

# 微系统 和纳米技术

MICROSYSTEM and NANOTECHNOLOGY

周兆英 王中林 林立伟 主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



TN4/71

2007

# 微系统和纳米技术

周兆英 王中林 林立伟 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

微系统和纳米技术,是微米纳米技术的两个重要组成,既有区别又有联系,是一个新兴的多学科交叉的科技领域。本书由40多位国内外著名专家学者分章撰写,分为微系统和纳米科学技术基础、微系统技术、纳米技术、应用问题、发展和展望五个部分,共26章。全书统一规划,各章独立,由浅入深,图文并茂。收录众多在第一线耕耘的作者的科技成果和亲身体会是本书的重要特点,书中还邀请了美、德、英、日和我国的权威专家畅谈他们数十年从事微系统研究的经验和对未来的展望,从科技发展的规律说明微米纳米科技发展的阶段性和成熟周期。

本书可作为相关领域本科生、研究生和教师的教学参考书,并可供相关的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

微系统和纳米技术/周兆英,王中林,林立伟主编. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-017771-1

I. 微… II. ①周…②王…③林… III. ①微电机②纳米材料-新技术应用 IV. ①TM38②TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第090073号

责任编辑:巴建芬 潘继敏 / 责任校对:赵桂芬  
责任印制:张克忠 / 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

\*

2007年7月第一版 开本:16(787×1092)

2007年7月第一次印刷 印张:52 3/4

印数:1—3 500 字数:1 184 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

## 编者的话

很荣幸和王中林、林立伟两位教授合作编写出版本书。王教授是美国佐治亚理工学院 (Georgia Institute of Technology) 终身教授和欧洲科学院院士, 林教授是美国加州大学伯克利分校 (U. C. Berkeley) 传感器与致动器中心 (BSAC) 主任。面对这个迅速发展的多学科交叉的领域 (例如, 有的国际学术会议一次就收到数百篇甚至上千篇论文), 一个人很难写出全面的、准确的专著, 于是就有了这个合编的构想。2003 年初我们讨论出一个章节大纲, 大致分为科学技术基础、微机电系统、纳米技术、应用问题四个部分, 便分别邀请了清华大学的李志坚院士、中国科学技术大学侯建国院士、美国加州大学洛杉矶分校 (UCLA) 的何志明院士、美国加州理工学院戴聿昌教授、德国 Roland Zengerle 教授等 40 多位国内外著名专家学者分章和我们一起撰写, 还邀请了美国 Richard S. Muller 院士、德国 Wolfgang Menz 教授、日本 Masayoshi Esashi 教授、英国 Geoff Beardmore 博士等国际权威专家畅谈他们数十年从事微系统研究的经验和展望。收录众多在第一线耕耘的作者的科技成果和切身感受是本书的重要特点。我们对这 40 多位专家对本书的贡献表示衷心的感谢, 相信以后还会有多种形式的交流和讨论。在本书出版时, 还有一些准备为本书撰稿的专家学者未能赶上出版日期, 我们希望在日后的英文版或再版的时候能够进一步丰富此专著。

微系统和纳米技术, 或者称微米纳米技术, 是一个新兴的科技领域。几位诺贝尔奖获得者的预言激励了许多科技工作者。例如, 理查德·费恩曼 1959 年在 CIT 的著名演讲中说: There's plenty of room at the bottom (在底端是大有作为的)。许多科学家和科技战略研究人员用精辟的归纳方式说明这个问题, 例如, 有人把生物工程、信息技术和微米纳米技术并列为 21 世纪的三大前沿科技领域, 认为它们的结合和发展将引起一场新的科技革命; 还有人认为科技发展是向两极延伸的, 大尺度是空间科技, 小尺度是微纳科技。虽然用尺度描述科学技术未必准确, 但小事物的地位如此重要, 于是近年来这个领域得到各国政府和企业的的大力支持, 有时也难免会要求过急。本书的作者们不但在他们所从事的领域里充满信心, 还从科技发展的规律说明了微米纳米科技发展的阶段性和成熟周期, 脚踏实地地推动其发展。

