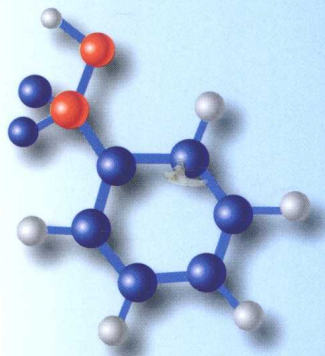




21世纪全国高等院校材料类 **创新型** 应用人才培养规划教材



MATERIALS

纳米材料基础与应用

主 编 林志东

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

纳米材料基础与应用

主 编 林志东
副主编 杨汉民 石和彬
参 编 王学华 付 萍 付秋明 李 亮
陈 喆 张占辉 唐定国 瞿 阳



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统地介绍了纳米材料的基本效应和相关基础理论、纳米微粒的物理化学特性、纳米材料的研究分析方法、各类纳米材料特性与功能应用及其典型的制备技术,侧重介绍了纳米粉体的制备技术。所涉及的纳米材料的类型包括零维纳米粉体、一维纳米管(纳米棒、纳米丝和纳米带)、二维纳米薄膜、三维纳米块体及其纳米结构和纳米复合材料。

本书内容丰富,条理清晰,采用典型纳米材料的实例来阐述纳米材料的特性、应用与制备,适合不同专业的学生进行学习。每章配有习题便于学生对重点内容进行回顾与把握,也为学生拓展知识面、锻炼综合运用能力提供帮助。

本书可作为高等院校材料类、应用化学类专业的本科教材,也可作为纳米材料生产、检测与应用开发的工程技术人员和研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

纳米材料基础与应用/林志东主编. —北京:北京大学出版社, 2010. 8

(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-17580-4

I. ①纳… II. ①林… III. ①纳米材料—高等学校—教材 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 146842 号

书 名: 纳米材料基础与应用

著作责任者: 林志东 主编

策 划 编 辑: 童君鑫

责任编辑: 周 瑞

标准书号: ISBN 978-7-301-17580-4/TG·0007

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 444 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单（按拼音排序）

- | | |
|---------------|----------------|
| 白培康（中北大学） | 陈华辉（中国矿业大学） |
| 崔占全（燕山大学） | 杜彦良（石家庄铁道大学） |
| 杜振民（北京科技大学） | 耿桂宏（北方民族大学） |
| 关绍康（郑州大学） | 胡志强（大连工业大学） |
| 李楠（武汉科技大学） | 梁金生（河北工业大学） |
| 林志东（武汉工程大学） | 刘爱民（大连理工大学） |
| 刘开平（长安大学） | 芦笙（江苏科技大学） |
| 石海芳（辽宁工程技术大学） | 孙凤莲（哈尔滨理工大学） |
| 孙玉福（郑州大学） | 万发荣（北京科技大学） |
| 王春青（哈尔滨工业大学） | 王峰（北京化工大学） |
| 王金淑（北京工业大学） | 卫英慧（太原理工大学） |
| 伍玉娇（贵州大学） | 夏华（重庆理工大学） |
| 徐鸿（华北电力大学） | 余心宏（西北工业大学） |
| 张朝晖（北京理工大学） | 张海涛（安徽工程大学） |
| 张敏刚（太原科技大学） | 张锐（郑州航空工业管理学院） |
| 张晓燕（贵州大学） | 赵惠忠（武汉科技大学） |
| 赵莉萍（内蒙古科技大学） | 赵玉涛（江苏大学） |

编写人员名单

主 编：林志东（武汉工程大学材料科学与工程学院）

副主编：杨汉明（中南民族大学化学与材料科学学院）

石和彬（武汉工程大学材料科学与工程学院）

编 委：（以姓氏笔画为序）

王学华（武汉工程大学材料科学与工程学院）

付 萍（武汉工程大学材料科学与工程学院）

付秋明（武汉工程大学材料科学与工程学院）

李 亮（武汉工程大学材料科学与工程学院）

陈 喆（武汉工程大学材料科学与工程学院）

张占辉（武汉工程大学材料科学与工程学院）

唐定国（中南民族大学化学与材料科学学院）

瞿 阳（华中农业大学理学院）

前 言

本书是为满足我国高等院校材料类和应用化学类专业本科生的专业学习，以及为从事新材料生产、检测与应用开发的科技人员快速了解纳米材料相关知识而编写出版的。

纳米科技是 20 世纪末诞生，将在 21 世纪快速发展并将深刻改变人类社会生活的新科技。纳米材料作为纳米科技的物质基础，对纳米科技发展起着巨大的推动作用，也是新材料的重要组成部分。让尽量多的科技人员了解和掌握纳米材料的物理、化学特性和制备技术及其功能应用，将会促进我国新材料产业的蓬勃发展，进而带动传统产业的升级换代。

