

微纳米技术的潜在应用前景

Implications of Emerging Micro-and Nanotechnologies

(美) 国家科学院科学研究委员会 著

刘俊 等译 张文栋 等校



机械工业出版社

微纳米技术的潜在应用前景

Implications of Emerging Micro-and Nanotechnologies

(美) 国家科学院科学研究委员会 著

刘 俊 等译

张文栋 等校



机械工业出版社

微纳米技术近年来迅速发展,涉及领域越来越广泛,本书对微纳米技术的两大方面——电子系统的微型化和信息密集化,并侧重微纳米技术潜在的应用前景进行了全面阐述,介绍了国外最新的微纳米技术的研究动态和发展趋势,对我国正在蓬勃兴起的微纳米技术研究和应用有很好的借鉴意义。本书的作者来自美国国家科学院、国家工程院和国家医学院的资深研究人员。读者对象为微纳米技术、微机电系统的科研人员、大院校师生。

This is a translation of Implications of Emerging Micro-and Nanotechnologies, Committee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies, National Research Council ©2002 National Academy of Sciences. First published in English by National Academies Press. All rights reserved. This edition published under agreement with the National Academy of Sciences.

本书中文版由美国学术出版社授权机械工业出版社独家出版。版权所有。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-2616

图书在版编目(CIP)数据

微纳米技术的潜在应用前景/(美)国家科学院科学研究委员会著;刘俊等译—北京:机械工业出版社,2004.7

ISBN 7-111-14953-X

I. 微… II. ①美…②刘… III. 纳米材料-新技术应用-远景 IV. TB-383

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第072067号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:杨绍臣

封面设计:王洪流

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年7月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·6.5印张·250千字

0 001—2 000册

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

译者的话

经过近 20 年的发展，融合了自上而下的硅微加工工艺和自下而上的自组装加工工艺的微纳米技术在器件、系统的需求牵引下，得到了快速的发展。当我们还在谈论微机电系统（Micro Electro—Mechanical Systems, MEMS）技术概念、理论层面问题和加工工艺与方法的时候，纳米机电系统（Nano Electro—Mechanical Systems, NEMS）或称为纳米技术概念范畴跃入人们的视野，在探索微观世界本质特征好奇心的驱动下，纳米技术理论、技术特征、器件加工工艺和系统应用研究得到快速发展。

微纳米技术是微电子技术和精密加工工艺技术的延伸与拓宽，它不但具有信号处理功能，而且具有对外部世界的感知功能和作用功能。以此为基础发展的智能化、高功能密度的新型系统将如微电子技术 in 20 世纪的作用一样，对 21 世纪的人类社会生产和生活方式产生革命性的影响，奠定国家在国际舞台上的地位，是关系国民经济建设和国家安全保障的战略高科技。

微纳米技术器件和系统将构筑未来世界的主体框架，将成为未来社会众多领域的核心部分，其重要性已被世界各高技术强国得到认可，我国于 20 世纪 90 年代开始跟踪和发展这一技术，经过十几年的发展，形成一批特征尺度为微米级的微惯性传感器、光学 MEMS、生物 MEMS、RFMEMS、化学 MEMS 和功率 MEMS 等以及微执行器和集成微系统，取得了重要的研究成果。

本书是由美国国家科学研究委员会的国家科学院、国家工程院和国家医学院以及美国国家空军科学技术部组织相关学者撰写的最新研究成果，研究集中在微纳米技术增加信息量、微型化系统、新的工程材料、

增加的功能和自主性和未来微纳米技术的发展方向。其目的是预测微纳米技术在未来军事领域中的应用和新技术给军事变革带来的影响。

我们认真的阅读了原版外文书，该书作者的目的是为从事微纳米技术的高层主管和战略专家以及高级研究人员提供的具有指导方向性的读物。在中国国家自然科学基金委员会材料与工程学部机械学科雷源忠研究员的推荐下，由中北大学（原华北工学院）刘俊教授组织翻译。

本书由刘俊教授担任主译，负责全书的翻译，张文栋教授担任主审，负责全书的审校，石云波负责了全书翻译工作的协调与最后组稿。本书翻译工作的分工如下：刘俊、石云波、钮乾鹏、肖文定翻译序言、摘要，第1章由李锦明、苏淑静、贾小虎翻译；第2章由熊继军、马游春、沈三民、李进武翻译；第3章由秦丽、孟令军、张会新、李建钊、白云、林华亮翻译；第4章由刘文怡、甌国涌、焦新泉、张彦军翻译；第5章由薛晨阳、吴慧、郭涛翻译；第6章由任勇峰、文丰、刘伟周翻译；第7章由刘俊、张斌珍、张瑞平翻译；附录由刘俊、徐佩翻译。

