



国际制造业先进技术译丛

WILEY

# 陶瓷组装 及连接技术

## Ceramic Integration and Joining Technologies

[美]米苏佳·辛格(Mrityunjay Singh)

[日]大司·达树(Tatsuki Ohji)

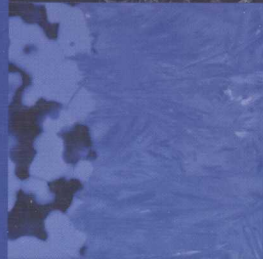
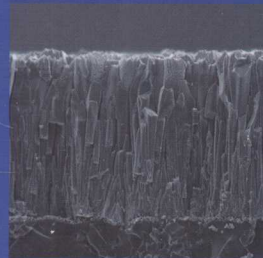
[美]拉吉夫·阿莎娜(Rajiv Asthana)

[德]桑杰·马瑟(Sanjay Mathur)

林铁松 曹健 亓钧雷

主编

译



国际制造业先进技术译丛

# 陶瓷组装及连接技术

Ceramic Integration and Joining Technologies

[美] 米苏佳·辛格 (Mrityunjay Singh)

[日] 大司·达树 (Tatsuki Ohji)

[美] 拉吉夫·阿莎娜 (Rajiv Asthana)

[德] 桑杰·马瑟 (Sanjay Mathur)

林铁松 曹健 亓钧雷

主编

译



机械工业出版社

Copyright© 2011 by The American Ceramic Society.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Ceramic Integration and Joining Technologies: From Macro to Nanoscale, ISBN 978-0-470-39122-8, by Mrityunjay Singh et al, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2015-0856 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷组装及连接技术/ (美) 辛格 (Singh. M.) 等主编; 林铁松, 曹健, 亓钧雷译. —北京: 机械工业出版社, 2016. 4

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文: Ceramic Integration and Joining Technologies: From Macro to Nanoscale

ISBN 978-7-111-53219-4

I. ①陶… II. ①辛…②林…③曹…④亓… III. ①陶瓷—连接技术 IV. ①TQ174

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 051657 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 陈保华 责任编辑: 陈保华 徐 强

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 常天培

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 37 印张 · 824 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-53219-4

定价: 189.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203 金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

策划编辑: 010-88379734 教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面防伪标均为盗版

本书从宏观到纳米尺度介绍了陶瓷组装及连接技术。不仅全面地介绍了陶瓷组装及连接结构、界面、应力等方面的基础理论、连接原则,而且从航空航天、核能和热电能源、微机电系统、固体氧化物燃料电池、多芯片组件以及纳米生物等不同领域,对于目前实际应用过程中的陶瓷先进组装及连接技术及其面临的挑战进行了系统的介绍。本书介绍了陶瓷组装及连接的前沿技术,具有先进性。本书是目前最为全面、系统的介绍陶瓷组装、连接技术及其应用方面的著作,内容丰富实用。

本书可作为陶瓷工程技术人员与研究人员的参考书,也可作为材料科学与工程、机械工程、电气和电子工程等专业的本科生和研究生的参考书。

## 译 丛 序

### 一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是在20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面技术的交叉、融合和集成。先进制造技术综合应用于产品全生命周期的整个制造过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，可实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术方面主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式方面主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

### 二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术的应用情况等。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，

对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,虽然现在已有网络通信、计算机等信息传输和储存手段,但图书仍将因其具有严谨性、系统性、广泛性、适应性、持久性和经济性的特点而长期存在。纸质图书有更好的阅读优势,可满足不同层次读者的阅读习惯,同时它具有长期的参考价值和收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献,为我国的制造业科技人员引进、吸纳国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的先进制造技术著作,从而提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平的不断进步。

### 三、选译严谨质高面广

(1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

(2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

(3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

(4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

(5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员。高等院校的教师和学生,可以按照不同层次和水平要求各取所需。

