

国家自然科学基金资助项目 (S1221003)

纳米科技应用发展 与纳米技术安全研究

李士田 修等 编著

3



科学出版社

国家自然科学基金资助项目 (S1221003)

纳米科技应用发展与纳米技术 安全研究

李 士 田 修 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

纳米技术与信息技术、生物技术共同构成了当今世界高新技术的三大支柱，并在新能源、新材料以及人类健康等领域得到应用。但是，纳米科技的发展也是一把“双刃剑”，其安全性和不确定性给人们带来潜在风险，涉及的伦理、社会和法律问题也得到世界各国的重视。本书通过理论与实证研究，系统介绍纳米科技在传统产业、生物医药、新能源等领域的应用，并提出了纳米科技发展的潜在风险，介绍了欧盟、美国等国家及地区的纳米安全战略；在此基础上提出了我国纳米科技发展与安全研究的方向，形成了纳米技术行为规范框架建议，并提出了纳米科技工作者的社会责任。

本书适合从事纳米科学研究工作的专家学者、科技管理人员及学生阅读，也适合对纳米科技感兴趣的大众读者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

纳米科技应用发展与纳米技术安全研究/李士等编著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048908-1

I. ①纳… II. ①李… III. ①纳米技术—研究 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 136521 号

责任编辑: 杨 震 刘 冉 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京图阅盛世

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 300 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《纳米科技应用发展与纳米技术安全研究》 课题组

课题组组长：李 士

课题组副组长：田 修

课题组成员：吴树仙 董宏伟 李增辉

葛广路 任红轩 张丽丽

前言

中国是国际上率先开展纳米科技研究的国家之一，经过 20 余年的努力，纳米科技创新成果丰硕。纳米技术与信息技术、生物技术共同构成了当今世界高新技术的三大支柱，已被公认为是最重要、发展最快的前沿领域之一。纳米科技将对经济、社会发展及国防安全产生重大影响。纳米材料和纳米技术的研究已成为当今科学的前沿热点，并不断取得重大进展或突破，全球 50 余个国家纷纷制定国际发展战略和计划，投入巨资抢占战略制高点。纳米技术已经在传统产业转型升级及产品高端化、清洁能源开发、人类健康、新材料领域大量产业化应用，创造了巨大经济效益和社会效益。纳米材料，纳米电子学、光电子学和磁学，纳米医学和生物学等领域科研成果出现井喷式发展。

纳米科技作为一门新兴学科，其发展是一把“双刃剑”，纳米科技研发和应用存在的安全性和不确定性给人们带来潜在风险。纳米科技涉及的伦理、社会和法律问题也得到世界各国的重视。联合国教科文组织发布了《纳米技术与伦理——政策及行动》的报告，欧盟委员会和英国皇家学会相继发布了《关于纳米材料的法规问题》、《负责任的纳米科学与技术研究行为准则》和《负责任的纳米行为准则倡议》，对纳米科技相关的研发、应用活动和社会治理进行规范、监管和指导。

为了掌握纳米科技在产业中的应用情况，并建立符合我国国情和纳米科技特点的纳米技术安全、纳米科技工作者职业道德规范，在国家自然科学基金委员会的资助下，本课题组系统梳理纳米科技在传统产业、生物医药、新能源等领域的应用情况，并提出纳米科技应用发展存在的潜在风险及表现，通过翻译整理欧盟及其成员国、美国、俄罗斯等国家和地区的纳米安全战略、应用行为规范与行为准则经验总结，在实证调查研究基础上，提出了我国纳米科技应用发展与纳米技术安全研究方向，形成纳米技术行为规范和行为准则建议框架，并提出纳米科技工作者承担社会责任激励体系。

本课题研究的目的，是在积极推动纳米科技发展的同时，引导纳米科技工作者关注和重视纳米科技安全问题、伦理问题和职业操守问题，一个国家只有对

纳米技术的安全问题、职业规范问题、伦理问题高度重视、深入研究，完善纳米技术风险的“善治”体系建设，才能真正成为世界纳米技术强国。对纳米技术的安全、职业规范及伦理治理研究，并不是拒绝和反对纳米技术的发展，相反，是期望达成一个具有普遍共识的治理的框架和职业行为准则及道德规范，更好地推动纳米科技更健康发展，更好地保护纳米科技工作者的智慧成果，更广泛地造福人类社会。

