



## 基于硅-玻璃键合工艺的微惯性器件的材料热失配应力表征

刘梦霞, 秦强, 董显山, 崔健, 赵前程

引用本文:

刘梦霞, 秦强, 董显山, 等. 基于硅-玻璃键合工艺的微惯性器件的材料热失配应力表征[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1715-1724.

LIU Meng-xia, QIN Qiang, DONG Xian-shan, et al. Characterization of thermal mismatch stress of micro-inertial devices based on silicon-glass bonding process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1715-1724.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1715>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 脉冲激光沉积薄膜的残余应力测量

Measurement of residual stresses in pulsed laser deposited thin films

*光学精密工程*. 2018, 26(1): 70-76 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182601.0070>

### 碳纤维悬臂梁式振动检波器

Vibration detectors with carbon fiber cantilever

*光学精密工程*. 2015, 23(10z): 374-380 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0374>

### 单晶硅各向异性湿法刻蚀的形貌控制

Morphologic control of wet anisotropic silicon etching

*光学精密工程*. 2016, 24(2): 350-357 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162402.0350>

### 基于柔性止动的MEMS惯性开关冲击可靠性强化

Shock reliability enhancement by flexible stop for MEMS inertial switch

*光学精密工程*. 2017, 25(1): 123-132 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172501.0123>

### 微机械应力测试结构的温度特性和应力抑制方法

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

*光学精密工程*. 2016, 24(6): 1345-1351 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162406.1345>

文章编号 1004-924X(2020)08-1715-10

## 基于硅-玻璃键合工艺的微惯性器件的 材料热失配应力表征

刘梦霞<sup>1</sup>, 秦 强<sup>1</sup>, 董显山<sup>2</sup>, 崔 健<sup>1</sup>, 赵前程<sup>1\*</sup>

- (1. 北京大学微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 北京 100871;
2. 工业和信息化部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家级重点实验室, 广东 广州 510610)

**摘要:** 基于硅-玻璃键合工艺实现敏感结构和衬底相接是微惯性器件的主流工艺方案之一。硅和玻璃热膨胀系数不同, 在惯性器件环境温度发生变化时, 硅玻璃接触表面会产生热应力, 该应力严重影响器件的性能。为了测量异质材料间的热失配应力以及键合锚点尺寸对应力的影响, 本文提出了一种以悬臂梁作为测试结构的锚点形变测量和数据处理方法, 用于表征器件的工艺热失配应力。根据仿真结果将锚点设计成切块形式以减小最大应力和结构形变。测试结果表明, 对于边长为 600, 400 和 200  $\mu\text{m}$  的锚点, 悬臂梁相对锚点的平均离面位移分别为 0.43, 0.30 和 0.20  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ; 结果具有良好的重复性。该结果说明锚点热形变与锚点的大小直接相关, 这对 MEMS 惯性结构以及工艺设计改进具有重要的意义。

**关键词:** 微惯性器件; 热失配应力; 悬臂梁; 测量方法; 离面位移

中图分类号: TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20202808.1715

## Characterization of thermal mismatch stress of micro-inertial devices based on silicon-glass bonding process

LIU Meng-xia<sup>1</sup>, QIN Qiang<sup>1</sup>, DONG Xian-shan<sup>2</sup>, CUI Jian<sup>1</sup>, ZHAO Qian-cheng<sup>1\*</sup>

- (1. *Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China;*
2. *Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, No. 5 Electronics Research Institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zqc@pku.edu.cn*

**Abstract:** Silicon-glass bonding technology is critical to the development of durable micro-inertial devices. Because the thermal expansion coefficients of silicon and glass are different, thermal stress is produced on the silicon-glass contact surface when the operating temperature of the inertial device changes. This can have a serious effect on the performance of the device. Therefore, an understanding of the extent of thermal mismatch stress between these heterogeneous materials and the effect of

收稿日期: 2020-01-05; 修订日期: 2020-02-09.

基金项目: 装发共性技术基金资助项目 (No. JAD1828480)

bonding anchor point size on stress are important for the improvement of the structure and process design of these devices. In this paper, a method of anchor deformation measurement and data processing using a cantilever beam as the test structure is proposed to characterize the process thermal mismatch stress of the device. The simulation results indicate that anchor points designed in block form reduce the maximum stress and structural deformation. For anchor points with side lengths of 600  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$ , the average off-plane displacements of the cantilever beam relative to the anchor points are 0.43  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , 0.30  $\text{nm}/^\circ\text{C}$  and 0.20  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , respectively. These results have good repeatability. Our results show that the thermal deformation of anchor points is directly related to the size of the anchor points, and this has important research significance for the improvement of MEMS inertial structure and process design.

**Key words:** micro-inertial device; thermal mismatch stress; cantilever beam; measurement method; off-plane displacement

## 1 引 言

硅基微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)惯性传感器具有小体积、低功耗、低成本等显著优势,已广泛应用于军事和民用领域<sup>[1-2]</sup>。微加工工艺是 MEMS 惯性传感技术的基础支撑技术,工艺误差是微惯性仪表各类关键误差的主要来源。基于硅-玻璃键合工艺实现敏感结构和衬底相接是微惯性器件的主流工艺方案之一,美国 Honeywell 公司、挪威 Sensoror 公司以及日本 Silicon sensing 公司等都成功推出了基于硅-玻璃工艺的高精度 MEMS 陀螺产品。阳极键合作为硅-玻璃工艺的关键技术,可以有效地将硅与玻璃结合在一起<sup>[3-7]</sup>。由于阳极键合的两种材料硅和玻璃的热膨胀系数不一致, MEMS 器件工作环境温度的变化会使得硅和玻璃两种材料拉伸或压缩的长度不同,从而在接触面产生跟温度相关的热失配应力。该应力通常在结构锚点处产生,会直接影响器件谐振频率的温度稳定性<sup>[8-9]</sup>,严重影响器件的零位温度稳定性以及长期稳定性<sup>[10-13]</sup>。因此,测量异质材料间的热失配应力以及键合锚点尺寸对热应力的影响,对结构以及工艺设计改进具有重要的意义。

