

薄膜材料弯曲测试方法的验证研究

黄鑫龙¹,李根梓²,周龙飞³,杨绍松⁴,夏燕⁵,董显山¹,来萍¹,夏长奉³,
宋辰阳²,张晋熙²,韩金哲²

(1.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重点实验室,广东 广州 511370;
2.雁栖湖基础制造技术研究院(北京)有限公司,北京 101407;3.无锡华润上华科技有限公司,江苏 无锡 214028;
4.无锡芯感智半导体有限公司,江苏 无锡 214000;5.苏州市质量和标准化院,江苏 苏州 215000)

摘要:在国家标准《微机电系统(MEMS)技术 薄膜材料的弯曲试验方法》制定阶段,为验证该标准中测试方法的准确性和实用性,设计并制备了4种尺寸的悬臂梁结构,并利用纳米力学测试系统记录其弯曲变形过程,获取了待测结构的形变-应力曲线。通过该标准可实现薄膜材料弯曲力学性能的有效表征。对弯曲试验的测量数据进行分析,实验结果表明,基于该测试方法10次的重复性达到0.32%,同类型的测试结构具有较强的规律性,靠近悬臂梁根部的测试点表现出更高的机械刚度,与理论预测完全一致。因此,该标准中所采用的弯曲测试方法可重复性好,可用于薄膜材料的弯曲力学性能测试。

关键词:薄膜材料;微机电系统;悬臂梁;力学测试;弯曲试验;国家标准

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Verification of a Bend Testing Method for Thin-Film Materials

HUANG Xinlong¹, LI Genzi², ZHOU Longfei³, YANG Shaosong⁴, XIA Yan⁵, DONG Xianshan¹,
LAI Ping¹, XIA Changfeng³, SONG Chenyang², ZHANG Jinxi², HAN Jinzhe²

(1. Science and Technology on Reliability Physics and Application Technology of Electronic Component Laboratory,
No. 5 Electronics Research institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China;
2. Yanqi Lake Institute of Basic Manufacturing Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 101407, China;
3. CSMC Technologies Fab2 Co., Ltd., Wuxi 214028, China; 4. Wuxi Sencoch SeMiconductor Co., Ltd., Wuxi 214000, China;
5. Suzhou Institute of Quality and Standardization, Suzhou 215000, China)

Abstract: In the process of developing the Chinese national standard "Micro-electromechanical systems technology-Bend testing methods of thin film materials", cantilever beam structures with different sizes were designed and prepared to verify the accuracy and practicality of the method used. Their bending deformation processes were recorded by nanoindentation instrumentation, and the deformation-stress curves of the structures were obtained. The bending mechanical properties of thin-film materials can be effectively characterized based on this standard, and the measured data from the bending tests were analyzed. The experimental results show that the repeatability over 10 tests reached 0.32% using this testing method, and the same type of test structure exhibits strong regularity. The test point near the anchor of the cantilever beam exhibits high deformation stiffness, fully consistent with the theoretical prediction. Therefore, the bending test method used in this paper has good repeatability and can be used for testing the bending mechanical properties of thin-film materials.

Key words: thin-film materials; MEMS; cantilever beam; mechanical tests; bend testing; national standard

0 引言

微机电系统(MEMS)是一种结合微电子器件和微机械系统的技术^[1]。薄膜在MEMS中扮演着

至关重要的角色,其可以实现微小尺寸和高度集成,具有高性能和低功耗的特点,适用于需要精密控制和节能的应用^[2]。此外,薄膜材料选择和设计

收稿日期:2024-06-24

基金项目:国家重点研发计划(No. 2022YFB3207105);国家自然科学基金项目(No. U23A20638);广东省重点领域研发计划(No. 2022B0701180002)

