

表面物理与表面物理国家重点实验室

郭建东 沈电洪

日常生活中人们无时无刻不在与表面打交道，人类对物质的认识也总是从表面开始才能够逐渐深入的。我们生活在地球表面，在板块运动以及空气和水的侵蚀作用下，地表形成复杂的山川河流，由此我们欣赏到迷人的自然风光。在较小的尺度下，各种植物的枝叶、果实表面在应力作用下呈现不同的形状，为我们识别、利用丰富的自然资源提供了特征依据。人们甚至通过对材料表面进行修饰，从而实现对其功能的设计和调控，比如在钢铁表面电镀惰性金属，可以大大提高钢铁结构的抗腐蚀能力和美观性；而通过对镜头表面镀膜厚度的控制，能够实现滤光或增透的目的。在肉眼不能直接观察的微观尺度上，表面上发生的众多物理、化学现象和过程，也在我们的生产生活中扮演着重要的角色，比如金属纳米颗粒对一些重要化学反应的催化作用，半导体界面对电子传输的调制作用等。正是表面科学帮助人们理解这些行为产生的微观机理，并帮助人们探索控制、优化材料相应功能的方法，从而推动人类文明社会的发展。特别地，人们对表面、界面现象研究的尺度越小，理解得越细致，发展对相应性质的调控方法就越有效，其宏观应用产生的意义也越重大。当今的表面物理在原子、分子尺度上研究各种物相表面与界面上的物理、化学过程及其动力学原理，广泛交叉物理、化学、生物等学科，作为联接微观物质世界与宏观功能利用的重要桥梁，已经成为信息、能源等关键产业发展的原动力。

表面物理是一门从 20 世纪 60 年代末期蓬勃兴起的综合性边缘学科。严格来说，我们日常生活中所接触到的“表面”是材料与大气环境的界面，而表面物理通常研究的表面，只有在超高真空条件下才能够获得和保存（超高真空是指体系内的压强小于 10^{-10} Torr， $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$ ）。因此表面物理的发展与超高真空技术的进步密切相关，正是超高真空技术的成功应用，我们才能够制备出表面物理的研究对象——真正的清洁表面。我们可以在超高真空中对三维体材料进行解理，借助机械力打破晶格网络结构，使之显露出“表面”。我们也可

以利用去除材料表面无定形吸附物的方法制备清洁表面，比如在超高真空中高温退火，使不太稳定的污染物脱离表面并且被真空泵抽走，留下更加稳定的清洁表面；或者利用惰性气体离子溅射的方法，将动能传递给表面层的原子或分子，使之脱附。实验中我们往往采用先溅射再退火的方法，可以制备出清洁的单晶表面。在物理研究中，样品的制备是基础，而获得清洁表面正是表面物理研究的重要环节，它使得人们对表面物理现象、过程等的观测及其进一步深入的研究成为可能。