本课题从立项开始就得到国家自然科学基金委员会何鸣鸿副主任、方玉东处长等的关心、支持和指导，本课题组在此一并表示感谢。

《纳米科技应用发展与纳米技术安全研究》课题组

2015年10月1日于北京

目 录

前言

第 1 章 纳米科技应用发展——基本发展概论	1
1.1 纳米科技定义及范围	1
1.2 纳米科技发展历程	1
1.3 纳米科技产业趋势	3
1.4 主要国家和地区纳米投入领域	5
1.5 纳米科技专利及技术产出	19
第 2 章 纳米科技应用发展——典型产业应用	28
2.1 皮革产业中的应用	28
2.2 家具地板产业中的应用	29
2.3 塑料加工产业中的应用	31
2.4 造纸产业中的应用	32
2.5 家纺产业中的应用	34
2.6 信息产业中的应用	36
2.7 纺织面料产业中的应用	37
2.8 玻璃制造产业中的应用	38
2.9 家电产业中的应用	40
2.10 生物医药产业中的应用	42
2.11 建材产业中的应用	44
2.12 汽车产业中的应用	45
2.13 塑料产业中的应用	47
2.14 新能源产业中的应用	48
第 3 章 纳米科技应用发展——潜在风险剖析	50
3.1 纳米物质理化特性带来的潜在风险	50
3.2 纳米物质暴露对生物的潜在风险	52
3.3 纳米物质对人类健康的潜在风险	53

3.4	纳米物质对环境生态的潜在风险	54
3.5	风险评估机制不健全带来的潜在风险	55
3.6	纳米物质信息数据库不健全带来的潜在风险	57
第4章	纳米技术安全管理——美国纳米技术安全管理战略	59
4.1	美国纳米技术安全管理战略总体部署	59
4.2	安全战略落实载体——NNI 纳米技术研究	60
4.3	NNI 纳米材料测量基础设施研究	70
4.4	NNI 纳米物质暴露影响研究	79
4.5	NNI 纳米物质与人类健康研究	88
4.6	NNI 纳米物质对环境安全研究	100
4.7	NNI 风险评估与风险管控体系研究	111
4.8	NNI 纳米信息库、模型及共享研究	123
4.9	NNI 对外发展与合作研究	128
	附录	138
第5章	纳米技术安全管理——欧盟及其他组织安全管理战略	152
5.1	欧盟纳米安全战略——研究路线图	152
5.2	欧盟对纳米技术产品的监管原则及政策	155
5.3	其他国家或组织开展纳米伦理学研究	158
第6章	纳米技术安全管理——监管政策与行为准则	160
6.1	欧盟纳米科技应用监管制度	160
6.2	欧盟成员国对纳米监管执行情况	164
6.3	欧盟纳米科技应用行为准则	167
6.4	英国“负责任的纳米准则倡议”	172
6.5	美国纳米科技监管政策	175
第7章	纳米技术安全管理——我国纳米技术发展与安全研究	178
7.1	产业态势——我国纳米科技应用发展及产业化需求	178
7.2	研究目标——开展的研究计划及期望达到的目标	179
7.3	研究背景——建立纳米科技规范和行为准则势在必行	194
7.4	研究工具——调查问卷和访谈提纲内容设计	196
7.5	研究计划——课题研究具体步骤及阶段性任务	206

7.6 调研数据——调查问卷回收及调研数据分析结论	208
7.7 研究成果——纳米技术行为规范和行为准则框架	221
第 8 章 纳米科技发展与安全管理——纳米科技工作者的社会责任	226
8.1 纳米科技工作者的定义及内涵	226
8.2 科技工作者应承担的主要社会责任演变	228
8.3 纳米科技工作者社会责任的内容	231
8.4 纳米科技工作者社会责任的实现激励措施	235
参考文献	240

第 1 章 纳米科技应用发展——基本发展概论

1.1 纳米科技定义及范围

1.1.1 纳米科技定义

纳米科技是指在纳米尺度（1~100 nm，即 10^{-9} ~ 10^{-7} m）上研究物质（包括原子、分子的操纵）的特性和相互作用以及利用这些特性的多学科交叉的科学和技术。物质小到 1~100 nm 时，呈现出许多既不同于宏观物体，也不同于单个孤立原子的奇异现象。