作者简介:黄鑫龙(1997-),男,江西省宜春市人,工程师。通信作者:李根梓(1974-),男,内蒙古自治区包头市人,研究员。

灵活性高,可以根据特定应用的需求进行定制,适用于医疗、通信、汽车等领域^[3]。MEMS 薄膜的制造技术逐渐成熟,生产效率提高,其成本相对较低,有利于推动大规模商业化应用的发展^[4-10]。

弯曲试验是一种常见的性能评价手段^[11-12]。通过关于微尺度光滑悬臂式测试结构的弯曲试验方法的标准化,对 MEMS 薄膜的弯曲刚度、强度等力学性能进行表征与评估。了解 MEMS 薄膜在弯曲载荷下的行为,从而预测其失效模式和寿命,并帮助优化模型参数,提高仿真的可靠性,为 MEMS 薄膜设计提供更可靠的依据,提高产品质量和稳定性。

此外,《微机电系统(MEMS)技术 薄膜材料的弯曲试验方法》标准的制定对于 MEMS 技术具有重要意义。薄膜材料弯曲试验方法的标准化可以确保不同研究机构、企业测试结果的准确性和可比性,保证产品的稳定性和可靠性,有助于规范产业发展,提高产品质量,促进技术创新以及提升行业竞争力。

1 实验样品设计与制备

1.1 悬臂梁结构设计

国家标准《微机电系统(MEMS)技术 薄膜材料的弯曲试验方法》规定测试结构为悬臂梁结构,其中悬臂梁结构的长度(L)、宽度(W)和厚度(S)之间的关系宜为 $5 < L/W < 10$ 和 $10 < L/S < 100$ 。根据以上准则进行多款悬臂梁的结构设计及工艺设计,结构设计版图如图 1 所示,悬臂梁尺寸如表 1 所示。

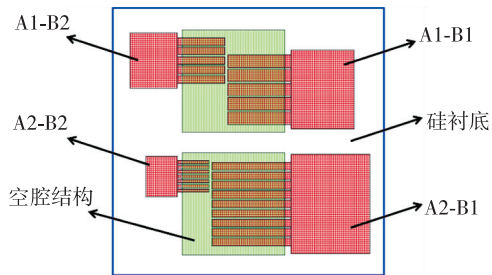


图 1 版图中各种结构示意图

表 1 试验样品设计尺寸

样品	$L/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	$S/\mu\text{m}$
结构 A1-B1	400	80	10
结构 A1-B2	300	50	10
结构 A2-B1	500	50	10
结构 A2-B2	200	20	10

1.2 悬臂梁结构制备

为实现悬臂梁结构的精准备,对该试验样品的加工工艺进行定制化设计^[13],图 2 为悬臂梁结构的

的加工工艺流程示意图。

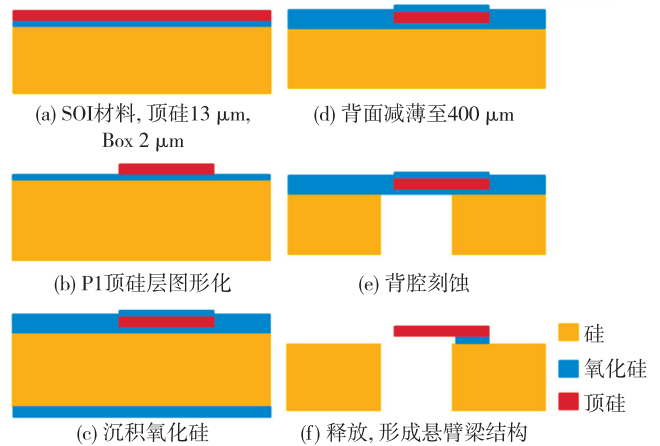


图 2 悬臂梁结构加工工艺流程

如图 2 所示,该工艺流程包含 6 个步骤:

a) 准备 SOI 材料片,顶硅厚度 $13 \mu\text{m}$,Box 层厚度 $2 \mu\text{m}$ 。

b) P1 顶硅层图形化。使用涂胶机进行涂胶处理,对硅片进行前烘热处理以增强光刻胶的粘附性并挥发光刻胶中的溶剂。前烘后的硅片顶硅层经曝光、显影、刻蚀、去胶,形成设计的悬臂梁结构。

