

基于空耦超声激励的微结构模态频率温度特性研究^{*}

余东生¹ 于震¹ 田江平²

(1. 渤海大学控制科学与工程学院 锦州 121013; 2. 大连理工大学能源与动力学院 大连 116024)

摘要: 为了研究微悬臂结构弯曲振动模态频率的温度特性,首先针对各向异性材料的等截面矩形微悬臂结构建立了其各阶模态频率温度系数的理论模型;然后搭建了包括激光测振单元、空耦超声激励单元和温度控制单元的非接触式微结构动态特性测试系统;最后利用所搭建的测试系统分别对等截面矩形单晶硅微悬臂梁在室温~300℃时的动态特性进行了测试,获得了微悬臂梁前三阶弯曲振动模态频率随温度的变化规律和频率温度系数。研究表明,单晶硅微悬臂梁前三阶弯曲振动模态频率随着温度的升高而呈近似线性的减小,并且微悬臂梁前三阶弯曲振动模态具有几乎相同的频率温度系数,其中一阶模态频率的温度系数为 $-2.18 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,二阶模态频率的温度系数为 $-1.91 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,三阶模态频率的温度系数为 $-2.01 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,前三阶模态频率温度系数的测试结果与理论模型预测值的偏差分别 $3 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 空耦超声激励;微结构;频率温度系数;弯曲振动模态

中图分类号: TH825 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4099

Study on temperature dependence of modal frequencies for microstructures based on air-coupled ultrasonic excitation

She Dongsheng¹ Yu Zhen¹ Tian Jiangping²

(1. College of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To study the temperature characteristics of flexural vibration modal frequencies for microcantilevers, the theoretical models of temperature-frequency coefficients were established for anisotropic materials microcantilevers with constant rectangular cross-section. Then, a non-contact dynamic characteristic testing system for microstructures was constructed, including a laser vibrometer unit, air-coupled ultrasonic excitation unit, and temperature control unit. Finally, using the established testing system, the dynamic characteristics of single-crystal silicon microcantilevers with constant rectangular cross-section were tested over a temperature range from room temperature to 300℃. The change regularities with temperatures of the first three-order flexural vibration modal frequencies for the silicon microcantilever were figured out, and the temperature coefficients of the first three-order modal frequencies were obtained. The results indicate that the first three bending vibration modal frequencies of the single-crystal silicon microcantilevers approximately linearly decrease with increasing temperature. Moreover, the temperature coefficients of the first three-order modal frequencies are almost the same. Specifically, the temperature coefficient for the first modal frequency is $-2.18 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, for the second modal frequency is $-1.91 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, and for the third modal frequency is $-2.01 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. The deviations of the test results of the temperature coefficients of the first three modal frequencies from the predicted values of the theoretical model are $3 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ and $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, respectively.

Keywords: air-coupled ultrasonic excitation; microstructures; temperature coefficient of frequencies; flexural vibration modal

收稿日期:2024-01-16

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52071064)、辽宁省教育厅重点项目(LJKZ1009)资助

0 引言

微型机械电子系统(micro-electro mechanical system, MEMS)器件中微机械结构的模态参数与器件的动态性能密切相关,通过模态测试获取微机械结构的模态参数已成为 MEMS 器件研发过程中至关重要的环节之一^[1-5]。随着 MEMS 器件应用领域的不断拓展,各种环境参数会以多种不同的方式来考验器件的鲁棒性和稳定性,因此,研究微机械结构模态参数在各种环境因素影响下的变化规律变得越来越重要^[6]。

温度是最常见、最重要的环境参数之一。微结构模态参数随温度的变化规律在近二十年来一直都是国内外科研人员关注焦点。Jiang 等^[7]对单晶硅压阻纳悬臂梁在 140~240 K 的动态特性进行了测试,得到其一阶谐振频率的温度系数为 $-2.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。Czaplewski 等^[8]对四面体非晶碳微梁在 300~900 K 的动态特性进行了测试,得到一阶模态固有频率的温度系数为 $-2.25 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。余东生等^[9]对室温~300 °C 的 T 型单晶硅微梁的一阶固有频率随温度的变化规律进行了测试研究,得到其一阶固有频率的温度系数为 $-2.71 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。Blue 等^[10]对 MEMS 谐振器中 U 型多层硅微悬臂梁谐振频率随温度的变化规律进行了研究,实验获得的频率温度系数为 $-1.75 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。可以看出,对于不同材料、结构的微结构,固有频率随温度的变化规律有很大的差异。近年来,随着 MEMS 器件性能的不不断提升,对微结构模态参数随温度变化规律的研究也有了更高的需求,体现在如下两个方面:一方面,不再仅局限于一阶模态参数随温度的变化规律,需要向更高阶模态拓展;另一方面,无论是在激励方法上还是在检测技术上均应实现完全的非接触式,避免在测试时对微结构产生干扰,从而提高测试结果的准确性。为了满足这两方面需求,在测试时需要使用适合的非接触式振动检测方法和非接触式振动激励方法。

