

# 解读量子围栏

司徒平



现行《高中物理(必修加选修)》第三册(人民教育出版社,2003年6月

第1版)第40页第二十一章《量子论初步》的章首图片(如图1所示)是利用扫描隧道显微镜(STM)拍摄的“量子围栏(quantum corral)”照片。本文就先来介绍扫描隧道显微镜的诞生过程和工作原理,进而解读“量子围栏”。

## 一、扫描隧道显微镜的诞生过程

自有人类文明以来,人们就一直为探索微观世界的奥秘而不懈努力。1674年,荷兰人列文虎克(A. Van. Leeuwenhoek)发明了世界上第一台显微镜,首次观察到血细胞,从而开始了利用仪器研究微观世界的新纪元,开阔了人类的观察视野,但是由于受到光波波长的限制,其观察范围只能局限在细胞水平上,分辨率大约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 米,人类能否看得更小、更精确一些呢?为了达到这个目的,经过几个世纪的不懈努力,1931年,德国科学家鲁斯卡(E. Ruska)利用电子透镜可以使电子束聚集的原理,发明了电子显微镜,分辨率达到了 $10^{-8}$ 米。在电子显微镜下,比细胞小得多的病毒也露出了原形。但是,相对于纳米尺度,所有这些显微镜的分辨率都还不高,人们盼望着在微观世界的探索中再迈出新的一步。

正像绝大多数科学家的新发现和新发明一样,当20世纪70年代末物理学家宾宁(G. Binnig)和他的导师罗赫尔(H. Rohrer)在美国国际商用机器公司(IBM)设在瑞士苏黎世的实验室进行超导实验时,并没有把自己有关“超导隧道效应”的研究与新型显微镜的发明联系在一起。但是,这个实验却为他们今后发明扫描隧道显微镜奠定了基础。一次偶然的机会,这两位科学家读到了物理学家罗伯特·杨(R. Young)撰写的一篇有关“形貌仪”的文章,这篇文章中提到的用驱动探针在样品表面扫描的方法使他们突发奇想:难道不能利用导体的隧道效应来探测物体表面并得到其表面的形貌吗?以后的事实证明,这是一个绝妙的主意。经过师生二人的共同努力,1981年,世界上第一台具有原子分辨率的扫描

隧道显微镜终于诞生了。

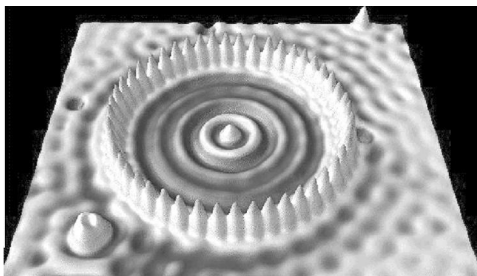


图1

扫描隧道显微镜的英文名称是 Scanning Tunneling Microscope, 简称为 STM。STM 具有惊人的分辨本领,水平分辨率小于0.1纳米、垂直分辨率小于0.001纳米。1982年,宾宁发表的Si(111)  $7 \times 7$ 表面的原子分布图像是人类首次看到的原子分布图(如图2所示),从而揭开了原子尺度微观世界的神秘面纱。导电物质表面结构的原子、分子状态在STM下清晰可见,因而成为研究表面物理和其他实验研究的重要显微工具,被国际科学界公认为80年代世界十大科技成果之一。由于这一卓越贡献,宾宁和罗赫尔以及电子显微镜的发明者鲁斯卡分享了1986年度的诺贝尔物理奖。

1988年初,中国科学院院士白春礼教授也成功研制出中国第一台STM,使我国在表面研究领域一步跨入了“原子世界”。1988年底,白春礼领导的科研小组又研制出我国第一台原子力显微镜(AFM),其性能

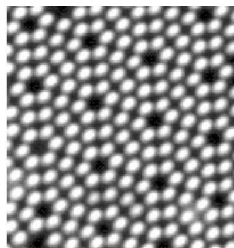


图2

一下子就达到了原子级分辨率,当时世界上只有少数国家研制的AFM能达到原子级分辨率。白春礼小组因此获得1990年度中科院科技进步一等奖。1992年白春礼等人再接再厉,又成功研制出激光力显微镜(LFM)。1993年初,白春礼和超导专家赵忠贤教授合作推出我国第一台低温STM,对于研究材料在低温下的表面特性具有重要意义。这些新型系列显微仪器的研制成功,代表了我国在这一高新技术领域的研究水平,为我国的扫描隧道显微学的发展奠定了必要的物质基础。

