

纳米科学与技术的发展与展望*

白春礼

(中国科学院化学研究所, 北京 100080)

关键词 纳米科学与技术 发展 研究领域

纳米科学与技术(简称纳米科技)是 80 年代后期发展起来的, 面向 21 世纪的综合交叉性学科领域, 是在纳米尺度上新科学概念和新技术产生的基础. 它把介观体系物理、量子力学、混沌物理等为代表的现代科学和以扫描探针显微技术、超微细加工、计算机等为代表的高新技术相结合, 在纳米尺度上(0.1nm 到 100 nm 之间)研究物质(包括原子、分子)的特性和相互作用, 以及利用原子、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.

1 历史背景

对于纳米科技的历史, 可以追溯到 30 多年前著名物理学家、诺贝尔奖获得者 Richard Feynman 于美国物理学会年会上的一次富有远见性的报告¹⁾. 他认为能够用宏观的机器来制造比自己体积小的机器, 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. 他在这篇报告中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大的地方; (2) 计算机微型化; (3) 重新排列原子. 他提醒到, 人类如果有朝一日能按自己的主观意愿排列原子的话, 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. 就物理学家来说, 一个原子一个原子地构建物质并不违背物理学规律. 30 年前还是幻想的东西在当今有些已成为现实了^[1].

1990 年, 第一届国际纳米科技会议与第五届国际扫描隧道显微学会议同时在美国巴尔的摩召开. 同年, 《纳米技术》和《纳米生物学》杂志创刊, 宣告了纳米科技——一个国际上的前沿学科领域的正式诞生. 1993 年 8 月在俄罗斯, 1994 年 11 月在美国, 先后召开了第二届和第三届国际纳米科学与技术会议. 第四届国际纳米科技会议将于 1996 年在中国召开.

2 发展趋势

由于纳米科技在材料科学、机械制造、信息科学、应用物理、生物科学以及国防和空间

* 中国科学院科技政策局资助项目

1) Feynman R P. Engineering and Science, 1960

技术上有着广阔的发展前景,因此这个领域的研究在全世界范围内受到高度重视。

世界上一些发达国家已投巨资,组织该领域有影响的科学家进行纳米科技研究。纳米科技在世界范围内方兴未艾。美、英、日、德等国对纳米科技给予了高度重视。美国真空学会成立了纳米科学与技术部。美国国家基金会把纳米科技列为优先支持的项目,美国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计划,在机械、光学、电子学等领域遴选了8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。其投资额多达几十亿日元。美、日政府和公司也纷纷投入了人力、财力、物力去进行纳米科技的研究。德国汉堡大学应用物理系微结构研究中心已投资1千万马克,正准备建造一套具有世界一流水平的超高真空低温扫描隧道显微镜(STM),期望在研究磁单极的存在性的重要科学问题上有重要的突破。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、生物、医疗等领域迅速发展,尤其是在国防上有巨大的发展前景,国外已开始注意到对有关纳米科技的研究内容实行保密和技术封锁^[2]。

纳米科技的产业应用直接根植于基础研究,与传统的技术发展规律不同,它从基础到应用的转化是直接的,并且转化的周期将会更短。科学家们预言,纳米科技的研究与发展,将极大地改变人们的思维方式和更新人们的传统观念,从而对人类的社会生活面貌产生革命性的影响。纳米科技给人类带来的变化可能会像产业革命、抗菌素以及核武器给人类带来的变化那样深远。纳米科技对于基础科学(纳米化学、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、奇特的效应和特异的性质。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。纳米科技的一个重要方面是微型化,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。

3 研究领域

纳米科技的迅速发展已经引发了若干新的研究分支。根据目前国际会议的主题和热点,主要可分为纳米电子学、扫描探针显微学、纳米材料学、纳米生物学、纳米机械学、纳米化学等研究领域。

3.1 纳米电子学

作为发展信息科学技术的先导,微电子技术在过去的30多年中已经取得了令人瞩目的惊人进展。目前,作为微电子技术核心的集成电路已经发展到超大规模集成电路(VLSI)阶段,并正在向特大规模集成电路(ULSI)方向迈进。但是随着微电子器件有源区的特征尺寸日益缩小,在接近或者达到纳米尺度时,传统的半导体器件所遵循的宏观物理规律已不再适用,而各种量子效应则会明显地表现出来。纳米电子学的任务就是研究纳米量子微结构的许多新鲜性质,并在此基础上设计和制作量子电子器件及其集成电路^[2]。

