



纳米科学与技术

纳米科技创新方法研究

王 琛 杨延莲 等 编著



科学出版社



纳米科学与技术

纳米科技创新方法研究

王 琛 杨延莲 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书归纳总结纳米科学研究中的创新科学方法及思想,分析纳米科学研究方法的发展趋势,阐述先进的纳米科学测量仪器和技术手段,论述纳米科学研究方法与其他学科领域的交叉、融合与互相促进。重点论述纳米材料合成方法学、自组装方法、扫描探针显微技术、单分子科学、分子影像技术、聚焦电子束/聚焦离子束技术、纳米刻蚀技术、纳米标准及理论计算方法等,并探讨了其发展的根源、创新思维及未来的发展等。

本书可作为高等院校物理、化学、生物、材料、医学等专业研究生的参考教材,也可供从事纳米科学与技术相关研究的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米科技创新方法研究/王琛等编著. —北京:科学出版社,2012
(纳米科学与技术/白春礼主编)
ISBN 978-7-03-033320-9

I. ①纳… II. ①王…②杨… III. ①纳米技术-研究 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 004999 号

责任编辑:杨 震 张淑晓 刘 冉 / 责任校对:张小霞
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年2月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012年2月第一次印刷 印张: 24

字数: 480 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明 封松林 傅小锋 顾 宁 汲培文 李述汤

李亚栋 梁 伟 梁文平 刘 明 卢秉恒 强伯勤

任咏华 万立骏 王 琛 王中林 薛其坤 薛增泉

姚建年 张先恩 张幼怡 赵宇亮 郑厚植 郑兰荪

周兆英 朱 星

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

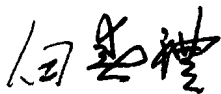
兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养做出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



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

2011年3月于北京

前 言

过去十几年中,随着科研水平的不断提高,基础学科领域也取得了较大的进展和成就。在这些成就的取得过程中,科学方法、创新思维的作用功不可没。对创新方法系统理论进行总结和提炼,发挥创造性思维,将科学方法更好地应用到实践中去,将会引导我们取得更大的发展和进步。因此,我们希望通过总结这些成就,提炼创新方法所展示的创新思维,启迪读者,对我国科研事业的原始创新起到启发和借鉴的作用,对未来的学科发展起到启发和导向性作用。在科技部的支持下,我们对基础科学相关领域科学方法进行了系统研究,本书是在总结其中纳米科学研究成果的基础上编写而成的。

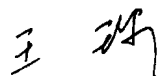
纳米科学是一个物理学、化学、医学、材料科学、生物学等多学科交叉的科学,纳米科学的发展,是世界高科技领域的一个重要的战略制高点。它对信息科学、生命科学、新材料、新能源,甚至环保领域都可能具有重要的影响。纳米尺度材料的制备表征技术、纳米器件的设计与微弱信号检测技术、单分子科学技术,表面物理、表面化学研究方法和表征技术等,极大地推动了很多学科领域的创新研究方法的建立和发展,也对学科的发展提出了新的问题和挑战。创新的科学研究方法、纳米表征与检测的新原理、新技术及其相应的纳米测量设备是当前纳米科学研究中亟待发展的关键内容。

本书共分为五篇十二章,将归纳总结纳米科学研究中的创新科学方法及思想,探讨纳米科学研究对其他自然科学领域发展的影响,分析纳米科学研究方法的发展趋势,阐述先进的纳米科学测量仪器和技术手段,论述纳米科学研究方法与其他学科领域的交叉、融合与互相促进。重点论述纳米材料合成方法学、自组装方法、扫描探针显微技术、单分子科学、分子影像技术、聚焦电子束/聚焦离子束技术、纳米刻蚀技术、纳米标准及理论计算方法等重要和前沿的创新科学方法,并探讨了其发展的根源、创新思维及未来的发展等。内容简明扼要,覆盖面广,有助于从事相关工作的科研人员,尤其是刚刚涉猎该领域的研究生,迅速把握纳米科技领域的发展历程、前沿热点以及发展趋势。

本书第1章由北京大学的薛增泉编写;第2章由国家纳米科学中心的夏云生、唐智勇编写;第3章由国家纳米科学中心的孙连峰编写;第4章由国家纳米科学中心的魏志祥编写;第5章由国家纳米科学中心的马晓晶、杨延莲、王琛编写;第6章由国家纳米科学中心的仇君、袁秉凯、刘新风、王小伟、曾丽金、裘晓辉编写;第7章由东南大学的顾宁、杨芳、陈平、罗守华、陈功编写;第8章由国家纳米科学中心的

葛广路编写;第9章由中国科学院物理研究所的顾长志、杨海方、李无瑕编写;第10章由国家纳米科学中心的吴晓春编写;第11章由中国科学院理化技术研究所的段宣明编写;第12章由北京应用物理与计算数学研究所的张伟编写。在本书即将出版之际,对参加本书编写和编辑的所有老师和同学表示由衷的谢意!在书稿的编辑和出版过程中,科学出版社的杨震编辑和张淑晓编辑为本书的出版工作给予了极大的支持和帮助,刘冉编辑在本书的编校方面付出了大量的心血,在此一并致以衷心的感谢!

