



纳米科学技术大系
Nano Science and Technology Series

纳机电基础效应与器件

张文栋 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

纳米科学技术大系

纳机电基础效应与器件

张文栋 等 著

科学出版社

北 京

《纳米科学技术大系》编委会

顾 问	韩启德	师昌绪	严东生	张存浩	
主 编	白春礼				
副主编	朱道本	解思深	范守善	侯建国	林 鹏
编 委	(按姓氏汉语拼音排序)				
	封松林	顾 宁	汲培文	李亚栋	梁 伟
	梁文平	刘 明	强伯勤	万立骏	王 琛
	薛其坤	张先恩	张幼怡	赵宇亮	郑厚植
	郑兰荪	周兆英	朱 星		

《纳米科学技术大系》序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析、形成体系并实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想和对这个学科领域的充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一。其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国都将发展纳米科技作为国家战略。

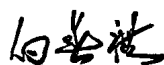
兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学技术大系》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去。为

我国纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,为提高全民科学素养作出贡献。

我代表《纳米科学技术大系》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的所有同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院常务副院长

国家纳米科技指导协调小组首席科学家

二〇〇九年四月于北京

序

纳米技术与生物技术、信息技术并称为 21 世纪的三大关键技术,是 21 世纪高技术竞争的制高点,而纳米技术是支撑它们走向应用的基础。纳机电器件技术是纳米科学与技术的重要组成部分,是 20 世纪 90 年代末至 21 世纪初提出来的一个新概念。纳机电器件是基于纳机电效应的、特征尺寸在 0.1~100nm 的新型器件;纳机电器件技术是研究纳米器件和构成微米/纳米混合系统的重要基础技术。纳机电器件涉及物理、化学、生物、材料、电子、机械等学科,是一个多学科交叉的新科技领域,是在微机电系统(MEMS)技术的基础上发展起来的纳米科技的一个重要方向。

纳机电器件技术不仅大大拓宽了器件的尺度范围,开辟了新的领域,大幅度提升了器件的精度和质量,同时也将发展新的理论和方法。纳机电器件技术将产生新原理、新概念器件,将突破常规器件的性能极限,并将实现超微型化和高功能密度化。纳机电器件在军事领域具有重要应用价值,并在航空、航天、信息、生物医学、环境、交通、工业等领域都有着广泛的应用前景。

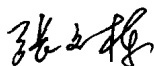
据美国国家科学基金会预测,未来 15~20 年,全球纳米技术市场规模将达到每年 10 000 亿美元左右。美国于 1998 年推出“国家纳米技术计划”,从 2005 年起三年内联邦政府对纳米科技给予 37 亿美元的资助,并将纳米制造列为重要研究领域之一。2011 年 2 月发布了美国 2011 纳米技术发展战略(NNI),标志着美国进入全面推进纳米科技发展的新阶段。英国、法国和德国等欧洲国家每年对纳米技术的研究总投入约为 10 亿欧元,并逐年增加。2001 年,日本也制定了《纳米技术与材料重大推进计划》。2001 年我国制定了《国家纳米科技发展纲要(2001—2010)》,以指导未来 5~10 年纳米科技的研究与开发工作。《中国至 2050 年纳米科技发展路线图》重点阐述了我国纳米科技领域至 2050 年的发展战略目标与发展路线图,提炼出信息、健康、能源与环境三条纳米技术优先发展的快行主线。

本书全面介绍了作者主持项目的研究成果,系统地论述了纳机电器件的尺度效应和耦合问题、纳机电器件基础结构制造方法和纳机电器件基础结构设计及测试方法。

书中内容包括:提出并验证了共振隧穿介观压阻效应、原子干涉角速率信号提取方法以及纳米梁能量耗散模型,揭示了纳机电结构传感与致动的重要规律,为设计高性能纳机电力电耦合器件提供了理论支撑;提出了纳机电结构关键加工技术,开发出微纳结合的硅基和砷化镓基纳机电结构集成制造工艺,为军用高性能纳机