许多人关心我国的微米纳米技术的发展, 并付出了积极的努力。从科学发展的规律来看, 微米纳米技术的发展是长期的。我国在政府大力支持下, 倡导技术创新机制, 形成了强有力的研究队伍, 正在建设高水平的微米纳米技术发展平台。微米纳米科学技术大有可为。因此, 本书各位作者的知识、经验和创新成果, 值得我们借鉴。来稿的相当

部分是用英文书写的，由和我合作的博士及博士后认真翻译，并由孙立军博士和红艳小姐对全书的目录、章节、图片进行了整理，在此一并致谢。

周兆英，北京清华大学

在过去几十年微电子技术发展的历程中，技术的发展遵从莫尔定律，即每 18 个月在硅片上可以集成的电子元件的密度翻一番，而标志微电子技术的指标就是元件的尺寸，如 90 纳米技术、60 纳米技术等。当器件尺寸达到 50 纳米以下时，器件的工作原理在物理上已有根本的改变，从而不可避免地进入纳米时代。

纳米技术是对从原子或分子尺度设计的、至少有一维的尺寸属于纳米级的功能结构的集成和运用。纳米技术是第二次用长度来表征的技术。纳米技术的未来发展和应用有三大主要方向：纳米技术和微系统的结合、基于纳米过程的生命科学和医疗技术、纳米材料在能源和环境技术中的应用。本书就是关于纳米技术和微系统的结合。

在第一次工业革命中最主导的材料是钢铁。到第二次工业革命时，最主导的材料是硅。当纳米技术刚被提出时，有人认为它有可能会取代微米技术，而且硅材料也有可能被其他材料所取代。然而，建立在无论如何小尺寸的技术，甚至“皮米技术”（pico-technology），都必须和现实世界联系起来，即实用的技术一定是从纳米到微米，再到毫米等多尺度技术的结合。因此，纳米技术在微系统中的应用是新型纳米材料和器件与硅技术的结合和集成。本书的目的就是把这样一个主题和未来呈现给读者。

我很荣幸地和周兆英教授及林立伟教授一起编写本书。首先感谢为本书撰写各章节的各位作者，同时也感谢周教授在本书编写过程中的具体领导和精心筹划。希望本书能为推动中国和世界微米纳米技术的结合起到一定的积极作用。

王中林，美国佐治亚理工学院 (Georgia Institute of Technology), Atlanta USA  
中国国家纳米科学中心，北京

在过去的几十年里，微电子技术应用到包括可移动机械元件的微器件制造中，激发了微/纳米传感器和致动器研究的出现。半导体材料的多功能性以及 VLSI 制版技术的微小化预示了比传统机械元件具有更高性能和更好性价比的新系统的出现。这些微系统的关键元件和普通元件基本上基于两部分。首先，各种微制造过程，如表面加工、体积加工和热压注塑塑料模以及注射模的设计和制造革新将器件的概念更新为更好、更便宜的多功能系统。其次，新的和原有的基础科学和技术基础促进了新发现的过程。早期的研究结果在近期变成了成熟的产品，如微压力传感器、加速度传感器和陀螺仪。

随着 MEMS（微机电系统）和纳米技术研究的出现，在许多领域已经有大量的资金和资源的投入。传统上说，美国、日本和欧洲是三个典型的研究动力工厂，主导了世界上大部分的研究活动。这种主导也反映到了 MEMS 和纳米技术领域。但是，近期亚

洲各种领域研究的快速进步已经给 MEMS 和纳米技术的研究造成了显著的影响。例如，韩国成为了 13th International Conference of Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems in 2005 的主办国，该会议是每两年在美国、欧洲和亚洲轮流举行的 MEMS 领域最大的会议。中国将主办 2011 年的会议，这一事实清楚地证明了中国内地的研究是被全世界认同的。同时，在中国有 100 多所大学、500 多个原理研究人员在 MEMS 领域内工作。而且据估计，未来的 5 年内，中国在 MEMS 领域将会有 1.5 亿多美元的投入。所有这些都表示，在不久的将来，中国将成为微米纳米研究的动力工厂。

