

纳米材料和纳米结构

——国家重大基础研究项目新进展

张立德 解思深 主编

中国人民大学图书馆



B1098420



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

《纳米材料和纳米结构——国家重大基础研究项目新进展》

编委名单

主 编 张立德 解思深

编 委 范守善 江 雷 卢 柯 高 濂 钱逸泰

都有为 刘邦贵 蔡伟平 周维亚 李亚栋

丛洪涛 唐少龙 费广涛

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米材料和纳米结构:国家重大基础研究项目新进展/
张立德,解思深主编. —北京:化学工业出版社,2004. 12
ISBN 7-5025-6355-5

I. 纳… II. ①张… ②解… III. 纳米材料
IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 123584 号

纳米材料和纳米结构

——国家重大基础研究项目新进展

张立德 解思深 主编

责任编辑:陈志良

文字编辑:徐雪华

责任校对:陶燕华

封面设计:于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 29¼ 字数 730 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6355-5/TB·98

定 价: 75.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

1999年12月在科技部大力支持下,国家重大基础研究项目(973项目)“纳米材料和纳米结构”正式启动,时间是五年,这标志着中国纳米材料和纳米结构的研究进入了一个崭新阶段。在国际纳米科技的热潮中,中国拥有一支不可忽视的研究力量,项目组确定的研究目标是:获得一批国际水平的研究成果,使中国在纳米材料和纳米结构研究和应用总体水平进入国际先进行列,争取作出若干原创性的工作,在国际上占有一席之地。要解决的科学问题是:纳米材料和纳米结构奇特物性的起因;纳米材料界面中物质和能量传输的新规律;纳米材料结构和性能的稳定性;纳米尺度下物理量的探测和评估。项目分为9个课题,01课题是纳米结构组装体系的设计合成,承担单位是中国科学院固体物理研究所;02课题是纳米碳管及其阵列体系的制备、物性和应用,承担单位是中国科学院物理研究所;03课题是半导体及相关材料准一维纳米体系的合成、物性和应用,承担单位是清华大学;04课题是纳米材料表面界面优化设计和修饰改性,承担单位是中国科学院化学研究所;05课题是金属及合金纳米体材料力学性能和应用,承担单位是中国科学院金属研究所;06课题是纳米陶瓷体材料的力学性能和应用,承担单位是中国科学院上海硅酸盐研究所;07课题是纳米材料化学制备的新方法、新技术的研究,承担单位是中国科学技术大学;08课题是纳米功能材料的特性和应用,承担单位是南京大学;09课题是纳米材料和纳米结构若干基本理论问题的研究,承担单位是中国科学院物理研究所、固体物理研究所和南京大学等。五年来,在项目组全体科技人员的努力下,取得了在国际有重要影响的研究成果。在新知识创新方面,发现了一些新现象、新规律,在纳米材料的生长动力学及纳米尺度的可控生长、纳米材料增强增韧及超塑性机理、纳米结构强发光的起因、间接跃迁转变为直接跃迁机理、准一维纳米结构中的量子相干和量子输运等方面的研究,作出了在国际上有显示度的成果。在新技术创新方面,发展了纳米功能材料的组装技术;纳米结构的自组织生长技术;二元协同纳米界面材料的复合技术;纳米材料、纳米结构的稳定化技术。在新材料创新方面,合成了一批有实用价值的纳米新材料,其中非碳纳米管、同轴纳米电缆、超双疏截面材料、超长超细纳米碳管及大面积合成纳米有序阵列的制备受到了国际关注,申请了一批拥有自己知识产权的发明专利,部分结果已在实际中获得了应用。这些科研成果推动了我国纳米材料的研究和产业化进程,为我国在该领域的研究处于国际前列贡献了力量。五年来,项目组共发表SCI论文1200余篇,被引用6000多次,其中在“Nature”和“Science”杂志上发表论文5篇,影响因子大于6的杂志上发表论文59篇,在国际会议上做邀请报告59次,获得发明专利36项,获得国家自然科学二等奖4项,省部级自然科学一等奖8项。为了进一步促进学术交流,回报社会,我们主编了《纳米材料和纳米结构——国家重大基础研究项目新进展》一书,主要汇编了国家重大基础研究项目纳米材料和纳米结构取得的最新进展,并对纳米材料今后的发展进行了展望,对我国纳米材料研究今后的发展提出一些建议,供大家参考。

