

# 扫描力显微镜中超微力的探测方法

于建宏 黄文浩

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,合肥 230026)

**摘要** 本文介绍了近十年来,各国科学家在研究扫描力显微镜的过程中所采用的各种超微力( $10^{-8}\sim 10^{-10}\text{N}$ )传感器的探测方法。评述了各种方法的灵敏度,抗振性,使用范围,操作方式和各自的优缺点。并对最近出现的几种新的探测方法作了说明。

**关键词:**扫描力显微镜;超微力;探测

自扫描力显微镜(Scanning Force Microscope-SFM)<sup>[1]</sup>于1986年由 G. Binnig, C. F. Quate 等人发明以来,它已被广泛应用于物理,化学,生物,电子,机械等各个领域<sup>[2]</sup>,并带动和影响了一批新兴学科,为纳米科技等高科技学科提供了有力的工具。SFM 出现的时间不长,但已显示出极大的生命力。它不仅可以对导体和半导体进行检测,还可以对绝缘体进行纳米级甚至原子级的形貌探测;就使用环境来说,它不仅可以用在空气中,还可以用在液体和真空中;在使用中,SFM 不需对样品进行特别的处理和加工,所以几乎不会对样品造成任何损伤,这些特性在很大程度上扩大了它的使用范围。另外,利用 SFM 测量中对力的极端敏感性,它还可以用来测量样品表面的纳米级力学性质,如对样品的弹性,塑性,硬度,针尖与样品之间的范德华吸引力以及磁力<sup>[3]</sup>,摩擦力<sup>[4]</sup>和粘着力<sup>[5]</sup>的研究,已经取得了很有意义的结果。在扫描力显微镜中,超微力传感器是其核心部件,它通常由一端部带有微小针尖的悬臂梁组成,并且应该满足较小的弹性系数和较高的固有频率等力学性质。在探测样品的过程中,对悬臂梁在超微力的作用下,其变形程度的探测是至关重要的。在 SFM 中是通过检测纳米级变形的检测来实现超微力检测的。至今,探测悬臂梁变形程度的方法已经有很多种,从最畅上隧道电流探测法,后来的光学偏转法,各种干涉方法,电容探测法,一直到最近的压阻法和压电法等。了解和分析各种探测方法的优缺点,以及它们的分辨率、抗振性、适用范围、操作方式等,对正确使用 SFM 和在设计新的探测方法方面有着重要意义。

## 1 隧道电流探测法<sup>[1-5]</sup>

悬臂梁放在样品和扫描隧道显微镜<sup>[6]</sup>的针尖之间,并与一压电陶瓷固定在一起,通过给压电陶瓷一交流电压信号,可使悬臂梁在一定频率下振动。隧道电流探测法的优点是灵敏度高,悬臂梁的共振频率大于 2kHz。但这种方法缺点较多,因此,目前这种方法除了在特殊场合下

(低温,真空中)已很少使用。

## 2 光学偏转法(光学杠杆法)<sup>[7-8]</sup>

光学偏转法的原理为:从激光器射出的光聚焦在悬臂梁的背面,并反射到位置敏感元件(PSD)上。在扫描过程中,悬臂梁随着针尖和样品之间作用力的变化而发生幅度不同的偏转,使反射光的位置发生变化,由此可得到样品的表面图像。

光学偏转法简单,容易操作,并且可探测悬臂梁的较大幅度(几百埃)的振动,对悬臂梁的表面粗糙度不敏感,分辨率亦较高。但这种方法有一个在光学探测法中都存在的缺点,即对于某些光敏材料,用光学探测法有可能使样品的表面特性发生一定的变化,所以对其使用造成影响。这种方法的灵敏度可达  $1 \times 10^{-3} \text{ \AA} / \text{Hz}^{1/2}$ ,共振频率为十几 kHz。