本书的翻译是在原出版社授权下翻译的，在此对他们所给予的信任与合作表示感谢。特别要感谢国家自然科学基金委员会机械学科主任雷源忠先生为本书的翻译出版提供了机会和友好支持，感谢机械工业出版社杨绍臣编辑和有关人员为译书的出版所付出的艰辛劳动。在全体译者的通力合作下，译书顺利完成，在此也对他们表示感谢。另外在翻译的过程中还得到中北大学王高老师、马淑丽老师、郝婷婷老师、宁波老师的帮助，同样表示最诚挚的谢意。

因翻译和学术水平有限，译书中肯定有错译、误译和不恰当之处，恳请广大读者给予批评指正。

译者

2004年7月

国家级的研究机构

国家科学院是一个私立的、非盈利的、能自身永久存在的团体，它主要致力于科学和工程研究，并为科学技术的进一步发展做出贡献。该院于 1863 年由国会授权成立，并有权对国家政府的科学技术发展提出建议。Bruce M.Alberts 博士是国家科学院的院长。

国家工程院建立于 1964 年，通过和国家科学院的协议，该院和国家科学院是两个工程上同等的组织。它在管理和人员的选择上具有一定的自主权，它并和国家科学院共同享有对政府建议的义务。国家工程院也承担着国家需要的一些工程项目，对教育和科研进行促进，并去发现一些先进的工程技术人员取得的成就。Wm.A.Wulf 博士是国家工程院的院长。

医学院由国家科学院创立于 1970 年，其目的是为某些行业中的杰出成员提供一定的公共健康保障。该院主要是在国家科学院的带领下作为国家政府的建议者，并依照其创建的本意去探索医疗、教育和研究。Harvey V.Fineberg 博士是医学院的院长。

国家科学研究委员会由国家科学院于 1916 年组建，其目的是为了协助科学院进行一些科学和技术上的研究以进一步对知识进行探索以及向国家政府提出建议。和科学院确立的其他部门的功能一致，该委员会成为了国家科学院和国家工程院为政府、社会和科学以及工程界提供服务的基本执行机构。它同时由国家科学院和医学院来管理，Bruce M.Alberts 博士和 Wm.A.Wulf 分别担任国家研究委员会的主席和副主席。

www.national-academies.org

微纳米技术应用委员会

STEVEN R.J. BRUECK, 主席, 新墨西哥大学, 阿尔伯克基
S. THOMAS PICRAUX, 副主席, 亚历桑那州大学, 滕比
JOHN H. BELK, 波音公司, 圣. 路易斯, 密苏里
ROBERT J. CELOTTA, 标准和技术国家学会, Gaithersburg, 马里兰
WILLIAM C. HOLTON, 北卡罗莱那州大学, 罗利
SIEGFRIED W. JANSON, 航空宇宙公司, 洛杉矶
WAY KUO, 德克萨斯 A&M 大学, 学院站
DAVID J. NAGEL, 华盛顿大学, 华盛顿
P. ANDREW PENZ, 科学应用国际公司, 理查森, 德克萨斯
ALBERT P. PISANO, 加利福尼亚大学, 柏克莱
ROSEMARY L. SMITH, 加利福尼亚大学, 戴维斯
PETER J. STANG, 犹他大学, 盐湖城
GEORGE W. SUTTON, 斯巴达, 阿灵顿, 维吉尼亚
WILLIAM M. TOLLES, 顾问, 亚历山大, 维吉尼亚
ROBERT J. TREW, 维吉尼亚工艺学院和州立大学, 布莱克斯堡
MARY H. YOUNG, HRL 实验室, 马利布, 加州

