

第一章 纳米技术与纳米材料

1.1 纳米材料的涵义与特性

想象一下将人体分解成最基本的成分。我们会收集相当一部分的气体，即氢气、氧气和氮气；大量的碳和钙；小部分的金属，如铁、镁和锌；和微量的许多其他化学元素（见表 1.1）。这些材料的总成本将低于一双好鞋的成本。我们人类就这么不值钱吗？显然不是，主要是因为这些元素特定的排列方式和组装方式，才让人类能够进食、交谈、思考和繁殖。那么我们是否可以在遵循自然规律的基础上用一个一个原子或分子构建出我们想要的任何物质？

表 1.1 70 公斤人体的近似化学成分

Element	Symbol	Number of Atoms	Element	Symbol	Number of Atoms
Hydrogen	H	4.22×10^{27}	Cadmium	Cd	3×10^{20}
Oxygen	O	1.61×10^{27}	Boron	B	2×10^{20}
Carbon	C	8.03×10^{26}	Manganese	Mn	1×10^{20}
Nitrogen	N	3.9×10^{25}	Nickel	Ni	1×10^{20}
Calcium	Ca	1.6×10^{25}	Lithium	Li	1×10^{20}
Phosphorous	P	9.6×10^{24}	Barium	Ba	8×10^{19}
Sulfur	S	2.6×10^{24}	Iodine	I	5×10^{19}
Sodium	Na	2.5×10^{24}	Tin	Sn	4×10^{19}
Potassium	K	2.2×10^{24}	Gold	Au	2×10^{19}
Chlorine	Cl	1.6×10^{24}	Zirconium	Zr	2×10^{19}
Magnesium	Mg	4.7×10^{23}	Cobalt	Co	2×10^{19}
Silicon	Si	3.9×10^{23}	Cesium	Ce	7×10^{18}
Fluorine	F	8.3×10^{22}	Mercury	Hg	6×10^{18}
Iron	Fe	4.5×10^{22}	Arsenic	As	6×10^{18}
Zinc	Zn	2.1×10^{22}	Chromium	Cr	6×10^{18}
Rubidium	Rb	2.2×10^{21}	Molybdenum	Mo	3×10^{18}
Strontium	Sr	2.2×10^{21}	Selenium	Se	3×10^{18}
Bromine	Br	2×10^{21}	Beryllium	Be	3×10^{18}
Aluminum	Al	1×10^{21}	Vanadium	V	8×10^{17}
Copper	Cu	7×10^{20}	Uranium	U	2×10^{17}
Lead	Pb	3×10^{20}	Radium	Ra	8×10^{10}
Total = 6.71×10^{27}					

Adapted from R. Freitas Jr., in Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities, Landes Bioscience, 1999, <http://www.nanomedicine.com/NMI.htm>.

纳米技术一词于 1974 年由 Norio Taniguchi 首次使用，指代精加工材料所需的精确公差。1981 年，现供职于 Foresight Nanotech Institute for Molecular

Manufacturing 的 K. E. Drexler 描述了一种新的“自下而上”的纳米技术，而不是之前 Feynman 和 Taniguchi 讨论的自上而下的方法。1986 年，德雷克斯勒出版了《Engines of Creation》一书，最终普及了纳米技术这一术语。

纳米技术不仅仅是传统微加工技术的扩展和延伸。纳米技术的最终目的是以原子、分子为起点，去设计制造具有特殊功能的产品。在未来，人们将可以用纳米技术一个一个地将原子组装起来，制成各种纳米机器如纳米泵、纳米齿轮、纳米轴承和用于分子装配的精密运动控制器，如图 1.1 所示。

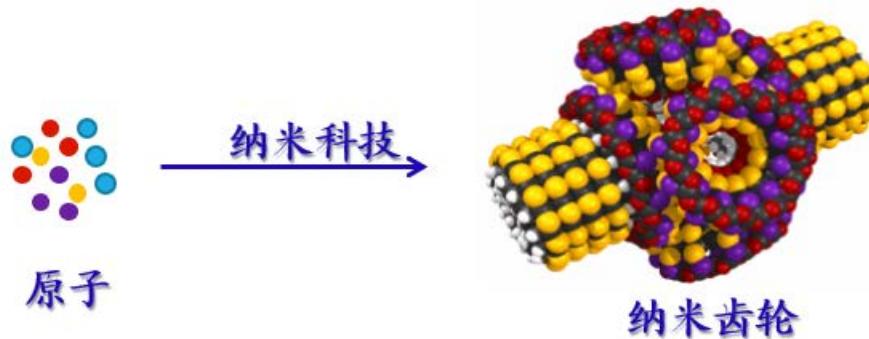


图 1.1 纳米技术的扩展与延伸

纳米科技研究的技术路线可分为“自上而下”和“自下而上”两种方式。自上而下：是指通过微加工或固态技术，不断在尺寸上将人类创造的功能产品微型化。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，从而构筑成具有特定功能的产品，这主要是利用化学和生物学技术。

纳米一词来源于希腊语中的矮人。它用作任何单位（例如秒或米）的前缀，表示该单位的十亿分之一。因此，一纳米 (nm) 是十亿分之一米，即 10^{-9} 米。如图 1.2 中所示的图像序列。纳米与米、厘米和毫米一样，是一个长度单位，简写为 nm。（ $1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m}$ ），在原子物理中还常用埃作单位 (Å)， $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ，所以 $1 \text{ nm} = 10 \text{ Å}$ 。

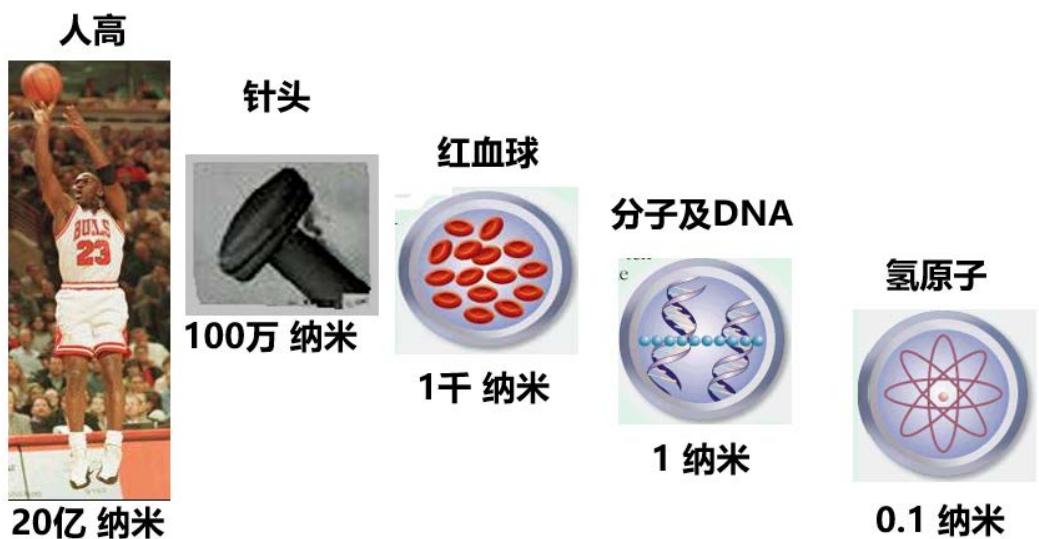


图 1.2 不同大小比例级别的图像

尽管纳米技术这个词被广泛使用，但这个词在很多情况下都具有误导性。这是因为一些技术处理的是微米范围的系统，而不是纳米范围(1-100 nm)的系统。纳米材料也不是未被发现的材料，而是金、银、铂、铁等众所周知的材料的纳米级形式。光合作用实际上是纳米结构在世界日常生活中作用的一个很好的例子。

叶子含有数以百万计的叶绿体，它使绿色植物变成绿色（见图 1.3）。在每个叶绿体内，有数百个葡萄球含有对光敏感的色素。这些色素是具有纳米级尺寸的分子，可以捕捉光（光子）并将其引导到光反应中心。在每个反应中心，都有光敏色素执行实际的光子吸收。当这种情况发生时，电子被激发，从而引发连锁反应，水和二氧化碳被转化为氧气和糖。



