

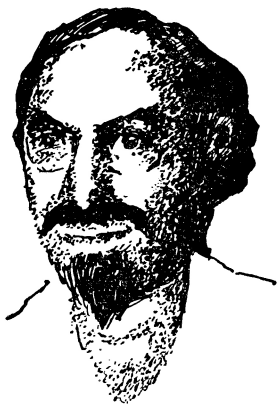
# 扫描隧道显微镜

——介绍获得 1986 年诺贝尔  
物理学奖的发明

先 鼎 昌

对微观世界的探索，是多少个世纪以来人类梦寐以求的事业！自从荷兰人雷文虎克（A. Van Leeuwenhoek）在 1671 年用透镜制造出第一台光学显微镜之后，科学史上第一次出现了称为显微术的学科。

光学显微镜使用的是可见光，波长是 4000 埃到 8000 埃（一埃等于万分之一微米）。由于对于一个显微镜来说，它能够分辨的线度与所用的波长成正比，这就确定了光学显微镜只能分辨到微生物和细胞的程度。如果想观察更小的物体，譬如说原子，就必须使用波长与原子的线度差不多的光。一个原子的典型线度是 3 埃，这就是说，必须使用波长短于 3 埃的光才有可能“看”到原子。我在这里给看字打上引号，因为



罗雷尔

这种光是 X 光，实际上不是我们的眼睛所能看到的。

1912 年，德国物理学家劳厄（M. Laue）发现了 X 光在物质上的衍射现象，第二年便被英国的布喇格（L. Bragg）用来研究固体的微观结构。不过，用这种方法得到的不是原子或分子的图象，而是 X 光的衍射花纹，它反映着固体中的原子的空间分布情况。直到今天，这个方法



宾尼格

还被广泛地应用来作从矿物到蛋白质、从聚合物到

核酸等有着一定内部结构对称性的物质的研究。

1925 年法国物理学家德布洛意提出一切物质都具有波动性的理论，这个理论在 1927 年两个美国科学家戴维逊（C. Davidsson）及玖默（L. Germer）的发现——电子在晶体上有衍射花纹——中得到证实。按照德布洛意的理论，物质的波长和它的动量反比，动量越大，它的波长就越短。应用这个发现，德国的科学家卢斯卡（E. Ruska）和克诺尔（M. Knoll）在 1932 年制造出世界上第一台电子显微镜，它的原理与光学显微镜相仿，只不过用电子代替了光，用通电流的线圈做成的电磁透镜代替了光学透镜。动能为 100 电子伏特的电子的波长是 1.2 埃，这样，电子显微镜是研究物质的微观结构的很有力的工具，特别是缺乏对称性的物质结构的研究。

近年来，对物质表面结构的研究发展得十分迅速。这门学科的发展，要求有一种能够拍摄物质的表面，精细到原子的线度的显微术。以往的方法都达不到这个目的，因为 X 光和具有大动量的电子都很容易进入物质内部，这样给出的只是物质的内部结构，而不是表面的结构图象。即使有这样一种探测表面的方法，要建造一台给出表面全貌的显微镜，还需要极高的机械精度：它不但能够分辨一、两埃线度里的表面形貌，而且还能对相当大的表面范围进行扫描，这是对当代技术科学最高精度的挑战。



鲁斯卡

1978 年，瑞士苏黎世国际商用公司实验室的科学家罗雷尔（H. Rohrer）和一个年青的德国研究生宾尼格（G. Binnig）接受了这个挑战，并且在两、三年内成功地造出最终导致他们获得 1986 年诺贝尔物理学奖金的一半的扫描隧道显微镜（奖金的另一半授与发明电子显微镜的卢斯卡）。这个发明，是从罗雷尔和宾尼格的一次谈话开始

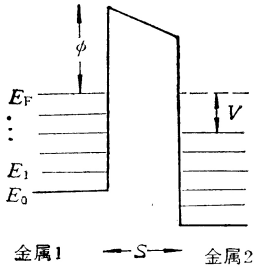


图1 被一块厚度为  $S$  隔开的两块金属中的电子能级,  $V$  是加在这两块金属上的电压

家伽莫夫 (G. Gamov) 提出来的理论。为了说明这个效应, 让我们来看被一片厚度为  $s$  的绝缘物(例如真空)隔开的两片金属里面的电子(图1), 两片金属上加