由于时间仓促,书中难免存在缺憾甚至谬误,恳望广大读者指正。



2011年11月于国家纳米科学中心

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

前言

第一篇 绪 论

第 1 章 纳米科技研究方法	3
1.1 科学方法研究	3
1.1.1 关于科学方法	3
1.1.2 科学方法的分类	4
1.1.3 科学方法的主要内容	6
1.1.4 科学方法的发展历程	14
1.1.5 研究科学方法的意义	15
1.2 科技发展的新时代	16
1.2.1 科学发展的变革时期	17
1.2.2 科技发展的机遇	19
1.3 科技面临的新问题	23
1.3.1 原子团特性	24
1.3.2 量子效应	26
1.3.3 尺寸效应	29
1.3.4 维数效应	33
1.3.5 相位相干	34
1.3.6 单电子行为	37
1.3.7 量子比特	40
1.3.8 多场调控	41
1.4 多学科交叉的研究方法	41
1.4.1 纳米结构的复杂性	41
1.4.2 多尺度与界面	42
1.4.3 大学科交叉	43
1.5 纳米科技研究方法的发展趋势	44
1.5.1 NBIC 汇聚技术	45
1.5.2 分子电子学的难题	47

1.5.3 生物电子学	50
1.5.4 智能电路与人造物种	52
参考文献	55

第二篇 纳米材料制备篇

第2章 纳米材料的液相制备方法	59
2.1 烧杯中的化学	59
2.2 水相合成	62
2.2.1 半导体纳米粒子	62
2.2.2 贵金属纳米粒子	65
2.2.3 金属氧化物纳米材料	67
2.2.4 磁性纳米材料	68
2.3 有机相合成	69
2.3.1 半导体纳米材料	69
2.3.2 贵金属纳米材料	71
2.3.3 金属氧化物纳米材料	73
2.3.4 磁性纳米材料	74
2.4 界面合成	76
参考文献	79
第3章 一维纳米材料的气相合成	83
3.1 气相合成方法的分类	83
3.2 化学气相沉积方法制备碳纳米管	84
3.2.1 化学气相沉积方法在碳纳米管研究中的应用	84
3.2.2 化学气相沉积方法制备碳纳米管的实验装置及条件	84
3.2.3 化学气相沉积方法制备碳纳米管机理研究	85
3.2.4 化学气相沉积方法制备多壁碳纳米管的研究进展	86
3.2.5 化学气相沉积方法制备单壁碳纳米管的研究进展	90
3.3 化学气相沉积方法制备纳米线	94
3.3.1 化学气相沉积方法在纳米线研究中的应用	94
3.3.2 化学气相沉积方法在氧化锌纳米线研究中的应用	95
3.3.3 氧化锌纳米线的生长机理	97
3.3.4 氧化锌纳米线的性能及应用	102
3.4 物理气相沉积方法在纳米器件研究中的应用	105
参考文献	106

第4章 自组装方法和技术	110
4.1 自组装的驱动力——非共价作用	111
4.1.1 静电作用	111
4.1.2 范德华力	112
4.1.3 氢键	112
4.1.4 $\pi\pi$ 堆积作用	113
4.1.5 疏水作用	113
4.2 分子和纳米粒子的自组装	114
4.2.1 两亲性组装单元的自组装	114
4.2.2 纳米粒子的自组装	118
4.2.3 手性超分子组装	121
4.2.4 多尺度、多级次组装	126
4.3 分子和纳米粒子受限环境中的组装	127
4.3.1 气/液界面的自组装	128
4.3.2 固/液界面的自组装	130
4.3.3 图案化组装	132
4.4 结论与展望	134
参考文献.....	134

第三篇 纳米表征技术篇

第5章 扫描探针显微技术	139
5.1 扫描隧道显微镜	141
5.1.1 工作原理	141
5.1.2 结构分辨率	142
5.1.3 扫描隧道谱	148
5.2 原子力显微镜	151
5.2.1 工作原理	151
5.2.2 结构分辨率	153
5.2.3 单分子力谱	155
5.3 静电力显微镜	156
5.3.1 静电力显微镜工作原理	156
5.3.2 静电力显微镜的应用	157
5.4 磁力显微镜	161
5.4.1 磁力显微镜工作原理	161
5.4.2 磁力显微镜的应用	162

