

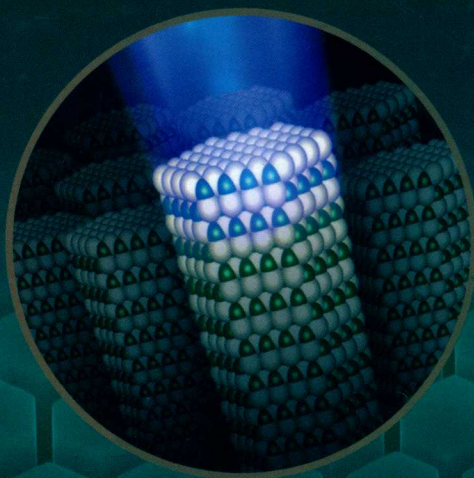
低维材料与器件丛书

成会明 总主编

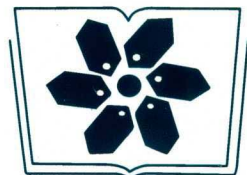
SEMICONDUCTOR NANOWIRE
FUNCTIONAL DEVICES

半导体纳米线 功能器件

张 跃 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

低维材料与器件丛书

成会明 总主编

半导体纳米线功能器件

张 跃 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为“低维材料与器件丛书”之一。过去二十多年, 半导体纳米线因其独特结构与优异性能引起了世界各国科学家的高度关注与广泛研究, 半导体纳米线功能器件在不同领域都展现出巨大的前景。本书基于作者多年的科研工作, 并结合国内外的最新研究进展, 系统介绍了半导体纳米线功能器件的研究成果。内容涵盖了从半导体纳米线功能器件的发展现状和加工技术、不同功能器件的研究进展、多场耦合调控到损伤与服役行为研究。对基于半导体纳米线的电子器件、发光器件、光电转换器件、力电转换器件、传感器件等代表性功能器件进行了详细介绍。本书对半导体纳米线功能器件的发展具有重要的推动意义与学术参考价值。

本书同时涵盖了半导体纳米线功能器件研究的基础知识与最新进展, 既可以作为高等院校相关学科研究生和高年级本科生的专业学习参考用书, 也可作为高等院校和科研单位从事低维材料与器件研究及开发的研究人员提供指导和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体纳米线功能器件 / 张跃著. —北京: 科学出版社, 2019.3

(低维材料与器件丛书/成会明总主编)

ISBN 978-7-03-060533-7

I. ①半… II. ①张… III. ①半导体材料—纳米材料—电子器件—研究 IV. ①TN304 ②TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 026330 号

责任编辑: 翁靖一 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 肖 兴 / 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

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

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 23 1/4

字数: 451 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

低维材料与器件丛书

编委会

总主编：成会明

常务副总主编：俞书宏

副总主编：李玉良 谢毅 康飞宇 谢素原 张跃

编委（按姓氏汉语拼音排序）：

胡文平	康振辉	李勇军	廖庆亮	刘碧录	刘畅
刘岗	刘天西	刘庄	马仁敏	潘安练	彭海琳
任文才	沈洋	孙东明	汤代明	王荣明	伍晖
杨柏	杨全红	杨上峰	杨震	张锦	张立
张强	张莹莹	张跃钢	张忠	朱嘉琦	邹小龙

总 序

人类社会的发展水平，多以材料作为主要标志。在我国近年来颁发的《国家创新驱动发展战略纲要》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》、《“十三五”国家科技创新规划》和《中国制造2025》中，材料都是重点发展的领域之一。