自 2000 年以来，国内许多高校的材料类、应用化学类等本科专业相继开设了纳米材料的相关课程。但由于该课程内容涉及物理、化学、材料、电子等多学科的知识，学科交叉性强，而传统的本科专业知识体系构建时未考虑纳米材料课程教学的特殊性，所以一直难以找到真正适合于本科生教学用的教材。本书从物理、化学等多种角度阐述纳米材料的相关知识点，对前期知识点要求低，系统介绍纳米材料的基础知识和功能应用，既便于不同专业方向、不同层次的读者进行理解，也便于本科教学。

随着高等教育的普及，大学教育更注重工程能力和应用型人才的培养。本书在编写过程中，始终坚持以应用实例说明问题，在实例分析中学习知识点，通过对本书的学习，读者不仅能在纳米材料方面具备较系统的专业知识，而且能成为新材料研发、生产和检测的工程技术人员。

本书尽量按照对新材料的认知过程与教学规律进行编写，力求实现：

- (1) 通过引入纳米新材料激起读者的求知欲，功能应用贴近生活实际。
- (2) 系统而简明地介绍了纳米材料的基本概念、基本特性和基本理论，整个教材内容完整、重点突出，强调纳米材料的实际制备与应用。
- (3) 章节内容循序渐进，不断回答引起读者思索的问题，同时也不断激发读者进一步的思考。
- (4) 通过章首的教学要点以及章末的习题，帮助读者把握重点，并培养综合运用知识的能力。
- (5) 各章均引用国内外最新的研究成果报道，力争紧跟新材料的世界发展趋势。
- (6) 在各类纳米材料的制备和应用部分，以实例来说明各种纳米材料的制备特点与特性功能，强调工程实践。

本书共分 9 章。第 1 章主要介绍纳米科技、纳米材料的概念与发展历程，以及纳米材料研究对象、纳米材料对社会影响和纳米材料发展方向；第 2 章主要介绍纳米材料的基本理论和纳米微粒的物理、化学特性；第 3 章主要介绍纳米微粒的制备及其表面改性；第 4 章主要介绍纳米微粒的分析检测方法；第 5、6、7 章分别介绍一维纳米材料、纳米薄膜以及纳米固体的特性、应用与制备技术；第 8、9 章主要介绍纳米结构、纳米复合材料的特性、应用与制备。本书全面系统地介绍了各类纳米材料的相关知识点，实例丰富，实践性和应用性较强。



本书由林志东负责设计全书结构、草拟写作提纲、组织编写工作和最后统稿定稿。各章的具体分工如下：第1章由石和彬(武汉工程大学)编写；第2章由付萍(武汉工程大学)编写；第3章由杨汉民、唐定国(中南民族大学)编写；第4章由瞿阳(华中农业大学)编写；第5章由李亮(武汉工程大学)编写；第6章由付秋明(武汉工程大学)编写；第7章由张占辉(武汉工程大学)编写；第8章由王学华(武汉工程大学)编写；第9章由陈喆(武汉工程大学)编写。

本书在编写过程中参考了有关书籍和资料，在此向其作者表示衷心的感谢。本书在出版过程中得到了北京大学出版社大力支持，在此也表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏之处，敬请读者批评指正。