近三十年来,国内外研究机构成功的将以激光多普勒测振技术为代表的多种光学测振方法应用到 MEMS 微结构的振动检测当中,这些方法具备非接触式、非破坏性的特点,并能够保证足够的空间分辨率、测试精度和测试带宽,可以满足微结构的非接触式模态测试需求^[11-12]。相比于非接触式的振动检测方法,在非接触式振动激励方法上的研究则相对滞后,目前在 MEMS 动态测试领域,以静电激励、压电激励、磁激励、电热激励、光热激励为代表的接触式激励方法^[13-14]和以基于压电陶瓷或激波的底座激励方法为代表的半接触式激励方法^[15]仍然占据主导地位,但这两类方法固有的缺陷使得准确地获取微结构的模态参数变得十分困难。现有的非接触式激励方法可分为两大类,一类是以激光作为激励源的激励方法^[16],另一类是以超声波作为激励源的激励方法^[17]。第 1 类方法可以实现对微结构非接触式冲击激励,激励能力强,但其主要缺点在于微结构表面激光投射区域的形貌特征会被改变,并

且由于热冲击效应,在该区域内将产生较大的热应力,导致微结构发生变形甚至被损坏。第 2 类方法不会破坏微结构表面,可以实现非接触式的激励,但由于超声波在空气中衰减严重,所以激励能力相对不足。

本文针对等截面矩形单晶硅微悬臂梁前三阶模态频率随温度的变化规律进行研究,在综合比较现有非接触式激励方法和非接触式测振方法优缺点的基础上,搭建基于空气耦合聚焦超声波的微结构激励装置和基于激光多普勒技术的动态特性测试系统,建立微悬臂结构前三阶弯曲振动模态频率的温度系数模型,并通过测试实验对模型进行验证和讨论。

1 空气耦合聚焦超声波激励原理

使用空气耦合聚焦超声波对微结构进行激励的原理如图 1 所示。

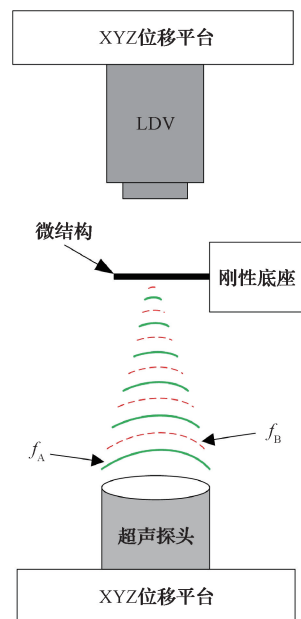


图 1 空耦超声激励原理

Fig. 1 Schematic of air-coupled ultrasonic excitation

当使用双带抑制载波调幅信号(double sideband suppressed carrier amplitude modulation, DSB-SC-AM)驱动点聚焦空气耦合超声波探头时,会导致超声探头发射出两束幅度相同、相位不同的超声波,一束超声波的频率为 $f_A = f_c - f_m/2$,另一束超声波的频率为 $f_B = f_c + f_m/2$,其中 f_c 为中心载波频率, f_m 为两超声波的频率差。两束超声波被聚焦到微结构表面并形成干涉,导致焦点 z 处声场能量密度发生改变,从而产生超声辐射力 $F(z, t)$,其表达式为^[18]:

$$F(z, t) = \frac{P(z)^2}{\rho_A c^2} \cos[2\pi f_m t + \Delta\phi(z)] d_r(z) dS \quad (1)$$