随着科学技术的不断进步和发展，人们对信息、显示和传感等各类器件的要求越来越高，包括高性能化、小型化、多功能、智能化、节能环保，甚至自驱动、柔性可穿戴、健康全时监/检测等。这些要求对材料和器件提出了巨大的挑战，各种新材料、新器件应运而生。特别是自20世纪80年代以来，科学家们发现和制备出一系列低维材料(如零维的量子点、一维的纳米管和纳米线、二维的石墨烯和石墨炔等新材料)，它们具有独特的结构和优异的性质，有望满足未来社会对材料和器件多功能化的要求，因而相关基础研究和应用技术的发展受到了全世界各国政府、学术界、工业界的高度重视。其中富勒烯和石墨烯这两种低维碳材料的发现者还分别获得了1996年诺贝尔化学奖和2010年诺贝尔物理学奖。由此可见，在新材料中，低维材料占据了非常重要的地位，是当前材料科学的研究前沿，也是材料科学、软物质科学、物理、化学、工程等领域的重要交叉，其覆盖面广，包含了很多基础科学问题和关键技术问题，尤其在结构上的多样性、加工上的多尺度性、应用上的广泛性等使该领域具有很强的生命力，其研究和应用前景极为广阔。

我国是富勒烯、量子点、碳纳米管、石墨烯、纳米线、二维原子晶体等低维材料研究、生产和应用开发的大国，科研工作者众多，每年在这些领域发表的学术论文和授权专利的数量已经位居世界第一，相关器件应用的研究与开发也方兴未艾。在这种大背景 and 环境下，及时总结并编撰出版一套高水平、全面、系统地反映低维材料与器件这一国际学科前沿领域的基础科学原理、最新研究进展及未来发展和应用趋势的系列学术著作，对于形成新的完整知识体系，推动我国低维材料与器件的发展，实现优秀科技成果的传承与传播，推动其在新能源、信息、光电、生命健康、环保、航空航天等战略新兴领域的应用开发具有划时代的意义。

为此，我接受科学出版社的邀请，组织活跃在科研第一线的三十多位优秀科学家积极撰写“低维材料与器件丛书”，内容涵盖了量子点、纳米管、纳米线、石墨烯、石墨炔、二维原子晶体、拓扑绝缘体等低维材料的结构、物性及其制备方

法，并全面探讨了低维材料在信息、光电、传感、生物医用、健康、新能源、环境保护等领域的应用，具有学术水平高、系统性强、涵盖面广、时效性高和引领性强等特点。本套丛书的特点鲜明，不仅全面、系统地总结和归纳了国内外在低维材料与器件领域的优秀科研成果，展示了该领域研究的主流和发展趋势，而且反映了编著者在各自研究领域多年形成的大量原始创新研究成果，将有利于提升我国在这一前沿领域的学术水平和国际地位、创造战略新兴产业，并为我国产业升级、提升国家核心竞争力提供学科基础。同时，这套丛书的成功出版将使更多的年轻研究人员和研究生获取更为系统、更前沿的知识，有利于低维材料与器件领域青年人才的培养。

历经一年半的时间，这套“低维材料与器件丛书”即将问世。在此，我衷心感谢李玉良院士、谢毅院士、俞书宏教授、谢素原教授、张跃教授、康飞宇教授、张锦教授等诸位专家学者积极热心的参与，正是在大家认真负责、无私奉献、齐心协力下才顺利完成了丛书各分册的撰写工作。最后，也要感谢科学出版社各级领导和编辑，特别是翁靖一编辑，为这套丛书的策划和出版所做出的一切努力。

材料科学创造了众多奇迹，并仍然在创造奇迹。相比于常见的基础材料，低维材料是高新技术产业和先进制造业的基础。我衷心地希望更多的科学家、工程师、企业家、研究生投身于低维材料与器件的研究、开发及应用行列，共同推动人类科技文明的进步！



成会明

中国科学院院士，发展中国家科学院院士

清华大学，清华-伯克利深圳学院，低维材料与器件实验室主任

中国科学院金属研究所，沈阳材料科学国家研究中心先进炭材料研究部主任

Energy Storage Materials 主编

SCIENCE CHINA Materials 副主编

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高科技新兴学科领域,在信息、材料、能源、环境、化学和生物等方面显示出广阔的应用前景,被认为是新科技革命和产业变革的重要标志。纳米材料是纳米科学和技术发展的基础与支撑,也是纳米科学与技术研究的重要领域。半导体纳米线是具有半导体特性的一维纳米材料,在长度方向可自由传输电子、空穴和光子,同时具有大的比表面积和量子效应。半导体纳米线具有不同于体相材料的特性,可用于发展新型纳米器件,是纳米科技领域最重要的研究对象之一。早在 2004 年麻省理工学院《技术评论》就把纳米线技术列为影响未来的十大技术之一,《自然》杂志在 2006 年也把半导体纳米线研究列为物理学的十大研究热点之一,而国际路线图委员会(International Roadmap Committee, IRC)在 2011 年度《国际半导体技术发展路线图》中也把半导体纳米线材料作为最具发展潜力的十大热门材料之一。半导体纳米线已成为全世界科学家们突破传统半导体器件工艺极限和发现科学新现象的重要平台。