图 1.3 叶绿体内部发生光合作用

纳米科学是指在纳米尺度上研究材料的制备及其性质、现象的科学。首先，它是一个非常广泛的跨学科领域。它需要物理、化学、材料科学、生物学、机械

和电气工程、医学及其集体知识方面的专业知识。其次，它是原子和分子与宏观世界之间的边界，最终性质由原子的基本行为决定。第三，它是人类的重大挑战之一，使人类在原子水平上控制材料成为可能。那么，纳米科学和纳米技术是真实的，还是虚构的？在 1990 年代，德雷克斯勒的《Engines of Creation》一书启发了许多科幻作家思考纳米技术的前景。例如，在《Star Trek》的“进化”一集中，一个男孩制造了“纳米机器人”，这是一种用于在活细胞中工作的纳米级机器人。这些机器最终演变成能够控制星际飞船的智能生物。在《Queen of Angels》一书中，有心理问题的人类可以通过注射纳米设备来治疗。如果将来我们能够在原子或分子水平上控制物质，这些虚构的想法可能会成为现实。

1.2 纳米技术的由来

异想天开的纳米技术，源于一个天才物理学家的大胆设想。1959 年诺贝尔奖获得者、物理学家理查德·费因曼教授在加州理工大学发表了题为《在底部还有很大空间》的演讲。费因曼指出物理学的规律不排除从每一个原子制造物品的可能，他提出人类可以根据需要从单个分子、甚至原子出发，进行组装产品。正是这一个大胆的想法：从原子和分子开始制造产品，导致 40 年后的纳米技术。原子、分子实在太小了，微电子科学所使用的最小长度单位微米无法测量原子，于是，微米的 1 / 1000—纳米（nanometer）诞生了。

1974 年，世界上开始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，向我们揭示原子、分子世界，对纳米科技发展产生了积极作用。

1989 年，美国斯坦福大学搬动原子团“写”下斯坦福大学。

1990 年，第一届国际纳米科学技术会议在美国举办标志着纳米科学技术的诞生。

1991 年，碳纳米管被发现它的质量是相同体积钢的六分之一，成为纳米技术研究的热点其应用相当广泛。

1997 年，美国科学家成功地用单电子移动单电子利用这种技术可以把现在的计算机速度和存贮量提高成千上万倍。

1999 年，巴西和美国科学家进行纳米碳管实验时发现了世界上最小的“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。

1999 年，纳米技术逐步走向市场，估计全年纳米产品的营业额达 500 亿美元。

目前科学界在纳米科学技术领域已经取得了一系列重要的进展，并开发出了不少纳米材料和器件，但从严格的意义上讲，纳米科学技术在 20 世纪，仅是刚刚露出其尖尖角的小荷，它的灿烂和美丽将是属于 21 世纪的。因而，这门学科的诞生可以说是 20 世纪的科学家们献给 21 世纪的一份珍贵的礼物。

1.3 纳米材料的分类

这里假设二维纳米材料是单层材料，厚度低于 100 纳米，长度和宽度超过纳米尺寸。然而，正如所讨论的，一种材料可以仅仅根据其内部结构尺寸而被归类为纳米材料，而不考虑其外部材料尺寸。这些内部结构的限定是使二维纳米材料分类更加复杂的部分原因。在这方面，请看图 1.4 的示例。在这里，一个二维纳米材料显示了一个特殊的内部结构，由纳米尺度的晶体(或晶粒)组成。这种二维纳米材料可以被称为纳米晶薄膜，因为它有两个特点：(1)材料表现出纳米尺度的整体外观厚度，(2)其内部结构也处于纳米尺度。虽然这个例子有助于说明对二维纳米材料进行分类的两种可能的方法，但这两种限制都不需要被认为是纳米材料。这些示例有助于指出内部结构尺寸和外部表面尺寸如何成为二维纳米材料分类的独立变量。

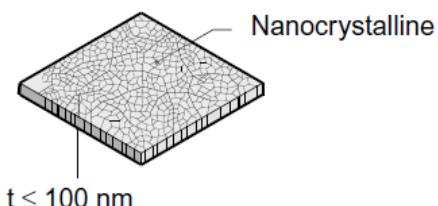


图 1.4 纳米尺度下具有厚度和内部结构的二维纳米材料

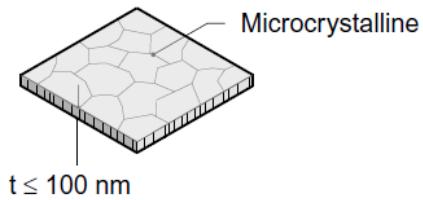


图 1.5 纳米尺度上具有厚度，微观尺度上具有内部结构的二维纳米材料

二维纳米材料的生产方式增加了其分类的复杂性。通常，二维纳米材料，如图 1.8 所示，沉积在典型尺寸超过纳米级的基板或载体上。在这些情况下，整体样品厚度尺寸成为薄膜和基材厚度的总和。当这种情况发生时，二维纳米材料可以被认为是一种纳米涂层（见图 1.6）。然而，有时当基板厚度确实具有纳米级尺寸或当多个具有纳米级厚度的层按顺序沉积时，二维纳米材料可以归类为多层二维纳米材料（见图 1.7）。在每一层内，内部结构可以是纳米级或更高（图 1.7）。

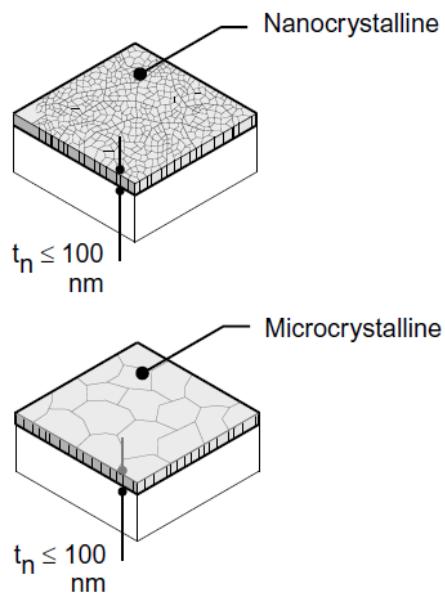


图 1.6 二维纳米材料，其厚度为纳米级，内部结构为纳米级/微米级，并以纳米涂层的形式沉积在任何尺寸的基底上

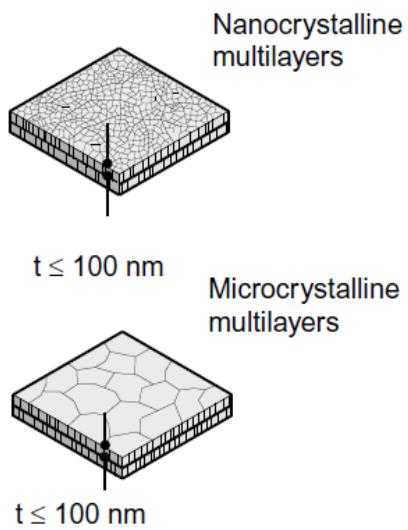


图 1.7 二维纳米晶和微晶多层纳米材料。

继续讨论三维纳米材料。按照我们之前的定义，块状纳米材料是在纳米尺度上没有任何限制的材料。然而，块状纳米材料仍然表现出纳米级的特征。如前所述，尺寸大于纳米级的块状纳米材料可以由纳米级的微晶或晶粒组成，如图 1.8 所示。这些材料被称为纳米晶体材料。图 1.9 总结了二维和三维晶体结构。