张立德 解思深

2004年10月

目 录

第 1 章 纳米科技导论	1
1.1 纳米冲击波在世界产生的影响	1
1.2 纳米技术的潜力和影响	2
1.3 纳米技术的推动力	3
1.4 纳米技术对各个领域的影响	4
1.5 纳米学科领域的拓展	7
第 2 章 碳纳米管的制备、表征和性能	12
2.1 多壁碳纳米管的可控制合成——小直径碳纳米管、连续碳纳米管线.....	12
2.1.1 小直径碳纳米管.....	12
2.1.2 多壁碳纳米管阵列的可控制合成.....	20
2.2 单壁、双壁纳米碳管的可控制合成.....	30
2.2.1 单壁纳米碳管的可控制合成.....	30
2.2.2 双壁碳纳米管的浮动催化法制备.....	40
2.3 高温溶剂热合成碳纳米材料.....	51
2.3.1 高温溶剂热合成碳纳米管.....	51
2.3.2 碳空心球及无定形碳球的合成.....	57
2.3.3 碳空心锥制备与表征.....	58
2.4 单壁、双壁碳纳米管的共振拉曼散射研究.....	60
2.4.1 双壁碳纳米管的共振拉曼光谱.....	60
2.4.2 取向单层碳纳米管阵列的偏振拉曼光谱研究.....	67
2.5 纳米管的生长、缺陷结构和物理特性的分子动力学模拟和第一原理计算.....	69
2.5.1 单壁碳纳米管的自组装生长的分子动力学模拟.....	69
2.5.2 碳纳米管上缺陷组装机理的分子动力学模拟研究.....	70
2.5.3 碳纳米管的弹性和强度.....	72
2.5.4 单壁碳纳米管储氢性能的理论研究.....	74
2.5.5 束缚于碳纳米管中的氢分子凝聚和相变.....	76
2.5.6 含氮碳纳米管的几何构型和电子结构的第一原理计算.....	77
2.5.7 III-V 化合物管状结构及其电子结构的理论探索	79
2.5.8 甲烷与碳纳米管的碰撞反应研究.....	80
2.5.9 束缚于纳米空间的原子、分子碰撞反应动力学研究.....	81
2.6 碳纳米管的性质研究和应用.....	83
2.6.1 碳纳米管束的拉伸性质研究.....	84
2.6.2 单根多壁碳纳米管的径向压缩性质的研究.....	86
2.6.3 多层碳纳米管的热学性质研究.....	88
2.6.4 多层碳纳米管的电输运性质研究.....	90

2.6.5 多层碳纳米管在高压下的行为	93
2.6.6 碳纳米管的场发射性质及其显示应用	97
2.6.7 碳纳米管的应用	103
参考文献	105

第3章 纳米线和纳米带

3.1 纳米线的气相合成和表征	113
3.1.1 气相法生长纳米线的机理	113
3.1.2 元素纳米线	114
3.1.3 二元化合物纳米线	116
3.1.4 多元化合物纳米线	121
3.2 同轴纳米电缆的合成与表征	124
3.2.1 激光烧蚀法合成同轴纳米电缆	125
3.2.2 溶胶-凝胶与碳热还原及蒸发-凝聚法合成同轴纳米电缆	126
3.2.3 化学气相沉积法合成同轴纳米电缆	126
3.3 纳米带的合成与表征	129
3.3.1 元素纳米带	129
3.3.2 二元化合物纳米带	130
3.3.3 多元化合物纳米带	133
3.4 纳米线和纳米带的光学特性	136
3.4.1 本征发光	137
3.4.2 非本征发光	138
3.5 纳米线和纳米带的输运特性	141
3.5.1 量子扩散区的输运现象	142
3.5.2 弹道区电子输运	144
3.6 纳米线和纳米带的热学特性	151
3.6.1 热膨胀的基本理论和测量	151
3.6.2 纳米颗粒热膨胀和熔点研究	154
3.6.3 纳米线和纳米带的结构相变和热膨胀特性	155
3.7 纳米线和纳米带的谱学特性	159
3.7.1 拉曼光谱和红外光谱	159
3.7.2 X射线光电子能谱 (XPS)	161
3.7.3 电子能量损失谱 (EELS)	163
3.7.4 电子顺磁共振 (EPR)	163
3.7.5 小结	164
参考文献	165

第4章 纳米结构和纳米阵列

4.1 氧化铝模板的制备技术	172
4.1.1 氧化铝模板的制备	172

4.1.2 氧化铝模板的结构与表征	174
4.1.3 氧化铝模板有序通道阵列形成机理的探索	174
4.2 大面积有序孔洞材料的制备	176
4.2.1 滴涂法	177
4.2.2 旋涂法	178
4.2.3 垂直提拉法	178
4.3 有序纳米阵列的合成与表征	179
4.3.1 基于氧化铝模板合成的有序纳米阵列	179
4.3.2 基于二维胶体晶体模板合成的有序纳米阵列	199
4.4 纳米颗粒与自组装	202
4.5 纳米阵列的输运特性	207
4.6 纳米阵列的光学特性	211
4.6.1 光致发光	211
4.6.2 光吸收	216
4.6.3 光偏振	219
4.7 纳米阵列的磁学特性	222
4.8 纳米阵列的谱学特性	229
4.8.1 拉曼散射光谱	229
4.8.2 能量损失谱	231
4.8.3 X 光电子能谱	232
4.8.4 电子顺磁共振谱	233
参考文献	234

第5章 纳米多孔材料的制备技术	241
5.1 介孔材料及其分类	241
5.2 介孔复合体及组装技术	243
5.3 介孔材料的评价技术	244
5.3.1 滞后圈与孔形状结构	245
5.3.2 孔径分布的计算	246
5.4 介孔组装体系的制备技术及性质研究	247
5.5 干凝胶及气凝胶制备技术	251
5.6 MCM-41 有序介孔材料制备技术	253
5.6.1 MCM-41 介孔分子筛的发展历史	253
5.6.2 MCM-41 的基本含义, 结构和组成	254
5.6.3 MCM-41 的合成方法	255
5.6.4 MCM-41 的形成机理	256
5.6.5 MCM-41 的结构表征	258
5.6.6 介孔分子筛 MCM-41 的一些优异性质及其用途	260
5.6.7 MCM-41 介孔组装体的研究现状	260
参考文献	260