半导体纳米线经过二十多年的发展,其基础研究和应用研究已取得了诸多重要成果,半导体纳米线的基础理论不断丰富、制备和表征技术持续完善、性能调控与器件构筑方法日渐成熟,各种基于半导体纳米线的电子、光学及能源器件不断涌现。半导体纳米线功能器件在信息存储、激光、高效能源转换、储能电池、光探测及化学传感等应用方面展现出巨大的前景,并由基础研究逐步走向实际应用研究。我国高度重视半导体纳米线功能器件的创新研究,并将其纳入国家重大科学研究计划与国家重点研发计划支持的研究方向。半导体纳米线功能器件研究成为推动我国纳米科技发展与应用的重要驱动力。我国的高等院校和科研单位一直与国际同步开展半导体纳米线功能器件的研究,取得了具有国际水平甚至世界一流水平的创新性研究成果。

本书作者自 20 世纪 90 年代初至今,一直从事纳米表征技术和低维材料与器件相关的研究工作。近三十年来,在半导体纳米线的控制制备、结构表征、性能调控和器件构筑等方面积累了丰富的经验,特别是在半导体功能器件的构筑、性能调控与应用方面取得了一些重要的原创性成果。迄今国内尚没有能比较全面地反映半导体纳米线功能器件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,也希望能为从事半导体纳米线功能器件研究的工作者提供参考,作者完成了本书的撰写。

本书基于作者多年的科研工作，结合国内外的最新研究成果，力图系统而深入地介绍半导体纳米线功能器件的研究现状与发展趋势。全书共 10 章，内容涵盖了半导体纳米线功能器件的构筑方法、性能调控、服役行为与应用，并对半导体纳米线的电子器件、发光器件、光电转换器件、力电转换器件与传感器件等多种重要功能器件进行了详细介绍。相信本书的出版对半导体纳米线在能源、电子、信息和生物科学等诸多领域的研究具有重要推动意义和学术参考价值。

本书在撰写过程中，得到国内外众多同行的鼓励、支持和帮助，“低维材料与器件丛书”编委会成会明院士等专家为本书提出了宝贵建议。本书的完成也离不开多年来在实验室工作过的博士后、博士和硕士研究生的不懈奋斗，特别是戴英、廖庆亮、刘邦武、杨亚、张铮、康卓、章潇慧、雷洋、丁一、李会峰、李培峰、林沛、张光杰、司浩楠、孙旭、白智明、张骐、张先坤、柳柏杉、陈翔、刘怿冲、宋宇和申衍伟等，在此对他们一并表示感谢。在本书撰写过程中，也引用了一些参考文献中的图、表、数据等，在此向相关作者表示感谢。

最后，诚挚感谢科学技术部（项目编号：2013CB932600、2012DFA50990、2007CB936201）、国家自然科学基金委员会（项目编号：51527802、51232001、51172022、50572005、50325209）、教育部（项目编号：104022），以及北京市科学技术委员会和教育委员会等提供的项目和资金资助，使作者近三十年一直能连续、系统和深入地开展半导体纳米线及其功能器件的研究工作。

尽管本书力求全面反映本领域国内外具有代表性的研究成果及最新的研究进展，但由于纳米科技的研究日新月异，加之我们的研究领域和精力有限，书中难免有疏漏或不足之处，恳请广大读者批评指正！



