

纳米硬度计在 MEMS 力学检测中的应用

Nanoindentation applying to mechanical measurement for MEMS

张泰华

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

E-mail: zhangth @lnm. imech. ac. cn

摘要: 纳米硬度计是一种能提供 $10^3 \sim 10^2 \mu\text{m}$ 尺度材料或结构微力学性能检测的先进仪器。采用纳米压痕技术, 研究薄膜材料的弹性模量和硬度随压痕深度的变化规律以及薄膜厚度测量、微桥弯曲变形测量的方法。采用纳米划痕技术, 研究薄膜的表面粗糙度、临界附着力和摩擦系数测量的方法。该仪器能广泛应用于 MEMS 的力学检测, 并有望成为这一领域内的标准力学检测设备。

关键词: 纳米硬度计; 微机电系统; 力学检测

中图分类号: O348.3; TB938.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776(2003) 07/08-0212-03

1 引言

微机电系统(MEMS)已广泛应用于国防、医疗、航空航天、汽车等领域。目前,人们已不再满足某些系统功能的实现,开始关注 MEMS 结构优化设计及其工作的稳定性和可靠性等问题。这就对 MEMS 所用材料和结构的力学性能检测和破坏机理提出新的要求^[1]。

目前,典型的 MEMS 结构的特征尺寸在微米量级或更小。传统的材料力学性能测试设备在载荷和位移的测量精度、试样加工和装配等诸多方面远远不能满足要求^[2]。纳米硬度计是一种先进的能提供高分辨力连续载荷和位移测量的材料表面($10^3 \sim 10^2 \mu\text{m}$)力学性能测试仪器。它操作简单,可完成多种力学性能的测试,如弹性模量、硬度、膜厚、微结构的弯曲变形、粗糙度、临界附着力和摩擦系数等。纳米硬度计是 MEMS 所用材料和结构的最为理想的力学性能检测手段,已得到广泛应用^[3]。下面,以 MTS Nano Indenter XP 系统为检测手段,说明它在 MEMS 材料和结构力学性能研究中的应用。

2 纳米压痕技术的应用

2.1 压痕硬度和弹性模量

为了便于说明问题,这里选用五种典型材料进行了测试。首先,提供了硅片和玻璃的压痕实验结

果。图 1(a)包括压针在这两种试样中的加卸载曲线,卸载曲线的末端基本上反映卸载时的残余压痕深度,它可以说明材料弹性恢复的能力。从图 1(b),(c)中可以看出,硅片和玻璃的弹性模量和硬度不随压痕深度变化,弹性模量分别为 180 GPa 和 90 GPa,硬度分别为 12.5 GPa 和 8.4 GPa。

为了说明基体对薄膜力学性质的影响,使用溅射技术,在硅片和玻璃上分别沉积厚约 850nm 的铝膜。按显微硬度的经验,压痕深度为 $1/10 \sim 1/5$ 膜厚时,基体对膜的力学性能测试结果无影响^[4]。从图 1(b),(c)中可以看出,在压痕深度约在 50 ~ 150nm 范围内,硬度和弹性模量保持稳定,这是铝薄膜的力学性质,弹性模量和硬度约分别为 65 GPa, 0.5 GPa。随着压痕深度的增加,弹性模量和硬度不断增大,这是基体对薄膜性质的影响所致。由于 Si 片的弹性模量和硬度较大,Al/Si 的弹性模量和硬度随压痕深度的增加上升较快。

为了说明膜材料对薄膜力学性质的影响,采用 PECVD 技术,在硅片上沉积厚约 500 ~ 1100nm 的 TiN 膜。从图 1(b)和(c)中可以看出,50 ~ 100nm 时,TiN 膜的弹性模量和硬度分别为 310 GPa 和 24 GPa。随着压痕深度的增加,TiN/Si 的弹性模量和硬度逐渐变小,并接近于基体硅片的性质,说明基体的影响逐渐变大,这反映了硬膜软基材料的力学性能随压痕深度的变化趋势。对软膜硬基 Al/Si,

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10242001,10172086);中科院知识创新工程重要方向资助项目(KJ CX2-SW-L2)

