

纳 米 技 术 与 应 用

顾 宁 付德刚 张海黔 等 编著

人 民 邮 电 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米技术与应用/顾宁, 付德刚, 张海黔等编著. —北京: 人民邮电出版社, 2002.3

ISBN 7-115-10037-3

I. 纳... II. ①顾... ②付... ③张... III. 纳米材料—应用 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 004443 号

内 容 提 要

本书用简练的语言介绍了纳米科技的产生、纳米材料与结构、纳米加工制造技术及分子纳米技术, 在此基础上, 着重介绍了微/纳米机械学、纳米电子学、纳米生物学及纳米技术在建筑行业、纺织行业、化工行业、汽车工业及环境保护等方面的最新进展和相关应用。书中各章均给出了一些主要的参考书、期刊杂志和国内外相关网站, 为读者进一步的学习提供线索。

本书资料丰富, 突出创新, 是从事纳米科技的研发人员、大学生及广大的纳米科技爱好者的有益参考书。

纳米技术与应用

◆ 编 著 顾 宁 付德刚 张海黔 等
责任编辑 富 军 赵桂珍

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线: 010-67180876

北京汉魂图文设计有限公司制作

印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 10.25

字数: 246 千字 2002 年 4 月第 1 版

印数: 1—0 000 册 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10037-3/TN · 1830

定价: 14.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

前言

Nano-来源于拉丁语中的一个词头，是非常小、渺小的意思；在国际单位制中通常表示为 10^{-9} 量级。纳米（nanometer, nm）则是一个长度单位， $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ 。这个长度单位已被采用了很长的时间，科技工作者对其并不陌生。但绝大多数人没有想到，在今天，这个单位名词会被如此广泛地使用，会成为老百姓茶余饭后津津乐道的话题。

美国物理学家理查德·费曼教授是纳米科技最早的倡导者。他在1959年就为我们描绘出了一幅纳米科技的美妙画卷。随后，陆续地有许多科技工作者在自己的研究领域中，或多或少地涉及到一些对具有纳米尺度结构的加工制造、纳米微粒材料的制备以及特性的研究，等等。特别是1982年扫描隧道显微镜的发明，使得人类可以在室温、大气或液相条件下看到一个一个的原子，这如同为我们配了一付更加清晰的眼镜，让人类的视力获得了大大的延伸，能很容易地达到纳米尺度的观察要求，可使人们能够在自己的意愿下，进行搬运原子的操作和测量在纳米尺度微区域内的性质。总之，这些显微技术为我们人类提供了一种功能非常强大的工具，使得我们能便利地进入到纳米尺度的微观世界。

在纳米尺度的世界里，我们的确已经领略到了非常奇妙的景象。当材料的特征尺度降低到纳米尺度时，会因为小尺寸效应、量子效应、界面或表面效应等而出现明显不同于我们在宏观世界中常规材料的新性质。由于传统陶瓷材料质地较脆，韧性、强度较差，因而其应用受到了较大的限制。随着对纳米材料的制备与表征手段的深入研究和广泛应用，纳米陶瓷应运而生，希望以此来克服陶瓷材料的脆性，使陶瓷具有像金属一样的柔韧性和可加工性。纳米科技对电子学、光子学以及信息科技发展的推动，在于立足于最新的物理理论和最先进的加工工艺手段，按照全新的理念来构造光、电子等信息传输与处理系统，由此开发物质潜在的储存和处理信息的能力，实现信息技术的跨越式的革命性发展，为纳米计算系统的实现带来了希望的曙光。纳米生物医学可以在纳米尺度上了解生物大分子的精细结构及其与功能的关系，获取生命信息。在不久的将来，被视为当今疑难重症的艾滋病、高血压及癌症等问题都将迎刃而解！

我们完全有理由对纳米科技的发展以及将为我们带来的美好未来充满信心、欢欣鼓舞。同时，我们也需要冷静、客观地分析和看待不同阶段对纳米科技发展的限制因素，最重要的是我们要始终保持对发展纳米科技应有的信心，并愿为此作出不懈的努力。对从事纳米科技研究与发展的科研人员来说，都有一个共同的心愿，这就是尽量减少对纳米科技发展浮躁的、不切实际的与不分阶段的过高期望，而应该更多地加强纳米科技知识的普及与宣传，唯有这样，纳米科技才可能健康正常地发展。这也是我们编著本书的初衷。

这是一本集体编写的书。顾宁与王怡红合写了第1章；张宇、徐丽娜、马明、周凯常合写了第2章；徐丽娜、马全红、郭志睿、廖建辉编写了第3章；顾宁编写了第4章；付德刚、徐春祥、廖建辉、王伟、黄岚编写了第5章；张海黔最初参加了全书的计划安排、组稿工作，

并参与第 6 章的写作，后因中途去美国进修，第 6 章基本由虞伟完成；葛存旺、张宇编写了第 7 章；郭全忠、段磊、丁余心等人为本书的有关部分进行了配图，校订重要的符号、数据、参考文献及其他编务工作等；最后由顾宁、付德刚对全书进行了统稿。