c) 沉积氧化硅。利用 LPCVD 工艺在硅片沉积 300 nm 厚的 SiO_2 层,保护正面悬臂梁结构的顶硅层免受后续工序的影响。

d) 正面贴膜,背面减薄至 $400 \mu\text{m}$,减薄后揭膜。

e) 背腔刻蚀。背面涂胶、曝光、显影,形成硅刻蚀窗口。随后利用深硅刻蚀技术对硅衬底进行背面空腔刻蚀。

f) 释放,形成悬臂梁结构。使用 BOE 去除 SiO_2 ,然后用 IPA 浸润 10 min 、去离子水冲洗 20 min 并烘干。处理完成后得到完整设计的悬臂梁结构。

本工艺通过精细化的操作和控制,实现了悬臂梁结构的高效、精准备。该工艺不仅提高了悬臂梁结构的性能稳定性,也为后续的应用研究提供了可靠的基础。

2 样品检测与方法验证

2.1 样品检测

为验证所制备材料是否符合标准的适用范围,采用共聚焦显微镜对 4 种悬臂梁结构的尺寸进行测量,并设定了弯曲试验中 4 种结构的待测点。

针对 A1-B1 型悬臂梁结构,选取其中 5 根悬臂梁进行弯曲试验及分析。在每根悬臂梁上选取 3 个

具有代表性的位置作为待测点,以便全面分析悬臂梁在弯曲过程中的形变特性,待测点位置如图3所示。为便于数据记录和分析,将5根悬臂梁分别编号为01、02、03、04、05。同时测量每个待测点与悬臂梁根部之间的距离,分别标记为 L_A 、 L_B 、 L_C ,具体数据如表2所示。

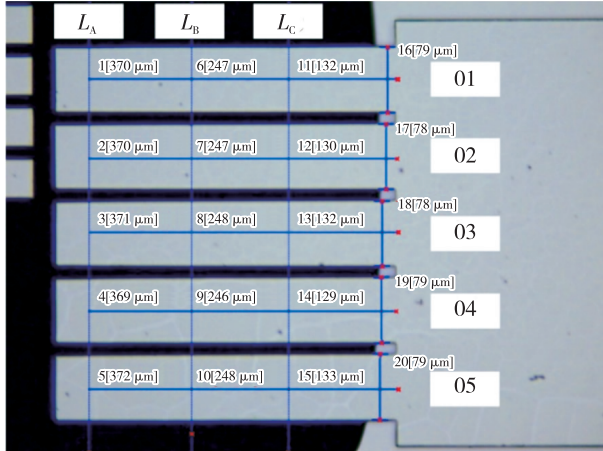


图3 A1-B1型结构测量图

表2 A1-B1型结构测试点

编号	$L_A/\mu\text{m}$	$L_B/\mu\text{m}$	$L_C/\mu\text{m}$
01	370	247	132
02	370	247	130
03	371	248	132
04	369	246	129
05	372	248	133

根据同样的编号规则及其测量步骤,对3种类型A1-B2、A2-B1、A2-B2的悬臂梁结构进行测量,并确定待测点的位置,如表3-5所示。由于A2-B2型悬臂梁结构较短,故其上仅设置了两个测试点。

表3 A1-B2型结构测试点

编号	$L_A/\mu\text{m}$	$L_B/\mu\text{m}$	$L_C/\mu\text{m}$
01	276	184	106
02	276	182	105
03	275	183	106
04	275	181	105

表4 A2-B1型结构测试点

编号	$L_A/\mu\text{m}$	$L_B/\mu\text{m}$	$L_C/\mu\text{m}$
01	479	334	212
02	481	337	214
03	480	336	213
04	481	336	214
05	481	336	213

