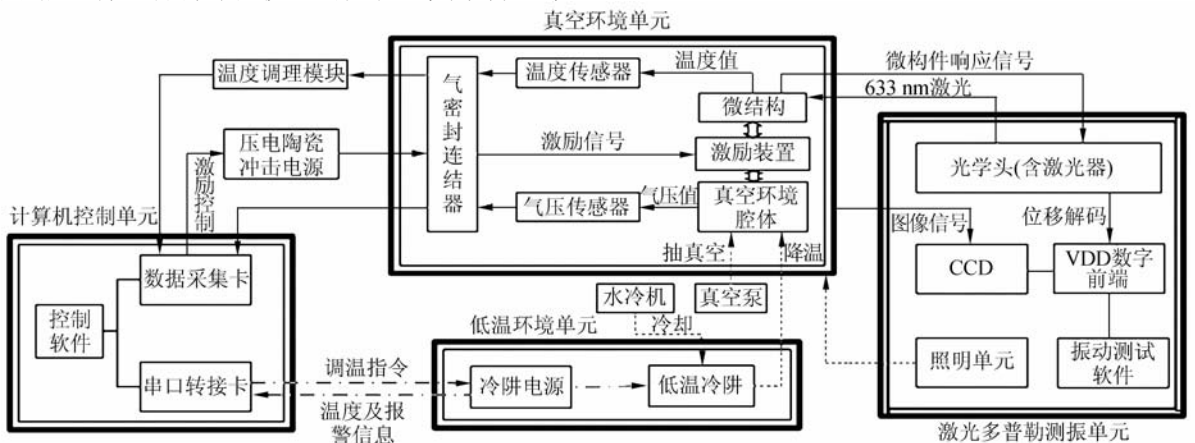


图 2 测试系统工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of testing system

3.1 低温环境的实现

如图 3 所示,采用半导体冷阱作为制冷装置,可实现 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境,其温控精度可达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷阱控制器与工控机之间通过 RS-485 串口进行通信。冷阱底部有水槽,用来对冷阱中半导体制冷堆进行降温,采用水冷机对水槽内的水降温,可加快冷阱的制冷速度。冷阱顶部加装光学玻璃窗口,非接触光学测振仪器可通过光学玻璃窗口对冷阱内微悬臂梁的振动响应进行测试。冷阱制冷时,由于冷阱内外的温度差异,在玻璃窗口外表面会出现结雾的现象,本文采用一种防雾型玻璃清洁剂解决了低温冷阱观察窗口结雾的问题。

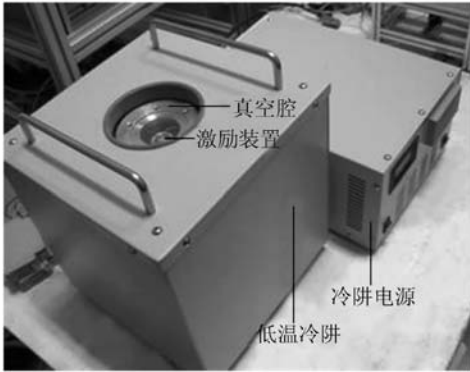


图 3 低温冷阱

Fig. 3 Cold trap

3.2 真空腔体

微结构及激励装置不是直接放置在冷阱中,而是将微悬臂梁及其激励装置安装在一个真空腔体当中,然后将真空腔体置于冷阱中。设计真空腔体的主要目的是由于微构件尺寸很小,在低温环境下,空气中的水蒸汽会在微悬臂梁的表面结霜,带来附加质量,影响测试精度。

压电陶瓷的电源线和温度传感器的信号线通过腔体底部的两个不同的真空接头与腔体外部相连;气压传感器安装在腔体的底部,用来检测腔内气体的真空度。腔体抽真空后,通过拧紧腔体底部一字螺丝来密封真空腔体,断开真空泵,再将腔体放置到冷阱当中,从而实现了对微悬臂梁的降温。真空腔体顶部装有光学玻璃窗口,便于外部光测设备对微悬臂梁的振动响应进行测试。