2018 年 12 月

目 录

总序

前言

第 1 章 半导体纳米线功能器件概述 1

1.1 引言 1

1.2 半导体纳米线的发展 2

参考文献 5

第 2 章 半导体纳米线功能器件的发展现状 9

2.1 引言 9

2.2 半导体纳米线的物理特性 10

2.2.1 半导体纳米线的力学性能 10

2.2.2 半导体纳米线的电输运特性 13

2.2.3 半导体纳米线的介电与压电特性 16

2.2.4 半导体纳米线的光学特性 18

2.3 半导体纳米线功能器件的种类 21

2.3.1 半导体纳米线电子器件 21

2.3.2 半导体纳米线光电子器件 24

2.3.3 半导体纳米线太阳能电池 27

2.3.4 半导体纳米线机械能-电能转换器件 28

2.3.5 半导体纳米线传感器件 30

2.3.6 半导体纳米线场发射器件 32

参考文献 33

第 3 章 半导体纳米线功能器件的加工技术 43

3.1 引言 43

3.2 “自上而下”微纳加工技术 43

3.2.1 图形成像 43

3.2.2 图形转移 45

3.2.3 聚焦离子束加工 47

3.3 “自下而上”微纳加工技术	47
3.3.1 气相沉积法	48
3.3.2 液相反应法	53
3.3.3 模板法	57
3.3.4 定向附着法	60
3.4 半导体纳米线器件的加工工艺	60
3.4.1 电极构筑	61
3.4.2 栅极构筑	64
3.4.3 半导体纳米线的自组装	67
参考文献	70
第4章 半导体纳米线电子器件	74
4.1 引言	74
4.2 场效应晶体管	74
4.2.1 硅纳米线场效应晶体管	75
4.2.2 碳纳米管场效应晶体管	77
4.2.3 III-V族和II-VI族半导体场效应晶体管	79
4.2.4 二维材料晶体管	82
4.3 阻变存储器件	84
4.3.1 阻变存储器的基本工作原理	86
4.3.2 阻变材料的研究	87
4.3.3 阻变存储器的集成	98
4.4 场发射器件	100
4.4.1 场发射理论基础	100
4.4.2 半导体纳米线的场发射特性	101
4.4.3 半导体纳米线场发射性能的调控	110
4.4.4 半导体纳米线强流场发射器件	116
4.5 其他电子器件	118
4.5.1 pn结和肖特基二极管	118
4.5.2 逻辑门电路	126
参考文献	129
第5章 半导体纳米线发光器件	139
5.1 引言	139
5.2 发光二极管	139
5.2.1 纳米线发光二极管	140

5.2.2 纳米线阵列发光二极管	147
5.3 激光器	151
参考文献	164
第6章 半导体纳米线光电转换器件	167
6.1 引言	167
6.2 太阳能电池	168
6.2.1 染料敏化太阳能电池	168
6.2.2 钙钛矿太阳能电池	173
6.2.3 pn 异质结太阳能电池	178
6.3 光电化学电池制氢	181
6.3.1 光电化学电池制氢原理	181
6.3.2 光电化学电池的吸光性能优化	182
6.3.3 光电化学电池的电荷分离性能优化	193
6.3.4 光电化学电池的稳定性优化	197
参考文献	200
第7章 半导体纳米线压电纳米发电机	205
7.1 引言	205
7.2 压电半导体纳米线概述	206
7.3 压电纳米发电机的结构及原理	208
7.3.1 单根纳米线器件	208
7.3.2 纳米线阵列器件	211
7.3.3 柔性压电纳米发电机	211
7.4 压电纳米发电机的性能调控	216
7.4.1 材料优化设计	216
7.4.2 结构优化设计	217
7.5 压电纳米发电机的应用	219
7.5.1 机械能收集	219
7.5.2 自驱动应变传感	220
7.5.3 电子皮肤	221
7.5.4 自驱动化学传感	225
参考文献	227
第8章 半导体纳米线传感器件	230
8.1 引言	230
8.2 应力应变传感器	230

