

原子力显微镜(AFM)力传感器及其固有频率的测试*

薛实福 刘永生 李庆祥 高宏 于水

(清华大学精密仪器及机械学系,北京100084)

摘要:由悬臂梁与探针集成件(Cantilever stylus)组成的力传感器是原子力显微镜的一个关键部件,固有频率(resonant frequency)是悬臂梁与探针集成件的一个重要技术指标,本文介绍了对力传感器的要求、力传感器的设计、检测力传感器的方法,着重介绍了一种采用光学象散原理组成的传感器的固有频率测试系统与方法。

关键词:原子力显微镜;悬臂梁探针;固有频率

1 引言

1982年IBM公司的G. Binnig和H. Rohrer成功地发明与研制了世界第一台扫描隧道显微镜(STM),使人类有史以来第一次能够实时地观察到单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物理、化学性质,对表面科学、材料科学、生命科学和纳米级加工等领域的研究工作有重大的意义和广阔的应用前景,G. Binnig和H. Rohrer因此获1986年诺贝尔物理奖。但STM只能用于导体、半导体材料的观测,1986年G. Binnig等人在STM技术的基础上发明与研制成功了原子力显微镜^[1](Atomic Force Microscope—AFM)它用原子在近距离内的相互作用力代替隧道电流,可用于导体、半导体和绝缘体的表面观测。AFM与STM同样具有原子级分辨率,图象分析也较为直接,它还可测量样品表面的力学性质。因此基于AFM原理发展了一批新的扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscope—SPM)如磁力显微镜(MFM)、静电力显微镜(EFM)、横向力显微镜(LFM)、弹道电子发射显微镜(BEEM)、扫描热显微镜等等。它们可在空气、真空、液体等各种环境下对导体、半导体和绝缘体材料直接观察固体表面的微细结构和对纳米尺度结构的物理化学性质进行测试。它不仅作为表面观测分析的手段,而且最近几年发展成为操纵原子,实现纳米级加工的技术手段。

从STM、AFM及其家族SPM的出现。虽然只有短短的十二年,但已在物理、化学、电化学、生物学、电子学、材料科学、医药学、度量学、微电子工业、微型机械制造和纳米加工等众多领域的研究和开发产生了不可估量的巨大推动作用。为了发展这项技术,对其中一些关键技术进行深入系统的研究很有必要。本文将着重介绍AFM力传感器的要求、设计,以及采用光学

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期:1994年11月17日

象散法测试力传感器的固有频率等。

2 AFM 力传感器及其要求

AFM 最初是在 STM 技术上改装而成。它的工作原理(如示意图 1-a)是将一个对微弱力极为敏感的悬臂梁探针式的力传感器的一端固定,另一端的探针尖与样品表面轻轻接触。由于针尖尖端原子与样品表面原子间存在极端微弱的排斥力。通过扫描时控制排斥力恒定,悬臂探针将对应于针尖与样品表面原子间作用力的等位面而垂直于样品的表面方向起伏运动。利用 STM 针尖与 AFM 悬臂梁之间隧道电流检测悬臂梁探针对应于扫描各点的位置变化来获得样品表面态的信息。这种测量悬臂形变的方法称隧道电流法。

检测 AFM 力敏悬臂梁变化的还有电容法(如图 1-b)、光干涉法(如图 1-c)、光反射法(如图 1-d)、压敏电阻法(如图 1-e)。现在用得最多的是光反射法,它由激光器发射出激光束照射到悬臂梁背面上,反射到光电位置检测器上,当悬臂梁探针扫描时对应于扫描各点位置发生变化,通过反馈系统控制 XYZ 扫描器保持力的恒定测出表面变化的信息。

对于 AFM,为了实现上述检测功能,准确反映出样品表面形貌和尽可能提高仪器的刚性,力传感器应满足以下要求^{[2],[6]}:

(1)低的力弹性常数:即悬臂梁在受到很小的力就能产生可检测到的位移,一般作用力为 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{N}$,达到高分辨率,力弹性常数在 $10^{-2} \sim 10^2 \text{N/m}$ 。

(2)高的固有频率:AFM 的成象速度受到悬臂梁固有频率的限制,要达到与 STM 相当的成象速度悬臂梁的固有频率应大于 10kHz。扫描速度快不仅成象方便,而且减小热漂移的影响。固有频率的提高还有助于减小环境和声音振动的影响。

固有频率 $f_m \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$ (m ——质量),为满足力弹性常数和固有频率的要求,则要求悬臂梁与探针的尺寸和质量要尽可能小。