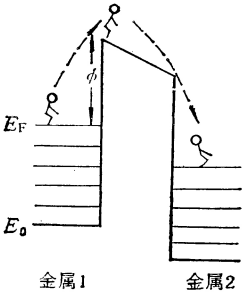


图2 在经典物理中, 在金属1中处在  $E_F$  能级的电子要先得到能量, 爬过位势  $\phi$ , 然后才到达金属2

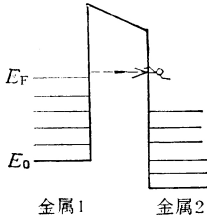


图3 隧道效应使金属1的电子有机会跑到金属2中去

有一个电压  $V$ . 在金属里, 电子的能级是  $E_0, E_1, E_2, \dots, E_F$ . 绝缘物相当于一个位势  $\phi$ . 按照普通的电磁学, 一个在金属1里处在能级  $E_F$  上的电子, 至少要获得能量  $\phi$ , 才能跑到金属2中去(图2), 但是按照量子力学, 它无须获得任何能量, 便有一定的几率离开金属1跑到金属2里去, 就象经过一条隧道从位势的山底下钻过去似的(图3), 这就是隧道效应. 由于隧道效应, 在两片金属之间便形成隧道电流, 它有一个非常独特的性质: 对于一定的电压, 隧道电流随着距离  $S$  的增加指数地减小. 很容易便可以

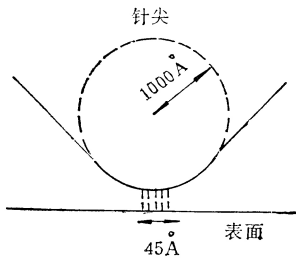


图4 放大的机械加工的针尖和隧道电流的范围

的, 当时宾尼格还是法兰克福市哥德大学的一名研究生. 罗雷尔介绍了要在苏黎世开展的表面物理研究计划, 在讨论中宾尼格提出, 隧道效应是研究表面现象的合适的方法. 这年的年底, 罗雷尔把宾尼格请到苏黎世, 开始了扫描隧道显微镜的研制.

隧道效应是一种量子力学的效应, 它是在1928年由苏联物理学家伽莫夫 (G. Gamov) 提出来的理论.

算出, 当距离改变一个原子的线度时, 隧道电流改变一千倍, 由于这个性质, 隧道电流的电子, 来自最顶层的表面原子.

宾尼格建议用来制造显微镜的, 正是这个电流, 但是要做到对金属表面形貌的测量, 要求这个电流不但在垂直距离上有高的分辨率, 而且对水平距离也有不差于原子线度的分辨率, 正如我们测绘一座山的形貌, 我们必须能够在不同的水平位置上测量它的高度一样.

可以设想用一根尖锐的探针和金属样品之间的电流, 来探测样品表面的形貌. 不过机械制作的针头, 放大起来看, 其尖锐的程度远不能达到原子的线度. 一个十分尖锐的针头的曲率半径大约是1000埃, 这相当于几百个原子排成一列的线度(图4). 不过宾尼格的计算表明, 即使如此, 隧道电流在水平方向的分辨距离仍可以达到45埃.

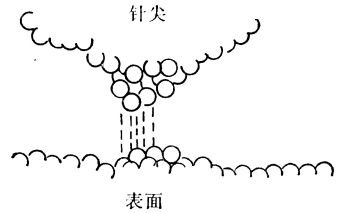


图5 经过特殊处理的针尖, 在端部的突起有着原子的线度

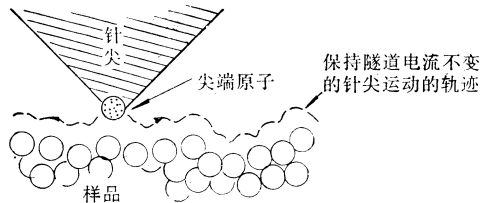


图6 扫描电子显微镜的工作原理

这真是令人鼓舞的关键性的一步. 下一步是怎样把探针头磨得更尖. 当然, 这不能用机械的方法达到, 然而在实验室中, 却有着制造更尖的探针头的技术. 一种方法是所谓“场蒸发”技术: 把针尖加热到表面呈液态, 加上强电场, 使原子开始蒸发离开表面, 这时撤去电场并降温, 那些来不及离开表面的原子使针尖的尖锐程度达到原子的线度(图5). 在理想的情况下, 尖端只有一个原子, 这时可以达到很高的水平分辨率.

