

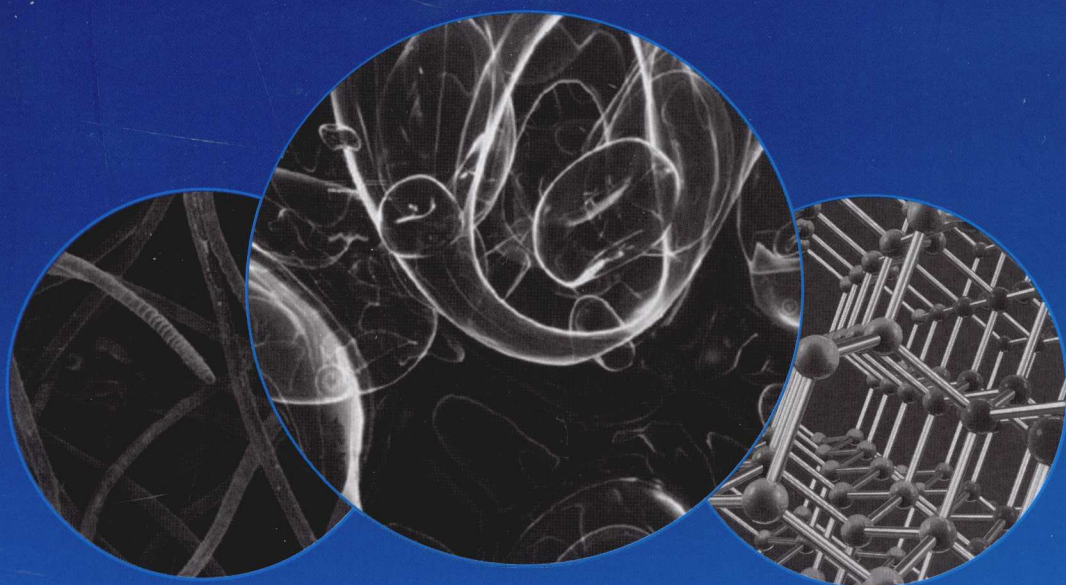
高等学校教材



纳米材料与纳米技术

徐志军 初瑞清 编著

**Nanomaterials
and
Nanotechnology**



化学工业出版社

高等学校教材

纳米材料与纳米技术

Nanomaterials and Nanotechnology

徐志军 初瑞清 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是高等学校教材。全书介绍了纳米材料的结构和性能以及制备方法,并讲述了纳米材料的应用和纳米材料与技术的新进展。本书主要任务是使材料专业本科生对纳米材料有一个比较广泛的了解。通过本课程的学习可了解到纳米材料和技术的发展趋势,掌握纳米材料的基本知识和基本理论,包括纳米颗粒,纳米管线,纳米薄膜,纳米固体材料,纳米结构的概念、特点、性能和制备方法等。全书共分9章,第1章综述了纳米材料与纳米技术的发展历程;第2章讲述了纳米材料的分类、概念及其特性;第3章讲解了纳米粉体材料的制备技术及其特点;第4章到第6章分别介绍了一维纳米碳管、纳米固体材料、介孔材料的特点及其制备方法;第7章是纳米材料的分析表征技术;第8章叙述了纳米材料的应用;第9章为有关纳米材料的潜在危害。

本书适合从事或有兴趣于纳米材料与纳米技术研究或教学的教师、研究生、本科生等人员阅读,另外,有些章节也可作为科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

纳米材料与纳米技术/徐志军,初瑞清编著. —北京:
化学工业出版社,2010.5
高等学校教材
ISBN 978-7-122-08039-4

I. 纳… II. ①徐…②初… 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(2010)第050593号

责任编辑:杨菁
责任校对:陈静

文字编辑:李玥
装帧设计:杨北

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京市彩桥印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张10 $\frac{3}{4}$ 字数252千字 2010年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:23.00元

版权所有 违者必究

前 言

纳米材料与纳米技术的灵感，来自于诺贝尔奖获得者 Richard Feynman 于 1959 年所作的《在底部还有很大空间》的演讲。他以“由下而上的方法”（bottom up）出发，提出从单个分子甚至原子开始进行组装，以达到设计要求。他说道，“至少依我看来，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。”并预言，“当我们对细微尺寸的物体加以控制的话，将极大地扩充我们获得物性的范围。”