书中引用了许多已发表的结果和文献，除主要部分作为引用文献指出外，还有一些因为篇幅的原因无法一一列举，在此特向被引用文献的作者致以我们衷心的感谢！

由于该书涉及的知识面宽，而且很多方面还处于研发阶段，因此书中难免有不妥甚至错误之处，恳请同行专家和广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 纳米科技的诞生及发展概况	1
§1.1 从扫描隧道显微镜的发明说起	1
§1.2 纳米与纳米科技的基本概念	3
§1.3 纳米科技发展的重要事件	4
§1.4 纳米科技发展的主要特征	8
§1.5 纳米科技发展的重要意义	9
参考文献	13
第 2 章 纳米材料与纳米结构	14
§2.1 纳米材料与纳米结构的定义	14
§2.2 纳米材料的特性	16
1. 量子尺寸效应	16
2. 小尺寸效应	17
3. 表面效应	17
4. 宏观量子隧道效应	18
§2.3 纳米材料的分类	18
1. 纳米粉末	18
2. 纳米纤维	23
3. 纳米薄膜	27
4. 纳米块体材料	31
§2.4 纳米材料的制备	33
1. 纳米材料的物理制备方法	33
2. 纳米材料的化学制备方法	37
参考文献	45
第 3 章 分子纳米技术	47
§3.1 分子组装技术	47
1. LB 膜技术及其应用	47
2. 分子自组装技术	50
3. 分子束外延 (MBE)	58
§3.2 分子导线	60
1. 分子导电性	60

2. 分子导线的种类	60
§3.3 分子开关器件	67
1. 量子效应分子电子器件	67
2. 机电分子电子器件	68
参考文献	71
第 4 章 纳米机械及其应用	75
§4.1 纳米机械的出现是微机电系统 (MEMS) 发展的趋势	75
§4.2 纳米机械学 (nano mechanics) 原理与技术研究	77
1. 纳米机械学的定义和任务	77
2. 纳米机械学的特点	78
§4.3 微/纳米机器的制造与应用前景	78
§4.4 纳米摩擦学 (nanotribology) 原理与应用	82
1. 纳米摩擦学的产生	82
2. 纳米摩擦学研究的进展概要	83
3. 纳米摩擦学的主要研究内容	84
参考文献	85
第 5 章 纳米光、电子器件及其应用	87
§5.1 纳米器件的制造技术	87
1. 传统的加工技术	88
2. 新兴的加工技术	89
§5.2 固态量子效应纳米电子器件	93
1. 量子点 (QD)	93
2. 谐振隧穿器件	94
3. 单电子器件	94
§5.3 纳米晶太阳能电池	98
1. 纳米晶光电化学电池	99
2. 纳米晶固体半导体光伏电池	103
3. 纳米晶有机光伏电池	106
§5.4 纳米发光材料及其应用	106
1. 硅基半导体纳米发光材料	107
2. 纳米粉末发光材料	108
3. 碳纳米管在发光显示技术中的应用	108
§5.5 纳米电子学的应用	109
1. 传统集成电路的极限与纳米集成电路的应用	110
2. 纳米电子学在生物学中的应用	111
3. 纳米电子学在军事领域中的应用	112

4. 纳米电子学在其他方面的应用	113
参考文献	114
第 6 章 纳米生物医学的研究与发展	118
§6.1 纳米生物医学的诞生与发展	118
1. 纳米技术与生物医学的结合	118
2. 纳米生物学 (nanobiology) 研究	119
3. 在细胞分离与细胞内部染色中采用纳米技术	121
4. 纳米级的仿生机器	122
5. 开创纳米医学新纪元	123
§6.2 纳米药物技术	124
1. 纳米药学的研究内容与特点	124
2. 纳米抗菌药物	126
3. 纳米微粒药物	126
4. 表面进行分子包敷的磁性纳米粒子药物	126
5. 纳米中药	127
§6.3 纳米技术在临床诊疗中的应用	128
1. 临床诊断与监测	128
2. 临床治疗	131
§6.4 纳米技术在保健与康复医学中的应用	133
1. 纳米医学保健	133
2. 康复医学与治疗	134
3. 纳米材料在康复医学中占有重要的位置	135
参考文献	135
第 7 章 纳米材料的应用	137
§7.1 引言	137
§7.2 纳米材料在建筑行业中的应用	138
1. 陶瓷领域中的应用	138
2. 涂料中的应用	138
§7.3 纳米材料在化工行业中的应用	140
1. 催化	140
2. 纳米塑料与橡胶	141
3. 材料表面防腐中的应用	142
§7.4 纳米材料在纺织品中的应用	142
1. 抗紫外线型化纤	143
2. 反射红外线 (含抗红外线) 型化纤	144
3. 抗菌、抑菌、除臭型化纤	145
4. 导电型化纤用超细粉体材料	147

5. 应用超细粉体材料的多种功能化纤	147
6. 智能型面料与纳米技术	148
§7.5 纳米材料在汽车工业中的应用	149
1. 汽油微乳化剂	149
2. 纳米润滑技术	149
3. 纳米材料电池	149
4. 汽车用纳米工程塑料	150
§7.6 纳米材料在环境保护中的应用	150
1. 简述	150
2. 半导体光催化氧化	151
3. 电磁波辐射防护	152
4. 白色污染	152
5. 污水处理	153
§7.7 纳米材料在其他领域中的应用	153
1. 纳米技术在体育方面的应用	153
2. 纳米技术在农业中的应用	154
3. 纳米材料在应用中存在的问题	154
参考文献	155