5.5	SPM 操纵与加工	163
5.5.1	原子/分子操纵	163
5.5.2	加工和刻蚀	164
	参考文献	165
第 6 章	单分子和单粒子检测技术	168
6.1	单分子研究方法	168
6.1.1	单分子的扫描隧道显微研究	168
6.1.2	基于原子力显微技术的单分子研究	175
6.1.3	平面电极隧道结技术	180
6.2	单个纳米结构的电、磁、热、光学性质测量	184
6.2.1	纳米材料的电学性质	184
6.2.2	纳米材料的磁学性质	186
6.2.3	纳米材料的热学性质	188
6.2.4	纳米材料的光学性质	190
	参考文献	194
第 7 章	分子影像技术	197
7.1	分子影像学的基本原理与方法	198
7.1.1	分子影像学的概念、任务与特点	198
7.1.2	分子影像探针	201
7.1.3	分子影像信号放大技术	205
7.1.4	分子影像设备及其相关技术	206
7.2	超声分子影像技术	208
7.2.1	超声分子成像的基本原理	208
7.2.2	超声分子影像设备	209
7.2.3	超声分子影像造影剂	209
7.3	磁共振分子影像技术	210
7.3.1	磁共振分子成像的基本原理	210
7.3.2	磁共振分子影像设备	211
7.3.3	磁共振分子影像探针	212
7.4	核医学分子影像技术	213
7.4.1	核医学分子成像的基本原理	213
7.4.2	核医学分子影像设备	213
7.4.3	核医学分子影像探针	214
7.5	光学分子影像技术	215
7.5.1	光学分子成像的基本原理	215

7.5.2 光学分子影像设备	216
7.5.3 光学分子影像探针	216
7.6 多模式分子影像技术	217
7.6.1 多模式分子影像设备	217
7.6.2 多模式分子影像探针	218
7.7 基于分子影像的诊断与治疗相结合的综合技术	219
7.7.1 分子影像探针携带药物	219
7.7.2 分子影像药物治疗评估	220
7.7.3 分子影像药物筛选	221
7.8 小结	223
参考文献	223
第8章 纳米标准与计量	227
8.1 纳米技术标准化	227
8.1.1 纳米技术领域名词术语的标准化	228
8.1.2 纳米测量与表征标准化	233
8.1.3 纳米环境、健康与安全	237
8.2 纳米标准物质与标准样品	241
8.2.1 纳米尺度基本几何量的标准物质	241
8.2.2 纳米材料与性能标准物质/样品	243
8.3 纳米计量研究	245
8.3.1 纳米几何量标准物质特性量值的计量定值	246
8.3.2 纳米计量仪器	252
8.3.3 其他纳米计量	254
参考文献	254

第四篇 纳米加工与器件篇

第9章 传统纳米加工技术	257
9.1 聚焦电子束方法	257
9.1.1 聚焦电子束的产生和操控——电子光学	257
9.1.2 电子束与物质的相互作用	259
9.1.3 聚焦电子束在纳米科技中的应用	260
9.2 聚焦离子束方法	272
9.2.1 离子与物质的相互作用	273
9.2.2 离子束聚焦的基本原理	273
9.2.3 聚焦离子束系统的基本结构	278

9.2.4 聚焦离子束系统的组成	279
9.2.5 聚焦离子束方法在纳米科学研究中的应用	282
参考文献	293
第 10 章 特色纳米加工技术	297
10.1 微接触印刷技术	297
10.1.1 微接触印刷技术简介	297
10.1.2 微接触印刷技术的各种变体	301
10.1.3 微接触印刷技术的应用	303
10.2 纳米压印技术	304
10.2.1 纳米压印技术的原理及分类	304
10.2.2 纳米压印技术的各个组成部分	306
10.2.3 纳米压印模式的发展	308
10.2.4 纳米压印技术的应用	310
10.3 浸蘸笔纳米印刷技术	310
10.3.1 DPN 技术的组成部分	311
10.3.2 DPN 技术的发展	313
10.3.3 DPN 技术的应用	315
参考文献	318
第 11 章 多光子超衍射三维纳米加工技术	321
11.1 多光子超衍射纳米加工基本原理	321
11.1.1 多光子吸收过程的物理效应	321
11.1.2 多光子超衍射纳米加工中的材料设计	324
11.2 多光子超衍射纳米加工技术	326
11.2.1 多光子超衍射纳米加工系统与方法	326
11.2.2 多光子加工分辨率	328
11.2.3 多焦点并行加工技术	330
11.3 多光子超衍射纳米加工技术的应用	331
11.3.1 微尺度光子学器件	331
11.3.2 微机械与微流控	334
11.3.3 功能材料的多光子微/纳加工	335
11.4 多光子超衍射三维纳米加工技术研究中所面临的问题及发展方向	338
11.4.1 多光子超衍射三维纳米加工物理机制与新原理发现	339
11.4.2 多光子超衍射三维纳米加工材料扩展与功能化	339
11.4.3 多光子超衍射三维纳米加工技术的应用	340

11.4.4 微/纳结构的大面积快速制备技术	340
参考文献	340

第五篇 纳米尺度的理论方法篇

第 12 章 纳米结构的理论模拟方法	347
12.1 纳米体系电子结构	348
12.2 理论建模——光学性质	350
12.2.1 金属/介电材料光学性质简介	350
12.2.2 半导体材料光学性质简介	352
12.3 理论建模——输运性质	354
12.3.1 稳态输运理论	355
12.3.2 含时输运: Tien-Gorden 方法	359
12.4 数值模拟方法	360
12.4.1 打靶法	360
12.4.2 Hartree 方法与 Hartree-Fock 方法	360
12.4.3 密度泛函理论	361
12.4.4 分子动力学	362
12.4.5 有限时域差分方法	363
12.5 小结	363
参考文献	364

第一篇 绪 论