编者
2010年7月

目 录

第 1 章 纳米科技及纳米材料绪论	1
1.1 纳米科技的兴起	2
1.1.1 纳米科技的提出	2
1.1.2 世界各国的发展情况	4
1.2 纳米科技的内涵	6
1.2.1 纳米科技的范畴	6
1.2.2 纳米科技的研究内容	7
1.2.3 纳米科技的发展前景	9
1.3 纳米材料	11
1.3.1 纳米材料的定义	11
1.3.2 纳米材料的发展历史	12
1.3.3 纳米材料的分类	14
1.3.4 纳米材料研究现状	15
1.3.5 纳米材料特性与应用	17
1.3.6 纳米材料的安全性	19
习题	21
第 2 章 纳米材料的基本理论	22
2.1 纳米微粒的基本效应	23
2.1.1 量子尺寸效应	23
2.1.2 小尺寸效应	25
2.1.3 表面效应	25
2.1.4 宏观量子隧道效应	26
2.1.5 库仑堵塞与量子隧穿效应	26
2.1.6 介电限域效应	27
2.1.7 量子限域效应	28
2.2 纳米微粒的物理特性	28
2.2.1 纳米微粒的热学性能	28
2.2.2 纳米微粒的光学性能	32
2.2.3 纳米微粒的电学性能	35
2.2.4 纳米微粒的磁学性能	37
2.2.5 纳米微粒的力学性能	43
2.3 纳米微粒的化学特性	45
2.3.1 纳米微粒的吸附特性	45
2.3.2 纳米微粒的催化反应	47
习题	50
第 3 章 纳米微粒的制备与表面修饰	51
3.1 纳米微粒制备方法分类	52
3.1.1 按反应所处的介质环境分类	52
3.1.2 按是否发生化学反应分类	53
3.1.3 按原材料的尺寸分类	54
3.2 典型固相制备方法	54
3.2.1 机械法	55
3.2.2 固相反应法	62
3.2.3 其他固相法	66
3.3 典型气相制备方法	67
3.3.1 低压气体中蒸发法	67
3.3.2 低真空溅射法	74
3.3.3 流动液面上真空蒸镀法	75
3.3.4 爆炸丝法	76
3.3.5 化学气相沉积法	77
3.3.6 气相中纳米微粒的生成及粒径控制	85
3.4 典型液相制备方法	86
3.4.1 沉淀法	86
3.4.2 金属醇盐水解法	90
3.4.3 溶胶-凝胶法	93
3.4.4 雾化溶剂挥发法	97
3.4.5 微乳液法	99
3.4.6 水热/溶剂热法	101
3.5 纳米微粒的表面修饰与改性	104
3.5.1 纳米微粒的表面物理修饰	105



第 8 章 纳米结构的制备与特性	229	9.1.1 纳米复合材料的概念	271
8.1 纳米结构及其分类	230	9.1.2 复合材料的分类	272
8.1.1 纳米结构的分类	230	9.2 纳米复合材料的性能	274
8.1.2 纳米结构薄膜	231	9.2.1 纳米复合材料的力学性能	274
8.1.3 有序纳米阵列	232	9.2.2 纳米复合材料的 热学性能	279
8.1.4 介孔材料	232	9.2.3 纳米复合材料的 阻燃性	282
8.2 纳米结构的性能及其应用	234	9.2.4 纳米复合材料的 阻隔性	285
8.2.1 纳米结构的电学性能 与应用	234	9.3 纳米复合材料的制备方法	287
8.2.2 纳米结构的磁学性能 与应用	235	9.3.1 共混法	287
8.2.3 纳米结构的光学性能 与应用	236	9.3.2 层间插入法	287
8.2.4 介孔材料的应用	237	9.3.3 反应器就地合成法	289
8.3 纳米结构的制备	239	9.3.4 溶胶-凝胶法	289
8.3.1 纳米结构的人工 加工技术	240	9.3.5 辐射合成法	289
8.3.2 纳米结构的自组装	250	9.4 纳米复合材料的应用	290
8.3.3 纳米结构的模板法制备	254	9.4.1 纳米复合材料的 应用领域	290
8.3.4 介孔材料的制备	265	9.4.2 规模生产的纳米复合 材料商品	291
习题	269	习题	293
第 9 章 纳米复合材料	270	参考文献	295
9.1 纳米复合材料概述	271		