## 3 干涉法

### 3.1 自差干涉法<sup>[9]</sup>

自差干涉法的原理见图 1。偏振激光器发出的光经偏振分光镜,1/4 波片,物镜打在悬臂梁的背面,从悬臂梁反射回来的光和从光学平板上反射的光发生干涉,结果由光电二极管接收,再由锁存放大器放大后经反馈系统来控制样品的 Z 方向运动。

自差干涉法的光路结构相对简单,使用比较方便,灵敏度可达 5pmRMS(100~1kHz)和 20pmRMS(0.5~3kHz),但两路干涉光的光程相差很大,测量受光路上的热扰动和机械扰动的影响较大(悬臂梁的共振频率为 5kHz),激光器的稳定性对测量结果也有影响。

### 3.2 光纤干涉法<sup>[10]</sup>

图 2 为光纤干涉法的原理图。从激光器中发出准直光( $\lambda=633\text{nm}$ ),首先经法拉第隔离器,然后再经 3×扩束镜、半波片。从偏振分光镜出来后,经-10×物镜汇聚在光纤的中心部位。再用一块玻璃盖片置于物镜和光纤之间,并用油滴将玻璃和光纤之间的空隙填满。光线通过光纤后射到悬臂梁的背面。在这套系统中,玻璃盖片作为一个反射镜,使一小部分光反射回去成为参考光,大部分经光纤打在悬臂梁上,反射回去后成为信息光,信息光的强度主要是由光纤的端面和悬臂梁的距离决定的。信息光和参考光发生干涉后,由光电二极管接收,产生不同强度的电流信号,对此信号进行处理,或将其作为反馈系统的控制信号,即可得到样品的表面信息。

光纤干涉法的探测灵敏度可达 1pmRMS(100~1kHz)和 30pmRMS(0.3~3kHz)。它的结构相对来说比较简单,共振频率为 5kHz 左右,它的两路干涉光的光程差别很小,从而减小了外部光学扰动对系统测量结果的影响,但在使用这种方法时,要注意光纤端部的光耦合及光纤探头的平面度。

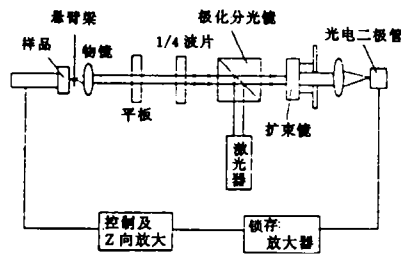


图 1 自差干涉法

### 3.3 外差干涉法<sup>[11-12]</sup>

外差干涉法的原理如图 3 所示。悬臂梁固定在压电陶瓷上,压电陶瓷使悬臂梁在略高于其最低共振频率附近振动。由于针尖和悬臂梁之间力的变化,使悬臂梁振动的幅值和频率发生相应的变化,干涉信号由光电二极管接收。

外差干涉法对悬臂梁的表面特性和热扰动不敏感,而且悬臂梁和光学部分之间的距离不必精确控制,但这种方法使用 DOVE 棱镜和声光调制器等复杂元件,因此结构较复杂,而且两路干涉光的光程差较大,测量受光路上的机械振动的影响较大。

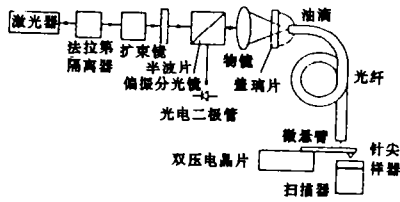


图 2 光纤干涉法

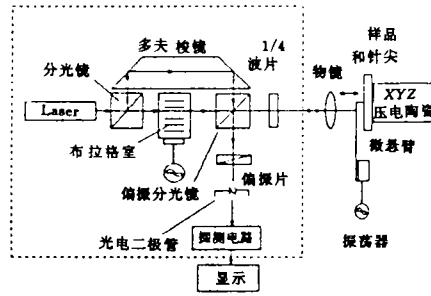


图 3 外差干涉法

外差干涉法的灵敏度较高,为  $8 \times 10^{-4} \text{ \AA}/(\text{Hz})^{1/2}$  (1kHz),共振频率亦较大,可达 50kHz,其噪声来源主要是光学噪声和热噪声。如果能够进一步减小悬臂梁的弹性系数,增大品质因子,增加振动的幅度,效果会更好。