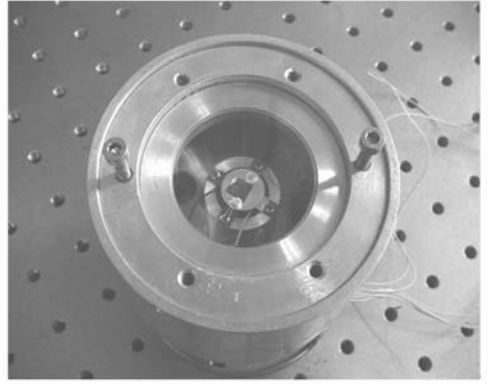


图 4 真空腔体

Fig. 4 Vacuum chamber

3.3 激励装置

激振装置的结构如图 5 所示,待测微器件粘接在顶部的十字弹簧片上,十字弹簧片通过螺钉安装在套筒顶部;压电陶瓷、上联接块、钢球、下联接块和垫块安装在套筒内部,压电陶瓷底部粘接在上联接块上,顶部和十字弹簧片接触,改变垫块的厚度,使十字弹簧片产生变形压紧压电陶瓷;上联接块和下联接块之间采用钢球过渡;套筒用导热性好的硬铝材料加工而成。

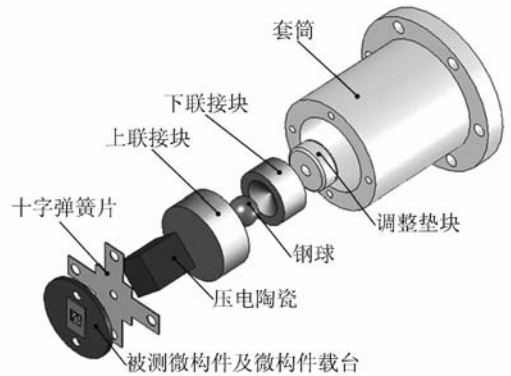


图 5 微构件激励装置

Fig. 5 Microstructure excitation device

如此设计的优势在于:(1)压电陶瓷在施加一定的预紧力的情况下,会延长其使用寿命,采用十字弹簧片对压电陶瓷施加预紧力,调整调节垫块的厚度可改变预紧力大小。(2)由于压电陶瓷是由多层压电材料粘接而成的,所以不能承受剪切力,在上连接块与下连接块上都加工有锥坑,锥坑内安装有钢球,这样可以将面接触力转变为线接触力,通过自调整来消除压电陶瓷安装时产生的

剪切力。

压电陶瓷的引线通过真空底部的真空开关与外部的压电陶瓷冲击电源^[8]相连接。

3.4 振动信号检测

采用 POLYTEC 公司的 OFV-534 单点式激光多普勒测振仪对微悬臂梁的振动信号进行检测。测振仪主要包括激光单元、光学头、CCD 等部件,其中激光单元中的氩-氟激光发生器将 633 nm 的激光通过光纤传送到测振仪头部的一个高精度的干涉仪内。这束激光被分成一束测量光束和一束参考光束,测量光束照射在被测物体上被反射;返回光束由于多普勒效应会在频率上产生微弱的偏移,并且包含了被测物体的位移和速度信息。光探测器将反射回来的光束与参考光束进行干涉,并将其转换成频率调制的电信号。这个电信号送入到测振仪的解调电路并按比例解调成电压或者位移信号,从而获得微悬臂梁的振动响应信号。



图 6 低温环境 MEMS 动态测试系统

Fig. 6 Dynamic testing system of microstructure at low temperature

如图 6 所示,激光多普勒测振仪安装在一个五维微动台上,在 CCD 的帮助下可在显示器屏幕上清晰地分辨激光光斑与微悬臂梁之间的相对位置,通过调节微动台的调节旋钮,可以更方便地将激光光斑移动到微悬臂梁表面上的指定位置。测量光束透过冷阱顶部的石英玻璃窗口和真空腔体顶部的观测窗口对微悬臂梁的振动信号进行检测。

