




国际制造业先进技术译丛

 Springer

# 微制造与纳米技术

Micromanufacturing  
and Nanotechnology

[印] N.P.马哈里克 (N.P.Mahalik) 等著  
蔡艳 吴毅雄 等译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际制造业先进技术译丛

# 微制造与纳米技术

[印] N. P. 马哈里克 (N. P. Mahalik) 等著

蔡艳 吴毅雄 冯凯 崔海超

李芳 聂璞林 姚成武 朱俊杰

译



机械工业出版社

本书主要介绍了微机电系统 (MEMS)、微光机电系统 (MOEMS)、激光技术在微制造中的应用、平版印刷术、体和表面微加工、纳米修整、误差补偿、碳纳米管、微能源化学系统、燃料电池、空间推进微结构、生物传感器等内容。书中用大量的数据、公式、图表和应用实例阐述了微制造与纳米技术的概念、理论、原理、设计思路、工艺、方法, 以及应用和前景等。

全书不仅具有权威性, 而且内容丰富、理论深入浅出、实用性强, 是广大微制造与纳米技术领域工作者和有关院校师生比较理想的一本参考书籍。

Translation form English Language edition.

Micromanufacturing and Nanotechnology By N. P. Mahalik.

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版发行, 未经机械工业出版社许可, 不得以任何方式复制、传播本书的任何部分。版权所有, 侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2010-1625 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

微制造与纳米技术/(印)马哈里克等著; 蔡艳等译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 6

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文: Micromanufacturing and Nanotechnology

ISBN 978-7-111-50357-6

I. ①微… II. ①马…②蔡… III. ①纳米技术-研究 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 115256 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: 吕德齐 责任编辑: 吕德齐

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 刘 岚

北京中兴印刷有限公司印刷

2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 25.75 印张 · 527 千字

0 001—2 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-50357-6

定价: 129.00 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)