1.1.2 纳米科学范围

纳米科技是在 20 世纪 80 年代末 90 年代初才逐步发展起来的前沿、交叉性新兴学科领域，它的迅猛发展将在 21 世纪促使几乎所有工业领域产生一场革命性的变化。

纳米科学是一门覆盖范围很广的边缘学科，主要包括纳米物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米生物学、纳米医学、纳米电子学、纳米加工学、纳米力学等。纳米科技的最终目标是直接利用原子、分子及物质在纳米尺度上表现出来的新颖的物理、化学和生物学特性制造出具有特定功能的产品。

1.2 纳米科技发展历程

1.2.1 纳米科学兴起

1959 年，著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼（Richard P. Feynman）预言，人类可以用小的机器做更小的机器，最后将变成根据人类意愿，逐个地排列原子，制造产品，这是关于纳米技术最早的梦想。

20 世纪 70 年代，科学家从不同角度提出有关纳米科技的构想。1974 年，日本东京科技大学谷口纪男（Taniguchi）最早使用纳米技术一词描述精密加工。

1982年,科学家发明研究纳米的重要工具——扫描隧道显微镜,为我们揭示了一个可见的原子、分子世界,对纳米科技发展产生了积极促进作用。

1990年7月,第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩(Baltimore)举办,标志着纳米科学技术的正式诞生。

1991年,碳纳米管被人类发现,它的质量是相同体积钢的 $1/6$,强度却是钢的10倍,成为纳米技术研究的热点。诺贝尔化学奖得主斯莫利(Smalley)教授认为,碳纳米管将是未来最佳纤维的首选材料,也将被广泛用于超微导线、超微开关以及纳米级电子线路等。

1993年,继1989年美国斯坦福大学搬走原子团“写”下斯坦福大学英文名字、1990年美国国际商用机器公司在镍表面用36个氩原子排出“IBM”之后,中国科学院北京真空物理开放实验室自如地操纵原子成功写出“中国”二字,标志着中国开始在国际纳米科技领域占有一席之地。

1997年,美国科学家首次成功地用单电子移动单电子,利用这种技术可望研制成功速度和存储量比现在提高成千上万倍的量子计算机。

1999年,巴西和美国科学家在进行碳纳米管实验时发明了世界上最小的“秤”,它能够称量十亿分之一克的物体,即相当于一个病毒的质量;此后不久,德国科学家研制出能称量单个原子质量的秤,打破了美国和巴西科学家联合创造的纪录。

1.2.2 纳米新材料

作为纳米科技物质载体的纳米材料,其必须同时满足两个基本条件:①在三维空间中至少有一维处于纳米尺度($1\sim 100\text{ nm}$)或由它们作为“基本单位”(building blocks)构建的材料;②与块体材料(bulk materials)相比,在性能上有突变或者大幅提高的材料。

纳米材料在纳米科技的发展和实际应用中占据着极为重要的地位,其通常表现出3种基本特性:表面效应、体积效应和量子效应。

表面效应是指纳米粒子的表面原子数与总原子数之比随粒径的变小而急剧增大所引起的性质上的变化,当颗粒的尺寸为 10 nm 时,表面原子数占物质总原子数的约40%,而当尺寸减小至 1 nm 时,原子几乎全部集中到纳米粒子的表面,表面原子数占据总原子数的比例增至90%左右。此时,由于表面原子配位数不足和高的表面能,这些原子易与其他原子相结合而稳定下来,表现出很高的化学活性。

体积效应是指由于纳米粒子体积小,所包含的原子数很少,相应的质量极小,往往表现出与由无限个原子构成的块状物质的性质不同的现象。

量子效应指当纳米粒子的尺寸减小至某一值时,金属粒子费米面附近电子能级由准连续变为离散能级,使得能隙变宽。由于处于分立的量子化能级中电子的波动性使纳米粒子具有一系列特殊性质,其声、光、电、磁、热力学等特性出现异常。如随着纳米粒子的直径减小,能级间隔增大,电子移动困难,电阻率增大,金属导体将变为绝缘体。