电器件的研制提供了实现手段;介绍了高灵敏度矢量水声传感器、高分辨率加速度传感器和高 Q 值谐振器基础结构,验证了纳机电器件突破常规器件现有性能极限的可行性,为进一步研制高性能、小型化的器件系统提供了基础。所取得的创新成果将为纳机电技术进一步发展及其应用发挥重要作用,充分体现了基础研究的重要学术价值和应用价值。本书是相关研究领域科技工作者的一本非常有益的参考资料。

本书聚焦纳机电器件与系统,创新内容较多,其他同类书籍未覆盖本领域研究内容。我衷心祝愿本书能够成为相关领域研究者的忠实助手,希望本书的出版能对我国纳机电器件技术的进一步发展和科技教育工作起到应有的作用。



2011 年 6 月

前 言

纳机电系统技术是纳米科学技术的重要组成部分,本书主要介绍特征尺寸在 $0.1\sim 100\text{nm}$ 、具有纳机电效应的器件、系统及其制造的共性技术。在纳米尺度,纳机电器件结构的尺度效应逐渐显露、机电耦合效应也呈现新的特征,这些新效应、新机理是研发能够突破常规器件性能极限的新型器件的基础,也是贯穿本书的主线。

本书系统介绍了纳机电系统的基本概念,从纳机电结构的基础效应、加工工艺以及器件与系统三个方面对我们在该领域的研究成果进行了系统论述,并展望了纳机电系统技术的发展趋势。

本书共分8章。第1章主要介绍纳机电器件与系统的基本概念和该领域的相关研究情况。第2章论述纳机电结构的尺度效应、纳米梁能量耗散机制,共振隧穿介观压阻效应,量子惯性效应。第3章从加工工艺角度,介绍了纳机电结构关键加工技术和集成制造工艺,重点是刻蚀与生长相结合的纳结构制造与表征方法,微纳结合的硅基和砷化镓基纳机电结构集成制造工艺。第4章到第7章分别就四种纳机电典型器件:纳机电加速度传感器、纳机电声传感器、纳机电谐振器和微流体角速度传感器,从传感机理、结构设计、工艺流程、性能测试与系统集成等方面进行了详细论述。第8章展望了该领域的未来发展趋势和前景。

本书中所涉及的主要内容来源于纳机电器件基础研究的结果。该项研究得到国家重点基础研究发展计划的资助,丁衡高院士为该项目顾问,张文栋为技术首席,参加单位有中北大学、清华大学、北京大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所,以及中国电子科技集团第十三研究所、东南大学、哈尔滨工业大学、电子科技大学和浙江大学。

本书由张文栋、周兆英、郝一龙、王跃林负责撰写,熊继军、冯焱颖、吴文刚、李铁、薛晨阳、张斌珍、张国军等为撰写组主要成员。本书撰写过程中得到了项目组所有研究者的大力支持和帮助,中北大学微米纳米技术研究中心的多位研究生为本书的完成做了大量工作,出版过程中凝聚了科学出版社诸位同志的心血,在此一并表示衷心感谢!作者还特别感谢支持开展纳机电器件基础研究工作的各位领导、专家和同志们。

本书可作为微米纳米技术领域科研工作者和研究生的参考用书,衷心希望读者对本书提出批评指正。

作 者

2011年2月

目 录

《纳米科学技术大系》序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 纳机电器件与系统基本概念	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书主要内容	11
参考文献	11
第 2 章 纳机电器件的尺度效应和耦合问题	13
2.1 纳机电器件尺度效应	13
2.1.1 弹性模量的尺度效应及纳尺度下力学理论适用性	13
2.1.2 硅纳米梁的能量耗散机制	17
2.1.3 纳尺度下理论模型适用性分析	30
2.2 纳机电介观压阻效应	36
2.2.1 力学分析	36
2.2.2 电子能态和内建电场的影响	44
2.2.3 量子阱共振隧穿	47
2.2.4 介观压阻效应的定量表述	54
2.2.5 电子自旋对介观压阻效应影响方式的理论研究	58
2.3 量子惯性效应研究	60
2.3.1 原子系统的相干控制及相干原子源	60
2.3.2 相干集成原子光学研究	63
2.3.3 原子量子惯性传感理论和测试方法研究	66
2.4 纳机电连续结构尺度效应的表征研究	80
2.4.1 微米/纳米尺度并行结构的尺度效应表征研究	80
2.4.2 典型纳米结构谐振特性的实验表征	82
2.4.3 典型纳机电结构谐振特性的测试	84
2.4.4 内耗效应研究	86
参考文献	87

