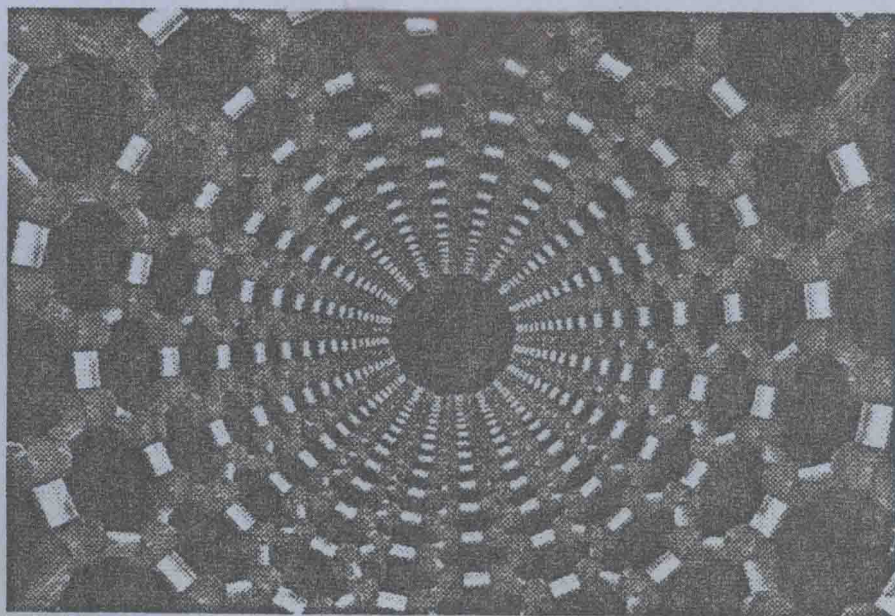


纳米科技导论

主编：沈海军



南京航空航天大学

2004. 4

前 言

纳米科技是 20 世纪 90 年代出现的一门新兴的科学技术。纳米技术是在纳米尺寸范围内认识和改造自然,通过直接操纵和安排原子、分子而创造新物质的高新技术。纳米不仅仅是一个空间尺度上的概念,而是一种新的思维方式。它的出现表明人类改造自然的能力已经延伸到了原子水平,标志着人类技术已经进入了一个新的时代——纳米科技时代。

科学家预言,纳米时代的到来不会很久,纳米技术的应用将远远超过计算机工业,并成为未来信息的核心。利用纳米技术,将来一台大型计算机的主机都可以压缩放进口袋,随身携带。正如中国著名科学家钱学森所说的那样,纳米科技将会带来一次技术革命,从而将引起廿一世纪又一次产业革命。

本世纪以来,各国为提高自身的竞争力,纷纷拉开了纳米科技竞争的战幕。我国政府也通过各种计划对纳米技术的研究进行了大力扶持,并在许多领域取得令人瞩目的进展。在这种大背景下,我国许多高校相继成立了“纳米研究中心”,增加了对纳米学科的扶持力度,在研究生阶段的相关专业上不同程度地增添了相应的研究方向,并开始招生。但相比之下,本科阶段的纳米学科建设显得相对薄弱。

本世纪初,教育部、科技部等五部委联合下发了《国家纳米科技发展纲要 2001-2010》以及落实“……要在物理、化学、生物、机械、电子学、计算机学等专业设置有关纳米科技新课程。”的要求。为了迎接 21 世纪科学技术的飞速发展以及纳米时代的到来,并使纳米科技的知识得到进一步地普及,我们编写了适用于本科生使用的《纳米科技导论》教材。该教材从纳米科技的发展、纳米材料特性及其制备、纳米材料的表征、纳米电子学、纳米生物学、纳米机械学、纳米力学、纳米科技的应用等几个方面讲述了纳米科技的几个主要科学分支以及相应的研究现状。通过该教程,可以使读者全面理解纳米科技的内涵,从不同学科的角度认识物质在纳米尺度的新现象、新规律;掌握纳米材料的表征、纳米科技在化工、微电子、医药、军事等领域应用等方面的相关知识;了解纳米科技相关的理论、技术、工艺,正确对待目前市场上借用“纳米”概念进行炒作的“伪纳米”现象。

本教程的学时数以 32 学时为宜。适宜作理工科本科生公共选修课教材,同时,也可供相关专业的研究人员、技术人员、生产人员、以及大专院校的师生阅读。

本书涉及的范围较广,由于编者水平限制,编写中必然存在许多不足与错误之处,希望读者提出批评和宝贵意见。

编者

2004.4 于南京航空航天大学

目 录

前言

第一章 总论	1
第一节 纳米科技的发展历史及其意义	1
一、人类对宏观世界与微观世界的探索	1
二、纳米概念的提出与纳米科技的发展历史	2
三、纳米科技的内涵、研究方法与重要意义	6
第二节 国内外纳米科技的发展与研究现状	7
一、美国纳米科技的发展现状	7
二、日本纳米科技的发展现状	12
三、欧盟纳米科技的发展现状	16
四、我国纳米科技的发展现状	20
思考题	23
第二章 纳米材料及其制备技术	24
第一节 纳米材料的定义与优异特性	24
一、纳米材料的定义	24
二、纳米材料的优异特性	24
第二节 纳米超微颗粒及其制备	26
一、固相法制备纳米超微颗粒	27
二、液相法制备纳米超微颗粒	27
三、气相法制备纳米超微颗粒	29
第三节 纳米碳管、富勒稀及其制备	31
一、纳米碳管及其制备	31
二、富勒稀及其制备	37
第四节 纳米薄膜及其制备	40
一、纳米薄膜的分类	40
二、纳米薄膜的性能	40
三、纳米薄膜的制备	43
四、LB 膜制备方法及其应用	44
第五节 纳米块体材料及其制备	46
一、纳米块体的制备	46
二、纳米块体材料的特性	47
思考题	52

