

纳米科学与技术新进展

白春礼 王忠怀

(中国科学院化学所)

[摘要] 纳米科学与技术(简称纳米科技)是在纳米($1\text{nm}=10^{-9}\text{米}$)尺度上研究物质(包括原子、分子)的特性和相互作用,以及利用这些特性的多学科的高新科技。它的最终目标是直接以原子、分子及物质在纳米尺度上表现出来的特性制造具有特定功能的产品,实现生产方式的飞跃。有人预言纳米科技将会给人类带来一次产业革命。本文简述了纳米科技的历史和最新进展;介绍了纳米生物学、纳米化学、纳米电子学、纳米机械学、纳米材料学方面的研究。另外对促使纳米科技发展的重要工具——扫描隧道显微镜(STM)和在STM基础上发展起来的其它扫描探针显微镜(如原子力显微镜AFM、弹道电子发射显微镜BEEM、电容显微镜等)作了简要介绍。

纳米科技(又称纤科技)是在纳米尺度(0.1nm到100nm之间)上研究物质(包括原子、分子)的特性和相互作用,以及利用这些特性的多学科的高新科技。它的最终目标是直接以原子、分子及物质在纳米尺度上表现出来的特性制造具有特定功能的产品,实现生产方式的飞跃。因而,纳米科技将对人类产生深远的影响,改变人们的思维方式,使人们的概念得以革新。有人断言:纳米科技将会象产业革命、抗菌素以及核武器那样给人类带来深远的变化。首先,纳米科技对于基础科学(量子力学、介观物理、混沌物理)研究来说有着诱人的前景,因为在纳米尺度上物质表现出新颖的现象、奇特的效应、特异的性质。纳米科技更具有直接的实用目的,作为一门技术,能为人类提供新颖的、特定功能的装置;纳米科技的另一重要方面是微型化,如制作体积更小、价格更便宜、速度更快的微电子元件,设计微型传感器、微型工具及微型仪器等。目前,纳米科技主要包括纳米生物学、纳米机械学、纳米电子学、纳米化学、纳米材料学以及原子、分子操纵和纳米制造等很多领域。扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM)在其中扮演了最重要的角色。随着人们认识的深入和研究纳米科技手段的发展,纳米科技也将不断被赋予新的内容。

纳米科技的历史,可以追溯到30多年前著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼于美国物理学会年会上的一次富有远见性的报告。他在这篇报告中作了很多幻想。他认为能够用宏观的机器来制造比其体积小的机器,而这较小的机器又可制作更小的机器,这样一步步达到分子线度。在这篇报告中他幻想了在原子和分子水平上操纵和控制物质。他的设想包括以下几点:1. 如何将大英百科全书的内容记录到一个大头针头部那么小的地方;2. 计算机微型化;3. 重新排列原子。他提醒人类,如果有朝一日能按自己的主观意愿排列原子,世界将会发生什么?4. 微观世界里的原子。在这种尺度上的原子和在体块材料中原子的行为表现不同。在原子水平上,会出现新的相互作用力、新颖的性质以及千奇百怪的效应。对物理学家来说,一个原子一个原子地构建物质并不违背物理学规律^[1]。有些30年前还是幻想的东西在当今已成为现实了。

本文于1992年11月10日收到。

纳米科技的迅速发展是在80年代末、90年代初,是由于80年代初出现了纳米科技研究的重要手段——STM及其发展所带来的^[2],所以现在纳米科技还处于幼儿期。

纳米科技的研究在世界范围内受到高度重视。美国真空学会成立了纳米科学与技术研究部。美国国家基金会把纳米科技列为优先支持项目,与纳米技术有关的资助一半以上来自军方。英国政府在财力困难的情况下也制订了纳米技术研究计划,在机械、光学、电子学等领域遴选了八个项目进行研究。日本制订的关于先进技术开发研究规划(ERATO)中有12个项目与纳米科技有关,研究主体是35岁以下的青年人。美、日政府和公司也纷纷投入人力、财力、物力进行纳米科技的研究。纳米科技的发展速度比原先人们估计的要快得多,有的已实用化了。纳米科技在计算机、信息处理、通讯、制造、生物、医疗、地面和空间发展,尤其是在国防上有巨大的发展前景,国外已开始注意对有关纳米科技实行保密和技术封锁。