封面防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 作 者

**B. H. 艾恩 (B. H. Ahn)**

光州科学技术学院机电系, 韩国光州广域市五龙洞北区 1 号, 500-712

**布莱恩 K. 保罗 (Brian K. Paul)**

俄勒冈州立大学工业和制造工程系, 美国俄勒冈州科瓦利斯市科沃尔馆 188 号, 97331-2407

**谦达那·卡纳提 (Chandana Karnati)**

路易斯安那理工大学化学和微制造研究所, 美国路易斯安那州洛斯顿市, 71272

**丹妮拉 S. 马伊纳尔迪 (Daniela S. Mainardi)**

路易斯安那理工大学微制造研究所, 美国路易斯安那州洛斯顿市, 71272

**尹大成 (Dae Sung Yoon)**

韩国科学技术研究所微系统研究中心, 韩国首尔市, 136-791

**埃德加·阿尔瓦雷斯-萨克 (Edgar Alvarez-Zauco)**

墨西哥国立自治大学应用科学和技术开发中心, 墨西哥墨西哥城 C. U., 04510

**埃琳娜 V. 巴斯克 (Elena V. Basiuk)**

墨西哥国立自治大学应用科学和技术开发中心, 墨西哥墨西哥城 C. U., 04510

**朱利奥·曼佐尼 (Giulio Manzoni)**

微空间所, 意大利的里雅斯特市威尔费尔兹街 6 号, 34100

**季海峰 (Hai-Feng Ji)**

路易斯安那理工大学化学和微制造研究所, 美国路易斯安那州洛斯顿

市, 71272

**李桢勋 (Jeong Hoon Lee)**

韩国科学技术研究所微系统研究中心, 韩国首尔市, 136-791

**约翰 A. 保罗 (John A. Polo)**

宾夕法尼亚州爱丁堡大学物理系, 美国宾夕法尼亚州埃丁伯勒市苏格兰路 235 号, 16444

**乔恩 A 普利斯 (Jon A. Preece)**

伯明翰大学化学学院, 英国伯明翰市巴斯顿镇, B15 2TT

**K. K. 谭 (K. K. Tan)**

新加坡国立大学电子与计算机工程系, 新加坡第三工程大道 4 号, 117576

**M. M. 艾尔卡斯 (M. M. Alkaisi)**

坎特伯雷大学电子与计算机工程系麦克戴米德先进材料和纳米技术研究所, 新西兰克赖斯特彻奇市

**N. P. 马哈里克 (N. P. Mahalik)**

光州科学技术学院机电系, 韩国光州广域市五龙洞北区 1 号, 500-712

**保拉 M 曼德斯 (Paula M Mendes)**

伯明翰大学化学学院, 英国伯明翰市巴斯顿镇, B15 2TT

**陈乾旺 (Qianwang Chen)**

中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 中国合肥, 230026

**R. J. 布莱克 (R. J. Blaikie)**

坎特伯雷大学电子与计算机工程系麦克戴米德先进材料和纳米技术研究所, 新西兰克赖斯特彻奇市

**罗伯特 A. 李 (Robert A. Lee)**

联邦科工组织制造和基础设施技术部, 澳大利亚维多利亚州克莱顿诺曼比路, 3168

**S. 库马尔·巴格 (S. Kumar Bag)**

韦洛尔科技大学电子和通信工程系, 印度韦洛尔

**S. N. 黄 (S. N. Huang)**

新加坡国立大学电子与计算机工程系, 新加坡第三工程大道 4 号, 117576

**郑成浩 (Sungho Jeong)**

光州科学技术学院机电系, 韩国光州广域市五龙洞北区 1 号, 500-712

**苏尼尔·杰哈 (Sunil Jha)**

印度坎普尔理工学院机械工程系, 印度坎普尔, 208016

**桑尼 E. 艾约克 (Sunny E. Iyuke)**

金山大学工程和建筑环境学院材料加工系, 南非约翰内斯堡维茨私人信箱 3 号, 2050

**金泰颂 (Tae Song Kim)**

韩国科学技术研究所微系统研究中心, 韩国首尔市, 136-791

**V. K. 契那 (V. K. Jain)**

坎普尔理工学院机械工程系, 印度坎普尔, 208016

**弗拉德米尔 A. 巴斯克 (Vladimir A. Basiuk)**

墨西哥国立自治大学核科学研究所, 墨西哥墨西哥城 C. U. , 04510

**黄钊 (Zhao Huang)**

中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 中国合肥, 230026

本书献给我所有的老师，特别是

阿比曼纽·马哈里克 先生

伊雅媿·马哈里克 夫人

巴布昌德·马哈里克 工程师

普拉巴卡尔·巴瑞克 先生

P R 摩尔 教授

S K 李 教授

同样重要的还有

达达伽达·萨塔帕斯 先生

(印度德卡纳尔党议员、奥里萨邦 The Dharitri 报编辑)

# 译丛序言

## 一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，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，以实现优质、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。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

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，在加工技术上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，在制造模式上主要有自动化、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应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创造，在实践中继承和改选，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

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段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，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值 and 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。

机械工业出版社希望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、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够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“国际机械工程先进技术译丛”。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，例如机械、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业企业、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、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者，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。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

# 译者的话

微纳米技术及其制造是 21 世纪最为引人瞩目的新发展领域之一，是多学科和技术集合交叉的科学技术领域。介绍此领域的最新发展，借他山之玉，引我国在此领域发展的宏伟篇章是出版社和译者的愿望。

本书主要介绍了微机电系统 (MEMS)、微光机电系统 (MOEMS)、激光技术在微制造中的应用、平版印刷术、体和表面微加工、纳米修整、误差补偿、碳纳米管、微能源化学系统、燃料电池、空间推进微结构、生物传感器等内容。本书用大量的数据、公式、图表和应用实例阐述了微制造与纳米技术的概念、理论、原理、设计思路、工艺、方法以及应用和前景等。通观全书不仅具有权威性，而且内容丰富、理论深入浅出、实用性强，是广大微制造与纳米技术领域工作者和有关院校师生比较理想的一本参考书。