表5 A2-B2型结构测试点

编号	$L_A/\mu\text{m}$	$L_B/\mu\text{m}$
01	192	136
02	193	138
03	192	137
04	192	137
05	192	137

2.2 弯曲试验

2.2.1 弯曲试验测试系统

选用纳米力学测试系统作为弯曲试验的测试仪器,如图4所示。在测量过程中采用高精度加载模式,其位移测试分辨率优于0.001 nm,力载荷分辨率优于3 nN。

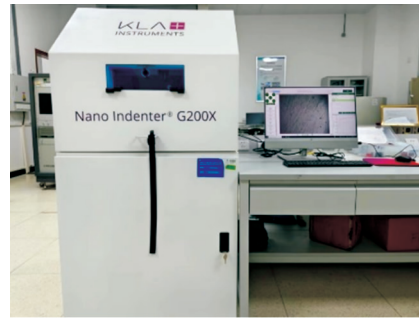


图4 纳米力学测试系统

薄膜材料的弯曲试验步骤如下:

- 1) 制备好测试结构。
- 2) 将测试结构安装于试验设备机台上。
- 3) 设定试验设备参数,包括选取加载头、确定试验速度等。
- 4) 开展试验,获取样品在不同位置点的力载荷-位移曲线。
- 5) 更换样品,重复步骤3)-4)。
- 6) 数据分析。

实验样品通过晶体胶固定在载物台上,载物台放置于纳米力学测试系统的夹持装置内,安装位置如图5所示。在测量过程中,选用曲率半径为 $5\mu\text{m}$ 的球形圆锥针头作为测试工具,施加的最大变形深度为5000 nm。应变率(定义为加载率除以载荷)设定为0.2,在测试初期,当绝对接触力较小时,加载率较低,随着接触力的逐渐增大,加载率也相应成比例增加。此外,为了排除外界环境对实验的干扰,实验室温度和相对湿度分别保持在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 和53%RH。

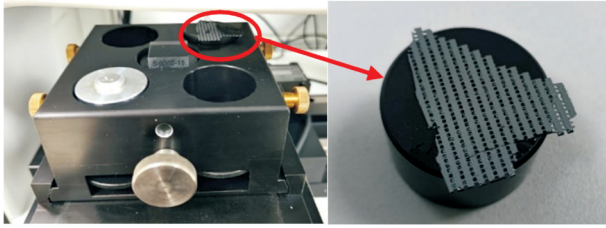
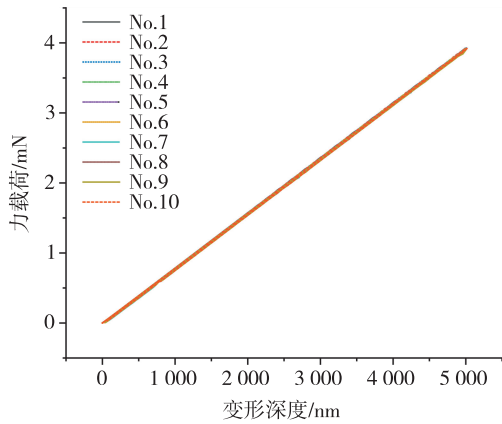
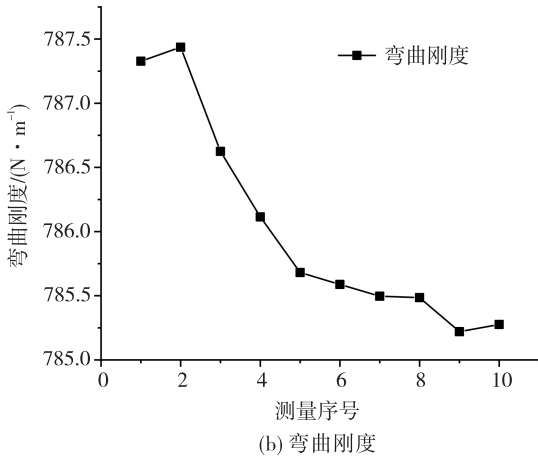