本书综合了力学、材料学、制造和产品知识，重点放在 MEMS 和纳米技术。非常感谢一些国内外主要的 MEMS/Nano 研究人员为本书撰写不同的章节。在此向撰写“微/纳流体力学”章节的美国加州大学洛杉矶分校的何志明教授、撰写“MEMS 介绍”章节的美国加州理工学院的戴聿昌教授、撰写“光 MEMS 和纳米光子”章节的美国加州大学伯克利分校的吴明强教授、撰写“MEMS 设计”章节的中国台湾清华大学的苏育全教授、撰写“MEMS 封装介绍”章节的加拿大不列颠哥伦比亚大学的乔木教授和中国台湾交通大学的郑裕庭教授、撰写“集成 CMOS 检测电路的表面微机械加速度计”章节的云维杰博士以及撰写“汽车中的 MEMS”的张世加博士表示感谢。非常明显，正是这些作者的贡献才有本书的出现。这些以及其他的 MEMS/Nano 研究者非常愿意看到研究质量和数量会在不久的将来更上一层楼，正如近年来的情况一样，了解这一点可能是更重要的。我们热切地希望本书能够成为 MEMS/Nano 领域出版的能促进中国内地 MEMS/Nano 研究的书籍之一。

林立伟，美国加州大学伯克利分校 (U. C. Berkeley)

# 目 录

编者的话

## 第一篇 微系统和纳米技术基础

<b>第 1 章 纳时代的信息电子学</b> .....	李志坚 清华大学	3
概述 .....		3
1.1 纳时代的 CMOSFET .....		3
1.1.1 CMOS 技术进展 .....		3
1.1.2 小尺寸 MOSFET 的次级效应 .....		5
1.2 纳米 MOSFET 新结构新材料 .....		9
1.2.1 纳米 MOSFET 新结构 .....		9
1.2.2 MOS 结构新材料 .....		11
1.2.3 终极(ultimate)MOSFET——传统 CMOS 技术极限 .....		12
1.2.4 ULSI 连接 .....		14
1.2.5 小结 .....		15
1.3 新兴纳电子器件 .....		15
1.3.1 量子共振隧道器件 .....		16
1.3.2 单电子晶体管 .....		18
1.3.3 纳米碳管电子学 .....		20
1.3.4 自旋电子学 .....		24
1.3.5 超导量子干涉器件 .....		28
1.3.6 分子电子学 .....		33
1.3.7 NEMS .....		37
1.3.8 小结 .....		42
1.4 量子信息处理 .....		42
1.4.1 SOC 和传统信息处理模式的革命 .....		42
1.4.2 量子信息处理的基本框架 .....		44
1.4.3 量子信息处理的物理实现 .....		53
1.4.4 小结 .....		62
结束语 .....		62

作者介绍 .....	62
参考文献 .....	62
<b>第 2 章 微/纳流体力学</b> .....	
..... 何志明 美国加州大学洛杉矶分校 戴聿昌 美国加州理工学院	69
概述 .....	69
2.1 物理常数 .....	70
2.2 基于水动力的流体系统 .....	72
2.3 水动力场对生物体的直接操纵 .....	73
2.3.1 单细胞操控 .....	73
2.3.2 DNA 操控 .....	73
2.4 电动力场 .....	74
2.4.1 电热流 .....	74
2.4.2 电渗 .....	74
2.4.3 AC 电渗 .....	75
2.4.4 电润湿 .....	76
2.4.5 电泳 .....	76
2.4.6 介电泳 .....	77
2.5 微流体生物分析过程 .....	78
2.5.1 样品浓缩 .....	78
2.5.2 混合 .....	79
2.5.3 分离 .....	79
2.5.4 电化学 DNA 探测 .....	80
2.5.5 蛋白质探测 .....	81
结束语 .....	82
致谢 .....	83
作者介绍 .....	83
参考文献 .....	84
<b>第 3 章 微系统中的材料问题</b> .....	蔡炳初 上海交通大学 88
概述 .....	88
3.1 微系统中材料失效的主要机制 .....	89
3.1.1 断裂机制 .....	89
3.1.2 黏附(stiction)、摩擦和磨损 .....	92
3.1.3 断口分析 .....	93
3.2 微系统中微结构材料机械性能测试方法 .....	93