本书由上海交通大学吴毅雄教授 (第 1 章)、蔡艳副教授 (第 10、11、12 章)、冯凯 (第 2、13、14 章)、李芳 (第 4、5、6 章)、姚成武 (第 3、16、18 章)、聂璞林 (第 7、19、20 章)、崔海超 (第 8、9 章)、朱俊杰 (第 15、17 章) 老师翻译，吴毅雄、冯凯、蔡艳、崔海超老师参与了审校，最后由吴毅雄教授、蔡艳副教授、冯凯博士通校了全文。

限于译者水平，译文中可能会存在一些疏漏和错误之处，恳切希望读者不吝赐教，以便在有机会再版时加以更正。

吴毅雄

# 前 言

复杂微型化部件和系统正在以最显著的方式改变着各种各样的产品和服务。微型化的方法和设计代表了广泛的研究方向，包括在基础物理、化学、材料科学、计算方法、超精密工程、制造技术、微加工和许多其他基于原理、表征、建模、模拟、复杂性、先进技术适应性中的应用。微制造与纳米技术（MAN）是根据先进产品和服务设计概念而出现的，且随着微型化的需求而不断发展。在MAN领域中，技术性研究正在扩大，它的设计阶段已经高度复杂化，并且涉及多物理和交叉学科的研究方法。这本书的主要目标是为了提供关于微/纳米系统和技术的概念、原理、特征、应用、最新技术进展与比较方面的信息。同时还包含了研究、发展、指南和案例分析。世界各地许多研究机构也正在开展微工程学、微制造、微观力学和纳米技术的学术和工业的研究与开发。随着这个领域的技术趋势（例如：设计和开发方法学、当前应用背景、优点和缺点等）需要更广泛地传播，以使MAN的革新更进一步地为社会服务。本书将重点阐述微制造与纳米技术的内在概念、微机电系统（MEMS）和微光机电系统（MOEMS）的多物理原理、设计提示和线索，以及技术和方法论。

微制造与纳米技术就像一枚硬币的两面。关于微工程学、微系统、超精密工程、微加工、纳米修整、微观力学、微结构和微系统的困惑和争论一直存在。因此本书中每章的作者都在试图阐明这个困惑，使读者理解微制造与纳米技术相关的更广泛的领域，例如激光技术的应用、平版印刷术、体和表面微加工、纳米修整、误差补偿、MEMS、MOEMS、碳纳米管、微能源化学系统、燃料电池、空间推进微结构、生物传感器等，以及它们的底层技术、哲学思想、概念、理念和原理的本质。并以适当的顺序给出微系统在设计过程、实践、技术、平台和实验结果方面的问题。同时每章还对当今备受关注的研究和最新技术进展进行专题性和一般性的概述，进一步研究的基本方法、创新、重要研究结果和参考文献。本书在相应的章节还适时地给出了相关技术的优点和缺点，这样无论是初学者还是资深从业者都能使用这些评价来指导他们的选择。而且书中所有的研究工作都经过合适的评论、处理和编排，以便于保持其连贯性，从而也使其对于不管是资深从业者还是新手的读者都能够理解大部分内容。由于本书涉及了许多交叉学科，其重点内容在微米和纳米领域也是非常重要的。

全书的框架如下所示:

第1章是导论。第2章讲述了MEMS和MOEMS的原理,以及与MEMS和MOEMS相关的不同物理现象及其应用的精确定义。第3章讲述了激光技术在微制造应用中的基本原理。其中高精密仪器系统的几何补偿至关重要。第4章着重介绍了用计算机辅助激光干涉仪进行误差补偿的基本原理和实验体系。在这一章中还描述了误差模型及其误差补偿的程序方法。第5章讨论了体微加工工艺,即一种微系统和设备制造的基本工艺要求。这种加工的进一步发展即是表面微加工。第6章介绍了表面微制造的原理。第7章讨论了与微系统相符合的光变图像(OVD),即一种已长期用于文档安全应用的极高标准设备的最新进展。第8章阐述了各种各样的纳米修整技术,以及包括微观系统和宏观系统操作和表征的重要方法。第9章介绍了微纳米技术在空间应用中的作用。第10和11章介绍了碳纳米管和纳米结构。得益于分子计算技术的发展,未来的计算世界将会日新月异。第12章对基于荧光、吸附和电子导电的分子逻辑门进行了综合性的描述。第13章给出了若干用于生物传感器的微尺度悬臂装置设计的研究结果。通过这些微装置进行微能源运输被称为微能源与化学系统(MECS),目前此研究已取得了重要突破。第14章介绍了MECS的应用前景,如微电子冷却系统、化学反应器、燃料处理和热泵。第15章对雕塑薄膜研究进行了详细阐述。接下来的两章,即第16章和第17章分别讨论了电子束和光学纳米微影技术。第18章对纳米技术相对燃料电池的应用进行了现象学描述。第19和20章分别介绍了碳纳米管与胺和 $C_{60}$ 薄膜中化学交联的衍生。