纳米材料的本质在于:当材料进入纳米尺度时,材料的物性之间由几个与尺度效应、边界效应等直接相关的特征物理尺寸(如电子的德布罗意波长、玻尔激子半径、隧穿势垒厚度、铁磁性临界尺寸等)所决定。只要结构几何尺寸接近这些特征物理尺寸(绝大部分在纳米科学定义的尺寸范围内),材料的电子结构、运输、磁学、光学、热力学和力学性能均要发生明显的变化。在这些特征尺寸内,物质的局域场强度与外场强度可比拟,局域场、外场、原子分子构型形变的耦合变得突出,原子间相互位置或分子构型的变化必然引起局部电子云密度变化和纳米尺寸物质的物理、生化性能变化。

1.2.3 纳米加工

纳米加工指在纳米尺度上进行纳米结构或纳米器件的设计与制造的技术。纳米加工技术水平是衡量纳米科技发展水平的最重要标志之一,是微加工在空间和技术上的延伸,主要面向微纳电子、生物芯片等领域。德国电子技术、电气与信息技术协会(VDE)在2009年的发展研究报告中指出,到2020年,中国的微电子产业将占据世界产业的10%~20%,并将成为世界微电子产业中心。纳米加工技术主要包括两种方式:一种是自上而下,另一种是自下而上。前者需要专门的设备,效率高;后者以自组装形式实现,无需专门的设备和装置,速度慢。在实际加工时,则可能需要采用两者相结合的方式。

1.3 纳米科技产业趋势

1.3.1 纳米技术产业应用

纳米技术是近二三十年发展起来的新技术,其交叉性强、应用面广,是继信息技术之后又一具有重大战略意义的共性技术。目前,全球纳米技术发展迅猛,呈现出突破性增长的良好势头,正处于从实验室研究迈向大规模产业化关键时期,对培育战略性新兴产业和提升传统产业有重要影响。纳米技术目前已广泛应用于信息、材料、能源、环境等各个产业领域的上游、高端环节。这些应用纳米技术

的产业环节统称为纳米技术产业。

在短短二十几年里, 纳米科技已经对世界产生深远影响。大量原创性成果不断涌现, 有近十项重大突破性技术荣获诺贝尔奖, 使材料、能源、微电子、生物技术等众多产业领域发生深刻的变革, 产业规模迅速壮大。

1.3.2 纳米技术投入与从业人员

2000~2008 年, 全球纳米技术领域的科学发现、发明, 纳米技术从业人员、研发项目和市场规模以 25% 以上的年均增长率增长:

2008 年, 从事纳米技术的研究人员和工人数量从 2000 年的 6 万人增长到约 40 万人;

全球纳米技术产品市场规模从 2000 年的 300 亿美元增长到 2008 年的 2000 亿美元;

全球公共和私人的纳米技术研发投入从 2000 年的 12 亿美元增长到 2008 年的 150 亿美元, 年均增长率超过 30%;

全球纳米技术领域的风险投资从 2000 年的 2.1 亿美元增长到 2008 年的 14 亿美元。

由于新产品的不断成功进入, 纳米技术市场规模和有关工作岗位每三年将翻一番。2015 年, 纳米技术产品的市场估值达到 2 万亿美元, 创造 200 万个相关工作岗位; 纳米技术将达到 3 万亿美元的市场规模, 产生 600 万个相关工作岗位。中国科学院院长、国家纳米科技指导协调委员会首席科学家白春礼院士认为, 未来纳米科技会像今天计算机技术一样普及^①。

从全球范围看, 美国、日本、欧盟、俄罗斯在内的 50 多个国家和地区都有各自明确的纳米科技发展战略。各国对纳米技术产业的资助力度很大, 其中政府拨款和企业的研发支出占资助资金的大部分, 而来自风险投资的资金比例较低。美国政府对纳米技术的支出最高, 其次是日本和德国。另外, 企业投资在美国也是最高的。

从市场份额的角度看, 虽然到 2015 年, 美国和欧洲依旧为纳米技术产业的主要市场, 但市场份额将下降。相比之下, 由于在这一科学领域的稳定投资, 预计亚太地区在纳米技术的市场份额将大幅增长。与其他地区相比, 亚太地区各国政府对纳米技术的热情将更有利于该技术的发展。中国、俄罗斯和印度等新兴经济体在纳米技术领域最新的一系列研发举措, 将有助于未来纳米技术产品的增长^②。

① 世界及中国纳米技术产业发展情况 <http://www.bioon.com/trends/news/509713.shtml> (2012-08-20)