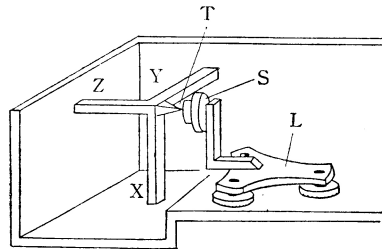


图7 扫描电子显微镜的心脏部件: 探针三角支架和驱动头

这样，一个制造扫描隧道电子显微镜的方案便形成了：既然隧道电流对距离是如此灵敏，如果我们移动针尖与样品的距离，使隧道电流保持恒定，通过针尖的水平扫描便给出整个金属表面的形貌（图6）。下一步要解决的关键是移动距离的精度要做到远小于1埃。

在精密机械制造中，有一种常用的材料，叫做压电晶体，在它的两端加以电压时，它的长度便会发生微小的变化，而且这个变化对电压十分灵敏，0.1伏的电压可以造成1埃的长度变化，正是这种压电晶体被用来驱动探针在垂直方向和水平方向的三维的扫描。

宾尼格和罗雷尔制造的扫描隧道显微镜的心脏部份，由探针支架和驱动头构成（图7）。被探测的样品S装在驱动头上，驱动头的作用是使探针与样品定位。驱动头的运动部件是一片压电晶体L，安装在三只金属支脚上。整个驱动头安放在一个平台的一块金属平板上，支脚与平板之间有绝缘的薄层，在支脚与金属平板之间加上电压，可以把它们固定住。要使驱动头移动，可以先固定一只支脚，再加上电压，这时压电晶体L收缩，其它两只支脚便会移动，然后固定其它两只支脚，放开第一支脚，撤去电压，晶体L便恢复原状，相应地第一支脚发生移动，整个驱动头完成一步移动。用这种方法可以使驱动头在平台上沿任何一个水平方向运动，运动的步长可以在100埃到1000埃之间变化。

当样品由驱动台送到定位位置之后，探针T对样品表面的扫描便由三根压电晶体X、Y、Z组成的三脚架进行。三脚架的每条腿都可以通过加电压的方法使它缩短或伸长，其结果是使得三脚架端顶的探针在空间按一定的轨道运动。如果我们使隧道电流保持恒定，那么沿一个水平方向探针的扫描轨迹正好就是这个方向上样品表面的形貌，在两维的水平方向的扫描之后，经过计算机图象处理，便给出样品的表面形貌图象。

最后还有一个关键的问题要解决，就是要把外来的扰动限制在测量的精度之下。声波振动和热变化可以用抽真空的办法来消除，但是通过地板传来的周围环境的振动总是存在的。为了说明限制这种振动的困难，只需指出，目前土建做得最好的一级防震地基，只能把震幅限制到1微米- $10^4$ 埃！曾经尝试过不同的减振装置，最简单的方法，是用弹簧进行逐级的减振，结果证明，两级的减震便可以达到所要求的减振精度。

经过这一系列在理论上、实验技术上和机械工艺上的突破，目前扫描隧道电子显微镜最好的垂直分辨率可以达到万分之一埃，水平分辨率达到2埃以下。可以说，扫描隧道显微镜的发明，是理论-实验技术-机械工艺三结合的范例，而这种结合，是使现代实验科学有所突破所必不可少的。

由于扫描隧道显微镜的出现，使得直接得到表面的结构图象成为可能。图8是用它拍得的硅晶体的表

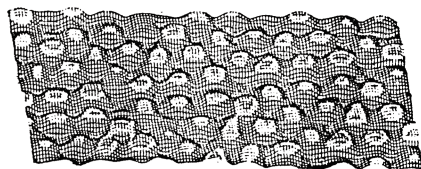


图8 用扫描隧道显微镜拍得的硅晶体的表面形貌图

面。扫描隧道电子显微镜为表面物理、化学作用、材料科学、原子物理和生物科学等开辟了一个十分广泛的领域，这个发明得到诺贝尔物理学奖，实在是当之无愧的。