第 6 章 纳米界面与薄膜	263
6.1 二元协同纳米界面材料的设计原理	263
6.2 超疏水纳米界面材料的合成与表征——从自然到仿生的超疏水纳米界面材料 ...	265
6.2.1 植物叶表面的疏水性	266
6.2.2 纳米结构产生高接触角	267
6.2.3 外场刺激下的超亲水-超疏水可逆开关	269
6.2.4 纳米结构与微米结构结合产生低滚动角	270
6.2.5 表面微米结构的排列影响滚动各向异性	272
6.3 颗粒膜的合成与表征	273
6.3.1 颗粒膜的制备	273
6.3.2 颗粒膜的表征	276
6.4 颗粒膜的磁学特性	279
6.4.1 颗粒体系中的静磁特性	279
6.4.2 颗粒膜中的输运特性	283
6.5 颗粒膜的巨磁电阻效应	285
6.5.1 金属-金属型颗粒膜的巨磁电阻效应	285
6.5.2 金属-绝缘体型颗粒膜的磁电阻效应	291
6.6 纳米磁性薄膜的霍尔效应研究	295
6.6.1 M-I 型颗粒膜的巨霍尔效应研究	297
6.6.2 M-M 型颗粒膜的巨霍尔效应的研究	301
6.7 颗粒膜的磁光效应	303
6.7.1 Fe-SiO ₂ 颗粒膜的磁光效应	303
6.7.2 Co-Ag 颗粒膜的磁光效应	304
6.7.3 Fe-Si 合金薄膜的磁光效应	304
6.8 纳米磁性薄膜的应用	306
6.8.1 高密度读出磁头	306
6.8.2 磁电阻效应传感器	308
6.8.3 磁随机存储器	310
6.8.4 自旋晶体管	311
参考文献	312
 第 7 章 纳米金属体材料	 316
7.1 纳米金属体材料制备和表征	316
7.1.1 纳米金属体材料的制备	317
7.1.2 纳米金属体材料的结构及其表征	320
7.2 纳米金属的力学性质	327
7.2.1 强度	327
7.2.2 塑性	330
7.2.3 弹性模量	332
7.2.4 应变强化	332

7.2.5	超塑性	333
7.2.6	蠕变	334
7.3	纳米金属的热稳定性	334
7.4	纳米晶软磁材料制备与性质	342
7.4.1	纳米晶材料中组元对磁性的影响	343
7.4.2	退火处理中降温速率对磁性的影响	345
7.4.3	纳米晶表面应力场及晶粒内位错的稳定性	345
7.4.4	纳米晶条带的表面改性	346
7.4.5	纳米晶中的马氏体转变	348
7.4.6	纳米晶软磁条带磁化过程中的弛豫	349
7.4.7	磁化机制与晶粒尺寸的关系	350
7.4.8	小结	350
7.5	纳米复合稀土永磁材料	351
7.5.1	纳米复合 NdFeB 永磁体中非晶相对交换耦合作用的影响	352
7.5.2	Dy 元素对富 B 体系纳米复合 NdFeB 的热行为和磁性能的影响以及该体系工艺参数的制定	353
7.5.3	元素添加对磁性能的改善	353
7.6	纳米晶磁制冷材料	354
7.6.1	磁制冷概念及国内外研究概况	354
7.6.2	纳米晶磁制冷材料	355
	参考文献	357
第 8 章	纳米陶瓷与纳米复相陶瓷	364
8.1	ZnO 纳米陶瓷	365
8.1.1	沉淀法制备 ZnO 纳米粉体	365
8.1.2	ZnO 纳米陶瓷的烧结与性能	366
8.1.3	ZnO 纳米陶瓷的电学性能	368
8.2	SiC-Al ₂ O ₃ 纳米复相陶瓷	369
8.2.1	SiC-Al ₂ O ₃ 纳米复合粉体的制备	369
8.2.2	SPS 烧结 SiC-Al ₂ O ₃ 纳米复相陶瓷的制备与力学性能	370
8.3	Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ (3Y)-SiC 纳米复相陶瓷	372
8.3.1	Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ (3Y)-SiC 纳米复合粉体的制备与表征	372
8.3.2	Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ (3Y)-SiC 烧结体的制备与显微结构观察	373
8.3.3	Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ (3Y)-SiC 纳米复相陶瓷的力学性能	376
8.4	ZTA/LaAl ₁₁ O ₁₈ 纳米复相陶瓷	377
8.4.1	ZTA/LaAl ₁₁ O ₁₈ 纳米复相陶瓷的制备	377
8.4.2	ZTA/LaAl ₁₁ O ₁₈ 纳米复相陶瓷的显微结构与力学性能研究	378
8.5	TiN-Al ₂ O ₃ 、TiN-Si ₃ N ₄ 纳米复相导电陶瓷	381
8.5.1	TiN-Al ₂ O ₃ 、TiN-Si ₃ N ₄ 纳米复相陶瓷的制备	381
8.5.2	TiN-Al ₂ O ₃ 、TiN-Si ₃ N ₄ 纳米复相陶瓷的表征与导电性能研究	381