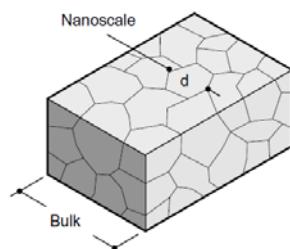


图 1.8 块状三维纳米晶体纳米材料

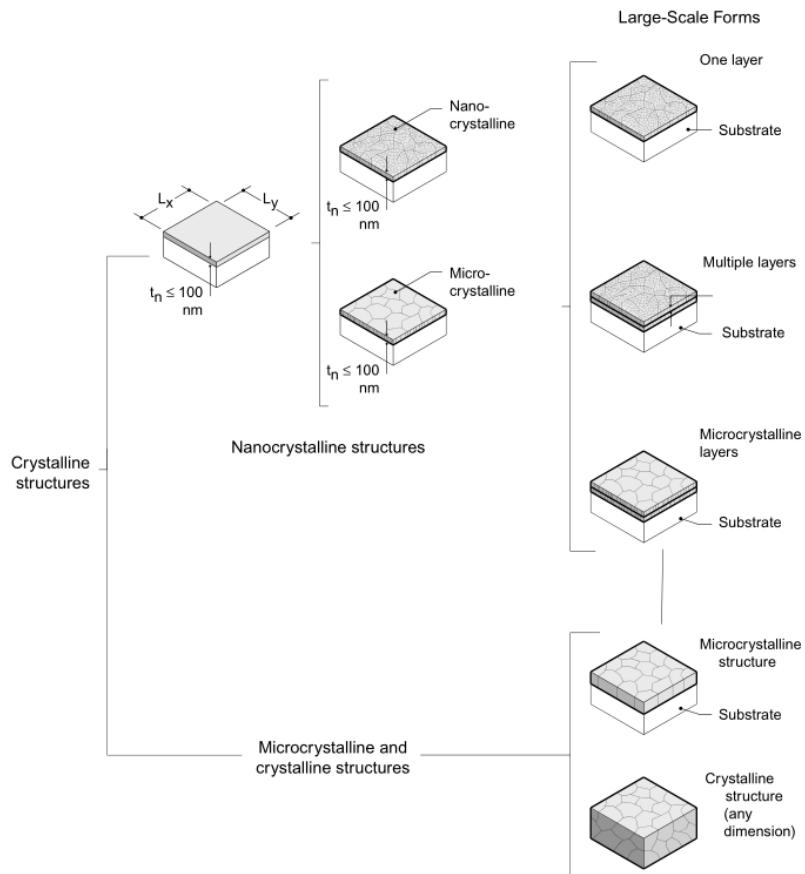


图 1.9 二维和三维晶体结构总结

新形貌纳米材料——纳米花 (Nano-flowers), 中科院物理所先进材料与结构分析实验室通过应力自组装在无机体系 Ag/SiO_x 微米级的内核/壳层结构上成功地获得了三角格子铺排和斐波纳契数花样 (图 1.10)。

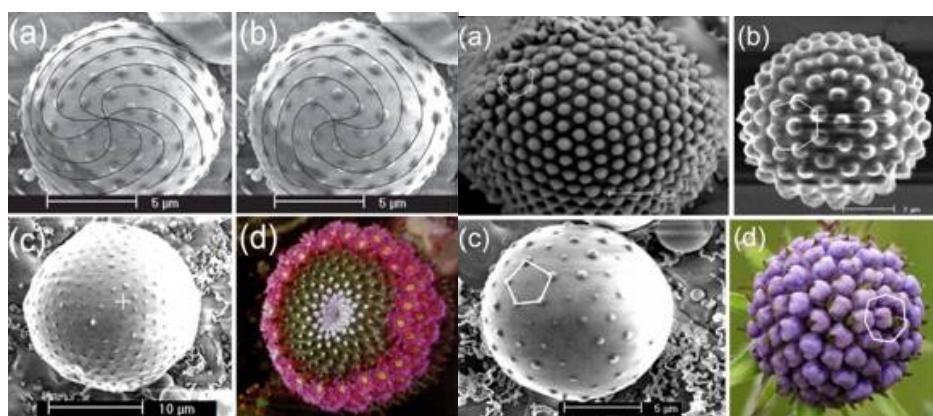


图 1.10 纳米花材料

1.4 纳米材料的性能

一、电学性能

在具有纳米尺度厚度的二维纳米材料的情况下，量子限制将沿着厚度维度发生。同时，载体运动沿片材平面不间断。事实上，随着厚度减小到纳米级，电子的波函数沿横截面被限制在非常具体的值（见图 1.11）。这是因为仅允许厚度为整数倍的电子波长存在。所有其他电子波长将不存在。换言之，沿厚度方向可用于电子传导的能量数量减少。电子被捕获在宽度等于厚度的所谓势阱中。一般来说，对于具有纳米级厚度的二维纳米材料，限制对能量状态的影响可以写为：

$$E_n = \left[\frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \right] n^2 \quad (1-1)$$

其中 $\hbar \equiv h/2\pi$, h 是普朗克常数, m 是电子的质量, L 是势阱的宽度（二维纳米材料的厚度）, n 是主量子数。方程 1-1 假设一个无限深的势阱模型。如前所述，载体可以沿片材平面自由移动。因此，载流子的总能量有两个分量，即与限制维度相关的项（方程 1-1）和与沿其他两个平面内维度的无限制运动相关的项。

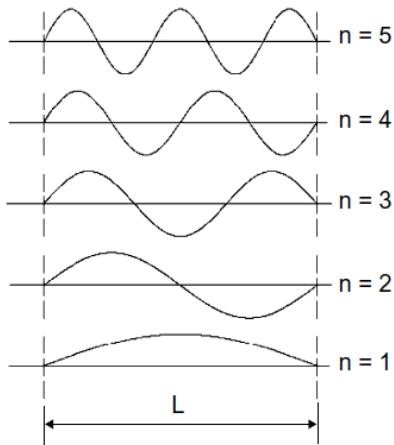


图 1.11 无限深量子阱的前五个限制态的能量和波函数

为了理解与不受限制的运动相关的能量，我们假设 z 方向是厚度方向, x 和 y 是电子离域的面内方向。在这些条件下，不受限制的运动可以用两个波向量 k_x 和 k_y 来表征，它们分别与电子沿 x 和 y 方向的动量有关，形式为 $p_x = h - k_x$ 和 $p_y = h - k_y$ 。这些离域电子对应的能量由所谓的费米能量给出，可以表示为：

$$E_F = \left[\frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \right] \quad (1-2)$$

$$k_F = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (1-3)$$

其中符号的含义与之前相同。在绝对零温度下，所有传导电子都包含在半径为 k_F 的圆内。因此，在具有纳米级厚度的二维纳米材料中，电子的总能量（由于限制和不受限制的运动）可以由下式给出：

$$E_n = \left[\frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2mL^2} \right] + \left[\frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \right] \quad (1-4)$$

二、超顺磁性

临界值：α-Fe：5nm

Fe₃O₄:16nm

α-Fe₃O₄:20nm

除了矫顽力，磁化反转机制也受到尺寸的强烈影响。在特定的直径范围内，通常大于超磁直径但小于临界直径，交换相互作用能足够强以在反转过程中保持自旋对齐。在此直径范围之上但仍低于临界直径 (Dcri) 时，磁化反转过程变得不连贯，涉及纳米颗粒或纳米尺寸晶粒内小体积材料的转换。磁性纳米颗粒或晶粒的尺寸对饱和磁化强度也有影响，即磁化强度在特定尺寸以下增加。例如，对于铁氧体锌，在这些材料中，对于 20 nm 左右的颗粒，饱和磁化强度会显着增加。这种磁化增强有助于通过热运动限制磁化矢量的旋转。这是磁记录技术的一个关键问题，特别是在需要增加记录密度的情况下。换句话说，需要小的磁性元件，但如果磁化由于热波动而不稳定，它就不能用作磁存储器。

在非磁或弱磁基体中包含很小的磁微粒，当其处于磁场时，微粒的磁旋方向会与磁场相匹配，因而增加磁有序性，降低了自旋系统的磁熵，若此过程是绝热的，则样品温度升高。如：在 1T 磁场中，磁性纳米材料的 Gd₃Ga_{3.25}Fe_{1.75}O₁₂ 的磁热效应在 6~30 K 之间，超过此温度范围是最好的致冷剂。

