

# 扫描探针显微术及其在纳米科技中的应用

王锐<sup>1,2</sup> 李道火<sup>1,2</sup> 黄永攀<sup>1,2</sup> 罗丽明<sup>1</sup> 浦坦<sup>1</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031

2 山东道钛纳米技术研究院, 济南 250100)

**摘要** 综述了近二十年来以扫描隧道显微镜为代表的、基于探针的成像显微装置基本原理及应用领域。

**关键词** 纳米技术; 扫描隧道显微镜; 扫描探针显微镜; 近场光学显微镜

1982年,美国国际商用机器公司(IBM)苏黎世实验室的葛·宾尼(Gerd Binnig)博士和海·罗雷尔(Heinrich Rohrer)博士及其同事们共同研制成功了世界第一台新型的表面分析仪器——扫描隧道显微镜(STM; Scanning Tunneling Microscope)。它的出现,使人类第一次能够实时地观察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<sup>①</sup>,在材料科学、表面科学、生命科学等领域的研究中有着重大意义和广阔应用前景,被国际科学界公认为20世纪80年代世界十大科技成就之一。为表彰STM的发明者们对科学研究的杰出贡献,1986年,宾尼和罗雷尔被授予诺贝尔物理学奖。

在STM出现后,又陆续发展了一系列工作原理相似的新型显微技术,包括原子力显微镜(AFM: Atomic Force Microscope)、横向力显微镜(LFM: Lateral Force Microscope)等,这类基于探针对被测样品进行扫描成像的显微镜统称为扫描探针显微镜(SPM: Scanning Probe Microscope)。

## 2.1 工作原理

根据量子力学的理论计算和科学实验证明,当具有电位势差的

两个导体间距离小到一定程度时,电子将存在一定几率穿透两导体之间的势垒,从一方向另一方穿透,这种现象在量子力学中被称为隧道效应,而形成的电流叫做隧道电流。隧道电流有一种特殊的性质,即对两导体之间的距离非常敏感,如果把距离减少0.1nm,隧道电流就会增大一个数量级。

扫描隧道显微镜的工作原理就是利用隧道电流对隧道距离的敏感性,利用探针针尖扫描样品,通过隧道电流获取信息,经计算机处理得到图象。图1示出其结构示意图。

## 2.2 优点和局限性

STM独具以下几个优点:①原子级高分辨率,在平行和垂直于样品表面方向的分辨率分别可达0.1nm和0.01nm,即可以分辨出单个原子;②可实时地得到实空间中表面的三维图像,可用于具有周期性或不具备周期性的表面结构研究,这种可实时观测的性能可用于表面扩散等动态过程的研究;③可

以观察单个原子层的局部表面结构,而不是体相或整个表面的平均性质。因而可直接观察到表面缺陷、表面重构、表面吸附体的形态和位置,以及由吸附体引起的表面重构等;④可在真空、大气、常温等不同环境下工作,甚至可将样品浸在水和其它溶液中,不需要特别的制样技术,且探测过程对样品无损伤。这些特点适用于研究生物样品和在不同试验条件下对样品表面的评价,例如对于多相催化机理、超导机制、电化学反应过程中电极表面变化的监测等;⑤配合扫描隧道谱STS(Scanning Tunneling Spectroscopy)可以得到有关表面结构的信息,例如表面不同层次的态密度、表面电子阱、电荷密度波、表面势垒的变化和能隙结构等。表1列出STM与其他显微镜的性能比较。