预言至今，纳米材料与纳米技术研究领域迅速拓宽，内涵不断扩展。目前，普遍接受的定义为基本单元的颗粒或晶粒尺寸至少在一维上小于 100nm，且必须具有与常规材料截然不同的光、电、热、化学或力学性能的一类材料体系。纳米材料的奇异性是由于其构成基本单元的尺寸及其特殊的界面、表面结构所决定的。

纳米科技是面向尺寸在 1~100nm 之间的物质组成的体系的运动规律和相互作用以及在实际应用中实现特有功能和智能作用的技术问题，发展纳米尺度的探测和操纵。它从思维方式的概念表明生产和科研的对象将向更小的尺寸、更深的层次发展，将从微米层次深入至纳米层次。纳米技术未来的目标是按照需要，操纵原子、分子构建纳米级的具有一定功能的器件或产品。纳米科学与技术主要包括：纳米体系物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米生物学、纳米电子学、纳米加工学、纳米力学、纳米测量学八个相对独立又相互渗透的学科。纳米科学与技术又分为纳米材料、纳米器件、纳米尺度的检测与表征三个研究领域。纳米材料的制备和研究是整个纳米科技的基础。扫描隧道显微镜（STM）在纳米科技中占有重要的地位，它贯穿到七个分支领域中，以其为分析和加工手段所做的工作占一半以上。

纳米材料与纳米技术的发展为新材料开发开拓了一条全新的途径，并注入了新的活力，必将推动信息、能源、环境、生物、农业、国防等领域的技术创新，称为继工业革命以来三次主导技术引发的产业革命之后的第四次浪潮的基础。为了让大学生、硕士生了解和认识纳米材料与纳米技术的基本知识、方法、概念和发展趋势，我们为大学高年级本科生和硕士生开设了纳米材料与纳米技术选修课，本书就是在这门选修课讲义的基础上编写而成的。通过本课程的学习，让学生能够基本了解和认识到纳米材料与纳米技术的方方面面，掌握相关内容的原理，为其奠定一定的纳米材料与纳米技术的理论基础，有利于以后开展相关工作。

书中编著者自己的研究成果是在国家自然科学基金（50602021）“钛酸钡单晶超高压电性能与机理的研究”与国家高技术研究发展计划（“863”计划，2006AA03Z437）“高使用温度无铅 PTCR 半导体陶瓷及其多层片式器件制备技术”支持下取得的，正是由于这两项基金的支持，才得以使本书顺利完成，在此致以诚挚的谢意。

本书的编著过程中，参考了很多同纳米材料与纳米技术相关的著作、学术论文以及互联网上的文章。这些都给予了本书编著者很大的启迪、参考以及支撑作用，在此对辛勤工作的专家、学者表示由衷的感谢。

本书适合于从事或有兴趣于纳米材料与纳米技术研究或教学的教师、硕士生、本科生等人员阅读，有些章节也可作为科普读物。但纳米材料与纳米技术的研究发展十分迅速，新的成果不断涌现，文献资料浩瀚无边、日新月异，由于编著者的水平有限，书中难免有疏漏与不妥之处，恳请专家、学者和读者批评指正！

徐志军
2010年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米材料与纳米技术发展历史	1
1.1.1 纳米材料与纳米技术的诞生	1
1.1.2 纳米材料与纳米技术的发展	1
1.2 中国纳米材料与技术发展概况	3
1.3 纳米材料热点领域的新进展	6
1.3.1 纳米组装体系的设计和研发	6
1.3.2 高性能纳米结构材料的合成	7
1.3.3 纳米添加使传统材料改性	7
1.3.4 纳米涂层材料的设计与合成	7
1.3.5 纳米颗粒表面修饰和包覆的研究	8
参考文献	8
第 2 章 纳米材料	9
2.1 纳米材料的分类	9
2.1.1 纳米微粒	9
2.1.2 纳米固体	10
2.1.3 纳米组装体系	11
2.2 纳米材料的性质	11
2.2.1 纳米材料的表面效应	12
2.2.2 纳米材料的小尺寸效应	12
2.2.2.1 特殊的光学性质	13
2.2.2.2 特殊的热学性质	13
2.2.2.3 特殊的磁学性质	14
2.2.2.4 特殊的力学性质	14
2.2.2.5 电学性质	14
2.2.3 纳米材料的宏观量子隧道效应	14
2.3 纳米材料的团聚与分散	15
2.3.1 纳米材料的团聚	15
2.3.2 纳米颗粒在液体介质中的团聚机理	16
2.3.3 纳米颗粒在气体介质中的团聚机理	18
2.3.4 纳米颗粒的分散	19
2.3.5 气体介质中纳米粉体分散技术与机理	19
2.3.6 液体介质中纳米粉体分散技术与机理	20
2.4 纳米颗粒表面修饰	21