第 1 章

纳米科技及纳米材料绪论



教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
纳米科技简史	掌握纳米的概念,了解纳米科技的形成过程	扫描隧道显微镜、富勒烯、巨磁阻效应
纳米科技在世界各国的发展概况	了解世界主要经济体的纳米科技发展规划	美国 NNI 计划、中国《纳米科技发展纲要》
纳米科技的范畴	掌握纳米尺度、纳米科技的基本概念	纳米尺度、宏观领域、微观领域、纳米科技
纳米科技的研究内容	理解纳米科技主要分支学科的基本特征	纳米科学、纳米技术、纳米工程、纳米物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米生物学、纳米医学、纳米力学、纳米制造
纳米科技的发展前景	了解纳米科技主要应用领域的发展前景	纳米科技对生物医学、信息技术、国防、能源环境、食品等领域的影响
纳米材料的定义	掌握纳米材料的基本概念	纳米结构单元、纳米材料
纳米材料的发展历史	了解纳米材料科学与工程的发展概况	纳米材料学、纳米材料工程、纳米材料发展的三个阶段
纳米材料的分类	掌握纳米材料按维度分类的方法	零维、一维、二维、三维纳米材料
纳米材料的研究现状	了解现在纳米材料的研究重点	—
纳米材料的特性与应用	了解纳米尺度对材料性质产生的影响及其应用	纳米尺度的基本物理、化学效应
纳米材料的安全性	了解纳米材料的潜在生物毒性及应对方法	纳米毒理学、世界主要国家的纳米安全研究计划



导入案例

1959 年 12 月 29 日, 著名物理学家费曼(见图 1.1)在美国加州理工学院召开的美国物理学会年会上作了一次极富想象力的演讲“*There’s plenty of room at the bottom*”, 其中有一些堪称经典的片段:



图 1.1 费曼

理查德·菲利普·费曼(Richard Phillips Feynman, 1918 年 5 月 11 日—1988 年 2 月 15 日), 美国物理学家, 1965 年诺贝尔物理学奖得主, 世界上首位提出纳米科技构想的科学家

——Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopedia Britannica on the head of a pin?

——What would happen if we could arrange the atoms one by one the way we want them?

——The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom.

这个演讲在当年颇有些惊世骇俗的意味, 被当时的科技界视为科学幻想。但到了 1993 年, 为了纪念费曼的远见卓识, 由德雷克斯勒创建的前景研究所(The Foresight Institute)设立了纳米科技费曼奖(Feynman Prize in Nanotechnology), 每年各奖励一位分别在纳米科技理论与实验方面做出突出成就的科学家, 成为纳米科技领域的一项国际大奖。

人们普遍认为纳米科技源自费曼于 1959 年的一次演讲, 而“小就是与众不同(*small is different*)”在现在几乎成了纳米科技界的一句口头禅。纳米科技近年来发展之迅猛, 从国际上如雨后春笋般冒出来的数十种纳米科技类杂志就可见一斑, 其中英国物理学会率先出版了 *Nanotechnology*, 美国化学学会继成功出版 *Nano Letters* 之后又推出了 *ACS Nano*, 国际著名科技出版商 Elsevier 出版了 *Nano Today*, Wiley-Blackwell 则发行了 *Small*, 而顶级科技期刊《自然》也出版了子刊 *Nature Nanotechnology*。那么, 纳米科技到底有什么魔力让人们如此着迷呢?

1.1 纳米科技的兴起

1.1.1 纳米科技的提出

纳米(nanometer, nm)是计量长度的单位之一, 前缀 nano 是希腊语中“侏儒”的意思, 在计量中表示 10^{-9} , 纳米即为 10^{-9}m , 而纳秒(nanosecond)则为 10^{-9}s 。我国过去一般用毫微米来表示 10^{-9}m , 很直观地反映了其长度单位的本质特征, 即千分之一微米(意译), 但现在普遍采用的是更加简洁的纳米(音译), 在我国台湾则被译为奈米。简单地讲, 纳米科技就是研究、控制与利用尺度约为 $1\sim 100\text{nm}$ 的物质。随着纳米科技的研究日益广

泛, 现在英文文献中常常直接用 nano 来表示纳米。1nm 大约是 2~3 个金属原子或 10 个氢原子排列在一起的“宽度”。一般病毒的直径为 60~250nm, 红血球的直径为 6000~8000nm, 头发丝的直径则为 30000~50000nm。

当物质的尺度小于 100nm 时, 其在较大尺度上所表现出来的许多性质将会发生改变, 自然界中就有许多由纳米尺度物质所表现出来的奇特现象。例如, 荷花能出淤泥而不染, 奥妙就在于荷叶以及荷花表面具有特殊的纳米结构。从肉眼来看, 荷叶表面是很平滑的, 但是放大几万倍以后却是凹凸有致, 由微米级的凸起与纳米级的毛刺构成, 宏观上表现为极度疏水, 即水滴落到荷叶表面时不会铺展开, 而是形成接近于圆球状的结构。尽管水滴与荷叶的实际接触很少, 但是水滴滑落时仍然有一定的摩擦作用, 带走了叶子上的尘土以及细菌, 会起到“自清洁”的功能。另外, 像蜜蜂、海龟的体内都存在纳米级的磁性颗粒, 这些磁性颗粒就像罗盘一样, 是蜜蜂、海龟的导航系统, 能引导蜜蜂、海龟判别前进的方向。试想一下, 如果人类也能加工制造出类似的精细产品, 将会给我们的生活带来怎样的变化? 而这正是纳米科技所要努力研究、解决的问题。

