



南京大学材料科学与工程系列丛书

纳米结构材料科学基础

韩民 谢波◎编著



科学出版社

南京大学材料科学与工程系列丛书

纳米结构材料科学基础

韩 民 谢 波 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书所讨论的纳米结构,是由纳米尺度(0.1~100nm)的构造单元所构成的材料和器件。它们具有与通常的宏观物质不同的奇异性质,并可以通过对纳米构造单元的基于物理、化学和生物过程的可控组装来设计与合成。本书包括以下五个方面:①纳米科学技术概览;②以原子团簇作为切入点对纳米效应进行基本的阐述;③纳米结构材料的制备、组装与加工;④基于扫描探针显微术的纳米结构表征;⑤纳米结构的电学、磁学与光学特性;⑥一种典型的纳米结构材料:碳基纳米结构的介绍。本书内容涵盖了从原子团簇到纳米结构薄膜的基本性质;从纳米结构的自组装到纳米加工和纳米结构表征方法;从原子所主导的表面效应到量子过程所主导的限制效应;特定纳米结构的应用和研究进展。

本书可供材料科学与工程、应用物理学及相关专业背景的高年级本科生和研究生作为教材或教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

纳米结构材料科学基础 / 韩民, 谢波编著. —北京: 科学出版社, 2017.3
(南京大学材料科学与工程系列丛书)

ISBN 978-7-03-052250-4

I. ①纳… II. ①韩… ②谢… III. ①纳米材料-结构材料 IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第053404号

责任编辑: 张 析 高 微 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本: 720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 375 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

2000年初,美国前总统克林顿发表了题为《国家的纳米技术战略》的著名国情咨文,“纳米科学与纳米技术”作为我们这个时代的一个标志性词组流行于世界。一般认为,纳米科技是21世纪前期最具影响力的主导科技,将对材料科学和微器件技术产生革命性的影响。有专家预言,纳米科学对人类社会的影响和冲击力将不亚于蒸汽机的发明,纳米科技的发展将导致新的工业革命。

尽管至今在大众传媒上,纳米科技还带有很多童话般的传奇色彩,但是纳米科技的研究对象却是明确而具体的,纳米科技可被定义为研究由尺寸在 $0.1\sim 100\text{nm}$ 之间的物质所组成体系的运动规律、相互作用,以及它们在实际应用中的技术问题的一门科学技术。而本书所论述的纳米结构,则正是纳米科技的物质载体。纳米结构,是由纳米尺度的构造单元所构成的材料和器件。它们具有与通常宏观物质不同的奇异性质,并可以通过对纳米构造单元的基于物理、化学和生物过程的可控组装来设计与合成。

纳米材料和纳米结构是当今材料研究领域中最富有活力、对未来经济和社会发展有着重要影响的研究对象,也是纳米科技中最为活跃的重要组成部分。对于纳米结构的研究开辟了认识自然的新层次,构筑起材料科学体系的新框架,也极大地丰富了物理、化学等领域的研究内涵。近年来,纳米结构和纳米材料研究取得了引人注目的成就。利用纳米尺度的新物性、新原理、新方法设计纳米结构材料和器件正孕育着众多新的突破。

纳米结构科学和技术是一个宽广的交叉领域,过去二三十年间其研究与开发活动在全球范围内经历了爆炸性的发展。关于纳米结构和纳米材料各个方面的性质和应用的研究成果早就已经难以包揽于单一的专著中,以至于出现了一系列大部头的百科全书或手册来总结纳米科学技术的进展。这些著作往往重于罗列种种文献报道研究进展,头绪众多,但是疏于总结归纳,导致初学者窥尽繁花,却往往不得要领。在国内,至今仍然缺乏适合初加入纳米科学研究行列者阅读的、对纳米科学的基本原理与技术做系统介绍的深浅适中的教材。