2.4.1	表面物理改性	21
2.4.2	表面化学改性	21
	参考文献	23
第3章	纳米粉体制备	25
3.1	纳米粉体材料的物理法制备	25
3.1.1	蒸发冷凝法	25
3.1.1.1	电阻加热法	26
3.1.1.2	高频感应法	26
3.1.1.3	溅射法	26
3.1.1.4	流动液面真空蒸镀法	26
3.1.1.5	通电加热蒸发法	27
3.1.1.6	混合等离子体法	27
3.1.1.7	激光诱导化学气相沉积 (LICVD)	28
3.1.1.8	化学蒸发凝聚法 (CVC)	29
3.1.1.9	爆炸丝法	29
3.1.2	机械合金化 (MA)	29
3.1.2.1	MA 物理过程	29
3.1.2.2	MA 工艺过程	30
3.1.2.3	MA 工艺特点	30
3.1.2.4	MA 工艺的主要影响因素	31
3.1.2.5	MA 工艺中的理论研究	33
3.2	纳米粉体材料的湿化学法制备	37
3.2.1	液相中生成固相微粒的机理	37
3.2.2	溶胶-凝胶法 (Sol-Gel)	39
3.2.2.1	溶胶-凝胶技术的原理	39
3.2.2.2	溶胶-凝胶技术的前驱体分析	40
3.2.2.3	溶胶-凝胶技术的应用举例	41
3.2.3	微乳液技术	44
3.2.3.1	微乳反应器原理	45
3.2.3.2	微乳反应器的形成及结构	45
3.2.3.3	微乳液法的应用举例	47
3.2.4	喷雾热分解 (SP) 法	48
3.2.4.1	喷雾技术	48
3.2.4.2	喷雾热分解合成步骤	49
3.2.4.3	喷雾热分解应用举例	51
3.2.5	水热法	52
3.2.5.1	水热法原理及特点	53
3.2.5.2	水热法的装置——高压釜	54
3.2.5.3	水热法的分类	54
3.2.5.4	水热法应用举例	55

3.2.6	沉淀法	56
3.2.6.1	沉淀法的原理	56
3.2.6.2	沉淀法原料选择及溶液配制	57
3.2.6.3	沉淀法的应用举例	57
3.3	纳米粉体材料的湿声化学法制备	59
3.3.1	湿声化学法简介	59
3.3.2	湿声化学法工艺过程与特点	60
3.3.3	湿声化学法的机理	61
3.3.4	湿声化学法的应用举例	61
3.3.4.1	PZT 粉体合成	61
3.3.4.2	SBT 粉体合成	61
	参考文献	62
第4章	一维纳米材料——纳米碳管	67
4.1	纳米碳管的性质及其应用	67
4.1.1	纳米碳管的结构	67
4.1.2	纳米碳管的性质	68
4.1.3	纳米碳管的应用	69
4.1.3.1	纳米电子学方面	69
4.1.3.2	复合材料领域	70
4.1.3.3	能源方面	71
4.1.3.4	医疗领域及生物工程	71
4.1.3.5	化学领域	72
4.2	纳米碳管的制备	73
4.2.1	电弧法	73
4.2.2	催化裂解法 (CVD)	74
4.2.3	激光蒸发法	75
4.2.4	化学气相沉积法	76
4.2.5	热解聚合物法	76
	参考文献	77
第5章	纳米固体材料	79
5.1	纳米固体材料的分类	79
5.2	纳米固体材料的微结构及其特性	81
5.2.1	类气态模型	82
5.2.2	扩展结构	82
5.2.3	短程有序	82
5.2.4	界面缺陷态模型	82
5.2.5	界面可变结构模型	82
5.3	纳米陶瓷	83
5.3.1	纳米陶瓷的性质与应用	83
5.3.1.1	力学性能及应用	83