8.6 CNTs- Al_2O_3 纳米复相陶瓷	385
8.6.1 碳纳米管在水性介质中的分散	386
8.6.2 CNTs- Al_2O_3 纳米复合粉体的制备	387
8.6.3 CNTs/ Al_2O_3 纳米复相陶瓷的制备及力学性能	388
8.7 CNTs-HAp 纳米复相陶瓷	390
8.7.1 原位沉积法制备 CNTs-HAp 纳米复合粉体	391
8.7.2 热压烧结制备 CNTs-HAp 纳米复相陶瓷	392
参考文献	394

第9章 纳米材料化学制备的新技术、新方法研究..... 395

9.1 溶剂热合成氮、硼、碳、磷等化合物的纳米材料	396
9.1.1 碘输运溶剂热制备六方相和岩盐相 GaN	396
9.1.2 HPN ₂ 和 BN 纳米管与纳米空心球的合成	397
9.1.3 还原-碳化法制备 SiC 纳米线	400
9.1.4 用碳纳米管为原料合成 TiC 空心球	400
9.1.5 α - Si_3N_4 纳米晶的低温制备	401
9.2 纳米材料的溶剂热、水热合成机理研究	402
9.2.1 乙二胺、单胺配体溶剂热合成硫族化合物纳米材料	402
9.2.2 In_2O_3 和 MnS 介稳相纳米材料的溶剂热合成	405
9.2.3 Te、硫化物及氧化物纳米材料的水热合成及形成机制	407
9.2.4 表面活性剂对 Ni 和 Te 的形状控制	412
9.3 复合溶剂热体系中纳米材料的合成	414
9.3.1 利用丙三醇-水为溶剂制备了 Bi_2S_3 纳米带和 Cu 纳米线	414
9.3.2 原位-前驱物模板-界面反应路线制备纳米空心球	416
9.3.3 以乙二胺-水为复合溶剂合成了规则几何形状的 PbS 闭合纳米线	417
9.3.4 1-D Te 纳米结构的控制合成	418
9.4 纳米材料制备新方法研究	419
9.4.1 γ 射线辐照法合成纳米材料	419
9.4.2 微波辅助制备纳米材料	421
9.4.3 多元醇回流法合成纳米材料	422
9.4.4 熔盐法制备纳米材料	423
9.4.5 超声辅助制备纳米材料	423
9.4.6 室温条件下合成纳米材料	423
参考文献	424

第10章 纳米体系的若干理论问题研究..... 426

10.1 表面纳米结构的生长与稳定性理论	426
10.1.1 引言	426
10.1.2 表面活性剂参与的异质原子岛生长的反应形核理论	426
10.1.3 表面三维原子岛的退化机理	427

10.1.4	CO 分子对 Pt 原子岛形状的控制机理	427
10.1.5	实际纳米结构生长的相场模型	428
10.1.6	小结	429
10.2	自旋电子学材料的第一原理研究与设计	429
10.2.1	引言	429
10.2.2	方法与参数	430
10.2.3	闪锌矿过渡金属化合物	430
10.2.4	纤锌矿结构的半金属铁磁体	432
10.2.5	小结	433
10.3	纳米结构的量子性质及其相关效应	433
10.3.1	引言	433
10.3.2	量子尺寸效应	434
10.3.3	库仑阻塞效应	435
10.3.4	Fano 效应	437
10.3.5	Kondo 效应	439
10.4	团簇及团簇催化性质	440
10.4.1	引言	440
10.4.2	团簇结构	440
10.4.3	团簇的催化及氧化性质	442
10.4.4	构造新的团簇组分和结构来设计新的高效催化剂	446
10.5	准二维体系中的 d-波超导电性	449
10.5.1	引言	449
10.5.2	准二维 Hubbard 模型中的超导相变	450
10.5.3	有关计算方法	451
10.5.4	小结	451
	参考文献	452
	结束语	454

第 1 章

纳米科技导论

1.1 纳米冲击波在世界产生的影响

“我的预算支持一项价值 5 亿美元的重要的新国家纳米技术计划。……能够在原子和分子水平上操纵物质。想像一下这样的可能性：强度为钢的 10 倍而质量只有钢的一小部分的材料；把国会图书馆的所有信息压缩进一个方糖大小的装置；在癌肿瘤只有几个细胞大小时就能探测出来。我们的一些研究目标也许需要 20 年或更长时间来完成，但这正是联邦政府发挥重要作用的原因所在。”这是美国前总统克林顿 2000 年在加州理工大学的讲话，如今四年已经过去了，从纳米技术崛起，到纳米技术在各个领域的拓展，它发展之快，对社会经济影响之深，超出了人们意料，纳米冲击波正在冲击各个领域。

在新兴的纳米科学和纳米工程领域中，一个引人瞩目的技术就是能按人的意志和需要精确地搬迁原子和分子，构筑新的纳米结构，这种对原子和分子进行控制的技术，使人们的创新能力延伸到纳米尺度空间。这将引起一场新的认知革命，这将使人们对纳米尺度物质的构成和新型纳米结构器件的构筑在原理上有所理解和认识。这些发展可能会改变几乎所有物体包括从疫苗到计算机到汽车轮胎直到还没有想像过的物体的设计和制造方式。因此，纳米技术可以与工业革命以来蒸汽机技术、电器化技术和微电子技术相比拟，将对未来社会发展产生深远的影响。一场以纳米技术为主导推动各个领域生产方式的变革，正在掀起 21 世纪一次新的产业革命。