为了发展纳米科技,科学研究人员和工程技术人员需要了解支配纳米尺度物质的基本物理规律。从本质上说,这些物理规律依然包含于经典物理学和量子物理学的理论范畴中,纳米科学并未发展出一门新的物理学。一般来说,当接近原子尺度时,相关的物理定律由经典物理转变到量子物理。但量子物理早已成为原

子分子物理、固体物理、化学等学科的基础。事实上，我们可以发现，关于纳米尺度的新效应，都可以在现有的物理学的基本理论框架下得以解释。但是，从宏观尺度到介观尺度，再到原子尺度，物质行为的演变在特定条件下的相关细节却是十分复杂的，当代物理学对此还只有一个宽泛的认识。在纳米尺度，一些现有的理论和方法将不再适用，这也为发现新的纳米效应带来了契机。

本书的出发点是为具有材料科学与工程学科和应用物理科学本科专业背景的研究生和高年级大学生在纳米科学技术研究中提供一本入门教材，其主旨是在对纳米效应及相关的物理概念理解提供指导，让读者了解到当物质尺度向着原子尺寸减小时所发生物性的变化。

本书作者自 2004 年起在南京大学讲授“纳米结构与纳米科学”课程，本书以讲课提纲为基础整理而成。本书以固体物理与表面物理的基本原理为基础，强调材料与器件小型化过程的尺寸与限制效应及其物理本质。在内容组织中，摒弃了常见纳米材料科学教材选定若干特定纳米结构材料与器件为主线展开的惯例，强调材料由大块到纳米尺寸的缩小过程，以及由原子分子到纳米结构单元的生长过程中原子组态与电子特性演变的普遍规律，以求解决纳米科学与技术的初始接触者往往把“纳米”仅作为一种尺寸概念，以尺寸大小作为判断“纳米材料与器件”的唯一依据的弊病。书中反复强调物理对象的缩放规则，以及缩放过程中物理定律与公式的适用性及物理性质的“经典”与“量子”演变。因此，本书对于“特征长度”给予特别的强调，并作为分析各种“纳米效应”的基本依据。

纳米科学技术发展至今，新材料、新器件、新方法层出不穷，但是基本上仍然可以由已有的几个基本的纳米效应加以解释。因此，本书起始，即将纳米效应的物理起源进行归纳整理，并以原子团簇作为切入点，对纳米效应进行细致的阐述，着重强调几个关键因素：由尺寸减小导致的系统粒子数（原子分子数和电子数）由不可数到可数，空间范围从周期性边界条件可用到无周期性边界条件，以及由粒子序到波序的演化，由此引入几个基本的纳米效应：巨大表面积比、分立能级的产生、量子限制与量子传输。在此基础上，本书引入特征尺寸作为纳米效应的区分界限，并成为一条主线贯穿于课程始终，在论述纳米材料的各种物理性质及其表征中，随时引入特征长度分析。

本书在写作中也注重与固体物理、统计物理及量子物理的衔接。纳米尺度的奇异性本质上都是在现有的固体物理、统计物理和量子物理的基本原理与方法的基础上通过引入有限空间尺寸、有限粒子数以及量子化能级后而引申得到。因此，本书的主要章节都以对大块物质的宏观性质的回顾入手，通过分析纳米化导致的关键物理限制，从而推导出独特的纳米效应。希望通过这样的叙述风格，达到提纲挈领的效果，使学生易于融会贯通，并启发其对纳米效应的新思考。

本书由韩民统稿并撰写第 1~4 章、第 6 章、第 8~10 章，由谢波撰写第 5 章和第 7 章。南京大学现代工程与应用科学学院、固体微结构物理国家重点实验室对本书的撰写提供了重要的条件，谨志谢忱。