(3)高的机械品质因数(Q):它是用米度量固有频率响曲线锐度的,即表示非接触式 AFM 悬臂梁探针的灵敏度。

(4)高的横向刚度:由于针尖与样品表面的摩擦力,如横向刚度差,可引起悬臂梁扭曲,导致图象失真。因此现在许多悬臂梁探针结构将矩形悬臂梁改为 V 形悬臂梁。

(5)采用光学检测法时要求悬臂梁背面具有高的光反射率,因此要求背面制成超光滑表面。如用隧道电流法时,应在悬臂梁背面制备金属电极,如用压敏电阻法时要在背面制压敏电阻及其相关电路。

(6)短的悬臂长度:当使用光学反射法来检测时,如果悬臂梁一端的线性平移量一定,则臂长愈短悬臂的弯曲角度就愈大,因而检测器的灵敏度与悬臂长成反比。

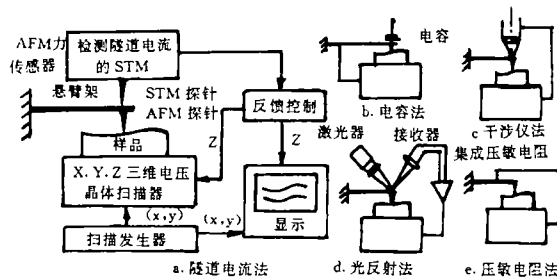


图 1 AFM 原理及微悬臂形变检测方法

(7) 尽可能尖锐的针尖: 由于针尖与样品间相互作用的基本理论有待于进一步发展有些问题尚在研究中, 对于 SPM 的各种显微镜的力传感器要求也有不同, 因此尚不能提出各种情况下的具体针尖尺寸(如针尖半径), 但要达到高分辨率要求尽可能尖的针尖这一点是共同的。最好能达到 10nm 以下, 对观察粗糙的表面保证针尖与样品之间只有一个接触点是很重要的。

(8) 其它方面: 如悬臂梁与探针集成件及其支撑体材料一致性, 大量生产、价格低、多种尺寸、规格可供使用者选择。

3 力传感器设计

根据上述要求, 力传感器的设计主要要解决以下结构形状及参数^[3-4]:

3.1 力传感器悬臂梁的结构形状

最简单的结构是矩形截面的力传感器悬臂梁结构(如图 2-a)。为了减轻重量, 提高横向刚度设计成 V 形且中间挖空(如图 2-b)。

L 、 W 、 t 、 L_1 、 L_2 如图分别表示悬臂梁的长、宽、厚等, 单位 μm 。

3.2 探针与悬臂梁的联结结构

分为两种结构: 分体式为针尖与悬臂梁粘结一起的结构, 整体式为针尖与悬臂梁一起加工出来的结构, 这种结构悬臂梁与探针是同一种材料因此比较好。

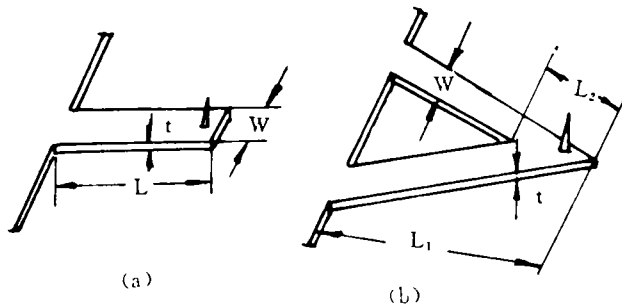


图 2 悬臂梁几何结构

3.3 针形

根据用途不同针型有金字塔状(底尺寸约 $4\mu\text{m}$, 高 $4\mu\text{m}$), 短圆锥(长 $5\mu\text{m}$ 左右, 底直径 $5\mu\text{m}$ 左右), 长圆锥形(长 $10-20\mu\text{m}$), 在金字塔状探针上再生成的超级探针 ($1.5\mu\text{m}$ 长)。

针尖半径, 不超过 50nm, 最好 10nm 或更小。

3.4 材料

分体式: 悬臂梁材料与探针材料不同, 如氮化硅梁上粘结金刚石。整体式: 硅、氧化硅、氮化硅等, 材料根据具体情况选择。

3.5 悬臂梁探针的力弹性常数和固有频率

(1) 力弹性常数

$$\text{对于矩形截面悬臂梁 } K = \frac{EWt^3}{4l^3} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

$$\text{对于 V 形截面悬臂梁 } K = \frac{Ewt^3}{2l_1^3 + l_2^3} \quad (\text{N/m}) \quad (2)$$

$E(\text{N/m}^2)$ 为材料的杨氏模量, 根据 AFM 作用力要求一般力弹性常数在 $10^{-2} \sim 10^2 \text{N/m}$ 间选择。

(2) 固有频率

$$f_r = 0.162 \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (Hz) \quad (3)$$

式中： ρ —材料密度(kg/m³)

接触式 AFM 力传感器固有频率一般为几千赫——几十千赫，非接触式 AFM 力传感器固有频率一般为 100 千赫以上，针尖质量与悬臂质量相比很小时可以忽略其对固有频率的影响。