三、热学性质

非晶纳米粒子的晶化温度低。例如：传统非晶氮化硅在 1793K 晶化成 α 相，纳米非晶氮化硅粒子在 1673K 加热 4 小时全部转变成 α 相。此外，纳米粒

子在加热时开始长大的温度随粒径的减小而降低，如图 1.12 所示。

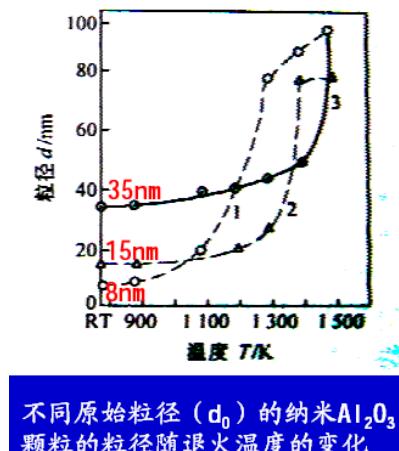


图 1.12 粒径与温度的关系

四、光学性质

宽频带强吸收。大块金属具有不同的金属光泽，表明它们对可见光中各种波长的光的反射和吸收能力不同。当尺寸减小到纳米时，各种金属纳米粒子几乎都呈黑色。它们对可见光的反射率极低，而吸收率相当高。例如，Pt 纳米粒子的反射率为 1%，Au 纳米粒子的反射率小于 10%。

1991 年春的海湾战争，美国 F-117A 型隐身战斗机外表所包覆的材料中就包含有多种纳米超微颗粒，它们对不同波段的电磁波有强烈的吸收能力，以欺骗雷达，达到隐形目的，成功地实现了对伊拉克重要军事目标的打击。

对于块状半导体材料，激子的吸收光谱可以在低温下看到，但它们通常太弱而无法在室温下观察到。然而，在纳米材料中，随着约束的增强，激子结合能增加，这降低了在较高温度下激子电离的可能性。结果，在室温下纳米材料的吸收光谱中出现了强激子态。到目前为止，我们已经解决了半导体纳米材料的光吸收问题。然而，如图 1-13 所示，如果电子和空穴复合，也可能发生光发射，从而产生光子。如果光子能量在 1.8 eV 到 3.1 eV 之间，则发射的光在可见光范围内，这种现象称为发光。由于纳米材料的量子限制，可见光的发射可以通过改变纳米尺度的尺寸来调节。典型的趋势是随着纳米材料尺寸的减小，发射峰向更短的波长移动（蓝移）。

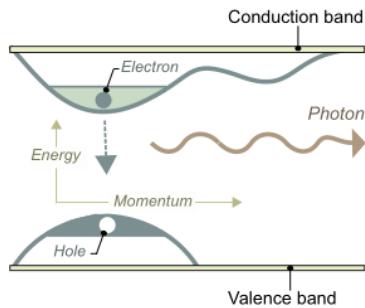


图 1.13 电子-空穴对复合时发射光子

1.5 纳米材料在国内外的研究现状

纳米科技的发展加深了人们对物质构成和性能的认识，使人类的微观感知和操控能力达到了空前的水平。通过纳米科技，人们可以在分子、原子水平上设计并制造具有全新性质和功能的材料及器件，将给材料、制造业、信息、生物和医学等领域带来革命性的变化。经过多年的发展，纳米科技已经对世界产生了深远影响，形成了大量的科技和产业成果，促使材料、能源、环境、微电子、生物和医药等产业领域发生了重大变革，推动了传统产业的升级换代和战略性新兴产业的建立。

35 亿年前，第一个细胞出现在地球上。

公元 400 年前，Democritus 提出“atom”概念，原子是物质不可分割的最小单位。

1905 年，爱因斯坦在估算糖分子的大小大约 1nm。

1931 年，马克斯·诺尔和恩斯特·茹斯卡发明了电子显微镜，可以用来观察比纳米还小的物体。

1.5.1 国外纳米技术的研究状况

纳米技术经过上个世纪八十年代的理论和实践的大量准备，到九十年代得到很快的发展。到世纪之交，2000 年 1 月 21 日美国总统克林顿向国会提出“国家纳米技术倡议”（NNI-National Nanotechnology Initiative）以后，很快在世界上掀起纳米技术的热潮。尽管这个热潮没有像“.com”网络热那样形成狂潮，但它受到科学技术界、企业界和各国政府的高度重视。各国政府根据自身的国情制订相应

的战略规划，加大财政拨款投资，设立专职协调机构，设立各项或专项计划申请制度，鼓励大企业投资纳米技术的基础研究和应用研究，鼓励开展国际合作，建立各种开放式研究机构，对一般性应用项目放开竞争，鼓励拥有专项纳米技术的专家创建小型企业为社会提供自身专长的产品和服务等等。

美国国家科技委员会早在 2000 年就率先制定了“国家纳米技术计划(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。参与计划实施的机构包括美国国家科学基金会、美国国防部、美国能源部、美国国立卫生研究院等多部门。为保持美国纳米科技的国际领先地位，NNI 计划一直保持高投入，并且不受经济危机影响而持续增加。迄今为止，根据美国政府官方公布的数据，如果包含 2014 财年的预算在内，NNI 的总投入达到了 200 亿美元。近 3 年来，NNI 投资显示：基础研究部分保持了最大份额，纳米技术设备与系统、纳米制造、环境、健康和安全研究方面的投入大幅增加。

美国国家纳米技术计划始于 2000 年，迄今已投资 270 亿美元。2018 年以后，虽然其预算有减少的趋势，但对以纳米技术签名倡议为首的 5 个项目构成的计划组成范围已作了战略性预算分配。根据摩尔定律，一直在推进高性能化的半导体也已触到微型化的界限，而在不依赖摩尔定律的情况下继续追求新的半导体高性能化的“电子复兴计划”则开始起动。量子计算机研究开发迅速推进，追求量子技术整体发展的新的可能性的“国家量子计划”也开始实施。这些都是美国政府政策支持的重点。

欧盟 2006 年推出了第 7 框架计划，纳米科技列为九大研究主题之一，欧盟投入 34.75 亿欧元以增强纳米科技的国际地位。在欧盟框架计划以外，欧盟各国纷纷制定了本国的纳米科技发展计划。以德国为例，德国政府 2011 年启动了“纳米技术行动计划 2015(Nanotechnology Action Plan 2015)”，并陆续成立了 9 个全国性的纳米技术研发网，成员来自纳米技术产业链的各个环节，以加强产业链上中下游的动态合作、集约技术、资金优势，加速创新过程和成果转化。德国目前已开始建立在纳米技术领域的经济与科学的五大创新联盟：有机发光二极管、有机光伏电池、创新型纳米碳管、分子成像以及锂离子电池，拟通过联盟的方式推动上述领域的应用市场。

欧盟在时长 7 年的“地平线 2020 计划”(2014-2020)中确定了 3 个优先发展

领域：“卓越科研”“产业领先”“社会挑战”。在“卓越科研”领域，10 年总投资 10 亿欧元，启动“石墨烯旗舰”“人类大脑项目”，从 2018 年起实施“量子旗舰”计划。在“产业领先”领域，把在“使能产业技术领先”中作为“关键使能技术”的纳米技术和尖端材料技术置于重要地位。在“地平线 2020 计划”中，投资预算共 748 亿欧元（107 亿欧元/年）。3 个优先发展领域的预算分配分别为：“卓越科研”244 亿欧元，“产业领先”170 亿欧元，“社会挑战”297 亿欧元。

日本是大大早于世界其它国家实施纳米技术国家计划的。

从 1980 年起，日本科学技术厅和通商产业省就多重次推进纳米技术研究开发。许多项目都在日本制定的第 1 期科学技术基本计划（1996 年）中就已起动。其后，在第 2 期（2001-2005）、第 3 期（2006-2010）和第 4 期（2011-2015）科学技术基本计划中也都制定安排了纳米技术、材料科学领域的项目。随着日本第 5 期科学技术基本计划（2016-2020）的实施，纳米技术被定位为“具有创造新价值、核心优势的基础技术”之一。同时，基于建设超智能社会的思考，日本特别确定建设 11 个系统，将“综合型材料开发系统”列为其中之一。这些基础技术包括“构件材料·纳米技术”“光·量子”。文部科学省决定实施“光·量子飞跃旗舰计划”等 7 个研究开发计划。2019 年，日本决定实施“为实现物联网社会的超微小传感技术开发”等 10 个研究开发计划。