弹性模量和硬度有随压痕深度增加变大的趋势,逐渐接近基体性质,这是软膜硬基材料的力学性能变化规律。

由上可知,该技术能检测出弹性模量和硬度随压痕深度变化的规律,是研究薄膜界面力学的有效手段。

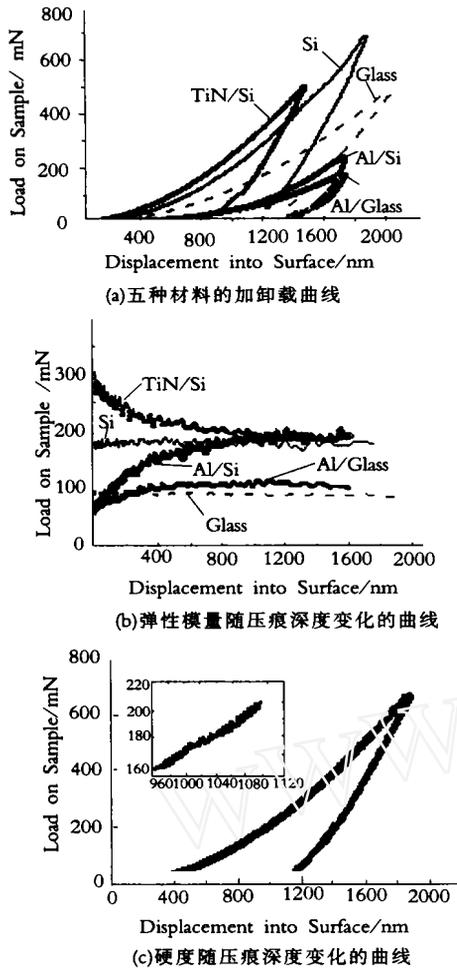


图1 硅片和玻璃的压痕实验结果

2.2 薄膜厚度

在硅片上进行氢氧合成生成约 $1\mu\text{m}$ 厚的氧化

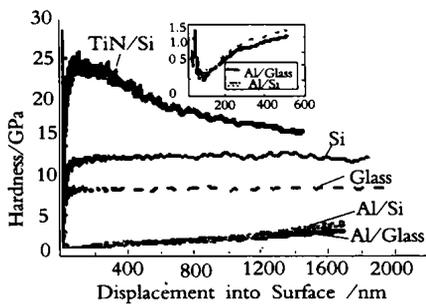


图2 二氧化硅的膜厚测量

硅薄膜,从图2中可以看出,在压痕深度为 $1020 \sim 1060\text{nm}$ 时,两条加载曲线上各有一平台。对一般材料来说,加卸载曲线多为连续变化的,见图1(a)。经

分析可知,该平台对应于膜厚,是由膜的粘着失效造成的。这可以作为一种测膜厚的方法,该方法仅对性质差别明显的膜基材料适用。

2.3 微桥的弯曲

对氢氧合成氧化生成的约 $1\mu\text{m}$ 厚的氧化硅,采用微加工工艺将膜制作成 $70\mu\text{m} \times 18\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 的微桥。测试使用的压针为楔形,楔长 $28\mu\text{m}$,楔角 45° 。为研究镍微桥的弯曲行为,压针楔长沿微桥宽度方向作用在微桥的中间,载荷-挠度见图3。