纳米生物学

大量的生物结构,从核酸、蛋白质、病毒到细胞器,其线度在1到100nm,所以对于生物学家来说,纳米这个名词并不陌生。生物结构虽然很小,但异常复杂,又格外活跃,表现出很多特定的生物学功能。早在1944年,量子力学奠基者薛定谔于《生命是什么》一书中就提出了生命活动是由分子机器来实现的^[1]。酶就是一种分子机器,它能打断化学键而使分子重新结合。脱氧核糖核酸(DNA)可以作为存储系统,能把命令转移到核糖体中,而核糖体这种分子机器可制造蛋白质分子。纳米生物技术的目的是开辟类似的方法,利用由程序化的分子机器组成的装配机器去构建物质。装配机器将像微小的工业机器人那样工作,通过排布装配分子附件、引导和利用化学反应,把原子逐个地构建成复杂的结构;纳米生物技术的另一重要方面是利用生物分子的特定功能去构建具有某种功能的产品。这些产品有可能使得人类不再为能源危机、环境污染、以及艾滋病之类的疾病所烦恼。纳米生物学是一个非常有意义但又神秘莫测的领域,它究竟会给人类带来多大的变化,目前还很难预测。

尽管自然分子机器在生物系统中普遍存在,人们却更想用人工办法去构建分子机器,如分子装配机器、基于分子装配的复制、机械纳米计算机和细胞修复机器(纳米手术剪刀)等。人工制造生物分子面临着许多问题,需要经过许多复杂的步骤,但纳米生物学家们并未被吓倒,他们利用现有工具和技术来克服困难。已有的方法中如基因工程可以裁剪蛋白质结构,从而可改变蛋白质功能;电工程方法可以探测来自蛋白质内部的信号。当然,新近出现的扫描探针显微技术(STM和AFM)可以在接近自然状态下对单个生物分子进行研究^[3],而且探针可对核酸分子进行切割并对单个分子进行搬运^[4,5],这给纳米生物学的研究增添了强有力的工具。

纳米生物学已取得了一些初步结果:(1)利用生物分子的特异性质,如对外界环境特别敏感的性质可发展生物传感器;(2)人们发现有种叫做细菌视紫红质的蛋白质对光很敏感,当它暴露于光下时会发射出质子,从而产生出可以检测的微小电信号。且信号依赖于这种蛋白质所处的化学环境:在某个频率的光照射下,发射出来的信号强度随介质的酸度增加而减弱;而在另一频率的光照射下,信号则对氯离子的浓度敏感。利用这些性质可以检测介质的酸度和氯离子的浓度;(3)利用生物分子对外界环境的敏感性还可做成生物分子开关;(4)光可改变细菌视紫红质蛋白质的光学性质,由此可制作一个计算机寄存器,即把一薄层细菌视紫红质

放在一块玻璃上，然后用一束极细的激光束去照射某区域，把信息“写”上去；再用第二束激光照射在光性质已改变了的地方，将“写”上的信息“读”出来。此外，现已有人设想制作生物分子纳米机器人，它可以在人体内穿行，而且可以对损坏的组织进行复杂的修复。

这里需要强调的是：用生物分子制造物质的最大优点是生物分子能自我组装，即在平衡条件下，分子自发组合成为一种稳定的、结构确定的、非共价键联结的聚集体。分子的自我组装在生命系统中普遍存在，而且是各种复杂生物结构形成的基础。基于分子装配的纳米技术将对物质的结构进行近似完全的控制，使得人们在至今已认识的自然规律下可能制造出更小、更强、更快的器件。