② GIA: 全球纳米技术市场 2015 年将达 304 亿美元 http://tech.gmw.cn/2012-04/12/content_3949951.htm (2012-08-04)

1.4 主要国家和地区纳米投入领域

1.4.1 美国纳米科技产业化投入总体情况

在所有实施纳米技术计划的国家中，美国是最早也是投入最多的国家：

- 从人员数量上看，2008年，美国纳米技术领域研究人员和工人数量从2000年的2.5万人增加到15万人，占世界的37.5%；
- 从经费投入上看，公共和私营部门对纳米技术的研发总投入从2000年的3.7亿美元增长到2008年的37亿美元，占世界的24.7%；
- 从风险投资上看，风险投资从2000年的1.7亿美元增长到2008年的11.7亿美元，占世界的83.6%；
- 从产品市场上看，纳米技术产品市场从2000年的130亿美元增长到2008年的800亿美元，占全球纳米技术产品市场的40%。

总体而言，十余年来，美国在纳米技术领域的投资不断增加。特别值得注意的是，美国于2000年提出发展纳米科技的战略目标和具体战略部署，并开始实施“国家纳米技术计划”(NNI)，这标志着美国进入全面推进纳米科技发展的新阶段。NNI是自阿波罗登月计划以来，最大的民用科学和技术投资计划。此外，美国的企业和州政府对纳米技术的投入更大。而NNI的参与机构也从最初的8个发展到25个，是美国参与机构最多的国家科技计划之一。

截至2010年，联邦政府对纳米技术的投入累计超过120亿美元。其中NNI 2006年的实际投入约13.6亿美元，2010年的实际投入超过19亿美元，2013年的财政预算也接近18亿美元，这几年来在纳米技术领域的研发投入都保持在每年近20亿美元的规模。

美国 NNI 计划对纳米科技四大领域的投入情况

我们针对2006年以来NNI各项目组成领域不同部门的经费投资分布，将NNI分类的各领域归类到纳米科技四大领域（即将纳米材料归类为纳米材料，将环境、健康与安全归类为纳米生物与医药，将纳米设备和系统、纳米制造、主要研究设备和仪器归类为纳米器件与制造，将仪器、方法和标准归类为纳米表征），分析这些年NNI在四大领域的投资分布及其占全部纳米科技投资的比重，发现：2006年以来，NNI在四大领域的实际投资经费总体呈逐年上升趋势，从2006年的8亿多美元上升到2010年的13.6亿美元，年均增长率超过10%；2006年至2010年四大领域的投资经费占全部纳米科技投资经费的百分比也从60.8%上升到70.9%，上升了10个百分点，可谓深受重视。2011年四大领域的实际投资经费小

有下滑,但也有约 12.4 亿美元(占全部纳米科技投资经费的 67.2%),NNI 建议 2013 年四大领域的投资将超过 12 亿美元(占全部纳米科技投资经费的 69.9%)。

比较各年度 NNI 对纳米科技四大领域的经费投资分配发现,四大领域中,NNI 对纳米器件与制造领域的投资最多,从 2006 年的 5.058 亿美元上升到 2010 年的 8.171 亿美元,年均增幅超过 10%;其次是纳米材料领域,从 2006 年的 2.651 亿美元上升到 2010 年的 3.589 亿美元,年均增幅约 7%;2006 年在纳米生物与医药领域没有经费投入,但从 2007 年起投入近 5000 万美元,并建议 2013 年超过 1 亿美元的投入,总体呈逐年上涨趋势;纳米表征领域的经费投入变化趋势相对较缓,都在数千万美元之间徘徊。

表 1.1、表 1.2 和图 1.1、图 1.2 显示了 2006~2013 年 NNI 在纳米科技全部领域以及纳米材料、纳米生物与医药、纳米器件与制造、纳米表征这四大领域的实际投资或估计及建议投资情况。

表 1.1 2006~2013 年 NNI 在纳米科技全部领域及其中四大重点领域的投资情况 (百万美元)