第三章 纳米计量学与纳米材料的表征	53
第一节 纳米计量学的发展	53
第二节 超微粉体的测试技术	54
一、超微粉体的表征	54
二、超细粉体粒度的表征技术	55
第三节 纳米计量学中的表面电子光学技术	58
一、低能电子衍射 (LEED)	58
二、电子显微镜和电子探针	59
三、俄歇电子谱	59
第四节 扫描探针显微技术	60
一、扫描隧道显微镜 (STM)	60
二、原子力显微镜 (AFM) 与扫描力显微镜 (SFM)	62
三、近场光学显微镜 (SNOM) 及其应用	63
四、弹道电子发射显微镜 (BEEM)	63
思考题	65
第四章 纳米电子学	66
第一节 微电子学面临的极限	66
第二节 纳米电子学与纳米电子器件	67
一、纳米电子学与量子结构	67
二、纳米电子器件	67
第三节 分子电子学与分子电子器件	71
一、分子电子学概述	71
二、分子电子器件	71
第四节 纳米电子器件制备与分子电子学相关技术	74
一、纳米电子器件制备技术	74
二、分子电子学相关技术	76
思考题	78
第五章 纳米生物学	79
第一节 纳米医学	79
一、纳米技术与临床医学	79
二、纳米医用材料	81
三、医用纳米机器	82
四、医用纳米机器人	83
第二节 生物芯片技术	83

一、生物芯片的概念.....	83
二、生物芯片的分类.....	84
三、基因芯片技术的应用.....	84
第三节 DNA 计算机.....	85
一、DNA 计算机概述.....	85
二、DNA 计算的出发点和理化依据.....	86
三、DNA 计算的优势.....	86
四、DNA 计算的应用.....	87
第四节 基因工程.....	88
一、际人类基因组计划.....	88
二、基因工程研究对人类生活、社会的影响.....	88
思考题.....	91
第六章 纳米机械学.....	92
第一节 纳米/微型机械发展现状.....	92
第二节 纳米机械学的研究的特点.....	95
一、微机构学.....	95
二、微结构材料力学.....	96
三、纳米摩擦学.....	96
第三节 微机械加工技术.....	97
一、材料.....	97
二、腐蚀法.....	98
三、表面淀积法.....	98
四、LIGA 技术.....	99
五、MEMS 封装技术.....	99
六、CAD 技术.....	99
七、扫描隧道显微加工技术.....	100
八、微型机械测试技术.....	100
九、微型机械(MEMS)装配技术.....	101
第四节 纳米摩擦学.....	101
一、纳米摩擦学的背景和影响因素.....	101
二、纳米摩擦学的主要研究内容.....	102
三、纳米摩擦学的研究方法.....	103
思考题.....	105
第七章 纳米力学.....	106
第一节 纳米力学的定义与范畴.....	106

一、纳米力学的定义与范畴.....	106
二、纳米力学与物理力学.....	107
第二节 纳观计算力学.....	107
一、大规模分子动力学算法.....	107
二、连续介质—分子动力学交叠层算法.....	108
三、准连续介质算法.....	109
四、LMPM方法.....	110
第三节 纳观试验力学.....	110
一、纳米云纹法.....	110
二、纳米压痕法.....	110
三、微纳米加载系统.....	111
第四节 纳米塑性力学.....	111
一、纳米晶体力学.....	111
二、纳米晶体界面相结构.....	113
三、位错力学场的纳观结构.....	114
第五节 纳米碳管力学.....	115
第六节 纳观断裂.....	116
一、纳观断裂的理论特征.....	116
二、纳观断裂的实验测量.....	116
第七节 纳米压痕力学.....	117
思考题.....	119
第八章 纳米技术的应用.....	120
第一节 纳米技术在化工催化中的应用.....	120
第二节 纳米技术在陶瓷、微电子领域的应用.....	121
一、纳米技术在陶瓷领域的应用.....	121
二、纳米技术在微电子学中的应用.....	122
第三节 纳米技术在医药学、生物工程中的应用.....	123
一、纳米技术在医药学领域中的应用.....	123
二、纳米技术在生物工程领域中的应用.....	124
第四节 纳米材料与纳米科技在军事领域中的应用.....	126
一、纳米材料在军事中的应用.....	126
二、纳米卫星的军事应用.....	127
三、纳型飞行器与传感器.....	128
四、分子传感器.....	129
五、纳米生物战.....	130
思考题.....	131

参考文献.....134

第一章 总 论

纳米科技是 80 年代末、90 年代初才逐步发展起来的前沿、交叉性新型学科领域。它利用现代化的微观测试技术和手段，将人类认识自然、改造自然的工作带入一个全新的领域——介观世界。在这片全新的领域内，有许多新的规律和现象有待发现，有许多新的技术和器件有待开发。早在上世纪 60 年代，美国物理学家，诺贝尔获得者费曼发表了名为《There is plenty of room on the bottom》的演讲，被公认为是纳米科学技术思想的来源。他在这篇演讲中所做的惊世预言“至少依我来看，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。”将会变成现实。