纳米化学

在化学家看来，纳米尺度是非常大的。纳米结构是原子数目在 10^3 到 10^9 之间的聚集体，其分子量为 10^4 到 10^{10} 道尔顿。目前，合成比该分子量范围小的而且有明确结构的技术正处于发展之中，而合成比此范围大的大部分技术尚未被探讨。至今，发明用于合成纳米结构的新方法的动力主要来自生物学，因而，当今纳米化学的主要热点就是企图理解和运用在生命体系遇到的各种惊人的复杂步骤及过程。可是，从广义上说，纳米化学正逐渐成为一门学科，它最终将包含许多领域：界面和胶体科学、分子识别、微电子加工、聚合物科学、电化学、沸石与粘土化学、扫描探针显微学等。需要指出的是，分子自我组装的特征特别适合制备纳米结构。和纳米生物学中提到的分子的自我组装一样，化学中的分子自我组装也是分子自发组装成结构上稳定的、非共价键连接的聚集体。生物学中有很多基于自我组装而形成复杂纳米结构的例子，并且生命系统本身拥有将化学物质之间以各种弱相互作用而形成大分子的艺术。对于化学家说来，仅仅是刚刚开始学习这种艺术^[1]。

纳米电子学

纳米技术发展的一个主要推动力来自电子工业。这也是美、日等国家特别是日本为什么对纳米科技投入很大力量的重要原因。

在过去的40年里，晶体管的特征尺寸由1cm减小到小于 $1\mu\text{m}$ 。现在商用上可实现在一个集成片上包含100万个单元。对于这种尺度的电子线路，宏观规律仍旧有效。然而，未来一二十年的科技发展使尺寸进一步缩小10到100倍时（进入到纳米尺度），量子力学及电子的波动性就不能不再考虑了。目前扫描探针显微技术可以在表面形成纳米级宽度的线条。

纳米电子学的发展不仅有着广阔的应用前景，而且还可以促使基础科学研究的深入。对固体物理学家来说，介观半导体结构或纳米结构提供给他们一个微小的实验室，在此实验室里可对量子尺寸效应和电子相干现象进行研究。

简而言之，纳米电子学的目标是给人类提供这样的技术：将集成电路的几何结构进一步减小，超越目前发展中遇到的极限，因而使得功能密度和数据通过量率达到远是目前难以想象的水平。这个目标的实现不仅需要对器件的概念进行革新，而且为了克服相互连接的限制需要发展全新的集成电路块制作方法。在这个尺度，传统的晶体管工作所遵循的物理规律不再适用了，新的物理效应将会出现，利用它可发展新颖的量子器件，象共振隧道二极管、量子阱激光器和量子干涉器件等。事实上，到那时人类或许进入到了“量子王国”。

纳米电子学另一个诱人的研究方向是发展分子电子器件和生物分子器件,它们完全以分子组合为基础,是一种完全抛弃以硅半导体等为基础的电子元件。

纳米机械学

纳米机械包括的领域很广,它是指能实现纳米尺度上某个功能的机械,如纳米制造设备及纳米马达等。纳米马达能实现纳米尺度移动和定位,已有两种构造可实现这个要求:一是基于线性马达的 Yoshida 系统,有1nm 的定位精度和200nm/s 的速度;另外一种是基于压电陶瓷管的蠕动爬行装置,以步进方式很容易达到1nm 的定位以及在 STM、AFM 上达到0.01nm 的精确定位。

纳米材料学

纳米材料学是发展最早且研究最深入的学科。纳米材料由于其结构的特殊性,如大的比表面以及小尺寸效应、界面效应、量子效应和量子隧道效应等一系列新的效应,使纳米材料出现许多不同于传统材料的独特性能,其电学、磁学、热学及光学等性能得到进一步优化。从而使其在未来新材料上充当重要角色,例如宽频带强吸收隐身材料,高灵敏度、高响应的传格材料,高活性催化剂材料,高矫顽力磁性记录材料,高性能驻极体换能材料以及多功能复相陶瓷材料,太阳能光—热、光—电转换材料等。纳米材料还为基础研究提供了可控参数的样品,可用于研究上述的效应。

