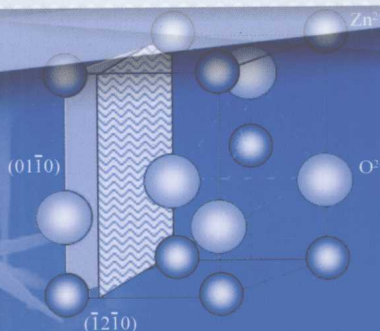




材料科学技术著作丛书

一维氧化锌纳米材料

张跃 等著



科学出版社
www.sciencep.com

材料科学技术著作丛书

一维氧化锌纳米材料

张 跃 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书对一维氧化锌(ZnO)纳米材料的制备、结构、性能及应用等方面进行了较系统的介绍。在本书的撰写过程中,作者力求尽可能全面反映本领域国内外具有代表性的研究成果以及最新的研究进展。

全书共分九章。第1章为纳米材料概述;第2章和第3章分别为一维ZnO纳米材料的理论研究和表征新技术;第4章~第6章介绍了一维ZnO纳米材料的制备方法、形貌结构及生长机理;第7章为一维掺杂ZnO纳米材料的制备与结构;第8章为一维ZnO纳米材料的性能;第9章为一维ZnO纳米材料的应用。

本书可供高等院校及科研单位从事纳米材料和纳米技术研究工作的科研人员使用,也可作为高等院校材料、物理、化学及相关专业高年级本科生、研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

一维氧化锌纳米材料/张跃等著. —北京:科学出版社, 2010.2

(材料科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-026445-9

I. ①—… II. ①张… III. ①氧化锌-纳米材料 IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第010803号

责任编辑:耿建业 于宏丽 王向珍 / 责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年2月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年2月第一次印刷 印张: 30 1/4

印数: 1—2 500 字数: 583 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

作者简介



张跃，1958年出生于湖南长沙，1993年获工学博士学位，2000年由 Anthony Mason Fellowship 资助在澳大利亚新南威尔士大学进行合作研究，2001年由 JSPS 资助在日本东北大学、东京大学、东京工业大学进行合作研究和学术访问，2002年为美国佐治亚理工学院纳米材料技术中心访问教授。

张跃教授现任北京科技大学副校长、国务院学位委员会学科评议组材料科学与工程组成员、国家自然科学基金委员会专家评审组成员、北京市新能源材料与技术重点实验室主任，并兼任中国金属学会常务理事及材料分会理事长、中国体视学会副理事长及材料分会理事长、中国微米纳米技术学会纳米科学技术分会常务理事、中国电子显微镜学会物理与材料专业委员会副主任、全国工程硕士教育指导委员会委员、全国 MPA 教育指导委员会委员、北京市学位委员会委员、中国博士后基金会理事、中国学位与研究生教育学会常务理事、北京科技大学学位委员会副主任，以及 *Journal of Nano Research*、*Frontiers of Physics in China*、*International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*、《中国体视学及图像分析》、《电子显微学报》编委等职务。

张跃教授是国家杰出青年科学基金和教育部“跨世纪优秀人才培养计划”获得者、北京市高等学校青年学科带头人，享受国务院政府特殊津贴。先后负责和承担了国家及省部级科研项目共 30 余项，其中包括“973”项目、“863”计划项目、科技部重大国际合作项目、国家杰出青年科学基金项目、国家自然科学基金项目（包括重大国际合作、重点及面上项目）、军工项目以及其他国家或省部级项目。共获省部级一等奖 5 项、二等奖 5 项，获国家首次自然科学基金资助项目优秀论文鼓励。发表国内外期刊论文 200 余篇，其中 SCI、EI 收录 160 余篇，被他人引用近千次，其中单篇他人引用 160 余次；发表国内外会议论文近 100 篇。参加撰写中文专著 6 部、英文专著 1 部。申请专利 20 余项，已授权 10 项。指导博士后 6 人，博士生 20 余人，硕士生 30 余人。