式中: ρ_A 为空气密度; c 为超声波声速; $d_r(z)$ 为焦点处的拖拽系数; $p(z)$ 为焦点处的超声波幅度; $\phi(z)$ 为焦点处两

超声波的相位差; dS 为超声波聚焦到微结构表面上的面积。微结构会在超声辐射力 $F(z, t)$ 的驱动下以两超声波的频率差 f_M 进行振动。当频率差 f_M 发生变化时,微结构的振动响应也随之发生变化,使用激光测振仪(laser Doppler velocimetry, LDV)获取每个 f_M 驱动频率下的微结构的振动响应,当 f_M 值与微结构固有频率相匹配时,微结构将产生谐振,因此,通过在探头频率带宽范围内逐渐改变频率差 f_M ,可以实现对该带宽范围内微结构各阶模态的激励。微结构被安装在一个刚性底座上,用来确保微结构在被激励的同时底座结构不会产生振动。空气耦合聚焦超声波探头被安装在一个精密位移平台上,通过调节精密位移平台可以实现两束超声波在微结构表面的聚焦。

2 微悬臂梁模态频率的温度系数模型

等截面矩形微悬臂梁弯曲振动前 n 阶固有频率可以表示为^[19]:

$$f_n = \frac{A_n}{2\pi \cdot \sqrt{12}} \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

式中: l 为微悬臂梁的长度; h 为微悬臂梁的厚度; E 是微悬臂梁的弹性模量; ρ 为微悬臂梁的密度; A_n 是振型常数,其中 $A_1 = 3.515$, $A_2 = 4.694$, 当 $n \geq 3$ 时, $A_n = (2n - 1)^2 \pi^2 / 4$ 。由于其结构尺寸、弹性模量和密度都是温度的函数,所以当微悬臂梁的温度为 T 时,其固有频率可以表示为:

$$f_n(T) = \frac{A_n}{2\pi \cdot \sqrt{12}} \cdot h(T) \cdot l(T)^{-2} \cdot E(T)^{\frac{1}{2}} \cdot \rho(T)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

如果已知当温度为 T_0 时,微悬臂梁的各阶弯曲振动模态频率为 $f_n(T_0)$,则固有频率温度系数的表达式为:

$$\frac{1}{f_n(T_0)} \cdot \frac{df_n(T)}{dT} = -2 \cdot \frac{1}{l(T_0)} \cdot \frac{dl(T)}{dT} + \frac{1}{h(T_0)} \cdot \frac{dh(T)}{dT} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E(T_0)} \cdot \frac{dE(T)}{dT} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\rho(T_0)} \cdot \frac{d\rho(T)}{dT} \quad (4)$$

将弹性模量的温度系数表示为 α ,密度的温度系数表示为 β ,如果微悬臂梁是由各向异性材料制作而成的,将长度方向的热膨胀系数表示为 ϵ_L ,厚度方向的热膨胀系数表示为 ϵ_h ,则式(4)可以改写为:

$$\frac{1}{f_n(T_0)} \cdot \frac{df_n(T)}{dT} = \frac{1}{2} \alpha - \frac{1}{2} \beta - 2\epsilon_L + \epsilon_h \quad (5)$$

由式(5)可以看出,对于各向异性的等截面矩形微悬臂梁来讲,其各阶弯曲振动模态固有频率从理论上都具有相同的温度系数,该温度系数仅由微结构的材料特性来决定。单晶硅弹性模量的温度系数为 $-5.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ^[20],其密度的温度系数为 $-1.3 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ^[21],另外虽然单晶硅是一种各向异性材料,但如果沿长度方向的晶向为 $\langle 110 \rangle$,

沿厚度方向的晶向为 $\langle 100 \rangle$,则在这两个方向上具有几乎相同的热膨胀系数,约为 $2.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[22-23],可以看出由于单晶硅悬臂梁的热膨胀系数相对较小,所以其频率温度系数主要是由其弹性模量的温度系数和密度的温度系数决定的。根据式(5)可知,等截面单晶硅矩形微悬臂梁各阶弯曲振动模态固有频率的温度系数约为 $-2.21 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

3 微结构动态特性测试系统

基于空耦超声的 MEMS 微结构动态特性测试系统主要由空耦超声激励单元、激光测振单元和温度控制单元组成。

空耦超声激励单元的核心器件是 ULTRAN 的 NCG350-D13-P38 型点聚焦空气耦合超声探头,如图 2 所示,该探头的带宽约为 140 kHz,焦距为 38 mm,焦点区域直径约为 2 mm;此外,该单元还包括 AGITEK 的 ATA-2042 功率放大器,ADVANTECH 的 PCI-1721-AE 模拟量输出板卡和 IPC-610L 工业控制计算机。在需要对微结构进行激励时,首先使用 LABVIEW 编写的任意波形发生器产生载波频率 f_c 等于 350 kHz 的 DSB-SC-AM 信号,其调制频率 f_M 可在 0~140 kHz 范围内任意选取,该信号经由 PCI-1721-AE 模拟量输出板卡的模拟量输出通道输出到 ATA-2042 功率放大器中,在 ATA-2042 功率放大器中放大到峰-峰值 400 V 后驱动 NCG350-D13-P38 型点聚焦空气耦合超声探头发射两束频率差为 f_M 的超声波,两束超声波被聚焦到微结构表面形成干涉,使微结构以频率 f_M 进行振动。在 0~140 kHz 范围内改变调制频率 f_M ,使用激光干涉测振单元获取每个 f_M 值下的微结构振动响应信号,当 f_M 值与微结构固有频率相匹配时,微结构产生谐振,从而获得微结构的固有频率。