更加直接、灵活的方法是在超高真空中生长材料从而获得清洁表面，这方面最常用的方法是分子束外延（MBE）生长技术（图 1）。MBE 就是在超

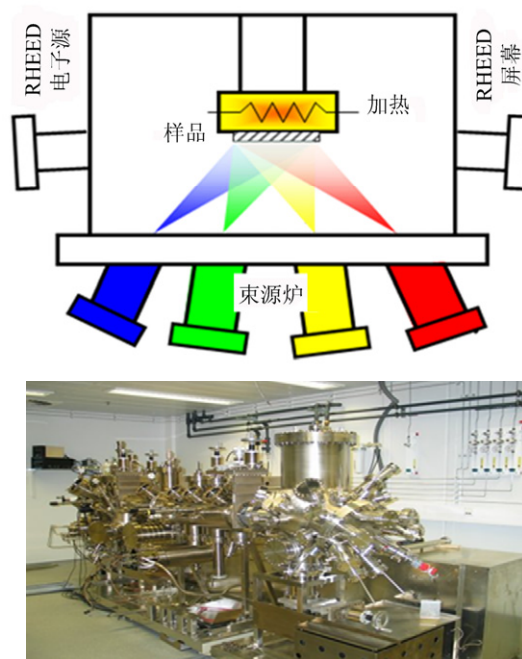


图 1 分子束外延生长的示意图（上）和设备照片（下）

高真空条件下，由装有各种所需组分的炉子（束源炉）加热而产生的蒸气，经小孔准直后形成分子束或原子束，直接喷射到适当温度的单晶衬底材料表面，使蒸发的分子或原子按晶体结构排列一层层地形成薄膜。由于束源炉和衬底表面温度不同，因此在生长界面上，生长物原子或分子是过饱和的，从

气相直接并入晶态的固相。这是一个动力学过程，所以 MBE 还可以生长在一般热平衡条件下难以获得的薄膜材料。另外在分子束外延装置中，还附有用以监测表面生长模式和薄膜结构、成分，以及束源蒸发速率的仪器，通过对束源炉温度的精确控制，实现高质量薄膜的生长。这一划时代的生长技术是 20 世纪 60 年代末，由美国贝尔实验室的卓以和 (Alfred Y. Cho) 和亚瑟 (J. R. Arthur) 发展并完成样机的。它不仅是表面物理兴起和发展的重要基石，也为人工设计并精确制备材料结构，进而得到可控功能的探索开拓了广阔的天地。被誉为 MBE 之父的卓以和因此获得了 2005 年度美国国家技术奖章。

精密电子测量技术的不断完善也对表面物理的发展产生了深远的影响，这是由于相对于体材料来说，表面层的原子数少，实际测量中发出的信号响应非常微弱。所以直到 1962 年锁相放大器问世，人们能够准确地测量到淹没在背景噪声中的微弱信号，对表面性质的实验研究才成为可能。比如俄歇电子能谱技术 (图 2)，它利用高能电子激发材料原

了俄歇效应的无辐射跃迁机制。但是直到 1968 年，人们才利用锁相放大器研制出真正的俄歇电子能谱仪。表面物理研究中广泛使用的各种电子能谱技术都依赖于精密的电子学分析与探测。20 世纪 50 年代，瑞典物理学家凯·西格班 (Kai M. Siegbahn) 设计了双聚焦磁式能谱仪，并用来研究 X 射线从原子内层能级上激发出来光电子的能量分布。通过和同事们一起不断对谱仪进行改进，他们精确测定了周期表中各种元素原子内层电子的结合能，还从理论上阐明了结合能位置与元素价态、化学环境的联系，从而为鉴别化学态和化学结构建立了完整的方法 (有兴趣的读者可以参阅徐亚伯著，《表面物理导论》，浙江大学出版社 (1992))。利用这种方法不仅可以研究样品表面有哪些原子，而且可以了解这些原子存在于何种化学环境中。由于在高分辨率测量仪器的发展以及光电子和轻元素定量分析方面的贡献，他与阿瑟·肖洛 (Arthur L. Schawlow) 和尼古拉斯·布洛姆伯根 (Nicolaas Bloembergen) 分享了 1981 年度的诺贝尔物理学奖。此后，基于这种光电电子能谱仪的其他表面能谱分析方法，如各种离子谱仪、表面电子能量损失谱仪、真空紫外光电子谱仪等都得到了快速发展，不仅为表面物理研究物理、化学性质和过程机制提供了有力的工具，也反过来推动了各种精密电子学技术的发展。

与凝聚态物理学其他分支的研究一样，要了解物质的表面特性及其起源首先要确定它的表面原子构造。因此谈到表面物理的发展还必须提及美国宾夕法尼亚州立大学的德裔科学家缪勒 (Erwin Wilhelm Müller) 于 1936 年发明的场离子电子显微镜 (Field Emission Electron Microscope, FEEM)，它可以用来研究制成针尖状材料表面的原子结构和电子性质。获得更广泛应用的表面原子结构分析技术是 1927 年美国科学家克林顿·戴维孙 (C. J. Davisson) 和革末 (L. H. Germer) 发展的低能电子衍射技术 (LEED)，它也是在 20 世纪 70 年代以后得益于超高真空技术的进步，能够在实验及其分析中精确处理多重散射带来的复杂性之后，才真正完善成为解析表面构造的技术的。