目前，几乎所有发达国家都对纳米科技的研发进行了大量投入，试图抢占这一 21 世纪科技战略制高点。因此，有人肯定的预言，纳米科技的迅猛发展将在 21 世纪引发一场新的工业革命。

第一节 纳米科技的发展历史及其意义

一、人类对宏观世界与微观世界的探索

在这里有必要简要地回顾一下人类对物质认识研究——物质观的演进历史。物质是什么组成的，是一个古老而又不衰的科学命题。人类对物质世界的认识，一直从微观和宏观两个层次进行孜孜不倦地探索研究。在自然科学领域内，人们可以根据空间尺度的大小，来划分问题的“宏”和“微”。人类对物质认识不断探索创造出了现代物质文明和精神文明。随着科学和技术的发展和理论不断创新，特别是上个世纪三十年代以后，人们越来越感到仅用传统微观和宏观两个尺寸去研究物质世界，显然力不从心，缺少精致性和准确性。自从上世纪初科学界提出量子力学和相对论以后，人类对物质世界的观察、研究和科学实践，从微观和宏观两个方面的研究都获得了巨大的进展。

1. 从微观到妙观

微观层次研究已经很深入，已进入原子核内部，发现了质子、中子、电子等百种以上的基本粒子。随着研究的深入，研究的手段和装置也越来越庞大，所花的资金也越来越多。目前，人们所从事研究的物质世界的时空尺度已经很小，最小时间以 10^{-15} 秒计，尺度空间以 10^{-10} m 计，这个世界离通常所说的微观世界相去甚远。因此，在 20 世纪 60 年代关于原子模型的大讨论时，我国著名科学家钱学森博士在一次谈话中，提出了“妙观”的概念，这个提法比较准确的反映了人类对物质世界现今最深层的探索研究。人类从微观层次到妙观层次对物质世界的大规模研究是从第二次世界大战开始的，它的探索研究极大地推动了科学技术的发展，对人类的生活产生了极大的影响。在这大规模研究探索过程中产生的一系列理论、方法、手段、工具以及发现的一系列新现象，大大地加快了人类物质文明的历史进程。由于妙观层次的探究，产生了粒子加速器，对撞机、电子显微镜、原子弹、氢弹，原子能发电、高能辐射技术的广泛应用，激光的发明等等这些直接关系人类生存和生活的事

物。妙观层次探索研究，除产生上述已为人们熟知的事物及影响外，还会继续发挥它的深远影响。

2. 从宏观到宇观

自从爱因斯坦提出相对论以后，特别是哈勃的宇宙大爆炸理论提出以后，人类对宏观的探索研究也已经走的更加遥远了，已延伸到宇宙深空。它所用的时空尺度，更是涵盖了人类目前所使用的一切时空单位，长的单位有“光年”、“亿光年”，小的即妙观层次的时空单位，都在应用。“有”、“无”、“真空”、“烟灭”、“可见物质”、“暗物质”、“反物质”、“反世界”这些玄而又玄的名词是它用来描述宇宙世界的常用词语。所以用传统的所谓“宏观”已经难以包容它了。因此，科学家在讨论物质观时提出了“宇观”的概念。用“宇观”研究物质世界非常深奥，而且同“妙观”领域的研究有相互交融回归的趋势。“宇观”研究所用的研究工具、设备及装置也非常庞大，所用的技术也是最先进的，费用高昂，如一架哈勃天体望远镜的耗资可高达 10 亿美元。虽然“宇观”所探索的结果，提出并需验证的理论，离我们的生活很远，但科学家为它的探索所创造的技术手段、设备、产品和服务正在惠及人类的现实生活。

3. 微观物质同宏观物质联系的重新认识 - 介观

在从微观到“妙观”，以及从宏观到“宇观”的探索研究过程中，一系列相关的技术成果已经大大推动了人类物质文明的进程。同时也为人类进一步认识从原子、分子层次的微观物质世界同一切具体的宏观物质（体）世界的本质联系的深入探索研究提供必要的理论、方法和技术手段。应该说，正是由于科学家们对微观物质世界和宏观物质世界在“妙观”和“宇观”两个方面的深层次的探索研究所积累的知识、方法和物质技术手段，促使一些科学家回归到对现实的物质世界进行进一步的深入观察研究。