5.3.1.2	电学性能及应用	83
5.3.1.3	光学性能及应用	83
5.3.1.4	磁学性能及应用	84
5.3.1.5	催化性能及应用	84
5.3.1.6	敏感性能及应用	84
5.3.1.7	其他性能及应用	84
5.3.2	纳米陶瓷的制备	84
5.3.2.1	纳米陶瓷的成型	84
5.3.2.2	纳米陶瓷的烧结	85
5.4	纳米薄膜	86
5.4.1	纳米薄膜的分类	86
5.4.2	纳米薄膜的特性	87
5.4.2.1	机械力学性能	87
5.4.2.2	电磁学性能	87
5.4.2.3	光学性能	88
5.4.2.4	气敏特性	88
5.4.3	纳米薄膜的制备	88
5.4.3.1	薄膜的形成过程与影响因素	88
5.4.3.2	纳米薄膜的制备技术简介	89
5.4.4	纳米薄膜的研究进展	93
5.4.4.1	纳米磁性膜	93
5.4.4.2	纳米光学膜	93
5.4.4.3	纳米气敏膜	94
5.4.4.4	纳米润滑膜	94
5.5	纳米复合材料	94
5.5.1	纳米复合材料的分类	95
5.5.1.1	按基体材料分类	95
5.5.1.2	按纳米改性剂分类	95
5.5.1.3	按制备方法分类	95
5.5.2	纳米复合材料的性能与特点	95
5.5.2.1	纳米复合材料的基本性能	95
5.5.2.2	纳米复合材料的特殊性质	96
5.5.3	纳米复合材料的制备方法	96
5.5.4	纳米复合材料的研究举例	98
5.5.4.1	高介电常数的聚合物基纳米复合电介质材料	98
5.5.4.2	模板法合成含镧的层状无机-有机纳米复合材料	99
5.5.5	纳米固体材料的发展	99
	参考文献	99
第6章	介孔材料	103
6.1	介孔材料的分类及特性	103

6.2	介孔材料的合成机理	104
6.2.1	液晶模板机理	104
6.2.2	棒状自组装模型	106
6.2.3	电荷密度匹配机理	106
6.2.4	协同作用机理	106
6.2.5	层状折叠机理	107
6.3	介孔材料的制备	108
6.3.1	模板剂	109
6.3.1.1	模板剂的作用	109
6.3.1.2	模板剂的分类及发展	110
6.3.1.3	模板剂的脱除	111
6.3.2	无机介孔材料的制备	112
6.3.3	无机-有机杂化介孔材料的制备	112
6.4	介孔材料的应用研究	112
6.4.1	应用研究	113
6.4.1.1	择形吸附与分离	113
6.4.1.2	催化	113
6.4.1.3	光催化反应	113
6.4.1.4	在气体检测传感器方面的应用研究	113
6.4.1.5	电容、电极、储氢材料	114
6.4.1.6	信息储运	114
6.4.2	有序介孔材料的应用领域	114
6.4.2.1	化工领域	114
6.4.2.2	生物医药领域	115
6.4.2.3	环境和能源领域	115
6.5	介孔材料研究热点及未来趋势	116
	参考文献	116
第7章	纳米材料的表征	120
7.1	粒度表征	120
7.1.1	颗粒及颗粒粒度	120
7.1.2	粒度分析的意义	122
7.1.3	粒度分析方法	122
7.1.3.1	显微镜法	123
7.1.3.2	电镜观察粒度分析	123
7.1.3.3	激光粒度分析	123
7.1.3.4	沉降法	124
7.1.3.5	X射线衍射线宽法	125
7.1.3.6	粒度分析的新进展	125
7.2	形貌表征	125
7.3	成分分析	127

7.4 热分析技术及宏观性质	129
7.5 纳米测试技术的发展	130
参考文献	131
第8章 纳米材料与纳米技术的应用	132
8.1 纳米技术在陶瓷领域方面的应用	132
8.1.1 纳米技术在普通陶瓷中的应用	132
8.1.2 纳米技术在特种陶瓷中的应用	133
8.1.2.1 结构陶瓷中的应用	133
8.1.2.2 功能陶瓷中的应用	134
8.1.3 纳米技术在陶瓷应用中的问题	135
8.2 纳米技术在陶瓷工业环保领域的应用	136
8.2.1 纳米材料对大气污染的治理	136
8.2.2 纳米材料对废水的治理	137
8.2.3 纳米材料对噪声的治理	138
8.3 纳米技术在微电子学上的应用与前景	138
8.3.1 纳米技术在微电子学上的应用	138
8.3.2 纳米技术在微电子学上的应用前景	139
8.4 纳米材料在化工生产中的应用	140
8.4.1 纳米材料在催化方面的应用	140
8.4.2 纳米材料在涂料方面的应用	140
8.4.3 纳米材料在其他精细化工方面的应用	141
8.5 纳米技术在生物工程及医学上的应用	141
8.5.1 纳米材料在生物学领域的应用	142
8.5.2 纳米生物医学材料的应用	142
8.5.3 纳米技术在临床诊断与检测中的应用	143
8.5.4 纳米技术在临床治疗中的应用	144
8.5.5 纳米技术在基础医学中的应用	145
8.6 纳米技术在军事领域上的应用	146
8.6.1 纳米电子技术在军事领域的应用	146
8.6.1.1 纳米计算机系统	147
8.6.1.2 纳米航天及航空技术	147
8.6.1.3 微机电系统、“纳米武器”和“纳米军队”	148
8.6.2 纳米技术将改变战争形态	149
8.6.3 纳米技术在装备上的应用	149
8.6.3.1 纳米技术将使发动机产生质的飞跃	150
8.6.3.2 纳米技术在润滑油中的应用	150
8.6.3.3 纳米技术在燃油上的应用	150
8.6.3.4 纳米技术在车辆轮胎上的应用	150
8.6.3.5 纳米技术改善车辆尾气	150
8.6.3.6 未来纳米装备的轮廓素描	151