### 四、衷心感谢不吝赐教

首先要感谢许多热心支持“国际制造业先进技术译丛”出版工作的专家学者,他们积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐评审和翻译的知名专家,特别要感谢承担翻译工作的译者,对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切的敬意,同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

希望本套丛书能对广大读者的学习与工作提供切实的帮助,希望广大读者不吝赐教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

## 译者序

本书介绍了陶瓷组装与连接技术多年来的研究成果和最新进展，涵盖了多学科、跨尺度的理论知识与实用技术，有助于推动先进制造领域的技术发展。本书可作为材料加工工程、机械工程、冶金工程学科的本科生和研究生的教材与参考书，也可满足对该领域感兴趣的从业者和研究者的教育和研究需求。本书编者均为工业界和学术界的科研一线知名专家，第一作者米苏佳·辛格教授（Mrityunjay Singh）目前为 NASA Glenn 研究中心俄亥俄航空材料研究所首席科学家，世界陶瓷科学院院士，美国陶瓷学会理事，美国材料学会理事，在 NASA 公共服务、外太空开发等方面均做出了突出的贡献，是材料加工、连接与组装领域的国际顶级专家。

本书揭示了从宏观至微观的多尺度组装与连接技术的关键问题，首先介绍了宏观尺度的组装科学与技术，具体包括陶瓷和陶瓷基复合材料的先进钎焊与扩散连接技术、陶瓷-陶瓷和陶瓷-金属的空气钎焊、碳/碳复合材料-金属的组装技术及碳-金属间的相互作用；接下来介绍了能源领域的组装问题，具体包括铁氧体及功率电感器件、氧化物热电发电装置、固体氧化物燃料电池、传感器和功能复合材料及器件的组装与连接技术、多功能复合热障涂层、金属互联界面的可靠性、钛酸锶钡薄膜的组装与气溶胶沉积技术；最后介绍了纳米与生物领域的组装问题，具体包括先进纳米组装方法、基于薄膜技术的纳米组装、纳米线规模化集成的发展及挑战、喷墨打印技术及人造器官的生物组装。

感谢米苏佳·辛格教授的信任，将本书的翻译推荐给了译者，在翻译过程中也得到了作者的大力支持与诸多帮助。本书的翻译是由哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室从事相关领域研究的学者共同完成的。全书共分为 24 章，林铁松翻译了第 2~4 章和第 8~10 章，曹健翻译了第 1 章、第 5~7 章、第 17~24 章、元钧雷翻译了第 11~16 章。最后由林铁松和曹健对全书进行了审校。翻译中还得到了哈尔滨工业大学新材料及异种材料连接课题组的潘瑞、林盼盼、郭伟、刘贵铭、张鹏哲、王义峰、代翔宇、陈哲、李瑞、苏帅、林景煌等研究生的帮助，在此表示衷心的感谢。

最后，由于译者水平及经验所限，译文中错误之处在所难免，衷心希望广大读者提出宝贵的意见和建议。

译者

# 前 言

为了开发新材料并挖掘它们的使用潜力，研究者正在不断研究和开发跨尺度的组装技术。目前迫切需要改进或革新现有组装方法，以将新兴材料集成到元件、组件、设备和系统中。组装技术不仅应用普遍，更打破了学科界限，它是连接材料创新与工业生产的核心关键技术。然而，目前还没有关于先进材料组装的专业书籍，尤其缺乏针对陶瓷材料（这种为不同组装领域研究提供桥梁的材料）先进组装研究的权威概括性书籍，只有该领域的工作和研究人员或者有特殊兴趣的研究者才能掌握相关组装技术。

鉴于组装技术的广泛应用及当前对其全面理解的欠缺，我们决定撰写本书以给出不同领域内陶瓷组装的技术特点和发展状况。考虑到技术的多样性与统一性，本书共24章，涉及跨学科和跨尺度的陶瓷连接和组装技术。书中包含了不同领域中宏观、微观和纳米尺度的连接和组装问题，具体涉及航天、核能和热电能源、微机电系统、固体氧化物燃料电池、多芯片模块、人工器官等众多领域。本书将组装广义上定义为先进技术的核心推动力。