拉曼光谱法可直接对局部微小区域进行原位残余应力测量<sup>[14-20]</sup>。然而,由于硅和玻璃都具有一定的厚度,拉曼光谱法难以准确测量硅玻璃键合界面的热应力。此外,拉曼光谱法对应力测量的精度在 10 MPa 左右<sup>[21-22]</sup>。而对于 MEMS 惯

性器件,其尺寸非常微小,1 MPa 的应力便可以对结构造成不可忽略的影响<sup>[23]</sup>。因此,针对硅玻璃键合表面热应力测量需要一种测量精度更高更可行的方法。

为了更加直接而简便地表征热失配应力,本文通过测量结构形变的方法来分析器件锚点的表面应力。首先设计微悬臂梁作为辅助测试结构,使用 COMSOL 对它进行热应力仿真。在测试中,通过测量悬臂梁的翘曲程度来得到锚点应力受温度以及锚点自身的影响。为消除因表面工艺 KOH 腐蚀造成悬臂梁表面不平整带来的高度误差和测量随机性误差,对同一结构进行多次测量以及同时测量多组相同结构。将测量数据进行相应算法处理,以得到悬臂梁在热应力作用下相对锚点的离面位移(即悬臂梁与锚点两者平均高度之差)。

## 2 悬臂梁式锚点应力结构设计及原理

在测试结构设计中,结构越复杂,对应力产生影响的因素就越多,因此结构设计宜简单。悬臂梁结构的翘曲程度可以直观反应锚点应力,因此选取悬臂梁作为测试结构。图 1 为硅玻璃键合及形变示意图。其中图 1(a)为测试结构示意图,下层衬底材料为玻璃,上层结构材料为硅。两者通过阳极键合结合在一起。结构几何参数见表 1。锚点为水平截面为不同边长正方形的长方体,以研究锚点尺寸与热膨胀引起形变之间的关系。

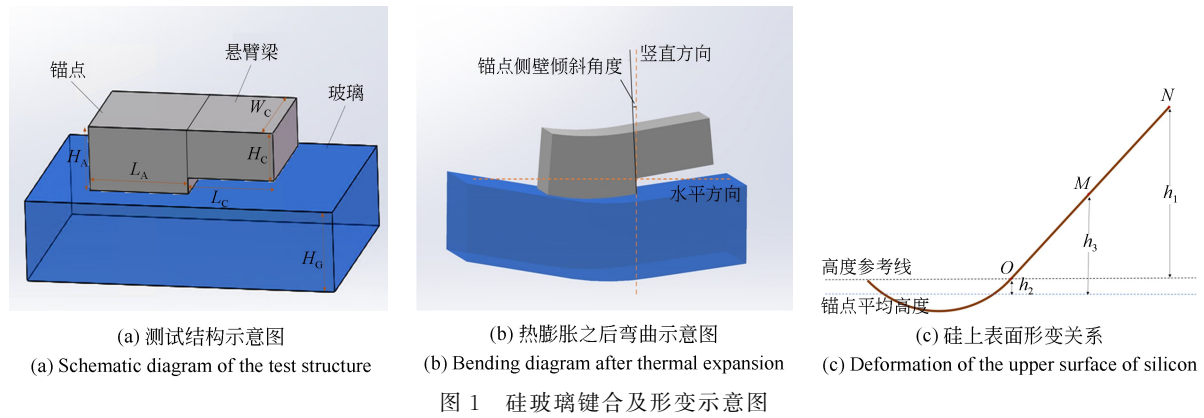


Fig. 1 Schematic diagram of silicon glass bonding and deformation

表 1 悬臂梁式锚点应力测试结构的设计参数

Tab. 1 Design parameters of cantilever beam anchor stress test structure

参数符号	参数意义	取值/ $\mu\text{m}$
$L_A$	锚点边长	200, 400, 600
$H_A$	锚点高度	85
$L_C$	悬臂梁长度	1 000
$W_C$	悬臂梁宽度	100
$H_C$	悬臂梁高度	80
$H_G$	玻璃厚度	500

当器件的环境温度发生改变,硅和玻璃的热膨胀系数不一致导致它们膨胀或收缩程度不同,在键合界面会产生应力。这种内应力使得锚点与玻璃发生凹凸变形,并且使锚点的侧壁发生倾斜,如图 1(b)所示(这里只画出了结构左右方向的翘曲,实际前后方向也有相应的翘曲)。由于悬臂梁仅和锚点的侧壁相连,另一端完全自由,因此悬臂梁内部不会产生应力。故而设计较长的悬臂梁结构可以将锚点侧壁的倾斜放大为较明显的离面位移。这种离面位移直接反映了硅和玻璃的热膨胀变形情况以及接触界面的热失配应力。因此,需要准确测量悬臂梁的离面位移。