《材料科学技术著作丛书》编委会

顾 问 师昌绪 严东生 李恒德 柯 俊
颜鸣皋 肖纪美

名誉主编 师昌绪

主 编 黄伯云

编 委 (按姓氏笔画排序)

| | | | |
|-----|-----|------|------|
| 干 勇 | 才鸿年 | 王占国 | 卢 柯 |
| 白春礼 | 朱道本 | 江 东亮 | 李元元 |
| 李光宪 | 张 泽 | 陈立泉 | 欧阳世翕 |
| 范守善 | 罗宏杰 | 周 廉 | 施尔畏 |
| 徐 坚 | 高瑞平 | 屠海令 | 韩雅芳 |
| 黎懋明 | 戴国强 | 魏炳波 | |

序

纳米科学技术是一个新兴的、发展迅猛的多学科交叉融合的前沿领域，涉及诸多的研究领域与技术产业，是 21 世纪主流的科学技术之一，当前已成为世界高新技术战略竞争的热点，将对人类社会的发展和科技进步产生巨大影响，也是近十年来世界各国政府、科研机构以及企业高度关注和巨额投入的研发领域。我国政府对纳米科学技术高度重视，国务院 2006 年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》及国家“十二五”科技发展战略规划都将纳米研究作为重大研究计划，科技部、国家自然科学基金委员会等部门也给予了纳米科学技术领域研究极大的关注与多方面的经费支持。目前，我国纳米科学技术的研究发展迅速，在诸多研究方向取得了举世瞩目的成就，在国际上占有重要地位。

在我国的高等院校和科研单位，有很多研究小组从事纳米科学技术领域的研究，取得了具有国际水平、甚至国际一流水平的研究成果，发表了大量高水平的研究论文。美国科学引文数据库（Web of Science）显示，2007 年我国在纳米科学与技术领域发表的论文总数已排名世界第二。在纳米材料体系中，一维 ZnO 纳米材料由于具有独特的优异性能和广阔的应用前景，近十年来受到研究者高度关注，相关的研究成果不断涌现。北京科技大学的张跃教授以及他所领导的研究团队，从事一维 ZnO 纳米材料的研究已近十年，在一维 ZnO 纳米材料的控制合成、性能和结构调控与表征以及相关功能器件的构筑等方面进行了系统而又深入的研究，取得了较多研究成果和较大进展，受到了国内外同行的关注。为了总结他们在一维 ZnO 纳米材料领域的研究成果，同时介绍国内外同行们在一维 ZnO 纳米材料研究领域的最新和最具有代表性的研究成果与进展，张跃教授用了一年多的时间，完成了《一维氧化锌纳米材料》这部专著。该书从一维 ZnO 纳米材料的理论研究、表征技术、制备方法、形貌结构、生长机理、性能及应用等几方面，较全面和系统地介绍了国内外在本领域最新的研究成果和进展。相信本书会为从事纳米材料与技术研究的工作者及相关专业的研究生提供非常有益的参考。

在此，除祝贺《一维氧化锌纳米材料》付梓出版之外，同时也祝愿从事纳米科学技术研究的广大科学工作者取得更丰硕的成果，进一步提升我国在纳米科学技术研究领域的国际地位，为国家的科技进步和富强做出积极的贡献。

中国科学院资深院士

中国工程院资深院士

Handwritten signature of Shi Changjun in black ink.

2009年12月23日于北京

前 言

纳米科学和技术是具有前沿性、交叉性和多学科特征的新兴研究领域，在信息、材料、能源、环境、化学、微电子、微制造、生物、医学等方面显示出越来越广阔的应用前景，对社会经济发展、科学技术进步、人类生活等方面将产生巨大影响。在纳米研究领域，美国政府的 NNI 计划 (National Nanotechnology Initiative) 在 2005 年投入超过 10 亿美元 (不包括企业等非政府投入)，而日本政府在同一年投入约 12 亿美元，此后逐年增长。2007 年美国 NNI 计划投入达 14.25 亿美元，2009 年预计突破 15 亿美元。为促进我国科学技术发展，推动我国纳米科学和技术在国际上占据重要地位，国务院 2006 年 2 月 9 日发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》将纳米研究作为四个重大科学研究计划之一，列入重点支持。纳米重大研究计划也已被列入国家“十二五”科技发展战略规划中。