4 测试实验

在设定的目标温度下,对微悬臂梁进行冲击激励,利用激光多普勒测振仪检测振动响应信号,采用 POLYTEC 公司的振动测试软件得到微悬臂梁的时域响应曲线。

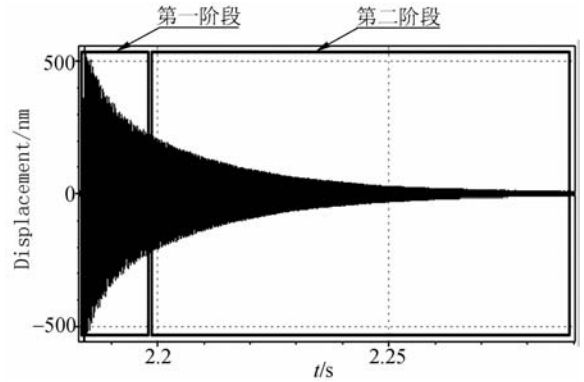


图 7 微悬臂梁时域响应信号

Fig. 7 Measured impulse time response of micro-cantilever

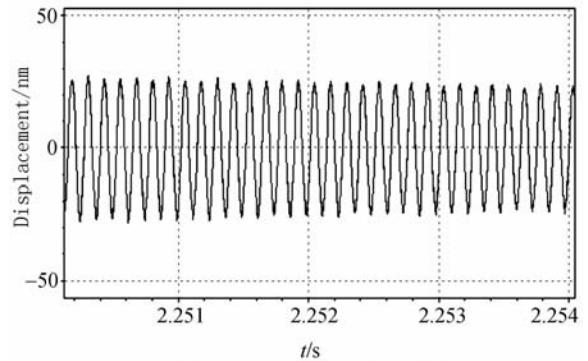


图 8 微悬臂梁自由衰减振动曲线

Fig. 8 Free damping time response of micro-cantilever

如图 7 所示,微悬臂梁的时域响应信号可分为两个阶段,第一个阶段,即振动的初始阶段,响应信号不仅包含微悬臂梁自身的振动响应,还耦合了底座、安装结构等的振动响应;第二个阶段,这个阶段微悬臂梁进入有阻尼自由衰减振动状态。图 8 选取了第二阶段的一段信号,利用测试软件的信号后处理模块进行 FFT 变换后,即可以获得微悬臂梁的一阶谐振频率,图 9 为在室温(26 ℃)下测得的微悬臂梁谐振频率。

每隔 20 ℃ 设定一个目标温度点,每个目标温度点记录 3 组数据,如表 1 所示。对各个目标温度下测试结果求均方根值,再采用最小二乘法

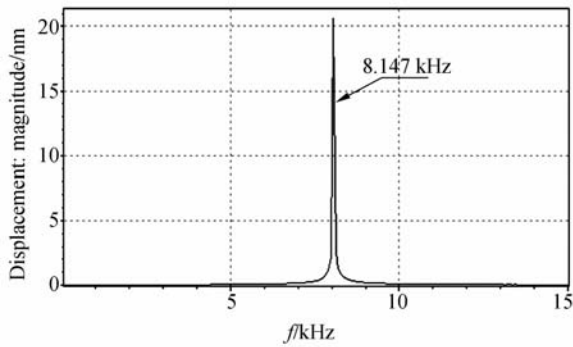


图 9 微悬臂梁一阶谐振频率曲线

Fig. 9 First order resonance frequency of micro-cantilever

拟合实验数据可以得到微悬臂梁一阶谐振频率随温度的变化关系曲线,如图 10 所示。从图中可以得到微悬臂梁谐振频率的温度实际变化率约为 -0.263 Hz/K 。

表 1 各目标温度下的微悬臂梁谐振频率测试结果

(单位: kHz)

Tab. 1 Measuring results of frequencies of micro-cantilever under aim temperatures (Unit: kHz)

测试次数	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	26	10	-10	-30	-50
1	8.148	8.149	8.155	8.160	8.160
2	8.148	8.152	8.152	8.156	8.162
3	8.145	8.149	8.155	8.158	8.164
均方根值	8.147	8.150	8.154	8.158	8.162

利用公式(8)可以得到微悬臂梁一阶谐振频率随温度变化的理论曲线,谐振频率为 8.147 kHz (室温 $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$)的硅微悬臂梁,其一阶谐振频率在 $-50 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim$ 室温随温度的变化关系曲线如图 10 所示,同时可以求得微悬臂梁谐振频率随温度的理论变化率为 -0.201 Hz/K 。

从图 10 中可以看出,微悬臂梁的一阶谐振频率随温度的降低而增大,并且近似地呈线性关系,与理论分析的结果相一致。其谐振频率的温度实际变化率的绝对值要比由公式计算出的理论值的

绝对值略大。其原因在于在计算谐振频率随温度变化率的理论值时所采用的单晶硅弹性模量随温度的相对变化率是一个平均值,而实际上单晶硅材料在不同的温度范围内其弹性模量的温度变化率并不相同,所以采用平均值计算时会带来偏差。