由于学识有限，书中难免有疏漏或不妥之处，敬请批评指正。

韩 民

2016 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 纳米科技：一场可能的新产业革命	1
1.2 纳米的概念	3
1.3 纳米尺度材料的新特性	5
1.4 纳米科学与技术	10
1.5 纳米科技的历史	12
参考文献	19
第 2 章 团簇物理	20
2.1 原子团簇的概念	21
2.2 团簇的表体比	24
2.3 团簇的稳定结构和幻数	26
2.4 团簇的光吸收和光电子谱	34
2.5 团簇的热力学与“相变”	42
2.6 纳米粒子	49
参考文献	51
第 3 章 纳米结构制备：“由底向上”的途径	52
3.1 获得纳米结构的两类途径	52
3.2 纳米粒子的气相制备	53
3.3 纳米粒子的尺寸分布及尺寸选择	62
3.4 纳米粒子的化学合成	66
3.4.1 溶液反应法制备纳米粒子	67
3.4.2 喷雾法制备纳米粒子	73
3.5 纳米粒子的团聚与分散	76
参考文献	82
第 4 章 低维纳米结构及其制备与组装	84
4.1 低维纳米结构	84
4.2 一维纳米结构	86
4.3 一维纳米结构制备	88
4.3.1 一维纳米结构的气相制备	89

4.3.2	一维纳米结构的液相制备	89
4.3.3	其他一维纳米结构的制备方法	92
4.4	一维纳米结构生长机制	93
4.5	二维纳米结构	97
4.6	二维纳米结构的自组装	100
4.6.1	自组装单层膜	101
4.6.2	纳米粒子自发有序	104
4.6.3	嵌段共聚物自组装	105
4.6.4	Stranski-Krastanov 生长法	107
4.6.5	模板引导的自组装	111
4.7	纳米固体	114
	参考文献	115
第 5 章	微纳米加工	117
5.1	半导体器件特征尺寸的缩小	117
5.2	光学曝光的基本工艺流程	118
5.3	光学曝光的分辨率极限	121
5.4	极端紫外光学曝光与 X 射线光学曝光	124
5.5	电子束曝光	125
5.6	聚焦离子束加工	128
5.7	图形转移技术	130
5.8	分辨率增强技术	133
	参考文献	136
第 6 章	扫描探针显微术	137
6.1	材料显微分析技术及其分辨率极限	137
6.2	扫描探针显微镜的特点	139
6.3	扫描隧道显微镜的原理	141
6.4	扫描隧道显微镜的构造	144
6.5	扫描隧道显微镜的工作模式	147
6.6	扫描隧道显微镜达到原子分辨的途径	148
6.7	原子力显微镜的原理	149
6.8	原子力显微镜的构造	150
6.9	原子力显微镜的工作模式与成像模式	152
6.10	原子力显微镜探针	154
6.11	扫描探针显微镜家族	156
6.12	基于扫描探针显微镜的纳米加工	158

参考文献	160
第 7 章 纳米结构的电子性质	161
7.1 固体能带的起源	161
7.1.1 金属自由电子理论	161
7.1.2 能带的形成	163
7.2 金属纳米粒子的量子尺寸效应: Kubo 理论	165
7.2.1 尺寸减小导致电子能级的明显分立	165
7.2.2 量子体系电子能级的统计学和热力学	167
7.3 量子限制效应	170
7.3.1 不同维度材料的电子结构特征	170
7.3.2 量子点的量子限制效应	172
7.4 特征长度和相干长度	174
7.4.1 输运性质的经典理论	174
7.4.2 与电子输运相关的特征长度	176
7.5 弹道输运	178
7.6 Landauer-Büttiker 公式	180
7.7 量子干涉	184
7.8 库仑阻塞与单电子学	187
7.8.1 库仑阻塞与单电子学的基本概念	187
7.8.2 单电子隧道结	188
7.8.3 电流偏置隧道结: 库仑振荡	189
7.8.4 观察到库仑阻塞和库仑振荡的条件	191
7.8.5 电压偏置的串联单电子隧道结: 库仑台阶	192
参考文献	194
第 8 章 纳米结构的磁性	195
8.1 物质的磁性	196
8.2 团簇的磁矩	197
8.3 单畴极限	200
8.4 各向异性	201
8.5 超顺磁性	202
8.6 交换作用	204
8.7 巨磁电阻	205
参考文献	209
第 9 章 纳米结构的光学性质	211
9.1 材料的光学性质	211