纳米材料是纳米科学和技术重要的研究领域，在众多纳米材料体系中，一维氧化锌 (ZnO) 纳米材料无疑是最重要的研究对象之一。由于一维纳米 ZnO 的结构特点及其优异的光、电、磁、力等性能，使其在纳米光电子器件、纳米传感器、纳米机械、纳米生物探测等领域显示出极大的应用潜力，在世界范围内受到越来越广泛的关注。根据英国物理学会 *Physics World* 2008 年发表的有关物理学研究领域关联图显示，ZnO 纳米线与碳纳米管、薄膜半导体、等离子体激元和超常材料、量子计算、暗能量等同属于当前最热门的研究领域。另据统计，2008 年在著名的物理科学期刊 *Applied Physics Letters* 上发表的有关 ZnO 的论文数量超过了 SiC 和 GaN，在著名的纳米科学期刊 *Nano Letters* 上发表的有关 ZnO 的论文数量则超过了 GaN 和碳纳米管。在整个 SCI 统计的科学期刊中，有关 ZnO 的论文数量和引用次数，一直处于快速上升阶段。

目前一维 ZnO 纳米材料研究受到国内外科研单位及研究人员的高度关注，有关一维 ZnO 纳米材料控制合成、形貌结构、生长机理、理论计算、性能调控与测量技术以及器件构筑等方面的科研成果不断涌现，并且正朝着更深入、更广阔的方向发展。在理论研究不断取得成果的同时，应用研究方面也不断取得突破性进展，实现了原型器件及实际器件的构筑，在许多领域已表现出很好的应用前景。我国也有一些高等院校和科研单位的研究小组和研究人员与国际同步进行着本领域的研究工作，取得了具有国际水平、甚至国际一流水平的研究成果。

迄今为止，国内尚没有一部能比较全面地反映一维 ZnO 纳米材料研究现状

和研究成果的专著。为了反映国内外同行在本领域最新的优秀研究成果，并能从事纳米材料与技术研究的工作者提供参考材料，作者怀着忐忑的心情，完成了本书的写作。

本书内容涵盖了作者的研究小组在一维 ZnO 纳米材料研究中取得的成果，同时也介绍了国内外研究人员在该领域的研究进展。全书内容由九章组成。各章内容及撰写人如下：第 1 章，概述（黄运华、张跃）；第 2 章，一维 ZnO 纳米材料的理论研究（顾有松）；第 3 章，一维 ZnO 纳米材料表征新技术（齐俊杰）；第 4 章，一维 ZnO 纳米材料的制备方法（张跃、黄运华）；第 5 章，一维 ZnO 纳米材料的形貌结构（张跃、黄运华、闫小琴、杨亚）；第 6 章，一维 ZnO 纳米材料的生长机理（张跃、黄运华）；第 7 章，一维掺杂 ZnO 纳米材料的制备及结构（齐俊杰、张跃）；第 8 章，一维 ZnO 纳米材料的性能（张跃、黄运华、齐俊杰、顾有松、闫小琴等）；第 9 章，一维 ZnO 纳米材料的应用（廖庆亮、张跃）；全书最后由张跃修改和审定。

作者攻读博士学位期间从事钛铝金属间化合物的断裂与环境断裂的研究，受 Mandelbrot 教授“分形”研究工作的启发，产生了将分形理论应用到钛铝金属间化合物断裂和环境断裂研究中的想法，提出了纳观度域分形维数的概念。但由于实验手段的限制，一直未能验证。幸运的是，一个偶然的时机，作者看到了 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 两位博士因发明扫描隧道显微镜而获得 1986 年诺贝尔物理学奖的资料，敏锐地感觉到验证纳观度域与分形维数的实验可能实现。作者非常感谢中科院常务副院长白春礼院士，在他们研制的国内第一台 STM 设备上进行了研究。作者与王中怀博士共同发展了用 STM 在纳观度域测量分形维数的新方法，实现了纳米度域钛铝金属间化合物断裂表面的分形维数测量，验证了材料断裂表面纳米度域分形维数的存在，并拓展了分形理论和 STM 技术的应用范围。半年多的研究，使作者感受到了纳米技术的奇异和在此领域研究的快乐。90 年代中期，作者又从事超细 WC-Co 纳米复合粉末的制备和超强硬质合金的研究工作。2000 年，作者与博士后戴英合作，开展了 ZnO 纳米材料研究，并以此作为研究小组重要的研究领域，开展了近十年的研究。