纳米科技研究的重要工具——STM 和 AFM 等

STM 是80年代初出现的一种新型表面分析工具。1986年它的发明者宾尼和罗雷尔博士因此而获得诺贝尔物理学奖。STM 具有空间的高分辨率(横向可达0.1nm,纵向可优于0.01nm),能直接观察到物质表面的原子结构,从而实现了人们梦寐以求的愿望,把人们带到了微观世界。STM 的基本原理是基于量子隧道效应和扫描。它是用一个极细的针尖(针尖头部为单个原子)去接近样品表面,当针尖和表面靠得很近时($<1\text{nm}$),针尖头部原子和样品表面原子的电子云发生重叠,若在针尖和样品之间加上一个偏压,电子便会通过针尖和样品构成的势垒而形成隧道电流(纳安级)。通过控制针尖与样品表面间距的恒定并使针尖沿表面进行精确的三维移动,就可把表面的信息(表面形貌和表面电子态)记录下来。由于 STM 具有原子级的空间分辨率和广泛的适用性,国际上掀起了研制和应用 STM 的热潮,并推动了纳米科技的产生与发展。

STM 主要用来描绘表面三维的原子结构图,在纳米尺度上研究物质的特性。最近,我们和北京航空航天大学非晶态实验室合作用自制的 STM 研究了纳米硅薄膜,获得了原子级分辨的图像。不仅如此,由于 STM 可以在表面达到原子级的精确定位,它的探针还可对表面非常局部的区域产生影响,从而在纳米尺度上将人类的主观意愿施加到自然。STM 已逐渐地成为在纳米尺度上对表面进行改性的工具,在纳米制造领域有着广阔的应用前景。

STM 对表面的纳米加工包括对原子、分子的操纵和对表面的刻蚀。利用 STM,已成功地实现了对原子的操纵,使人类梦寐以求地在原子尺度上控制物质的愿望成为现实,最引人注目的成功例子是 IBM 公司研究人员用35个原子排出了“IBM”三个字样^[6]。借助 STM 来操纵

原子、分子已得到了一系列结果。STM 对表面进行纳米刻蚀也获得了一些令人鼓舞的结果。聚集的束流可以在一非常局域的区域提供能量使化学物质分解，分解产物包括沉积到表面的金属物质或参与刻蚀反应的腐蚀物质。最近我们用自制的 STM 于石墨表面刻写出线宽为 10nm 的字符和图案，为制作高密度的存储信息元件和纳米尺度的电子元件提供了经验。

基于 STM 发展起来的一系列扫描探针显微镜，如原子力显微镜 (AFM)、磁力显微镜 (MFM)、弹道电子发射显微镜 (BEEM)^[7]、光子扫描隧道显微镜 (PSTM)、扫描电容显微镜 (SCaM)、扫描近场光学显微镜 (SNOM)、扫描近场声显微镜、扫描近场热显微镜、扫描电化学显微镜等。这些显微技术都是利用探针与样品的不同相互作用来探测表面或界面在纳米尺度表现出的物理性质和化学性质。

发展历史较长的 AFM 能探测针尖和样品之间的相互作用力，也可达到原子级的空间分辨率。AFM 也可以作为纳米制造的手段，目前已有一些成功的实例^[8]。中科院化学所早在 1989 年就研制出国内第一台 AFM，新近又进一步研制成功激光检测的 AFM。弹道电子发射显微镜 (BEEM) 可以在纳米尺度无损地对表面下的界面电子性质进行谱学研究并能以高分辨率成像，能使人们更深入地了解表面和界面的性质。诸如研究表面的基本特征、负载在表面上的沉积膜的影响、界面的电子穿透性、超晶格载流子的迁移率、量子阱深度等。另外一种显微镜——扫描电容显微镜 (SCaM) 实现了在接近纳米尺度上对历史文献的读写^[9]。