本书作者均为一线研究人员和各自专业技术领域的从业人员，来自于12个不同国家的大学、企业、政府和私人研究机构。他们从现代视角介绍了各自领域核心应用中如何看待和应用组装技术。我们希望本书可以激励陶瓷组装方法的新思考，交换不同领域的想法与信息，同时为新材料组装到先进组件和系统中提供开创性的解决方案。

现有经典学科一般是有组织的知识体系，但是新知识不会以相同的逻辑和结构再次出现。新体系通常源自不同领域内缺乏共性的不断探索的协同创新。我们相信协同创新可以将不同群组的从业者带到一个公共平台上。跨洲际的世界级教育和研究机构已经开始将组装知识带上了他们的专业研究日程，以期在这个材料和制造基础领域培养学生。我们相信本书可以满足对连接和组装技术感兴趣的从业者和研究生的教育和研究需求。本书的目的不是要建立连接和组装技术的教学基础，而是提供该领域的深度前沿知识，这些知识的重要性已经得到了广泛认可。

感谢所有的作者和他们有价值的工作。我们还要感谢 John Wiley & Sons 出版社和他们的出版团队，尤其是感谢 Rebekah Amos 女士在本书准备过程中的支持。

**Mrityunjay Singh**

俄亥俄航空研究所，美国国家宇航局 Glenn 研究中心，美国

**Tatsuki Ohji**

先进工业科学与技术国家实验室 (AIST)，日本

**Rajiv Asthana**

威斯康星大学斯托特分校，美国

**Sanjay Mathur**

科隆大学，德国



# 目 录

译丛序  
译者序  
前 言

第 1 章 跨尺度陶瓷组装：技术、挑战与机遇	1
1.1 引言	1
1.2 先进技术系统中的组装问题	1
1.2.1 微电子和纳米电子	1
1.2.2 能源	2
1.2.3 航空和地面运输	2
1.3 跨领域和跨尺度组装	3
1.3.1 宏观组装的科学与技术	3
1.3.2 发电装置和器件制造中的组装问题	4
1.3.3 纳米尺度和生物系统的组装问题	7
第 2 章 陶瓷组装部件的先进钎焊技术	10
2.1 简介	10
2.2 润湿性、残余应力和接头可靠性	11
2.3 接头设计	13
2.4 陶瓷基复合材料的连接	16
2.4.1 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ (质量分数为 30%) 的连接	17
2.4.2 SiC 纤维增强硅硼酸盐玻璃的连接	21
2.4.3 莫来石-莫来石陶瓷基复合材料的连接	22
2.5 总结	23
致谢	23
参考文献	24
第 3 章 核工业中陶瓷基复合材料的连接及组装	27
3.1 简介	27
3.2 国际热核聚变实验堆	27
3.2.1 陶瓷基复合材料的连接在 ITER 上的应用	28
3.2.2 为什么 ITER 中使用 C/C 复合材料	29
3.2.3 ITER 中 C/C 复合材料连接的设计问题	30
3.2.4 ITER 中 C/C 复合材料的连接技术	32
3.2.5 C/C-Cu 接头的力学性能测试	37