在此，作者要衷心感谢导师肖纪美院士、褚武扬教授、任涛教授、袁润章教授。正是他们的指导和引领，才使作者得到多年的科学研究训练，并步入了科学研究的道路，在科学的道路上不断进取。

作者还要感谢研究组的其他同事和研究生，他们是戴英、贺建、刘娟、张晓梅、陈红升、邓战强、曹佳伟、王学强、唐立丹、章潇慧、李会峰、雷洋、秦子、赵婧、叶宁、王建、张骥、林伟华等。

作者还要感谢美国佐治亚理工学院纳米中心主任、中国科学院外籍院士王中林教授，他与作者在 ZnO 纳米材料的合作研究中进行了多次有益的讨论和广泛的

学术交流。

作者感谢科技部（2007CB936201、2006DFB51000、2006AA03Z351、50620120439）、国家自然科学基金委员会（50325209、50572005、10876001）、教育部（104022）、北京市教育委员会和自然科学基金委员会（2082015）等提供的项目和资金资助，使作者近十年一直能连续、系统和深入地开展一维 ZnO 纳米材料研究工作。

希望本书能为从事纳米材料和纳米技术研究的科研人员以及材料、物理、化学及相关专业的教师和学生提供有益的参考。

尽管作者力求尽可能全面反映本领域国内外具有代表性的研究成果以及最新的研究进展，但由于纳米科技领域的研究日新月异，加之作者的研究领域有限，书中难免存在疏漏，在此恳请读者批评指正。