## 二、扫描隧道显微镜的工作原理

经典物理学认为,当两个导体之间有一个绝缘体时,如果在这两个导体之间加一定的电压,一般是不会形成电流的。这是因为,虽然两个导体间有电压,各有一定的电势,但其间的绝缘体阻碍电子从高电势向低电势运动,导体中的自由电子不能穿过绝缘体运动到另一个导体,也就不能形成电流,即两个导体间存在势垒。只有电压增大到能把绝缘层击穿,也就是势垒被击穿时,电子才会通过绝缘体。

量子力学认为,微观粒子在空间的运动是按一定的几率密度分布的。根据量子力学的计算,如果势垒厚度小到只有几十纳米( $1\text{ 纳米} = 10^{-10}\text{ 米}$ )时,电子可能穿过势垒,即从势垒的这一边到达势垒的另一边,形成电流。也就是说,在势垒相当窄的情况下,这一侧的电子可能在势垒上打通一条道路,穿过势垒到达势垒的另一侧。电子在势垒相当窄的情况下穿过势垒的现象,在量子力学中叫做隧道效应,这样形成的电流叫做隧道电流。根据量子力学原理,由于电子的隧道效应,金属中的电子并不完全局限于金属表面,电子云密度并不是在表面边界处突变为零。金属表面以外的电子云密度呈指数衰减,衰减长度约为1纳米。用一个极细的、只有原子线度的金属针尖作为探针,将它与样品的表面作为两个电极,当样品表面与针尖非常近(距离小于1纳米)时,两者的电子云将略有重叠。若在两极间加上电压,电子会在电场作用下穿过两个电极之间的势垒,通过电子云的狭窄通道从一极流向另一极,形成隧道电流。隧道电流的大小与针尖和样品间的距离以及样品表面平均势垒的高度有关。隧道电流对针尖与样品表面之间的距离极为敏感,距离每减小0.1纳米,隧道电流就会增加一个数量级。

STM有两种工作方式。一种称为恒高度模式,即在对样品进行扫描的过程中保持针尖的绝对高度不变。当针尖与样品表面的局域距离发生变化时,隧道电流的大小也随之发生变化;通过计算机记录隧道电流的变化并转换成图像信号,屏幕上就会显示出样品的表面形貌。另一种称为恒电流模式,即利用电子反馈线路保持隧道电流恒定,再通过计算机系统控制针尖在样品表面作二维运动。由于要维持隧道电流不变,针尖与样品表面之间的局域高度也会保持不变,因而针尖就会随着样品表面的高低起伏而作相同的起伏运动。通过计算机记录下针尖

高低运动的轨迹,就可得到样品表面的三维立体信息。这样获取的图像信息全面、显微图像质量高,因而应用广泛。

从STM的工作原理可以看出,其工作过程是利用探针针尖扫描样品表面,通过隧道电流获取信息,经计算机处理得到显微图像,而不需要光源和透镜。这正是“扫描隧道显微镜”的得名原因。

早在1959年,著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费恩曼(R. Feynman)就曾预言:“物理学的规律不排除一个原子、一个原子地制造物品的可能性。”“化学将变成根据人们的意愿逐个地准确放置原子的问题。”1981年诞生的STM为人们搬迁原子和分子“改造世界”提供了物质基础。

## 三、原子搬迁——量子围栏

用STM不仅可以观察到原子和分子,帮助人们“认识世界”,还可以操纵单个原子和分子的排列,进而有效地“改造世界”。在探针针尖上加很微弱的电流,就会产生一个电场,当两个物体非常接近(距离为几十纳米)的时候会互相吸引,这时把针尖提起,针尖就能够从样品表面吸起一个孤立原子移到别处,然后撤去电场,把原子“栽”到新的位置上,就能实现原子和分子的搬迁。

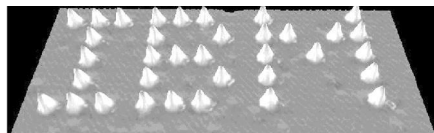


图3

1990年,美国IBM公司位于加州研究中心的研究员伊格(D. M. Eigler)等人在超低温( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和超真空环境下,用STM将镍表面吸附的氙(Xe)原子逐一搬迁,最终以35个Xe原子排成该公司的字母商标“IBM”,每个字母高5纳米,Xe原子间最短距离约为1纳米(如图3所示),这是人类有目的、有规律地移动和排布单个原子的开始,从而实现了费恩曼1959年的预言。1990年4月,英国《自然》杂志344卷524~526页曾报道过该成果。紧接着,他们又成功地移动48个铁(Fe)原子排列组成了两个汉字——“原子”(如图4所示)。以后他们又实现了一氧化碳(CO)分子的搬迁排列,在铂单晶的表面上,将吸附的CO分子用STM搬迁排列,组成一个身高5纳米的世界上最小的人形图样。构成该图样的CO分子间距离仅为0.5纳米,人们称之为“一氧化碳小人”(如图5所示)。