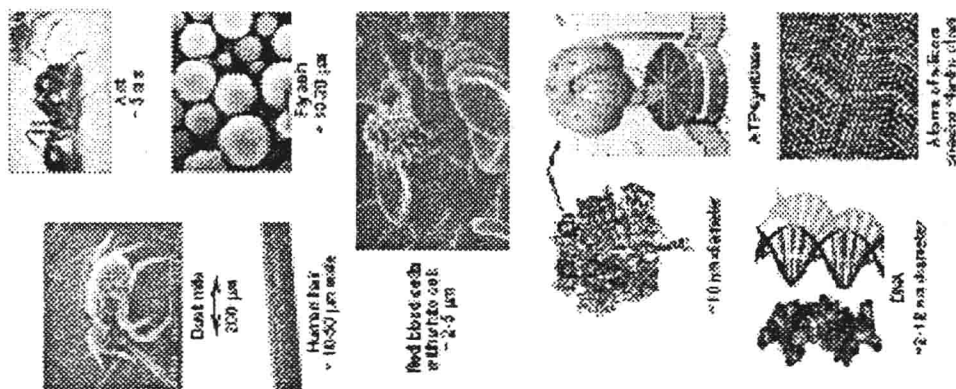
起初他们所观察的空间尺度，从亚微米级（即 $100\sim 1000\text{nm}$ ）开始，随着深入观察研究，发现在 $1\sim 100\text{nm}$ 空间内的物质世界存在许多奇异的物理性质。我们知道构成一切现实宏观物质的基本单元是原子和分子。因此原子和分子是现实宏观物质的微观起点。在 $1\sim 100\text{nm}$ 这样的空间内，存在的原子和分子为数不多，却存在着一块近年来才吸引一大批科学家极大兴趣和探研的“处女地”。在这个研究领地，即不同于原子和分子这样的微观起点，又不同于现实宏观物质领域，它正好介于微观和宏观之间，科学家们把它称之为“介观物理”或“介观”。介观物理历经四十多年的发展，已有长足进展，特别是近十几年来的高速发展，已形成了新兴的科学技术，即纳米科技（Nano-ST）。这是人类对现实物质世界认识的深层次的回归和把握。这也是人们对“妙观”和“宇观”的深究和远探以后的现实回应。实现回归的“介观”将会引导人们采用技术手段师法自然，像天然植物那样，把存在于自然界的空气、水、无机物质自组装成人类生活所需要的各种各样的物品，如粮食、纤维、各种微型机器人、计算机等等。

二、纳米概念的提出与纳米科技的发展历史

1. 纳米概念的提出

1 纳米为 10^{-9}m ，符号为 nm (nanometer)。它在长度单位中所处的位置见表 1-1。图 1-1 给出一些人工以及自然界中存在的物体的尺寸。从图中可以看到，生物体内

Thuis Natural



Things That Will

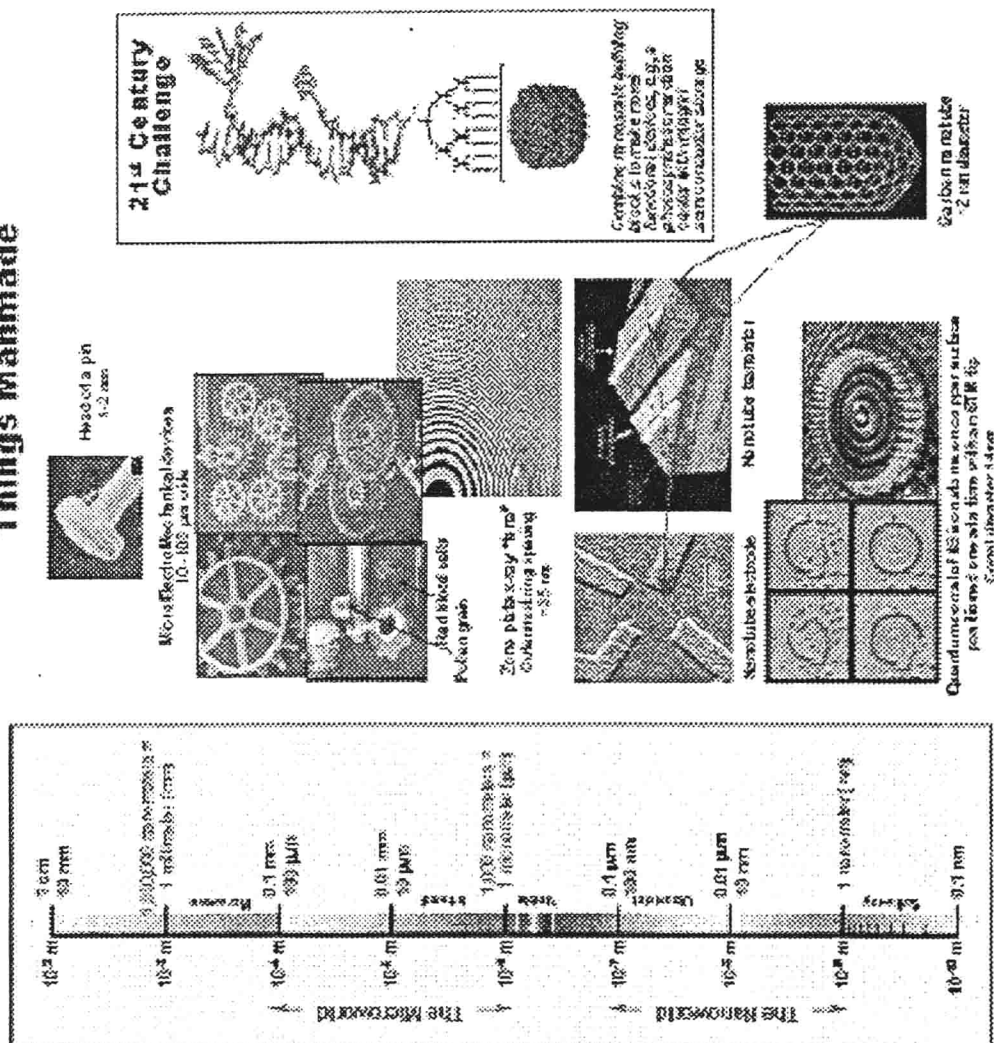


图 1-1 物体的尺寸

的 ATP（三磷酸腺甙）分子、DNA 分子以及人工制备的纳米管器件、纳米管晶体管，以及一些多晶硅的晶粒都属于纳米尺度。

事实上，“纳米”尺度的粒子早已存在。比如，中国古代的徽墨粒子，出土铜镜涂层中的粒子，已在轮胎中使用了 100 年用作增强剂的炭黑颗粒等。疫苗（它常含有一种或数种纳米尺度的蛋白质）也可能挤身于纳米之列。

表 1-1 纳米在长度单位中所处的位置

单位	缩写或符号	与主单位的比	
米	m	主单位	
分米	dm	1/10	10^{-1}
厘米	cm	1/100	10^{-2}
毫米	mm	1/1000	10^{-3}
丝米	dmm	1/10000	10^{-4}
忽米	cmmm	1/100000	10^{-5}
微米	μm	1/1000000	10^{-6}
纳米	nm	1/1000000000	10^{-9}
埃	Å	1/10000000000	10^{-10}

最早提出纳米尺度上科学和技术问题的是著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼。1959 年他在一次著名的讲演中提出：“如果人类能够在原子 / 分子的尺度上来加工材料、制备装置，将有许多激动人心的新发现。……我们需要新型的微型化仪器来操纵纳米结构并测定其性质。……那时，化学将变成根据人们的意愿逐个地准确放置原子的问题。”他还预言，“当 2000 年人们回顾历史的时候，他们将会为直接用分子、和原子来制造机器而感到惊讶。”不幸的是，费曼博士于 1988 年去世。

100 年前，爱因斯坦在其博士论文中曾根据糖在水中的扩散的试验数据计算出了糖分子的直径为约 1 个纳米。100 年后的今天，纳米尺度在科学中的重要性膨胀起来。

1974 年，Tanigyuchi 最早使用纳米技术（Nanotechnology）一词描述精细机械加工。20 世纪 70 年代后期，麻省理工学院德雷克斯勒教授提倡纳米科技的研究，但当时多数主流科学家对此持怀疑态度。

纳米科技的迅速发展是在 80 年代末，90 年代初。80 年代中期出现的纳米科技最重要的研究手段——扫描隧道显微镜（STM）、原子力显微镜（AFM）等微观表征和操纵技术对纳米科技的发展起了积极的促进作用。

扫描探针显微镜（SPM）的出现，标志着人类在对微观尺度的探索方面进入到一个全新的领域。作为纳米科技重要研究手段的 SPM 也被形象地称为纳米科技的“眼睛”和“手”：

“眼睛”——可以利用扫描探针显微镜直接观察测试原子、分子的相互作用与特性；

“手”——可以借助扫描探针显微镜移动原子，构造纳米结构，同时为科学家提供在纳米尺度下研究新现象、提出新理论的微小实验室。

图 1-2 是借助扫描探针显微镜, 将原子一个个重新排列, 构筑出世界上最小的“算盘”的示意图。关于扫描探针显微镜的原理与应用将在第三章中进行讲述, 这里不再赘述。

1990 年 7 月, 第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩与第五届国际扫描隧道显微学会同时举办, 《纳米技术》与《纳米生物学》两种国际性专业期刊相继问世。至此, 纳米科技作为一门崭新的科学从此得到科技界的广泛关注。

2. 纳米科技的发展历史

纵观纳米科技的发展, 可以发现, 纳米科技的历史是由一件件的科研成就与历史事件组成:

1959 年, 美国著名的物理学诺贝尔奖获得者理查德·费曼预言, 人类可以用小的机器制作更小的机器, 最后将变成根据人类意愿, 逐个地排列原子, 制造产品, 这是关于纳米技术最早的梦想。

七十年代, 科学家开始从不同角度提出有关纳米科技的构想, 1974 年, 科学家唐尼古奇最早使用纳米技术一词描述精密机械加工。

1982 年, 科学家发明研究纳米的重要工具——扫描隧道显微镜 (STM), 为我们揭示一个可见的原子、分子世界, 对纳米科技发展产生了积极促进作用。

1990 年 7 月, 第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩举办, 标志着纳米科学技术的正式诞生。

1991 年, 碳纳米管被人类发现, 它的质量是相同体积钢的六分之一, 强度却是钢的 10 倍, 成为纳米技术研究的热点。诺贝尔化学奖得主斯莫利教授认为, 纳米碳管将是未来最佳纤维的首选材料, 也将被广泛用于超微导线、超微开关以及纳米级电子线路等。

1993 年, 继 1989 年美国斯坦福大学搬走原子团“写”下斯坦福大学英文名字、1990 年美国国

际商用机器公司在镍表面用 36 个氙原子排出“IBM” (如图 1-3 所示) 之后, 中国科学院北京真空物理实验室自如地操纵原子成功写出“中国”二字, 标志着我国开始在国际纳米科技领域占有一席之地。

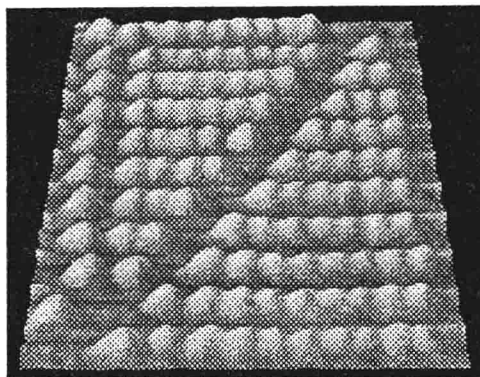


图 1-2 世界上最小的“算盘”

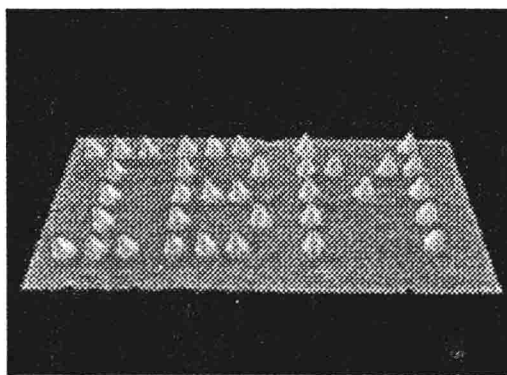


图 1-3 氙原子写成的“IBM”

1999年,美国科学家首次成功地用单电子移动单电子,利用这种技术可望在20年后研制成功速度和存贮容量比现在提高成千上万倍的量子计算机。

1999年,巴西和美国科学家在进行纳米碳管实验时发明了世界上最小的“秤”,它能够称量十亿分之一克的物体,即相当于一个病毒的重量;此后不久,德国科学家研制出能称量单个原子重量的秤,打破了美国和巴西科学家联合创造的纪录。

2000年,《Nature》报道香港科技大学发现了世界上最细的纯碳纳米管——0.4nm碳管。

2001年7月,《Science》报道香港科技大学首次在单根纯碳纳米管中观察到超导特性。

2002年10月,《Nature》报道清华大学首次合成了长达30cm的碳纳米管。

.....

到1999年,纳米技术逐步走向市场,全年纳米产品的营业额达到500亿美元。

三、纳米科技的内涵、研究方法与重要意义

1. 纳米科技的内涵

对于纳米科技,从不同角度可以有不同的提法,归纳起来有以下四种:

1) 把纳米技术定位为微加工技术的极限,也就是通过纳米精度的“加工”,人工形成纳米大小结构的技术。有人把通过超精细加工制作的微机电装置也称为纳米装置;

2) 在材料领域,把纳米级颗粒的制备技术及由此引起的材料的性能改变称为纳米技术;

3) 从原子、分子出发来构建特殊的结构,制造具有所需功能的分子装置,从而产生生产方式的革命;

4) 仿制生物体系的纳米结构,利用生物的自识别、自组织、自复制的功能制造特定的纳米产品。

基于以上提法,我们可以把纳米科技定义为:纳米科技是指在纳米尺度(1nm到1000nm之间)上研究物质(包括原子、分子的操纵)的特性和相互作用,以及利用这些特性的多学科交叉的科学和技术。它使人类认识和改造物质世界的手段和能力延伸到原子和分子。纳米科技的最终目标是以原子、分子及物质在纳米尺度上表现出来的新颖的物理、化学和生物学特性制造出具有特定功能的产品。

2. 纳米科技的研究方法

当前,纳米科技的研究方法有两种路线,即所谓的“从上到下”方法和“从下到上”方法。“从上到下”方法的主导思想是通过开发现有宏观工艺与技术潜力,实现材料/器件的微型化。这些技术包括光学光刻、电子束光刻、离子束光刻技术等。“从下到上”方法则是希望通过微观手段控制和操纵一个个功能单分子,设计并构造各种新的物质和分子功能器件,它们包括自组装与分子合成、Langmuir—Blodgett(LB)膜、有机分子外延生长(OMBE)、AFM/STM技术等。这两种研究方法都可以用来衡量纳米科技的发展水平。

3. 纳米科技的重要意义

美国政府从 1999 年开始,就已经把纳米科技研究列为 21 世纪前 10 年 11 个关键领域之一。美国总统科技助理曾在致国会的信中称:“纳米技术将与信息技术和生物技术一样,对 21 世纪经济、国防和社会产生重大影响,可能引导下一场工业革命(Leading to the next industrial revolution),应把它放在科学技术的最优先地位。”

纳米科技的陡然升温不仅仅是尺度的缩小问题,实质是由于纳米科技在推动人类社会产生巨大变革方面所具有的重要意义所决定的。

纳米科技的发展,将促进了人类对客观世界认知的革命。人类在宏观和微观的理论充分完善之后,在介观尺度上有许多新现象、新规律有待发现,这也是新技术发展的源头。纳米科技是多学科交叉融合性质的集中体现,我们已不能将纳米科技归为哪一门传统的学科领域。而现代科技的发展几乎都是在交叉和边缘领域取得创新性突破的,正是这样,纳米科技充满了原始创新的机会。因此对于还比较陌生的纳米世界中尚待解决的科学问题,科学家有着极大的好奇心和探索欲望。而一旦在这一领域探索过程中形成的理论和概念在我们的生产、生活中得到广泛的应用,那么,它将极大地丰富我们的认知世界,并给人类社会带来观念上的变革。

与此同时,纳米科技推动产品的微型化、高性能化和与环境友好化。将极大地节约资源和能源,减少人类对它们的过分依赖,并促进生态环境的改善。这将在新的层次上为人类可持续发展提供物质和技术保证。

随着人类对客观世界认知的革命,纳米科技将引发一场新的工业变革。由于量子效应,微电子器件的极限线宽一般认为 0.07 微米(70 纳米)。根据美国半导体工业协会预计,到 2010 年半导体器件的尺寸将达到 0.1 微米(100 纳米)。这正好是纳米结构器件的最大长度。小于这一尺寸,所有的芯片需要按照新的原理来设计。为了突破信息产业发展的瓶颈,必须研究纳米尺度中的理论问题和技术问题,建立适应纳米尺度的新的集成方法和技术标准。在这一尺度上制造出的计算机的运算和存储能力,将比目前微米技术下的计算机性能呈指数倍的提高,这将对信息产业和其它相关产业的一场深刻的革命。同样,生命科技也面临着在纳米科技影响下的变革。所以,人们认为纳米科技是未来信息科技与生命科技进一步发展的共同基础。正如美国《新技术周刊》指出:纳米技术是 21 世纪经济增长的一个主要的发动机,其作用可使微电子学在 20 世纪后半叶对世界的影响相形见绌。

纳米科技也将促使传统产业“旧貌换新颜”。比如,纳米材料的研究,在化纤制品中加入纳米微粒,可以除味、杀菌;通过纳米技术的运用,使建筑物外墙涂料的耐洗刷性由原来的 1000 次提高到 10,000 多次,老化时间也延长了两倍多。这种对传统材料进行纳米改性的技术,企业应用的投入不大,而且市场前景广阔。

纳米科技的巨大影响还在于使纳米尺度上的多学科交叉展现了巨大的生命力,迅速形成一个具有广泛学科内容和潜在应用前景的研究领域。该领域可大致包括纳米材料学、纳米化学、纳米计量学、纳米电子学、纳米生物学、纳米机械学、纳米力学等七个新生学科。

第二节 国内外纳米科技的发展现状

一、美国纳米科技的发展现状

1. 美国发展纳米科技的历史回顾

为在这场以“纳米”为主题的高科技争夺战中赢得有利竞争地位，美国从上世纪 90 年代起已开始进行准备。1991 年，美国正式将纳米技术列入“国家 22 项关键技术”和“2005 年的战略技术”；1997 年，美国国防部将纳米技术提高到战略研究领域的高度；1996-1998 年间，以美国国家科学基金会为首的十余家政府机构联合出资并委托 LOYOLA 学院的“世界技术评估中心”，在美国国内以及法、德、比利时、荷兰、瑞典、瑞士、英国、俄罗斯、日本和中国台湾等地进行了为期三年的纳米技术发展情况调查研究；根据这一调查研究结果，美国总统科学顾问委员会认为：纳米技术是自二战以来美国将要经历的第一场不具备绝对领先优势的具有重要经济意义的科技革命，如果美国要在 21 世纪继续保持其经济上的领导地位和保证其国家安全，则需要在未来的 10 至 20 年中显著、稳定地增加对纳米科技研究开发的投入。

2000 年 2 月，白宫正式发布了“国家纳米技术计划”(National Nano-technology Initiative, NNI)，提出了美国政府发展纳米科技的战略目标和具体战略部署，标志着美国进入全面推进纳米科技发展的新阶段。该报告指出：纳米技术将对二十一世纪早期的经济和社会产生深刻的影响，这种影响也许可以与信息技术或细胞、基因和分子生物所带来的影响相媲美。同时报告认为，NNI 是一项跨部门的系统工程，可确保美国在这一新兴领域拥有主导地位，而这将是美国能在 21 世纪上半叶保持世界经济和国家安全领导地位的实质所在。

2. 美国联邦政府在推动纳米科技发展中的重要作用

尽管纳米科技有着及其美好的发展前景，但其目前的研发水平仍处于初始阶段，还仅仅相当于 50 年代计算机和信息技术的发展状况，因此要开发出相应的应用产品还将需要许多年时间。目前所要做的绝大部分工作仍然是基础性的，比绝大多数产业界所能承担的时间限度要长得多。正如美国前总统克林顿所说：“我们的某些目标可能需要花费 20 年或者更长时间才能达到，这也正是联邦政府在其中处于重要角色的原因所在”

美国联邦政府目前正努力在纳米科技长期和高风险投资中发挥作用，将政府对纳米科技的投资重点放在刺激合作和支持基础科学方面，帮助建立未来十年所需的纳米技术基础设施和研究支持，培养为未来纳米产业发展所需的人才储备，鼓励跨学科的网络与合作，确保信息的传播，鼓励新兴公司开发纳米技术。

2000 年 8 月，美国国家科学技术委员会专门成立了“纳米科学、工程与技术分会”(NSET)，以加强对纳米科技研发活动的领导与协调，保证 NNI 计划的实施，包括：1、项目的计划安排；2、经费预算；3、项目实施与评估等等。NSET 又下设了“国家纳米技术协调办公室”，负责日常技术与行政工作，并作为政府机构、科研院所、产业界、职业社团、国外机构以及其它组织开展纳米科技活动的联络站，还负责在 NSET 的指导下完成相关的文字材料，并维护 NNI 网站。

在纳米科技研发投入策略上，联邦政府和国会的高层官员们达成了一种共识：目前纳米技术研发的投入应以联邦政府为主，并且在相当长的一个时期内，联邦政府需要保持其投入的稳定性。表 1-2 给出了 1999-2003 年美国联邦纳米技术研发经费分部门明细表。正是基于这种认识，近几年来联邦政府在纳米科技方面的投资连年增长，从 2000 年的 2.7 亿美元增加到 2001 年的 4.64 亿美元，年增幅达 71.85%，2002 年又增长 30.4%，这种连年高增幅在联邦科技研发预算中并不多见。

3. 近五年美国纳米科技发展目标 and 主要任务

正如 NNI 报告中所阐述的：“鉴于纳米技术具有高竞争性和动态特性，及其所具有极大的投资回报潜力，目前明显需要为纳米科学、工程及人力资源的发展创立一种平衡的基础设施，现在正是国家兴起一项支持纳米技术的重要的研发推进计划的时候。”为创立这样一种平衡的基础设施，美国首先在以下 5 个方面进行了战略布局和重点投资：

长期、基础性的纳米科学和工程研究。这一发展主题旨在长期扶持从事基础性、创新性研究的单个研究人员和小型组织，并促进大学—产业界—联邦实验室和各机构间的合作伙伴关系，培育跨部门间的联合。

重大挑战。这一发展主题瞄准了纳米科技的应用开发。美国确定了总计十二项重大的挑战，这些挑战将奠定美国纳米科技发展的基础，诸如：纳米级微电子产品的低成本制造方法；更有效的能源储存装置；运用于保健和生化恐怖威胁的生物传感器等。

优秀的中心和网络。这一发展主题是促进研究的网络化和共用学术界用户设施。优秀中心和网络的建立被认为是实施 NNI 计划的关键，在特定工具的开发和利用中以及将来促进合作伙伴关系方面将扮演重要角色，它们将有力促进纳米科技在不同学科间的融合。

研究基础设施。这一发展主题的目标是建立一套能使新发明和新发现被产业界快速商业化的灵活、实用的基础设施。投资重点主要在于度量衡、检测仪器、建模和仿真以及用户设施等方面。将建立拥有新的测试设备的研究中心，并保证各研究机构都可以利用这些测试设备。

道德、法律、社会影响及劳动力教育和培训。这一发展主题主要在于培养纳米技术所需的新一代跨学科技术人才。同时对纳米技术在法律、道德、社会、经济和劳动力准备等方面对社会所产生的影响加以研究。

表 1-3 给出了美国联邦政府在这五个纳米科技重要战略布局中的经费投入。

表 1-2 1999-2003 年美国联邦纳米技术研发经费分部门明细表。单位：百万美元

部 门	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
国家科学基金会	85	97	150	199	221
国防部	70	70	123	180	201
能源部	58	58	88	91	139
国家航空航天局	5	5	22	46	51
商务部	16	8	33	38	44
国家健康研究所	21	32	40	41	43
司法部			1	1.4	1.4
环保署			5	5	5
农业部			2	1.5	2.5
交通部				2	2
总计	255	270	464	604.9	709.9

资料来源： Small Wonders, Endless Frontiers :A Review of the National Nanotechnology Initiative

表 1-3 美国联邦政府在纳米科技五个重要战略布局中的经费投入 单位: 百万美元

年份	基础研究	重大挑战	优秀的中心和网络	研究基础设施	道德、法律和社会影响及劳动力	总计
2000	87	71	47	50	15	270
2001	144	149	78	76	17	464
2002	201	180	96	97	30	604
2003	232	204	119	120	35	710

资料来源: 以上数据为《National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan》和《Small Wonders, Endless Frontiers: A Review of the National Nanotechnology Initiative》两个报告中相关数据汇总

4. 美国未来纳米科技的发展动向

不久前发布的《Small Wonders, Endless Frontiers: A Review of the National Nanotechnology Initiative》报告, 对前一阶段 NNI 计划实施状况进行了评估, 并在此基础上, 专家委员会对今后一个时期美国如何加强纳米科技研究与开发工作提出了十条建议, 这些建议是:

1) 进一步加强组织和管理

由于各部门之间需要更多的信息交流, 加上需要有更广阔的视野来洞察具有纳米科技巨大发展潜力和深远影响的交叉研究机遇, 因此专家委员会建议成立纳米科技顾问委员会 (Nanoscience and Nanotechnology Advisory Board -NNAB), 该委员会的职责是为 NSET 提供在研究投资策略、计划目标、管理程序和协调各部门执行这些计划等方面的建议。该委员会将来自产业界和学术界的领导成员组成, 他们必须具有与纳米科技相关的研发管理的经验。

2) 制定更加具体的行动计划

连续两年实施 NNI, 所涉及的研发领域十分广泛, 但是这些研发活动更多地是从每个部门需要出发, 较少从整个纳米科技发展需要进行考虑, 而且 NNI 五个发展主题存在重叠, 目标也不明确。因此专家委员会建议要制定更具体的战略计划, 这一计划应包括一整套预期结果以及达到这些结果所需的时间, 包括加速从概念到应用的机制, 相应的机制可以是引导计划、为工程应用注入新的资金、激励大学与产业界及地区孵化器合作的机制等。专家委员会要求对“重大挑战”这一发展主题重新进行调整, 将每一重大挑战集中于一个科学问题, 并提出解决这一问题的研究计划和具体的评估衡量标准。

3) 对纳米科技给予长期、连续的资助

纳米科技将带来持续的和不断增强的影响。在纳米科技短期和长期资助方面需要建立一种恰当的平衡。专家委员会并不认为应该放弃成功的短期研究, 事实上, 一些短期研究的成功, 特别是能导致应用的成果, 是获得公众支持的关键。但是, 按照委员会的意见, 现在的这一平衡应该更多地向长期资助方面倾斜。尽管对于一些特别的新思想进行长期的资助会有风险, 可是只要在这些资助中有一小部分取得成功, 就会取得重大突破, 这些突破足以补偿其它一些失败的投资。

4) 增加纳米技术和生物学的交叉研究

纳米生物学和生物医学正显示出越来越重要的作用。细胞作用的过程本身就