激光测振单元由 POLYTEC 的 OFV-3001 控制器、OFV-512 光学头,ADVANTECH 的 PCI-1714 数据采集卡和 IPC-610L 工业控制计算机组成。测试系统可以实现 1.5 MHz 的测试带宽,激光光斑直径最小可达到 15 μm 。微结构的振动响应信号由 OFV-512 光学头拾取,并在 OFV-3001 控制器中的速度解码器中进行解码,再经 PCI-1714 数据采集卡送入到 IPC-610L 工业控制计算机当中,并由 LABVIEW 编写的数据采集程序进行保存。为了调节激光光斑在微结构表面上的相对位置,OFV-512 光学头被安装在一个 XY 精密位移台上,位移台的最大行程为 25 mm,分辨率为 2 μm 。

温度控制单元由筒式电阻加热器、BTA06 双向可控硅、JKH-D1 可控硅移相触发器、Pt100 铂电阻温度传感器、ADAM3013 信号调理模块、E5AZ-C3MT 型数字温控仪表组成。4 个筒式电阻加热器被均布安装在黄铜安装板侧壁的安装孔内,通过热传导的方式实现对待测微结构的加热,黄铜安装板和两个安装支柱之间采用陶瓷垫圈进行隔热;Pt100 铂电阻温度传感器安装在承载微结构的圆

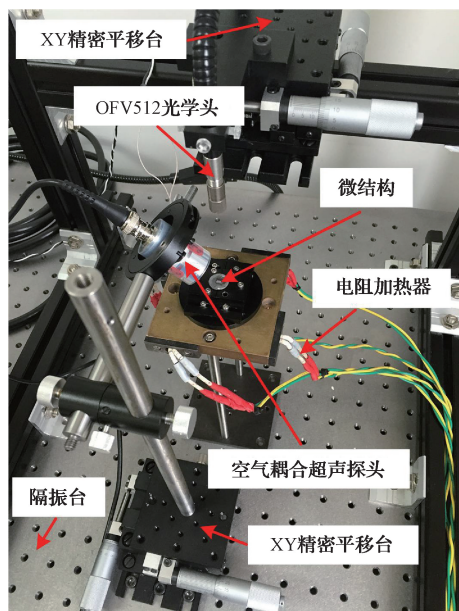


图 2 微结构动态特性测试系统

Fig. 2 Dynamic characteristics testing system of microstructures

形铝片上,用来检测微结构的温度,采集到的温度信号通过 ADAM3013 信号调理模块送入到 E5AZ-C3MT 型数字温控仪表中,经过与设定温度值进行比较,采用 PID 控制算法得出控制量,通过 JKH-D1 可控硅触发器来控制 BTA06 双向可控硅的导通时间,实现对筒式电阻加热器加热功率的控制,进而实现对微结构温度的控制。

4 微结构的尺寸参数

单晶硅微悬臂梁采用 220 μm 厚双抛 3 in 单晶硅片经过干法和湿法相结合的工艺制作而成,其扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图如图 3 所示。单晶硅微悬臂梁的结构尺寸如下:长度 $l=1\,500\,\mu\text{m}$,宽度 $b=600\,\mu\text{m}$,厚度 $h=10\,\mu\text{m}$ 。

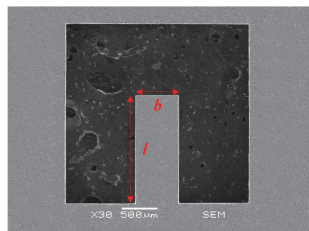


图 3 微结构 SEM 图

Fig. 3 SEM image of microstructure

采用 ANSYS 有限元分析软件对单晶硅微悬臂梁前三阶弯曲振动模态的固有频率进行了仿真分析,在仿真过程中使用的材料参数如下:单晶硅的弹性模量参考值为 167 GPa,泊松比为 0.278,密度为 2 330 kg/m^3 [21],仿真结果如图 4 所示。