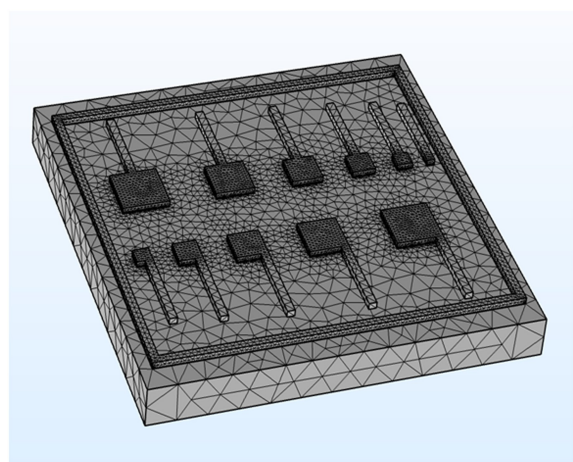
图 1(c)是结构层硅发生形变后的示意图(彩图见期刊电子版)。图中实线部分为测试结构上表面形变示意图。O 点为锚点与悬臂梁的接触点,N 点为悬臂梁最远端,M 点为悬臂梁中点。蓝色虚线所示高度为锚点平均高度,黄色虚线为

高度参考线。可以得到关系式: $h_3 = h_1/2 + h_2$ 。硅玻璃接触界面热失配应力可通过离面距离  $h_3$  表征出来,因此选取  $h_3$  作为实验测量目标。

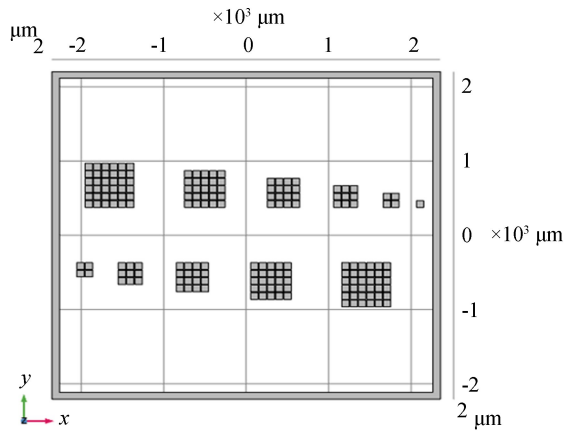
### 3 仿真分析

本文采用有限元软件 COMSOL 进行仿真。首先对测试结构进行建模及网格划分,如图 2(a)所示。下层衬底为玻璃,结构层为硅。锚点形状为正方形,其边长分别取 600, 400 和 200  $\mu\text{m}$ 。其余尺寸参数见表 1。为减小上层结构形变以降低对器件性能的影响,可通过将锚点切分为多个边长为 90  $\mu\text{m}$ ,间距为 10  $\mu\text{m}$  的正方形阵列的方式减小锚点的刚度,如图 2(b)所示。

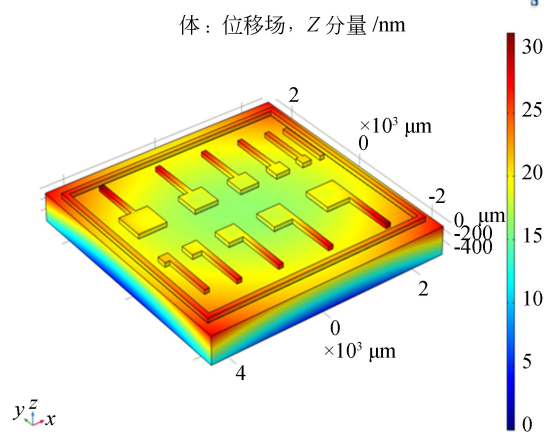
初始温度设置为 30  $^{\circ}\text{C}$ ,目标温度点选择 40  $^{\circ}\text{C}$ 。硅和玻璃材料参数选取如表 2 所示。



(a) COMSOL 建模及网格划分  
(a) COMSOL modeling and meshing



(b) 锚点形状划分  
(b) Anchor point shape division



(a) z 方向位移场  
(a) Displacement field in z direction

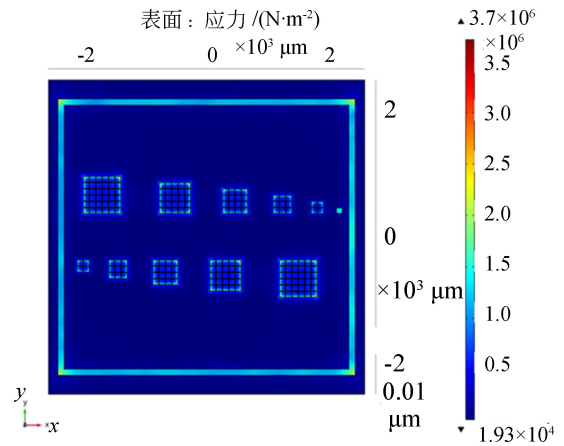
图 2 悬臂梁式锚点应力测试模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress test model for cantilever beam anchor

表 2 硅与玻璃材料参数

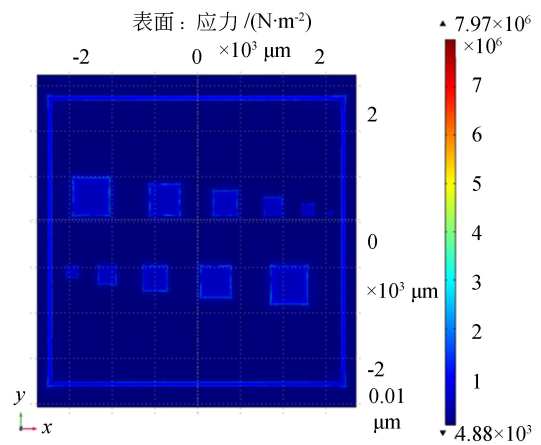
Tab. 2 Material parameters of silicon and glass