9.1.1	固体的基本光学参数	211
9.1.2	固体的光吸收	213
9.1.3	固体发光	215
9.2	半导体量子点的光学性质	216
9.2.1	半导体量子点的能带结构	217
9.2.2	半导体纳米结构的光吸收	218
9.2.3	半导体量子点的发光	221
9.2.4	IV族半导体纳米结构	223
9.3	金属表面等离激元	224
9.3.1	等离激元的基本概念	224
9.3.2	Drude 模型	225
9.3.3	介质金属界面的表面等离激元	226
9.4	局域表面等离激元	229
9.4.1	金属纳米粒子的表面等离激元共振	229
9.4.2	表面等离激元共振的影响因素	232
9.5	耦合表面等离激元	237
9.6	近场	238
9.7	近场光学显微	241
9.8	局域场增强效应	243
9.9	表面增强拉曼光谱	246
9.9.1	表面增强拉曼散射的机理	246
9.9.2	SERS 增强因子	249
9.9.3	针尖增强拉曼光谱	249
9.10	等离激元增强发光	251
9.10.1	表面等离激元与荧光分子的作用	252
9.10.2	金属纳米结构表面等离激元对半导体发光的作用	253
9.11	非线性光学增强	254
	参考文献	256
第 10 章	富勒烯与碳纳米管	260
10.1	共价键理论	260
10.2	碳的同素异构体	263
10.3	富勒烯	265
10.4	碳纳米管的制备	269
10.5	碳纳米管的结构	271
10.6	异型单壁碳纳米管	276

10.7 碳纳米管的电学性质	278
10.7.1 单壁碳纳米管的电子能带结构	278
10.7.2 单壁碳纳米管的电学性质	280
10.8 碳纳米管的力学性质	281
10.9 碳纳米管的热学性质	283
参考文献	284

第1章 引言

1.1 纳米科技：一场可能的新产业革命

从石器时代开始，人类历史的发展经历了多次产业革命。石器时代始于距今二三百万年，止于距今 6000~4000 年。这个时代人类发展的文明水准，以制造和利用石制工具为特点。石器时代包含了人类进化过程中的第一次科技大范围传播。大约从公元前 4000 年至公元初年，世界各地相继进入青铜时代(中国在公元前 3000 年前已掌握了青铜冶炼技术，但一般认为公元前 2000 年左右，是中国青铜时代的上限。中国的青铜时代绵延 1500 余年，使中国成为人类古代文明形成的中心之一)。在青铜时代，青铜器在生产、生活中占据重要地位。青铜的出现，对提高社会生产力起了划时代的作用。当人们在冶炼青铜的基础上逐渐掌握了冶炼铁的技术之后，铁器时代到来了。铁器时代以能够冶铁和制造铁器为标志，是人类发展史中一个极为重要的时代。中国在战国初期，青铜器时代逐渐被铁器时代所代替。从青铜时代到铁器时代，工业生产的特征是工场手工业作坊。

18 世纪 60 年代，瓦特研制出新蒸汽机；到 80 年代，瓦特制成联动式蒸汽机，推动人类社会进入“机器时代”。机器时代的到来，促使工场手工业作坊转变为机器大工业生产，改变了人们的生活和工作环境，形成了真正意义上的社会化大生产，也促进了采矿业、纺织业、冶金业及交通运输业的发展。蒸汽动力驱动的轮船和火车使交通运输更加便捷，世界各地的联系更加密切。机器时代的到来，代表了人类工业的一次重大变革，被称为第一次工业革命。工业革命创造了巨大生产力，使社会面貌发生了翻天覆地的变化，实现了从传统农业社会转向现代工业社会的重要变革。19 世纪末 20 世纪初，电、电流、电磁感应、电磁波的发明和应用以及电力传输技术的发展，使电力取代了蒸汽动力成为广泛应用的能源和动力，电力技术开始广泛应用，电力工业、电气设备工业迅速发展，发电机、电动机、变压器、断路器以及电线、电缆等研究制造发展迅速，使人类社会生产力发展又一次实现重大飞跃，这次变革被称为第二次工业革命，人类由此进入电气时代。汽车和飞机的问世是第二次工业革命时期应用技术上的一个重大成就，内燃机的发明推动了石油开采业的发展和石油化学工业的产生。石油也像电力一样成为一种极为重要的新能源。