第3章 纳机电器件基础结构制造、测试和表征方法	91
3.1 纳机电结构加工的关键新工艺及机理研究	92
3.1.1 纳机电结构的成型方法	92
3.1.2 纳米结构定位、定向组装方法	115
3.1.3 纳米(机电)结构的电连接方法	118
3.1.4 纳米功能薄膜制备方法	124
3.2 纳机电功能结构加工的共性集成工艺研究	132
3.2.1 具有“纳米宽度梁”特征的纳机电功能结构的集成工艺	132
3.2.2 具有“纳米厚度梁”特征的纳机电功能结构的集成工艺	136
3.2.3 具有“纳米柱/针尖”特征的纳机电功能结构的集成工艺	138
3.3 纳机电器件基础结构加工的集成工艺研究	141
3.3.1 纳机电惯性敏感结构集成制造工艺	141
3.3.2 纳机电介观压阻效应传感结构集成制造工艺	142
3.3.3 纳机电谐振器结构集成制造工艺	149
3.4 纳米结构特性测试与表征方法研究	150
3.4.1 纳米薄膜应力片上测试方法和相应测试结构	150
3.4.2 纳米结构尺寸形貌测量方法	154
3.4.3 纳米结构静力学特性、振动特性测试方法	160
参考文献	164
第4章 纳机电加速度传感器	169
4.1 纳机电加速度计基础结构设计及建模仿真研究	169
4.1.1 纳机电加速度计基础结构设计	169
4.1.2 纳机电加速度计基础结构的建模仿真	170
4.2 纳机电加速度计结构测试方法研究	176
4.2.1 纳机电静力学分析与测试	176
4.2.2 纳机电动力学模型与测试	178
4.2.3 纳机电加速度计结构测试	182
4.3 纳机电加速度计特性和性能测试	203
参考文献	206
第5章 纳机电声传感器	208
5.1 介观压阻效应基础结构的验证与传感机理	208
5.1.1 纳机电电力电耦合敏感结构的优化设计与仿真分析	208
5.1.2 压力传感器结构设计及微分负阻特性验证	217
5.1.3 纳机电电力电耦合敏感结构的加工及其介观压阻效应	219
5.1.4 纳机电电力电耦合敏感结构信号解算电路研究	228

5.2 纳机电水声传感器的设计和加工	232
5.3 纳机电声传感器的集成封装与性能测试	243
5.3.1 纳机电声传感器的集成封装	244
5.3.2 纳机电声传感器的水下性能测试	245
参考文献	255
第6章 纳机电谐振器	259
6.1 纳机电谐振器的 Q 值分析、驱动及检测设计	259
6.1.1 纳机电谐振器的 Q 值分析	259
6.1.2 纳机电谐振器的驱动设计	261
6.1.3 纳机电谐振器检测方法研究	264
6.2 纳机电谐振器基础结构的制备	266
6.3 纳机电谐振器基础结构的性能	271
参考文献	275
第7章 微流体角速度传感器	277
7.1 微流体角速度传感机理研究	277
7.1.1 微流体定向运动结构设计	277
7.1.2 微流体定向运动的协调控制方法研究	283
7.1.3 微流体角速度传感的微观机理研究	287
7.2 微流体行为可视结构实现方法研究	292
7.2.1 低应力振动膜的关键加工工艺的优化和设计	292
7.2.2 玻璃衬底上悬浮敏感梁的设计和制作	295
7.2.3 利用多层掩模制造 4 种不同深度的硅结构	300
7.2.4 振动膜上电极的低电阻连接	302
7.3 微流体角速度传感技术实现方法研究	303
7.3.1 热流式角速度传感器结构加工	303
7.3.2 射流式角速度传感器结构加工	305
7.4 微流体信号处理方法与试验研究	307
7.4.1 敏感信号检测	307
7.4.2 驱动控制技术研究	308
7.4.3 微流体角速度传感器测试	311
参考文献	315
第8章 纳机电器件与系统的发展趋势及应用前景	317
附录 缩略语	321
彩图	