3.2.6	无损检测 .....	39
3.2.7	ITER 中 C/C-Cu 界面热冲击和高热流测试 .....	41
3.2.8	欧洲联合核聚变反应堆 .....	42
3.2.9	JET 中 C/C 复合材料的连接技术和设计问题 .....	43
3.2.10	总结 .....	44
3.3	ITER 以外的聚变反应堆 .....	45
3.3.1	为什么选择 SiC/SiC 复合材料 .....	47
3.3.2	SiC/SiC 复合材料的连接材料和连接技术 .....	48
3.3.3	连接的 SiC/SiC 材料特性 .....	52
3.4	CMCs 在先进裂变反应堆中的应用 .....	53
3.5	总结 .....	54
	致谢 .....	54
	参考文献 .....	55
	网络资源 .....	65
<b>第 4 章</b>	<b>大气中钎焊：陶瓷-陶瓷和陶瓷-金属连接的新方法</b> .....	<b>66</b>
4.1	简介 .....	66
4.2	陶瓷钎焊的方法 .....	67
4.3	空气钎焊的概念 .....	69
4.4	空气钎焊钎料的设计：Ag-CuO 体系 .....	71
4.4.1	相平衡 .....	72
4.4.2	基体的润湿 .....	73
4.4.3	接头强度 .....	81
4.4.4	推荐的空气钎焊条件 .....	87
4.5	Ag-CuO 体系的成分改良 .....	88
4.5.1	使用金属 Pd 和 Al 进行合金化 .....	88
4.5.2	使用金属氧化物 TiO <sub>2</sub> 进行合金化 .....	91
4.5.3	添加难熔颗粒 .....	93
4.6	总结 .....	95
	参考文献 .....	96
<b>第 5 章</b>	<b>碳化硅陶瓷的扩散连接——复杂陶瓷构件的关键制造技术</b> .....	<b>103</b>
5.1	简介 .....	103
5.2	实验 .....	105
5.3	结果与讨论 .....	107
5.4	总结 .....	115
	致谢 .....	115
	参考文献 .....	115
<b>第 6 章</b>	<b>C/C 复合材料-金属热管理系统的组装技术</b> .....	<b>118</b>
6.1	简介 .....	118

6.2 用于热管理的材料 .....	119
6.3 C/C 复合材料 .....	121
6.4 碳和 C/C 复合材料与金属的组装 .....	122
6.4.1 润湿性 .....	122
6.4.2 钎焊 .....	126
6.5 接头完整性、微观组织和组成 .....	129
6.6 C-C 复合材料/金属接头力学性能 .....	131
6.6.1 接头强度和断口组织 .....	131
6.6.2 显微硬度 .....	133
6.7 热和热机械方面的讨论 .....	134
6.7.1 热膨胀失配及残余应力 .....	134
6.7.2 钎焊接头导热性 .....	136
6.8 总结和未来前景 .....	137
参考文献 .....	137
<b>第7章 连接和组装过程中碳-金属体系间的相互作用 .....</b>	<b>141</b>
7.1 简介 .....	141
7.2 与碳不反应的金属在石墨和金刚石表面的润湿 .....	141
7.3 第Ⅷ族金属在石墨上的润湿 .....	142
7.4 与碳接触的碳化物形成金属 .....	145
7.5 与碳不反应的熔体中添加碳化物形成金属后在石墨上的润湿 .....	149
7.6 熔体润湿固相时热力学和界面活性的相互关系 .....	151
7.7 含有反应和非反应金属添加剂的Ⅷ族金属熔体在石墨上的润湿性 .....	152
7.8 相图、硬化后界面结构和润湿等温线类型的关系 .....	159
7.9 高压环境对金属熔体在石墨和金刚石上润湿的影响 .....	160
7.10 总结 .....	162
参考文献 .....	164
<b>第8章 陶瓷电路中铁氧体及功率电感器件的组装 .....</b>	<b>168</b>
8.1 简介 .....	168
8.2 器件物理 .....	170
8.3 铁氧体的合成 .....	176
8.4 电磁特性 .....	177
8.5 嵌入式功率电感器 .....	181
8.6 多层陶瓷变压器 .....	184
8.7 总结 .....	189
致谢 .....	189
参考文献 .....	190
<b>第9章 氧化物热电发电装置 .....</b>	<b>192</b>

9.1	简介	192
9.2	热电发电	192
9.3	氧化物热电材料	193
9.3.1	P型氧化物	193
9.3.2	N型氧化物	196
9.4	器件工艺学	199
9.4.1	P型块体材料	199
9.4.2	N型块体材料	203
9.5	模块	208
9.5.1	实验过程	208
9.5.2	结果与讨论	209
9.6	总结	210
	参考文献	211
<b>第10章</b>	<b>固体氧化物燃料电池(SOFC)及其他电化学发电装置的组装技术</b>	<b>213</b>
10.1	简介	213
10.2	电化学反应器的基础	214
10.2.1	电化学活性	214
10.2.2	纳米结构控制对电化学反应的影响	214
10.2.3	SOFC发展中电化学反应的控制及其应用	215
10.2.4	电极支撑的薄膜电解质的结构控制	217
10.3	SOFC及其相关研究与发展	217
10.4	微型SOFC的发展	218
10.4.1	研究背景	218
10.4.2	微管状电池的制造	219
10.4.3	小型高性能微燃料电池束的发展	220
10.4.4	低温SOFC的发展和紧凑型模块的制造	221
10.4.5	3D控制的微SOFC的发展:蜂窝状电化学反应器	222
10.5	电化学DE-NO <sub>x</sub> 反应器及清洁汽车技术的其他应用	223
10.5.1	高性能电化学反应器的发展	223
10.5.2	用于NO <sub>x</sub> /PM同时净化的电化学反应器的发展	228
	参考文献	229
<b>第11章</b>	<b>传感器组装技术</b>	<b>232</b>
11.1	简介	232
11.2	微型点胶工艺	233
11.2.1	喷墨和点胶器	233
11.2.2	3D直写技术的适用性	234
11.2.3	陶瓷浆料的流变特性	234

11.2.4 浆料的流变性能	235
11.2.5 沉积速率的监控	235
11.3 装备制造	236
11.3.1 电炉型微型装置	236
11.3.2 微型二氧化锡气敏元件	236
11.3.3 采用喷注器的 TE 气体传感器元件	237
11.3.4 陶瓷触媒的沉积	237
11.4 传感器性能	238
11.4.1 触媒的尺寸和厚度	238
11.4.2 陶瓷触媒的稳定长效性	239
11.4.3 热电器件触媒	239
11.5 总结	241
参考文献	241
<b>第 12 章 功能复合材料和纳米光子及光电子器件的芯片集成</b>	<b>243</b>
12.1 单片集成电路	243
12.1.1 对接接头生长	243
12.1.2 选区生长	244
12.1.3 偏移量子阱	244
12.1.4 量子阱混合	245
12.1.5 多步增长单片集成电路	245
12.1.6 表面钝化和整平	246
12.1.7 通孔和沟道金属互连	247
12.2 纳米加工技术	247
12.2.1 光刻	248
12.2.2 扫描电子束光刻技术	248
12.2.3 SPL	249
12.2.4 连续图形结构表面	249
12.2.5 并行表面图形化	250
12.2.6 边缘光刻	250
12.2.7 软光刻技术	253
12.3 一般的自组装技术	255
12.3.1 模板化的自组装	256
12.3.2 化学辅助的组装	258
12.3.3 干燥媒介(蒸发诱导)自组装	259
12.3.4 磁、光或电导向的自组装	259
12.3.5 分界面的自组装	260
12.3.6 择形自组装	260