据总务省统计局公布，2016 年日本国家科学技术研究费为 18 兆 4326 亿日元，在特定目的使用的研究费中，“纳米技术·材料”领域为 1 兆 425 亿日元，同比增长 4.1%。

德国联邦政府于 2006 年发布了推进研究开发及创新的综合战略“高技术战略”。2010 年，该战略更新为“高技术战略 2020”。2014 年秋，德国发布了第 3 期战略“新高技术战略”。2018 年则发布了“高技术战略 2025”，德国联邦政府投资 150 亿欧元。到 2025 年，产业界与州政府联合，要求研究开发投资对 GDP 的比重为 3.5%。在“高技术战略 2025”中，新追加的研究项目关系纳米技术、材料科学领域的有 3 项，分别应对塑料问题的以再生利用为前提的材料开发；电池制造工艺技术开发；自动行走用的高可靠性、高性能传感器、电子学开发。另一方面，德国将纳米技术与材料一起定为横向关键技术之一，制定了“纳米技术行动计划 2020”（2016-2020），研究资金配置于各个专项计划，部门参与推进。

联邦教育及研究部布局广范围课题助力纳米材料创新活动，课题有“生物经济用的纳米技术”等 13 项。进而，联邦政府于 2018 年发布了基本计划“量子技术- 从基础研究到市场”(2018-2022 年，最长到 2028 年)，到 2021 年，预定在量子技术领域的研究开发投资约 6.5 亿欧元。

英国由于脱欧将影响到包括纳米技术、材料科学领域在内的科学技术整体的工作。英国决定从 2017 年起建立产业战略挑战基金，而且，2016 年商务·能源·产业战略部继续进行研究基础设施的投资，到 2021 年决定投资 58 亿英镑。英国的纳米技术、材料科学技术战略的基础是于 2010 年发起的英国纳米技术战略。该战略一方面反映国民、产业界、学界的需求，另一方面大力支援作为新兴技术、使能技术的纳米技术的发展，促进其利用。2014 年，在关于科学技术创新战略中，英国将纳米技术和尖端材料设定为领导世界的 8 项重要技术之一。在材料领域，英国商业·创新·技术部于 2009 年制定了“英国复合材料战略”，进行面向飞机、汽车的耐用性好、轻质、高性能的复合材料开发。在量子技术方面，英国也高度重视，于 2014 年起实施英国量子技术计划。

法国于 2009 年汇集推出“国家研究创新战略”，与此相关，同年为推进纳米技术的创新，制定实施“纳米创新”计划。为加速纳米技术产业化，法国设立了纳米技术综合中心，2009 年分配预算 7000 万欧元。2013 年 7 月，制定高等教育研究法，在研究开发领域制定了名为“(研究·技术转移·创新的战略议程) 法国—欧洲 2020”的基本战略。其中提出纳米电子学、纳米材料、微纳米流体工程为优先领域。而在欧盟地平线 2020 计划中，先进材料也是优先的领域和项目。随着一系列改革的推进，2015 年 3 月，法国公布了现行战略“国家研究战略法国—欧洲 2020”。这个研究战略特别确定了 10 个社会课题作为重点研究方向，其中包括与纳米技术、材料科学领域相关联的课题，例如稀有矿物资源依存度减少、能源和化学领域使用的化石系碳化合物替代品、新材料的设计、传感器等。

韩国于 2018 年 2 月公布“第 4 期科学技术基本计划”，同年 7 月发布“面向国家技术创新系统高级化的国家 R&D 创新”，显示把国家 R&D 的重点从过去的技术取得、重视经济性转到面向人与社会的方针。而在早先发布的“面向革新增长的以人为中心的第 4 次产业革命应对计划”(2017 年 11 月) 中，有多个与纳米技术、材料科学相关的未来型新产业。韩国的纳米技术政策，以过去的《纳

米技术开发促进法》(2003 年)为根据，实施“第 4 期纳米技术综合发展计划”(2016-2025 年)。要求其时的技术水平达到美国的 100% 或 92%，在这个过程中培育 12000 名高级纳米人才，纳米产业全球领先，纳米技术产品的市场份额达到 12%，建立 1000 家与纳米技术关联的风险企业。纳米技术公共研究开发投资，2013 年以后与 2012 年以前相比成倍增长，年增长金额超过 5 亿美元。2017 年 3 月，韩国又发布了“2017 年度纳米技术发展实施计划”。2018 年，韩国政府以合同的形式与相关的 10 个部门制作发表了《第 3 次国家纳米技术地图》(2018-2027)，就韩国未来社会“便利而快乐地生活”“与地球一起生活”“健康而安全地生活”的三大目标，选定了“用纳米技术实现目标的 30 项未来技术”，为此又确定了 70 项核心技术，推进便携式人工智能、便携式无线通信、无人机、超快速充电电池等的开发。

俄罗斯将“纳米系统和材料产业”选定为国家预算重点分配的 8 个优先科学技术领域之一。根据 2007 年国家认可的“纳米产业发展战略”，明确提出了重视纳米技术的方向。据此，俄罗斯建立了 100% 由国家出资的针对纳米技术产业化的投资公司“RUSNANO”。到 2015 年，俄罗斯国内纳米技术产业的市场规模为 9000 亿卢布，其中 RUSNANO 投资的企业的销售额达 3000 亿卢布。2016 年该公司投资企业的销售额为 3690 亿卢布。预计到 2020 年，该公司将投资 1500 亿卢布，俄罗斯纳米技术产业规模将达 1 兆 3000 亿卢布，其中该公司投资企业的销售额为 6000 亿卢布。

新加坡贸易与工业部制定了 2020 年起始的 5 年计划“研究、创新与创业计划 2020”，计划投资 190 亿新加坡元。今后 5 年间，新加坡政府将生物医学、双向数字媒体和物理科学与工程 3 个方面作为新的重点研究领域。在物理科学与工程中，包括先进材料·制造业、先进系统·工程。在实施科技产业化政策、积极进行投资的基础上，新加坡正在构筑由新加坡科技研究局经办的纳米印记铸造和以大学为中心的国际性的纳米研究开发据点。现在新加坡国立大学设置的主要中心有新加坡国立大学纳米科学和纳米技术计划、先进 2D 材料中心、量子技术中心、新加坡同步加速器光源、离子束应用中心、新加坡太阳能研究院。

印度在科学技术部之下，设置科学技术司、生物技术司、科学产业研究司。科学技术司 DST 于 2001 年 10 月实施纳米科学技术计划。2007 年 5 月，开始

其后的计划——国家纳米科学和纳米技术使命。在该计划使命中，包括基础研究的促进、纳米技术基础设施的整备、纳米领域产业应用的开拓、该领域研究员职位授予的人才培育和国际合作研究的促进等内容。各项使命均实行补助金的公募。通过支援纳米技术人才培养项目，在全国多个研究所构筑纳米科学技术研究所的基础，成功地构筑了该领域的生态系统。2020 年 3 月，印度决定扩大纳米使命规模，旨在为继续支持该领域的基础研究开发，支援更多的关联技术项目创造环境条件。科学技术司和其他司局密切协作，支援孵化器和新兴企业，与产业界也积极地进行合作，共同出资，支持与纳米科学技术相关的项目。2018 年起，科学技术司和德国 DFG 一起实施材料科学·材料工程合作项目，积极地推进国际合作研究。

纵观全球各国近 10 年来的纳米科技投入和研发现状，国际纳米科技的发展已呈现出“突出重点、集中资源、培育产业、引领带动”的发展态势。发达国家希望通过纳米科技整合其基础研究、应用研究和产业化开发，抢占未来科技发展的制高点和优先权，引领下一次产业革命。发展中国家希望通过纳米技术在新一轮的科技和产业革命中获得更多的话语权。

1.5.2 国内纳米材料研究状况

在基础研究方面，目前我国发表纳米科技 SCI 论文总量和论文总被引用次数已跃居世界第 2 位，部分研究成果在国际上引起了较大影响，标志性的成果主要包括：中国科学技术大学侯建国领衔的单分子科学团队在国际上首次实现亚纳米分辨的单分子光学拉曼成像，将具有化学识别能力的空间成像分辨率提高到前所未有的 0.5 nm。审稿人盛赞这项工作“是该领域迄今质量最高的顶级工作，开辟了该领域的一片新天地”，研究成果在 Nature 发表。北京大学李彦团队发展了一类钨基合金高效催化剂，这种纳米催化剂粒子具有非常高的熔点，能够生长出具有特定结构的单壁碳纳米管，并在高温环境下保持其晶态结构和形貌，相关成果发表在 Nature。中国科学院大连化学物理研究所包信和团队基于“纳米限域催化”的新概念，创造性地构建了硅化物晶格限域的单铁中心催化剂，成功地实现了甲烷在无氧条件下选择活化，一步高效生产乙烯、芳烃和氢气等高值化学品，相关成果发表在 Science。厦门大学郑南峰团队在铂纳米复合催化剂的制备、表

征及催化反应的过程机理方面取得重要研究进展，制备出实用的高活性、高稳定性贵金属纳米催化剂，能在室温下实现 CO 的 100% 转化，相关研究成果在 Science 发表。中国科学院金属研究所卢柯研究团队利用自主设计的表面机械研磨处理技术，在金属镍表层突破晶粒尺寸极限，获得纳米级厚度并具有小角晶界的层片结构。这种纳米层片结构兼具超高硬度和热稳定性，研究成果在 Science 发表。国家纳米科学中心裘晓辉团队利用改进的非接触原子力显微镜在实空间观测到分子间氢键和配位键的相互作用，在国际上首次实现了对分子间局域作用的直接成像，中国学者首次“看见”氢键引起国际同行高度关注，相关成果发表在 Science。中国科学院高能物理研究所和国家纳米科学中心赵宇亮团队在国际上较早开展了人造纳米材料的毒理学研究，建立了较为系统的研究方法，尤其是体内纳米颗粒的定量探测方法；系统研究了不同尺寸不同表面的纳米材料的毒理学效应和共性规律，揭示了纳米颗粒穿越生物屏障的能力，提出了将纳米毒理学现象反向应用于肿瘤治疗的新思路。在国际著名学术刊物上连续发表了一系列的研究成果，连续 9 年入选毒理学和药理学领域的世界顶尖 25 篇热点论文，在纳米材料健康效应方面形成很强的国际影响力。

“十三五”规划纲要在科技方面对纳米技术、材料科学领域的课题也作了布局。例如“新材料技术”“新材料的设计与制造工程的研究”“重点新材料”“量子通信·量子计算机”“智能制造·机器人”“航空发动机·燃气轮机”等都被列入其中。

在“十三五”规划纲要中，以制造业高端化为目标的“中国制造 2025”和互联网技术与制造业融合推进的“互联网+”等被放在重大国家战略的位置。2015 年发布的“中国制造 2025”提出了 10 个重点领域，“新材料”则是其中之一。2016 年出台的“国家重点研究开发计划”在 2018 年第一期和第二期中设立了 9 个课题，总经费 23 亿元，其中之一是“纳米技术”课题。

现在，中国已构筑多个国家级纳米科技点，例如国家纳米科学中心（北京）、国家纳米技术与工程研究院（天津）、纳米技术及应用国家工程研究中心（上海）、国家纳米技术国际创新园（苏州），它们都承担着国家纳米科学技术产业化的任务。

这些工作都大大地推动了中国纳米科学技术的迅速发展。北京现已成为中国纳米技术整体战略的智力中心，而上海、苏州已成为技术开发和创业的中心。苏

州从 1994 年起，与新加坡合作启动苏州工业园区建设，使它成为以纳米技术和生物技术为中心的高技术城市。

1.5.3 纳米技术的研究进展

纳米科技日新月异的发展正在展现其强大的生命力和对社会经济发展的推动作用，连同其他新兴科技的发展，正在成为提升国家未来核心竞争力的重要手段和推动世界各国经济发展的主要驱动力。

目前人们对纳米科技的理解，似乎仅仅是讲纳米材料，这是不全面的。主要原因是国内科研经费的资助以及有影响的成果的获得，主要集中在纳米材料领域，而且我国目前纳米科技在实际生活中的应用也最先在纳米材料这一领域表现出来。我国现在 300 余家从事纳米科技研发的公司也主要是从事纳米材料，尤其是纳米粉体材料的生产。

纳米材料发展前景广阔。具有防水防油、抗菌抑菌、韧性大和强度高等优点。用金属纳米颗粒粉制成的金属，强度增大十几倍，而且可拉伸长度增大几十倍。强度高，约为普通钢的 100 倍。自重轻，是钢质量的 $1/6$ 。具有良好的柔韧性，可弯曲。

1.信息产业中的纳米技术

信息产业不仅在国外，在我国也占有举足轻重的地位。2000 年，中国的信息产业创造了 GDP5800 亿人民币。纳米技术在信息产业中应用主要表现在 3 个方面：①网络通讯、宽频带的网络通讯、纳米结构器件、芯片技术以及高清晰度数字显示技术。因为不管通讯、集成还是显示器件，都要原器件，美国已经着手研制，现在有了单电子器件、隧穿电子器件、自旋电子器件，这种器件已经在实验室研制成功，而且可能在 2001 年进入市场。②光电子器件、分子电子器件、巨磁电子器件，这方面我国还很落后，但是这些原器件转为商品进入市场也还要 10 年时间，所以，中国要超前 15 年到 20 年对这些方面进行研究。③网络通讯的关键纳米器件，如网络通讯中激光、过滤器、谐振器、微电容、微电极等方面，我国的研究水平不落后，在安徽省就有。④压敏电阻、非线性电阻等，可添加氧化锌纳米材料改性。

2.环境产业中的纳米技术

纳米技术对空气中 20 纳米以及水中的 200 纳米污染物的降解是不可替代的技术。要净化环境，必须用纳米技术。我国现在已经制备成功了一种对甲醛、氮氧化物、一氧化碳能够降解的设备，可使空气中的大于 10ppm 的有害气体降低到 0.1ppm，该设备已进入实用化生产阶段；利用多孔小球组合光催化纳米材料，已成功用于污水中有机物的降解，对苯酚等其它传统技术难以降解的有机污染物，有很好的降解效果。近年来，不少公司致力于把光催化等纳米技术移植到水处理产业，用于提高水的质量，已初见成效；采用稀土氧化铈和贵金属纳米组合技术对汽车尾气处理器件的改造效果也很明显；治理淡水湖内藻类引起的污染，最近已在实验室初步研究成功。

3. 能源环保中的纳米技术

合理利用传统能源和开发新能源是我国当前和今后的一项重要任务。在合理利用传统能源方面，现在主要是净化剂、助燃剂，它们能使煤充分燃烧，燃烧当中自循环，使硫减少排放，不再需要辅助装置。另外，利用纳米改进汽油、柴油的添加剂已经有了，实际上它是一种液态小分子可燃烧的团簇物质，有助燃、净化作用。在开发新能源方面国外进展较快，就是把非可燃气体变成可燃气体。现在国际上主要研发能量转化材料，我国也在做，它包括将太阳能转化成电能、热能转化为电能、化学能转化为电能等。

4. 纳米生物医药

这是我国进入 WTO 以后一个最有潜力的领域。目前，国际医药行业面临新的决策，那就是用纳米尺度发展制药业。纳米生物医药就是从动植物中提取必要的物质，然后在纳米尺度组合，最大限度发挥药效，这恰恰是我国中医的想法。在提取精华后，用一种很少的骨架，比如人体可吸收的糖、淀粉，使其高效缓释和靶向药物。对传统药物的改进，采用纳米技术可以提高一个档次。

5. 纳米新材料

虽然纳米新材料不是最终产品，但是很重要。据美国测算，到 21 世纪 30 年代，汽车上 40% 钢铁和金属材料要被轻质高强材料所代替，这样可以节省汽油 40%，减少 CO₂ 排放 40%，就这一项，每年就可给美国创造社会效益 1000 亿美元。此外，还有各种功能材料，玻璃透明度好但份量重，用纳米改进它，使它变轻，使这种材料不仅有力学性能，而且还具有其他功能，还有光的变色、贮光，