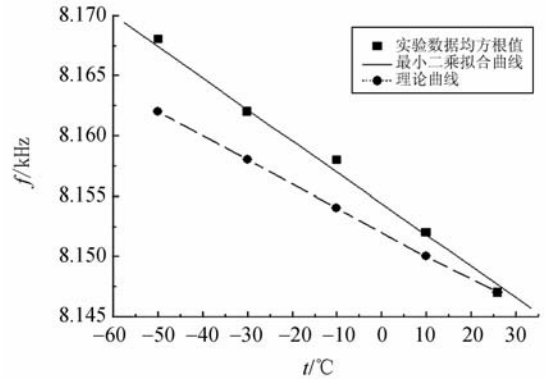


图 10 微悬臂梁谐振频率随温度变化曲线

Fig. 10 Frequency of micro-cantilever vs temperature

5 结 论

本文对低温环境下单晶硅微悬臂梁谐振频率的温度特性进行了研究。首先,从理论上分析单晶硅微悬臂梁谐振频率随温度变化的原因,指出其本质上是由于温度变化引起了材料弹性模量的变化和结构尺寸的变化,从而导致微悬臂梁谐振频率的改变。研究了在低温环境下对微构件的动态特性进行测试的方法,建立了低温环境微悬臂梁动态特性测试系统。以压电陶瓷为激励源,采用激光多普勒测振仪对微构件振动信号进行检测,在 $-50 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim$ 室温对单晶硅微悬臂梁的谐振频率进行了测试。实验测得的谐振频率的温度变化率约为 -0.263 Hz/K ,比理论值略小。实验结果表明,单晶硅微悬臂梁的谐振频率随温度的升高而减小,且近似地呈线性关系,与理论分析的结果相吻合。

参考文献:

[1] 周兆英,叶雄鹰,崔天宏,等. 微米纳米技术及微型机电系统[J]. 光学精密工程,1998,6(2):1-7. ZHOU Z Y, YE X Y, CUI T H, et al.. Microtechnology/Nanotechnology and MEMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(2): 1-7. (in Chinese)

[2] WEN H K. Trends and frontiers of MEMS [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 136: 62-67.

[3] TANAKA M. An industrial and applied review of new MEMS device features [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84: 1341-1344.

- [4] CHOA S H. Reliability of vacuum packaged MEMS gyroscopes [J]. *Microelectronics Reliability*, 2005, 45:361-369.
- [5] TANNER D M. MEMS reliability: where are we now? [J]. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49: 937-940.
- [6] RAITERI R, GRATTAOLA M, BUTT H J, *et al.*. Micromechanical cantilever-based biosensors [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 79:115-126.
- [7] MERTEN J, FIONOT E, THUNDAT, *et al.*. Effects of temperature and pressure on microcantilever resonance response [J]. *Ultramicroscopy*. 2003, 97(1-4):119-126.
- [8] 王涛. 高 g 值环境典型微结构动态特性及其测试技术研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2008:56-57.
WANG T. *Study on Dynamic Characteristics and Testing Technology of Microstructure under High g-Force* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008:56-57. (in Chinese)
- [9] LIN R M, WANG W J. Structural dynamics of Microsystems—current state of research and future directions [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 1015-1043.
- [10] 李智, 王向军. 微机电系统测试技术及方法 [J]. 光学精密工程, 2003, 11 (1):37-44.
LI Z, WANG X J. MEMS measurement technologies and methods [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11 (1):37-44. (in Chinese)
- [11] 王文亮, 张文, 罗惟德, 等. 结构动力学 [M]. 上海: 复旦大学出版社. 1993. 245-251.
WANG W L, ZHANG W, LUO W D, *et al.*. *Dynamics of Structures* [M]. Shanghai: Fudan University Press. 1993. 245-251. (in Chinese)
- [12] PETERSEN K. Silicon as a mechanical materials [J]. *Proceedings of IEEE on Electron Devices*. 1982, 70(5):420-457.
- [13] MCSKIMIN H J. Measurement of elastic constants at low temperature by means of ultrasonic waves data for silicon and germanium single crystals and for fused silica [J]. *J. Appl. Phy.* 1953, (24):988-997.

作者简介:



余东生(1980—),男,辽宁锦州人,博士研究生,2002年、2006年于大连理工大学获得学士、硕士学位,主要从事MEMS动态测试技术的研究工作。E-mail: dutsds@gmail.com



王晓东(1967—),男,天津人,教授,博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事精密仪器设计与制造、微装配技术与系统等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn



张习文(1985—),男,湖北荆门人,博士研究生,2006年于华中农业大学获得学士学位,主要从事微装配技术与系统的研究。E-mail: zhangxw023@yahoo.com.cn

导师简介:



王立鼎(1934—),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,1960年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事超精密齿轮工艺与测试、精密机械设计及微纳米机械等方面的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn