



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第2版

纳米科技

杨志伊 主编

Nanotechnology



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

纳 米 科 技

第 2 版

主编 杨志伊

参编 刘书进 刘同冈 陈 军

主审 王新林 朱 红

机 械 工 业 出 版 社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。作为纳米科技的基础教材,本书系统地介绍了纳米科技的内涵,即纳米物理、纳米化学、纳米测量学、纳米机械学、纳米生物学、纳米电子学、纳米材料学及其应用等。同时对所涉及的量子物理、统计物理、固体物理、介观物理、配位化学等相关基础理论也进行了简要的回顾。本书配有电子课件。

本书可供高等理工各专业本科生作为教学用书,也可作为普及纳米科技知识的基础教程,还可供相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米科技/杨志伊主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2007.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-13312-4

I. 纳... II. 杨... III. 纳米材料—高等学校—教材 IV. TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第059933号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:冯春生 责任校对:刘志文

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2007年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·345千字

标准书号:ISBN 978-7-111-13312-4

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379715

封面无防伪标均为盗版

序

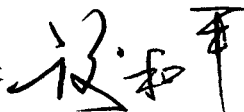
纳米科技是从20世纪80年代末、90年代初开始发展起来的新兴科学。十几年来,纳米科技受到了世界各国的高度关注,得到了迅猛发展,目前已广泛应用于材料、信息、能源、环境、生命、军事等领域。

我国政府和科技教育界高度重视纳米科技研究,特别是在纳米材料方面已取得了重要进展,引起了国际上的关注。在此基础上,国家科学技术部和教育部等五部委印发了《国家纳米科技发展纲要(2001~2010)》,对纳米科技研究和应用所面临的机遇与挑战、指导思想和原则、目标和任务、政策和措施等作了深入分析和具体规划。在此形势下,中国矿业大学积极响应五部委的通知要求,组织编写了《纳米科技》教程,开设了纳米科技选修课,并配备了相应的姐妹课——纳米科技实验课,取得了较好的效果,受到全校师生的欢迎。

本书主编杨志伊教授是博士生导师,曾被评为“国家有杰出贡献的中青年专家”和“有突出贡献的优秀归国留学人员”,并于1991年起享有政府特殊津贴。她治学严谨,重视基础理论的研究和教学,积极探索,勇于创新,多年来一直从事矿山机械领域的教学、科研和学科建设工作,其中1982年1月至1984年1月在美国俄亥俄州立大学做访问学者。她不顾年龄已高,大胆涉猎纳米科技这一科技领域,并取得了丰硕成果。本书就是她在近两年教学实践的基础上取得的一项可喜成果。在本书中,作者对纳米科技内涵、纳米物理学、纳米化学、纳米电子学、纳米生物学、纳米机械学、纳米摩擦学、纳米材料学以及相关领域作了较深入的介绍。本书的出版,必将为我国高等教育普及纳米科技知识,有效地推动这一学科领域的可持续发展和人才培养起到积极作用。

值此书出版之际,特作序言表示祝贺,并向广大读者热心推荐。

中国工程院院士、中国矿业大学校长



第2版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。自第1版出版以来，作为高等学校教材已经起到了非常好的作用及明显的教学效果。纳米科技是一门新型科技，创造发明和新成果不断出现，现国内外都将纳米科技作为重点发展领域，因此将其作为一门课程培养学生具有长远意义。

此次修订是在基本保持第1版教材体系的基础上，补充了近几年的技术成果，对上一版中不确切之处进行了改写，个别部分进行了重写，并注重理论联系实际，加强了纳米科技在各领域应用的实例介绍，争取进一步满足高等学校的教学要求。本课程讲授的学时数为54（或64）学时，实验课学时数为10~16学时。

本书由杨志伊担任主编。全书分为上、下两篇共八章。前四章为上篇，讲述纳米科技基础；后四章为下篇，讲述纳米科技应用。第一章至第四章由杨志伊编写，第五章至第七章由刘书进编写，第八章由刘同冈编写，全书多媒体课件由陈军制作。本书由王新林教授、朱红教授审阅，并提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于水平所限，加之本书涉及范围较广，错误与不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

于中国矿业大学

第1版前言

纳米科技是20世纪90年代兴起的一门新兴交叉学科,很快受到世界各国的重视,得以迅速发展。目前,纳米科技所取得的成果足以让整个社会为之震撼,使人类进一步认识了物质规律,掌握了改造微观世界的武器。纳米科技主要涵盖了物理学、化学、材料与制造、电子及计算机技术、医药与健康、航空与太空探测等领域。我国著名科学家钱学森毫不夸张地说:“纳米科技是21世纪科技发展的重点,会是一次技术革命,而且还会是一次产业革命。”它的重要意义已受到国内外科技教育界的广泛认同。

为了贯彻由教育部、科技部等五部委下发的《国家纳米科技发展纲要(2001~2010)》和落实“要从学校教育抓起,……在物理、化学、生物、机械、电子学、计算机科学等专业内部设置有关纳米科技的新课程。”的要求,迎接21世纪的科技新发展,适应纳米科技迅速发展对人才的需求,我们编写了供本科生用的《纳米科技》教材。本书在内容上力求加强基础理论的教学,使读者全面理解纳米科技内涵。即从普通物理、量子物理知识出发过渡到介观物理和纳米物理,使读者能正确理解和认识物质在纳米尺度的新现象、新规律;又从纳米化学角度介绍了纳米粉体、纳米薄膜、纳米块体的制备方法,特别强调了表面修饰和改性的重要性以及它们的应用;同时本书还讲述了纳米尺度的检测与表征,介绍了纳米科技在生物、电子、机械及其他领域的研究与应用情况。通过对本书的学习,使学生能对纳米科技的理论、技术、工艺、应用有较全面的正确了解,避免商业炒作时对纳米科技的歪曲和影响。

在本课程讲授过程中,除本教材所述内容外,还配合开设了相关的实验课,它们是:①化学共沉淀法纳米粉体的制备;②纳米粉体超顺磁性能测试;③纳米材料的应用(纳米塑料的制备)等。本课程学时数以64学时为宜,其中10学时为实验课。

本书由杨志伊主编。全书共分八章,前四章为基础知识部分,后四章为纳米科技的几大研究领域。第一章至第四章由杨志伊编写,第五章至第七章由刘书进编写,第八章由刘同冈编写。同时,应感谢刘耀福和程玉生在编审过程中提出的宝贵建议和付出的辛勤劳动。

由于书中涉及范围较广,编写中定有许多不足,错误与不当之处在所难免,敬请读者指正。

编者
于中国矿业大学

目 录

序

第2版前言

第1版前言

上篇 纳米科技基础

第一章 总论 1

第一节 纳米科技的研究意义和基本内涵 1

- 一、纳米科技的研究意义 1
- 二、纳米科技的基本内涵 2
- 三、纳米科技的研究方法 5

第二节 纳米科技的国际竞争及发展态势 5

- 一、纳米科技的国际竞争态势 5
- 二、纳米科技实用化的时间预测 10

第三节 我国纳米科技发展纲要简介 11

- 一、机遇与挑战 11
- 二、指导思想与发展原则 12
- 三、目标和任务 13
- 四、政策和措施 16

第二章 纳米体系物理学 18

第一节 量子物理基础 18

- 一、从经典物理到量子物理 18
- 二、波-粒二象性和德布罗意波 21
- 三、波函数、波动方程和不确定关系 21
- 四、势阱中的粒子、势垒 25
- 五、氢原子问题 30
- 六、电子的自旋、原子的电子壳层结构 31
- 七、能带 32

第二节 多粒子系统及量子统计 33

一、热力学基本知识 33

二、多粒子系统和统计物理 34

三、量子统计简介 38

第三节 金属的自由电子 41

一、经典理论 41

二、金属自由电子的能量与波函数 42

三、 k 空间和态密度 45

四、电子在允许状态上的分布 46

第四节 介观物理 47

一、介观系统和介观物理 47

二、介观物理典型成果 48

第五节 纳米材料体系物理 51

一、电子能级的不连续性 52

二、量子尺寸效应 53

三、小尺寸效应 54

四、表面效应 57

五、量子隧穿效应 58

思考题 58

第三章 纳米化学 60

第一节 纳米粉体的制备及与其他物质

间相容性的改善 61

一、纳米粉体的团聚问题和表面

修饰 61

二、纳米微粒制备 63

三、纳米材料表面修饰以改善同其他物质之间的相容性 69

第二节 超分子体系与分子自组装

技术 69

一、超分子体系 69

二、分子自组装技术 71

三、富勒烯—— C_{60} 73

四、碳纳米管 75

第三节 纳米化学性质 78

一、纳米粒子的催化作用	79
二、光催化作用及半导体纳米粒子光 催化剂	79
第四节 纳米薄膜	80
一、纳米薄膜的制备	81
二、纳米薄膜的应用	83
三、LB膜技术及其应用	86
第五节 纳米块体材料	88
一、纳米块体的制备	88
二、纳米块体材料的结构特点	90
三、纳米块体材料的性能	92
思考题	100
第四章 纳米测量学和纳米材料的 表征	102
第一节 超细粉体测试技术	102
一、粒度的表征	102
二、粒度及表面形状测量技术	103
三、粒子表面电性能测量及 Zeta 电 泳仪	107
第二节 电子光学表面分析方法在纳米 测量中的应用	107
一、低能电子衍射 (LEED)	108
二、电子显微镜和电子探针	109
三、俄歇电子谱	110
四、离子探针	110
五、原子探针和场离子显微镜	111
第三节 扫描隧道显微镜	114
一、扫描隧道显微镜 (STM)	114
二、原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM)	115
第四节 近场光学显微镜	117
一、基本原理	117
二、基本构成	118
三、应用	119
第五节 纳米结构表征与检测	120
一、纳米结构的表征	120
二、我国进展情况	120
三、展望	121
思考题	121

下篇 纳米科技应用

第五章 纳米机械学	122
第一节 微机械的发展历程	123
第二节 纳米机械学的范畴与组成	125
一、纳米机械学的概念	125
二、纳米机械学的研究范围	126
三、纳米机械学的组成	126
第三节 微机械的特性及超微加工 技术	127
一、微机械的特性	127
二、超微加工技术	128
第四节 纳米摩擦学	133
一、纳米摩擦学产生的背景和影响 因素	133
二、纳米摩擦学的研究方法	134
三、纳米摩擦学的主要研究内容	135
四、微观摩擦	136
五、零摩擦状态	137
六、纳米级薄膜润滑	138
七、微观磨损与纳米加工	141
第五节 纳系统技术	141
一、简单概述	141
二、纳机械	143
三、纳电子器件和系统	145
四、纳流体器件和系统	147
五、生物纳系统	147
第六节 纳米机械学研究展望	148
一、纳米机械研究现状	148
二、纳米机械学的研究方向	148
思考题	150
第六章 纳米生物学	151
第一节 引言	151
第二节 纳米生物学中生物大分子的 结构和功能的研究	151
一、脱氧核糖核酸 (DNA)	152
二、基因工程 (遗传工程)	154
第三节 纳米医学	158
一、引言	158
二、纳米科技在医学方面的应用	159

第四节 生物计算机	162	应用	190
一、生物计算机的研究目的和国外 进展	162	第一节 纳米塑料	190
二、生物计算机的特点	162	一、纳米塑料的制备方法	190
三、生物分子计算机的基本原理	163	二、纳米塑料的性能	193
四、生物分子计算的基本思想	164	三、典型纳米塑料举例	195
第五节 纳米生物机械	167	第二节 纳米陶瓷	198
一、分子电机	167	一、纳米陶瓷的制备工艺	198
二、典型的分子电机	169	二、纳米陶瓷的结构和性能	200
三、其他纳米生物机械	170	三、纳米陶瓷的应用	203
第六节 生物芯片技术	171	第三节 纳米复合涂料	204
一、概述	171	一、纳米复合涂料的分类和功能	204
二、生物芯片技术的主要内容	171	二、纳米复合涂料实例	207
三、发展情况	172	第四节 纳米复合纤维	208
思考题	173	一、紫外线防护纤维	208
第七章 纳米电子学	174	二、远红外功能纤维	211
第一节 微电子技术发展的限制	174	三、抗菌防臭和除臭纤维	215
一、光刻技术的限制	174	第五节 纳米磁性液体	219
二、电子行为的限制	175	一、磁性液体的组成	219
三、功耗的限制	175	二、磁性液体的制备	220
第二节 纳米电子技术的主要领域	175	三、磁性液体的特性	222
一、纳米电子学理论	175	四、磁性液体在工业上的应用	223
二、纳米电子器件	176	第六节 纳米晶太阳能电池	229
三、纳米电子材料及其组装技术	181	一、纳米晶光电化学太阳能电池	229
第三节 分子电子学	182	二、纳米晶固体半导体光伏电池	232
一、引言	182	第七节 纳米技术在军事领域中的 应用	234
二、典型的分子电子器件	182	一、纳米新材料在武器装备中的 应用	234
三、主要困难	185	二、纳米隐身技术	238
第四节 纳米电子技术发展概况	185	三、纳米技术支撑下武器装备的微型 化和智能化	239
一、国外纳米电子技术的发展	186	思考题	242
二、我国纳米电子技术的发展	187	参考文献	243
思考题	189		
第八章 纳米科技在其他领域中的			

上篇 纳米科技基础

第一章 总 论

纳米科技是 20 世纪 80 年代发展起来的交叉、前沿的新兴学科领域,将对未来的科技、经济和社会发展产生重大影响,世界上所有发达国家的政府和企业都对纳米科技的研发投入了大量的资金,试图抢占这一 21 世纪的科技战略制高点。我国也制定了《国家纳米科技发展纲要(2001~2010)》,将对我国新世纪的发展产生深远影响。

第一节 纳米科技的研究意义和基本内涵

一、纳米科技的研究意义

纳米是一个长度单位。 $1\text{ 纳米}(\text{nm})=10^{-3}\text{ 微米}(\mu\text{m})$,即 $1\text{ nm}=10^{-3}\mu\text{m}=10^{-6}\text{ mm}=10^{-9}\text{ m}$ 。纳米科技就是指在纳米尺度($1\sim 100\text{ nm}$)上研究物质的特性和相互作用,以及利用这些特性的多学科交叉的科学与技术(关于纳米技术的尺度界定,目前还不是很统一,北京理工大学林鸿溢教授引用的空间尺度是 $0.1\sim 100\text{ nm}$ 的范围,因为 0.1 nm 是最小的原子——氢原子的直径)。它在材料、信息、能源、环境、生命、军事、制造等领域具有广泛的应用前景。

中国科学院白春礼院士指出:纳米科技的重要意义首先将促使人类认知的革命,同时将引发新的工业革命,从而对我国的社会、经济及国家安全产生重大影响。

纳米尺度介于宏观和微观之间,属于介观尺度更接近于微观的部分,是人类非常陌生的领域,有大量的新现象、新规律有待发现,充满了原始创新的机会,是新技术发展的源头。纳米科技已不能归附于任何一门传统的学科领域,人们必须重新审视、理解和创立新理论。可持续发展是人类生存的惟一选择,纳米科技在推动产品高性能、微型化、环境友好,节约能源、资源,促进生态环境改善方面起到关键的作用。纳米科技引发的产业革命,首先表现在信息产业。纳米器件将代替微电子器件,芯片的设计需要符合纳米物理理论的原则,集成方法将改变;所有的生产线均要进行相应的调整,检测方法、手段、标准都要变化。这将是一场深刻的产业革命。生命科学也将因纳米科技的发展出现新的突破,生物计算机将是信息科学和生命科学进一步发展的共同基础。纳米材料的出现也促使传统产业焕发青春,染料、涂料、建材、纺织等行业均因纳米材料的应用和改性,使性能有很大提高,大大拓宽了市场。

21 世纪,世界进入知识经济时代,纳米科技因其对信息科学和生命科学的巨大推动作用而被发达国家列为绝对的国家机密和商业机密,严格限制对我国出口。但我国比发达国家起步不晚,特别是因为纳米科技属崭新的学科,传统学科影响相对较小,为我国跨越式的发展提供了可能,只要政策和方法对,我们抓住这一机遇,就能使我国在进入知识经济时代产生飞跃。

二、纳米科技的基本内涵

纳米科技(Nano-ST)是指在纳米尺度认识自然界,改造自然界,重新安排自然界,通过直接操作和安排原子、分子以创造新的物质。纳米科技就是研究纳米尺度的物质和体系的运动规律、相互作用和在其应用中存在的技术问题。

(一) 纳米物理学

纳米材料体系是指在零维、一维、二维或三维保持纳米尺度的材料体系,它们是纳米微粒、原子团簇、纳米丝、纳米管、纳米薄膜或由纳米粒子组成的块体。纳米物理学将深入揭示物质在纳米空间的物理过程和物理特性。它以纳米固体为研究对象,对重要物理问题进行研究。当物质小到纳米量级时,就会表现出量子效应、小尺寸效应、物质的局域性效应,以及由于表面和界面原子比例大大增加而表现出来的表面效应等,使物质的很多性能发生变化,呈现出既不同于宏观物体,也不同于单个孤立原子的奇异性能。

电子在物体内部都处于一定的能态上,称为能级;宏观物体内部电子数趋于无穷大,电子能级也就形成了密密麻麻准连续的能级带,称为能带。当物体的尺寸小到纳米量级时,纳米粒子中所含的总电子数会大大减少,这时电子能级总数也会减少,能级带的连续性发生分裂,形成离散的能级。当能级间距足够大时,会导致纳米粒子的光、电、磁、声、热、力学等特性发生显著的变化。如其力学性质不能再用连续介质力学来描述,磁性能也因纳米尺度而发生了变化,铁磁物质表现出超顺磁性、巨磁效应等。这些奇异性质的存在,迫使我们从物质的演化以及运动规律上去找原因。揭示这些奇异现象的本质即开发物质潜在信息是研究纳米物理学的任务。

(二) 纳米化学

纳米化学是当代化学中最富有挑战性的分支,它以纳米粒子或团簇的合成、表征及其化学性质为主要研究对象,着重研究不发生团聚的纳米产品的制备措施,改善纳米材料与其他物质相容性的方法,超大分子合成和自组装技术以及纳米材料的催化性能等。此外纳米陶瓷材料、纳米润滑材料、纳米磁性材料、纳米复合材料等还存在着大量需要解决的化学问题,这正是纳米化学所关注的要点。

(三) 纳米电子学

纳米电子学主要研究尺度为纳米量级的电子器件、理论和它们的制造技术。各种传统电子元器件都是通过控制电子数量来实现信息处理的。例如,开关器件是通过控制电子流的有无来实现电路的通断的,以 1 和 0 表示有、无电流通过;放大器件则是通过控制电子数目多少来完成放大功能的。但是,在纳米空间电子的波动性是不可忽

略的，经特殊设计的纳米器件中，电子将以波动性质表征其特性，这种器件也称为量子功能器件。在纳米空间电子所表现的特征和功能，是纳米电子学研究的范畴。量子功能器件不单纯通过控制电子数目的多少，还要通过控制电子波动的相位来实现某种功能。量子相干效应、A-B 效应（弹性散射不破坏电子相干性）、普适电导涨落、库仑阻塞效应等将成为量子器件的设计指导思想。量子功能器件响应速度高、功率消耗低。例如，现有硅（Si）和砷化镓（GaAs）器件不管如何改进，其响应速度最高只能达到 1ps（ $1\text{ps}=1\times 10^{-12}\text{s}$ ），功耗最低只能降到 $1\mu\text{W}$ ；而量子功能器件的相应数据要优化 $10^3\sim 10^4$ 倍。此外，纳米功能器件的线宽更小，集成度更高。纳米电子学不但为量子功能器件的制造展示了美好的前景，同时也给电子工业带来了一场革命。

（四）纳米机械学

纳米机械学包括微机构学、纳米加工、纳米摩擦学和纳系统技术几部分。它是集纳米技术、微电子技术、机械制造技术为一体，以制作纳米机械装置（又称微型机械或微机电系统）为目的的学科。尽管处于起始状态，但展现出诱人的前景。

微机电系统（MEMS）不是传统机械的相似缩小，其学科基础、研究内容和研究手段也不同于传统的机械电子。典型的 MEMS（这是美国的称谓，欧洲称为 Mcir-osystem，而日本则称为 Micromachine）包括多个传感器、执行器和处理电路等元部件，并把它们集成为一个智能化的有机整体。图 1-1 给出了典型的 MEMS 与外部世界的相互作用。

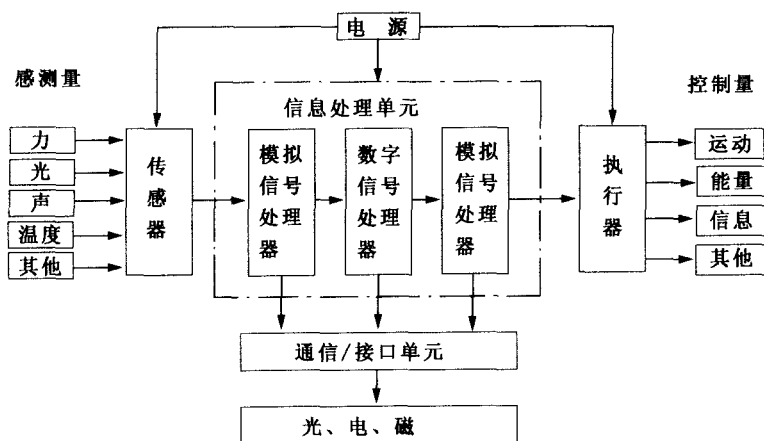


图 1-1 MEMS 与外部世界的相互作用示意图

MEMS 的基础理论首推小尺寸效应，同时表面力的作用成为主导，而物体力成为次要因素；某些微观尺度的短程力所具有的长程作用效应及其所引起的表面效应将起重要作用。纳米加工包含体型微机械加工工艺、表面微机械加工工艺、LIGA 技术（光刻—电铸—成形）以及 MEMS 封装技术；而纳米摩擦学关注的是零摩擦、零磨损和薄膜润滑。此外 MEMS CAD 和检测技术也是人们关心的研究方向。目前已经研制

出具有体积小、重量轻、功耗低的 MEMS 器件,如:①微传感器,包括检测力学量、磁学量、热学量、化学量、生物量等敏感传感器;②微执行器,包括微电机、微齿轮、微泵等;③微型构件,包括微梁、微探针、微腔、微沟道等;④微机械光学器件,包括微镜阵列、微光扫描器、微光开关等;⑤微机械射频器件;⑥真空电子器件;⑦微能源和微动力源等。

MEMS 的标准化问题也日渐引起研究者的注意,这也是纳米机械学产业化的新动向。

(五) 纳米生物学

生物技术亦称生物工程。在分子水平上通过基因剪裁组合和细胞融合等方法改变生物的性状是纳米生物学的主要任务,以分子自组装为基础的生物分子器件是目前研究的热点。美国早在 1995 年就利用蛋白质器件研究成功生物电脑;我国 2001 年就已完成了水稻基因组全序列测定工作,并完成了由全球科学家共同合作的人类基因组全序列测定项目中中国承担的部分。

纳米医学是纳米生物学的重要组成部分,在药剂学中,将药物粉末或溶液包埋在微米级或纳米级的颗粒中,可使药物在预定时间内自动按某一速度从剂型中恒速缓释作用于器官或特定靶组织。霍普金斯大学发明一种可直接将药物导入癌组织的铁氧体纳米粉粒技术,可望代替化疗。纳米金属粉末是制备动物生长素药物的添加剂,有望大规模制造人用生长激素和干扰素。用数层纳米粒子包裹的智能药物进入人体后,可主动搜索并攻击癌细胞或修补损伤组织。在人工器官外涂上纳米粒子,可预防移植后的排斥反应。微型机器人可进入人体血管到达各个脏器,进行生物医学的基础研究和微型手术及组织修复。在疾患早期诊断上,纳米传感器系统也起到了重要作用。

(六) 纳米材料学

纳米材料是纳米科技发展的重要基础。纳米材料的研究主要包括三个方面:①纳米材料的制备;②纳米材料的特性;③纳米材料的应用。纳米材料的粉体颗粒包含的原子数约为 $10^2 \sim 10^7$ 个,其中 50% 以上为界面原子。纳米粉体系统具有尺寸效应、量子效应、表面效应、耦合效应及可能的混沌现象。纳米材料的性能研究包括硬度、强度、韧性、电性、磁性、微结构和谱学特征,通过与常规材料对比,可找出纳米材料的特殊规律,建立描述和表征纳米材料的新概念和新理论。纳米材料的应用研究更是涉及各行各业,最具有代表性的如纳米陶瓷、纳米塑料、纳米润滑材料、吸波材料、纳米磁性液体、巨磁材料等。当然微电子行业用的量子器件、纳米生物工程、微型机械也都属于纳米材料的应用范围。

(七) 纳米测量学

为了在纳米尺度上研究材料和器件的结构及性能,发现新现象,发展新方法,创造新技术,必须建立纳米尺度的检测与表征手段。扫描探针显微技术的出现,标志着人类对微观尺度的探索进入到一个全新的阶段。1982 年,宾尼希(Binnig)和罗雷尔(Rohrer)首先研制成功扫描隧道显微镜(STM),为人类在纳米尺度,乃至在原子水平上研究物质的表面原子、分子的几何结构及与电子行为相关的物理、化学性质开

辟了新的途径。正因如此，他们获得了 1986 年诺贝尔物理奖。在 STM 出现以后又相继出现了原子力显微镜（AFM）、磁力显微镜、电容扫描显微镜等，特别是近场光学显微镜与 STM 相比更具特色。就纳米粉体而言，透射电子显微镜和光子相关谱仪（PCS）等更实用，在纳米粉体工业化生产中光子相关谱仪更适用。

总之，必须全面理解纳米科技的内涵，防止概念上的谬误和商业炒作。对纳米科技的理解不仅仅是纳米材料，如果以研究对象和工作性质来区分，纳米科技必须包括纳米材料、纳米器件和纳米尺度的检测与表征。材料是基础，器件是应用水平的标志，检测和表征是纳米科技研究与发展的实验基础和必要条件。本教材正是本着这个精神组织教学内容的。

三、纳米科技的研究方法

为制造具有特定功能的纳米产品，其技术路线可分为“自上而下”（Top Down）和“自下而上”（Bottom Up）两种。“自上而下”是指通过传统的微加工或固态技术，不断在尺寸上将功能产品微型化；而“自下而上”是指以原子、分子为基本单元，根据人们的意愿进行设计和组装，从而构筑具有特定功能的产品。这两种研究方法都可以用来衡量纳米科技的发展水平。

第二节 纳米科技的国际竞争及发展态势

纳米科技所蕴涵的巨大发展潜力和广阔的市场前景吸引着各国的关注。美国、欧洲、日本等一些科技先进国家纷纷启动重大研究计划，投入大量的资金，积极地以国家整体实力来推动纳米科技的发展，抢占战略制高点。

一、纳米科技的国际竞争态势

（一）美国纳米科技的发展概况

早在 1959 年美国物理学家理查德·范曼就提出：如果能控制物体微小规模的排序，将获得有奇异性能的物质。1977 年美国麻省理工学院学者认为上述设想可从模拟活细胞中生物分子的研究开始，并定义为纳米技术。1990 年美国 IBM 公司的两位科学家用 35 个 Xe（氙）原子排出了字高 5nm 的 IBM 字样。1990 年 7 月在美国巴尔的摩召开了首届纳米科技的国际学术会议，这一年被认为是纳米科技正式诞生的年代，足见美国在这一领域的确处于领先地位。

1. 2004 年以前纳米研究情况

（1）研究计划 美国早在 1991 年 4 月就正式把纳米技术列入“国家关键技术”的第 8 项和“2005 年的战略技术”。2001 年 1 月 21 日美国克林顿总统宣布了“纳米技术倡议（NNI）”，涉及国家科学基金会、国防部、商务部等 12 个部门，分解落实了美国国家的 NNI 计划，制定了各部门的发展计划：

1) 美国国家科学基金会（NSF）在 2000 年提出的“纳米科学与工程”研究计划

包括：纳米尺度的生物系统，纳米结构、新现象和量子控制，纳米器件与系统的结构、设计工具和纳米系统的专门软件；环境方面的纳米技术处理；在纳米尺度下的多数值范围、多现象的模型和数值模拟；纳米科学技术对社会的影响。

2) 国防部提出了：“科学研究倡议 (SROs) 计划”，包括：纳米科学；生物模仿；功能材料和压实粉末源材料。

3) 商务部认为纳米结构材料和纳米器件应用广泛，可用于制药、生物工程、色素、电子学、光电磁器件以及具有特性的涂层。

4) 国防先进研究计划局提出“极端电子计划”目标是开发超高密度超快计算组件，探索并研究材料、处理技术、量子器件等。

5) 能源部、科学研究航空动力办公室也都制定了相关计划。

(2) 重点研究领域 美国 12 个联邦机构共同关注的领域包括：①纳米结构材料的合成、加工、特性和表征；②与电子学有关的纳米制造研究；③纳米粒子和纳米薄膜的批量生产；④纳米结构材料在能源方面的应用；⑤用于生物化学和传感器开发的神经通信技术和生物芯片技术；⑥纳米结构的热、力、磁、电及热动力学特性的测量研究；⑦开发具有纳米尺度和皮秒 (10^{-12}s) 时间分辨率的器件等。

在 2000 年美国国家纳米技术倡议 NNI 中所重点支持的领域包括：

1) 长期进行纳米研究的机构和个人，它们在机械与材料、纳米电子学、医学与卫生、环境与能源、化学与制药、生物技术与农业、信息与计算技术及国家安全领域长期工作。

2) 重大挑战领域，如：①单位面积的存储量增加 1000 倍的存储器；②用分子或原子制造材料和产品；③强度为钢的 10 倍，重量仅为钢的几分之一材料；④提高计算机的速度，并使存储芯片的效率提高百万倍；⑤利用药物或基因检测癌细胞；⑥环保；⑦提高太阳能电池的能效等，要给予重点支持。

3) 建立中心和网络以便资源共享。

4) 加强基础研究设施。

5) 教育、培训。

除了 NNI 所重点支持的领域之外，相关的 12 个部门也都推出了自己的支持重点：

1) 美国国家基金会提出六个重点领域：①纳米尺度的生物系统；②纳米结构、新现象和量子控制；③纳米器件与系统的结构；④环境方面的纳米技术过程；⑤纳米尺度下的多数值范围、多现象理论、模型和数值模拟；⑥纳米尺度的科学技术进步对社会的影响。

2) 美国国防部重点支持领域有四个：①超轻超强的纳米材料；②自适应智能材料；③适时预警、处理信息的微型传感器；④远距离医学微型器件。

3) 美国商务部属下的国家标准与技术研究院提出了三个重点支持领域：①开发新的原子尺度的长度、质量、化学成分和其他特性的测量技术；②开发产业界在原子或分子水平上组装新器件的实用制造技术；③纳米科技影响美国人的经济和生活的新

的测量方法、标准和数据。

4) 美国宇航局的资助重点为：①飞行器的小型化；②储氢和化学处理在空间的应用。

5) 美国能源部支持重点领域有四个：①纳米尺度的聚集现象；②生产所需的原子水平设计和合成的功能材料；③生物有机体创造材料和功能复合物过程；④驱动纳米技术革命的实验表征工具、理论、建模和模拟工具。