但是，低能电子衍射图样并不是表面原子晶格的直观图像，必须在二维模型基础上，借助衍射的运动学理论才能解析出实空间的结构信息。因此在最经典的 Si(111) 表面，尽管人们使用 LEED 发现了

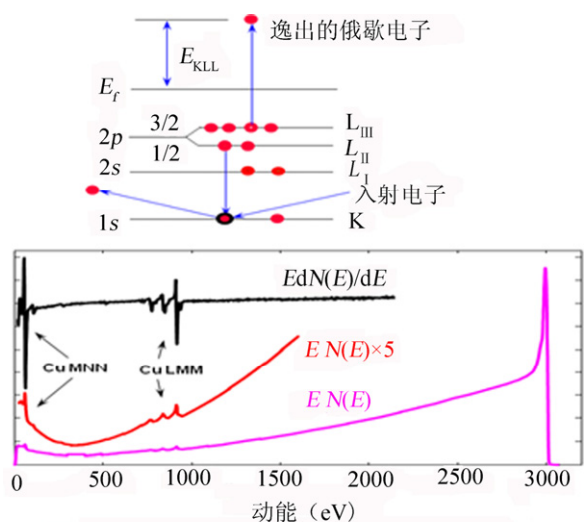


图 2 俄歇过程示意图 (上) 和 Cu 的俄歇电子能谱

子的内层电子逸出表面，高能级电子向下跃迁填充内层空穴时释放的能量不是产生光子，而是激发另一能级上的电子逸出。通过精确测量最终逸出电子的动能，就能够表征出原子内层电子的能级位置，从而获得元素种类的信息。奥地利科学家丽丝·迈特纳 (Lise Meitner) 在 1920 年首先观察到俄歇过程，1925 年法国物理学家皮埃尔·俄歇 (Pierre Victor Auger) 通过威尔逊 (Wilson) 云室实验阐明

(7×7)重构(即表面原子结构的最小周期性单元相对于三维体材料中的对应原子层,在两个高对称方向分别扩大了7倍),但是用衍射及其运动学理论分析如此复杂结构的真实模型,还是带给人们很多疑虑。直到1982年,IBM公司瑞士苏黎士实验室的德裔物理学家杰德·宾尼(Gerd Binnig)博士和他的导师亨利克·罗雷尔(Heinrich Rohrer)博士(图3)

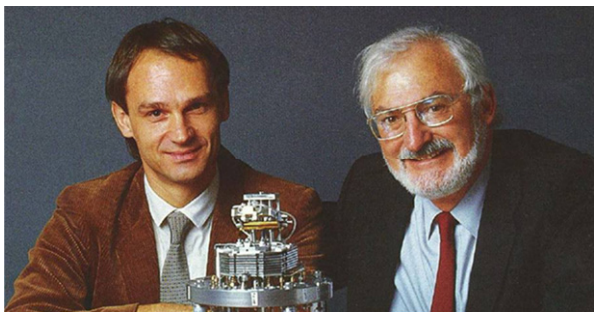


图3 宾尼(左)和罗雷尔(右)