20 世纪中期，半导体材料和技术兴起。半导体材料的研究推动了计算机的发

展。到 20 世纪后期，进一步发展为微电子技术。硅作为最重要、应用最广泛的半导体材料，绝大多数的集成电路器件都是制作在高纯优质的硅抛光片和外延片上，成为支撑着通信、计算机与网络技术等电子信息产业的重要基础材料。砷化镓、氮化镓等作为性能优良的半导体材料，用于发光二极管、光探测器及半导体激光器的制备，推动了光电子技术、现代信息技术、移动通信、卫星通信等的高速发展。微计算机与通信技术的发展，使互联网迅速崛起，互联网通过计算机网络，以数字化的方式存储、处理和传播信息，突破了空间上的限制，使世界紧密连成一体，使工作效率极大提高，生活方式与社会交往方式发生极大变化，人类因此进入“信息时代”。

回顾“机器时代”以来的历次产业革命，可以看到，材料的发展变化在每一次产业革命中都起到了积极的推动作用。另外一个重要特征是，自 18 世纪后期以来，每个世纪都会出现 2 种基本的科技发明，成为巨大财富创造的主要源泉，如 19 世纪的纺织技术和铁路，20 世纪的汽车和计算机技术。如图 1.1 所示，每一项这种技术都可在社会经济发展中持续 100 年的时间，包括前 25 年缓慢增长的导入期，中间 50 年线性高速增长的广泛采用期，以及后 25 年的增长饱和期。以计算机技术为例，1939 年美国人 Atanasoff 和他的学生 Berry 完成第一台真空管电子计算机，电子计算机开始获得发展并投入实际使用。1969 年出现第一个集成电路后，电子计算机技术开始获得迅猛的发展并延续至今，成为全球经济发展的主要推动力量。但最近已可看到，以个人计算机为代表的计算机产业已有增长变缓的趋势，预计于 2025 年前后进入增长衰退期。那么，2025 年以后接替计算机技术成为全球经济增长主要驱动力的核心技术将会是什么呢？很多分析都指向纳米技术。纳米科技是在 20 世纪 80 年代末、90 年代初逐步发展起来的前沿、交叉性新兴学科领域，由于它具有创造新的生产工艺、新的物质和新的产品的巨大潜能，因而它有可能在 21 世纪掀起一场新的产业革命。

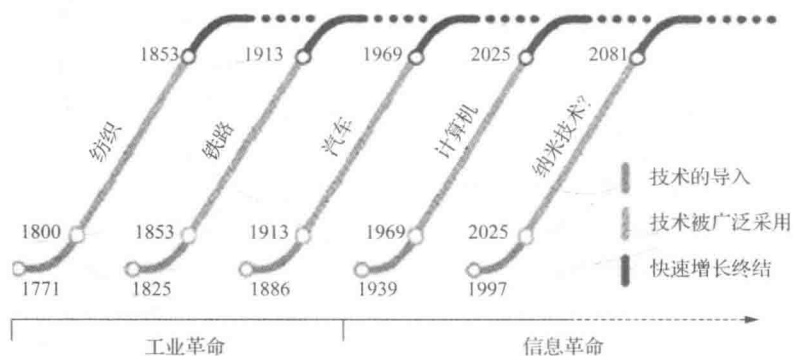


图 1.1 技术革命的发展及其对工业经济的推动^[1]