本书的成功出版源于许多研究人员、顾问、技术专家、学者、开发人员、设计人员和支持者的直接和间接参与。因此编者和出版商在这里感谢书中所涉及的所有文献、报道、文章、记录、研究材料等的幕后人员和团队。此外,书中各章的作者还要感谢支持研究工作的各基金资助机构,没有这些机构的资助,这些研究工作是无法完成的。在此还特别地感谢:M. Adrian Michalicek、Wassanai Wattanuchariya、Kannachai Kanlayasiri、Joseph Thomas、Hadi Hasan、Nitin Sharma、Patrick Kwon、Sharee McNab、David Melville、Conrad Wolf、Andrew Thompson、Alan Wright、Helen Devereux、Gary Turner、Mike Flaws以及下面的机构、研究所、公司和杂志。

科技部(项目代码:MS-01-133-01)、新西兰皇家社会马思顿基金(UOC-604和UOC-312)、EPSRC(英国)(基金号码:HPRN-CT-2000-00028和GR/N12657/01)、NEDO(日本)JRCAT、墨西哥科技国家委员会(CONACYT-36317-E和40399-Y)、欧洲太空总署、墨西哥国立自治大学(基金代码:DGAPA-IN100402-3和-IN100303)、奥里萨邦政府工业部、布尔拉大学工程学院、德克萨斯州仪器公司、科罗拉多大学博尔德分校、《微观力学与微工程》杂志、《IEEE微机电系统》杂志、《自然-材料》杂志、远景研究公司。