第 1 章 纳米科技的诞生及发展概况

§ 1.1 从扫描隧道显微镜的发明说起

20 世纪 70 年代末期，在位于瑞士苏黎世附近的一个叫做瑞峙林空（Rüschlikon）的美丽小城，国际商用机器公司（IBM）苏黎世研究实验室的研究员瑞士人海因里希·罗瑞尔（Heinrich Rohrer）博士与德国人盖尔德·宾尼戈（Gerd Karl Binnig）博士在共同研究超导以及反铁磁材料等方面的问题。他们用一根缝衣针大小的金属针的针尖靠近一个具有导电性的表面，比如一种金属的表面，当针尖距表面非常近（通常小于十亿分之一米）的时候，在针尖与表面间加上一个较小的电压（几个伏特），电子就可以穿过针尖与样品表面的间隙而形成连续的电流。这种现象叫做隧道效应，穿过针尖与导电表面间隙的电流叫做隧道电流。他们发现当外加电压保持不变时，隧道电流强度对针尖与样品表面之间的距离非常敏感。当距离减小到一百亿分之一米，隧道电流将增加一个数量级。由此，他们利用电子线路反馈控制隧道电流的恒定，并用压电陶瓷器件控制针尖在表面进行二维的扫描，于是探针在垂直于样品表面方向上的高低变化就反映出样品表面的起伏情况，如图 1-1 所示。这非常像盲人凭借指尖阅读盲文。不同的是真正起作用的探针针尖通常只有一个或几个原子的大小，所以它可以用来探索表面的原子尺度的起伏，获得可分辨原子尺度的图像。这种完全新型的表面分析仪器称为扫描隧道显微镜（scanning tunneling microscope，简称为 STM）。

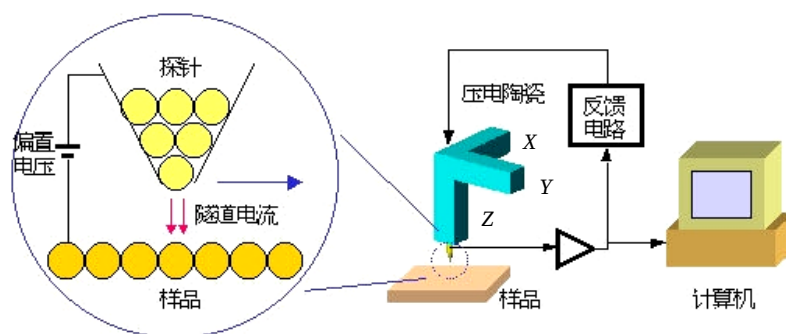


图 1-1 STM 的原理示意图

STM 的发明使人类能够在大气、常温等条件下，实时地观察并研究单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物理、化学性质。它具有十分深远的意义，仿佛人类的

视力被大大地延伸了，一直延伸到可以较容易地观察原子、分子的状态与行为。但在 STM 发明之初，并没有受到应有的重视。一方面，这一发明的重要性没有被认识到；另一方面，很多人担心其实际可以观察图像的分辨率究竟能有多高。无怪乎罗瑞尔与宾尼戈最初关于 STM 的论文被拒绝发表，理由是“他们的工作并不那么的有意义……”。尽管如此，STM 的发明（1982 年发表了第一篇相关论文）以及其在表面原子、分子结构研究方面的重要作用无可争辩的被广泛地承认了，并由此使得罗瑞尔与宾尼戈共同荣获了 1986 年的物理学诺贝尔奖。

伴随着 STM 的发明以及其在表面高分辨率观察研究中的各种应用的日渐增多，有人发现利用探针针尖与表面之间的各种相互作用，可以用来分析高分辨率成像。1986 年，宾尼戈等人发明了利用激光检测针尖与表面相互作用进行表面成像的分析仪器。该仪器称为原子力显微镜（atomic force microscope，简称为 AFM）。STM 与 AFM 共同构成了现今称之为扫描探针显微镜（SPM）的两大主体技术，如图 1-2 所示。

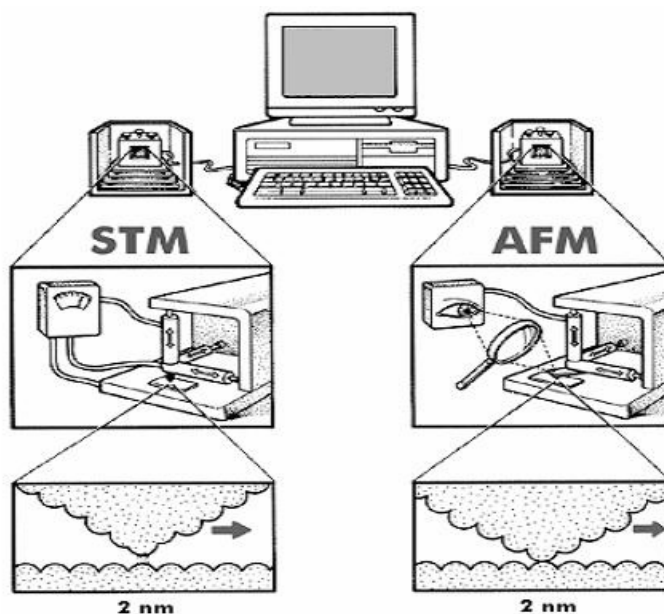


图 1-2 扫描探针显微镜（SPM）中的两种主要显微技术

1990 年，IBM 的艾格勒（D. M. Eigler）等人最早报道了成功地利用 STM 操纵原子拼写字母的结果。具体方法是利用 STM 探针的针尖通过静电力吸附上氙原子，再在液氦的低温条件下一个一个地将它们排放在镍（110）单晶表面，形成一个“IBM”的字样，一共用了 35 个氙原子，如图 1-3 所示。这应该说是目前世界上最小的原子商标，它表明人类不仅可以采用 SPM 观察、测量这些表面上原子、分子的结构，而且还可以根据人的意志来随意加工制造出最小的人工结构。因为 SPM 不仅可用于显微以及进行相关谱学的测量，更可以用来操纵原子，所以 SPM 也叫作扫描探针显微术。相应地，STM 叫作扫描隧道显微术，AFM 叫作原子力显微术。