### 3.4 差动干涉法(两点法)<sup>[13]</sup>

差动干涉法如图 4 所示。激光器中射出的光依次经法拉第隔离器,索~巴补偿器,4×扩束镜,分光镜和方解石后分成两束偏振状态相互垂直的线偏光 S 和 P,分别打在悬臂梁的根部和端部。悬臂梁由于针尖和样品之间力的作用而偏转时,P 光和 S 光会产生~动态的相位差  $\varphi$ ,通过调整索~巴补偿器,可使光电二极管接收的信号 A, B 与  $\varphi$  之间有下列关系:

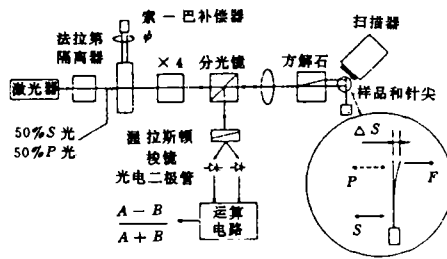


图 4 差动干涉法

$$\frac{A-B}{A+B} = V \sin(\varphi) \approx \varphi = 4\pi(\Delta S/\lambda)$$

其中  $V = 2 \sqrt{I_r \cdot I_p} / (I_r + I_p)$ 。  $I_r, I_p$  分别为反射光 S 光和 P 光的光强。

差动干涉法对光源和空气波动引起的光强变化不敏感,而且由于同时从悬臂梁反射参考光和信息光,所以对光学部件之间的振动和机械部件之间的振动不敏感,因而其精度和时间稳定性都比较高,其灵敏度为 1pmRMS(1~20kHz)和 40pmRMS(0.01~1kHz),共振频率为 4.5kHz。

### 4 电容检测法<sup>[14-15]</sup>

电容检测法的原理如图 5 所示。当悬臂梁由于针尖和样品之间力的作用而偏转时,将引起电容两极之间距离的变化,从而导致电容值的变化,利用一电容转换桥,就可通过探测电容的变化而把悬臂梁的微小偏移量探测出来。

电容探测法的结构简单,操作比较方便,灵敏度为 3pmRMS (0.01~1kHz),但电容传感器的制作有一定的困难。

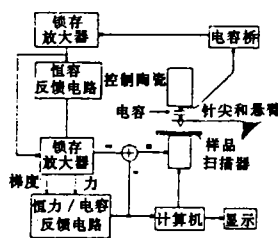


图 5 电容检测法

### 5 压阻检测法<sup>[16]</sup>和压电检测法<sup>[17-20]</sup>

压阻检测法和压电检测法,都是近几年出现的方法。压阻检测法如图 6 所示,在臂梁的表面或靠近表面的内部嵌入某种材料,当样品和针尖之间的作用力引起悬臂梁的偏转时,这种材料的电阻会根据偏转的不同程度而产生不同的变化,电阻的变化可由一直流偏置的威斯頓(Wheatstone)电桥来获得;图 7 为压阻悬臂梁的示意图。

$$\Delta R = -4R \frac{V_1 - V_2}{V}$$

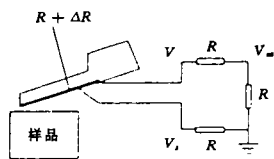


图 6 压阻检测法

为获得样品的形貌,既可直接对  $\Delta R$  进行处理来得到样品的表面信息,亦可将  $\Delta R$  作为反馈系统的控制变量。压阻检测法是一种比较

简单、可靠的探测方法,它的电路非常简单,带有偏移传感器的悬臂梁的制做也很方便,而且,它可采用针尖扫描的方式探测样品,所以特别适合探测比较大的样品并可在多种环境下工作,其灵敏度为 10~70pm(10~1kHz)。但威斯頓电桥中的电阻值不可能做得完全相同,因此将产生一定的误差。