3.2.1	微拉伸法	94
3.2.2	共振频率法	94
3.2.3	鼓胀(bulge)法	95
3.2.4	纳米压痕法	97
3.2.5	梁弯曲法	98
3.2.6	疲劳特性和断裂韧性的测试方法	99
3.3	微系统中的结构材料	101
3.3.1	硅及硅化物的机械性能	102
3.3.2	聚对二甲苯的性能及其应用	108
3.4	微摩擦学材料	113
3.4.1	自组装单分子膜	113
3.4.2	超薄硬质膜	115
	结束语	116
	作者介绍	117
	参考文献	117
<b>第4章</b>	<b>微机电系统的数值仿真方法</b> .....	<b>黄京芳 美国北卡罗来纳大学教堂山分校</b> 120
	概述	120
4.1	微机电系统的数学模型	120
4.1.1	多尺度问题	121
4.1.2	多物理问题	122
4.2	数值方法简介	123
4.2.1	有限差分方法	123
4.2.2	有限元方法	125
4.2.3	积分方程方法	127
4.2.4	方法比较	130
4.3	积分方程与快速算法	131
4.3.1	解的积分形式表示方法	131
4.3.2	快速算法	135
4.4	积分方程方法的进展与应用	150
4.4.1	积分方程的发展	150
4.4.2	快速算法的进展	154
4.4.3	积分方程与快速算法的应用	157
	结束语	160
	作者介绍	161

参考文献	161
<b>第 5 章 多学科交叉中的纳米力学</b>	郑泉水 王立峰 徐志平 清华大学 167
概述	167
5.1 纳米力学模型	168
5.1.1 连续介质力学模型	169
5.1.2 经验原子模型	170
5.1.3 紧束缚与半经验模型	172
5.1.4 第一原理模型与从头算方法	173
5.2 纳米管的力学	174
5.2.1 碳纳米管的分子结构	174
5.2.2 碳纳米管基本力学性能的实验测量	175
5.2.3 碳纳米管基本力学性能的理论研究	179
5.2.4 断裂机制和拉伸破坏强度	182
5.2.5 剪切强度和层间滑移	183
5.2.6 范德华相互作用影响下的奇异力学行为	185
5.3 碳纳米管的力学应用	186
5.3.1 碳纳米管增强复合材料	186
5.3.2 纳机电器件:振荡器	187
5.3.3 力电耦合及其应用	188
结束语	190
作者介绍	190
参考文献	191
<b>第 6 章 纳米结构与单分子的电子输运性质</b>	赵爱迪 侯建国 中国科学技术大学 198
概述	198
6.1 量子传导与电子隧穿	199
6.1.1 量子传导与 Landauer-Büttiker 公式	199
6.1.2 电子隧穿与一维隧穿模型	201
6.2 纳米结构电子输运系统	203
6.2.1 纳尺度电子输运系统及其构造	203
6.2.2 单势垒隧道结与扫描隧道显微镜	205
6.2.3 双势垒隧道结与单电子现象	209
6.3 实验与进展	212

6.3.1 单个原子的电子输运 .....	212
6.3.2 单分子的电子输运 .....	215
6.3.3 纳米团簇与颗粒 .....	223
6.3.4 分子单层膜 .....	228
结束语 .....	231
作者介绍 .....	231
参考文献 .....	232
<b>第 7 章 纳米材料的结构分析和表征 .....</b>	
..... 周维列 美国新奥尔良大学 王中林 美国佐治亚理工学院	239
概述 .....	239
7.1 X 射线对纳米粒子的表征 .....	239
7.1.1 小粒子的衍射 .....	240
7.1.2 纳米粒子衍射的特性 .....	240
7.1.3 晶体粒子 .....	240
7.1.4 非晶结构 .....	241
7.2 扫描电子显微镜在观察纳米材料中的应用 .....	242
7.2.1 简介 .....	242
7.2.2 扫描电子显微镜的原理 .....	243
7.2.3 扫描电子显微镜的构造 .....	244
7.2.4 扫描电子显微镜成像原理 .....	246
7.3 纳米材料的透射电子显微学及能谱学研究 .....	251
7.3.1 透射电子显微学 .....	251
7.3.2 高分辨 TEM 像 .....	252
7.3.3 纳米材料中的缺陷 .....	257
7.3.4 定量纳米分析 .....	260
结束语 .....	263
作者介绍 .....	263
参考文献 .....	264

## 第二篇 微 系 统

<b>第 8 章 MEMS 介绍 .....</b>	<b>戴聿昌 美国加州理工学院</b>	<b>271</b>
概述 .....		271
8.1 什么是 MEMS .....		271
8.2 MEMS 技术 .....		272

8.2.1	与半导体技术紧密联系 .....	272
8.2.2	MEMS 基础技术 .....	272
8.3	MEMS 的简单历史 .....	275
8.3.1	电子微小化的开始 .....	276
8.3.2	机械微小化的开始 .....	276
8.3.3	MEMS 的应用和前景 .....	279
8.4	MEMS 的未来 .....	280
8.4.1	“多学科”和“系统”是关键词 .....	280
8.4.2	未来有希望的方向 .....	281
	结束语 .....	281
	作者介绍 .....	281
	参考文献 .....	282
<b>第 9 章</b>	<b>微机电传感器 .....</b>	<b>鲍敏杭 复旦大学 287</b>
9.1	压阻压力传感器 .....	287
9.1.1	金属应变计 .....	287
9.1.2	应变式力敏传感器 .....	288
9.1.3	半导体的压阻效应 .....	288
9.1.4	压阻式压力传感器 .....	289
9.1.5	微机械加工的硅压阻式压力传感器 .....	290
9.1.6	表压、绝压和差压压力传感器 .....	291
9.2	压阻式加速度传感器 .....	292
9.3	电容式压力传感器和加速度传感器 .....	294
9.3.1	电容式压力传感器 .....	294
9.3.2	电容式加速度传感器 .....	295
9.4	电容式麦克风 .....	296
9.5	谐振式传感器 .....	297
9.6	振动式微机械陀螺 .....	298
9.7	集成的微机械加速度传感器——微机电系统 .....	300
	作者介绍 .....	302
	参考文献 .....	302
<b>第 10 章</b>	<b>微致动器 .....</b>	<b>邹峻 美国得克萨斯 A&amp;M 大学 304</b>
	概述 .....	304
10.1	微型静电致动器 .....	305
10.1.1	平行平板电容式微型静电致动器 .....	305
10.1.2	交叉指状电容致动器 .....	307

10.2 微型热致动器	310
10.2.1 利用单一材料的热致动	311
10.2.2 双金属热致动器	312
10.2.3 利用物质相变的热致动	314
10.2.4 热气致动	315
10.3 微型电磁致动器	316
10.3.1 利用电磁场进行的微致动	316
10.3.2 利用微加工的磁性材料进行的微致动	317
10.3.3 利用集成电磁线圈进行磁致动	320
10.4 微型压电致动器	322
10.4.1 悬臂梁式微型压电致动器的应用	323
10.4.2 薄膜式微型压电致动器的应用	324
10.5 其他微型致动器	325
10.5.1 形状记忆合金微型致动器	326
10.5.2 利用外界气压/液压驱动的微型致动器	326
10.5.3 基于电化学反应的微型致动器	326
10.6 常用微型致动器的结构、工艺和性能比较	327
作者介绍	327
参考文献	327
<b>第 11 章 MEMS 设计</b>	
..... 苏育全 中国台湾清华大学 林立伟 美国加州大学伯克利分校	332
概述	332
11.1 MEMS 设计工具	334
11.1.1 CAD 框架结构	334
11.1.2 分析、优化和加工工具	335
11.2 基于体硅微加工的 MEMS 设计	336
11.3 基于表面微加工的 MEMS 设计	342
11.4 未来趋势与总结	347
作者介绍	348
参考文献	349
<b>第 12 章 微型机电系统的加工制造工艺和技术</b>	
..... 王万军 连崑 美国路易斯安娜州立大学	353
12.1 微加工技术和分类	353
12.2 光刻技术的简介	355
12.2.1 几个基本概念	355