随后发展起来的 SPM 还包括电化学显微术（ECM）、磁力显微术（MFM）、电容量显微术（CFM）、电场力显微术（EFM）及扫描近场显微术（SNOM）等，形成为微结构观测技

术中强有力的工具。特别是，这些显微术不仅可进行微结构或形貌的观察测量，而且基于不同的成像原理可同时研究有关结构的性质，进行原子、分子的搬迁、操纵等。

如果将光学显微镜叫做第一代显微镜，电子显微镜叫做第二代显微镜，那么扫描探针显微镜则可以称之为第三代显微镜，其优势已如上述。特别是显微镜的飞速发展，为纳米科学与技术的发展奠定了必不可少的坚实基础。



图 1-3 世界上最小的原子商标——由 35 个氩原子在镍（110）单晶表面组成（液氮温度下）

§ 1.2 纳米与纳米科技的基本概念

纳米（nm）是一个长度单位，1nm 等于十亿分之一（ 10^{-9} ）米，即等于 10Å。可设想一下，1nm 的长度约相当于 3~5 个原子紧密地排列在一起所具有的长度。区区一个如此小的长度单位，如何又称之为科技呢？

SPM 的发明及一些先进的加工制备技术的产生，使人们可以越来越多地观察、测量，并进而分析、了解纳米尺度的材料或具有纳米尺度的结构所具有的不同寻常的特性，且将它们投入应用。所谓纳米科技是以 1~100nm 尺度的物质或结构为研究对象的学科，就是指通过一定的微细加工方式，直接操纵原子、分子或原子团、分子团，使其重新排列组合，形成新的具有纳米尺度的物质或结构，研究其特性，并由此制造具有新功能的器件、机器以及其他各个方面应用的科学与技术。

可见，纳米科技的首要任务就是要通过各种手段，如微细加工技术和扫描探针技术等来制备纳米材料或具有纳米尺度的结构；其次借助许多先进的观察测量技术与仪器来研究所制备纳米材料或纳米尺度结构的各种特性，最后根据其特殊的性质来进行有关的应用。所以，从一定程度上讲，纳米材料、纳米加工制造技术以及纳米测量表征技术构成为纳米科技发展的三个非常重要的支撑技术。如果将纳米科技比喻为一只鼎，它们就是这只鼎的三个足，奠定整个纳米科技发展的基础，如图 1-4 所示。

纳米科技的核心思想是制备纳米尺度的材料或结构，发掘其不同凡响的特性并对此予以研究，以致最终能很好地为人们所应用。将这种思想和相关的方法引入到各个领域，便形成形形色色的各类纳米科技研发领域，主要包括：纳米体系物理学、纳米体系化学、纳米材料学、纳米生物学、纳米电子学、纳米光子学、纳米机械学、纳米加工制造学、纳米表征测量