8.7 纳米技术在其他领域上的应用	151
8.7.1 纳米技术在光电领域的应用	151
8.7.2 纳米技术在分子组装方面的应用	152
8.7.3 纳米技术在能源方面的应用	153
8.8 纳米材料与纳米技术的应用前景	153
参考文献.....	154
第9章 纳米材料的潜在危害	157
参考文献.....	158

第 1 章 绪 论

在充满机遇与挑战的 21 世纪,信息、生物技术、能源、环境、先进制造技术和国防的高速发展必然对材料提出新的需求,元件的小型化、智能化、高集成、高密度存储和超快传输等对材料的尺寸要求越来越小;航空航天、新型军事装备及先进制造技术等对材料性能要求越来越高。新材料的创新,以及在此基础上诱发的新技术、新产品的创新是未来 10 年对社会发展、经济振兴、国力增强最有影响力的战略研究领域,纳米材料将是起重要作用的关键材料之一。

1.1 纳米材料与纳米技术发展历史

1.1.1 纳米材料与纳米技术的诞生

1959 年,著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼在美国加州理工学院召开的美国物理年会上预言:“如果人们能够在原子、分子的尺度上来加工材料,制造装置,将会有许多激动人心的新发现,人们将会打开一个崭新的世界。”这是关于纳米材料和纳米技术最早的梦想。科学发展至今,验证了费曼的预言和梦想并非空穴来风,纳米材料和纳米技术正如火如荼地向前发展。不少科学家认为,纳米材料与纳米技术的发展及应用在未来会超过计算机,成为信息时代的核心。

20 世纪 70 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,揭示了一个可见的原子、分子世界,对纳米科技发展产生了积极的促进作用。

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。

1.1.2 纳米材料与纳米技术的发展

纳米科技的迅速发展是在 20 世纪 80 年代末、90 年代初。80 年代初发明了费曼所期望的纳米科技研究的重要仪器——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,揭示了一个可见的原子、分子世界,对纳米科技发展产生了积极的促进作用。

1991 年,纳米碳管被人类发现,它的质量是相同体积钢的 $1/6$,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 个氩原子排出“IBM”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。

1997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储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。

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。

近年来，一些国家纷纷制定相关战略或者计划，投入巨资抢占纳米技术战略高地。到目前为止，世界上已有五十多个国家制定了国家级的纳米科技计划，美国、日本、欧盟三大纳米科技研发及产业发展格局已逐渐形成。一些国家虽然没有专项的纳米技术计划，但其他计划中也往往包含了纳米技术相关的研发。

为了抢占纳米科技的先机，美国早在2000年就率先制定了国家级的纳米技术计划(NNI)，其宗旨是整合联邦各机构的力量，加强其在开展纳米尺度的科学、工程和技术开发工作方面的协调。2003年11月，美国国会又通过了“21世纪纳米技术研究开发法案”，这标志着纳米技术已成为联邦的重大研发计划，从基础研究、应用研究到研究中心、基础设施的建立以及人才的培养等全面展开。

日本政府将纳米技术视为“日本经济复兴”的关键。第二期科学技术基本计划将生命科学、信息通信、环境技术和纳米技术作为四大重点研发领域，并制定了多项措施确保这些领域所需战略资源(人才、资金、设备)的落实。之后，日本科技界较为彻底地贯彻了这一方针，积极推进从基础性到实用性的研发，同时跨省厅重点推进能有效促进经济发展和加强国际竞争力的研发。