布什总统执政以来，十分重视发展纳米技术。从 2001 年以来，美国政府对纳米科技的投资每年递增 20%~30%，2002 年投资高达 6.3 亿美元，2003 年增加到 7.5 亿美元，从现在开始的今后 4 年，美国政府对发展纳米技术的投入将增加到 35 亿美元，到 2010 年纳米技术对美国 GDP 的贡献将达到 1 万亿美元。日本重新制定了发展纳米科技的计划，政府投资和企业的投资猛增，与美国发展纳米科技的总投入不相上下。欧盟也加快了发展纳米科技的步伐，2002 年的投资为 4.5 亿美元，2003 年增加到 6 亿美元。亚洲的韩国、中国的台湾确定了以市场为牵引、加快发展纳米科技的战略，到 2006 年韩国政府的投入为 9.8 亿美元，中国台湾为 6 亿美元。新加坡、印度、以色列、泰国、澳大利亚、南非都纷纷出台发展纳米科技的计划。目前，世界上已形成了发展纳米科技“三大板块”的格局，即美国、亚洲和欧盟。纳米科技的研究和发展已进入一个新阶段，它对世界的影响越来越重要。

美国国家纳米启动计划（NNI）起草组的组长、前美国科学技术主席助理 Neal Lane 博士说：“如果人们问我哪个科学和工程领域最有可能在未来产生突破性成就，我认为会是纳

米科学和工程。”

1.2 纳米技术的潜力和影响

纳米科学和工程的前景并非无人问津。1998年3月,美国前总统科学顾问 Jahu H. Gibbons 博士认为纳米技术是决定 21 世纪经济发展的五大技术之一。一些政府部门已在积极进行纳米科学研究与开发。美国国家科学基金会 1991 年开始实行纳米微粒合成和加工计划,1994 年启动国家纳米制作用户网络,并在 1998 财政年度预算中强调了纳米科学和工程。美国国防部 1997 年把纳米技术列为一个战略性研究目标。

1999 年 5 月 12 日,诺贝尔奖获得者 Richard Smalley 在向参议院科学和空间分委员会做的证言中总结道:“我们将有能力建造与物理特征长度(电子平均自由程、波尔半径和超导相干长度)尺度相当的物体。大胆地向这个新领域迈进,符合我们国家的最佳利益。”1999 年 6 月 22 日,美国科学委员会基础研究分委员会组织了一次听证会,主题是“纳米技术:纳米科学的现状及未来十年的展望”。分委员会主席,密执安州的 Nick Smith 在为听证会的总结中说:“纳米技术是在健康、制造、农业、能源使用和国家安全等方面取得突破的希望,已有足够的信息显示需要积极地为这个领域提供资金。”

2003 年美国把发展纳米技术列为九大技术之首,作为仅次于反恐斗争第二位重要任务提到议事日程。

纳米技术将引起一场各个领域生产方式的变革,也将改变未来人们生活方式和工作方式。

纳米技术将使目前的计算机硬盘和软盘的存储密度大大提高,芯片的存储能力还将提高 10 万~100 万倍,单位面积的存储密度将达到 $10^{11} \sim 10^{12}$ bit,这样就能把美国国会图书馆的所有资料缩进一个方糖大小的装置。自下而上组装构筑新的器件,制造新的物质成为纳米技术中一条重要的工作方式,这样不但能节省原材料、减少污染、节省能源,而且可以按照人们需要设计自然界存在的(仿生技术)或者自然界上不存在的新的物质。开发强度为钢的 10 倍而质量只有钢的几分之一的轻质高强纳米结构的材料,并用这种纳米材料制造交通、宇航、海洋技术所需要的新型交通工具及其相应的部件;用纳米技术还可以使计算机的速度再提高 1000~10 万倍,能耗再降低 10 万~100 万倍,纳米晶体管和芯片的尺度进一步缩小,在此基础上制造的计算机性能更加优越,它将使今天的奔腾 IV 相形见绌;作为纳米技术的重要组成部分,纳米生物医药和医疗方式将出现一场新的变革,基因芯片和靶向治疗技术都将为医疗诊断产生变革,利用基因芯片能精确地分析人体血液中的血糖含量、酸碱度以及血液中各种组织的健康状况,可以对人体各个器官健康的程度做出判断,实现疾病的早期诊断,通过靶向诊断和治疗技术,可以对早期癌变进行预测;纳米技术对空气中 20nm 的污染物和水中 200nm 的污染物的清除能力是其他技术不能代替的,用纳米技术可以实现对细菌和病毒的抑制,控制它们的繁殖能力,有利于人体的健康;利用纳米材料和技术设计新型太阳能电池,可以使太阳能到电能的转换效率提高 1 倍。

纳米技术对人文科学和社会科学各个领域也将产生很大影响,人们必须以创新的思路研究纳米科技对科学、教育、道德、法律等各个领域的影晌。这种研究能帮助人们分清潜在的问题,指导人们今后如何对可能需要采取的措施进行有效干预。