# 目 录

作者

译丛序言

译者的话

前言

## 第1章 导论 ..... 1

1.1 背景介绍 ..... 1

1.2 概述 ..... 1

1.2.1 精密工程 ..... 2

1.2.2 微铣削和微型钻孔 ..... 3

1.3 微机电系统 ..... 4

1.4 微电子制造方法 ..... 5

1.4.1 体微加工 ..... 6

1.4.2 表面微加工 ..... 6

1.5 微型化仪器 ..... 7

1.6 微机械电子 ..... 7

1.7 纳米修整 ..... 7

1.8 光变图像 ..... 8

1.9 微能源和化学系统 ..... 8

1.10 空间微推进 ..... 9

1.11 电子束纳米印刷 ..... 9

1.12 纳米技术 ..... 10

1.13 碳纳米管及其结构 ..... 10

1.14 分子逻辑门 ..... 11

1.15 纳米尺度生物传感器 ..... 12

1.16  $C_{60}$ 及其衍生物的化学  
交联 ..... 13

1.17 燃料电池 ..... 13

1.18 参考文献 ..... 13

## 第2章 微机电系统与微光机电 系统原理 ..... 15

2.1 概述 ..... 15

2.2 执行器的驱动原理 ..... 16

2.3 制造工艺 ..... 17

2.4 机械微机电系统 ..... 18

2.4.1 机械传感器 ..... 18

2.4.2 加速度计、悬臂式  
传感器和电容测量 ..... 18

2.4.3 扬声器 ..... 19

2.4.4 陀螺仪 ..... 20

2.4.5 机械执行器 ..... 22

2.5 热微机电系统 ..... 22

2.5.1 计温学 ..... 23

2.5.2 数据存储应用 ..... 23

2.5.3 微型加热器气体  
传感器 ..... 24

2.5.4 热执行器 ..... 24

2.6 磁微机电系统 ..... 25

2.7 微光机电系统 ..... 28

2.8 空间光调制器 ..... 30

2.9 数字微镜设备 ..... 30

2.10 光栅光阀 (GLV) ..... 32

2.11 参考文献 ..... 34

## 第3章 微制造中的激光技术 ..... 37

3.1 概述 ..... 37

3.2 激光的产生	37	5.2 体微加工的发展历史	69
3.3 激光的特性	41	5.3 湿法体微加工 (WBM)	70
3.3.1 单色性	41	5.4 晶体学及其影响	71
3.3.2 方向性	41	5.5 硅作为基板与结构材料	72
3.3.3 亮度	41	5.5.1 硅作为基板	72
3.3.4 相干性	42	5.5.2 硅作为结构材料	73
3.3.5 空间分布	42	5.5.3 应力与应变	73
3.3.6 时间脉冲波形	42	5.5.4 硅的热力学性质	76
3.4 激光应用	43	5.6 湿法蚀刻流程	76
3.5 微加工中的激光技术	44	5.6.1 各向同性蚀刻剂	76
3.5.1 背景	45	5.6.2 反应现象	77
3.5.2 激光的吸收和反射	45	5.6.3 各向同性蚀刻曲线	77
3.5.3 应用技术基础	46	5.6.4 掩膜	79
3.6 参考文献	50	5.6.5 依赖型掺杂蚀刻剂	79
<b>第4章 激光干涉仪几何误差</b>		5.7 各向异性蚀刻	80
<b>软补偿</b>	52	5.7.1 各向异性蚀刻剂	80
4.1 概述	52	5.7.2 各向异性蚀刻剂掩膜	81
4.2 几何误差校正概述	53	5.8 蚀刻控制: 停止技术	81
4.2.1 误差测量系统	54	5.8.1 硼扩散蚀刻停止	82
4.2.2 精度评价	55	5.8.2 电化学蚀刻自停止技术	82
4.3 几何误差补偿方法	56	5.8.3 薄膜与绝缘硅蚀刻停止	83
4.3.1 几何误差查找表	56	5.9 体微加工中蚀刻存在的问题	83
4.3.2 几何误差参数模型	57	5.9.1 基板面消耗	84
4.4 实验结果	60	5.9.2 角补偿	84
4.4.1 误差近似	60	5.10 小结	85
4.4.2 线性误差	60	5.11 参考文献	86
4.4.3 直线度误差	63	<b>第6章 表面微加工和晶片粘合</b>	
4.4.4 角度误差	63	<b>工艺的特点</b>	88
4.4.5 垂直度误差	64	6.1 概述	88
4.4.6 评价	65	6.2 光刻工艺	89
4.5 小结	67	6.3 表面微加工	91
4.6 参考文献	67		
<b>第5章 体微加工中的蚀刻工艺</b>			
<b>表征</b>	69		
5.1 概述	69		



6.4 表面微加工工艺特点·····	92	7.4 通用的光变图像微结构·····	124
6.4.1 隔离层·····	93	7.4.1 光变油墨技术·····	124
6.4.2 牺牲层·····	93	7.4.2 衍射数据箔·····	126
6.4.3 结构材料·····	94	7.4.3 生物识别光变图像 技术·····	128
6.4.4 选择性蚀刻·····	94	7.5 光学图像单元编码表面纳米 制造·····	130
6.5 特性·····	96	7.5.1 显微镜光变图像·····	131
6.5.1 附着力·····	96	7.5.2 显微镜光变图像的 起源·····	132
6.5.2 应力·····	96	7.5.3 显微镜光变图像光学效应 总结·····	136
6.5.3 黏滞·····	99	7.6 小结·····	138
6.6 晶片键合·····	99	7.7 参考文献·····	138
6.6.1 阳极键合·····	100		
6.6.2 融化键合·····	101		
6.7 小结·····	102		
6.8 参考文献·····	103		
<b>第7章 文件安全领域微加工： 光变图像·····</b>	<b>108</b>	<b>第8章 纳米修整技术·····</b>	<b>142</b>
7.1 引言·····	108	8.1 概述·····	142
7.2 概述·····	108	8.2 传统加工工艺·····	143
7.3 光变图像箔微结构·····	109	8.2.1 研磨·····	143
7.3.1 防伪全息图·····	109	8.2.2 抛光·····	144
7.3.2 Kinegram™技术·····	110	8.2.3 珩磨·····	144
7.3.3 Catpix™电子束光刻微 结构·····	113	8.3 高级修整工艺 (AFPs)·····	144
7.3.4 结构稳定性·····	114	8.3.1 磨料流加工 (AFM)·····	145
7.3.5 Pixelgram™调色 概念·····	114	8.3.2 磁力研磨 (MAF)·····	147
7.3.6 基于 Exelgram™轨道 的光变图像微结构·····	116	8.3.3 磁流变加工 (MRF)·····	149
7.3.7 隐蔽图片显微图像 安全特征·····	119	8.3.4 磁流变磨料流修整 (MRAFF)·····	152
7.3.8 Kinegram™和 Exelgram™ 的比较·····	119	8.3.5 磁悬浮抛光 (MFP)·····	155
7.3.9 Vectogram™图像多路 复用技术·····	121	8.3.6 弹性喷射加工 (EEM)·····	156
7.3.10 间隙刻槽单元 调制·····	123	8.3.7 离子束加工 (IBM)·····	158
		8.3.8 化学机械抛光 (CMP)·····	159



