

# 纳米材料的理化特性与应用

倪星元 沈军 张志华 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米材料的理化特性与应用/倪星元, 沈军, 张志华  
编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 9  
ISBN 7-5025-7674-6

I. 纳… II. ①倪…②沈…③张… III. 纳米材料-  
物理化学性质-研究 IV. TB383. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 109574 号

---

纳米材料的理化特性与应用  
倪星元 沈军 张志华 编著  
责任编辑: 丁尚林  
文字编辑: 徐雪华  
责任校对: 蒋 宇  
封面设计: 潘 峰

\*

化学工业出版社 出版发行  
材料科学与工程

# 序

纳米科技发展的战略地位和巨大潜力越来越受到世界各国政府和科学家们的高度重视。美国制定了纳米技术战略，与 21 世纪信息技术战略并列为最先研究开发的重点。日本政府在其《2001 年度科学技术振兴重点指南》中，也把纳米技术列为重点，并成立了专门机构。西欧将纳米技术列入欧盟 2002~2006 年科研框架计划。在我国对于纳米科技的研发受到政府和社会各界的广泛关注，使纳米科技在我国的快速发展提供了比较有利的外部环境。

但同时也应看到，一个时期以来对纳米科技的某些误解以及伪纳米产品的出现，使得有不少的人开始怀疑纳米科技本身的功能和可能进一步产生的优势。针对这一状况，让更多的人对纳米科技及所关联的纳米材料的基本特性、所具备的功能及发展的方向有所了解是很有必要的。

《纳米材料的理化特性及其应用》一书的出版为人们从本质上比较深入地了解纳米材料提供了很好的帮助，也为正在从事纳米科技和纳米材料工作的相关人员提高现有的工作水平提供了有益的参考工具。本书从材料最基本的原子、分子的结构和经典理论出发，深入浅出地介绍了新一代纳米材料的特殊的物理和化学特性，延展介绍了纳米材料对相应的最新

读物，也可作为从事纳米科技的专业工程技术人员、高年级大学生、研究生及相关科研人员的参考书。

本书的出版必将对我国纳米科技及纳米材料的研究和应用起到积极的推动作用。

中国工程院院士 李同保  
2005 年 7 月

# 前 言

材料是一切事物的物质基础。从科学技术发展的历史看，一种新技术的实现，往往需要新材料的支持。半导体材料的发明，促使电子技术发生了根本性的变化；20 世纪 70 年代初制成的光导纤维使光强度几乎不衰减的特性，造就了现代光通讯技术；高纯度大直径的硅单晶的产生，促进了超大规模集成电路的发展，也成就了今天如此发达的计算机世界及电子信息业。一门以 0.1~100nm 尺度范围揭示原子、分子特性以及新的应用前景为研究对象的纳米材料学，使纳米科技得到迅速发展。从 90 年代纳米科技正式兴起，并直接以原子和分子来构造具有特定功能的产品为最终目标的崭新技术，给材料生产与加工带来了一场革命性的冲击，也激发了一股新的科学热潮。

纳米材料在信息、能源、环境、生命、军事等众多方面具有广泛的应用前景，世界各国都十分重视包括纳米材料在内的纳米科技的研究开发，把它

象，在一个纳米量级的尺寸范围内，将形成许多既不同于宏观物体，也不同于单个原子、分子的奇异性质，或对原有性质有十分显著的改进和提高。纳米材料产生的奇异性能和主要限域效应有比表面效应、小尺寸效应、界面效应和宏观量子效应等。这些效应使纳米材料的光、电、热、磁等物理性质和化学性质与常规材料不同，使材料具有了许多新的特殊的功能。

随着纳米科技的兴起，已经有很多介绍纳米效应和纳米技术的应用及纳米材料制备技术的文献和资料面世，对推动纳米科技的健康发展起了很好的作用。但仔细看一下会发现，在已有的文献和资料中，有关探讨纳米效应产生机理的论述不多。根据作者的经验，知其然，不知其所以然，只看现象，不究内在机制，无论对做研究还是搞生产都是不利的。现在许多假冒的纳米科技和产品充斥于市场和媒体，难以识别真伪，原因就在于此。本书的一个重要特点是以物质的最基本的原子、分子的特性和结构为切入点，介绍了纳米材料特殊的效应和性质。这部分内容尽管占了较大的篇幅，但这将对深入理解纳米材料的特异效应