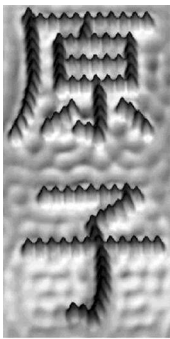


图 4

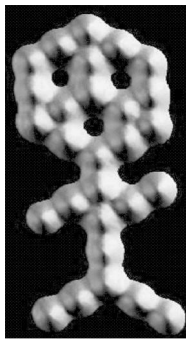


图 5

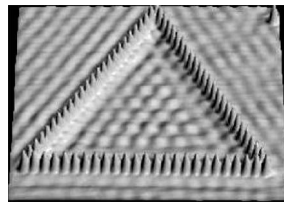


图 6

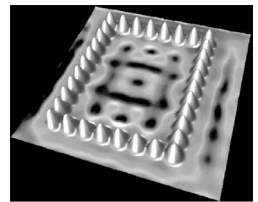


图 7

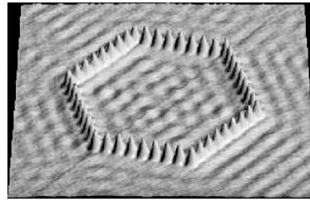


图 8

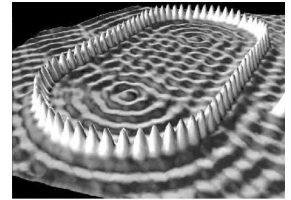


图 9

1993年5月, IBM的科学家克罗米(M. F. Crommie)等在4K的温度下用电子束将单层的Fe原子蒸发到Cu(111)表面,然后用STM针尖将48个Fe原子排列成直径为14.3纳米的圆形围栏(如图1所示)。围栏由分立的Fe原子(间距0.95纳米)组成却不连续,从而形成一个势阱围住栏内处于Cu(111)表面的电子,故称为“量子围栏”。根据Fe原子对表面电子的强散射作用,克罗米等最初设想用Fe原子做成对表面电子的量子化“禁锢”结构,将电子围起来。做此“量子围栏”的目的是捕获或将一些电子限制在圆形结构中,迫使这些电子进入“量子”态。这个实验为科学家提供了研究微观体系量子现象的微小实验室。虽然Fe原子并非密集排列,但却同一个连续围栏差不多,很少有电子能穿过围栏“逃”出去。围栏内的电子波如传播到围栏处,就会因Fe原子的强烈散射而被挡回去,从而在栏内形成同心圆状的驻波,导致围栏内形成一系列分立的、同心圆状的局域态密度起伏。因为隧道电流的大小不仅与隧道间隙有关,而且还与样品表面的电子局域态密度有关,因此样品表面的电子云状态也直接影响测量结果。图1中的波纹就是体现局域态密度起伏的电子波的驻波,它的大小及图形与量子力学的预言非常符合,这是世界上首次用实验方法形象地显示势阱内电子波的驻波的直观形态。描绘量子围栏中的同心圆形驻波,其实也可以借用苏轼的“无波真古井,有节是秋筠”。

图1为圆形量子围栏,后来科学家利用STM在Cu(111)板上又成功地搬迁Fe原子分别围成了三角形量子围栏(如图6所示)、四边形量子围栏(如图7所示)、正六边形量子围栏(如图8所示)和体育场形量子围栏(如图9所示)。

中国科学院北京真空物理实验室的研究人员于1993年底~1994年初,以STM为手段,在Si(111)

$7 \times 7$  重构表面上开展了原子操纵的研究,取得了世界水平的成果。他们在室温下,把硅晶体表面的原子拨出,从而在表面上形成一定规则的图形,如“中国”等字样,其沟槽的平均线宽为2纳米。当时,这是室温下在Si(111)  $7 \times 7$  表面“写”出的最小汉字(如图10所示)。图10中凹陷的地方是原子拨出后显示的深黑色沟槽,凸起的白色亮点是散落的原子。

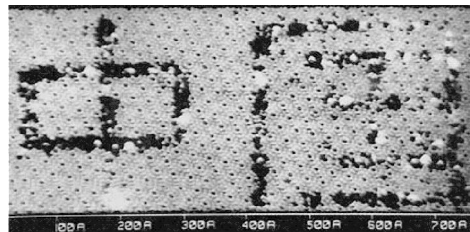


图 10

STM领域天生就是交叉科学,深深植根于量子力学、固体物理、物理化学、电子物理、机械工程和控制论之中。因此,尽管STM问世时间不长,但经过各国科学家的努力,这一技术已得到迅速发展,在许多方面显示出其独特的优势,相信随着理论与技术的日臻完善,STM及其相关技术必将在人类认识微观世界的进程中发挥越来越大的作用。

(河南郑州外国语学校高中部物理组 450001)