本书的出版得到了国家“973”计划（2007CB936201）、国家“863”计划（2006AA03Z351）、北京科技大学研究生教育基金等的资助。

张 跃

2009年11月于北京科技大学

目 录

序

前言

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 纳米材料简介 | 1 |
| 1.2 ZnO 纳米材料简介 | 5 |
| 参考文献..... | 8 |
| 第 2 章 一维 ZnO 纳米材料的理论研究 | 12 |
| 2.1 第一性原理计算方法简介..... | 12 |
| 2.2 包络函数法..... | 16 |
| 2.3 电子结构的第一性原理研究..... | 20 |
| 2.3.1 纳米材料电子态的影响因素 | 20 |
| 2.3.2 ZnO 纳米材料禁带宽度的变化 | 23 |
| 2.3.3 氢钝化对 ZnO 纳米线的影响 | 27 |
| 2.3.4 掺杂 ZnO 纳米线的电子结构 | 28 |
| 2.4 电子结构的包络函数法研究..... | 35 |
| 2.4.1 ZnO 纳米线的光学性能 | 35 |
| 2.4.2 Mn 掺杂 ZnO 纳米线的奇异磁性 | 38 |
| 2.5 结构、性能和应用的第一性原理研究..... | 40 |
| 2.5.1 In 掺杂实现 ZnO 纳米盘的极性生长 | 40 |
| 2.5.2 ZnO 纳米线的高压结构相变 | 43 |
| 2.5.3 ZnO 纳米线的禁带宽度随压强的变化 | 45 |
| 2.5.4 ZnO 纳米线的力学性能 | 47 |
| 2.5.5 传感器工作原理的探讨 | 52 |
| 参考文献 | 53 |
| 第 3 章 一维 ZnO 纳米材料表征新技术 | 56 |
| 3.1 纳米尺度表征和测量的特殊性..... | 56 |
| 3.2 STM-TEM 组合表征测量系统 | 57 |
| 3.3 SEM 原位操纵测试系统 | 60 |
| 3.4 扫描探针分析..... | 64 |
| 参考文献 | 71 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第 4 章 一维 ZnO 纳米材料的制备方法 | 72 |
| 4.1 气相沉积法 | 72 |
| 4.1.1 热蒸发化学气相沉积 1——简单蒸气反应沉积法 | 73 |
| 4.1.2 热蒸发化学气相沉积 2——碳热还原反应 | 88 |
| 4.1.3 热蒸发化学气相沉积 3——MOCVD | 96 |
| 4.1.4 热蒸发物理气相沉积 | 98 |
| 4.1.5 脉冲激光沉积 | 101 |
| 4.1.6 分子束外延法 | 102 |
| 4.1.7 射频磁控溅射法 | 103 |
| 4.2 液相反应法 | 105 |
| 4.2.1 液相直接反应法 | 105 |
| 4.2.2 电化学沉积法 | 112 |
| 4.2.3 模板法 | 114 |
| 4.2.4 溶胶-凝胶法 | 115 |
| 4.3 固态反应法 | 118 |
| 参考文献 | 121 |
| 第 5 章 一维 ZnO 纳米材料的形貌结构 | 133 |
| 5.1 纳米棒和四针状纳米棒 | 133 |
| 5.1.1 纳米棒 | 133 |
| 5.1.2 四针状纳米棒 | 136 |
| 5.2 纳米阵列 | 141 |
| 5.3 纳米线、纳米带 | 143 |
| 5.3.1 纳米线 | 143 |
| 5.3.2 纳米带 | 146 |
| 5.4 芯-壳结构 | 151 |
| 5.5 齿状纳米结构 | 154 |
| 5.6 其他形貌 | 162 |
| 5.7 结构缺陷 | 173 |
| 5.8 损伤与结构稳定性 | 179 |
| 5.8.1 高压相变研究 | 179 |
| 5.8.2 电致损伤 | 183 |
| 5.8.3 力学损伤 | 186 |
| 5.8.4 化学损伤 | 187 |
| 参考文献 | 188 |

| | |
|--|-----|
| 第 6 章 一维 ZnO 纳米材料的生长机理 | 194 |
| 6.1 气-固机理 | 194 |
| 6.2 气-液-固机理 | 195 |
| 6.3 螺旋位错生长机理 | 199 |
| 6.4 极性面控制生长机理 | 201 |
| 6.5 模板辅助生长机理 | 206 |
| 6.6 生长过程的其他解释 | 207 |
| 参考文献 | 208 |
| 第 7 章 一维掺杂 ZnO 纳米材料的制备及结构 | 211 |
| 7.1 n 型掺杂 ZnO 纳米材料 | 212 |
| 7.1.1 In 掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 212 |
| 7.1.2 Ga 掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 242 |
| 7.1.3 Sn 掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 249 |
| 7.1.4 S 掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 256 |
| 7.1.5 其他 n 型掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 260 |
| 7.2 磁性元素掺杂 ZnO 基稀磁半导体材料 | 262 |
| 7.2.1 稀磁半导体简介 | 262 |
| 7.2.2 Mn 掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 266 |
| 7.2.3 Co 掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 275 |
| 7.2.4 Ni 掺杂一维 ZnO 纳米材料 | 279 |
| 7.2.5 其他磁性掺杂 ZnO 纳米材料 | 282 |
| 7.3 p 型掺杂 ZnO 纳米材料 | 285 |
| 7.3.1 p 型掺杂 ZnO 纳米材料的研究现状 | 285 |
| 7.3.2 N 元素的掺杂 | 287 |
| 7.3.3 P 元素的掺杂 | 292 |
| 7.3.4 As 元素的掺杂 | 295 |
| 7.3.5 Al、N 共掺杂 | 295 |
| 7.3.6 Li 元素的掺杂 | 297 |
| 参考文献 | 298 |
| 第 8 章 一维 ZnO 纳米材料的性能 | 308 |
| 8.1 力学性能 | 308 |
| 8.1.1 弹性模量 | 308 |
| 8.1.2 强度 | 313 |
| 8.1.3 塑性 | 314 |
| 8.2 场发射性能 | 314 |