联 络

空军科技部

ALAN H. EPSTEIN, 麻萨诸塞州工学院, 剑桥

职 员

JAMES C. GARCIA, 研究主管

JAMES E. KDILLIAN, 研究主管

JAMES MYSKA, 副研究员

PAMELA A. LEWIS, 高级项目助理

LINDA D. VOSS, 技术作家

空军科技部

ROBERT A. FUHRMAN, 主席, 洛克希德公司 (退休), 圆石海滩, 加州

R. NOEL LONGUEMARE, 副主席, 私人顾问, Ellicott, 马里兰

LYNN CONWAY, 密西根大学, 安娜堡

WILLIAM H. CRABTREE, 顾问, 辛辛那提, 俄亥俄州

LAWRENCE J. DELANEY, 总裁, 执行总裁和董事会主席, 阿灵顿, 维吉尼亚

STEVEN D. DORFMAN, 休斯电子公司 (已退休), 洛杉矶, 加州

EARL H. DOWELL, 机械工程, 杜克大学, 达拉谟, 北卡罗莱那州

ALAN H. EPSTEIN, 燃气轮机实验室, 麻萨诸塞州工学院, 剑桥, 麻萨诸塞州

DELORES M. ETTER, 教授, 美国海军学院, 安纳波利斯, 马里兰

ALFRED B. GSCHWENDTNER, 林肯实验室, 麻萨诸塞州工学院, 列克星敦, 麻萨诸塞州

BRADFORD W. PARKINSON, 斯坦福大学, 斯坦福, 加州

RICHARD R. PAUL 副总裁, 策略发展, 幻影工作, 波音公司, 西雅图, 华盛顿

ROBERT F. RAGGIO, 执行副总裁, 达顿航空宇宙公司, 俄亥俄州达顿

ELI RESHOTKO, 退休教授, 西方保留大学, 克里夫兰, 俄亥俄州

LOURDES SALAMANCA-RIBA, 教授, 材料工程系, 马里兰的大学, 学院公园

EUGENE L. TATTINI, 副主任, 喷气推进实验室, Pasadena, 加州

职 员

BRUCE A. BRAUN, 主任

MICHAEL A. CLARKE, 副主任

WILLIAM E. CAMPBELL, 管理人员员

CHRIS JONES, Financial Associate

DEANNA P. SPARGER, 高级项目助理

DANIEL E.J. TALMAGE, 副研究员

序

在很久以前，生物学上就采用了微纳米技术。基因结构就是基于纳米级的相互作用，蚊子、蚂蚁、白蚁和其他昆虫都是在自动化和智能微机械方面很精致的例子。它们既体现在个体的行动方面，也体现在合作（群体活动）方面。人们开始考虑使用纳米技术至少可以追溯到文艺复兴时期威尼斯的玻璃的制作，直到今天，我们还在继续研究它的科学基础——原理、加工、材料和测试能力——为了在纳米技术方面能有全面的突破。

各项技术稳定的向着微米、纳米领域发展已经有一段时期了。集成电路的加工技术已接近纳米量级，目前最先进的微处理器中门电路的尺寸已经小于 100 nm。微机电系统（MEMS）器件已经将机械运动（和其他特性）和电路器集成到了微结构上，这就产生了一些新的应用途径甚至产生了新兴工业。

空军科学技术工程研究部门的助理秘书提出要求，由美国国家科学研究委员会成立的微纳米技术应用委员会，应当为空军微纳米技术的未来应用做出评估。并且要求这个协会描述出微纳米技术的状态，并对军队在微纳米技术的投资策略性做出充分评述，对加速研究空军使命的能力和系统的研究领域提出建议。

委员会收到了空军内外的一些专家对于微纳米技术各个方面的摘要。在这些摘要当中，有四点非常明确：日益增加的信息处理能力；不断朝着微型化的方向发展；基于纳米结构的新型功能型材料；更高水平的系统集成，功能的日益完善最终形成一个全自动化的系统。其中有很多挑战，同样也有很多机遇，包括把微纳米结构的独特性转换到宏观效应上来，加工微纳米材料和大规模的生产廉价的器件。

要想达到要求，在更高效和更广阔的空间上发展，微纳米技术的研究是一个十分重要的领域。所要受到的影响还并不能完全预料到，但可以用一些一般的术语来描述，但是很明显问题都会很大。空军应当利用这些技术力量以完成他们的使命。

这项研究的范围很大，覆盖了空间上的所有尺寸数量级，并且还需要将来几十年的努力。本委员会感谢空军内外各位专家的帮助，他们花了许多时间来向我们探讨他们的观点。本协会非常感谢国家科学研究委员会的成员：James Garcia, James Killian, Pamela Lewis, 和 James Myska 以及 Linda Voss 顾问，感谢他们在本书的撰写的过程中所给予的帮助和支持。