1.2 纳米的概念

纳米科技是关于纳米尺度物质的科学与技术。其中，“纳”是一个表示数量的词头，给出 10^{-9} 这一微小数量级。因此，用于长度上就是纳米，用于时间上就是纳秒，用于体积上就是纳升，用于质量上就是纳克。

“纳”是英语“nano”的音译，在台湾则译为“奈”。而“nano”这个英文词头则来自希腊语，原意是侏儒。因此可以认为“nano”最初是用来表示长度的，亦即“nanometer”，也就是“纳米”或“奈米”的意思。中文中还有一个与“nano”对应的词，即“毫微”，于是“毫微米”即“纳米”，“毫微秒”即“纳秒”。比“纳米”大的一个数量词头是“微”(micro-)，表示 10^{-6} ，1微米=1000纳米。比“纳米”小的一个数量词头是“皮”(pico-)，表示 10^{-12} ，1皮米= 10^{-3} 纳米。在表示长度时，物理学上还有一个与纳米接近的单位是“埃”(Å)，1纳米=10埃。埃与一般原子的直径相当。

与nano对应的大数词头是“-giga”，即“吉”(G)。nano代表微小，为 10^{-9} ，而giga代表巨大，为 10^9 。因此，对于宏观物体，如果组成单元达到纳米尺寸，则组成单元的数密度将达到吉量级。从这个意义上讲，尺寸的减小，意味着数量的增加。相应地，如果组成单元达到微米尺寸，组成单元的数密度则为兆(M, 10^6)量级。以上尺寸与数量的逻辑关系，可以磁存储器件的发展为典型来说明。目前，计算机硬盘的面记录密度每年以100%的速率递增。目前硬盘的存储介质为Co合金磁性层，提高硬盘记录密度要求Co合金磁性层的晶粒微细化，并保持均一化和低噪声化。2002年，硬盘的存储密度为30Gbits/in²(1in=2.54cm)，其存储单元的直径为50nm，Co合金层厚度为17nm，磁性层晶粒直径为12nm。到2010年，硬盘存储密度达到1000Gbits/in²，或者说1Tbits/in²，其存储单元直径减小到10nm，Co合金层厚度减小到6nm，磁性层晶粒直径则已达到5nm。制作这样的磁性介质层需要纳米量级控制精度的成膜技术。随着存储密度的提高，存储单元尺寸减小，最后将达到磁存储的物理极限：单磁畴的铁磁性晶粒的热扰动随尺寸的减小而增大，导致存储稳定性成为很大的问题。为此，发展出一种新的磁记录模式——垂直记录介质。

纳米空间尺度的物理过程中，时间尺度往往达到纳秒(ns)量级甚至更短。因此，与纳米被用来表示微小的空间尺度相对应，纳秒表示的时间尺度极短暂，或速度极快。在表述高速过程时往往采用频率，其单位为赫兹(Hz)。1ns的周期对应的频率是1GHz。目前，微电子器件的典型线宽为数十到十余纳米，而运行频率则已达到1GHz以上，也就是说，微电子器件已进入纳米尺寸和亚纳秒速度的时代。

图 1.2 比较了一些不同尺度范围的典型物体。在毫米尺寸有蚂蚁等自然物及大头针等人造物，在微米尺度有头发、粉煤灰、白细胞与红细胞等天然物及微电子器件、X 射线波带板等人造物。而腺苷三磷酸合成酶、DNA、硅原子点阵等天然物与碳纳米管及其所构成的纳米管电极、纳米管、晶体管以及量子围栏等都属于我们所定义的纳米尺度物体的范畴。图 1.2 的中间一栏还比较了一些电磁波谱的波长范围。可以看到，红外光波长主要在微米尺度，软 X 射线波长主要在亚纳米尺度，而可见光和紫外光的波长则都位于纳米尺度。