| | | |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 8.2.1 | 单根纳米线的场发射性能 | 315 |
| 8.2.2 | 大面积纳米线的场发射性能 | 318 |
| 8.2.3 | 强流场发射性能 | 319 |
| 8.2.4 | 影响场发射性能的因素 | 320 |
| 8.3 | 电输运性能 | 323 |
| 8.3.1 | 纯 ZnO 纳米材料的电输运性能 | 323 |
| 8.3.2 | 掺杂 ZnO 纳米材料的电输运性能 | 330 |
| 8.4 | 稀磁性能 | 340 |
| 8.4.1 | Mn 掺杂 ZnO 纳米材料的磁性 | 340 |
| 8.4.2 | Co 掺杂 ZnO 纳米材料的磁性 | 345 |
| 8.4.3 | Ni 掺杂 ZnO 纳米材料的磁性 | 348 |
| 8.4.4 | 其他磁性掺杂工作 | 350 |
| 8.5 | 光学性能 | 351 |
| 8.5.1 | 光致发光性能 | 351 |
| 8.5.2 | 光散射性能 | 361 |
| 8.5.3 | 受激辐射与波导性能 | 368 |
| 8.6 | 其他性能 | 370 |
| 8.6.1 | 压电性能 | 370 |
| 8.6.2 | 光催化性能 | 372 |
| 8.6.3 | 光电性能 | 374 |
| 8.6.4 | 吸波性能 | 380 |
| | 参考文献 | 384 |
| 第 9 章 | 一维 ZnO 纳米材料的应用 | 393 |
| 9.1 | 一维纳米材料器件的研究进展概述 | 394 |
| 9.2 | 光学器件 | 398 |
| 9.2.1 | 光致发光器件 | 398 |
| 9.2.2 | 电致发光器件 | 401 |
| 9.2.3 | 光传导器件 | 405 |
| 9.3 | 电子器件 | 407 |
| 9.3.1 | 二极管 | 407 |
| 9.3.2 | 三极管 | 410 |
| 9.3.3 | 多功能场效应晶体管 | 416 |
| 9.4 | 场发射器件 | 419 |
| 9.5 | 传感器件 | 424 |
| 9.5.1 | 湿度传感器 | 425 |

| | |
|--------------------|-----|
| 9.5.2 气敏传感器 | 426 |
| 9.5.3 生物传感器 | 431 |
| 9.5.4 压力传感器 | 433 |
| 9.5.5 其他传感器件 | 434 |
| 9.6 光伏器件 | 437 |
| 9.7 压电器件 | 444 |
| 参考文献 | 454 |

第 1 章 概 述

1.1 纳米材料简介

纳米科学和技术是具有前沿性、交叉性和多学科特征的新兴研究领域,其理论基础、研究对象涉及物理学、化学、材料学、机械学、微电子学、生物学和医学等多个不同的学科。近几年,纳米科学和技术的迅速发展,已经对社会的经济发展、科学技术进步、人类生活等方面产生了巨大影响。

世界各科技大国在纳米研究领域投入了高额的研究经费。1997年,美国、日本和欧洲联盟投入的研究经费均超过了1亿美元,此后每年均大幅增加。2005年美国 NNI 计划投入超过10亿美元,企业投入数倍于政府投入,仅美国纳米技术公司2005年的风险投资达4.34亿美元,超过2004年的两倍。日本在同一年的投入约12亿美元。2007年美国 NNI 计划投入达14.25亿美元,2009年预计突破15亿美元^[1~3]。