材料特性	硅	玻璃
密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	2.33	2.23
杨氏模量/GPa	130((100)晶向)	64
泊松比	0.3	0.2
热膨胀系数/( $10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	2.6	3.25



(b) 接触面热失配应力分布  
(b) Thermal mismatch stress distribution at contact surface

图 3 为锚点进行切分后的仿真结果。从图 3(a)中可以看出升温后各个部分 z 方向的位移变化。图 3(b)显示了硅与玻璃接触面热失配应力分布。图 3(c)为锚点不进行切分接触面热失配应力分布。对比图 3(b)和 3(c),锚点进行切分后最大应力可减小一半。表 3 是仿真数据的处理结果。其中,  $h_1, h_2$  和  $h_3$  为锚点进行切分后得到对应高度,  $h_{3_2}$  则为锚点不进行切分得到的离面距离。由表 3 数据可得, 锚点越大, 悬臂梁的翘曲值  $h_1$  越大; 锚点平均高度的绝对值  $|h_2|$  越大; 同时, 测试结构的离面位移  $h_3$  也越大。对比  $h_{3_2}$  和  $h_3$  可知, 锚点切分后离面位移减小, 意味着热失配应力对器件性能的影响减小。



(c) 锚点不进行切分接触面热失配应力分布  
(c) Thermal mismatch stress distribution at the anchor point on the contact surface before anchor point shape divided

图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

表 3 测试结构仿真情况统计

Tab. 3 Simulation statistics of test structures

锚点边长 / $\mu\text{m}$	$h_1/\text{nm}$	$h_2/\text{nm}$	$h_3/\text{nm}$	$h_{3,2}/\text{nm}$
600	9.01	-0.67	5.17	5.27
400	6.98	-0.42	3.92	3.94
200	3.03	-0.12	1.64	1.67

## 4 锚点弯曲变形测试

### 4.1 测试方法

使用锚点切块的版图 SOG (Silicon-on-Glass) 工艺加工测试结构。测试装备主要由控温装置和白光干涉仪组成。前者用于控制并稳定样品温度,后者用于对样品表面形貌的测量。

实际测量中会存在两个问题使得无法得到测试结构因热失配应力而产生的离面位移,如图 4 所示。图 4(a)是  $400\ \mu\text{m}$  锚点测试结构上的表面高度分布。图 4(b)是(a)图中悬臂梁中线高度分布。图 4(c)图则体现了对同一结构的两次测量结构会存在一定测量误差。

分析图 4 可知,测量的两个难题是:

(1)微结构上表面经过 KOH 减薄后会比较粗糙,大概有  $20\ \text{nm}$  左右的起伏,这会一定程度上影响测量的准确性。从图 4(c)可见测量随机性误差也不能被忽略。

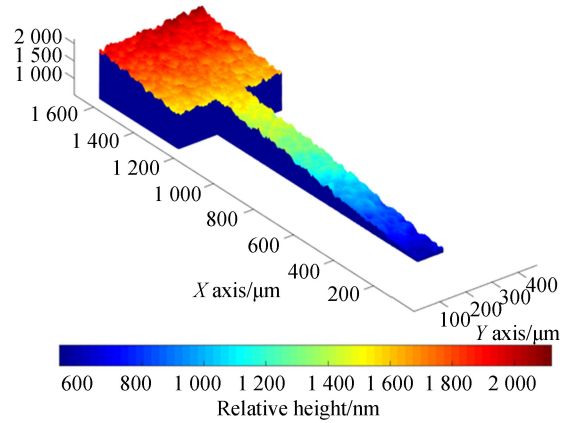
(2)在图 4(b)中,悬臂梁中线两端的高度差达高  $1\ \mu\text{m}$  以上。这一差值并非完全由热失配应力所产生的离面位移引起,测试结构并非绝对水平放置和玻璃因温度改变而发生弯曲造成硅结构倾斜都对此有影响。因此,需要对数据进行后处理以提取因热失配应力而产生的离面位移。

对应上述两点提出以下解决方案:

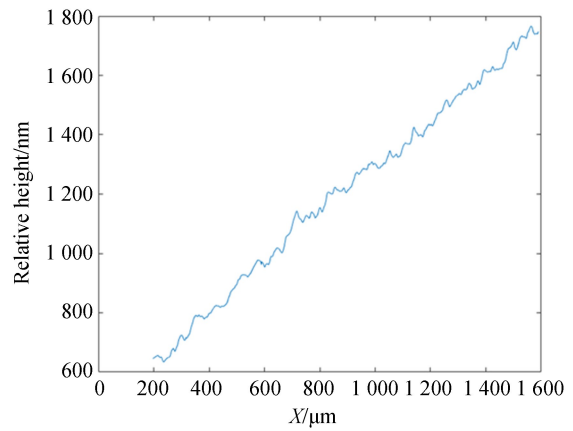
(1)实验设置 8 组(编号为 1~8)相同样品,每组样品各测量十次。以多次测量某一区域的位移取平均值作为测量指标。