Steven R.J.Brueck 主席
S. Thomas Picraux 副主席
微纳米技术应用委员会

致谢本书评委

依据国家科学研究委员会报告评审组通过的评审程序，本书的书稿曾被多位专家作过评阅，并提出了种种不同的看法和技术见解。进行独立评审的一个主要目的就是得到一个公正和批判性的评论从而保证本书具有一定的客观性、合理性和对学者的负责，以有助于在其发表后能够得到比较好的反响。为了保证整个审议过程的公正性，本书的原稿和评论都将保持机密。我们很衷心的对下面这些人作为本书的评审表示感谢。

Larry R. Dalton, 华盛顿大学, 西雅图

Elsa Reichmanis, 贝尔实验室, 美国朗讯科技公司, 默里山, 新泽西州

Lourdes Salamance-Riba, 马里兰大学, 大学公园

Henry I. Smith, 马萨诸塞州工程学院, 剑桥

T.S. Sudarshan, Materials Modification Inc., Fairfax, 维吉尼亚

Richard Taylor, Hewlett-Packard 实验室, 布里斯托尔, 英国

George M. Whitesides, 美国哈佛大学, 剑桥, 马萨诸塞州

虽然上面所列出的各个专家对本书提出了许多具有建设性的意见和建议，但他们在本书的发表以前，并没能看到最终的书稿。本书的评审是在北卡罗莱纳大学的 Royce W. Murray 监督下完成的，由国家科学研究委员会委派的 Chapel Hill 主要负责确保评审的独立性以及和相关程序的一致性，并将仔细考虑了所有的评论。这篇报告的最终内容由委员会负责。

目 录

图形和表	5
缩略词	8
前言	10
第 1 章 绪论	22
1.1 背景	22
1.2 任务综述	23
1.3 “微”“纳”米的具体涵义	24
1.4 机构报告与方法	29
参考文献	29
第 2 章 微纳米技术前景的展望	30
2.1 现状综述	30
2.2 半导体的国际技术规划	30
2.3 2001 年 MEMS 工业组年度报告	33
2.4 美国国家纳米技术创新计划	34
2.5 纳米技术的世界前景	36
参考文献	37
第 3 章 纳米技术的主要拓展领域	38
3.1 信息技术	38
1. 摘要	38
2. 计算能力——设备	39
3. 计算能力——结构	50
4. 存储	54
5. 通信	56
6. 电气限制	58
7. 光学限制	60
8. 微机电系统 (MEMS)	60
9. 信号和信息处理以及数据融合	64
10. 研究结论和建议	66
3.2 传感器	68

1. 简介	68
2. 分离的分布式传感器	68
3. 未来的意义	69
4. 化学和生物领域的传感器	74
5. 自传感	76
6. 分布式传感器系统	79
7. 研究结论和建议	82
3.3 生物激励材料和系统	82
1. 改善传感、通信和信号处理中的仿生学	83
2. 人类能力的伸展——作为人类一部分的机器	84
3. 研究结论和建议	85
3.4 结构材料	85
1. 简介	85
2. 轻质材料	86
3. 改善涂层	88
4. 多功能结构	89
5. MEMS 材料	90
6. 技术问题和领域	91
7. 研究结论和建议	92
3.5 空气动力学——推进力和动力	92
1. 飞行工具空气动力学	93
2. 空中工具的推进力和动力	94
3. 运载工具推进	98
4. 太空船推进	100
5. 空间动力产生	104
6. 研究结论和建议	105
参考文献	105
第 4 章 可实现制造技术	120
4.1 制造（成形）方法	120
1. 光刻技术和图形化	121
2. 自组装	127
3. 传统的光刻技术和自动装配成形技术的融合	129
4.2 主流硅技术与纳米器件的集成	131
1. 装配	131

2. 直接装配	132
3. DNA 辅助装配	133
4. 封装	136
5. 可靠性与生产能力	137
6. 产量及效率	138
4.3 商业化	139
1. 用新技术制造的产品的辨识	139
2. 新技术的技术细节	140
3. 开明的企业管理	140
4. 产品成本的大量削减	140
5. 政府在新技术推广中的角色	141
6. 制造业的复杂性对商业化的影响	143
7. 事例研究: 德州仪器和数字镜器件	143
4.7 研究结论和建议	146
参考文献	147
第 5 章 空军微纳米技术的计划和前景	152
5.1 微纳米技术对空军任务的影响	152
5.2 空军在微纳米技术方面目前的投资	153
1. AFRL 在微纳米技术的研究计划	153
2. AFOSR 在纳米技术方面的基础研究	155
5.3 国防部和空军的投资方向	158
5.4 空军投资的策略和挑战	161
5.5 研究结论和建议	163
参考文献	164
第 6 章 微纳米技术契机	165
6.1 突出的主题	165
1. 增强的信息能力	165
2. 微型化	166
3. 新工程材料	166
4. 增强的自动化和功能性	166
6.2 空军任务作为微纳米技术的驱动	167
6.3 契机出现的领域	168
1. 航天飞行器及系统	169