2003年我国正式成立国家纳米科技研究中心,首期投入人民币2亿多元。国务院2006年2月9日发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中将纳米研究作为四个重大科学研究计划之一(另外三大研究计划是蛋白质研究、量子调控研究、发育与生殖研究),列入重点支持。为加强我国纳米研究,加快在纳米研究领域中取得更多原创性的成果,实现重点突破,解决国家战略需求中的一些关键性、基础性的问题,科技部加大了纳米科技方面的投入,设立“纳米研究”重大研究计划。纳米重大研究计划现已被列入国家“十二五”科技发展战略规划。国家自然科学基金委员会在1991~2000年的十年中,资助纳米相关的基础研究约1亿元,在纳米材料的合成与制备、性能与表征、测试新技术和理论、系统组装和器件以及微机电系统等方面取得了一批基础研究成果。“十五”期间,国家自然科学基金委员会共支持直接与纳米有关的各类项目近2000项,资助经费约5亿元,年平均经费相当于前十年的总和,资助经费的平均年增长率超过25%。2009年,国家自然科学基金委员会又将“纳米制造的基础研究”列入三大重大研究计划,增大资助力度。

纳米科学和技术正在信息、材料、能源、环境、化学、微电子、微制造、生物、医学和国防等方面显示出广阔的应用前景。目前世界上关注的热点之一是半导体纳米线和纳米带、金属氧化物纳米线和纳米带等材料的基础理论研究、开发和应用。由

于这类材料种类繁多,并呈现出优异的力、光、电、声、磁、热、储氢、吸波等性能,可直接用于传感器、纳米电子器件及纳米光电子器件的组装,在纳米计算机、纳米生物探测器、纳米微型机械等应用领域显示出了强大的生命力^[4~13]。《Science》杂志将由纳米线组装的器件和线路评选为2001年重大突破性研究。与此同时,这类材料的研究和开发将直接推动与纳米科学技术有关的科学基础理论的发展以及其在工业上的实际应用。

纳米(nanometer),是一个几何尺寸的量度单位,简写为nm, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$,相当于3~5个原子排列起来的长度。

广义地讲,纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围或者由它们作为基本单元构成的材料^[14]。纳米材料一般具有不同于块体材料的特殊性能,它是纳米科技发展的重要基础。

纳米材料的特殊性能,如大的比表面及一系列新的效应(小尺寸效应、界面效应、量子效应和量子隧道效应)决定了纳米材料在磁、光、电、敏感等方面呈现出与常规材料不同的特性,因此在信息、材料、能源、微电子、生物、医学等领域将有广泛的应用。20世纪90年代以来,全球掀起了纳米材料研究热潮。

纳米材料的发展大致可以划分为三个阶段:第一阶段(1990年以前)研究对象主要集中在纳米颗粒如纳米晶、纳米相、纳米非晶等,以及由它们组成的薄膜与块体,研究评估表征方法,探索纳米材料的特殊性能;第二阶段(1990~1994年)人们关注的热点是如何利用纳米材料已经挖掘出来的奇特物理、化学和力学性能,如何设计纳米复合材料,纳米复合材料的合成及物性的探索成为纳米材料研究的主导方向;第三阶段(1994~现在)纳米组装体系或称为纳米尺度的图案材料受到人们的关注,其基本内涵是以纳米颗粒、纳米线和纳米管为基本单元,在一维、二维、三维空间组装排列成具有纳米结构的体系,其中包括纳米阵列体系、介孔组装体系、薄膜镶嵌体系。第三阶段的特点是强调按人的意愿设计、组装、创造新的体系,使材料具有人们所希望的特性,如量子线和量子点是未来量子器件的构造单元,量子线、量子点和纳米器件的制备仍是目前具有挑战性的课题。可以认为,从现在开始,纳米材料的发展已进入一个新的阶段,即纳米材料的结构与性能调控、纳米器件制备与初步应用的阶段。

未来纳米器件的制备有两条可能的技术路线:自上而下和自下而上。所谓自上而下是指从体材料出发,利用薄膜生长和纳米光刻技术(电子束光刻、X射线光刻等)制备纳米结构和器件。这一技术路线要求使用精密和昂贵的设备,同时还有许多技术难点需要克服,因此自下而上的路线越来越受到重视。所谓自下而上,可理解为从原子、分子出发自组织生长出所需要的纳米材料与纳米结构,这就要求在材料的生长过程中就对它们的结构、组分、形状、大小和位置进行人为的控制,从而直接生长出具有所需结构和性能的纳米器件。可见,纳米结构的设计和合成已