STM应用于纳米科技也遇到下述问题<sup>②</sup>: ①在恒电流工作模式下,STM有时对样品表面微粒之间的某些沟槽不能够准确探测,分辨

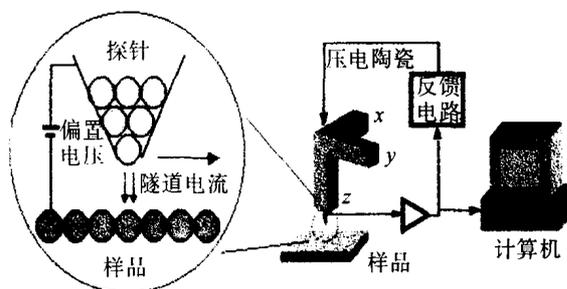


图1 STM结构示意图

收稿日期 2003-02-21

作者简介: 王锐(1976~),男,中科院安徽光学精密机械研究所读博士。对纳米技术和固体激光很感兴趣。

表1 扫描隧道显微镜(STM)与其他显微镜各项性能比较

仪器	性能	分辨率	工作环境、样品环境	温度	对样品破坏程度	检测深度
扫描隧道显微镜(STM)		原子级(0.1nm)	实环境、大气、溶液、真空	室温或低温	无	100 $\mu$ m 量级
透射电镜(TEM)		点分辨(0.3~0.5nm) 晶格分辨(0.1~0.2nm)	高真空	室温	小	接近 SEM,但实际上为样品厚度所限,一般小于 100nm
扫描电镜(SEM)		6~10nm	高真空	室温	小	10mm(10倍时) 1 $\mu$ m(10000倍时)
场离子显微镜		原子级	超高真空	30~80K	有	原子厚度

率较差;②所观察的样品必须具有一定程度的导电性,对于半导体,观测的效果就差于导体;对于绝缘体则根本无法直接观察。如果在样品表面覆盖导电层,则由于导电层的粒度和均匀性等问题又限制了对图像真实表面的分辨率。

### 2.3 应用

在纳米范围内,STM已在表面科学、材料科学、生命科学各个领域获得了广泛应用。已经对金、铝、铜、硅、砷化镓、氧化钛等表面进行了广泛研究<sup>[3,4,5]</sup>,结果表明,用STM不仅可以观察到这些材料清洁表面的原子或电子结构、清洁表面及有吸附质覆盖后表面的重构结构,还可以观察表面存在的原子台阶、平台、坑、丘等结构缺陷。当这些表面存在吸附质时,用STM可观察研究这些物质在表面的分布、衬底对它的影响,以及吸附质在表面的生长、扩散、迁移、反应等表面动力学过程<sup>[6,7]</sup>。这些问题如用X光衍射、低能电子衍射等手段进行研究,则往往要求样品长程有序,得到的结果大多数是样品在较大范围和深度内的平均性质,而STM给出的结果是样品最表层的局域信息,不仅弥补了上述实验手段的不足,而且得到了用这些手段难以获得的结果。

STM不仅能够对样品表面进行成像,而且还能在纳米尺度上对材料表面进行刻蚀与修饰。由微观

到宏观,直接操纵单个原子和分子,对它们进行排列组合,以形成新的物质,或制造出一定功能的机器,这是实现纳米加工的新思想<sup>[8,9]</sup>。自从STM问世以来,STM作为一种纳米加工工具的研究已涉及到表面直接刻写、电子束诱导沉积以及单原子操纵等方面,并取得了一批高水平的研究结果。

### 3.1 原子力显微镜

原子力显微镜的设计思想是:一个对力非常敏感的微悬臂,其尖端有一个微小的探针,当探针轻轻地接触样品表面时,由于探针尖端的原子与样品表面的原子之间产生极其微弱的相互作用力而使微悬臂弯曲,将微悬臂弯曲的形变信号转换成光电信号并进行放大,就可以得到原子之间力微弱变化的信号。从这里我们可以看出,原子力显微镜设计的高明之处在于利用微悬臂间接地感受和放大原子之间的作用力,从而达到检测的目的。原子力显微镜同样具有原子级的分辨率。由于原子力显微镜既可以观察导体,也可以观察非导体,从而弥补了STM的不足。图2为原子力显微镜结构示意图。

原子力显微镜发明以后,又出现了一些以测量探针与样品之间各种作用力来研究表面性质的仪器,如:以摩擦力为对象的摩擦力

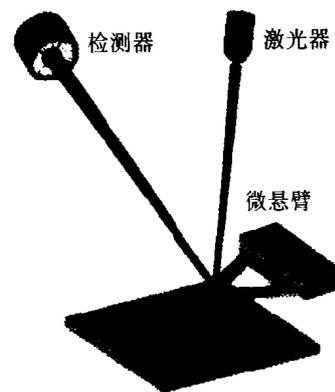


图2 原子力显微镜仪器结构示意图

显微镜、研究磁场性质的磁力显微镜、利用静电力的静电力显微镜等。这些不同功能的显微镜在不同的研究领域发挥着重要的作用,它们统称为扫描力显微镜。

### 3.2 扫描力显微镜(SFM)的应用

SFM能够在原子或纳米尺度上探测探针与样品之间的相互作用力,并可达到原子级或纳米级的分辨率。利用SFM,人们已经对层状化合物如二硫化钼、云母等,离子晶体如LiF、NaCl等以及生物分子如DNA和有机分子等进行了广泛的研究;对在原子尺度上存在的摩擦力进行了探测;在纳米尺度上,对与工程技术密切相关的材料如磁性材料、光栅、光盘等进行了探测研究。此外,AFM不仅可作为观测手段,而且也可作为纳米加工工具,例如经过改装的AFM可以实现对有机样品的改性和对Au/SiO<sub>2</sub>/Si体系的电荷存储。

