

扫描隧道显微镜

周小明 胡跃辉

1982年, Binning 和 Rohrer 研制成世界上第一台扫描隧道显微镜 STM(Scanning Tunneling Microscope), 是目前唯一具有原子级分辨率的实空间成像技术, 当这两位科学家用 STM 观察到高序石墨表面原子的图像时, 人们对微观世界的认识一下子从幻想和抽象的分析飞跃到对原子的直接观察和操纵. STM 和它的传统显微镜相比, 光学显微镜、扫描电子显微镜的分辨率不够, 而高分辨的透射电子显微镜虽然能够达到较高的分辨率, 可它的制样异常麻烦, 破坏了样品, 而且在测量过程中离不开真空环境. STM 因其可直接观察物体表面原子结构而不会对样品表面造成任何损伤, 被广泛地用于测定材料的物理、化学和生物性质, 并成为纳米加工的关键技术. 同时还能够通过其针尖与表面原子的相互作用, 对样品表面进行单个原子或多个原子的操纵, 成为近年来发展起来的一种技术——扫描探针显微术.

景德镇陶瓷学院基础部 江西 333001

术的进一步突破.

②能适应高能量通量的光学系统也有待进一步发展.

例如, 在连续激光推进方式中, 如果让 100MW 的激光束, 以 $3.2 \times 0.1 \text{ MW/cm}^2$ 的能量密度通过通透率达 99.98% 的透镜, 则仍有 20, 000W 的热能被透镜吸收, 这将产生很严重的热变形, 甚至熔化等问题. 对于地面站, 要建造直径更大的反射镜也不是一件容易的事.

③经费昂贵.

无论是自由电子激光器, 还是巨型光学系统, 都是极其昂贵的. NASA, 以及白沙靶场的高能激光系统实验设施, 都在寻找私人支持.

但是, 美国政府对 BMDO 的天基激光计划

1. 原理

根据量子力学原理, 粒子可以穿过比它能量更高的势垒如图 1 所示, 这种现象称为隧道效应, 它是由于粒子的波动性而引起的, 由量子力学可计算出穿过势垒的透射系数为:

$$T \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} e^{-\frac{2a}{\hbar} \sqrt{2m(V_0 - E)}}$$

由式中可见, T 与势垒宽度 a , 能量差 $(V_0 - E)$ 以及粒子的质量 m 有着很敏感的依赖关系, 随着势垒宽度 a 的增加, T 将指数衰减, 因此在一

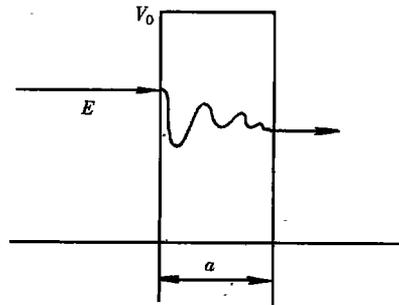


图1 量子力学中的隧道效应

(Space-Based Laser Program)投入却在最近大幅度增加, 1997年的经费为0.98亿美元, 1998年增至1.268亿美元. 这一计划的实施, 必将为激光推进积累更多的技术.

在提出用激光向轨道上的飞行器传送能量这一概念到现在的26年时间内, 美国和前苏联(后来的俄罗斯)无论是在基础理论研究, 还是实验研究、技术验证上, 均取得了很多研究成果. SDI计划强有力地推动这一设想变成现实. 随着激光技术与航天技术的迅猛发展, 人类将有可能全面解决这一设想面临的激光源、透镜等技术问题. 一旦解决这些问题, 其巨大的经济技术优势将有可能深刻地改变未来的航天面貌.

般的宏观实验中,很难观察到粒子隧穿势垒的现象.

扫描隧道显微镜的基本原理是将原子线度的极细探针和被研究物质的表面作为两个电极,当样品与针尖的距离非常接近时(通常小于1nm),在外加电场的作用下,电子会穿过两个电极之间的势垒流向另一电极,隧道电流 I 是电子波函数重叠的量度,与针尖和样品之间距离 S 和平均功函数 ϕ 有关:

$$I \propto V_0 \exp(-A\phi^2 S)$$

式中 V_0 是加在针尖和样品之间的偏置电压,平均功函数: $\phi = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2)$, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为针尖和样品的功函数, A 为常数,在真空条件下约等于1,隧道探针一般采用直径小于1mm的细金属丝,如钨丝、铂-铱丝等,被观测样品应具有一定的导电性才可以产生隧道电流,由上式可知,隧道电流强度对针尖和样品之间的距离有着指数的依赖关系,当距离减小0.1nm隧道电流即增加约一个数量级,因此,根据隧道电流的变化,我们可以得到样品表面微小的高低起伏变化的信息,如果同时对 x, y 方向进行扫描,就可以直接得到三维的样品表面形貌图. 常用的扫描模式主要有以下两种:

① 恒流模式,如2(a); x, y 方向起着扫描的作用,而 z 方向具有一套反馈系统,初始的隧道电流设为一恒定值,当样品表面凸起时,针尖就会向后退,以保持隧道电流的值不变;反之,当样品表面凹进时,反馈系统将使得针尖向前移动,计算机记录了针尖上下移动的轨迹,合成起来,就可给出样品表面的三维形

貌.

② 恒高模式:如图2(b), x, y 方向仍起着扫描的作用,而 z 方向则保持水平高度不变,由于隧道电流随距离有着明显的变化,只要记录电流变化的曲线,就可以给出高度的变化.