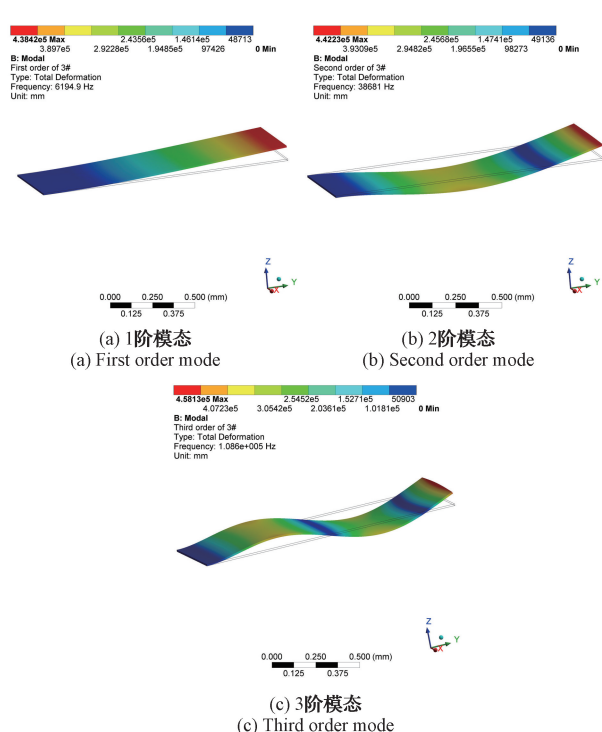


图 4 微悬臂梁前三阶模态仿真

Fig. 4 Simulation of first three order modes for microcantilever

由仿真结果可知,单晶硅微悬臂梁的前三阶弯曲振动模态固有频率分别为 6.194 9、38.681 和 108.6 kHz。

5 测试实验

采用所搭建的基于空耦超声的 MEMS 微结构动态特性测试系统对单晶硅微悬臂梁在室温 $\sim 300\,^{\circ}\text{C}$ 范围的动态特性进行了测试。在进行测试时,使空气耦合超声探头的轴线方向与微结构表面相倾斜,约呈 45° ,目的是避免形成驻波;调节激光光斑的位置,使其位于微悬臂梁的自由端附近约 50 μm 处;针对每个设定的 f_M 值,由激光测振单元获得微结构的时域振动响应,为了减少测试工作量,采取设定范围、逐步逼近的方法来获取微结构的固有频率。根据 ANSYS 仿真的结果,在对单晶硅微悬臂梁各阶模态固有频率进行测试时设定了一个 f_M 值的初始变动范围,其中一阶固有频率对应的 f_M 变动范围为 5.4~6.6 kHz,二阶固有频率对应的 f_M 变动范围为 34~40 kHz,三阶固有频率对应的 f_M 变动范围为 94~112 kHz。

首先,测试微悬臂梁在室温 $20\,^{\circ}\text{C}$ 时的一阶固有频率。在进行测试时,在设定的 f_M 变动范围内每间隔 100 Hz 选取一个测试点,共记 13 个测试点,针对每个测试点获取微结构的振动响应,对每个测试点均进行 5 次测试,获得该测试点振幅的均方根值,其中振幅排在前三位的测试点为 6.0、6.1 和 5.9 kHz,则微结构一阶固有频率应在 5.9~6.1 kHz 之间,重新设定 f_M 值的变动范围为 5.9~

6.1 kHz;在 5.9~6.1 kHz,每间隔 10 Hz 设定一个测试点,共记 18 个测试点,其中振幅排在前三位的测试点为 6.02、6.01 和 6.03 kHz,则再次设定新的 f_M 变动范围为 6.01~6.03 kHz;在 6.01~6.03 kHz,每间隔 1 Hz 设定 1 个测试点,共计 18 个测试点,其中 f_M 值为 6.022 kHz 时,振幅最大,则单晶硅微悬臂梁的一阶固有频率为 6.022 kHz。