欧盟在2002~2007年实施的第六个框架计划也对纳米技术给予了空前的重视。该计划将纳米技术作为一个最优先的领域，有13亿欧元专门用于纳米技术和纳米科学、以知识为基础的多功能材料、新生产工艺和设备等方面的研究。欧盟委员会还力图制定欧洲的纳米技术战略，目前，已确定了促进欧洲纳米技术发展的5个关键措施：增加研发投入，形成势头；加强研发基础设施；从质和量方面扩大人才资源；重视工业创新，将知识转化为产品和服务；考虑社会因素，趋利避险。另外，包括德国、法国、爱尔兰和英国在内的多数欧盟国家还制定了各自的纳米技术研发计划。

一般认为，纳米技术的发展会经历以下五个阶段。

第一阶段的发展重点是要准确地控制原子数量在100个以下的纳米结构物质。这需要使用计算机设计/制造技术和现有工厂的设备和超精密电子装置。这个阶段的市场规模约为5亿美元。

第二个阶段是生产纳米结构物质。在这个阶段，纳米结构物质和纳米复合材料的制造将达到实用化水平。其中包括从有机碳酸钙中制取的有机纳米材料，其强度将达到无机单晶材料的3000倍。该阶段的市场规模在50亿~200亿美元之间。

在第三个阶段，大量制造复杂的纳米结构物质将成为可能。这要求有高级的计算机设计及制造系统、目标设计技术、计算机模拟技术和组装技术等。这个阶段的市场规模可达100亿~1000亿美元。

纳米计算机将在第四个阶段中得以实现。这个阶段的市场规模将达到2000亿~1万亿美元。

在第五阶段里，科学家们将研制出能够制造动力源与程序自律化的元件和装置，市场规模将高达6万亿美元。

虽然纳米技术每个阶段到来的时间有很大的不确定性，难以准确预测，但在2010年之前，纳米技术有可能发展到第三个阶段，超越量子效应障碍的技术将达到实用化水平。纳米技术能够广泛应用于材料、机械、计算机、半导体、光学、医药和化工等众多领域。统计表明，眼下全球纳米技术的年产值已达500亿美元，而到2010年，全球纳米技术创造的年产值预计将达到14400亿美元。这无疑是一个诱人的“超级蛋糕”。

1.2 中国纳米材料与技术发展概况

在纳米材料与纳米技术发展初期，中国科学家已经开始关注这方面的研究。从1990年开始，中国就“纳米科技的发展与对策”、“纳米材料学”、“扫描探针显微学”、“微米/纳米技术”等方面，召开了数十个全国性的会议。中国科学院还在北京主持承办了第7届国际扫描隧道显微学会议（STM'93）和第4届国际纳米科技会议（Nano IV）。这些国际和国内会议的举办，为开展国际间和国内高校与科研单位间的学术交流与合作，起到了积极的促进作用。

中国的有关科技管理部门对纳米科技的重要性已有较高的认识，并给予了一定的支持。中国科学院（CAS）和国家自然科学基金委员会（NSFC）从20世纪80年代中期即开始支持扫描探针显微镜（SPM）的研制及其在纳米尺度上的科学问题研究（1987~1995）。国家科委（SSTC）于1990年至1999年通过“攀登计划”项目，连续10年支持纳米材料专项研究。1999年，科技部又启动了国家重点基础研究发展规划项目（“973”计划）“纳米材料与纳米结构”，继续支持纳米碳管等纳米材料的基础研究。国家“863”高技术计划，亦设立一些纳米材料的应用研究项目。

目前国内有50多所高校、20多个中科院研究所开展了纳米科技领域的研究工作。现有与纳米科技相关企业已达300余家。国家科研机构 and 高等院校从事纳米科技的研究开发人员大约有3000人。整体上国内的纳米科技研究涉及领域比较宽、点多分散，尚未形成集中的优势。国内已有中科院、清华大学、北京大学、复旦大学、南京大学、华东理工大学等单位成立了与纳米科技有关的研究开发中心。纳米科技是多学科综合的新兴交叉学科，在多学科的集成方面，中科院、北京大学、清华大学、复旦大学等研究单位占有优势。

中科院在国内最先开拓了纳米科技领域的研究，具有突出的优势。从20世纪80年代后期开始组织了物理所、化学所、感光所、沈阳金属所、上海硅酸盐所、合肥固体物理所以及中国科技大学等单位，积极投入纳米科学与技术的研究。支持方向有：激光控制下的单原子操纵和选键化学；分子电子学-分子材料和器件基础研究；巨磁电阻材料和物理纳米半导体光催化和光电化学研究；材料表面、界面和大分子扫描隧道显微学研究；纳米碳管及其他纳米材料研究；人造“超原子”体系结构和物性的研究等。与此同时，主持或承担了多项国家级重大项目。