8.2.1 单根纳米线应力应变传感器	230
8.2.2 纳米线阵列应力应变传感器	239
8.2.3 混合型应力应变传感器	243
8.3 光电传感器	246
8.3.1 电驱动光电传感器	246
8.3.2 自驱动光电探测器	251
8.4 生物传感器	257
8.4.1 电化学生物传感器	257
8.4.2 场效应晶体管生物传感器	259
8.4.3 高电子迁移率场效应晶体管生物传感器	265
参考文献	268
第9章 半导体纳米线功能器件的多场耦合调控	274
9.1 引言	274
9.2 单场调控与材料性能优化	275
9.2.1 应变调控光学性能	275
9.2.2 应变调控电学性能	283
9.2.3 磁学性能调控	289
9.3 力-光-电多场耦合与器件性能优化	294
9.3.1 多场耦合调控发光二极管性能	294
9.3.2 多场耦合调控太阳能电池性能	298
9.3.3 多场耦合调控光电探测性能	301
9.3.4 多场耦合调控光催化性能	307
参考文献	309
第10章 半导体纳米线功能器件的损伤与服役行为	314
10.1 引言	314
10.2 电学损伤与服役行为	314
10.3 力学损伤与服役行为	324
10.4 力电耦合损伤与服役行为	342
10.5 应力腐蚀损伤与服役行为	347
参考文献	352
关键词索引	356



纳米科学是在纳米尺度（从原子、分子到亚微米尺度）上研究物质的相互作用、组成、特性与制造方法的科学。纳米科学是具有前沿性、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^[1-4]。纳米科学汇聚了现代多学科领域在纳米尺度的焦点科学问题，促进了多学科交叉融合，孕育着众多的科技突破和原始创新机会。纳米科学与技术研究是具有广泛应用前景的战略性前沿研究，发展迅速，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。

由于纳米科技对国家未来经济、社会发展及国防安全具有重要意义，从 20 世纪 80 年代开始，纳米科技引起了人们的广泛关注，世界各国在纳米研究领域投入了高额研究经费。为了抢占纳米科技的先机，美国于 2000 年率先发布了“国家纳米技术计划”（NNI），掀起了国际纳米科技研究热潮。欧盟及其成员国、俄罗斯、日本、韩国和澳大利亚等国家及地区随后也制定了本国或本地区的纳米科技发展战略和专项计划。21 世纪各国及地区纷纷对原有计划进行了更新和调整，掀起了国际纳米科技研究热潮。中国高度关注纳米科技发展，与国际同步进行了布局，于 2000 年成立了国家纳米科学技术指导协调委员会，2003 年成立了国家纳米科学中心。国家重点基础研究发展计划从 1998 年实施开始就将纳米材料作为重点研究方向之一，为落实国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》的部署，2006 年又将纳米研究作为四个重大科学研究计划之一，列入重点支持领域。国家自然科学基金委员会于 2002 年开始组织实施“纳米科技基础研究”重大研究计划，并于 2007 年启动了“纳米制造的基础研究”重大研究计划，始终将纳米科技研究作为重点支持方向。中国科学院根据国务院要求，于 2010 年启动实施战略性先导科技专项“变革性纳米产业制造技术聚焦”，在多个产业领域形成了一系列纳米核心技术。2016 年，我国整合原来的国家重点基础研究发展计划和国家

高技术研究发展计划等科研专项设立了国家重点研发计划，在国家重点研发计划中也设立“纳米科技”重点专项。另外，国家相关部委和地方政府也都部署了纳米科技相关研究，这些措施极大地推动了中国纳米科技的发展。

在纳米科技发展的研究领域，纳米材料研究是纳米科技发展的基础与最重要的研究领域。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（1~100nm）或者由它们作为基本单元构成的材料，具有不同于常规尺寸材料的一些特殊物理化学特性^[5]。纳米材料具有独特的尺寸结构，因此有着传统块体材料不具备的特殊性能，它是纳米科学与技术发展的重要基础。纳米材料的独特结构产生特殊的效应，如表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应等^[6]。纳米材料独特的性能决定了其在磁、光、电、敏感等方面呈现常规材料不具备的特性，因此在能源、信息、微电子、生物、医学等领域显示出广阔的应用前景^[7,8]。纳米材料按照维度可划分为零维、一维和二维三种。零维纳米材料包括团簇、人造原子和纳米微粒等；一维纳米材料包括纳米线、纳米管、纳米棒、纳米纤维等；二维纳米材料包括纳米带、超薄膜、多层膜等^[5,6]。在纷繁复杂、种类多样的纳米材料中，一维纳米材料具有独特的取向特性，被认为是定向电子传输的理想材料，也是电子与光激子有效传输的最小维度结构，是纳米材料组装器件与应用的重要基本单元。