反射各种紫外线、红外线，光的吸收、贮藏等功能。

1.6 纳米技术的政府支持

我国政府有关科技管理部门也较早地认识到纳米科技的重要性，并积极推动和提供财政支持。中国科学院和国家自然科学基金委员会，从八十年代中期开始，就支持扫描探针显微镜(SPM)的研制及其在纳米尺度上科学问题的研究(1987~1995)。国家科委出台的“攀登计划”(1990~1999)中，就有纳米科技项目，并给予连续10年的专项支持。1999年，国家科技部又制定了“国家重点基础研究发展规划”(“973”计划)其中安排了“纳米材料与纳米结构”项目，对纳米碳管等纳米材料的基础研究继续给予大力支持。在国家“863”高技术计划中，也列有不少纳米材料的应用研究项目。

我国纳米科技的布局较早，在纳米科技发展的开始阶段就同国际发展保持同步。“八五”期间，“纳米材料科学”列入国家攀登计划项目。20世纪90年代以来，纳米材料的应用研究成果涌现，地方政府和企业的介入，使我国纳米材料的研究进入了以基础研究带动应用研究的崭新局面。

2001年7月，科学技术部会同有关部委成立了“国家纳米科学技术指导协调委员会”，并与前国家发展计划委员会、中国科学院和国家自然基金委员会联合制定了《国家纳米科学技术发展纲要》。在《国家纳米科学技术发展纲要》框架指导下，各部门围绕纳米科学技术相关的材料、信息、能源、环境、医学及纳米安全等领域进一步强化了项目部署。

2006年国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》(以下简称《规划纲要》)，指出“纳米科技是我国有望实现跨越式发展的领域之一”。为贯彻落实《规划纲要》，科学技术部于2006年启动实施了我国纳米科学技术的旗帜性研究计划——纳米研究国家重大科学计划，连同国家高技术研究发展计划(863计划)、科技支撑计划，进一步强化了我国纳米科技的投入。

国家自然科学基金委员会也启动了一系列纳米科技及纳米制造基础研究等重大研究计划。中国科学院组织了一批能充分发挥综合优势、多学科系统集成的大型纳米科技项目，2013年7月启动了“变革性纳米产业制造技术聚焦”的战略性先导科技专项，将在纳米绿色印刷、纳米动力锂电池、纳米医药、纳米催化以

及能源环境相关的纳米技术等方面进行重点攻关，进一步推动纳米技术的产业化应用。

我国还建成了一批国家级纳米科技基地：在北京建立了国家纳米科学中心；在上海建立了纳米技术及应用国家工程研究中心；在天津建立了国家纳米技术与工程研究院；在杭州建立了浙江加州国际纳米技术研究院；在苏州建立了国家纳米技术国际创新园。此外，还相继建立了 40 余个各具特色的地区性或行业性的纳米研究中心，逐步形成了我国纳米科学技术研发平台体系。

北京市，围绕纳米技术及材料，针对纳米光电子器件、碳材料、碳基纳米器件、纳米药物、纳米生物医学材料、纳米能源、纳米生物效应与安全、纳米技术标准、表征技术、环境纳米材料等开展研究。

安徽省，积极推进纳米材料和超细粉体材料发展。加强方解石、膨润土、凹凸棒石粘土、沸石、珍珠岩、绢云母等矿产的深加工，积极推进超细粉体材料、纳米材料、改性材料和特殊用途材料等系列矿产品的开发利用，逐步达到国内领先地位。积极推进前沿技术研究、引进和转化，高度关注超导材料、纳米材料、石墨烯等战略前沿材料发展。

福建省，扎实推进厦明火炬新材料产业园建设，推动厦门纳诺泰克新型纳米材料等一批在谈项目落地。支持研发新型高分子材料和纳米材料、环保节能墙体等新材料的推广运用。

江西省，加强与新材料重点领域国内外龙头企业的对接、引进与合作，加快推进科研成果在我省转化，超前谋划布局，积极引进超导材料、纳米材料、生物基材等一批战略前沿材料重大项目。

山东省，聚焦碳纤维、石墨烯、纳米材料等领域，加快新材料前沿技术研发，打造全国最大的碳纤维及制品生产基地。

河南省，纳米材料依托河南平奇纳米材料有限公司的金属纳米粉体产品，拉伸纳米粉体材料的链条，加快培育成具有一定影响力的纳米金属粉体生产中心。优化纳米材料产业园项目实施发展环境，对项目建设推进过程中的问题，由市政府大项目办公室、发展和改革委员会会同相关部门协调解决，全力保障项目早日建成投用。

湖北省，开展纳米材料在光电子、新能源、生物医药等领域应用研发，形成一

批具有广泛带动性的科技创新成果。

湖南省，高度关注颠覆性新材料对传统材料的影响，做好超导材料、纳米材料、石墨烯、生物基材料等战略前沿材料提前布局和研制。

广东省，以纳米材料为基础，开拓在新型电子、智能穿戴、物联网等领域的
产品开发与推广应用，推动南方柔性电子产业研究院建设，打造柔性电子产业集群。

广西省，人力发展新型合金材料、电子信息材料、稀土功能材料、纳米材料、
新型化工材料、新型建筑材料等。加快纳米材料、石墨烯材料、生物基材料等战
略前沿材料的研制和产业化进程。

贵州省，积极发展锯超导合金、石墨烯、纳米材料、智能新材料等前沿材料
产业。

甘肃省，推动新材料与传统应用产业的技术改造，发展市场需求量大的先进
复合材料、纳米材料。

宁夏省，引进转化生物基材料、纳米材料等前沿新材料的制备技术。

在各方面的共同努力下，我国纳米科学技术得到了较快速的发展，在前沿基
础研究、应用技术与成果转化等方面均取得重要进展，跻身世界纳米科技大国，
部分研究跃居国际领先水平。

上海市，建多模式融合的纳米检测表征平台，开展纳米尺度及纳米制造的重
大基础科学问题研究，发展新型纳米材料与结构的制备及其器件化与工程化技术，
在纳米材料与结构、超微器件与系统集成和检测表征等方面取得若干国际一流的
原创性成果，推动纳米技术在信息、生物医药、新能源和环保等产业。

天津市，依托天津国家纳米技术产业化基地，推进纳米新材料、纳米生物医药、
纳米微机电、纳米环保等领域的研究。

山西省，加快推进纳米材料、先进复合材料、颠覆性技术新材料等领域的重
大技术攻关，拓展产品在生物医学工程等行业的应用范围，进一步抢占国际竞争
制高点。

内蒙古，推动元宝山盛森硅业硅、错系列产品产业化，打造纳米材料产业基地。
研究、开发、生产工程塑料、塑料合金、汽车用料和纳米材料等塑料新材料。

辽宁省，用微处理器以及原子材料、纳米材料等新材料技术，实现智能对外

界信号和指令的采集处理、精准定位与传输,通过模湖胡逻辑运算、主动鉴另环境,自动调整和补偿适应环境。

吉林省,推动碳纤维复合材料、有机高分子材料、纳米材料突破关键技术和大规模开发应用,抢占产业发展制高点。

浙江省,突破高性能动力电池材料、新型显示材料、石墨烯、纳米材料、智能材料、仿生材料、超材料、低成本增材制造材料和新型超导材料等前沿材料研发和产业化。着力发展电子信息材料、光通信材料、有机硅材料、高性能金属材料、纳米材料、新型纺织材料、高新能纤维复合材料及高分子新材料等重点产业。

黑龙江,培育陶瓷材料、纳米材料等新兴材料,形成一批布局合理、特色鲜明、产业集聚的新材料产业基地。

江苏省,抢抓新材料技术与信息技术、纳米技术、智能技术融合发展机遇,加快石墨烯、纳米材料、超导材料、极端环境材料等前沿新材料基础研究与应用创新。

1.7 几种典型的纳米材料

纳米材料按照材料的形态,可将其分为四种。分别是纳米颗粒型材料、纳米固体材料、纳米膜材料、纳米磁性液体材料。

1.纳米颗粒型材料

应用时直接使用纳米颗粒的形态称为纳米颗粒型材料。被称为第四代催化剂的超微颗粒催化剂,利用甚高的比表面积与活性可以显著地提高催化效率,例如,以粒径小于 0.3 微米的镍和钢-锌合金的超微颗粒为主要成分制成的催化剂可使有机物氯化的效率达到传统镍催化剂的 10 倍;超细的铁微粒作为催化剂可以在低温将二氧化碳分解为碳和水,超细铁粉可在苯气相热分解中起成核作用,从而生成碳纤维。