压电检测法,是利用压电晶片在力作用下,可在表面产生电荷的原理而设计的。原电检测法有两种工作模式:

①在压电悬臂梁上加一交流电压,使悬臂梁在其共振频率附近振动,由于针尖和悬臂梁之间的力梯度的变化,导致悬臂梁的振幅和相位发生变化,而振幅和相位的变化又反映为压电晶片电阻的变化,因此,可根据其电阻的变化值,再在悬臂梁上加一直流偏压,使针尖和样品之间

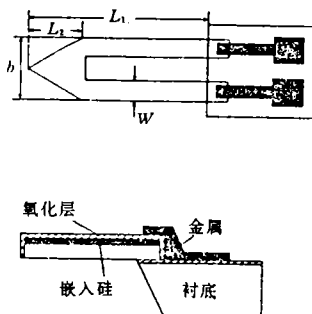


图 7 压阻悬臂梁结构示意图  
a)平面图 b)截面图

的距离保持不变,而所加的直流电压即反映了样品的表面形貌。其原理如图 8 所示。

②使样品在双压电晶片的共振频率附近振动,在针尖和样品之间的作用下,双压电晶片上产生的交流电压信号经锁存放大器、带通滤波、全波整流、低通滤波后产生一与样品和针尖之间的交变作用力成正比的直流信号,此信号再经传统的积分反馈控制并放大后来控制样品的 Z 方向运动。

压电检测法结构简单,分辨率较好,在探测带宽为 1Hz 的条件下,其力的灵敏度可达  $105\text{PN}/(\text{Hz})^{1/2}$ ,悬臂梁可成批制作,它和压阻检测法一样适合比较大的样品,并且免除了光学探测法中有可能对某些光敏材料产生影响的缺点。

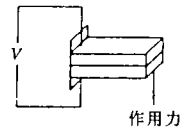


图 8 压电检测法

## 6 总结和展望

本文以上介绍了探测悬臂梁超微力的几种方法,这些方法在一定条件下都可达到原子级分辨率,并在此基础上得到了样品表面的纳米级或原子级的图像。表 1 总结了各种方法在不同的条件下其灵敏度和共振频率的大小以及各自的不同特点。

扫描力显微镜从发明到现在,在短短的几年中已受到了广泛的注意和得到迅速的发展。各种形式的仪器已经研制出来,并很快商品化。越来越多的科学家毫不犹豫地转入这一研究领域,国际间的学术交流和协作相当活跃。可以预见,在不久的将来,扫描力显微镜在表面科学、纳米材料、微型机械等领域必将发挥更大的作用。

表 1 各种检测方法灵敏度、抗振性一览表

检测方法	灵敏度(位置)	条 件	共振频率	特 点
STM 检测法	$0.2\text{pm}/(\text{Hz})^{1/2}$	1kHz 室温	$>2\text{kHz}$	导电梁,梁表面局部特性影响检测结果
	$2 \times 10^{-3}\text{pm}/(\text{Hz})^{1/2}$	1kHz 4K		
自差干涉法	5pmRMS	100~1kHz	5kHz	受热扰动、机械扰动的影 响较大
	20pmRMS	0.5~3kHz		
光纤干涉法	1pmRMS	100~1kHz	5kHz	稳定,受光扰动影响小
	30pmRMS	0.3~3kHz		
外差干涉法	$0.08\text{pm}/(\text{Hz})^{1/2}$	1kHz	50kHz	复杂、价高
差动干涉法	1pmRMS	1~20kHz	4.5kHz	稳定,受光扰动和机械扰 动的影 响小
	40pmRMS	0.01~1Hz		
电容检测法	3pmRMS	0.01~1kHz		简单、方便
光学偏转法	$0.1\text{pm}/(\text{Hz})^{1/2}$			简单、可靠
压阻检测法	10~70pmRMS	10~1kHz		大样品,针尖扫描
压电检测法	$105\text{PN}/(\text{Hz})^{1/2}(\text{力})$	1Hz 带宽		简单、分辨率高,适于大 样品,可用针尖扫描方式
	$5.4\text{nN}/(\text{Hz})^{1/2}(\text{力})$	2.6kHz 带宽		