图 5 样品安装位置示意图

为评估纳米力学测试系统的测试精度,对同一实验样品的相同测试点进行了 10 次弯曲试验,并基于其应力-应变关系计算了该测试点的机械刚度,10 次弯曲试验的测量结果如图 6 所示。测量结果表明,同一测试点的机械刚度偏差值为 2.52 N/m,相对测量误差仅为 0.32%。



(a) 应力应变曲线



(b) 弯曲刚度

图 6 试验设备重复性测试结果

2.2.2 测试结果

为了验证标准中所提出的弯曲试验方法的可行性,对制备的 4 种悬臂梁结构进行弯曲试验,其在弯曲试验过程中的变形深度-力载荷曲线如图 7-10 所示。

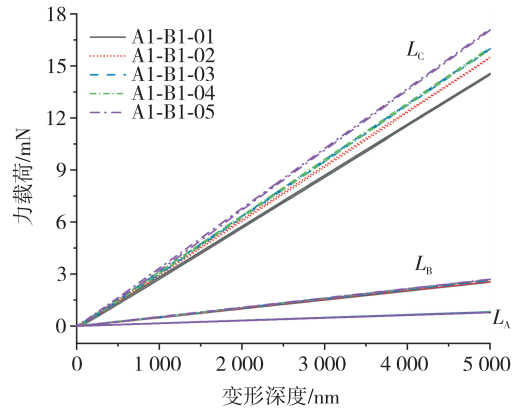


图 7 A1-B1 型结构测量曲线

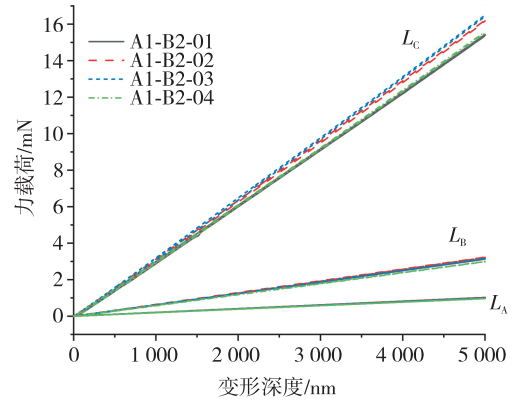


图 8 A1-B2 型结构测量曲线

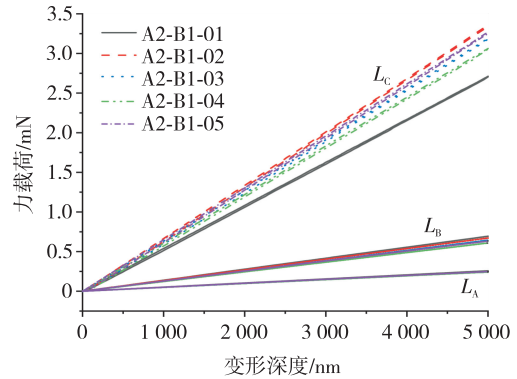


图 9 A2-B1 型结构测量曲线

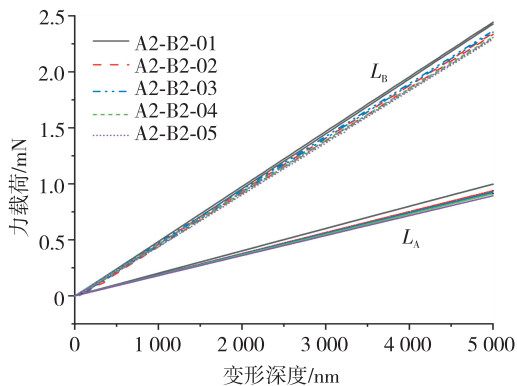


图 10 A2-B2 型结构测量曲线

测量结果表明,在 5 000 nm 形变范围内,4 种结构所有测量点的线性相关性 R^2 均优于 0.999,证明测量曲线具有非常高的线性特性,测试结构的变形范围处于弹性形变区内,确保悬臂梁在实验过程中未发生塑性变形或破坏。值得注意的是,变形深度-力载荷曲线的斜率与测试点的位置呈现明显的相关性,靠近悬臂梁根部的测试点具有更大的斜率,其原因是这些位置的机械刚度更大。