纳米科技的兴起可追溯到 20 世纪中期。在 1959 年 12 月召开的美国物理学会年会上, 著名物理学家、诺贝尔物理学奖得主理查德·费曼教授做了一个著名的演讲——“底部还有很大的空间(There's plenty of room at the bottom)”, 首次提出可以在分子与原子的尺度上加工与制造产品, 甚至能够按照人们的意愿逐个地排列原子与分子。费曼在演讲中首次阐述了自下而上(bottom-up)制备材料的思想, 即通过操纵原子、分子来构筑材料, 这是人类关于纳米科技最早的梦想。

到了 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, 东京理科大学教授谷口纪男(Norio Taniguchi)率先提出了纳米技术(nanotechnology)一词, 用来描述原子或分子级别的精密机械加工。

1981 年, IBM 公司苏黎士实验室的科学家宾尼(Gerd Karl Binnig)博士和罗雷尔(Heinrich Rohrer)博士共同发明了扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM), 使人类首次直接观察到了原子, 为测量与操控原子、分子等技术奠定了基础, 成为纳米科技史上划时代的里程碑, 对促进纳米科技的发展产生了非常积极的作用, 两人因此与电子显微镜的发明者鲁斯卡(E. A. F. Ruska)共同分享了 1986 年诺贝尔物理学奖。在 1985 年, 宾尼和罗雷尔还与斯坦福大学的奎特(C. F. Quate)教授合作推出了原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM), 弥补了 STM 只能测试导电材料的不足之处。以 STM、AFM 为代表的扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscopy, SPM)已成为微区分析领域的主流设备之一, 成为纳米尺度物质检测的重要手段。

1985 年, 英国萨塞克斯大学(University of Sussex)的克罗托教授(Harold Walter Kroto)与美国莱斯大学(Rice University)的斯莫利教授(Richard Errett Smalley)和科尔教授(Robert Floyd Curl)合作, 发现了金刚石和石墨之外的第三种稳定碳单质——由 60 个碳原子构成的足球状富勒烯(fullerene)分子 C_{60} , 也被称为“足球烯”(footballene)或“巴基球”(bucky-ball), 三人因此荣获 1996 年诺贝尔化学奖。在得到足球状 C_{60} 的同时, 还可以得到橄榄球状的 C_{70} , 后来又相继发现了 C_{76} 、 C_{84} 、 C_{90} 、 C_{94} 等多种有限纯碳分子, 在自然科学界引起了强烈的反响。

1986 年, 美国人德雷克斯勒(K. Eric Drexler)受费曼演讲的启发, 对纳米科技的概念进行了深入的探究与广泛的引申, 首次系统地阐述了纳米科技的重大意义与美好前景, 出



版了第一部有关纳米科技的书籍《创造的发动机：纳米科技时代的到来》(*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*)。

1988年,法国科学家费尔(Albert Fert)和德国科学家格林贝格(Peter Grünberg)分别独立发现了纳米结构多层膜的巨磁电阻效应,为大容量磁盘存储器等现代信息技术的发展奠定了基础,两人因此分享了2007年诺贝尔物理学奖。

随着纳米科技领域的重大研究成果不断涌现,纳米科技的影响日益扩大。到了1990年7月,在美国巴尔的摩举办了第一届国际纳米科技会议,同年英国物理学会开始出版发行第一种专门的纳米科技类杂志——《纳米技术》(*Nanotechnology*)。从此,纳米科技引起了全球学术界与产业界的广泛兴趣与高度重视,形成了全球性的纳米科技研究热潮,标志着纳米科技正式诞生。

1.1.2 世界各国的发展情况

自20世纪90年代以来,纳米科技步入了快速发展的轨道,不断涌现出令人兴奋的创新成果。1990年,美国IBM公司的科学家首次实现了对原子的操纵,用STM移动35个氙原子拼成了“IBM”三个字母,如图1.2(a)所示;而美国贝尔实验室则推出了一个只有跳蚤大小但“五脏俱全”的纳米机器人。