学及纳米医学，等等。

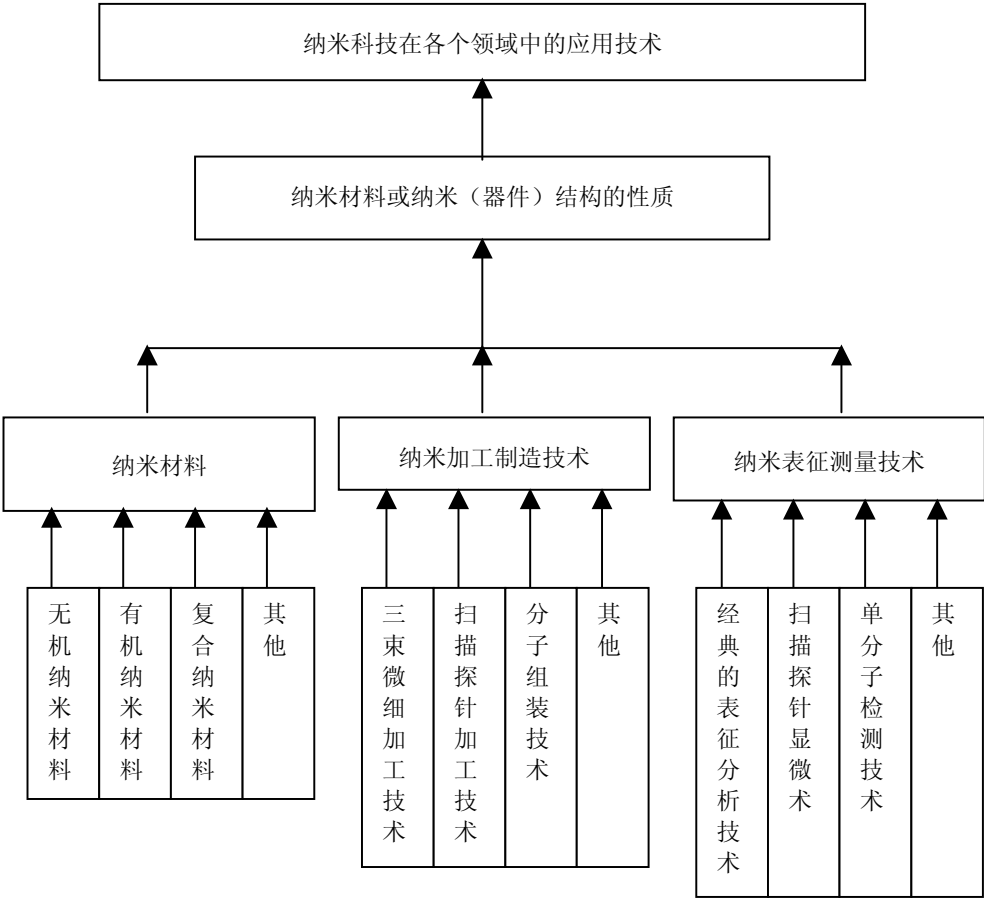


图 1-4 纳米科技的主要基础与重要研究发展方向

§ 1.3 纳米科技发展的重要事件

纵观纳米科技研究与发展过程中的一些重大的事件及重要的发明，可以使我们在以后介绍或讨论一些具体的问题之前形成一些初步的认识。话题还得从几十年前的美国物理学会的一次年会说起。

1959 年 12 月，在美国物理学会年会上，著名物理学家、诺贝尔物理奖得主理查德·费曼教授作了一次非常著名的讲演，题目叫作“自底层构造的丰富结构（There’s plenty of room at the bottom）”。其中有一段话是这样说的：“我认为，物理学的原理并不排斥用一个一个地安排原子来制造东西。这样做，并不违反任何定理，因而在原则上是可以实现的。它在实践中迄今未实现是因为我们太大了。”他还说：“如果我们能按照自己的愿望一个一个地安排原子，将会出现什么……这些物质将有什么性质？这是十分有趣的理论问题。虽然我不能精确回答它，但我绝不怀疑当我们能在如此小的尺度上进行操纵时，将得到具有大量独特性质的物质。”现在，

理查德·费曼的演讲已被看作是纳米科技基本概念的起源，有人甚至将纳米科技形象地称为“费曼之梦”。

1974 年，在日本精密机械学会等举办的一次国际生产工程技术会议上论及了纳米技术（nanotechnology）的概念。当时，已有许多关于超精密加工的论述，但加工精度的最终实现目标并不明确。基于加工技术的进步和提高加工精度的可能性，以及固体物质结构的最小特征尺寸等因素，设想加工精度的界限应为纳米级。若要求加工精度为 1nm，必然要求亚纳米级精度的测量和控制技术。因此，归纳出纳米技术至少是包括材料、加工、测量以及控制技术的统一体。

1982 年，IBM 公司苏黎世研究实验室的海因里希·罗瑞尔博士和盖尔德·宾尼戈博士共同发明了扫描隧道显微镜，使得人类能首次在大气及常温下看见原子，也为相关的测量以及搬迁原子等奠定了基础，并因此获得了 1986 年诺贝尔物理学奖。

1984 年，德国萨尔大学的葛莱特（Gleiter）教授等人首次采用惰性气体凝聚法制备了具有清洁表面的纳米微粒，然后在真空室中原位加压制作成纳米相固体，并提出纳米材料界面结构模型。随后发现氟化钙纳米离子晶体和二氧化钛纳米陶瓷在室温下出现良好韧性，在 180℃ 经受弯曲并不产生裂纹，使人们看到了陶瓷增韧的新曙光。

同年，为了模拟星际空间及恒星附近链状碳原子的形成过程，罗尔芬等人用质谱仪研究在超声氦气流中被激光汽化的石墨凝聚物时，发现了一族全新的碳原子团簇 $C_{30} \sim C_{100}$ ，团簇中碳原子数目均为偶数。

1985 年，英国苏塞克斯大学的克劳托（Kroto）与美国赖斯大学的克尔、斯莫利（Richard E. Smalley）教授合作，进行宇宙尘埃的模拟研究，采用激光加热石墨蒸发并通过甲苯收集获得碳的团簇，质谱分析发现以 C_{60} 、 C_{70} 为主的新谱线。 C_{60} 具有高稳定的新奇结构，即由 60 个碳原子组成了一个封闭的 32 面体结构，其中有 20 个六边形以及 12 个五边形。这种类似于足球的 32 面体结构的提出，受到美国建筑设计师富勒设计的圆形穹顶结构的启发，于是将这种笼状原子簇命名为富勒烯，也常被人戏称为足球烯。由于碳的这种结构与常规的碳的两种同素异构体，即金刚石与石墨完全不同，特别是理化性质也十分独特，具有非常好的应用前景，使得其一出现就引起了巨大的反响，在物理、化学领域中引发了大量的研究。因为这些原因， C_{60} 的发现使克劳托、克尔、斯莫利教授获得了 1996 年诺贝尔化学奖。

同年，莫斯科国立大学的一位年轻的物理学教授康斯坦丁·利哈廖夫、博士后亚历山大·佐林以及本科学生德林特里·阿韦林共同提出，可以通过控制单个电子进入或离开所谓的库仑岛，即与纳米线路通过一定的间隔相联系的，具有纳米尺度的导体或半导体，来实现一些目前需要一定规模电路才能实现的功能，如电荷计量等。这就是单电子器件的基础。

1986 年，麻省理工学院的德瑞克斯勒（K. Eric Drexler）博士在其著作《创造的工程》中描绘了一幅即将到来的纳米技术时代的乌托邦景象：通过分子的自发相互作用可进行具有纳米尺度的器件或系统的制造。当“自组装”缩小到可以在原子大小的自组装流水线上应用时，可以获得从最底层组装成的任何可以想象到的实物，比如小汽车、地毯甚至是一块烤牛排。德瑞克斯勒博士作为目前世界上非常有影响的前瞻研究所（foresight Insitute）的理论家和主席，为分子纳米技术的发展，从材料到分子剪裁、组装乃至应用等许多方面都提出了许多非常有创建性的想法，研究所的工作也获得了广泛的称道。