然后,以相同的方法测试微悬臂梁在室温 20 °C 时的二阶固有频率和三阶固有频率。与一阶固有频率测试不同的地方在于 f_M 的变动范围和测试点间隔的选择。当测试其二阶固有频率时,第 1 轮的测试点间隔为 500 Hz,最大振幅出现在 38 kHz;第 2 轮的 f_M 值的变动范围为 37.5~38.5 kHz,测试点间隔为 100 Hz,最大振幅出现在 37.7 kHz;第 3 轮的 f_M 值的变动范围为 37.6~37.8 kHz,测试点间隔为 10 Hz,最大振幅出现在 37.75 kHz;第 4 轮的 f_M 值的变动范围为 37.74~37.76 kHz,测试点间隔为 1 Hz,获得单晶硅微悬臂梁的二阶固有频率为 37.754 kHz。在测试其三阶模式固有频率时,第 1 轮测试点间隔为 1 kHz,最大振幅出现在 106 kHz;第 2 轮的 f_M 值变动范围为 105~107 kHz,测试点间隔为 100 Hz,最大振幅出现在 105.6 kHz;第 3 轮 f_M 值变动范围为 105.5~105.7 kHz,测试点间隔为 10 Hz,最大振幅出现在 105.59 kHz;第 4 轮 f_M 值变动范围为 105.58~105.60 kHz,测试点间隔为 1 Hz,获得单晶硅微悬臂梁的三阶弯曲振动模式频率为 105.594 kHz。

当完成微悬臂梁在室温 20 °C 时前三阶弯曲振动模式频率测试之后,分别对单晶硅微结构在高温环境下(75 °C、150 °C、225 °C 和 300 °C)的动态特性进行了测试,获得了单晶硅微结构在对应温度下的前三阶模式固有频率,测试结果如图 5 所示。

为了比对前三阶模式固有频率的温度系数,验证理论模型的准确性,对每个温度点下测得的频率值进行了归一化处理,归一化方法如下:

$$f_g = \frac{f(T)}{f(T_0)} \quad (6)$$

式中: f_g 为归一化频率; $f(T)$ 为不同温度时获得的固有频率; $f(T_0)$ 为室温 20 °C 时的固有频率值。单晶硅微悬臂梁前三阶模式归一化固有频率随温度变化如图 6 所示。图 6 中最小二乘拟合直线的斜率就是对应的模式频率温度系数。因此,单晶硅微悬臂梁一阶固有频率温度系数为 $-2.18 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,二阶固有频率温度系数为 $-1.91 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,三阶固有频率温度系数为 $-2.01 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,前三阶模式频率温度系数的测试结果与理论模型预测值的偏差分别 $3 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

可以看出,单晶硅微悬臂梁模式频率温度系数的测试值和由频率温度系数模型所获得的理论值十分接近,存在一定差异的可能原因如下:一方面在计算理论值时所引用的弹性模量的温度系数和热膨胀系数均为实验测试获得

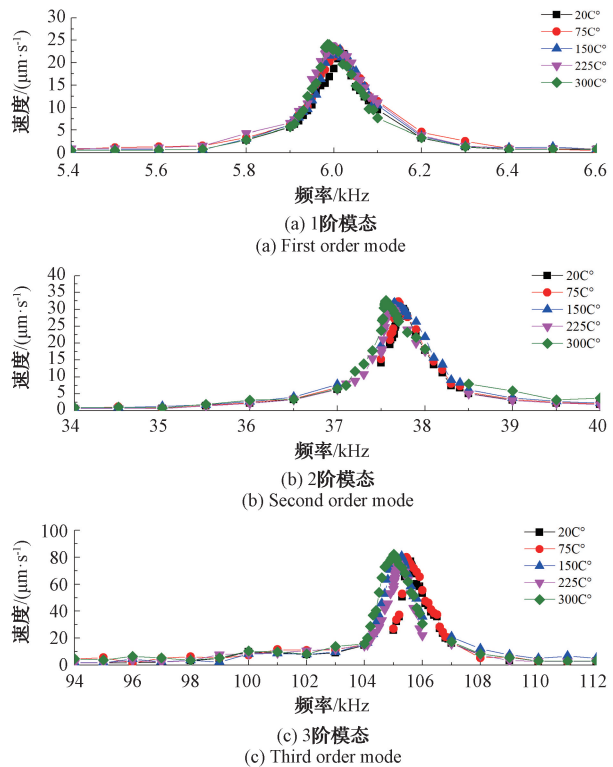


图 5 微悬臂梁前三阶模式频率

Fig. 5 First three order mode frequencies of microcantilever

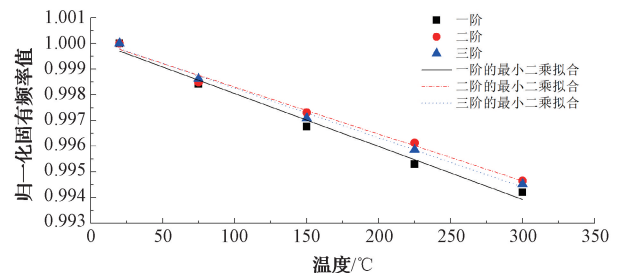


图 6 前三阶归一化模式频率随温度变化

Fig. 6 Graph of first three order normalized mode frequencies as a function of temperature