8.4 参考文献 .....	160	10.6.1 场效应管中碳纳米管 的电子输运 .....	191
<b>第9章 微纳米技术在空间微推进 系统中的应用 .....</b>	<b>163</b>	10.6.2 在计算机中的 应用 .....	192
9.1 概述 .....	163	10.6.3 基于碳纳米管的纳米 器件在生物学中的 应用 .....	194
9.2 微型化航天器微推动的子 系统和设备 .....	166	10.6.4 X射线仪 .....	194
9.3 推进系统 .....	171	10.6.5 基于碳纳米管的纳米 机械执行器和人工 肌肉 .....	195
9.3.1 固体推进剂 .....	171	10.6.6 燃料电池 .....	196
9.3.2 冷气体 .....	172	10.6.7 膜电极组 .....	197
9.3.3 胶体推进器 .....	172	10.6.8 基于CNTs的双极板 机械和电气强化 .....	198
9.3.4 热气体 .....	172	10.6.9 在碳纳米管中 储氢 .....	199
9.3.5 单组元和双组元推进 系统 .....	172	10.7 参考文献 .....	200
9.3.6 再生加压循环 .....	172	<b>第11章 碳基纳米结构 .....</b>	<b>206</b>
9.3.7 姿态调整与控制 系统 .....	172	11.1 概述 .....	206
9.4 冷气体微推进器的实现 ..	173	11.2 富勒烯的历史 .....	206
9.4.1 气体和流体动力学 ..	173	11.3 碳纳米管的结构 (CNTs) .....	207
9.4.2 原型设计 .....	174	11.3.1 Y形 .....	208
9.5 小结 .....	179	11.3.2 双螺旋形 .....	208
9.6 参考文献 .....	179	11.3.3 竹节形 .....	209
<b>第10章 碳纳米管的制造和应用: 纳米技术基础 .....</b>	<b>181</b>	11.3.4 分层结构 .....	209
10.1 概述 .....	181	11.3.5 环形多壁碳 纳米管 .....	209
10.2 纳米技术和碳纳米管 的前景 .....	181	11.3.6 圆锥端帽形多壁碳纳 米管 .....	210
10.3 碳纳米管的研究进展 .....	182	11.4 富勒烯的结构 .....	211
10.4 碳纳米管的结构 和属性 .....	184	11.4.1 C <sub>48</sub> 富勒烯结构 .....	211
10.5 碳纳米管的制备 .....	186	11.4.2 环形富勒烯 .....	211
10.5.1 化学气相沉积 .....	187	11.4.3 C <sub>60</sub> 、C <sub>59</sub> 、C <sub>58</sub> 、C <sub>57</sub> 的结构 .....	212
10.5.2 电弧放电 .....	188		
10.5.3 激光烧蚀 .....	188		
10.5.4 生长机理 .....	189		
10.5.5 碳纳米管提纯 .....	190		
10.6 碳纳米管的应用 .....	191		