如何抑制纳米技术的负面影响,最大限度地发挥纳米技术的积极作用,这不仅是科学家

的责任，也必须在道德、法律等方面制定新的规范，促进纳米技术和社会协同发展。

我们知道科学技术是人创造的，科学技术的应用也是由人来执行的。科学技术是双刃剑，如原子核裂变的发现，可以用来建造核电站，为人类造福，也可以用来制造原子弹，用于战争残害人类；计算机的制造为人类带来极大的利益，但计算机病毒却为人类应用计算机带来灾害；人类发明的激素，可以在医生指导下治病，但是把它用于人类食物——甲鱼和鳝鱼的生长，将极大损害人的健康；克隆技术可以使濒临死亡的物种复生，但克隆人则违反了人类道德的基本准则。对发展纳米技术，我们必须保持清醒头脑，充分认识可能出现的负面效应，研究抑制负面效应的措施，发挥纳米材料和纳米技术的优越性，以造福于人类，回报社会，促进经济发展。

因此，随着纳米科技的发展和纳米科技迅速进入社会，也必将促进人文科学的发展。哲学、经济学、社会学、法学等领域必然充实新内涵，反映纳米科技对社会影响。

1.3 纳米技术的推动力

纳米尺度上的新特性并不一定能根据大尺度上观察到的特性来预测。最重要的性能改变不是由尺寸量级减少引起的，而是由于纳米尺度特有的或在纳米尺度时变得显著起来的现象引起的。这种现象已经被人们发现，如尺寸效应、表面界面效应和宏观量子效应。一旦有可能控制特征尺寸，也就有可能提高材料的性能和装置的功能，以至超过我们现在知道的甚至认为是可行的那些性能和功能。减小结构尺寸可以带来诸如碳纳米管、量子线和量子点、薄膜、以基因（DNA）为基础的纳米结构、纳米结构激光器等具有独特性能的实体。假若我们能够发现和充分利用基础原理，这些新形式的材料和装置将预示一个科技革命时代的到来。

理查德·费曼在 1959 年发表了著名的演讲“在介于微观和宏观领域有大量创新的空间”。他的预见激励着人们——如果谁能在原子/分子尺度按人的意志来制作材料和装置，那将是振奋人心的新发现。他指出，要想使这样的事情发生，得需要一组新的小型化仪器来操纵和测量这些小“纳米”结构的性能。

理查德这位物理大师的预见，终于在 20 世纪 80 年代得到实现。这些设备包括扫描隧道显微镜、原子力显微镜、近场显微镜，它们为测量和操纵纳米结构提供了观察手段和操作技术。与此同时，计算能力也在扩大，这使对纳米尺度材料性能的模拟成为可能。这些新工具和技术引起了整个科学界的兴奋。当材料的尺度与物理特征长度（电子平均自由程、波尔半径、超导相干长度、磁畴大小等）相当时，材料就出现了新的奇异特性，甚至出现一些意想不到的新现象和新规律，很难用传统的模型和理论进行解释，表征测试技术和相应的测试工具均发生很大的变化，这个尺度范围一般在 100nm 左右。进而言之，并不是材料的三维尺度都达到纳米级才出现新的特性，实际上材料至少有一维尺度达到纳米级，就会出现不能被传统模型和理论所解释的不同新特性。因此，很多学科的科学家的正热切地制作和分析纳米结构，以求发现发生在单个原子/分子和成千上万的分子之间的中间尺度上的新现象。纳米结构通过亚微尺度组装（理想的状态是利用自组织、自组装和人工组装），“自下而上”生成实体，而不是用“自上而下”的超小型方法把较大的结构变成较小的结构，这就为材料制造提供了新的范例。到目前为止，人们对纳米结构构筑原理的理解十分肤浅，对自然界特别是海洋生物存在着大量的天然纳米结构形成的过程、方法和原理知道的甚少，仿生纳米技术是当

前人类需要认识和发展的重要纳米技术。即使可以制作纳米结构的装置，它们的物理、化学性能也只是刚开始被发现，目前微米级或更大级的装置是在宏观的原理和方法基础上建立起来的。对于物理、化学、生物性能和制作原理的每一次重大进步，对制造原理新的预见和制造方法新的突破，都会引起一场工作方式的变革，半导体晶体管在设计原理和方法上，都是在真空电子管的基础上有新的发展和新的突破，从而把测量控制的设备体积和质量均缩小了几十倍，功耗也大大地降低。纳米科技的发展，以及目前对纳米材料和技术认识的程度已给我们设计和制造纳米测量表征设备、并在实际中得到应用提供了可能，这类测量技术和仪器设备的发展势头看好，前景方兴未艾。因此，无论从知识创新的空间广阔的程度，还是从对纳米尺度测量仪器的需求，都成为纳米科技发展的推动力。

从市场和经济角度来分析，纳米技术的发展对纳米技术的推动也是十分有力的，这是因为纳米技术具有潜在的经济回报和社会利益，例如纳米技术为信息技术的发展（芯片技术、网络通讯技术、显示技术和纳米结构器件等）提供新的商机，也为环境、能源、先进制造技术、医学保健、国家安全、生物和农业等产业的快速发展提供了新的可能，也为新材料制造业的快速增长提供新的机遇。前 IBM 首席科学家 John Amstrong 在 1991 年写道：“我相信纳米科学和纳米技术将成为下一个信息时代的中心，它的革命性将与始于 70 年代初的微米级科学技术相媲美”。1999 年 1 月 27~29 日在美国举行的 IWGN 研讨会，众多企业家到会参加研讨，一致认为“纳米科学和技术将在 21 世纪改变几乎所有人造物体的性质和制造模式，如此重要的材料性能改善和制造模式的变化将激发一场工业革命”。