(3) 投入力度

1) 1997~1998 年度美国联邦政府部门共投入了 1.15 亿美元于纳米科技的研究经费，其中 25% 为应用研究项目；同期，国家科学基金会在纳米科技方面的投资为 6500 万美元，占 1.15 亿美元的 60%。美国能源部投入了 700 万美元，美国商务部属下的国家标准与技术研究院投入了 400 万美元。

2) 2001 年度美国联邦政府 NNI 的经费投入为 4.95 亿美元，较 2000 年投入的 2.7 亿美元增加了近 1 倍，是 1997~1998 年度投入的 4 倍多。表 1-1 为美国 2000~2001 年度联邦政府机构的纳米研究开发经费分配情况。表 1-2 给出了该年度美国按研究项目分配的纳米研究开发经费情况。

表 1-1 美国 2000~2001 年度联邦政府机构的纳米研究开发经费分配情况

政 府 机 构	2000 年经费/百万美元	2001 年经费/百万美元	增长率(%)
国家科学基金会	97	217	124
国防部	70	110	57
能源部	58	96	66
航空航天局	4	20	400
商务部	8	18	125
国家卫生研究院	32	36	13
总 计	270	497	84

表 1-2 美国按研究项目分配的纳米研究开发经费情况

项 目	经费/亿美元	占全部经费的比例 (%)
基础研究	1.95	39.2
重大挑战项目	1.10	22.1
杰出中心和研究网络	0.77	15.5
基础研究设施	0.87	17.5
伦理、法律和社会影响以及教育培训	0.28	5.6
总经费	4.95	100

2. 《21 世纪纳米研发法案》

2004 年，美国总统布什签署了《21 世纪纳米研发法案》 [The 21st Century Nanotechnology Research and Development Act of 2003 (Public Law 108~153)]，以法律的形式保证 2005 年以后的 4 年，政府对纳米科技有一个稳定的投入。美国能源部确定了未来 20 年科学发展的战略规划，其“重中之重”的项目有：①聚变能研究的 ITER 项目；②通过科学计算丰富科学发现；③发展纳米科学，开发新材料、新方

法；④征服微生物世界（基因组学的下一次革命）；⑤研究暗能量，探索宇宙起源；⑥研究极端条件下的核物质。

美国科技政策办公室和预算管理办公室的预算指导备忘录中提出的 2005 年预算的优先选择领域有五个，其中纳米科技为第二位（其他第一位为反恐研究支出；第三位是网络和信息技术研发支出；第四位是生命过程的分子水平研究；第五位是环境与能源领域）。从美国政府和政策上面看，已经把纳米科技放到了明确的地位。

（二）日本国纳米科技发展概况

1. 纳米研究计划

日本科学技术厅是日本政府纳米技术研究计划的主要推行者。早在 1981 年的“先进技术探索研究（ERATO）”就有许多纳米科技的研究内容，如与量子效应和纳米结构有关的量子波计划（1988～1993 年）；包括用扫描隧道显微镜操纵单个原子的原子工艺计划（1989～1994 年）；包括电子全息技术和超导薄膜中的 Fluxones 运动的电子波前计划（1989～1994 年）；包括非确定性原理、量子非破坏性测量和单电子控制的量子波前计划（1993～1998 年）。

自 1991～2001 年，日本通产省制定了与科技厅全面协作且接受国家资助的纳米科技计划。它们分别是：

1) 原子技术计划（耗资 1.85 亿美元）。

2) 量子功能器件（耗资 4000 万美元）。

3) 分子极限操纵的研究与开发（耗资为 2.5 亿美元），其中 1.67 亿美元用于微机器人的开发。

与此同时，私人企业也投资了 10 亿美元于纳米技术的研发。

2. 重点研究领域

日本“原子技术计划”的研究领域有以下五个方面：

1) 利用分子探针技术测量并控制原子层次的结构。

2) 利用电子束技术观测并形成原子尺度结构的技术。

3) 观测并操纵有机分子结构。

4) 研究新的电子材料和与开发原子技术有关的物理学。

5) 研究原子和分子加工的理论方法。

日本通产省对纳米科技的应用基础研究最感兴趣的有两项：一是纳米微机械，一是纳米生物技术。它们的主要研究领域为：

1) 量子器件及其无机介观结构。

2) 涉及蛋白质、生物技术的自下而上所形成的结构，生物技术属于这一领域。

3) 量子效应器件，如量子阱、量子线、量子点等。

3. 投入力度

日本在 1991～2001 年共投入 2.25 亿美元，其中原子技术计划 1.85 亿美元，量子功能器件 4000 万美元，调动企业投资是日本的一大特点，企业投资几乎是政府投资的 3～4 倍。