经过这些年的努力，广大纳米科技工作者已经积累了相当多的应用范例，本书实在难以涵盖，所涉及的只能是挂一漏万。

本书的编写汇集了许多同仁的心智，李同保院士给予了悉心指导和帮助，在此一并表示感谢。

如果本书能给广大读者有所启示和帮助，能对纳米科技的进展起到一些促进的作用，作者将感到莫大的欣慰。

由于纳米科技发展迅猛，纳米材料新品层出不穷，加之作者学识所限，时间仓促，本书会有许多不足之处，恳请读者谅解并批评指正。

作者  
2005. 7

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                | 1  |
| 1.1 纳米科技的兴起与发展 .....          | 1  |
| 1.2 纳米的基本定义 .....             | 5  |
| 1.3 纳米材料特性研究的主要内容和意义 .....    | 8  |
| 参考文献 .....                    | 11 |
| 第 2 章 纳米材料的物理和化学特性的基础知识 ..... | 13 |
| 2.1 元素和原子结构 .....             | 13 |
| 2.2 分子和物质的相态 .....            | 18 |
| 2.3 能级与能量 .....               | 22 |
| 2.4 纳米排列和自组装 .....            | 29 |
| 参考文献 .....                    | 31 |
| 第 3 章 纳米材料的电子能态特性 .....       | 33 |
| 3.1 纳米材料的                     |    |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 5 章 纳米材料的物理特性 ..... | 51 |
| 5.1 纳米材料的热学性能 .....   | 51 |
| 5.2 纳米微粒的磁学性质 .....   | 52 |
| 5.2.1 磁畴结构 .....      | 52 |
| 5.2.2 超顺磁性 .....      | 53 |
| 5.2.3 矫顽力 .....       | 55 |
| 5.2.4 居里温度 .....      | 56 |
| 5.2.5 磁化率 .....       | 57 |
| 5.3 纳米微粒的光谱特性 .....   | 58 |
| 5.3.1 宽频带强吸收 .....    | 58 |
| 5.3.2 蓝移和红移现象 .....   | 59 |

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 7.2   | 纳米微粒的分散与团聚 .....     | 92  |
| 7.2.1 | 分散 .....             | 92  |
| 7.2.2 | 微粒的团聚 .....          | 93  |
| 7.3   | 纳米微粒的表面活性和催化作用 ..... | 94  |
| 7.4   | 光催化性能 .....          | 96  |
|       | 参考文献 .....           | 101 |
| 第 8 章 | 纳米材料的表征和测量 .....     | 103 |
| 8.1   | 电子显微镜和显微结构分析 .....   | 103 |
| 8.1.1 | 透射电子显微镜 (TEM) .....  | 104 |
| 8.1.2 | 扫描电子显微镜 (SEM) .....  | 106 |
| 8.1   |                      |     |

|                   |               |     |
|-------------------|---------------|-----|
| 8.5.2             | 红外光谱          | 135 |
| 8.5.3             | 拉曼光谱          | 137 |
| 8.4.4             | 紫外-可见吸收光谱     | 138 |
|                   | 参考文献          | 140 |
| 第9章 纳米材料在电子学方面的应用 |               | 141 |
| 9.1               | 引言            | 141 |
| 9.2               | 量子电子器件        | 143 |
| 9.2.1             | 高电子迁移率三极管     | 145 |
| 9.2.2             | 量子干涉晶体管       | 147 |
| 9.2.3             | 单电子晶体管 (SETS) | 147 |
| 9.2.4             |               |     |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 10.4.3 矿物分离 .....                | 171        |
| 10.5 在巨磁电阻中的应用 .....             | 172        |
| 10.6 纳米微晶软磁材料及应用 .....           | 173        |
| 10.7 纳米磁流体及应用 .....              | 174        |
| 10.8 在其他领域的应用 .....              | 176        |
| 参考文献 .....                       | 177        |
| <b>第 11 章 纳米材料在光学方面的应用 .....</b> | <b>179</b> |
| 11.1 引言 .....                    | 179        |
| 11.2 纳米材料中的一些基本光学现象 .....        | 181        |
| 11.2.1 光的反射 .....                | 181        |
| 11.2.2 光的透射 .....                |            |