12.4	SAMs .....	261
12.4.1	SAMs 基质类型 .....	261
12.4.2	从气体和液体装配的机制 .....	262
12.4.3	制备 SAMs .....	262
12.4.4	SAMs 在现有纳米制造工业中的应用 .....	263
12.5	纳米晶体的组装 .....	264
12.5.1	外延生长自组织固态量子点 .....	264
12.5.2	胶体量子点的自组装 .....	264
12.5.3	聚合物控制纳米颗粒分布 (根据聚合状态) .....	266
12.5.4	自组装形成的单分散纳米晶体的二维和三维序列 .....	266
12.5.5	在自组装样品上吸附半导体纳米晶体的选择性 .....	266
12.5.6	Au 纳米晶体/DNA 结合物 .....	267
12.5.7	采用溶胶-凝胶包容复合疏水性二氧化硅纳米球 .....	267
12.5.8	多尺度自组装形成的分层冷光样品 .....	268
12.5.9	带有有机和无机组件的混合纳米复合材料的优点 .....	268
12.6	用直流电场形成纳米棒阵列 .....	268
12.6.1	纳米棒阵列 .....	269
12.6.2	电场中垂直导向超晶格纳米棒组装 .....	269
12.7	使用 DEP 和光电镊子 (OETS) 组装纳米结构 .....	270
12.7.1	DEP .....	270
12.7.2	OETSs .....	272
12.8	纳米切割: 制备纳米结构阵列的新方法 .....	272
12.8.1	纳米切割技术 .....	272
12.8.2	使用图形化的基板制造复杂的纳米结构 .....	273
	参考文献 .....	274
<b>第 13 章</b>	<b>化学气相沉积多功能复合热障涂层 .....</b>	<b>281</b>
13.1	简介 .....	281
13.2	TBC 过程 .....	282
13.3	常规 CVD 法高速制造涂层 .....	283
13.4	激光 CVD 法高速制造涂层 .....	287
13.5	总结 .....	291
	参考文献 .....	291
<b>第 14 章</b>	<b>金属互连界面的物理演变及可靠性 .....</b>	<b>293</b>
14.1	简介 .....	293
14.2	互连失效概述 .....	293
14.2.1	腐蚀 .....	293
14.2.2	晶须形成 .....	294

14.2.3 小丘形成 .....	295
14.2.4 应力诱发空洞 .....	296
14.2.5 电迁移 .....	299
14.3 电迁移物理变化 .....	300
14.3.1 尺寸效应下金属电阻率的增加 .....	300
14.3.2 阻挡层尺寸 .....	303
14.3.3 扩散通道扩展的影响 .....	304
14.3.4 驱动力的演变 .....	306
14.3.5 电迁移失效统计学 .....	307
14.4 钎焊接头失效的物理变化 .....	310
14.5 总结 .....	311
参考文献 .....	311
<b>第 15 章 可调微波器件中钛酸锶钡薄膜的集成 .....</b>	<b>317</b>
15.1 简介 .....	317
15.2 基于可调谐微波应用的 BST 器件制造工艺 .....	318
15.3 BST: 结构和性能 .....	320
15.3.1 晶体结构 .....	320
15.3.2 相变 .....	321
15.3.3 极化 .....	325
15.3.4 极化与频率 .....	325
15.3.5 电场对铁电材料的影响 .....	326
15.3.6 微观结构和点缺陷化学 .....	327
15.4 BST 二极管技术 .....	328
15.5 BST 薄膜的沉积技术 .....	330
15.5.1 CSD .....	331
15.5.2 PLD .....	331
15.5.3 RF 磁控溅射 .....	332
15.5.4 MOCVD .....	333
15.6 性能对 BST 薄膜的影响 .....	333
15.7 内扩散解决方法: 纳米金刚石/Pt/BST 结构 .....	336
15.8 总结 .....	338
致谢 .....	338
参考文献 .....	338
<b>第 16 章 气溶胶沉积 (AD) 技术及其在微型器件组装中的应用 .....</b>	<b>345</b>
16.1 简介 .....	345
16.2 AD 法 .....	346
16.3 室温冲击固化 .....	348