## 参 考 文 献

- [1] G. Binnin, C. F. Quate and Ch. Gerber, Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.* 1986, **56**:930
- [2] D. Rugar, P. Hansma, Atomic Force Microscope. *Physics Today*, 1990, 10:23
- [3] Y. Martin, H. K. Wickramasinghe and D. Rugar, High-resolution Magnetic Imaging of Domains in TbFe by Force Microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 1988, **52**:244
- [4] C. M. Mate, G. M. McClelland, Atomic-scale Friction of a Tungsten Tip on a Graphite Surface. *Phys. Rev. Lett.* 1987, **59**:1942
- [5] H. J. Hug, Th. Jung, A High Stability and Low Drift Atomic Force Microscope. *Rev. Sci. Instrum.* 1992, **63**:3900
- [6] G. Binnig and H. Rohrer, Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy, *Phys. Rev. Lett.* 1982, **49**:57
- [7] G. Meyer and N. M. Amer, Novel Optical Approach to Atomic Force Microscope. *Appl. Phys. Lett.* 1988, **53**:1045
- [8] S. Alexander, L. Helleman. An Atomic Resolution Atomic-Force Microscope Implemented Using an Optical Lever. *J. Appl. Phys.* 1989, **65**:164
- [9] P. C. Yang, Y. Chen. Attractive-mode Atomic Force Microscopy with Optical Detection in an Orthogonal Cantilever/Sample Configuration. *J. Appl. Phys.* 1992, **71**:2499
- [10] D. Rugar, H. J. Mamin, Force Microscope Using a Fiber-Optic Displacement Sensor. *Rev. Sci. Instrum.* 1988, **59**:2337
- [11] Y. Martin, C. C. Williams, Atomic Force Microscope Force Mapping and Profiling on a Sub 100-Å Scale. *J. Appl. Phys.* 1987, **61**:4723
- [12] Y. Martin, H. K. Wickramasinghe. Magnetic Imaging by Force Microscope with 1000 Å Resolution. *Appl. Phys. Lett.* 1987, **50**:1455
- [13] C. Schonberger, S. F. Alvarado, A Differential Interferometer for Force Microscope. *Rev. Sci. Instrum.* 1989, **60**:3131
- [14] R. C. Barrett and C. F. Quate, Large-scale Charge Storage by Scanning Capacitance Microscopy. *Ultramicroscopy*, 1992, (42-44):262
- [15] T. Goddenhenrich, H. Lemke, Force Microscope with Capacitive Displacement Detection. *J. Vac. Sci. Technol.* 1990, **A8**:383
- [16] M. Tortoness, R. C. Barrett. Atomic Resolution with an AFM Using Piezoresistive Detection. *Appl. Phys. Lett.* 1993, **62**(8):834
- [17] M. Anders and C. Heiden, Imaging of Tip-sample Compliance in STM. *J. Microsc.* 1988, **152**:643
- [18] J. Tansock and C. C. Williams. Force Measurement with a Piezoelectric Cantilever in a Scanning Force Microscope. *Ultramicroscopy*, 1992, (42-44):1464
- [19] K. Takata and T. Hasegawa. Tunneling Acoustic Microscope. *Appl. Phys. Lett.* 1989, **55**:1718
- [20] K. Takata, Whole Electronic Cantilever Control for Atomic Force Microscope. *Rev. Sci. Instrum.* 1993, **64**(9):2598

## Detection Methods of Super-micro Force in SFM

Yu Jianhong, Huang Wenhao

*(Dept. of the Precision Machinery and Precision Instrument of USTC, Hefei 230026)*

### Abstract

In this paper, some detection methods of Super-micro force sensor used in researching scanning force microscopy are introduced, and their sensitivity, anti-vibration, operation scope, operation method, advantages and disadvantages are evaluated, and several new detection methods are illustrated.

**Key words:** Scanning force microscope, Super-micro force, Detection