2. 针尖的制备

隧道针尖是STM技术中要解决的主要问题之一,针尖的大小、形状和化学同一性不仅影响着图像的分辨率和图像的形状,而且也影响着被测样品的电子态. 针尖的宏观结构使得针尖具有高的弯曲共振频率,从而减小了相位滞后,提高了采集速度. 如果针尖的最尖端只有一个稳定的原子而不是有多重针尖,那么隧道电流就会很稳定,而且能够获得原子级分辨率的图像. 针尖的化学纯度高,就不会涉及系列势垒. 例如,针尖表面若有氧化层,则其电阻可能会高于隧道间隙的阻值,从而导致在针尖和样品间产生隧道电流之前,二者就发生碰撞.

目前制备针尖的方法主要有电化学腐蚀法、机械成型法等. 在场发射显微术(FEM)中,有许多用于制备针尖样品的电化学腐蚀方法,这些方法中所用的溶液和条件等也常常可用于STM针尖的制备. 通过控制交流电压、波形、相角、频率和波数,能制备可重复的尖锐铂针尖. 离子研磨、场离子显微术(FIM)技术也被应用于单晶钨针尖的制备. 由于钨针尖能够满足STM仪器刚性的要求,因而被广泛地使用. 但由于钨针尖在水溶液中或暴露在空气中时,容易形成表面氧化物(通常是 WO_3),因此在真空中使用前,最好在超高真空

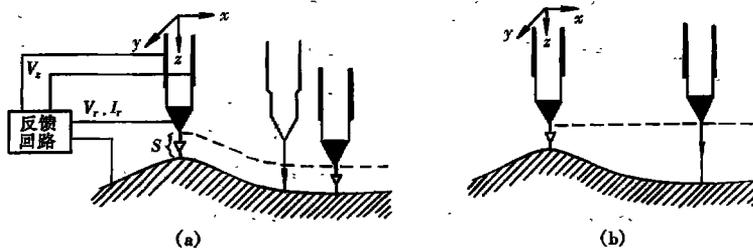


图2 扫描隧道显微镜的两种工作模式(a)恒流模式. (b)恒高模式.

系统中进行蒸发;在空气中使用前,通过退火或使用离子研磨技术中的溅射等方法除去针尖表面的氧化层。与钨相比,铂材料虽软,但不易被氧化,在铂中加入少量铱(例如铂铱的比例为80%:20%)形成的铂铱合金丝,除保留了不易被氧化的特性外,其刚性也得到了增强,故现在大部分人使用铂铱合金作为隧道针尖材料。

3. STM的减震

由于STM工作时的针尖与样品间距一般小于1nm,同时因隧道电流与隧道间距成指数关系,因此任何微小的振动,例如,由说话的声音和人的走动所引起的振动都会对仪器的稳定性产生影响。许多样品,特别是金属样品,在STM的恒电流扫描模式中,观察到的表面起伏通常为0.01nm,因此,好的仪器应具有良好的减震效果,一般由振动所引起的隧道间距变化必须小于0.001nm。

有两种类型的扰动必须隔绝:振动和冲击。振动一般是重复性的和连续性的,而冲击则定义为当动能在一个短时间内传递到系统时的瞬态变化。二者当中,振动隔绝是最主要的。建筑物一般在10到100Hz频率之间摆动,当在实验室附近扫描隧道显微术及其应用的机器工作时,可能激发这些振动。通风管道、变压器和马达所引起的振动在6到65Hz之间,房屋骨架、墙壁和地板一般在15到25Hz易产生与剪切和弯曲有关的振动。实验室工作人员所产生的振动(如在地板上的行走)频率在1到3Hz范围。因此,STM减震系统的设计应主要考虑

1到100Hz之间的振动。隔绝振动的方法主要靠提高仪器的固有振动频率和使用振动阻尼系统。目前实验室常用的减震系统采用合成橡胶缓冲垫、弹簧悬挂以及磁性涡流阻尼等三种综合减震措施来达到减震的目的。

4. 控制与图像处理软件

以Nanoview-1型扫描隧道显微镜为例,本装置由具有减振系统的STM头部、电子学控制系统和包括A/D多功能卡的计算机组成,如图3框图。探针X,Y,Z三个方向的运动都是由压电陶瓷控制,其压电系数优于5nm/v,其中X,Y方向起着扫描的作用,而Z方向具有一套反馈系统,其精度很高,以保证仪器在Z方向上的高分辨率。实验首先由计算机控制步进电机驱动,使探针逼近样品,进入隧道区,其后的扫描和数据采集都由计算机中的D/A多功能卡来完成。

由于反馈系统是一种高增益电路,隧道电流又在纳安的数量级,很容易受到外界的干扰,因此,对系统要进行很好的屏蔽。此外,由于探针对外界的振动很敏感,因此,对整个STM的头部要做严格的减振。

控制软件采用Windows95为操作界面,具有使用方便的菜单和工具箱,图像的存储可以采用多种格式,最大分辨率可达512×512,图像工具可对原始图像进行平滑、卷积滤波、快速Fourier变换等处理,并提供了数据统计、顶视图、线三维和面三维变换等功能。支持实时扫描与离线分析两种工作方式。

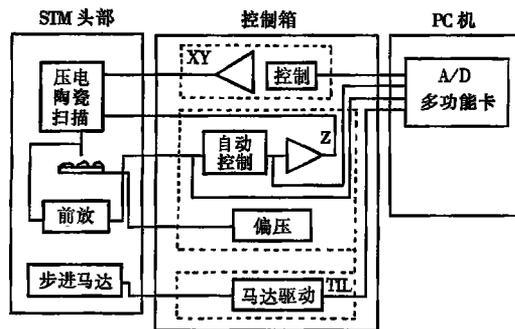


图3 扫描隧道显微镜的电子学框图