纳米电子学的发展将会有力地促进基础学科,尤其是凝聚态物理和低维物理研究的深入。对于固体物理学家而言,介观半导体超微结构为他们提供了一个微型实验室,使他们能对量子线、量子点、量子环以及量子接触等超微结构所具有的各种量子效应,如量子尺寸效

应、量子隧穿效应、量子相干性、量子波动性、弹道电子输运以及 Coulomb 阻塞等现象进行富有成效的研究。

纳米电子学的主要目的之一, 将是由器件物理学家们依据量子微结构的各种新颖物理性质, 设计制作顺应 21 世纪高密度信息处理技术需要的新一代量子电子器件。这些器件包括, 利用共振隧穿效应的谐振隧道晶体管, 利用量子线的一维电子气的高电子迁移率效应设计超快速逻辑开关器件, 利用量子点的可集蓄电子原理构想大容量存储器, 基于控制电子波函数的相位设计横向量子干涉器件, 利用量子点接触的 Coulomb 阻塞和单电子隧穿现象制作单电子晶体管等。

从根本上改变微电子技术的面貌, 迫使微电子工程师们超越目前集成电路发展中遇到的物理与工艺极限, 对传统的器件概念进行革新, 发展全新的集成电路块制作方法, 是纳米电子学的另一个主要目的。其中, 由扫描探针显微镜技术与微电子技术相结合的扫描探针微电子学研究的兴起, 将有可能为这种新型集成电路的制作开辟一条新途径, 而无导线集成电路的出现又为新型集成电路的实现增加了一种可能的选择, 这就是日本东芝公司最近用量子效应器件开发的新式集成电路。他们把 4 个量子箱组成一个基本单元, 再将多个单元连在一起, 单元之间电子的运动以耦合方式进行, 从而实现信号的传递。模拟实验证实, 这种无导线集成电路工作性能稳定且功耗低。无疑, 新型量子电子器件和全新集成电路的实现, 将同分子电子器件、超导电子器件、神经元光学器件和真空微电子器件一起, 奠定第六或第七代计算机设计与制作的基础。

3.2 扫描探针显微学

扫描探针显微学是一门新的学科领域。它以扫描隧道显微镜 (STM)、原子力显微镜 (AFM) 等新型系列扫描探针显微镜 (SPM) 为主要实验技术, 在纳米级乃至原子级的水平上研究物质表面的原子和分子的几何结构及与电子行为有关的物理、化学性质, 在纳米尺度上研究物质的特性^[3]。由于 SPM 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域的区域产生影响, 从而在纳米尺度上将人类的主观意愿施加到自然。SPM 已逐渐地成为在纳米尺度上对物质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 是 80 年代初出现的一种新型表面分析仪器^[4]。1986 年, 它的发明者 Binnig 和 Rohrer 博士因此获得诺贝尔物理学奖。STM 具有高分辨率 (横向可达 0.1 nm, 纵向可优于 0.01 nm), 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, 把人们带到了原子级的微观世界。STM 及相关新型显微仪器的出现, 为纳米科技的发展注入了新的动力, 使科学家能够真正在纳米甚至原子尺度上对物质进行研究及加工。目前, 在纳米科技国际会议上, 与 SPM 技术有关的报告约占一半以上, 从中不难看出扫描探针显微学在纳米科技领域所占据的重要地位。

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”3 个字样。借助 STM 来操纵原子、分子, 已得到了一系列结果^[1]。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。1991年,中国科学院化学研究所用自制的STM在石墨表面刻蚀写出线宽为10 nm的字符和图案^[5],中国科学院真空物理开放实验室也在硅单晶表面刻写出文字和图案。这些研究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的基本原理,现在已发展起来了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)、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^[6]。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。

AFM能探测针尖和样品之间的相互作用力,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。经过改装的AFM已实现了在接近纳米尺度上对历史文献的读写。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实现高分辨率成像,还可在界面上进行纳米加工。这一切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。

3.3 纳米材料学

材料是人类赖以生存和发展的物质基础,而纳米材料又是当今材料学研究中的一个极为活跃的前沿,被人们誉为“21世纪内最有前途的材料”。所谓纳米材料学是研究具有纳米尺度材料物质的制备方法、物理性质以及技术应用的学科^[7],一般而言,纳米材料可分为超微粒子、纳米薄膜和纳米固体3类。