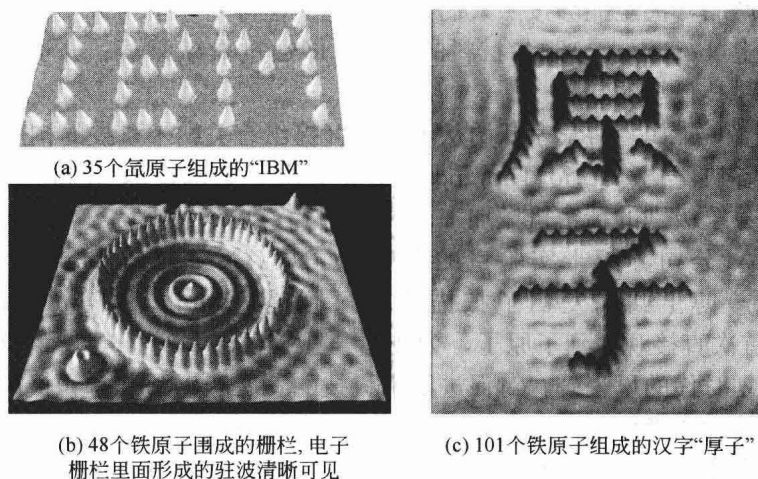


图 1.2 STM 操纵原子构成的纳米图案

1991年,日本NEC公司的科学家饭岛澄男(Sumio Iijima)发现了碳纳米管,单壁碳纳米管的密度只有钢的1/6,强度却是钢的10倍;IBM公司则成功操纵CO分子排列出了一个卡通人的图形,实现了对分子的操纵。

1992年,美国科学家发现纳米钴粒子镶嵌在铜膜中构成的颗粒膜具有巨磁电阻效应;中国科学院真空物理实验室采用STM在硅单晶表面搬迁原子,形成了“中国”的汉字图案;日本日立制作所研制成功了可在室温下工作的单电子存储器,可在极微小的晶粒中封入一个电子用来存储信息。

1993年,IBM公司用STM操纵铁原子,用48个铁原子在铜表面组装成了一座“铁原子栅栏”,栅栏的半径仅7nm左右,铜表面的电子就像关在栅栏里的羊群一样逃不出去,形成一种电子驻波,如图1.2(b)所示。一些由STM操纵原子构成的纳米图案如图1.2所示。

1994年,美国开始着手研制“麻雀卫星”、“蚊子导弹”、“苍蝇飞机”以及“蚂蚁士兵”等新式武器,纳米技术在国防领域逐渐显现其威力。

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年后研制出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碳纳米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,相当于一个病毒的质量;此后不久,德国科学家研制出能称量单个原子质量的秤,打破了美国和巴西科学家联合创造的纪录。

进入21世纪以来,全球形成了世界性的纳米科技热潮,纳米科技领域的新发现、新成果与新产品层出不穷。纳米科技大大拓展和深化了人们对客观世界的认识,使人们能够在原子、分子水平上制造材料及器件。发达国家普遍认为纳米科技将成为21世纪经济发展的主要增长点,并将在信息、材料、能源、环境、医疗、卫生、生物与农业等诸多领域带来新的产业革命,对经济社会的发展以及国防安全等均具有重要的意义。

在20世纪末,美国总统科学顾问委员会对日本、欧洲等世界主要经济体的纳米科技发展状况进行了为期三年的调查研究,最后认为纳米科技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,为了在21世纪继续保持美国在经济上的领导地位并保障美国的国家安全,必须在未来的10~20年中显著地、稳定地增加对纳米科技研究与开发的投入。2000年1月21日,时任美国总统克林顿在加州理工工学院正式发布“美国国家纳米科技计划(National Nanotechnology Initiative,简称NNI)”,将纳米科技视为下一次工业革命的核心,认为纳米科技将对21世纪早期的经济和社会产生深刻的影响,就像信息技术、细胞、基因和分子生物学一样。该计划整合了美国各相关机构的力量,加强对纳米尺度的科学、工程和技术研发工作的协调,并于2000年11月得到美国国会的批准。美国政府在2001财政年度对纳米科技的投资比上年猛增了近1倍,达到4.97亿美元。