1.4 纳米技术对各个领域的影响

纳米技术的潜在利益无处不在，也可以说它是一个无孔不入的技术，纳米技术对各个领域都将产生深远的影响，也给各个领域的发展、产业升级带来新的机会。

（1）材料和制造

纳米部件的成分和结构能做到精确的控制，制造和构筑在性能结构上从来没有的新的部件，从根本上变革这种纳米结构部件的制造方式和工作方式，给制造业带来一场新的革命。例如只有红血球大小的纳米机器人在血管内传输的方式，这种纳米机器人加工装配的生产方式是全新的，它和传统机器人加工装配方式完全不同，原理和技术等方面都有明显的创新，甚至不能以传统机器人的工作方式来理解纳米机器人的工作，这些全新的概念和全新的技术，把先进的制造业带进了一个新的层次。

纳米材料和技术带来的经济利益很可能在未来的新产品上体现出来：更轻、更坚固、可编程的材料；抗老化和较低的损坏率可减少生命周期成本；基于新原理和结构的革新性装置；运用分子/团簇制造，这些制造主要是充分利用纳米组装和组合技术，上面所提到的产品仅仅是有限的例子，就好像冰山上露出了一角，具有全新性能的纳米技术的产品是多种多样的。人们将能发展出以前在自然界观察不到的结构。关键的难点是：根据设计来合成材料，发展生物材料和生物激发材料，发展成本有效的、规模可变的生产技术，以及确定导致纳米材料损坏的基本因素，并采取有效的措施和对策，预防材料的老化和破损。

重要的生产方式变革和采用纳米技术可能实现的新产品和新工艺有：①无需机器切削而具有确切形状的纳米金属、陶瓷和聚合物；②既有颜料又有染料双重功能的纳米微粒和纳米粉体材料，很可能制造全新的油墨，导致印刷业全面升级；③纳米级连接技术、胶合技术、

纳米技术对传统油漆的改性，以及在刀具的改性和精细化工方面的应用，都将取得良好的经济效益；④纳米技术测量的新标准、新方法和纳米材料表征仪器的设计和制作；⑤纳米芯片的制作技术、纳米原器件的集成技术和纳米芯片表面的抛光技术。

(2) 纳米电子学和计算机技术

电子产品和计算机技术一直是信息产业的支柱，在即将进入纳米时代，电子产品和计算机技术的内涵和产品的模式都将发生很大的变化，纳米技术给信息领域的产业带来新的商业机会，也使在这个领域的知识和技术创新的目标更加明确和更加有针对性。美国半导体协会(SIA)为下一代电子仪器的小型化、高空间分辨率、高处理速度、低功耗和新性能制定了研究开发的蓝图，并制定了加速运用纳米技术进行创新的日程表。这些电子元器件包括信号获取传感器、逻辑存储器、可视化展示器、通讯传送设备和高密度存储器等，美国半导体协会对2010年纳米技术对电子元器件和计算机技术的影响进行了预测，“100nm的元器件和组装构筑技术很可能给美国带来新的经济增长，刺激美国信息产业走向一个新的层次”。目前的困难是对于100nm的元器件的加工方法、组装技术及新的原理还缺乏认识和理解，科学和技术的创新积累不多。因此，建立新型纳米加工技术、研制新型的设备提到议事日程。从现在开始，大致还需要10~15年的时间，竞争十分激烈，谁抓住这个机遇，先抢占这个制高点，谁就有可能领导纳米电子元器件和计算机产业的潮流，在第四次浪潮激烈角逐竞争的格局中，占据有利的位置，实现跨越式发展。必须清楚地认识到，纳米技术进入市场的速度是竞争的关键，当今技术进入市场的速度之快是历史上从来没有过的。19世纪末，有线电话进入市场花费了52年的时间；20世纪初，真空电子管经历31年的时间才进入了市场；彩色电视机进入市场的速度是12年；IC和IT进入市场的速度是6年；网络通讯技术仅花了4年的时间。纳米技术中，巨磁电阻材料和技术，从科学发现到进入市场，才花了10年的时间，1988年法国科学家发现了巨磁电阻现象，1998年美国率先把巨磁电阻技术应用到计算机读写磁头上，使现有的计算机读写磁头全部更新，大大提高了读写速度，仅这一项技术已给美国创造了340亿美元的经济效益，预计2005年将形成近500亿美元的市场，可见纳米技术对计算机行业的影响是巨大的。纳米技术在这个领域具有潜在突破的产品还包括：①功耗小、成本低和节省原材料的计算机中的纳米微处理器；②宽频带（比现在的频宽高10倍）的通讯设备给通讯、科研、教育、商业、国防和人们生活带来更大的利益，纳米技术将扮演重要角色；③利用纳米技术制造的量子磁盘和高密度存储器，将使信息存储的密度，从现在的水平再提高1000~10000倍，计算机的容量不是以兆(10^6 bit/in²)而是以G(10^9 bit/in²)来度量。1000G的超大容量计算机，是未来10~20年奋斗目标，纳米技术将发挥重要作用；④能够收集、处理和传送大量数据的纳米器件，质量轻、容量大、能耗低的纳米传感器。