的参考值,该参考值会受到实验条件影响而有一定的波动范围;另一方面,由于温度传感器无法直接安装在悬臂梁的表面,因此温度传感器的示值温度与悬臂梁的实际温度存在一定的差异。为了评估这个差异对测试结果的影响,额外安装一个 Pt100 铂电阻温度传感器在单晶硅微悬臂梁的基板上,该传感器的示值温度可近似的看作单晶硅微悬臂梁的实际温度,通过对不同测温点两传感器示值温度进行比较可知,单晶硅微悬臂梁的实际温度比设定温度低 7% 左右。此外,由于空气对流传热的影响,导致悬臂梁表面存在温度梯度。这些因素都会导致在对应温度点下获得的悬臂梁模式频率存在一定的测试误差,也最终影响到模式频率的温度系数。

为了获得微悬臂梁各阶模态的品质因数,首先使用 Lorentz 函数或 GaussAmp 函数对所获得的频域响应进行曲线拟合,然后利用所获得的拟合曲线使用半功率点法获取各阶模态的品质因数,如式(7)所示^[19]。

$$Q = \frac{2f_k}{f_x - f_y} \quad (7)$$

式中:Q 为品质因数; f_k 为固有频率值; f_x 和 f_y 为半功率点处对应的两个频率值。根据式(7)可知,在每个设点的测温点下,所获得的单晶硅微悬臂梁前三阶弯曲振动模态的品质因数如图 7 所示。由图 7 可知,单晶硅微悬臂梁各阶模态的阻尼均比较小,可以忽略不计,也就是说可以将测试获得的微悬臂梁有阻尼固有频率看作其无阻尼固有频率。此外,微悬臂梁各阶模态品质因数随着的温度变化并未呈现明显的变化规律。

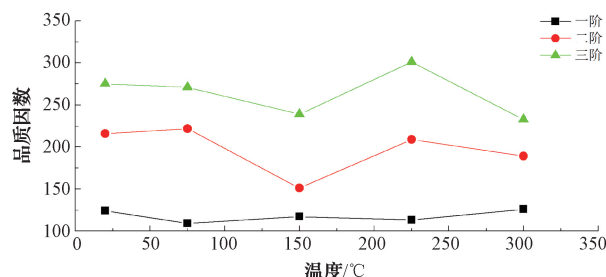


图 7 微结构品质因数随温度变化

Fig. 7 Graph of microstructure quality factor as a function of temperature

测试获得的微结构各阶模态固有频率与仿真值存在一定的差异,总体来讲该差异是由两方面因素所导致的。一方面就是测试系统误差和随机误差引起的,其中因为激光多普勒测振仪具有很高的分辨率,所以系统误差的影响很小,而随机误差可通过在共振频率峰值附近的多次测试来解决;另一方面就是在获取仿真值过程中所引用的尺寸参数、材料参数和微结构的实际参数之间存在差异,比如长度、宽度、厚度、弹性模量和密度等。

6 结 论

本文对矩形等截面单晶硅微悬臂梁前三阶弯曲振动模态频率的温度特性进行了研究,并得出如下结论。首先,基于空气耦合聚焦超声波激励的方法能够满足微尺度悬臂结构在高温环境下的激励需求,当使用带宽为 140 kHz 的空耦超声探头时,能激励起所测试的矩形等截面单晶硅微悬臂梁的前三阶模态;其次,矩形等截面单晶硅微悬臂梁前三阶模态频率温度系数十分接近,并且均为负温度系数,这意味着微悬臂梁前三阶模态频率都随着温度的升高而减小,且在测试温度范围内呈近似的线性关系,这与理论预测的结果是相一致的;再次,在所测试的温度范围内,单晶硅微悬臂梁前三阶模态的品质因数并未呈现明显的变化规律。最后,本文在测试微结构模态频率时