1987 年秋天，荷兰的戴尔夫特理工大学的巴尔特·威斯和飞利浦研究所的亨克·豪特等人在研究电流流过现在被称作量子点接触的纳米结构时，获得了明显的具有台阶特征的伏安

特性，这是电导量子化的有力证据。

1989 年，美国加州大学洛伦兹—伯克利实验室的研究人员首次用扫描隧道显微镜清晰地观察到小牛胸腺 DNA 的右手双螺旋结构。这一工作开辟了纳米生物学研究的新领域，被评为当年全美十大科技新闻之一。

1990 年，美国 IBM 公司的科学家艾格勒（D. M. Eigler）博士在液氦温度（4K）下，用超高真空 STM 首次实现了单原子操纵。其具体作法是：在 4K 的低温下，首先将氙原子吸附在镍（110）表面，用 STM 得到该表面的高分辨率图像；接着，用 STM 的针尖对准并逼近一个氙原子，在针尖和样品之间加上一定的电场，使该氙原子与针尖产生相互作用而将氙原子吸住；最后将针尖沿样品表面移动来拖动氙原子到特定的位置上，去掉电场（或使电场极性反转）使针尖与氙原子分离，针尖退回到正常高度。重复上述过程，结果用 35 个氙原子在镍表面上组成了一个“IBM”图案，开创了单原子操纵研究的先河。一年之后，他们用一氧化碳分子在铂表面上构造了一个大头娃娃的分子人，分子人从头到脚仅有 5nm 高度。

同年 7 月，在美国巴尔的摩市召开了国际首届纳米科学技术会议（Nano’I）。会上，各国科学家们对纳米科技（主要包括纳米材料学、纳米电子学、纳米生物学、纳米机械学、纳米表征测量技术等）的前沿领域和发展趋势进行了探讨和展望，并决定出版三种杂志：《纳米结构材料（nanostructured materials）》、《纳生物学（nanobiology）》、《纳米技术（nanotechnology）》。

1991 年，日本 NEC 的科学家饭岛澄男（Sumino Iijima）等人采用电弧放电合成球碳微粒时，在负极一端的沉淀物中分离获得一种具有纳米尺度直径的碳管，亦即我们现在常说的纳米碳管。其方法是在真空反应器中充以一定压力的惰性气体（如氩气）作为保护气体，对碳进行电弧放电气化，在碳负极上即可收集分离获得纳米碳管。由于纳米碳管的特殊结构、特性以及巨大的应用前景，使得对纳米碳管的研究从其发现到现在，始终得到超乎寻常的重视。

1992 年，美国科学家伯库威兹与肖等人分别发现纳米钴微粒镶嵌在铜膜中的颗粒膜具有巨磁电阻效应，由此掀起了研究纳米颗粒膜巨磁电阻效应及作为其重要应用的磁电子学的热潮。

1993 年，IBM 的克莱梅（Crommie）等人采用原子搬动的方法，在铜表面用 48 个铁原子建起一座“铁原子围栏”，围栏的半径仅 7nm 左右，铜表面上的电子就像关在栅栏里的羊群一样逃不出去。同时，中国科学院真空物理实验室庞世谨研究组采用 STM 在硅单晶表面搬迁原子，形成“中国”的汉字图案。也在这一年，日本日立制作所报道研制成功了可在室温下工作的单电子存储器。这种存储器是在极微小的晶粒中封入一个电子，用此存储信息。具体方法是在硅衬底上制作控制电流的栅极，然后再在其上生长一层氧化硅薄膜，并在薄膜上制备宽度为 100nm、厚度约 10nm 的多晶硅细线。这些细线成十字交叉状。细线本身是由直径仅 10nm 的数目众多的硅晶粒一个挨一个地组成的。换句话说，细线是一条由微小的硅晶粒“铺成”的通道。硅晶粒的大小及结构不尽相同，电子选择容易通过的晶粒在细线中运动。这时如果给栅极加一个较大的电压，则流动中的电子就会“跳起”而被封入电子流外的一个硅晶粒中。此时，规定封入一个电子的状态为“1”，而没被封入电子的状态为“0”。由此，信息就被存储在硅晶粒之中了，其存储状态可保持一个月以上。用这种单电子存储器制成 16 千兆位的存储器，容量相当于当时存储器的 1000 倍。

1994 年，在美国波士顿召开的材料研究学会（MRS）秋季会议上正式提出了纳米材料工程的名称。它是纳米材料研究的新领域，是在纳米材料研究的基础上通过纳米合成、纳米添加等发展新型的纳米材料，并可能通过纳米添加来对传统材料进行改性，扩大纳米材料的应

用范围。这一年，美国亚利桑那大学材料科学与工程系的研究人员首次用碳纳米管作为先驱体，在流动氩气保护下让其与氧化硅气体在接近 2000℃ 的条件下反应，合成出长度和直径均比碳纳米管相应尺度大一个数量级的实心——“针状”碳化硅晶须。