纳米科技涉及的面很广，其发展将带动基础科学的研究，特别是给物理学带来很多契机。纳米科技的研究需要这些分支学科的相互协作。我们深信纳米科技将给人类的生产与生活带来革命性的影响。

参 考 文 献

- [1] A Special Section of SCIENCE, Engineering a Small World: From Atomic Manipulation to Microfabrication, *Science*, **254** (1991), 1300—1342.
- [2] Proceedings of the Fifth International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and the First International Conference on Nanometer Scale Science and Technology, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**, (II) (1991).
- [3] H·G·Hansma, J·Vesenska and C·Siegerist, et al., Reproducible Imaging and Dissection of Plasmid DNA Under Liquid with the Atomic Force Microscope, *Science*, **256** (1992), 1180.
- [4] E·Henderson, Imaging and Nanodissection of Individual Supercoiled Plasmids by Atomic Force Microscopy, *Nucleic Acids Research*, **20** (3) (1992), 445.
- [5] G·Dujardin, R·E·Walkup, Ph. Avouris, Dissociation of Individual Molecules with Electrons from the Tip of a Scanning Tunneling Microscope, *Science*, **255** (1992), 1232.
- [6] D·M·Eigler and E·K·Schweizer, *Nature*, **344** (1990), 524.
- [7] 白春礼, “弹道电子发射显微镜”, *真空科学与技术*, **11** (4) (1991), 211.
- [8] Y·Kim and C·M·Lieber, Machining Oxide Thin Films with an Atomic Force Microscope: Pattern and Object Formation on the Nanometer Scale, *Science*, **257** (1992), 375.
- [9] R·C·Barrett and C·F·Quate, Large-Scale Charge Storage by Scanning Capacitance Microscopy, *Ultramicroscopy*, **262** (1992), 42—44.

SOME NEW PROGRESS IN RESEARCH ON NANOMETER SCIENCE AND TECHNOLOGY

Bai Chunli Wang Zhonghuai
(*Institute of Chemistry, Academia Sinica*)

Abstract

Nanometer science and technology (NST), an advanced multidiscipline, studies and utilizes characters of substances including atoms and molecules and their interactions at the nanometer ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) level. As a science, NST makes the vision of mankind go a further step and improves the understanding of nanometer scale phenomena and novel effects amongst the engineering, fabrication, optics, electronics, materials sciences, biological and medical communities. On the other hand, as a technology, its direct aim is to create specific-functional products using atoms or molecules at the nanometer level. Someone predicted that NST will lead to an industrial revolution. In this review, a brief description of the history of NST and its present condition in the world are given. The main part is devoted to reviewing some new progress on nanobiology, nanochemistry, nanomechanics, nanomaterials science. Finally, some brief comments on nanometer level instruments such as scanning tunneling microscope, atomic force microscope (including other probe microscopes such as ballistic electron emission microscope and scanning capacitance microscope) which have helped the appearance and development of NST are presented.

· 信 息 ·

再提基金制

据日本《科学新闻》报道：日本学术会议的近藤次郎会长在第115届全会上就“在学术领域为世界作贡献”问题发言说：所谓在学术方面为世界作贡献就是要把日本的学术研究成果广泛地公诸于世，从而推动学术的进步。因此，应当完善、充实各种条件，以利于国外科研人员主动来日，进而取得优异的成果。为了达到这个目标，需要有一个新体系（例如学术合作机构）。她能够超越行政部门，集中官方、民间的力量，制定、推行和保证必要的资金、造就人才等方面的基金政策。

基于这个宗旨，学术会议将就具体方案进行全方位的研究，以便得出结论，提出建议。

1990年日本学术会议的副会长渡边格访问国家自然科学基金委员会时曾对胡兆森副主任说过类似的想法，此次是旧话重提。

(国际合作局 王逸 编译)