(2)将测试所得的结构高度数据导入 MATLAB 进行处理提取悬臂梁相对锚点的离面距离。

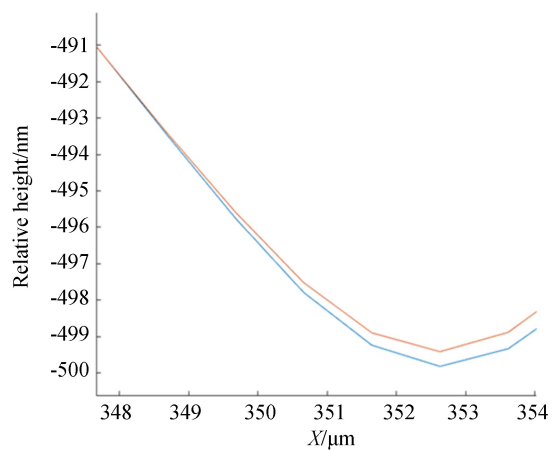
测试中同一组样品位于同一芯片上。每组样品包含锚点边长为  $600, 400, 200\ \mu\text{m}$  等不同结构参数的对比样品。



(a)  $400\ \mu\text{m}$  锚点测试结构表面高度分布  
(a) Surface height distribution map of  $400\ \mu\text{m}$  anchor point test structure



(b)  $400\ \mu\text{m}$  锚点测试结构悬臂梁中线高度分布  
(b) Center line height distribution map of  $400\ \mu\text{m}$  anchor point test structure cantilever beam



(c) 测量误差  
(c) Measurement errors

图 4 测试中存在的问题  
Fig. 4 Problems in the test

具体测试步骤如下:

(1)将芯片置于白光干涉仪下,调节仪器至 PSI 模式,并设定好仪器参数。

(2)调节温度控制装置,使样品温度达到 60 °C。为利于热量传递,每次调节温度后,需保证样品在稳定该温度下 30 min 后再做测量。

(3)温度稳定后每隔 1 min 对样品表面高度进行测量,共测量 10 次。

(4)以 5 °C 为间隔,重复步骤(2)和(3)直到温度为 30 °C。

数据处理时以锚点平均高度为参考,测量整个悬臂梁的平均高度相对于锚点的平均高度之差。将采集到的离面位移的原始数据利用 MATLAB 工具进行处理,提取出所需结果。

数据处理步骤如下:

(1)先计算悬臂梁中线和锚点中线上各点的平均高度,得到两条离面位移分布曲线。

(2)将测试数据分为悬臂梁和锚点两个部分,分别进行曲线拟合。

(3)以悬臂梁和锚点交界处为轴,将锚点拟合曲线旋转至水平位置,图中其他曲线进行同一角度旋转。这样,保证了锚点表面的绝对水平,从而可提取悬臂梁因热失配应力而产生的离面位移。

(4)分别计算旋转后两条曲线的平均高度。

(5)两者平均高度之差即为悬臂梁相对锚点的离面位移。

(6)将十次测量得到离面位移取平均值,消除单次测量带来的误差。

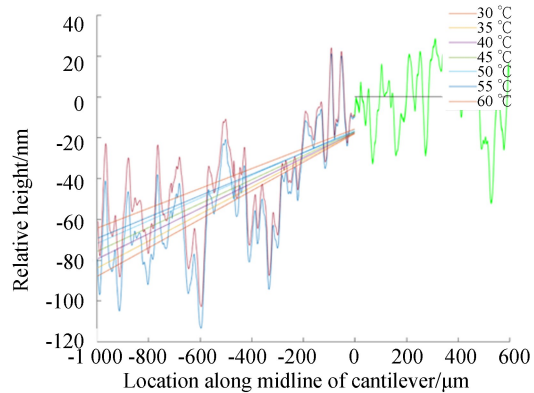
(7)对八组样品所得的离面位移取平均值并计算标准值。

采用上述测量和数据处理方法,可以有效消除前述测量问题。

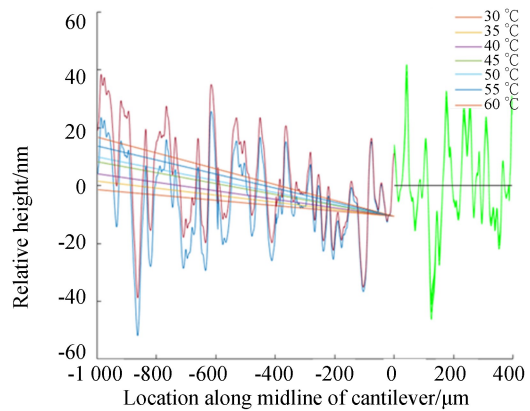
## 4.2 测试结果及数据分析

实际结构中,锚点段和悬臂梁段在交界处是连续的。但是在数据处理上,考虑到数据抖动等因素,这里以锚点平均高度为参考,测量整个悬臂梁的平均高度相对于锚点的平均高度之差。图 5 展示了第 1,2 组某次测试经数据处理过后的高度分布。图中横轴是沿悬臂梁中线的位置。其中,零点右侧为锚点部分,左侧为悬臂梁部分。纵轴是结构高度。悬臂梁部分的直线为各温度下的拟合直线,锚点部分的直线为锚点高度的平均值。图中以锚点平均值作为参考点,将各个温度下的

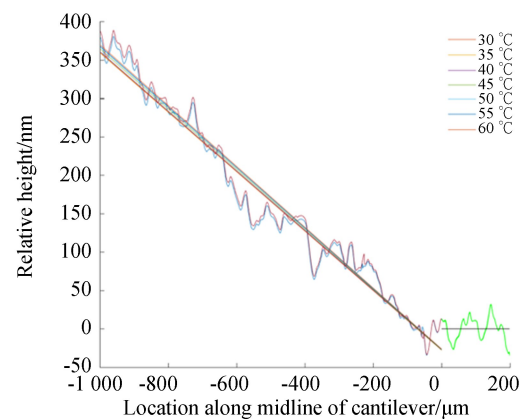
锚点平均值画为同一条直线。其中,悬臂梁是用多项式最小二乘拟合方法拟合而得以还原其真实的翘曲情况,而锚点是各点高度取平均值,因此得