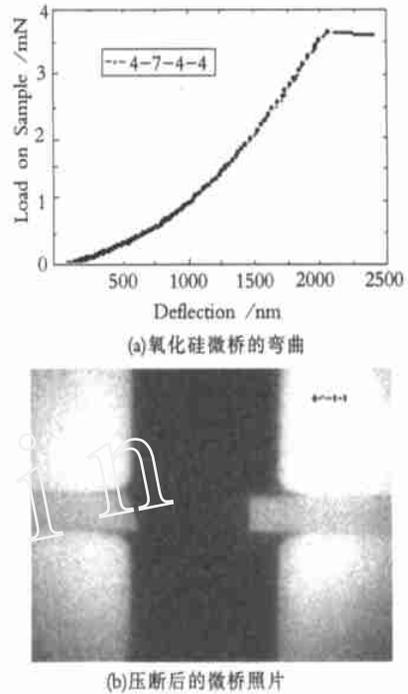


图3 微桥的载荷-挠度曲线及压断后的照片

3 纳米划痕技术的应用

3.1 粗糙度

使用纳米硬度计对硅片的表面粗糙度进行了测试,结果见图4。

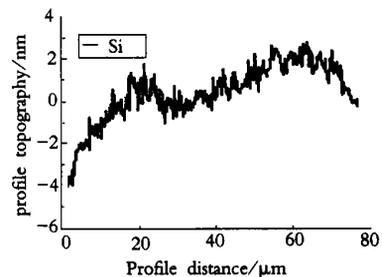


图4 硅片的表面粗糙度

测试时,扫描正压力为 $20\mu\text{N}$,扫描长度为 $80\mu\text{m}$ 。

3.2 临界附着力和摩擦系数

在硅片上利用磁控溅射方法沉积铝膜,对此进行纳米划痕实验。样品台水平移动速率为 $10\mu\text{m/s}$ 。

划痕过程主要分三步:第一步,用 $20\mu\text{N}$ 垂直作用力沿 Y 方向扫描试样表面,这可以看成是试样表面粗糙度的测试(图 5(a))。第二步,用最大为 60mN 线性增加的载荷(图 5(b))刻划试样表面。

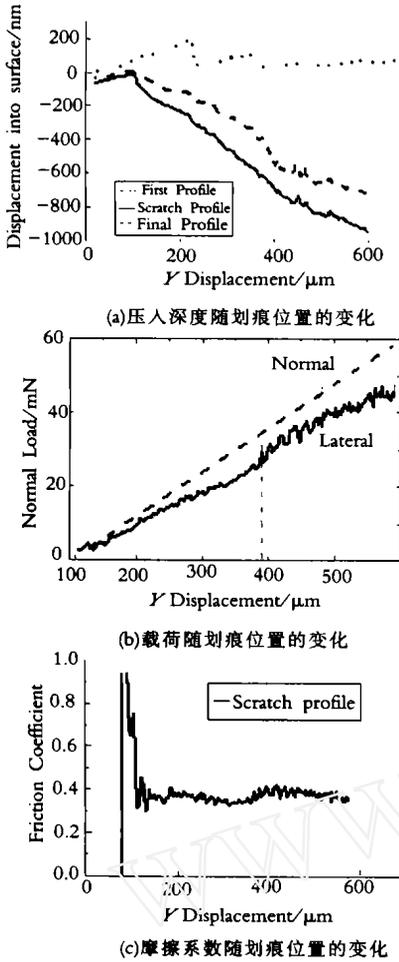


图 5 划痕过程

第三步,再用 $20\mu\text{N}$ 垂直作用力沿 Y 方向扫描试样表面,这可以看成是刻划后试样表面残余深度的测试(图 5(a))。对比 Scratch Profile 曲线和 Final

Profile 曲线,可看出划痕的弹性恢复情况。在图 5(b)中,水平力曲线中 $390\mu\text{m}$ 位置处出现了明显的波动,这是材料性质突变所致,该位置对应图 5(a)的压痕深度约 $0.7\mu\text{m}$,这正是膜厚,只有在膜基界面处材料的性质才会突变,所以也可以看成是一种测膜厚的方法。在该位置处,膜与基体出现了剥离,对应的正压力为 34.7mN ,水平力为 14.7mN ,此为膜的临界附着力。图 5(c)为摩擦系数随划痕位置的变化曲线。

4 结论

综上所述,采用纳米压痕技术,可以研究薄膜的弹性模量和硬度随压入深度的变化规律以及测量薄膜厚度和微结构弯曲变形。采用纳米划痕技术,可以测量薄膜的表面粗糙度、临界附着力、摩擦系数。总之,纳米硬度计能广泛应用于 MEMS 的力学检测,并有望成为该领域的标准力学检测设备。

感谢北京大学微电子研究院在试样制备方面的帮助。

参考文献:

- [1] BROWN S B. Unresolved issues in the material properties of MEMS (Invited paper) [A]. MEMS Reliability for Critical and Space Applications. SPIE 's 1999 Symposium and Education Program on Micromachining and Microfabrication [C]. Santa Clara, California, USA. 1999, 5-9.
- [2] 张泰华, 杨业敏, 赵亚溥, 等. MEMS 材料力学性能的测试技术[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 545-562.
- [3] 张泰华, 杨业敏. 纳米硬度技术的发展和应[J]. 力学进展, 2002, 32(3): 349-364.
- [4] 曲敬信, 汪泓宏. 表面工程手册[M]. 北京:化学工业出版社, 1998, 856-857.

作者简介:

张泰华 (1966-)男,江苏盱眙人,高级工程师,博士,主要从事材料的微尺度力学检测和爆炸力学研究,发表论文 30 余篇。