1996 年，美国赖斯大学的斯莫利教授等人合成了成行排列的单壁碳纳米管束，每一束中含有许多碳纳米管，并且这些碳纳米管的直径分布很窄。几乎同时，中国科学院物理研究所解思深教授等人实现了碳纳米管的定向生长，并成功地合成了超长至毫米量级的纳米碳管。与纳米碳管材料制备技术进步相比拟的另一个重要进展，是中科院真空物理开放实验室、中科院化学所、北京大学电子学系以及化学学院有关科研人员组成的联合研究组采用自行设计、合成和制备的全有机复合薄膜作为电子学信息存储材料，并利用 STM 成功地得到了信息点直径分别为 0.7nm 和 0.8nm 的信息存储点阵，两个信息点的最小间距分别为 1.2nm 和 0.6nm，仅为当时最好信息存储密度的几十分之一且非常稳定，在连续 2000 次的读取过程中没有发生可观察到的变化。信息点直径是现已实用化的光盘信息存储密度的千万倍以上，奠定了我国在该领域中的国际领先地位。

1997 年，美国康奈尔大学纳米技术研究人员利用极细的高能电子束作为“刻刀”，在计算机辅助下，在硅晶体上成功地刻蚀一把吉他，长约 10 μm，与一个细胞的大小相当。吉他有 6 根弦，每根弦的直径仅 50nm，相当于 100 个原子紧密排列在一起的长度。如果用原子量级上的极微小的力量拨动这些弦，它们还可产生振动。不过，振动所产生的声音人耳无法听到。

1998 年，美国的罗伯特·福雷塔斯（Robert A. Freitas Jr.）博士出版的其三卷本的《纳米医学（nanomedicine）》中的第一卷，标志着纳米材料、纳米表征测量技术以及纳米器件的研发已关系到直接应用于医学的临床检测诊断与治疗的许多方面。由此可见，纳米技术应用于为人类健康服务的医疗事业是必然的，同时进展也十分迅速。

1999 年，巴西达尼埃尔·乌加尔特教授与美国敖特·席尔教授在合作进行纳米碳管的强度和柔韧性实验时，将纳米碳管放在电流中，使之出现频率固定的振动。研究人员通过高分辨率显微镜记录下振动的频率，由此计算出碳管的强度和韧性。实验结束后，乌加尔特突发灵感，将一个微粒放在纳米碳管的顶端，继续用电流进行激励。由于重量发生了改变，纳米碳管的振动频率随之出现变化。实验人员将这种振动频率和原先的进行比较，从而测算出微粒的重量。世界上当时最小的“秤”由此诞生了，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。也在这一年，哈佛大学的菲利浦·基姆（Philip Kim）博士和查尔斯·理伯（Charles M. Lieber）教授将两根碳管固定于一根斜劈形，且两侧制作了电极层的玻璃微管的相应电极上，通过电驱动产生两根碳管的相向合拢与背向分开的动作，从而实现镊子的功能，被称为纳米管纳米镊子。

2000 年，西班牙巴塞罗那大学克塞罗斯磁性材料实验室的荣周力（Ron Zioli）博士及其所领导的小组发明了一种新型磁性材料，即采用一种直径仅 8nm 的纳米微粒嵌入固态基质中形成了纳米复合材料。制备这种材料，首先是用氧化铁纳米微粒加入到一种甲醇基的液体聚合物中，然后将这种溶液冷却到 4.2K 的极低温度，使其成为固体。固态基体就是甲醇基聚合物，基体中的氧化铁纳米微粒就均匀地嵌入其中，形成类似泡沫塑料的结构。其中的纳米微粒起初无法运动，被牢牢地固定于基体之中。当在基体上加上小的磁场时，纳米微粒能脱离基体，并在它所占据的空腔中旋转。正是由于这些纳米微粒像一个个小罗盘旋转，总是使自己的磁场方向和外加磁场的方向保持一致，因此在外加磁场变化时，几乎没有能量损失。这

是以往能量损耗很大的磁性材料所无法具备的性能。可预计由此材料作成的变压器体积会很小，而效率可以大大提高。

2000年4月，美国能源部桑迪亚国家实验室运用激光微细加工技术研制出智能手术刀。该手术刀可以每秒扫描10万个癌细胞，并将细胞所包含的蛋白质信息输入计算机进行分析判断。操作过程中能够把医生在手术中“错杀”的健康细胞数量减到最低。6月，美国德州大学的科研人员合成出能与半导体材料结合的缩氨酸分子，在此基础上可望用缩氨酸及蛋白质分子选择、运送纳米级的半导体微晶粒，并按照设计组织出元件结构，甚至电路。这为制造体积更小、功能更强的器件或系统提供了新的技术手段。与此几乎同时，英国牛津大学的研究者采用扫描隧道显微镜，成功地在室温下操作单个溴原子在铜表面上移动。为了准确地移动原子，他们令探针不断地快速振动，振幅为原子直径的几倍，从而克服了探针本身不断晃动的影响。采用这种方法，探针振动一定时间后，即可准确地捕获到溴原子并将其移动到目标位置上。这就使得原子操纵技术前进了一大步。

2001年，美国亚特兰大佐治亚理工学院纳米科学与技术中心主任王中林教授、潘正伟博士和戴祖荣博士利用高温固体气相法，成功地合成了准一维氧化锌、氧化锡、氧化铟、氧化镉和氧化镓等宽带半导体体系的带状结构。这些带状结构纯度高、产量大、结构完美、表面干净且体内基本无缺陷，是理想的单晶型薄片结构。带状结构的横截面是一窄矩形结构，带宽为20~300nm，厚度为5~10nm，而长度可达几毫米。和碳纳米管以及硅和复合半导体线状结构相比，这是迄今唯一被发现的具有结构可控且无缺陷的宽带半导体准一维带状结构，而且具有比碳纳米管更独特和优越的结构和物理性能。