(a) 第 1 组 600 μm 锚点  
(a) Group 1 anchor points of 600 μm



(b) 第 1 组 400 μm 锚点  
(b) Group 1 anchor points of 400 μm



(c) 第 1 组 200 μm 锚点  
(c) Group 1 anchor points of 200 μm

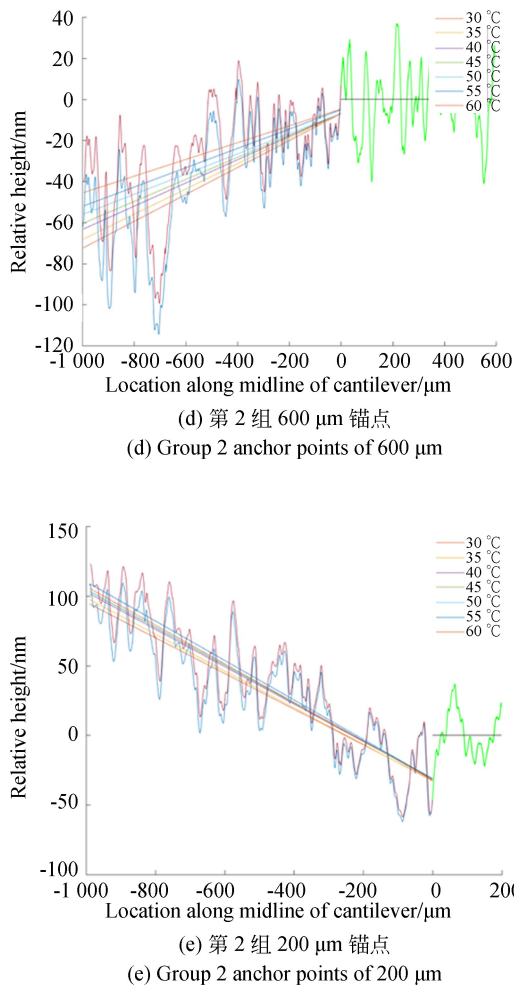


图 5 数据处理后的高度分布

Fig. 5 Height distribution after data processing

到的这两段直线在图中表现不连续。为了使图形更美观清晰,此图仅展示了悬臂梁的测量高度差异最大的 30  $^{\circ}\text{C}$  和 60  $^{\circ}\text{C}$  两条曲线。

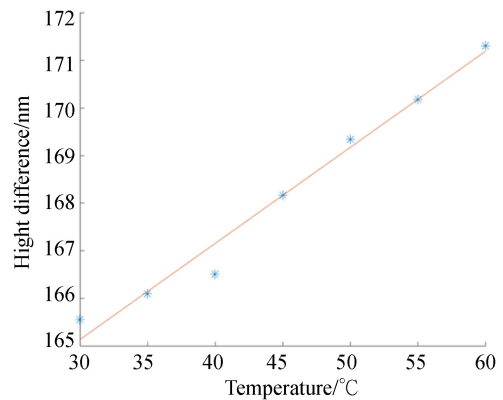
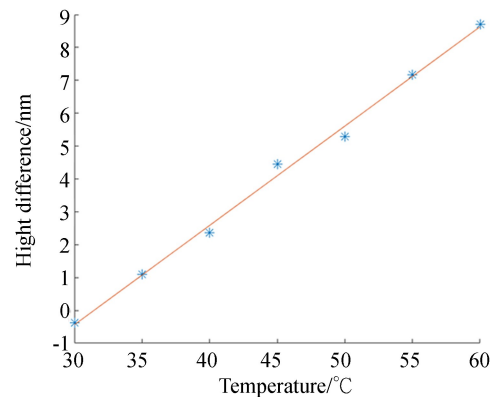
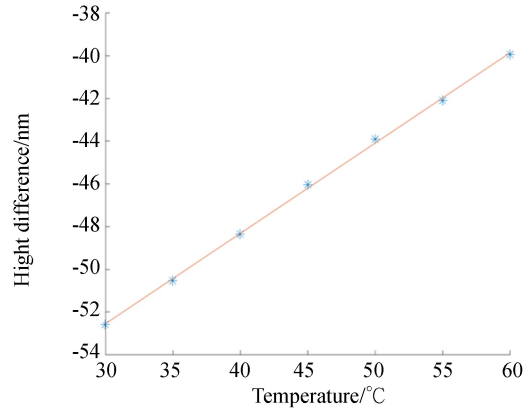
表 4 第 1 组 600  $\mu\text{m}$  锚点测试结构在 30  $^{\circ}\text{C}$  下 10 次重复测量所得到的离面位移

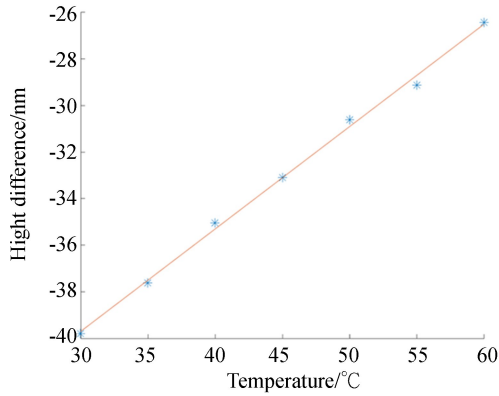
Tab. 4 Out-of-plane displacement obtained by 10 repeated measurements of 600  $\mu\text{m}$  anchor point test structure in group 1 at 30  $^{\circ}\text{C}$