发明了扫描隧道显微镜(STM),并于次年报告了他们在实空间观察到Si(111)-(7×7)表面原子级分辨率的重构图像,人们对这种复杂表面重构现象中的原子排列情况才终于建立起了较为准确的模型。1986年宾尼和罗雷尔以及发明电子显微镜的德国人欧内斯特·鲁斯卡(Ernst Ruska)分享了诺贝尔物理学奖,这进一步激发了全世界科学家们对这种新研究方法的热情,争相研制各种扫描探针显微镜并开发其在各个领域的应用。由于扫描探针显微镜的针尖与样品表面之间的相互作用并不仅限于隧穿电流或原子作用力,因此对表面纳米结构的力学、光学、电学、声学、热学等各项性质的测量,只需要在STM或原子力显微镜的结构基础上,对探针及其信号探测稍加变换后就可以实现。扫描探针显微镜很快衍生成为一个提供不同功能用途的表面分析仪器大家族,例如:磁力显微镜(Magnetic Force Microscopy, MFM)、侧向力显微(Lateral Force Microscopy, LFM)、近场光学显微镜(Near-field Scanning Optical Microscopy, NSOM)、静电力显微镜(Electrostatic Force Microscopy, EFM)、表面电位显微镜(Surface Kelvin Microscopy, SKM)、表面电容显微镜(Surface Capacitance Microscopy, SCM)等,使得纳米尺度下对表面结构构形与性质的分析方法更加多元化,带领表面物理进入了研究“纳米世界”的全新时代。

自20世纪60年代末期起,我国科学家深刻意识到表面科学的发展将为我国电子工业、石油化工

和钢铁等工业带来深刻的变化。在当时简陋的条件下,科学家们已经开展了超高真空技术、表面电子能谱仪器与方法等的研究。1972年,美籍华人科学家朱兆祥(R. Tsu)应中国科学院邀请来访,介绍了半导体超晶格的概念,引起了强烈的反响。特别是中科院物理研究所的研究人员对这一全新领域投入了高度的热情和期望,并马上成立了“分子束外延设备研制和表面物理”课题组。在中科院、国家计委的支持以及老一辈科学家的帮助下,表面物理国家重点实验室于1983年开始筹建,实验室成员包括物理所和半导体所的研究人员。1987年9月,表面物理国家重点实验室筹建工作完成并正式向国内外开放。表面物理国家重点实验室在二十多年的历程中稳步发展。目前实验室设立7个课题组,开展的研究方向包括:表面小系统的形成机理和输运性质、表面动力学过程与薄膜生长、表面低维结构的控制生长及其量子效应、单分子与表面元激发的测控及动力学、氧化物人工低维结构的生长与性能调控、单分子和纳米结构的电学输运性质、低维材料的分子束外延生长与电子态调控等。表面实验室不仅在轻元素化合物纳米结构构筑及其物性调控、表面低维结构生长动力学及其中的新奇量子现象等领域研究中取得了一系列国际领先的优秀成果,还在杰出人才的引进和培养方面,为我国科技事业作出了重要的贡献。截至2010年底,实验室共有3人被推选为中国科学院院士,7人获得国家杰出青年科学基金支持;培养的近百名博士研究生中有三人获得“全国百篇优秀博士学位论文”奖励,多人入选中国科学院“百人计划”以及国家青年海外高层次人才引进计划(“青年千人”计划)。这些青年人才一直活跃在国内外表面物理及其相关领域研究的最前沿,已经逐渐成长为一支重要的力量。

如今表面物理的研究成果已经赋予人们在表面上以原子级的精度构筑纳米结构的能力,科学家们得以深入探索各种新奇的量子现象及其操控方法,以期建立发展新型电子器件的概念和结构设计。表面物理能够处理并理解的体系也从简单金属表面,逐渐延伸到半导体、复杂氧化物表面,乃至分子-固体界面。为了充分发挥已有的优势基础,保持在相关领域的影响力和竞争力,实验室一方面致力于青年人才和研究生的引进和培养,另一方面努力开拓前瞻性的研究方向,注重功能性表面、界面涉及

的基础科学问题。比如在材料、器件物理中至关重要的复杂材料人工低维结构“演生”现象(emergent phenomenon)的原子尺度调控研究(很多功能材料中,晶格、电荷等存在强相互作用,从而形成复杂的相图结构,其性质随外场、掺杂等有非常剧烈的变化。而在器件结构中,由于体系尺寸减小、维度降低,材料还可能表现出与其体相性质相关却又截然不同的特性和现象。因此,复杂材料人工低维结构同时显示出功能材料的复杂性和低维结构的特殊性,其中蕴含着丰富的物理问题,并具有巨大的应用价值);以及在能源、环境应用中最基本的水科学