四大领域	纳米材料	纳米生物与医药	纳米器件与制造				纳米表征	四大领域合计	其他		总计
各项目原始组成领域	纳米材料	环境、健康与安全	纳米设备和系统	纳米制造	主要研究设施和仪器	小计	仪器、方法、标准		基础现象与过程	教育和社会层面	
2006 年实际	265.1	0.0	319.6	33.8	152.4	505.8	51.0	821.9	455.9	73.5	1351.3
2007 年实际	258.3	48.3	344.7	48.1	152.4	545.2	52.5	904.3	480.6	39.2	1424.1
2008 年实际	285.1	67.9	372.7	47.1	196.4	616.2	69.0	1038.2	478.5	37.7	1554.4
2009 年实际	331.9	74.5	435.2	75.6	177.6	688.5	90.7	1185.6	479.2	36.8	1701.6
2010 年实际	358.9	90.2	542.1	84.8	190.2	817.1	89.4	1355.6	490.5	66.9	1913.0
2011 年实际	348.2	88.0	454.7	92.0	185.8	732.5	73.2	1241.9	567.9	37.5	1847.3
2012 年估计	310.7	102.7	413.4	73.5	177.0	663.9	75.3	1152.6	510.1	34.2	1696.9
2013 年建议	368.4	105.4	412.9	88.9	189.9	691.7	69.2	1234.7	498.2	34.2	1767.1

表 1.2 2006~2013 年 NNI 在纳米科技的投资情况简表 (百万美元)

投资经费	2006 年实际	2007 年实际	2008 年实际	2009 年实际	2010 年实际	2011 年实际	2012 年估计	2013 年建议
四大领域投资	821.9	904.3	1038.2	1185.6	1355.6	1241.9	1152.6	1234.7
全部投资	1351.3	1424.1	1554.4	1701.6	1913.0	1847.3	1696.9	1767.1
比例	60.8%	63.5%	66.8%	69.7%	70.9%	67.2%	67.9%	69.9%