### 4.1 扫描近场光学显微镜(SNOM)的原理<sup>[10,11]</sup>

科学界把探针与样品之间的距离小于几十纳米的范围称为近场,而大于这个距离的范围叫做远场。显然,STM、AFM等利用探针在样品表面扫描的方法均属于近场探测。

正如电子具有隧道效应一样,光子也有隧道效应。研究发现,物体受光波照射后,离开物体表面的光波分为两种成份:一部分光向远方传播,这是传统光学显微镜能接收的信息;而另一部分光波只能沿物体表面传播,一旦离开表面就很快衰减。这部分在近场传播的光波又叫隐失波。由于隐失波携带有研究样品表面非常有用的信息,科学家一直设想能对这种近场的光波加以研究利用。STM新颖的设计思想的出现,为近场光学的研究提供了思路,一种新型的科研仪器——近场光学显微镜诞生了。图3为扫描近场光学显微镜设计图。

### 4.2 扫描近场光学显微镜(SNOM)的应用

扫描近场光学显微镜是扫描探针显微技术与光学检测方法在纳米尺度上的结合,是扫描探针显微技术近年来的突出进展之一。由于不受传统的光学显微镜衍射极限的限制,SNOM的分辨率可达纳米级,在化学、生物、环境等领域中对样品作纳米分析。目前世界上已有一些SNOM的应用结果如:单一染料分子SNOM像、线性量子阱半导体结构的近场光学像及其光谱分析、近场区域(100nm)拉曼光谱在钻石表面上的测量等。此外,SNOM还能够用于近场高密度信息存储。

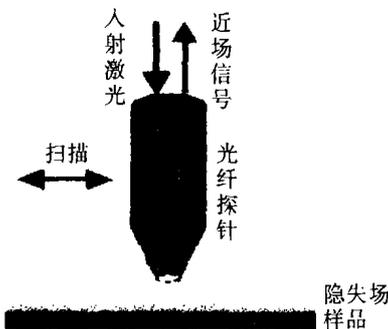


图3 扫描近场光学显微镜设计图

### 5.1 弹道电子发射显微镜(BEEM)的原理

当扫描隧道显微镜探针与样品之间的距离非常接近时,由于探针的电势高于样品,探针会向样品发射隧道电子。这些隧道电子进入样品到达界面时,虽然大部分电子的能量由于已经衰减而被界面的势垒反弹回来,但是仍有少数能量较高的电子能够穿透界面到达下层材料,这些穿透界面的电子称为弹道电子。由于弹道电子在穿透界面时携带了许多有关界面的信息,因此BEEM为界面的研究提供了有价值的信息。图4为弹道电子发射显微镜示意图。

### 5.2 弹道电子发射显微镜(BEEM)的应用

弹道电子发射显微镜是在扫描隧道显微镜基础上发展起来的一种

界面探测新技术,它能够同时对表面和界面进行直接、实时及无损探测并具有纳米级的空间分辨率。目前,人们已经研制出大气、惰性气体、超高真空以及低温等不同环境中运行的BEEM系统,并对Au/Si、Pd/Si、NiSi<sub>2</sub>、金属/GaAs及GaP等不同体系进行了广泛研究,获得了这些体系局域肖特基势垒高度及其在纳米尺度上的空间分布等特性;对Pt/SiO<sub>2</sub>/Si体系的局域电荷存储及InAs/GaAs异质结的能带偏移进行了探测。此外,还对Au/Si体系的界面改性进行了探索。总之,BEEM的应用主要有以下几个方面:1)探测金属/半导体界面的肖特基势垒高度及其空间分布,2)研究界面的能带结构,3)进行界面改性,4)研究低能电子在固体中的散射。这些工作对进一步发展和完善对界面性质的认识,研究电子在界面及固体中的输运性质具有重要意义。

STM及随后发展起来的SPM技术是在纳米尺度上研究物质的特性和相互作用的有力手段,能够获得用其它实验方法很难得到的结果,为纳米科技的诞生与发展起了根本性的推动作用。