基础研究等,都已经启动了相关的科研计划。对表面物理研究新仪器、新方法的发展也一直是实验室工作的重点,正在研制的仪器包括原位透射电镜光电测试系统、电子自旋共振扫描隧道显微镜、新型高分辨率电子能量损失谱仪等,这将为科研工作的顺利开展提供有力的支持,同时也将为表面物理和其他相关学科的进步贡献重要的推动力。

欢迎走进奇妙的“表面”世界。

(中国科学院物理研究所表面物理国家重点实验室 100190)



科苑快讯

自清洗衬衫

还在为洗衣服而烦恼吗?

未来的家务将可能很轻松——

衣服不用洗,只要放在阳光下晒晒即可,因为最近开发出一种自清洗棉。其实这并非新技术,涂有二氧化钛的表面具有自清洗功能,早已广为人知。化合物受到光照后,向相反方向放出带电粒子,形成电子空穴对,激发所谓的氧化反应,分解有机物(比如污垢)。但是这种光只能是占阳光一小部分的紫外光,所以效率较低。研究者在棉纱上涂一层掺杂的二氧化钛($N-TiO_2$),外加一层碘化银(AgI)。在可见光下, $N-TiO_2$ 和 AgI 一起作用,令生成的电子、空穴分开而罕有机会重新结合,最终更有效地进行氧化反应。

在《应用材料与界面》(*Applied Materials & Interfaces*)杂志发表的论文中,研究者描述了一件污染橘黄色染料的衣服在1000瓦灯光下是如何在2小时内自清洗干净的。在清洗这种特殊的衣服时,你需要做什么呢?那就是好好保护衣服上的自清洗涂层。

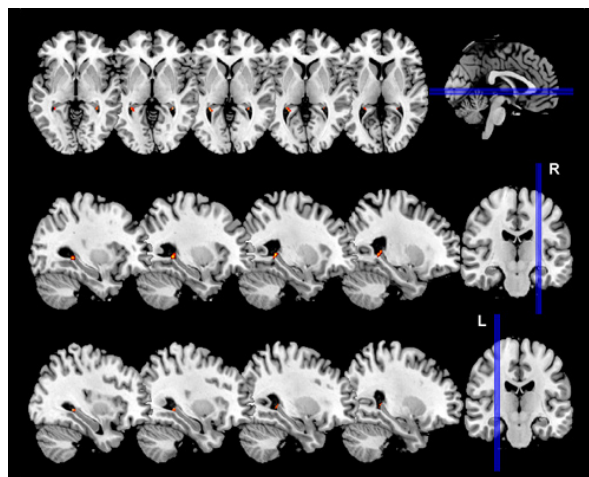
(高凌云编译自2011年12月15日
www.sciencemag.org)

出租车司机的大脑与常人不同

出租车司机与我们常人不同,他们的海马体比我们要大。伦敦的研究人员10多年前就发现经过多年训练的出租车司机中的精英分子都身怀绝技,掌握着2.5万个街道的心理地图,有着更大的海马体——这一区域与学习和导航紧密相关。但是他们

想知道的是,这些司机增大的海马体是训练所致还是与生俱来的。一个研究小组对3组人群做了跟踪研究:一组获得出租车司机资格成功掌握地图绝技,一组未获资格,还有一组根本不是出租车司机。

在4年多的时间里,于训练前、中、后,对其大脑进行测试扫描。他们发现获得资格者在接受训练前与未获资格者及非出租车司机没有任何不同,但是随着大脑装进这些地图绝技,获得资格者的海马体开始不断增大(如图从左至右),从而改变了他们的大脑,这一报告已发表于《当代生物学》(*Current Biology*)网络版。未获资格者的海马体没有变化,这也许说明获得资格者真的具有先天优势——其大脑比其他人更具可塑性。



(高凌云编译自2011年12月8日
www.sciencemag.org)