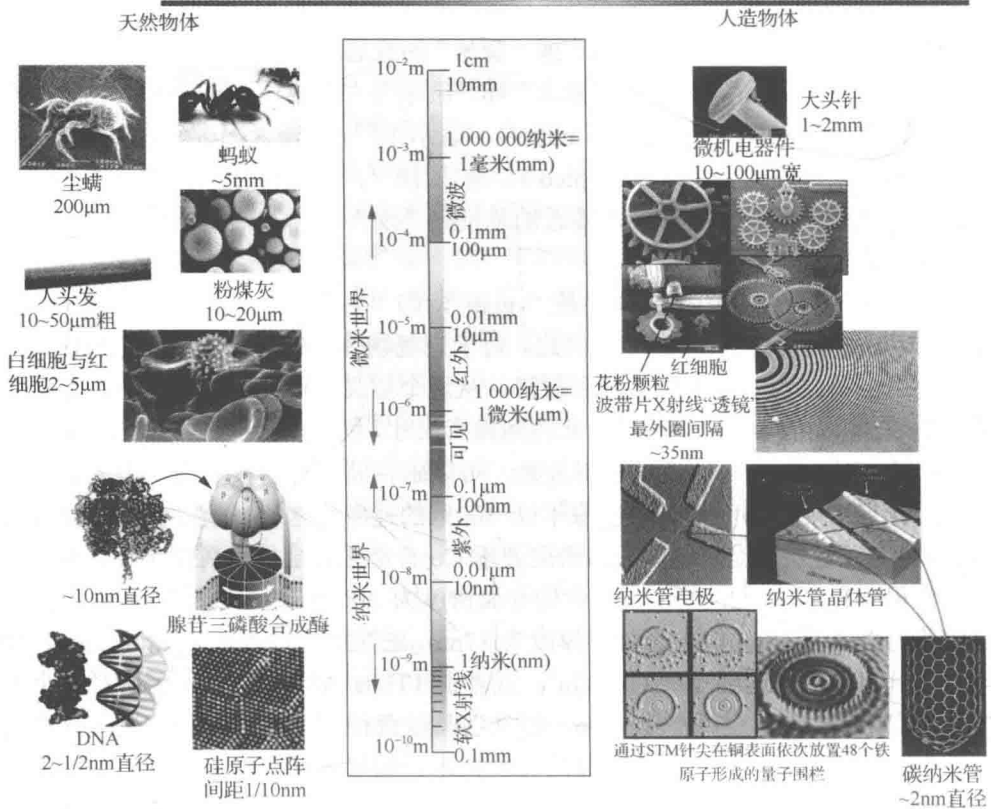


图 1.2 不同尺寸的典型的天然物体和人造物体。中间的标尺比较了不同波长的电磁波，从最短波长的软 X 射线到最长波长的微波

图 1.3 比较了不同尺度的物质层次及相应的观察手段。人眼可以直接观察毫米到米的尺寸范围；借助于常规的望远镜，人眼可以观察到公里的尺寸范围；而借助于常规的光学显微镜，人眼可以分辨微米的尺寸范围。在纳米尺度，常规的光学显微镜已失去用武之地，电子显微镜成为该尺度有效的观察工具。在亚原子尺度，则需通过高能加速器来探索原子核的结构。