纳米超微粒子是采用真空蒸发、金属陶瓷法、原子团束法等制备的,粒度大小介于20~100 nm之间的超微细颗粒。固态超微粒子具有很大的表面体积比,因此表面效应非常突出,当粒度很小时,呈现出明显的量子效应。从工业技术应用的角度来看,超微粒子将在催化、气溶胶、粉末冶金、燃料、磁记录、超导、传热、雷达波隐形、光吸收、光电转换以及光脉冲诊断中有着潜在的应用价值。

纳米薄膜是直接依靠成膜机制,采用磁控溅射或化学气相沉积方法,在固体表面上制备的,由纳米晶粒组成的薄膜。纳米薄膜具有约50%的庞大界面组元,因此显示出许多既不同于晶态,又不同于非晶态物质的许多崭新性质。如纳米晶硅具有热稳定性好、光吸收能力强、掺杂效率高、室温电导率可在大范围内变化等。近几年,我国采用等离子体化学气相沉积技术,已成功地制备了纳米晶硅薄膜,并对其原子结构、电导性、光致发光和电致发光现象进行了研究。预计,纳米薄膜将在压阻传感器件、光电器件以及其他薄膜微电子器件中具有重要作用。

纳米固体是由大量超微粒子在保持新鲜表面性质的条件下,经过加压成型获得的块状固体材料。这种由无数粒子组成的聚合体,其界面原子比例很高,因而具有许多超乎寻常的性质,如高热膨胀力、高比热、高扩散性、高电导性、高强度、高韧性和低饱和磁化率等,因而在表面催化、磁记录、传感器以及工程技术上有着广泛应用。我国近几年分别采用惰性气体沉积和真空成型方法、电子回旋共振法以及激光合成方法制备出 Si_3N_4 、 Al_2O_3 等纳米固

体材料,最近采用化学方法,制备出公斤级的超细金属纳米材料,标志着我国在这一领域的研究已处于世界先进水平.

3.4 纳米生物学

生物技术亦称生物工程,它是生物科学与技术科学相结合的产物,它的迅速发展可以使科学家通过基因的剪裁组合和细胞融合等方法,在分子水平上改变生物的性状,这就是把纳米科学技术引入生物技术而形成的纳米生物学的任务.

目前,纳米生物学对于人们来说是一个既令人振奋鼓舞,而又感到神秘莫测的领域,它的主要目的有两个,其中之一是由程序化的分子机器首先组成装配机器,然后再由装配机器去构建具有新结构形式的物质.像微小工业机器人那样工作的装配机器,将按照人为的意志去排布和装配分子部件、诱导化学反应,最后构建成复杂的分子结构,实际上这是一种分子自我组装.同样,化学中分子自我组装也可以使分子自发组装成结构上稳定、具有非共价键连结的聚合体.人工制造生物分子需要经过许多步骤,目前,人们可以利用基因工程技术剪裁蛋白结构,以改变蛋白质的功能.用电子工程技术探测来自蛋白质内的信号,以便对蛋白质的特性进行分析.而利用扫描探针显微技术对核酸、蛋白、细胞等生物分子在极高分辨率水平上的观测研究及对生物分子的操纵,是纳米科学技术对生物技术的一个重要贡献.

纳米生物学的另一个目的是利用生物分子的特定功能去构建具有某种功能的产品,如利用生物分子对外界环境特别敏感的性质做成生物分子开关和生物传感器;利用细菌视紫红蛋白对不同频率的光十分敏感的性质来检测某种介质的酸度和离子的浓度;利用光可以改变视紫红蛋白光学性质的特点,可制作计算机寄存器等.总之,纳米生物学将对生物物理学、生物化学、生物电子学以及生物医学的发展产生重大而深远的影响.

3.5 纳米机械学与超微加工技术

纳米机械学是融纳米技术、微电子技术和机械制造技术为一体,以制作纳米机械装置为目的技术学科^[8].尽管目前纳米机械学的发展还处于萌芽状态,但它展示的前景是诱人的.由微型固态集成传感器、微执行器和微机械构件组成的微电子机械系统就属于纳米机械学的范畴,它是以硅作为基本材料,采用精密腐蚀、薄膜生长、键合技术及层间互连工艺去制作各种微型器件,如膜片、微桥、微型梁、微型导管、齿轮、微型泵、微型静电式电动机等.尤其是用微电子机械组成的微型机器人,可进入血管到达各个脏器,进行生物医学的基础研究、或进行耳、眼、神经、心脏等器官的微手术,以对损坏的部位及组织进行复杂的修复.