2001年末，纽约斯隆—凯特林癌症研究中心的戴维·沙因贝格尔博士及其同事报导了把放射性同位素铯-225的一些原子装入一个形状像圆环的微型药丸中，制造了一种消灭癌细胞的靶向药物。有人形象地称之为对付癌细胞的智能炸弹。这些微型药丸是陶氏化学公司利用碳和氮两种元素制成的。因为铯-225原子带有一个正电荷，而圆环壳体带有负电荷，圆环和铯-225原子通过静电作用像磁铁那样结合在一起。在壳体和原子上附着一种抗体，这种蛋白质能与细胞表面的相关蛋白质结合，随后整个复合体进入细胞内部。铯-225放射出的阿尔法线（ α 射线）杀死细胞。已有对老鼠的动物实验结果显示，铯-225原子能选择性地杀死很多种癌细胞，包括血癌、淋巴癌、乳癌、卵巢癌和前列腺癌细胞等，从而显著延长荷瘤实验鼠的生命。这些研究可能不久将进入人体实验阶段。

§ 1.4 纳米科技发展的主要特征

从纳米科技发展的有关情况，我们可以发现纳米科技本身具有一些非常明显的特征。

① 从材料发展的角度看，纳米材料的制备将更多地考虑分子设计、材料结构设计等，包括将表面或界面的许多情况，如悬挂键密度、缺陷等因素加以考虑或处理；有关纳米材料的制备技术方面已出现了许许多多有别于一般材料制备的新技术，特别是包括精确调控纳米（复合）结构的超分子合成技术等；对材料的特征尺寸，如粒度或块体中相的尺寸以及尺寸分布等均有非常高的要求。

② 从纳米结构加工制造角度看，传统的以三束（光子束、电子束、离子束）技术为核

心的微电子平面加工技术仍在扮演主要的角色。同时，以原子、分子 SPM 操纵搬运、分子装配等为基础的分子组装技术，在纳米结构加工制造中的重要作用和意义也越来越受到重视，因为这种加工技术可批量获得一致性好、特征尺寸分布窄、内部缺陷少以及可精确控制的纳米结构，故而具有非常吸引人的应用前景。特别是对单原子、单分子的操纵，显示了人类对物质世界改造能力的极大飞跃。

③ 对纳米对象 (nano-objects) 的表征测量除了采用传统观察测量技术，如谱学技术、电子显微镜技术以及其发展所带来的新技术，包括这些技术的综合之外，特别采用了以 STM、AFM 以及扫描近场显微术 (SNOM) 为代表的扫描力显微技术，可以在常温、大气甚至溶液等环境条件下观察到具有原子尺度的结构，测量纳米尺度微区的特性，使得人类的视力和感觉大大增强。

④ 纳米器件的研发将在一定的时间里沿着两条路线进行。其一，是目前微电子技术不断缩小加工尺寸所可能导致的一些新的系统，如系统集成芯片 (system on a chip, 简称为 SOC)，为此需要发展新的功能材料以及设计技术；其二，则是量子效应纳米器件，包括分子器件等。一定时间后，两条路线可能将会合，形成纳米集成电路以及纳米计算机。

⑤ 在纳米材料、纳米结构或器件，乃至纳米机器的设想及研制过程中，人们越来越关注生物或生命体给我们带来的启发。利用分子组装，特别是具有识别以及特异性装配特点的智能组装，可以实现具有我们设计功能的一些机构。自然界中噬菌体消灭细菌、病毒传染及鞭毛马达动作等，为我们制备纳米机器 (人) 提供了可借鉴的模型系统。因此可以设想出更多的“天人合一”的纳米机器。

§ 1.5 纳米科技发展的重要意义

纳米科技是面向 21 世纪的核心战略科技。纳米科技的发展关系到一个国家是否能在未来走在世界先进行列或领先于世界。1986 年物理学诺贝尔奖的获得者之一罗瑞尔博士曾说：70 年代重视微米的国家如今都成为发达国家，现在重视纳米技术的国家很可能成为下一世纪先进的国家。由此可见，纳米科技将成为未来高新技术发展的一个重要的基础，其进步将带动科技的整体进步与发展。

纳米材料和纳米技术是知识创新和技术创新的源泉，新规律、新原理的发现及新理论的建立促进了基础科学的发展，对未来高新技术产业的发展及国家和地区经济性技术竞争能力的提高都将具有前瞻性的重大带动作用，使其越来越引起世界广泛的重视。

主要发达国家对发展纳米科技均持积极态度。1991 年 3 月 22 日，美国国家关键技术委员会向美国总统提交了《美国国家关键技术》报告。其中，第 8 项为“微米级和纳米级制造”。报告指出，“微米级和纳米级制造涉及微量级 (微米级制造) 和原子量级 (纳米级制造) 的材料及器件的制造和使用”；“对先进的纳米级技术的研究也可能导致纳米级机械装置及传感器的生产”；“微米级和纳米级技术的发展已使人们能开发出一类新的微量级尺寸的器件。这些器件能在诸如环境控制、医学等不同的领域工作，则它们的低成本及比现有器件高的灵敏度可能使许多领域有所突破”。《美国商业周刊》1999 年 8 月 19 日报道，美国政府决定把纳米技术研究列入 21 世纪前 10 年中前 11 个关键领域之一，在 21 世纪可能取得重要突破的