组号	1	2	3	4	5
高度差/nm	-52.42	-52.05	-52.67	-52.30	-52.75
组号	6	7	8	9	10
高度差/nm	-52.43	-51.69	-53.33	-53.02	-53.17

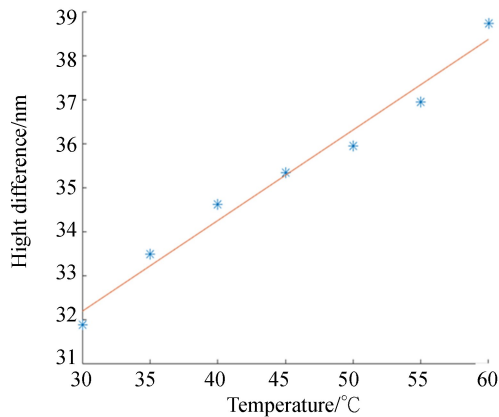
表 4 统计了第 1 组 600  $\mu\text{m}$  锚点测试结构在 30  $^{\circ}\text{C}$  下 10 次重复测量所得到的离面位移。

由表 4 数据计算可得平均离面高度为 -52.58 nm, 标准差为 0.510 3 nm。测量结果表现出很好的重复性。





(d) 第 2 组 600  $\mu\text{m}$  锚点  
(d) Group 2 anchor points of 600  $\mu\text{m}$



(e) 第 2 组 200  $\mu\text{m}$  锚点  
(e) Group 2 anchor points of 200  $\mu\text{m}$

图 6 测试结构在温变情况下的悬臂梁与锚点高度差

Fig. 6 Height difference between cantilever beam and anchor point of test structure at different temperatures

将每组 10 次测试得到的离面距离取平均值,画出每组平均离面位移与温度的关系。图 6 展示了第 1, 2 组测试结构在温变情况下悬臂梁与锚点高度差的关系。图中直线为拟合结果,其斜率即为测试结构对温度的敏感度。

每组离面位移对温度的敏感度如表 5 所示。表 6 则是这 8 组数据的统计信息。重复性为温度敏感度的标准方差,标准方差越小,说明实验重复性越好。 $h_{3\_test}$  为由温度敏感度计算所得的 30~40  $^{\circ}\text{C}$  的离面位移。通过对比前面仿真得到的离面位移  $h_3$  值,得到对比误差。

表 5 8 组样品离面位移对温度的敏感度

Tab. 5 Sensitivity of off-surface displacement of 8 groups of samples to temperature (nm/ $^{\circ}\text{C}$ )

锚点/ $\mu\text{m}$	1	2	3	4
600	0.423	0.439	0.429	0.423
400	0.302	-	0.298	0.313
200	0.202	0.206	0.204	0.200
锚点/ $\mu\text{m}$	5	6	7	8
600	0.431	0.444	0.427	0.431
400	0.304	0.317	0.301	0.295
200	0.210	0.197	0.209	0.201

表 6 8 组样品离面位移对温度的分辨率统计数据

Tab. 6 Resolution statistics of off-surface displacement of 8 groups of samples to temperature

锚点/ $\mu\text{m}$	温度敏感度/ $(\text{nm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	重复性/ $(\text{nm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	$h_{3\_test}$ / $\text{nm}$	与仿真比/对误差/%
600	0.4309	$7.38 \times 10^{-3}$	4.31	-16.6
400	0.3043	$7.95 \times 10^{-3}$	3.04	-22.8
200	0.2036	$4.50 \times 10^{-3}$	2.04	24.4

分析以上数据可得:

(1) 该测试结果具有很好的重复性。标准方差均小于 0.01 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 锚点越大,离面位移越大,意味着锚点热失配应力越大;而过小的锚点会使得器件结构容易断裂。此测试结果给器件锚点设计提供了参考。

(3) 对比不同锚点的测试结果可以发现,大锚点重复性比小锚点更好。原因在于小锚点与衬底玻璃的结合程度不够好,在温度变化过程中,结合程度不够会带来更多随机性因素。

(4) 比较仿真与测试结果可发现,对于 400 和 600  $\mu\text{m}$  锚点,实际测试的结果均比仿真值要小。这是因为在仿真中选取的硅的杨氏模量为 130 GPa,而实际中硅的平均杨氏模量要大于这个值,故而结构整体弯曲刚度比仿真值要大,弯曲形变值也相应要小。另一方面,硅的热膨胀系数随温度逐渐增大,而玻璃的热膨胀系数则保持不变。温度升高时,两者的热膨胀系数差值减小,导致离面位移也减小,从而使直线斜率变小。