纳米微加工技术泛指在纳米尺度上对材料进行加工的技术,如半导体量子线、量子点微结构的制作,纳米金属导线的淀积以及利用 STM 的微加工等,都是纳米微加工技术.量子线、量子点微结构是继超晶格与量子阱之后的一种新型低维材料,在未来的信息处理和计算机技术中占据着十分重要的地位.经过长期的探索,最近人们已开发了一些制备量子线、量子点微结构的方法.这些方法大体可以分为两类:一类是基于物理控制的分裂栅方法;另一类则是基于工艺技术的选择生长制备方法.因后者能够制备形状各异的量子线、量子点,因而是制造量子微结构的主导技术.所谓选择生长是指利用选择区域超薄膜外延生长和以电子束、离子束和光子束为主的三束精细加工,在化合物半导体表面上制备量子线、量子点阵列的方法,日本的东京大学,NTT 和 NEC 公司已在这方面进行了出色的研究.

纳米细线的制备也是个引人注目的课题。新近,美国的约翰·霍普金斯大学用电化学沉积方法,在聚碳酸酯膜上制备了一维镍和铝金属微细导线,日本新技术事业团采用新开发的蚀刻技术,可以原子层厚度为单位对半导体表面进行加工,用于制造下一代千兆级存储装置。德国人用钨化物研制出一种原子开关,采用这种技术制成的半导体芯片可存储 60 亿页的文献资料。

STM 对表面的纳米加工包括对原子和分子的直接操纵和表面蚀刻,诸如直接刻字、电子束曝光、离子束刻蚀、局部加热、场致蒸发、表面修饰、场诱导局部化学反应,电化学腐蚀与沉积等。正像 70 年代微电子技术产生了信息革命一样,纳米科学技术将引起 21 世纪中最为世人关注的高新科学技术。

4 结束语

因发明 STM 而获得 1986 年度诺贝尔奖的 Rohrer 博士,1993 年 8 月出席了在北京举办的第七届国际 STM 会议并受到江泽民主席接见,他在回国后给江泽民主席的信中写道:

“我非常希望这次纳米科学和技术会议能在中华人民共和国留下印记。许多人认为纳米科技仅仅是遥远的未来基础科学的事情,而没有什么实际意义。但我确信纳米科技现在已具有 150 年前微米科技所具有的希望和重要意义。150 年前,微米成为新的精度标准并成为工业革命的技术基础,最早和最好学会并使用微米技术的国家都在工业发展中占据了巨大的优势。同样,未来的技术将属于那些明智地接受纳米作为新标准,并首先学习和使用它的国家。不幸的是,目前对这一新领域持保留和怀疑态度的还大有人在。我们应当记住,微米技术曾同样地被认为对使用牛耕地的农民无关紧要。的确,微米与牛和耕犁毫无关系,但它却改变了耕作方式,带来了拖拉机。”

Rohrer 博士富有远见卓识的精辟论述,唤醒了人们对于纳米科技的极端重要性的认识。上面我们已经看到,许多发达国家已经对纳米科技给予了高度的重视。目前,纳米科技充满着机遇与挑战。就我国而言,不失时机地开展这方面的研究,具有极其重要的科学意义和工业价值。纳米科技一旦成熟,将从根本上改变人类现有的生产方式。纳米水平的直接生产,不仅可以节省能源与原材料,解决环境问题,而且可能取代现有许多大规模工业模式。由于基础与应用结合紧密,使得未来纳米科技工业的建立与传播依赖于基础研究,这完全不同于传统模式。如果在这方面能抢先取得突破,并使其实现工业化,其产生的巨大的经济效益,无疑对于增强我国的综合国力起着极其重要的作用。

参 考 文 献

- 1 白春礼. 原子、分子的观察与操纵. 长沙: 湖南教育出版社, 1995
- 2 白春礼. 纳米科学与技术. 昆明: 云南科技出版社, 1994
- 3 Bai C L. Scanning Tunneling Microscopy and Its Application. Berlin: Springer, 1995
- 4 Binnig G, Rohrer H. Scanning tunneling microscopy. Helv Phys Acta, 1982, 55: 726~735
- 5 王忠怀, 戴长春, 孙 红等. 石墨表面纳米级直接刻蚀的研究. 科学通报, 1993, 38(5):433
- 6 白春礼. 扫描隧道显微术及其应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1992
- 7 张立德, 牟季美. 纳米材料科学. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994
- 8 周兆英, 白春礼, 尤 政等. 微米/纳米技术. 见: 机械工程学科前沿. 北京: 机械工业出版社, 1996