1.2 半导体纳米线的发展

自从 1991 年日本电子显微镜专家 Iijima 发现碳纳米管（CNT）后，以碳纳米管为代表的一维纳米材料因其特殊的结构成为世界上科学家最关注的热点之一^[9]。一维纳米材料种类繁多，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、纳米电子器件及光电子器件的组装，在能源、信息和传感等应用领域已经显示出了强大的生命力^[10-19]。一维纳米材料根据形态还可以分为纳米管、纳米线、纳米带、纳米棒和电缆等不同结构，其中纳米线是构筑纳米功能器件最重要的构建单元，引起国际学术界的广泛研究。未来纳米器件的构建有“自上而下”（up-down）和“自下而上”（bottom-up）两条技术路线。传统的“自上而下”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。纳米线是通过“自下而上”的路线构建微纳器件的理想构建单元，纳米线组装器件和纳米电子学被《科学》杂志评选为 2001 年的十大突破性进展之一。

根据组成材料和性能不同，纳米线可分为不同的类型。根据导电性能，纳米线可以分为金属纳米线（如 Ag、Pt 和 Au 等纳米线）、半导体纳米线（如 ZnO、Si、InP 和 GaN 等纳米线）和绝缘体纳米线（如 SiO₂ 等纳米线）。随着半导体工业的高速发

展,现代工业对材料和器件的要求越来越高,器件朝着小型化、集成化、功能化和智能化的方向发展,尤其是集成电路中单片集成电子器件的密度成为衡量微电子领域发展的重要技术指标(通常称为摩尔定律),这也使得器件的尺寸越来越小^[20]。当电子器件进入 100nm 尺度以下时,量子效应就会越来越明显,电子的运动不仅表现出粒子性,而且显现出波动性,使得服从经典理论下的电子器件难以维持正常的工作。因此为了延续摩尔定律,寻找新型半导体材料和发展纳米半导体器件变得越来越重要。半导体纳米线是一种独特的一维人工微纳结构,相比传统块体半导体材料和其他纳米材料,具有以下独特的优点:①与传统块体半导体材料相比,纳米线具有显著的表面效应和尺寸效应;②一维结构纳米线是电荷传输的最小单元;③纳米线不仅可以作为器件构建单元,也可以作为器件电路的互联导线;④半导体纳米线的化学成分选择具有丰富多样性。因此,半导体纳米线不仅是研究纳米科学基本规律的理想研究对象,也是构造功能纳米器件的理想构筑单元(building block)。半导体纳米线材料与功能器件的研究已经引起了国际学术界和工业界的广泛关注。根据 Web of Science 的检索结果,从 1999 年到 2018 年 7 月,全世界关于半导体纳米线研究的 SCI 论文总数超过 25 万篇,如图 1-1 所示。近年来,全世界每年关于半导体纳米线研究的 SCI 论文数量都超过 2.5 万篇。根据发表论文的国家 and 地区分布图可以看出,中国学者在半导体纳米线研究方面发表论文的综述约占全世界的 1/3。中国科学家在半导体纳米线研究方面的成果在全世界具有举足轻重的地位。