12.2.2	感光胶的基本构成和紫外感光胶的感光频谱	356
12.2.3	光刻的基本流程	356
12.2.4	用于光刻的光源、光刻的分辨率及其衍射现象	358
12.2.5	多层接触式光刻的校准要求	359
12.2.6	掩膜板的设计制造	360
12.3	硅表面加工技术	361
12.3.1	硅表面工艺的简单介绍	361
12.3.2	硅表面工艺的基本工艺流程	362
12.4	湿法刻蚀技术	365
12.4.1	硅片的表面清洗	366
12.4.2	各向同性刻蚀	366
12.4.3	各向异性刻蚀	367
12.4.4	湿法刻蚀的掩膜板	371
12.5	干法刻蚀技术	372
12.5.1	等离子体和等离子发生器	372
12.5.2	等离子刻蚀的机理	373
12.5.3	反应离子刻蚀(RIE)的基本原理	375
12.5.4	硅深反应离子刻蚀	376
12.6	SU-8 的紫外光刻技术及其应用	377
12.6.1	SU-8 的物理、化学和电特性	378
12.6.2	SU-8 紫外光刻的基本流程和技术介绍	379
12.6.3	衍射问题的产生及其减少措施	383
12.6.4	SU-8 的倾斜曝光	385
12.6.5	紫外光刻 SU-8 的应用	386
12.7	LIGA 制造技术	389
12.7.1	用于 X 射线 LIGA 工艺的光源	390
12.7.2	用于 X 射线 LIGA 工艺的光刻胶——PMMA	391
12.7.3	用于 X 射线光刻的掩膜板	393
12.7.4	X 射线光刻后的 PMMA 的显影	396
12.7.5	电镀/电铸成形技术	396
12.7.6	注塑/热压成形技术	397
	作者介绍	398
	参考文献	399
<b>第 13 章 光 MEMS 和纳米光子</b>		
吴明强 美国加州大学伯克利分校 蔡睿哲 中国台湾大学 Wibool Piyawatta-		

nametha 美国斯坦福大学 Pamela R. Patterson 美国 Malibu, LLC, HRL 实验室	402
概述	402
13.1 致动机制	402
13.1.1 静电致动	402
13.1.2 磁致动	403
13.1.3 热致动	404
13.1.4 其他致动机制	404
13.2 应用	404
13.2.1 显示、成像和显微技术	404
13.2.2 光通信	412
13.2.3 纳米光子学	430
结束语	436
作者介绍	436
参考文献	437
<b>第 14 章 MEMS 封装介绍</b> 乔木 加拿大不列颠哥伦比亚大学 郑裕庭 中国台湾交通大学 林立伟 美国加州大学伯克利分校	447
概述	447
14.1 MEMS 封装的基本原理	447
14.2 目前的 MEMS 封装方法	449
14.3 用于 MEMS 封装的键合工艺	450
14.3.1 MEMS 封装的熔合键合	450
14.3.2 用于 MEMS 封装的阳极键合	451
14.3.3 环氧键合(黏合剂键合)	452
14.3.4 共晶封装	452
14.3.5 焊料键合	452
14.3.6 局部加热和键合	453
14.4 密封/真空封装和应用	454
14.4.1 集成微加工工艺	454
14.4.2 后封装工艺	456
14.4.3 局部加热和键合	458
14.4.4 混合方法	460
14.5 封装可靠性和加速测试	461
14.6 将来的趋势和总结	464
作者介绍	465
参考文献	466