美国NNI计划的出台,推动纳米科技在全球范围内的竞争上升到了国家战略的高度,纳米科技因此成为国际高科技领域的竞争热点之一。世界主要经济体纷纷推出了相关的发展战略或计划,投入巨资推动纳米科技的发展,抢占21世纪科技战略制高点。不仅日本、德国、法国、英国等主要发达国家分别出台了各自的纳米计划,而且新兴经济体与科技实力较强的发展中国家和地区也对纳米科技进行了部署和安排。韩国政府于2001~2003年间相继制定了《促进纳米科技10年计划》、《促进纳米技术开发法》与《纳米技术开发实施规则》;我国台湾地区自1999年开始也相继制定了《纳米材料尖端研究计划》与《纳米科技研究计划》;俄罗斯、加拿大、澳大利亚、以色列、印度、瑞士、墨西哥、泰国、埃及、土耳其等国家也对纳米科技发展进行了部署,全球总计已有50多个国家或地区制定了战略性的纳米科技计划。

我国先后成立了国家纳米科技指导协调委员会、国家纳米科学中心和纳米技术专门委员会,于2001年7月发布了《国家纳米科技发展纲要(2001—2010)》。遵循“有所为、有所不为、总体跟进、重点突破”的构想,近期目标以纳米材料及其应用为主,中、长期目标瞄准纳米生物和医疗技术、纳米电子学和纳米器件,希望在纳米科学前沿取得重大进展,在纳米技术开发及其应用方面取得重大突破,并逐步形成精干的、具有交叉综合和持续创新能力的纳米科技骨干队伍。在纳米科技基础建设方面,要建立具有国际先进水平的国家纳米科学技术发展公用平台和重点实验室系统、纳米科技信息网络和科研开发网络,



形成若干各具特色的、具有国际一流水平的纳米科技创新基地，构筑国家纳米科技研究与开发创新体系。同时要注重自主知识产权、市场需求，讲究多学科交叉融合以及科技创新与体制创新相结合，以期大幅度提高纳米科技创新能力，促进纳米科技成果实用化或产业化，造就一批具有市场竞争力的纳米高科技骨干企业，推动经济跨越式发展，使我国在纳米科技领域的整体水平进入国际先进行列，并在若干方面具有竞争优势。

近年来，全球在纳米科技研究、开发和商业化方面的投资一直呈持续、高速增长态势，2007年全球投入纳米科技领域的资金已达到了139亿美元，其中美国、欧洲、日本的份额大致相同。美国NNI计划在2009财政年度的投入已达到16.576亿美元，日本作为开展纳米科技研究最早的国家之一，其政府将纳米科技视为“日本经济复兴”的关键，在资金投入上仅次于美国。欧盟坚信纳米科技作为一个新兴的研究领域，对于促进其经济增长、创造更多的就业机会，尤其是提升欧盟的国际科技竞争力、实现欧盟里斯本首脑峰会提出的可持续发展战略目标将发挥越来越重要的作用。欧盟将纳米科技列入其科研框架计划的优先主题领域，并不断追加经费预算，在第六科研框架计划中对纳米科技的投入为13亿欧元，而在第七框架计划(2007~2013年)中增加到34.75亿欧元。除此之外，德国、法国、英国等欧盟成员国家各自对纳米科技也投入了大量资金，其投入总和已超过了欧盟。从世界各国对纳米科技的投入来看，在公共投入方面，美国与欧洲的基本相当，日本第三，而在企业投入方面，美国第一，日本次之，欧洲第三。俄罗斯凭借其强大的基础研究实力，出台了雄心勃勃的纳米科技计划，计划在2007—2010年拨款80亿美元发展纳米科技，并且成立了俄罗斯国家纳米科技公司(Rusnano)，计划到2015年将向其累计投入约110亿美元的巨额资金。

“纳米”现在已成为一个很常见的词汇，用百度搜索纳米，可以得到约4500万条结果，而用谷歌搜索英文纳米相关网页，可以得到1亿5千多万条结果。目前已基本形成了美国、欧盟与日本引领国际纳米科技的发展，中国、韩国、俄罗斯、印度等新兴国家紧随其后的格局。大体上来看，美国在纳米科技领域处于整体领先地位，但是美、日、欧在不同的领域各有千秋。在基础研究及生物、医学领域、纳米级分散体和涂料等方面，美、欧领先，日本次之；在合成与组装、高表面材料等方面，美国领先，其次是欧洲，然后是日本；而在纳米器件与结构纳米材料领域，日本则独占鳌头，美国和欧洲居后。现在计算机的运算速度越来越快、存储容量越来越大，无不受益于纳米科技的进步。各种纳米科技产品正以日新月异的姿态出现在我们的面前，人类社会正在逐步进入纳米时代。