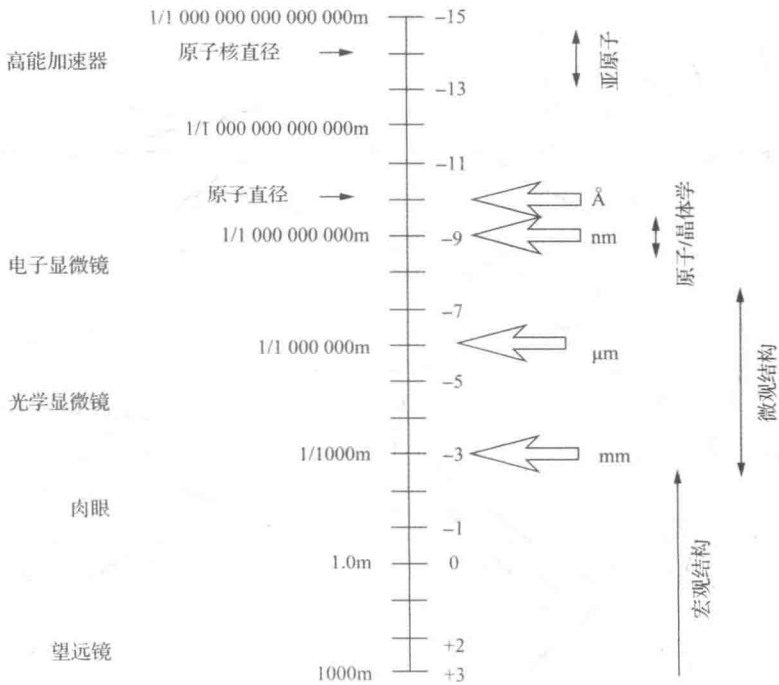


图 1.3 各种物质层次的尺度范围及相应的观测手段

1.3 纳米尺度材料的新特性

材料科学有一个基本法则，即材料的结构决定材料的性质。对于纳米材料，纳米尺度的结构导致特定纳米效应的出现，由此决定了特定纳米结构的功能。

大量数目的同类原子或分子[例如， 10^{23} 个，这是人的感官能够不借助于仪器而对其性质(如质量、体积、颜色等)给出半定量估价的基本量级]被约束于特定的空间内并处于特定的条件(如温度、压力)下，可以以独立的原子或分子的形式而分散存在，构成气态；或者以相互凝聚的流体的形式存在，构成液态；或者以相互间处于固定平衡位置的固体的形式存在，构成固态。对于这三种状态的物质，在宏观的情形，可以通过考察孤立的单个原子或分子(即单粒子系统)，或宏观量(无穷多)的相互作用的原子或分子所认知。迄今科学家们所擅长的理论和数学手段，在处理单粒子系统或无穷多粒子系统(统计系综)时，都是水到渠成的。实际上，宏观物质各种性质的理论描述都是在无穷多全同粒子的假设前提下，经过一定的简化或近似，引入一定的边界条件或初始条件，并通过某种特定的统计分布计算得到的平均值。对于纳米尺度的物质，当空间尺度有限或粒子数有限，导致

某种假设不再适用时,在这种近似下所获得的物理定律或理论公式就不再适用,因而不能正确描述纳米尺度物质的性质,从而导致纳米效应的出现。

固体理论中对特定问题的处理,往往通过引入某种特征长度来实现简化或近似。表 1.1 列出了材料的一些典型的物理性质及其相应的特征长度。当纳米结构的尺寸小于某种性质所对应的特征长度时,往往体现出异于大块固体的特性,即“纳米效应”。例如,在经典金属导体中自由电子在电场作用下运动,将经历大量与晶格的弹性和非弹性碰撞,由此产生电阻,并使电流与电压之间满足欧姆定律。经典电子输运理论中引入弹性平均自由程和非弹性平均自由程,电子的经典电导的推导是基于导线的直径和长度都远大于上述平均自由程的假定进行的。对于纳米导线,其直径或长度可减小到小于电子的弹性平均自由程或非弹性平均自由程,因此电子在导线中输运过程中不再经历与晶格的弹性碰撞或非弹性碰撞,这就使

表 1.1 固体理论中的一些特征长度^[2]

领域	性质	特征长度/nm
电学	电子波长	10~100
	非弹性平均自由程	1~100
	隧道穿透	1~10
磁学	畴壁	10~100
	交换能	0.1~1
	自旋反转散射长度	1~100
光学	量子阱	1~100
	金属趋肤深度	10~100
超导	库珀对相干长度	0.1~100
	Meisner 穿透深度	1~100
力学	位错相互作用	1~1000
	晶界	1~10
成核/生长	缺陷	0.1~10
	表面褶皱	1~10
催化	定域成键轨道	0.01~0.1
	表面拓扑	1~10
超分子	初级结构	0.1~1
	次级结构	1~10
	三级结构	10~1000