## 第三篇 纳米技术

<b>第 15 章 纳米管、纳米线和纳米带</b> .....	
王中林 王旭东 美国佐治亚理工学院 高瑞平 国家自然科学基金委员会	475
概述 .....	475
15.1 一维纳米材料的合成工艺 .....	476
15.1.1 一维纳米材料的合成工艺简介 .....	476
15.1.2 热挥发法的试验过程 .....	476
15.1.3 VLS 生长机理 .....	477
15.2 纳米管结构 .....	478
15.2.1 碳纳米管的结构和形貌 .....	479
15.2.2 碳纳米管的性质 .....	484
15.3 纳米线结构 .....	489
15.3.1 纳米线结构的尺寸控制 .....	489
15.3.2 纳米线的有序阵列 .....	491
15.4 纳米带结构 .....	493
15.4.1 氧化锌纳米带 .....	493
15.4.2 纳米带家族 .....	500
15.4.3 纳米带的性质研究 .....	501
15.5 一维纳米材料的应用前景 .....	505
15.5.1 激光和发光二极管器件 .....	505
15.5.2 场效应管及场发射枪 .....	506
15.5.3 化学及生物传感器 .....	507
15.5.4 在复合材料中的应用 .....	509
结束语 .....	510
致谢 .....	510
作者介绍 .....	510
参考文献 .....	511
<b>第 16 章 半导体纳米晶体——量子点、量子线、量子棒</b> .....	
..... 彭作岩 美国 Evident Technology 公司	517
16.1 半导体纳米晶体简介 .....	517
16.2 半导体纳米晶体粒子的电子结构 .....	519
16.3 半导体纳米晶体粒子的合成及表征 .....	522
16.3.1 半导体纳米晶体粒子在无机基体材料中的合成 .....	522

16.3.2	高温配位溶剂金属有机化合物合成法 .....	525
16.3.3	氧化镉及其衍生生成法 .....	528
16.3.4	半导体纳米晶体的表征 .....	530
16.4	半导体纳米晶体的形状及结构控制 .....	534
16.5	半导体纳米晶体的核-壳(core-shell)结构 .....	539
16.6	半导体纳米晶体在生物检测上的应用 .....	543
	作者介绍 .....	548
	参考文献 .....	548
<b>第 17 章 STM 和 AFM 在纳米加工和制造中的应用 .....</b>		
	..... 张益 胡钧 中国科学院上海应用物理研究所 肖旭东 香港科技大学	553
	概述 .....	553
17.1	对单个原子和分子的操纵和加工 .....	553
17.2	表面的纳米刻蚀和加工 .....	557
17.3	基于纳米电化学反应的表面加工 .....	557
17.4	利用场蒸发现象制作金属纳米结构 .....	559
17.5	纳米蘸笔技术 .....	559
17.6	纳米嫁接技术 .....	561
17.7	SPM 在纳米加工和制造中的前景 .....	562
	作者介绍 .....	562
	参考文献 .....	563
<b>第 18 章 纳米尺度制造 .....</b>		
	曾安培 美国亚利桑那州立大学 Andrea Notargiacomo 意大利罗马第三大学	565
	概述 .....	565
18.1	电子束光刻技术 .....	566
18.1.1	投影光刻 .....	566
18.1.2	直写和剥离工艺 .....	567
18.2	离子束光刻技术 .....	569
18.2.1	离子投影光刻 .....	569
18.2.2	聚焦离子束直写/铣削 .....	570
18.2.3	聚焦离子束直写/注入 .....	571
18.2.4	聚焦离子束直写/沉积 .....	572
18.3	扫描探针显微镜光刻 .....	574
18.3.1	扫描隧道显微镜光刻 .....	574
18.3.2	原子力显微镜(AFM)光刻 .....	576