16.3.1	室温下陶瓷颗粒的固化 .....	348
16.3.2	AD 过程中冲击颗粒速度和局部温度的升高 .....	350
16.3.3	AD 过程陶瓷膜的致密化机制 .....	351
16.3.4	运载气体的影响 .....	352
16.4	沉积特性和膜的图形化 .....	352
16.4.1	沉积率和原料粉末特性的影响 .....	352
16.4.2	陶瓷层的图形化特性 .....	353
16.5	其他类似方法及与 AD 法的对比 .....	355
16.5.1	基于固态颗粒碰撞的涂层工艺 .....	355
16.5.2	AD 法与其他方法的对比 .....	356
16.5.3	AD 膜的电性能 .....	357
16.6	设备应用 .....	357
16.6.1	用于抗等离子腐蚀工件的氧化钇 AD 膜 .....	357
16.6.2	压电器件中的应用 .....	359
16.6.3	高频装置中的应用 .....	359
16.6.4	光学设备中的应用 .....	361
16.7	总结 .....	362
	致谢 .....	363
	参考文献 .....	363
<b>第 17 章</b>	<b>先进纳米组装方法：图案、定位及自组装 .....</b>	<b>368</b>
17.1	简介 .....	368
17.2	陶瓷的纳米组装 (NI) .....	369
17.2.1	金属氧化物图案的 SAM 预处理 .....	369
17.2.2	非晶 TiO <sub>2</sub> 薄膜的 LPP .....	370
17.2.3	采用种晶层的锐钛矿型 TiO <sub>2</sub> 薄膜 LPP .....	372
17.2.4	采用选点消除法的锐钛矿型 TiO <sub>2</sub> 薄膜 LPP .....	373
17.2.5	采用钨催化剂的磁性颗粒薄膜的 LPP .....	375
17.2.6	晶体 ZnO 的 LPP 和形态控制 .....	376
17.2.7	氧化钇的 LPP: Eu 薄膜 .....	379
17.2.8	总结 .....	381
17.3	颗粒的纳米组装 .....	382
17.3.1	液体中胶体晶体的图案化 .....	382
17.3.2	胶体晶体和二维阵列的干法图案化 .....	387
17.3.3	胶体晶体的图案化以及双溶液法球面组装 .....	395
17.4	总结 .....	403
	参考文献 .....	403
<b>第 18 章</b>	<b>新型器件及电路中纳米线组装：进展与挑战 .....</b>	<b>407</b>



18.1	简介	407
18.2	一维纳米级建造模块：合成和生长机制	408
18.2.1	合成方法	408
18.2.2	生长机制	415
18.2.3	一维半导体材料	419
18.3	结构-性能表征以及二者的关系	423
18.3.1	对一维结构的研究	423
18.3.2	依赖于尺寸及形状的物理性质	428
18.4	纳米器件结构的开发	432
18.4.1	场效应晶体管器件制备	432
18.4.2	纳米线元件集成为复杂的纳米器件结构	434
18.5	总结	437
	致谢	439
	参考文献	439
<b>第 19 章</b>	<b>纳米结构设计中类金刚石的组装（类金刚石薄膜的微纳制造）</b>	<b>459</b>
19.1	微纳机械器件基础	459
19.2	DLC 的性能和准备	461
19.2.1	DLC 薄膜：制备	462
19.2.2	DLC 薄膜：材料性能	463
19.3	DLC 机械设备：制造和性能	468
19.3.1	图案化生长提拉制备 DLC 微机械设备	468
19.3.2	通过聚焦离子束刻蚀技术制备 DLC 微纳机械设备	471
19.3.3	FIB 辅助 CVD 法制备 DLC 纳米结构	473
19.4	DLC 微纳结构发展前景	474
	致谢	474
	参考文献	474
<b>第 20 章</b>	<b>一维陶瓷纳米线的合成、性能、组装及应用</b>	<b>478</b>
20.1	简介	478
20.2	垂直取向陶瓷纳米结构合成方法	479
20.2.1	无模板辅助合成法	479
20.2.2	模板辅助法	480
20.3	1D 纳米结构的特性	483
20.3.1	NCs	483
20.3.2	纳米微粒和纳米线的维度效应	484
20.3.3	1D 金属氧化物的物理性质	485
20.3.4	1D 纳米结构的机械特性	488
20.4	纳米线的综合应用与设备组装	489