## 5 结 论

本文以悬臂梁作为测试结构,初步验证了一种锚点形变测量和数据处理方法的可行性,这为MEMS惯性器件结构形变的测试提供了一种新

的思路。根据仿真结果,将测试版图的锚点切块以降低结构形变。测试结果具有良好的重复性,测试数据可进一步指示锚点热失配应力。同时,该结果也说明了锚点热形变与锚点的尺寸直接相关,这对MEMS惯性结构以及工艺设计改进具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] YAZDI N, AYAZI F, NAJAFI K. Micromachined inertial sensors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1640-1659.
- [2] FUJITA H. Microactuators and micromachines[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1721-1732.
- [3] KNOWLES K M, VAN HELVOORT A T J. Anodic bonding [J]. *International Materials Reviews*, 2006, 51(5): 273-311.
- [4] YANG Z C. Wafer-level vacuum packaging with lateral interconnections and vertical feedthroughs for microelectromechanical system gyroscopes[J]. *Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10(1): 011507.
- [5] ALBAUGH K B, CADE P E, RASMUSSEN D H. Mechanisms of anodic bonding of silicon to Pyrex glass[J]. *IEEE Technical Digest on Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 6450: 109-110.
- [6] ESASHI M. Wafer level packaging of MEMS[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2019, 18(7): 073001.
- [7] TANAKA S. Wafer-level hermetic MEMS packaging by anodic bonding and its reliability issues[J]. *Microelectronics Reliability*, 2014, 54(5): 875-881.
- [8] CUI J, YANG H B, LI D, *et al.*. A silicon resonant accelerometer embedded in an isolation frame with stress relief anchor[J]. *Micromachines*, 2019, 10(9): 571.
- [9] DONG J H, QIU A P, SHI R. Temperature influence mechanism of micromechanical silicon oscillating accelerometer[C]. 2011 *IEEE Power Engineering and Automation Conference*, 8-9 Sept. 2011, Wuhan, China. *IEEE*, 2011: 385-389.
- [10] PENSALA T, JAAKKOLA A, PRUNNILA M, *et al.*. Temperature compensation of silicon MEMS resonators by heavy doping [C]. 2011 *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 18-21 Oct. 2011, Orlando, FL, USA. *IEEE*, 2011: 1952-1955.
- [11] 袁安萍, 董金虎. 硅微谐振式加速度计的温度效应及补偿[J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(3): 215-219.
- QIU A P, DONG J H. Temperature effect and compensation of silicon resonant accelerometer[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(3): 215-219. (in Chinese)
- [12] FERGUSON M I, KEYMEULEN D, PEAY C, *et al.*. Effect of temperature on MEMS vibratory rate gyroscope[C]. 2005 *IEEE Aerospace Conference*, 5-12 March 2005, Big Sky, MT, USA. *IEEE*, 2005: 1-6.
- [13] 牛海莎, 祝连庆, 刘宁. 基于傅里叶变换相位提取法的激光回馈应力测量系统[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1954-1959.
- NIU H SH, ZHU L Q, LIU N. Laser feedback stress measurement system based on Fourier transform phase extraction method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1954-1959. (in Chinese)
- [14] 钱劲, 刘激, 张大成, 等. 微电子机械系统中的残余应力问题[J]. *机械强度*, 2001, 23(4): 393-401.
- QIAN J, LIU, ZHANG D CH, *et al.*. Residual stresses in micro-electro-mechanical systems[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(4): 393-401. (in Chinese)
- [15] 王莎莎, 陈兢, 梁大超, 等. 基于局部基底弯曲法的高灵敏度薄膜应力测试技术[J]. *半导体学报*, 2006, 27(6): 1129-1135.
- WANG S S, CHEN J, LI D C, *et al.*. A highly sensitive local curvature metrology for internal stress detection in thin films[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(6): 1129-1135. (in Chinese)
- [16] STRENGTH M. Micro-Raman spectroscopy and its applications to measure residual stress in micro-

- structure[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(4):389-392.
- [17] BONERA E, FANCIULLI M, BATCHELDER D N. Combining high resolution and tensorial analysis in Raman stress measurements of silicon[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(4): 2729-2740.
- [18] 李美栓, 辛丽, 余家康, 等. 喇曼光谱方法测量金属表面氧化膜的残余应力[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1999, 19(3): 185-188.  
LI M SH, XIN L, YU J K, *et al.*. Measurements of residual stress in oxide scales by Raman spectroscopy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 1999, 19(3): 185-188. (in Chinese)
- [19] BENRAKKAD M S, BENITEZ M, ESTEVE J, *et al.*. Stress measurement by micro Raman spectroscopy of polycrystalline silicon structures[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1995, 5(2): 132-135.
- [20] 刘洋, 张天舒, 赵雪松, 等. 高精度测温拉曼激光雷达光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8):1904-1909.  
LIU Y, ZHANG T SH, ZHAO X S, *et al.*. Optical design of high precision temperature measurement Raman lidar spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8):1904-1909. (in Chinese)
- [21] 熊继军, 张文栋, 薛晨阳, 等. 拉曼光谱应用于硅微悬臂梁的应力特性测试[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(14): 1292-1295.  
XIONG J J, ZHANG W D, XUE CH Y, *et al.*. Applications of Raman spectroscopy in stress performance measurement of micro-cantilever [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(14): 1292-1295. (in Chinese)
- [22] 李小雷, 王红亮, 曹新鑫, 等. 高压烧结 AlN 陶瓷的残余应力研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(7): 7121-7124.  
LI X L, WANG H L, CAO X X, *et al.*. Residual stress of aluminum nitride ceramics sintered at high pressure[J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(7): 7121-7124. (in Chinese)
- [23] 刘燕锋, 陈志勇, 张嵘. 微机械应力测试结构的温度特性和应力抑制方法[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1345-1351.  
LIU Y F, CHEN ZH Y, ZHANG R. Temperature characteristics of MEMS stress-testing structure and a stress-suppressing method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1345-1351. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘梦霞(1996—),女,广东韶关人,硕士研究生,2018年于湖南大学获得学士学位,主要从事 MEMS 工艺、硅谐振加速度计及硅谐振器非线性的研究。E-mail: m. liu@pku. edu. cn

#### 通讯作者:



赵前程(1975—),男,黑龙江鸡西人,博士,高级工程师,2007年于北京大学获得博士学位,主要研究方向为微机电惯性器件结构及其工艺。E-mail: zqc@pku. edu. cn