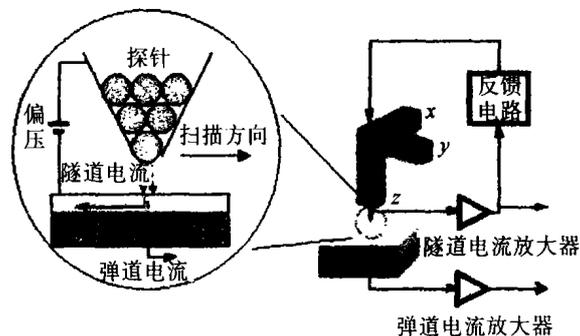


图4 弹道电子发射显微镜示意图

## 参 考 文 献

- 1 庞乾骏. 扫描隧道显微镜单原子操纵技术及其物理机理. 上海交通大学学报, 2001, **35**(02):157~167
- 2 詹捷, 冯晓娟, 唐志良等. 扫描隧道显微镜系统. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, **24**(03):137~141
- 3 郭省才. 金属表面化学反应的直接观察. 化学通报(印刷版), 1998, **61**(5):21~24
- 4 谢敬伟, 暴宁钟, 陆小华. 扫描探针显微技术在 TiO<sub>2</sub> 表面研究中的应用. 化学通报(印刷版), 2002, **65**(7):445~451
- 5 蔡继业, 曾耀英, 曾洁铭. 扫描探针显微术的应用(综述). 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2001, **22**(03):91~95
- 6 汪雷, 唐景昌, 王学森. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si 表面 Si 生长过程的扫描隧道显微镜研究. 物理学报, 2001, **50**(03):517~522
- 7 王学森, 唐景昌. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si 表面 Ge 生长过程的 STM 研究. 真空科学与技术学报, 2001, **21**(02):83~86
- 8 谢大纲, 袁哲俊. 纳米技术的最新发展. 制造技术与机床, 2000, **454**(5):5~8
- 9 李艳宁, 傅星, 胡小唐. 用扫描隧道显微技术实现原子识别的原理初探. 仪器仪表学报, 1998, **19**(4):373~376
- 10 刘秀梅, 王佳, 李达成. 扫描近场光学显微镜及其初步应用. 中国激光, 1999, **26**(9):793~796
- 11 吴世法, 简国树, 潘石. 纳米分辨近场光学显微成像技术现状. 中国图象图形学报, 2000, **5**(8):625~631

## Application of Scanning Probe Microscopy in Nano Technology

Wang Rui<sup>1,2</sup> Li Daohuo<sup>1,2</sup> Huang Yongpan<sup>1,2</sup> Luo Liming<sup>1</sup> Pu Tan<sup>1</sup>

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

2 Shandong Daohuo Nano Technology Academy, Jinan 250100)

**Abstract** Reviewed are the basic principles and application fields of probe-based imaging microscope, represented by scanning tunneling microscopes for the recent 20 years.

**Key words** nano science and technology; scanning tunneling microscope; scanning probe microscope; scanning near-field optical microscope

## 干涉型光纤陀螺技术及其应用进展

陈娅冰 赵尚弘 朱蕊蕨 刘玉昕 庄茂录

(空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077)

**提 要** 光纤陀螺仪已成为惯性导航系统中最重要新兴器件。本文对干涉型光纤陀螺的国内外进展、国内现有水平和技术状况进行了分析探讨。最后介绍了光纤陀螺仪的发展方向。

**关键词** 光纤陀螺; 刻度因子; 惯导系统

光纤陀螺仪是 20 世纪 70 年代后期发展起来的全固态陀螺仪, 与传统的机电陀螺仪和环型激光陀螺相比具有更大的优越性, 在未来的惯性导航和制导系统中占有取

代机电式陀螺仪和环型激光陀螺仪的趋势; 为了适应现代化战争对武器系统快速、机动、灵活性的需要, 光纤陀螺仪可以兼顾高精度与快速的环境适应性要求, 因此光纤陀螺仪将是 21 世纪前期军民两用

惯性技术市场的重要惯性元件<sup>[1]</sup>。

由于国内光纤性能和光学器件的性能和国外相比一直有较大的差距, 所以干涉型光纤陀螺的工程化还有待发展, 其中需要解决的两个技术<sup>[2]</sup>是进一步提高光纤陀螺