1.2 纳米科技的内涵

1.2.1 纳米科技的范畴

如果以尺度来衡量人类对物质世界的探索，那么人们过去长期关注的是以下两个领域：①宏观领域，其下限一般为肉眼通过普通光学显微镜可以直接观察到的最小尺度，即亚微米级，向上则延伸到天体、星系直到浩瀚无垠的宇宙，从尺度上看是有下限而没有上限，遵循牛顿力学定律是宏观领域的基本特征；②微观领域，其上限为单个的分子、原

子, 向下则为各种基本粒子, 有上限而没有下限, 在微观领域起主要作用的是量子力学规律。而在宏观领域与微观领域之间, 则属于纳米领域, 就是费曼所预言的还有很大空间的“底部”。

纳米科技(Nanotechnology)的基本特点是具有比较明确的尺度特征, 美国 NNI 计划中对 Nanotechnology 的定义是“纳米尺度上的科学、工程与技术”, 所以 Nanotechnology 应该有两种含义, 一种是广义的, 指纳米科技, 另一种是狭义的, 即纳米技术。纳米科技可以看作是对纳米科学(nanoscience)、纳米技术(狭义的 nanotechnology)以及纳米工程(nanoengineering)的统称, 是研究、开发、利用纳米尺度物质的一门新型的应用型学科, 具有多学科交叉的特征。

按照对尺度范围的一般认定, 纳米尺度范围应包含亚纳米, 即介于 0.1~100nm 之间。然而, 亚纳米尺度与微观领域有明显的重叠, 而且有专门用来描述微观领域分子、原子大小的尺度单位埃($1\text{\AA}=0.1\text{nm}$), 因此, 现在一般认为纳米科技的合理尺度范围是 1~100nm。需要指出的是, 现在已发现了一些尺度小于 1nm 的纳米材料, 如 C_{60} 的直径为 0.7nm、最细的单壁碳纳米管的直径仅为 0.33nm, 所以也有一些学者建议将纳米科技的尺度范围定义为 0.1~100nm。研究纳米科技, 不仅要探索物质在纳米尺度上所表现出来的各种现象及其内在规律, 更重要的是要能够制取、表征与利用纳米尺度的物质。

1.2.2 纳米科技的研究内容

纳米科技关注的是物质在纳米尺度上表现出来的新现象与新规律, 如果作为一个学科, 可以把纳米科技概述为纳米尺度上的新概念、新理论、新原理、新方法与新用途的一门新型的、多学科交叉的应用型学科。因此, 从纳米尺度的角度来看, 可以将纳米科技的研究内容概括为以下三个方面:

(1) 纳米科学: 探索与发现物质在纳米尺度上所表现出来的各种物理、化学与生物学现象及其内在规律, 尤其是原子、分子以及电子在纳米尺度范围的运动规律, 为纳米科技产品的研发提供理论指导。

(2) 纳米技术: 主要包括纳米尺度物质的制备、复合、加工、组装以及测试与表征, 实现纳米材料、纳米器件与纳米系统在原子、分子尺度上的可控制备, 为纳米科技的应用奠定基础。

(3) 纳米工程: 包括纳米材料、纳米器件、纳米系统以及纳米技术设备等纳米科技产品的设计、工艺、制造、装配、修饰、控制、操纵与应用, 推动纳米科技产品走向市场、有效地服务于经济社会。

纳米科技作为一门应用型学科, 这三者之间是相互密切联系的, 只是在具体的研究中在侧重点上有所不同。随着纳米科技产品的应用日益广泛, 纳米尺度物质的安全性研究受到了广泛的重视, 其内容包括纳米尺度物质对人类健康与环境的影响, 乃至纳米科技、纳米产品对社会道德与伦理的影响等。目前, 为了抢占市场先机, 纳米科技产品标准的制定已成为国际上一个竞争十分激烈的领域。一方面纳米科技产品需要标准来加以规范, 有利于规范产品的生产, 提高产品的质量和生产效率, 另一方面标准也是国际贸易以及国际技术合作的纽带, 产品标准化的程度直接影响贸易中技术壁垒的形成和消除。目前, 国际标准化组织已成立了专门的委员会来协调、制定相关的标准, 促进纳米科技产业的有序发展。