此外,在同一悬臂梁结构中靠近根部的 L_C 测量点的测量曲线差异性相对较大,一致性显著低于 L_A 和 L_B 。主要归因于两个因素:

1) 悬臂梁根部对测量点加载位置精度的要求较高,即使微小的位置误差也可能导致机械刚度发生变化,进而影响测量结果。

2) 由于加工工艺的固有差异,每根悬臂梁的厚度可能存在一定偏差,同样会对测量曲线造成一定影响。

综上所述,本文所采用的弯曲试验测试方法具有较高的可行性和准确性,可以有效实现薄膜材料的弯曲力学性能表征。

3 结束语

国家标准《微机电系统(MEMS技术)薄膜材料的弯曲测试方法》中规定的测试方法利用高精度力学加载装置,在加载过程中自动获取薄膜材料的变形深度和加载力,从而获取测试结构的弯曲力学性能。通过薄膜加工工艺制备了 4 种微米级的悬臂梁测试结构,并利用纳米力学测试系统获取其变形深度-力载荷曲线。测量结果表明,该标准所采用的弯曲测试方法简便易行,测试结果重复性好,在薄膜材料的弯曲力学性能表征方面具有重要参考意义。

参考文献:

[1] WANG P, LU Q, FAN Z. Evolutionary design optimization of MEMS: a review of its history and state-of-the-art[J]. Cluster Computing, 2019, 22 (Suppl. 4): 9105-9111.

[2] 汪思奇,汪忠睿,吴志坚,等. 压电薄膜振动传感器灵

敏度与频响标定研究[J]. 压电与声光, 2022, 44(6): 925-928.

WANG Siqi, WANG Zhongrui, WU Zhijian, et al. Study on calibration of sensitivity and frequency response characteristics of piezoelectric thin film vibration sensor [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2022, 44(6): 925-928.

[3] 赵正平. MEMS 智能传感器技术的新进展[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(1): 1-7.

[4] 杨婷婷. 基于 AlN 压电薄膜的水听器结构优化及测试[D]. 太原:中北大学, 2022.

[5] 李浩冉. AlN 薄膜磁控溅射工艺及其在声表面波器件中应用的研究[D]. 天津:河北工业大学, 2023.

[6] 李鹏璐. 基于 AlN 薄膜的 MEMS 超声换能器性能研究[D]. 太原:中北大学, 2023.

[7] ZHANG W, HAO C, ZHANG Z, et al. Vector high-resolution marine turbulence sensor based on a MEMS bionic cilium-shaped structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(7): 8741-8750.

[8] WANG R, SHEN W, ZHANG W, et al. Design and implementation of a jellyfish otolith-inspired MEMS vector hydrophone for low-frequency detection[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2021, 7(1): 1.

[9] DÜRR O, FAN P Y, YIN Z X. Bayesian calibration of MEMS accelerometers[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(12): 13319-13326.

[10] 全国微机电技术标准化技术委员会. MEMS 产业发展与标准化白皮书[R]. 北京:全国微机电技术标准化技术委员会, 2022.

[11] 全国微机电技术标准化技术委员会. GB/T 41852-2022 半导体器件 微机电器件 MEMS 结构黏结强度的弯曲和剪切试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, (2022-10-12)[2024-06-02].

[12] 全国微机电技术标准化技术委员会. GB/T 42895-2023 微机电系统(MEMS)技术 硅基 MEMS 微结构弯曲强度试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, (2023-08-06)[2024-06-02].

[13] 王强, 杨婷婷, 赵龙, 等. 基于 SOI 的压电薄膜式水听器[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(10): 787-792.