2. 武器系统	172
3. 航空飞行器及系统	173
6.4 研究结论和建议	176
参考文献	176
第 7 章 研究结论和建议	177
7.1 重要研究结论和建议	177
1. 技术	177
2. 政策	179
7.2 特殊的研究结论和建议	181
附录 A 制造、设计及可靠性	184
附录 B 委员会简介	186
附录 C 会议和主要活动	191

图形和表

图

- 1-1 MEMS 安全开关
- 1-2 量子点的原子力显微照片
 - 1-1-1 空间尺寸量级
 - 1-2-1 SNAP-1 纳米卫星
- 2-1 集成电路的发展
- 2-2 半倾斜光刻尺寸与时间的关系
- 2-3 可能的规划
- 2-4 世界各国政府在纳米技术上研究与发展的费用
- 3-1 高频微波器件电源与频率的关系
- 3-2 半导体器件的抗辐射水平
- 3-3 赤道轨道辐射环境
- 3-4 二极管激光阈值
- 3-5 InAs 原子在 InP 上的冲击增长
- 3-6 光学 MEMS 的范例
- 3-7 RFMEMS 电容器
- 3-8 环境识别系统原理
- 3-9 软件方面的典型转换
- 3-10 微机械加工的太阳传感器
- 3-11 波音/恩得富克公司的压力带
- 3-12 典型的超音速运输机风洞模型中压力敏感涂料测试结果
- 3-13 大阵列
- 3-14 微机械气体涡轮发动机
- 3-15 微机械气体涡轮发动机的硅涡轮
- 3-16 可批量生产的冷却气体推进模型
- 3-17 国际通信卫星的航空飞船电能
- 3-18 使用动力交换系绳来进行轨道转换

3-1-1 碳纳米管结构

3-2-1 纳米卫星群

4-1 军事硬件的制造、维修和使用所需要的单元

4-2 光刻技术举例

4-3 LIGA 工艺步骤

4-4 LISC 所使用的结构框架

4-5 集成电路制造

4-6 经过深度反应离子蚀刻处理的硅晶片横截面照片

4-7 MEMS 设备

4-8 DNA 辅助拾取放置原理

4-9 DNA 辅助微组装

4-10 运用疏水/亲水选择制成的透镜排列

4-11 MEMS 交易累计的用户量

4-12 数字镜器件结构模型的剖面图

4-13 数字式微反射镜显微照片

4-1-1 二维活性像素传感器阵列

5-1 空军纳米技术的研究

5-2 1990~2003 年研发的投资趋势

5-3 国防部的基础研究投资

5-4 科学技术经费水平

5-5 集成电路销售

6-1-1 DARPA/太空公司的纳米卫星

6-2-1 “黑寡妇”微型航空飞行器

6-2-2 “黑寡妇”各个子系统的质量、尺寸及分布

A-1 纳米产品的计算生产工艺

表

ES-1 建议空军在微纳米技术研究中的作用

ES-2 微纳米研究领域和对空军的适用性的分类

ES-3 所选任务及平台的机遇范畴

2-1 2001 年 ITRS 选定参数的预测值

- 3-1 半导体器件的抗辐射水平
- 4-1 纳米产品的可靠性范例
- 4-2 数字镜设备的高度复杂性
- 5-1 需求和影响领域
- 5-2 空军纳米技术的研究
- 5-3 空军科学研究所下属的国防大学纳米技术研究机构在纳米方面的投资
- 5-4 2001 年度 MURI 纳米技术
- 5-5 2001 年度 AFOSR 技术拨款
- 6-1 被选任务和平台的契机领域

框 图

- 1-1 尺寸范围
- 1-2 小型卫星：我们能够做到多小
- 3-1 无处不在的碳纳米管
- 3-2 大量微平台紧急事件行为
- 4-1 金属氧化物半导体实现服务
- 5-1 空军纳米技术研究的预期影响
- 5-2 国防部在纳米技术方面的最初研究
- 5-3 空军纳米技术的项目
- 6-1 纳米卫星和皮米卫星
- 6-2 “黑寡妇”微型飞行器