所使用的具体操作方法,可以为其他不同尺寸、不同结构微结构的动态特性测试提供有价值的参考。

参 考 文 献

- [1] SAWANE M, PRASAD M. MEMS piezoelectric sensor for self-powered devices: A review [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2023, 158: 107324.
- [2] 寇志伟,崔啸鸣,陈苏力德,等. 一种高灵敏度电容式波动陀螺的设计与分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(7): 39-44.
KOU ZH W, CUI X M, CHEN S L D, et al. Design and analysis of a capacitive wave gyroscope with high-sensitivity[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 6(7): 39-44.
- [3] 关存贺,许高斌,王焕章,等. 复杂应力条件下 MEMS 加速度传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 17-25.
GUAN C H, XU G B, WANG H ZH, et al. Reliability analysis of MEMS acceleration sensors under complex stress conditions [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 17-25.
- [4] 张河斌,秦刚,张和铭. MEMS 惯性传感器自主标定系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(7): 62-68.
ZHANG H B, QIN G, ZHANG H M. Design of MEMS inertial sensor autonomous calibration system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(7): 62-68.
- [5] 李传昊,王军波,商艳龙,等. 介质隔离高精度 MEMS 谐振式压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 219-227.
LI CH H, WANG J B, SHANG Y L, et al. Dielectrically isolated high-precision MEMS resonant pressure sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 219-227.
- [6] GILL W A, HOWARD I, MAZHAR I, et al. A review of MEMS vibrating gyroscopes and their reliability issues in harsh environments[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7405.
- [7] JIANG Y G, ONO T, ESASHI M. Temperature-dependent mechanical and electrical properties of boron-doped piezoresistive nanocantilevers [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 15(8): 065030.
- [8] CZAPLEWSKI D A, SULLIVAN J P, FRIEDMANN T A, et al. Temperature dependence of the mechanical properties of tetrahedrally coordinated amorphous

- carbon thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(16): 161915-161917-3.
- [9] 余东生, 杨一柳, 李琨, 等. T型硅微悬臂梁频率温度系数的测试研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(7): 1470-1478.
- SHE D SH, YANG Y L, LI K, et al. Study on the measurement of natural frequency temperature coefficient for T-shaped silicon microcantilever [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(7): 1470-1478.
- [10] BLUE R, BROWN J G, LI L, et al. MEMS gas flow sensor based on thermally induced cantilever resonance frequency shift[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(8): 4139-4146.
- [11] CHOI J S, NOH J, CHOI H, et al. Characterizing the performance of a resonance-based MEMS particle sensor with glass beads[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2024, 11: 481-489.
- [12] YU M, SANG M, GUO C, et al. A demodulation algorithm for periodically in-plane vibrating MEMS based on a stroboscopic micro-visual system [J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2022, 28(1): 145-151.
- [13] LIN R M, WANG W J. Structural dynamics of microsystems—current state of research and future directions [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(5): 1015-1043.
- [14] NAMAZU T. Mechanical property measurement of micro/nanoscale materials for MEMS: A review [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2023, 18(3): 308-324.
- [15] LUO W, SU W, NIE Z, et al. Vibration characteristic measurement method of MEMS gyroscopes in vacuum, high and low temperature environment and verification of excitation method[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 129582-129593.
- [16] XIONG L C, ZHOU Q, WU Y, et al. New laser excitation method for modal analysis of microstructure[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 50: 227-234.
- [17] ZHOU N, ZHONG S, LIN J, et al. Acoustic-excitation optical coherence vibrometer for real-time microstructure vibration measurement and modal analysis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 7209-7217.
- [18] HUBER T M, ABELL B C, MELLEMA D C, et al. Mode-selective noncontact excitation of microcantilevers and microcantilever arrays in air using the ultrasound radiation force [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(21): 214101.
- [19] PILKEY W. *Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices*[M]. New York: Wiley, 1994.
- [20] MCSKIMIN H J. Measurement of elastic constants at low temperatures by means of ultrasonic waves—data for silicon and germanium single crystals, and for fused silica[J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 988-997.
- [21] SOMA T, KAGAYA H M. *Properties of Silicon*, EMIS Data Reviews Series [M]. 4th ed. New York: Wiley, 1988.
- [22] ROBERTS R B. Thermal expansion reference data: Silicon 300 ~ 850 K [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1981, 14(10): L163.
- [23] WATANABE H, YAMADA N, OKAJI M. Linear thermal expansion coefficient of silicon from 293 to 1 000 K[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2004, 25(1): 221-236.

作者简介

余东生(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为MEMS动态特性测试、缺陷检测和故障诊断等。

E-mail: mems-sds@163.com

于震, 硕士, 讲师, 主要研究方向为故障诊断。

E-mail: 459799763@qq.com

田江平, 博士, 教授, 主要研究方向为内燃机流动、喷雾、燃烧光学诊断技术。

E-mail: tianjp@dlut.edu.cn