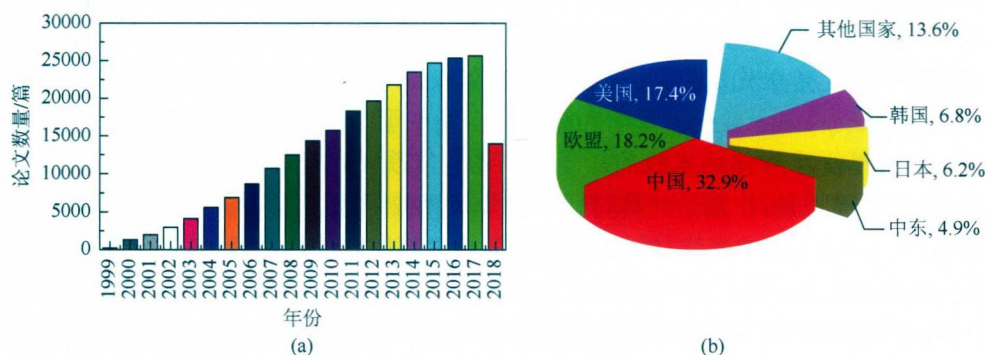


图 1-1 (a) 1999 年至 2018 年 7 月有关半导体纳米线研究的 SCI 论文数量情况; (b) 不同国家和地区在半导体纳米线研究方面发表的 SCI 论文所占比例

半导体纳米线是构建微纳电子器件最重要的构建单元,成为最重要的研究体系。根据不同的分类方法,半导体纳米线可分为无机半导体纳米线和有机半导体纳米线。无机半导体又包括元素半导体和化合物半导体。属于元素半导体材料的有 B、C、Ge、Si 等^[21]。化合物半导体种类繁多,如 III-V 族和 II-VI 族化合物半导体、IV-IV 族化合物半导体(SiC)和氧化物半导体(ZnO)等。有机半导体是指具有半导体性质的有

机材料,可分为有机物材料、聚合物材料和供体-受体络合物材料三类。过去的二十年里,半导体纳米线已经成为纳米科研领域最热门的研究方向之一^[22-24]。

材料的物理化学性能在很大程度上取决于其形状和尺寸,半导体纳米线的横截面积在1~100nm,长度可达几十微米,即只在两个维度上存在量子限域效应,因而可以在第三个维度上自由地传输电子、空穴和光子,这种新型高长径比的半导体结构使纳米线完美地连接起纳米和微米世界^[22]。半导体纳米线具有大的比表面积和量子效应,导致其表现出了与体相材料不同的性能,如光电特性及光电转换特性等。利用半导体纳米线的这些特性,可以研究新型纳米器件,为新型科技的诞生带来了可能。早在2004年麻省理工学院《技术评论》就把纳米线技术列为影响未来的十大技术之一,《自然》杂志在2006年把半导体纳米线研究列为物理学的十大研究热点之一^[25],而国际路线图委员会在2011年度《国际半导体技术发展路线图》中把半导体纳米线材料作为最具发展潜力的十大热门材料之一。半导体纳米线成为国际科学家们突破传统微纳器件工艺极限和发现科学新现象的重要平台。自上世纪末至今,张跃研究小组围绕半导体纳米线开展了从控制制备、性能调控、器件构筑到服役行为的系统研究^[26-32]。实现了ZnO纳米四针和双晶纳米线等半导体纳米新结构的控制合成^[26-28],发展了半导体纳米线的性能调控方法与器件构筑理论,设计构筑了半导体纳米线的光探测、生物传感、电子发射和光电能量转换等功能器件^[13-15, 29-32]。2012年Weber等在《科学》上报道了一个重要工作。他们利用扫描隧道显微镜刻蚀技术结合分子束外延生长等成功设计出迄今世界上最细的Si纳米导线。研究发现,在一定条件下,欧姆定律在原子尺度量子世界和低温下依然成立^[33]。而荷兰代尔夫特理工大学Kouwenhoven教授研究小组设计基于单根InTb纳米线的混合型粒子量子探测器件,发现了马约拉纳费米子存在的实验证据,这一基于半导体纳米线的粒子探测器的发现可能把马约拉纳费米子应用到量子计算,开创拓扑量子计算时代。这项研究被评为2012年度世界十大科技进步之一^[34]。半导体纳米线材料在新能源领域也获得大量的创新应用。2006年,美国佐治亚理工学院的王中林教授研究小组利用ZnO纳米线独特的压电半导体耦合特性将机械能高效转换成了电能,发明了ZnO纳米线压电纳米发电机^[35]。经过近十年的不断改进和优化,压电纳米发电机的输出功率显著提高,并应用于不同领域^[36-38]。2015年,加利福尼亚大学伯克利分校杨培东教授研究小组构建了一套由半导体纳米线和细菌组成的独特系统,该系统可捕捉到二氧化碳气体并模仿自然界的光合作用。通过“人工光合作用”,该系统能够将能量转化为碳基物质储存下来,从而减少二氧化碳排放、降低温室效应影响^[39]。随后,杨培东教授研究小组又通过细菌/无机半导体混合人工光合作用系统使得生物沉淀硫化镉纳米粒子进行自我复制并作为光收集器,以维持细菌的代谢,实现了太阳能到化学能的转化和二氧化碳的减少^[40]。《科学美国人》(Scientific American)杂志与世界经济