(3) 宇航

宇航包括航空航天，一直是引人注目的高科技领域，在第三次产业革命中得到了快速的发展。20世纪50~60年代运载火箭和人造卫星制造技术、70年代宇宙飞船的制造控制技术已把人类对太空的认识扩展到其他星球。当前，宇航领域面临的挑战是如何减轻材料的质量、降低燃料的消耗、提高火箭的运载能力，使卫星和飞船能伸向更远的太空，揭示宇宙的秘密。现在研究的水平仅能达到火星，之所以不能把卫星和飞船送到更远的其他星球上，主要的制约因素是由于材质不够轻、强度不够高，导致携带燃料的数量不能太多，如果采用轻质高强的纳米材料可以大大减轻卫星和飞船的质量，仪器仪表的质量也会减少，这就给携带

更多燃料带来机会，同时纳米技术还可以使燃料燃烧的效率和推进力大大提高。如高冲量比和高含能材料纳米碳纤维，纳米镍、丝和颗粒以及纳米级铝粉，都可能在燃料助推上发挥作用。因此，纳米技术为宇航工业的发展提供了重要的机遇。纳米技术的进一步应用，也为宇航领域技术创新和产品创新提供了广阔的空间。如：①人造卫星和飞船中适合在太空中进行使用的新型计算机，用纳米技术改进计算机，使其具有功耗低、防辐射的功能；②用纳米技术可以制造在微重力条件下进行工作的各种仪器仪表；③用于人造卫星及各种航天器的新型电子控制系统；④纳米技术改性的高效燃料；⑤纳米技术改性的适合在太空中使用的纳米润滑剂；⑥抗辐射、耐摩擦、耐烧蚀涂料。

(4) 环境和能源

走进 21 世纪，一个挑战性的问题是如何节省资源和能源，做到与环境友好，在这方面纳米技术将发挥重要作用。纳米技术对空气中 20nm 的污染物、水中 200nm 的污染物的清除能力，在某种意义上来说是其他技术不可代替的。采用纳米的光催化技术可以降解空气和水中的有机污染物，利用纳米絮凝技术可以净化水；利用纳米自清洁技术可以制造防污染的涂料；利用纳米技术可以设计和制造新型净化剂、催化剂和助燃剂，提高传统能源的燃烧效率，减少污染。纳米技术也给新型能源的开发带来新的机会，它可以使不能燃烧的气体变成可燃烧的气体，利用纳米技术可以制造能量转化元器件，提高太阳能→电能、化学能→电能、热能→电能的效率。环境能源领域应用纳米技术的机会：①化学工业用于环保领域的纳米结构催化剂，其中以多孔氧化铝、氧化钛和氧化硅为载体的纳米组合高效催化剂的设计与合成，具专家估计纳米结构组合催化剂将有 300 多亿美元/年市场的机会；②MCM-41 纳米介孔材料是 20 世纪 90 年代初美孚石油公司研制成功，这种结构的机体材料是二氧化硅或铝酸盐，孔径尺寸约为几纳米到几十纳米，呈六角形，具有通道结构，以这种结构为载体，组装贵金属、过渡族金属和稀土氧化物，可大大提高催化效率，这种催化剂对空气中的污染物有很强的降解作用；③利用粉体材料聚合物的复合，或者采用纳米插层技术合成纳米复合高聚物材料，强度和韧性都能大幅度提高，这种材料可以代替汽车中的金属材料，减轻汽车的质量，降低耗油量。美国纳米促进计划中提到“这些纳米合成物的广泛使用每年可为交通工具减少 15 亿公升汽油消耗，并每年减少 50 亿千克二氧化碳的排放量”；④利用黏土中的纳米粒子代替炭黑是一项有广阔市场前景的新技术，由它可以生产环保型耐磨橡胶。未来潜在的突破还包括使用纳米机器人及管理环境和核废物的智能系统，在核燃料处理中使用纳米过滤器分离同位素，使用纳米流体增加核反应堆的冷却效率，用纳米粉末实现净化，对核安全进行纳米尺度上的计算机模拟等。

(5) 生物与农业

纳米技术为生物技术和农业未来的发展提供了新的机遇，进入 21 世纪，科学家们向人类提交了最出色的答卷是人类基因排序，这标志着人类揭示生命奥秘又前进了一大步。人类基因组排序，不但在科学上有重要的意义，同时也为人们认识疾病的起因，特别是遗传病的产生提供了新的科学和技术，这在认知科学上也是个飞跃。基因（DNA）尺度为 2.5nm，把基因排序形成纳米微阵列，这本身就是纳米结构的构筑技术，基因信号的识别、放大、接收和分析也需要各种纳米技术相互配合，纳米技术是纳米生物学和基因科学不可缺少的关键技术。在生物体内细胞中有许多结构单元实际上是纳米尺度，红细胞内包含的红血球约为 200nm，许多蛋白、核酸、各种酶、脂肪单元和碳水化合物等尺度都在纳米范围，正是纳米尺度的蛋白质的折叠和弯折构成了形态各异、多种多样的物质，这就为生物合成和生物加工