|        |                      |     |
|--------|----------------------|-----|
| 12.2.1 | 纳米颗粒和固体生物材料 .....    | 198 |
| 12.2.2 | 纳米生物薄膜 .....         | 201 |
| 12.2.3 | 纳米复合生物材料 .....       | 203 |
| 12.3   | 药物和基因输送的纳米载体 .....   | 204 |
| 12.3.1 | 药物载体 .....           | 204 |
| 12.3.2 | 输送基因的纳米载体 .....      | 207 |
| 12.3.3 | 导向药物 .....           | 209 |
| 12.4   | 纳米药物输送、控释系统 .....    | 210 |
| 12.4.1 | 纳米药物输送、控释系统的特点 ..... | 210 |
| 12.4.2 | 纳米药物                 |     |

|        |                                 |     |
|--------|---------------------------------|-----|
| 14.1   | 引言 .....                        | 243 |
| 14.2   | 抗菌材料 .....                      | 244 |
| 14.2.1 | 纳米 Ag 抗杀菌材料 .....               | 245 |
| 14.2.2 | 纳米 TiO <sub>2</sub> 抗杀菌材料 ..... | 247 |
| 14.3   | 功能涂料 .....                      | 250 |
| 14.3.1 | 纳米抗老化环保复合涂料 .....               | 251 |
| 14.3.2 | 抗菌防污纳米复合涂料 .....                | 254 |
| 14.3.3 | 抗干扰及电磁屏蔽涂料 .....                | 256 |
| 14.4   | 纳米材料在其他降污染方面的应用 .....           | 257 |
| 14.4   |                                 |     |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 纳米科技的兴起与发展

回顾人类科学发展史在 20 世纪达到了一个辉煌的顶峰，这就是电子信息技术和生命科学。但这辉煌同样遇到了新的挑战，回应这挑战的武器之一就是纳米科技。人类科技发展和纳米技术兴起的经历，可简单归纳于表 1.1 中。

表 1.1 科学的发展及纳米技术的兴起

| 起 始 时 间       | 时 代 | 发明或技术进步 |
|---------------|-----|---------|
| 公元前 2200000 年 | 石器  | 工具      |
| 公元前 3500 年    | 青铜器 | 冶金</    |

和 Rohrer 发明了扫描隧道显微镜,使得人类首次在大气及常温下观察到了原子,这为纳米技术的发展奠定了基础。

1990 年另一位叫 Drexler 的科学家对 Feynman 提出的纳米技术概念进行了拓展,指出:“纳米技术的基本思想是在分子水平上,通过操纵原子来控制物质的结构。它使我们可以利用单个原子组建分子系统,制备不同类型的纳米器件。”

这些年来,世界各国都把发展纳米技术作为增强未来竞争力的科技战略。无论是在美国、日本还是其他发达国家对纳米科学和工程的前景至今已无人敢忽视。原美国国家科学基金主任、后任总统科学顾问的 Lane 博士在 1998 年 4 月的一次国会听证会上陈述:“如果有人问我科学和工程的哪一个方面最有可能在未来产生突破性的进展,我将毫不犹豫地说是纳米

了“国家纳米发展纲要”。

其实纳米科技也不是空穴来风，人工制备纳米材料的历史至少可以追溯到 1000 多年前。中国古代利用燃烧蜡烛采集的炭黑作为墨的原料以及用于着色的染料，这也许可以算最早的纳米材料；中国古代铜镜表面有一层防锈层，现经检验，这层防锈层为纳米氧化锡颗粒构成的薄膜。当然那个时代的人们还不知道这是由人的肉眼根本看不到的仅有纳米尺度大小的小颗粒构成。大约在 1861 年，随着胶体化学 (colloid chemistry) 的建立，科学家们就开始了直径为  $1 \sim 100\text{nm}$  的粒子系统即所谓胶体 (colloid) 的研究，当时只是从化学的角度作为宏观体系的中间环节开展研究，并没有意识到就此揭示了人们认识世界的一个新的层次，即我们现在所说的“纳米世界”。

人们自觉地把纳米相材料