论坛 (WEF) 将人工光合系统“人工树叶”评为 2017 年的突破性技术之一。

半导体纳米线在电学、光学、力学和热学等方面展现出优异的性质, 成为制备纳米级光电子器件的新一代材料。尺寸的减小、优异的材料性质及自下而上集成工艺的可能性, 使得这种纳米结构成为一种很有前景的纳米级器件的构造模块。半导体纳米线具有独特的一维结构, 在长度方向具有独特的电输运特性, 因此在电子器件和能源器件方面具有重要的应用价值。半导体纳米线材料的折射率高, 表面光滑缺陷少, 且两个端面的反射率也足够, 使得光可以被束缚在线里面来回反射从而形成谐振。因此, 半导体纳米线可以作为谐振腔。另外, 半导体纳米线自身也是一种高增益介质。这两个独特的性质让半导体纳米线成为理想的纳米级激光器材料。另外, 纳米线结构相比块体结构也具有非常独特的力学特性, 包括屈服强度和拉伸性能, 因此在力学传感器和力电能量转换器件方面具有重要的应用^[41, 42]。半导体纳米线吸引了国内外研究者极大的研究兴趣, 并且已经有各种基于纳米线的电子、光学及能源器件的报道, 包括纳米发电机^[35-38]、场效应管^[43-45]、场发射器件^[46-48]、太阳能电池^[49-51]、发光二极管^[52, 53]、激光器^[54-58]、光电探测器^[59-61]、光波导器件^[62, 63]、存储器件^[64, 65]、光催化^[66, 67]及高敏感化学与生物传感器^[11, 68]。半导体纳米线在电子和光电器件领域中表现出了卓越的应用潜力。

经过二十多年的发展, 半导体纳米线已经实现了稳定的可控制备, 并且由基础研究逐步走向应用研究, 在高效能源转换、储能电池、信息存储、光探测器及化学传感等应用方面展现出美好的前景。除了应用于构筑各类功能器件以外, 以纳米线为研究对象, 弹道输运、自旋输运、力电耦合效应、光电效应、尺寸效应、量子限域效应等各种新物理现象也得到了极大的丰富, 加深了人们对微纳尺度下新奇物理现象的认识。

本书主要介绍半导体纳米线功能器件的主要研究进展, 具体包括半导体纳米线功能器件的发展现状、加工技术、电子与发光器件、光电转换器件、力电转换器件、传感器件、多场耦合调控、损伤与服役行为等相关内容。希望本书能为开发出超高灵敏度、超高效率的半导体纳米线功能器件并实现应用提供指导。

参 考 文 献

- [1] 张跃. 一维氧化锌纳米材料. 北京: 科学出版社, 2010: 2.
- [2] Zhang Y. ZnO Nanostructures: Fabrication and Applications. London: Royal Society of Chemistry, 2017.
- [3] Roco M C, Williams R S, Alivisatos P. Nanotechnology research directions: IWGN workshop report. NSTC, USA, 1999.
- [4] Siegel R W, Hu E, Roco M C. Nanostructure science and technology—A worldwide study. NSTC, USA, 1999.
- [5] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构. 北京: 科学出版社, 2001: 3.
- [6] 王世敏, 许祖勋, 傅晶. 纳米材料制备技术. 北京: 化学工业出版社, 2002: 2.
- [7] Zhang Y, Yan X, Yang Y. Scanning probe study on piezotronic effect in ZnO nanomaterials and nanodevices.