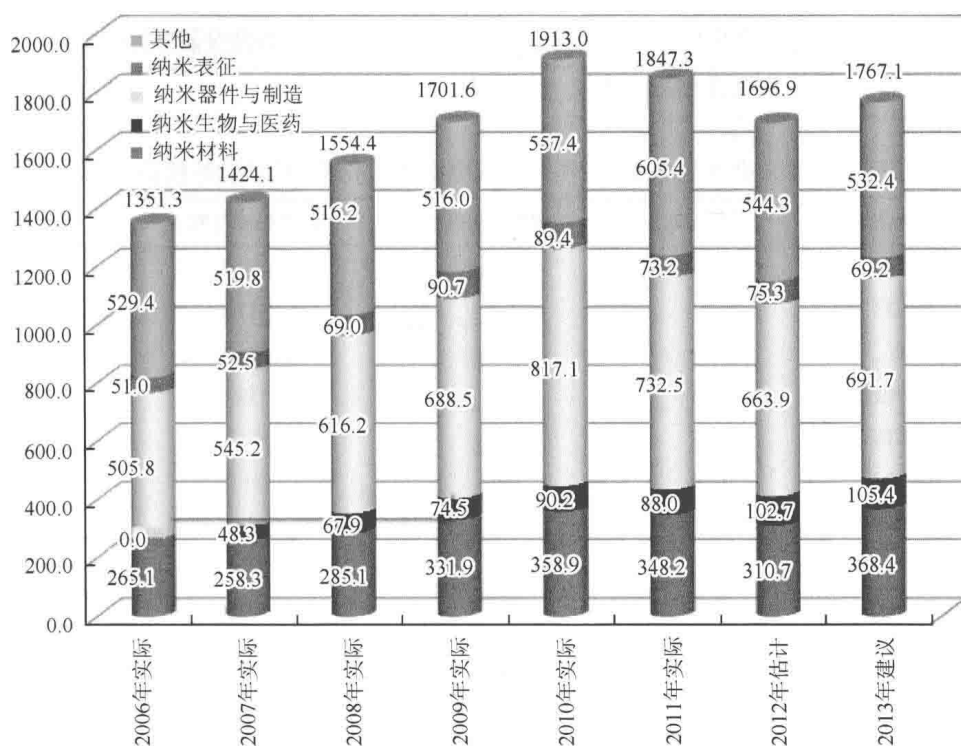


图 1.1 2006~2013 年 NNI 在纳米科技全部领域及其中四大重点领域的投资情况（百万美元）

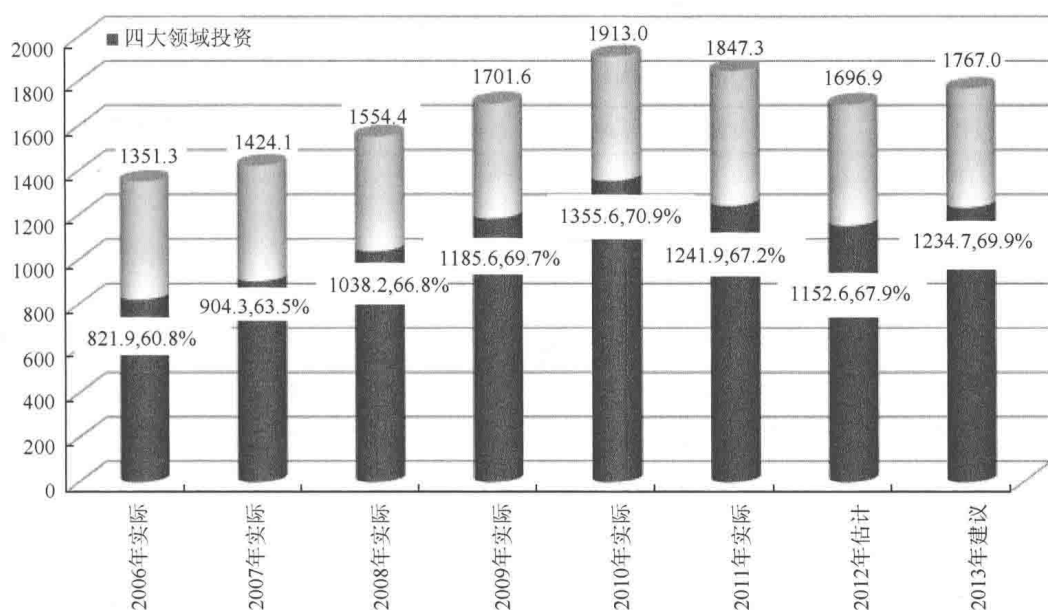


图 1.2 2006~2013 年 NNI 在纳米科技的四大领域投资情况简图（百万美元）

另外，为了更详细地了解 2006~2013 年 NNI 不同部门对纳米科技四大领域

的投资情况，我们对 2006~2013 年这 8 年来，各财政年度的投资情况也分别进行了分类统计。详见表 1.3~表 1.10。

表 1.3 按四大领域分类的 2006 年 NNI 各项目组成领域不同部门的实际投资（百万美元）

投资机构	纳米材料	纳米生物与医药	纳米器件与制造	纳米表征
NSF	52.5	0.0	101.2	6.6
DOD	109.7	0.0	117.8	10.8
DOE	57.4	0.0	112.1	11.0
HHS/NIH	16.8	0.0	119.0	6.9
DOC/NIST	8.4	0.0	30.3	14.9
NASA	18.0	0.0	21.0	0.0
EPA	0.3	0.0	0.3	0.0
USDA/CSREES	1.0	0.0	2.2	0.0
HHS/NIOSH	0.0	0.0	0.0	0.0
USDA/FS	1.0	0.0	0.4	0.5
DHS	0.0	0.0	1.5	0.0
DOJ	0.0	0.0	0.0	0.3
DOT/FHWA	0.0	0.0	0.0	0.0
总计	265.1	0.0	505.8	51.0

表 1.4 按四大领域分类的 2007 年 NNI 各项目组成领域不同部门的实际投资（百万美元）

投资机构	纳米材料	纳米生物与医药	纳米器件与制造	纳米表征
DOD	86.0	0.0	149.8	4.3
NSF	58.4	26.9	109.0	14.9
DOE	68.5	0.0	103.1	11.3
HHS/NIH	25.4	7.7	126.5	5.9
DOC/NIST	7.5	0.9	40.8	14.2
NASA	9.9	0.0	9.1	0.0
EPA	0.2	7.1	0.1	0.0
HHS/NIOSH	0.0	5.6	1.7	0.0
USDA/FS	1.3	0.0	0.9	0.2
USDA/CSREES	1.0	0.1	2.2	0.1
DOJ	0.1	0.0	0.0	1.6
DHS	0.0	0.0	2.0	0.0
DOT/FHWA	0.0	0.0	0.0	0.0
总计	258.3	48.3	545.2	52.5