2000年中科院组织了有11个研究所参与的“纳米科学与技术”重大项目，总投资2500万人民币。项目的主要研究内容是：发展或发明新的合成方法和技术；制备出有重要意义的新纳米材料及器件。希望通过项目的支持，在纳米材料和纳米结构的规模制备，纳米粉体中颗粒的团聚和表面修饰，纳米材料和纳米复合材料的稳定性，纳米尺度内物理、化学和生物

学性质的探测及特异性质的来源以及纳米微加工技术等方面取得重要的进展。

中科院在 2001 年还成立了由其所属的 19 个研究所组成的中国科学院纳米科技中心，开通了隶属于中心的纳米科技网站，并在化学所建成纳米科技楼。纳米科技中心围绕纳米科技领域的重点问题和国家、院重大科技计划，组织分布在不同地域，不同单位的科技人员，利用纳米科技网站与纳米科技中心研究实体，实现有关科研信息、技术软件和仪器设备的共享，体现科研纽带、产业纽带、人才纽带、设备纽带的优势，加强不同学科的交叉与融合，促进自主知识产权成果向产业化的转化，加速高级复合型人才的培养，在统一规划协调下，充分发挥仪器设备的效用。

中国的纳米科技研究与国外几乎同时起步，在某些方面有微弱优势。从近期美国《科学引文索引》核心期刊查询，中国纳米科技论文总数位居世界前列。例如，有关纳米碳管方面的学术论文排在美、日之后位居世界第三。在过去的十年间，国家通过研究计划对纳米科技领域资助的总经费大约相当于 700 万美元，社会资金对纳米材料产业化亦有一定投入。但与发达国家相比，投入经费相差很大。由于条件所限，研究工作只能集中在硬件条件要求不太高的领域。纳米科技的其他基础研究相对薄弱，研究总体水平与发达国家相比还有不小差距，特别是在纳米器件及产业化方面。

中国的纳米科技研究近些年取得了重大进展，在以下方面具有自己的优势。

(1) 纳米材料 中国对纳米材料的研究一直给予高度重视，取得了很多成果，尤其是在以纳米碳管为代表的准一维纳米材料及其阵列方面做出了有影响的成果，在非水热合成制备纳米材料方面取得突破，在纳米块体金属合金和纳米陶瓷体材料制备和力学性能的研究、介孔组装体系、纳米复合功能材料、二元协同纳米界面材料的设计与研究等方面都取得了重要进展。

① 在纳米碳管的制备方面，我国首先发明了控制多层碳管直径和取向的模板生长方法，制备出离散分布、高密度和高强度的定向碳管，解决了常规方法中碳管混乱取向、互相纠缠或烧结成束的问题。1998 年合成了世界上最长的纳米碳管，创造了一项“3mm 的世界之最”，这种超长纳米碳管比当时的纳米碳管长度提高 1~2 个数量级。他们在纳米碳管的力学、热学性质、发光性质和导电性的研究中取得重要进展。世界上最细的纳米碳管也在 2000 年前后制造出来。先是物理所的同一个小组合成出直径为 0.5nm 的碳管，接着香港科技大学物理系利用沸石作模板制备了最细单壁纳米碳管 (0.4nm) 阵列 (与日本的一个小组的结果同时发表)，接着中科院物理所和北京大学在单壁纳米碳管的电子显微镜研究中发现电子束的轰击下，能够生长出直径为 0.33nm 的纳米碳管。

② 清华大学首次利用纳米碳管作模板成功制备出直径为 3~40nm、长度达微米级的发蓝光的氮化镓一维纳米棒，在国际上首次把氮化镓制备成一维纳米晶体，并提出纳米碳管限制反应的概念。中科院固体物理所成功研制出纳米电缆，有可能应用于纳米电子器件的连接。

中科院金属研究所用等离子电弧蒸发技术成功地制备出高质量的单壁纳米碳管材料，研究了储氢性能，质量储氢容量 (mass capacity of hydrogen storage in carbon nanotube) 可达 4%。

③ 在纳米金属材料方面，中科院金属研究所的研究小组，在世界上首次发现纳米金属的“奇异”性能——超塑延展性，纳米铜在室温下竟可延伸 50 多倍而“不折不挠”，被誉为“本领域的一次突破，它第一次向人们展示了无空隙纳米材料是如何变形的”。