录音带、录像带和磁盘等都是采用磁性颗粒作为磁记录介质。随着社会的信息化,要求信息储存量大、信息处理速度高,推动着磁记录密度日益提高,促使磁记录用的磁性颗粒尺寸趋于超微化。目前用金属磁粉(20 纳米左右的超微磁性颗粒)制成的金属磁带、磁盘,国外已经商品化,其记录密度可达 $4 \times 10^6 \sim 4 \times 10^7$ 位/厘米($10^7 \sim 10^8$ 位/英寸),即每厘米可记录 4 百万至 4 千万的信息单元,与

普通磁带相比，它具有高密度、低噪音和高信噪比等优点。

超细的银粉、镍粉轻烧结体作为化学电池、燃料电池和光化学电池中的电极，可以增大与液体或气体之间的接触面积，增加电池效率，有利于电池的小型化。超微颗粒的轻烧结体可以生成微孔过滤器。例如，超微镍颗粒所制成的微孔过滤器平均孔径可达 10 纳米，从而可用于气体同位素、混合稀有气体、有机化合物的分离和浓缩，也可用于发酵、医药和生物技术中。磁性超细微粒作为药剂的载体，在外磁场的引导下集中于病患部位，利于提高药效，这方面的研究国内外均在积极地进行。采用超微金颗粒制成金溶胶，接上抗原或抗体就能进行免疫学的间接凝集试验，可用于快速诊断。有一种超微颗粒乳剂载体，极易和游散于人体内的癌细胞溶合，若用它来包裹抗癌药物，可望制成克癌“导弹”。

在化学纤维制造工序中掺入铜、镍等超微金属颗粒，可以合成导电性的纤维，从而制成防电磁辐射的纤维制品或电热纤维，亦可与橡胶、塑料合成导电复合体。

1991 年春的海湾战争，美国执行空袭任务的 F-117A 型隐身战斗机，其机身外表所包覆的红外与微波隐身材料中亦包含有多种超微颗粒，它们对不同波段的电磁波有强烈的吸收能力。在火箭发射的固体燃料推进剂中添加 1% 重量比的超微铝或镍颗粒，每克燃料的燃烧热可增加 1 倍。此外，超细、高纯陶瓷超微颗粒是精密陶瓷必需的原料。因此超微颗粒在国防、国民经济各领域均有广泛的应用。

2.纳米固体材料

纳米固体材料通常指由尺寸小于 15 纳米的超微颗粒在高压下压制成型，或再经一定热处理工序后所生成的致密型固体材料。

纳米固体材料的主要特征是具有巨大的颗粒间界面，如 5 纳米颗粒所构成的固体每立方厘米将含 10¹⁹ 个晶界，原子的扩散系数要比大块材料高 10¹⁴~10¹⁶ 倍，从而使得纳米材料具有高韧性。通常陶瓷材料具有高硬度、耐磨、抗腐蚀等优点，但又具有脆性和难以加工等缺点，纳米陶瓷在一定的程度上却可增加韧性，改善脆性。

如将纳米陶瓷退火使晶粒长大到微米量级，又将恢复通常陶瓷的特性，因此可以利用纳米陶瓷的特性对陶瓷进行挤压与轧制加工，随后进行热处理，使其转变为通常陶瓷，或进行表面热处理，使材料内部保持韧性，但表面却显示出高硬度、高耐磨性与抗腐蚀性。电子陶瓷发展的趋势是超薄型（厚度仅为几微米），

为了保证均质性，组成的粒子直径应为厚度的 1% 左右，因此需用超微颗粒为原材料。随着集成电路、微型组件与大功率半导体器件的迅速发展，对高热导率的陶瓷基片的需求量日益增长，高热导率的陶瓷材料有金刚石、碳化硅、氮化铝等，用超微氮化铝所制成的致密烧结体的导热系数为 100~220 瓦 / (K·米)，较通常产品高 2.5~5.5 倍。用超微颗粒制成的精细陶瓷有可能用于陶瓷绝热涡轮复合发动机，陶瓷涡轮机，耐高温、耐腐蚀轴承及滚球等。

3. 颗粒膜材料

颗粒膜材料是指将颗粒嵌于薄膜中所生成的复合薄膜，通常选用两种在高温互不相溶的组元制成复合靶材，在基片上生成复合膜，当两组份的比例大致相当时。就生成迷阵状的复合膜，因此改变原始靶材中两种组份的比例可以很方便地改变颗粒膜中的颗粒大小与形态，从而控制膜的特性。对金属与非金属复合膜，改变组成比例可使膜的导电性质从金属导电型转变为绝缘体。

颗粒膜材料有诸多应用。例如作为光的传感器，金颗粒膜从可见光到红外光的范围内，光的吸收效率与波长的依赖性甚小，从而可作为红外线传感元件。铬-三氧化二铬颗粒膜对太阳光有强烈的吸收作用，可以有效地将太阳光转变为热能；硅、磷、硼颗粒膜可以有效地将太阳能转变为电能；氧化锡颗粒膜可制成气体-湿度多功能传感器，通过改变工作温度，可以用同一种膜有选择地检测多种气体。颗粒膜传感器的优点是高灵敏度、高响应速度、高精度、低能耗和小型化，通常用作传感器的膜重量仅为 0.5 微克，因此单位成本很低。超微颗粒虽有众多优点，但在工业上尚未形成较大的规模，其主要原因是价格较高，而颗粒膜的应用则不受价格因素的影响，这是超微颗粒实用化的很重要方向。

4. 纳米磁性液体材料

磁性液体是由超细微粒包覆一局长键的有机表面活性剂，高度弥散于一定基液中，而构成稳定的具有磁性的液体。它可以在外磁场作用下整体地运动，因此具有其它液体所没有的磁控特性。常用的磁性液体采用铁氧体微颗粒制成，它的饱和磁化强度大致上低于 0.4 特。目前研制成功的由金属磁性微粒制成的磁性液体，其饱和磁化强度可比前者高 4 倍。国外磁性液体已商品化，美、日、英等国均有磁性液体公司，供应各种用途的磁性液体及其器件。磁性液体的用途十分广泛。

1.8 纳米材料的发展前景

纳米材料展现了异常的力学、电学、磁学、光学特性、敏感特性和催化以及光活性，为新材料的发展开辟了一个崭新的研究和应用领域。纳米技术在精细陶瓷、微电子学、生物工程、化工、医学等领域的成功应用及其广阔的应用前景使得纳米材料及其技术成为目前科学的研究热点之一，被认为是世纪的又一次产业革命。纳米材料向国民经济和高新科技等各个领域的渗透以及对人类社会的进步的影响是难以估计的。

纳米材料和纳米结构无论在自然界还是在工程界都不是新生事物。在自然界存在大量的天然纳米结构，只不过在透射电镜的应用以前人们没有发现而已。

目前已受到世界各国科学家的高度重视。美国的“星球大战计划”、“信息高速公路”，欧共体的“尤里卡计划”等都将纳米材料的研究列入重点发展计划；日本在 10 年内将投资 250 亿日元发展纳米材料和纳米科学技术；英国也将发展纳米材料科学技术作为重振英国工业的突破；我国的自然科学基金“863”计划、“793”计划以及国家重点实验室都将纳米材料列为优先资助项目。美国科学技术委员会把“启动纳米技术的计划看作是下一次工业革命的核心”。

纳米技术和材料领域的特殊性，使得它们的研究开发迅速推进，技术潮流澎湃向前，展现了广阔的应用前景。世界主要国家都十分重视纳米技术、材料科学，纷纷制定国家计划，积极进行投资，大力推进研究开发。