4 象散法测试固有频率原理与系统

一般来讲，在 AFM 上应用的力传感器运动的检测装置都可以改作为固有频率测试装置。

对固有频率测试系统应包括(1)对力传感器——悬臂梁的激振；(2)机械振动信息的接收及转换光电及电信号装置；(3)振动信息处理与显示。

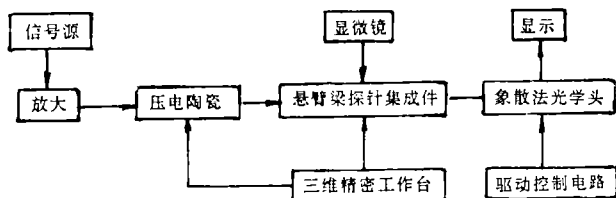


图3 光学象散法检测力传感器检测系统的原理框图

本文采用光学象散法检测力传感器的固有频率，其检测系统的原理框图如图 3。

4.1 力传感器的激振

由信号发生器提供不同频率的激振信号经放大激振压电陶瓷，悬臂梁的基体与压电陶瓷紧固在一起，随其振动。

4.2 振动信息的获取、转换处理与显示

本系统采用象散法光学头^[5]。其光路如图 4-a，由半导体激光器发出的光经过光栅照到半透半反镜，反射光经聚光镜和物镜聚焦到悬臂梁上，反射光经物镜、聚光镜、半透半反镜、柱面镜后照射到光电接受器上。

在悬臂梁激振前将光路调整至正焦位置，其光斑图形如图 4-b 中间位置，当悬臂梁振动时，光斑离焦。其左右二光斑图形为焦前和焦后位置，当入射光经物镜没有聚焦在梁上时，可通过力短器调整物镜位置，聚焦到悬臂梁上。

将上述振动时光斑信号经光电器件接收，后将光电流转化为电压，经滤波放大，通过示波器显示波形与幅度。

光学头中激光器电源、光电转换电路、物镜调整电路由驱动控制电路提供。为了调悬臂梁背面与光路垂直，采用三维精密工作台进行调整。用显微镜观察入射光是否照射到悬臂梁的背

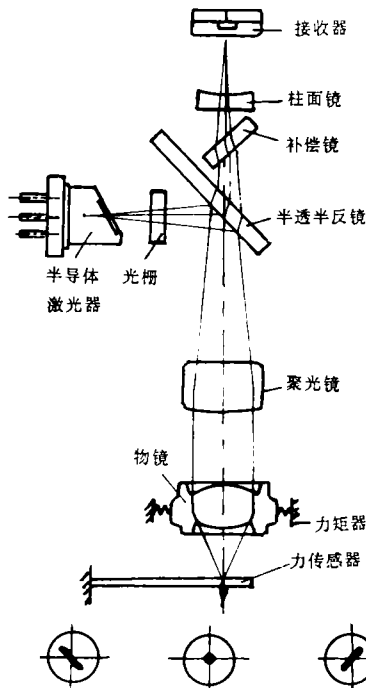


图4 系统光路图及其光斑图形

面。

采用该系统测试图 3-b 氮化硅 V 形力传感器($L=220\mu\text{m}$, $t=1\mu\text{m}$, $w=40\mu\text{m}$), 其固有频率为 26kHz, 与按式(3)计算值基本一致。

5 结 束 语

采用上述系统对力传感器的固有频率进行了实测, 结果表明该测量系统测得值与理论计算值基本一致。该方案为测量 AFM 力传感器的固有频率提供了一种较适用的方法, 其测试固有频率范围在 100kHz 以下。

参 考 文 献

- [1]G. Binnig C. F. Quate, Atomic Force Microscope. Phys. Rev. Lett, 1986, **156**(9): 930—933
- [2]T. R. Albrecht, Ph. D Dissertation. Dept of Applied Physics, Stanford University, 1989
- [3]I. C. Kong et al. , Integrated Electrostatically resonant Scan Tip for an Atomic Force Microscope. J. Vac. Sci. Technol. , 1993, **B11**(3): 634—641
- [4]J. Brugger et al. , Silicon Cantilevers and tips for Scanning Force Microscopy Sensors and Actuators, 1992, **A34**: 193—200
- [5]Specifications for KLS—150AEM, SONY CO.
- [6]白春礼, 扫描隧道显微术及其应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1991

Atomic Force Microscope Force Sensors and Its Resonant Frequency Testing

Xue Shifu, Liu Yongsheng, Li Qingxiang, Gao Hong and Yu Shui

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, 北京 100084)

Abstract

In Atomic Force Microscope (AFM), the force sensor, cantilever with integrated tip, is a crucial component, and its resonant frequency is a main technical parameter. In this paper, the specification, design and testing of the force sensor are presented. A method based on optic astigmatism principles to test the resonant frequency of the force sensors is described in detail.

Key words: Atomic force microscope, Cantilever stylus, Resonant frequency