④ 在纳米无机材料合成方面, 中国科技大学钱逸泰教授领导的研究小组发展了溶剂热合成技术, 发明用苯热法制备纳米氮化镓微晶, 首次在 300°C 左右制成粒度达 30nm 的氮化镓微晶。该小组还采用非水热合成制备金刚石粉末, 开辟了一条十分有经济价值的技术路线。

⑤ 在纳米有机材料及高分子纳米复合材料方面, 中国科学院化学所在高聚物插层复合、分子电子学、富勒烯化学与物理以及二元协同纳米界面材料方面取得显著进展, 发展了具有自主知识产权的技术, 有些已开始走向产业化。

⑥ 在纳米颗粒、粉体材料的研究方面, 中科院固体物理所自主开发的纳米硅基氧化物 SiO_2-x , 具有很高的比表面积 ($640\text{m}^2/\text{g}$)。他们与企业合作, 已建成了百吨级生产线, 并在纳米抗菌银粉、新型塑料添加剂、传统涂料改性等方面发挥了重要效用, 已推出多项产品上市。华东理工大学在纳米超细活性碳酸钙 3000 吨/年的工业性实验基础上, 建设 1.5 万吨/年大规模生产线, 填补国内空白。北京科技大学在纳米镍粉制备取得成绩, 分别应用于国内最大的镍氢电池公司和日本新日铁公司。北京化工大学于 1994 年发展了超重力合成纳米颗粒的研究方法, 现已建立超重力法合成 3000 吨/年的纳米颗粒生产线, 其规模和技术均为国际领先。天津大学研制纳米铁粉, 使我国成为第二个工业化生产纳米金属粉体材料的国家。青岛化工学院在纳米金属铜催化剂的研究开发中已有成功的经验。

⑦ 目前纳米材料粉体生产线吨级以上的有 20 多条, 生产的品种有: 纳米氧化物 (纳米氧化锌、纳米氧化钛、纳米氧化硅、纳米氧化锆、纳米氧化镁、纳米氧化钴、纳米氧化镍、纳米氧化铬、纳米氧化锰、纳米氧化铁等)、纳米金属和合金 (银、钯、铜、铁、钴、镍、铝、银、银-铜合金、银-锡合金、铜-锡合金、镍-铝合金、镍-铁合金和镍-钴合金等)、纳米碳化物 (碳化钨、碳粉、碳化硅、碳化钛、碳化铬、碳化铌、碳化硼等)、纳米氮化物 (氮化硅、氮化铝、氮化钛、氮化硼等)。

从纳米材料的研究情况来看, 研究领域广泛, 投入人员较多, 许多科研单位都参与了纳米材料研究, 形成一支实力雄厚的研究力量。但应该指出, 目前纳米材料研究的基础设施还相对薄弱, 纳米材料的设计与创新能力不强, 生产规模偏小, 自主知识产权不多。为了真正使纳米技术转化为生产力, 应加大纳米材料产业化力量的投入, 尤其要注重纳米科学的工程化研究和纳米材料的应用研究, 鼓励产业化有基础和经验的研究单位与其他研究单位联合或研究单位与企业联合, 使实验室技术尽快转化为生产力, 为国民经济增长作出贡献。

(2) 纳米器件概况 在量子电子器件的研究方面, 我国科学家研究了室温单电子隧穿效应、单原子单电子隧道结、超高真空 STM 室温库仑阻塞效应和高性能光电探测器以及原子夹层型超微量子器件。

清华大学已研制出 100 纳米级 ($0.1\mu\text{m}$) MOS 器件, 研制出一系列硅微集成传感器、硅微麦克风、硅微电动机、集成微型泵等器件, 以及基于微纳米三维加工的新技术与新方法的微系统。

中科院半导体所研制了量子阱红外探测器 ($13\sim 15\mu\text{m}$) 和半导体量子点激光器 ($0.7\sim 2.0\mu\text{m}$)。中科院物理所已经研制出可在室温下工作的单电子原型器件。西安交通大学制作了纳米碳管场致发射显示器样机, 已连续工作了 3800h 。

在有机超高密度信息存储器件的基础研究方面, 中科院北京真空物理实验室、中科院化学所和北京大学等单位的研究人员, 在有机单体薄膜 NBPDA 上作出点阵, 1997 年, 点径为 1.3nm ; 1998 年, 点径为 0.7nm ; 2000 年, 点径为 0.6nm 。信息点直径较国外报道的研