第 1 章 绪 论

1.1 纳机电器件与系统基本概念

纳机电器件技术是纳米科学与技术的重要组成部分,是 20 世纪 90 年代末、21 世纪初提出来的一个新概念。纳机电器件是基于纳机电效应的、特征尺寸在 0.1~100nm 的新型器件。该技术是研究纳米器件和构成微米/纳米混合系统的重要基础技术。纳机电器件以“自上而下”(top-down)为主要制造方式,结合“自下而上”(bottom-up)方式,以纳米机械制造为基础,构成纳机电传感器、纳机电执行器及其组成的系统。它可实现利用现有技术难以实现的超高灵敏的传感和探测,超高精细的执行和操纵,超高密度的存储和传输,等等。

纳机电器件涉及物理、化学、生物、材料、电子、机械等多学科,是一个多学科交叉的新科技领域,是在微机电系统(microelectromechanical system, MEMS)技术的基础上发展起来的纳米科技的一个重要方向。微机电系统可以看作是传统机械的小型化和集成化,但未展现出新的物理效应,而在纳机电系统中,由于尺度效应,各种物理参量相互耦合显著增强,会表现出全新的物理性质,这使得基于纳机电效应的新器件的出现成为可能。

纳机电器件技术将产生新原理、新概念器件,将突破常规器件的性能极限,并将实现超微型化和高功能密度化。纳机电器件与 MEMS 器件相比灵敏度可提高 1~3 个量级,功耗减少 1~2 个量级。纳机电技术既可以用于改造现有测试设备,又能够发展新一代微型器件与装置。利用纳机电技术将能实现超高性能的微型惯性器件、声传感器件等;还能测量一些原来无法检测的物理、化学或生物量,如:生物单分子检测和极微量(痕量)检测、分子自旋电磁力检测等;纳机电射频技术将实现能耗更低、更高频的高集成度通信;纳机电存储器将具有真正海量的存储密度;纳机电执行器将能进行分子级捕捉和操纵;等等。有资料表明,未来的纳结构用于 RF 信号处理将使其尺寸减至百分之一(例如尺寸从 80cm² 减小到 0.8cm² 以下),功耗减小至几百分之一(例如从 300mW 减小到 0.83mW 以下),RF 性能(特别是效率和带宽)提高 10 倍,未来的超高频(UHF)通信/GPS 接收机将如手表大小。纳机电器件在军事领域具有重要应用价值,并在航空、航天、信息、生物医学、环境、交通、工业等领域都有着广泛的应用前景。

1.2 国内外研究现状

1982 年扫描隧道显微镜发明,1986 年原子力显微镜发明,1991 年碳纳米管被发现,这些标志着纳米技术的发端。纳米技术是 20 世纪 90 年代后期发展起来的前沿、交叉性新兴学科。鉴于研究纳米技术的重要科学意义和重大应用前景,近年来,美国、日本、欧洲各国都先后启动了纳米技术的大型研究计划。2000 年,美国以总统报告的形式,推出了《国家纳米技术计划》(*National Nanotechnology Initiative*, 简称 NNI 计划),该计划仅 2001 年财政年度的预算就达近 5 亿美元。克林顿宣称:“我的预算支持一个比较重要的、新的国家纳米技术倡议,即在原子和分子水平上操纵物质的能力,资助额度为 5 亿美元。试设想一下这样的可能性:材料将 10 倍于钢的强度而重量却只有其几分之一;国会图书馆内所有信息可以压缩在一块方糖大的器件上;当癌病变只有几个细胞那样大小时就可以探测到。我们的某些目标可能需要 20 年或更长的时间才能达到,但这恰恰是为什么联邦政府要在其中起重要作用的原因。”

2001 年,日本也制定了《纳米技术与材料重大推进计划》,准备投资 886 亿日元进行纳米技术的研究,其中重点研究内容涉及信息通信、环保、能源、医疗、生物系统的纳米器件和材料,以及测试、加工、数字分析和仿真等的基础技术领域。此外,欧洲也有相应的纳米技术研究计划。

纳机电器件是纳米技术的一个重要组成部分。虽然目前对纳机电器件及其应用的研究刚刚开始,但在国际上受到了极大重视,如上面提到的美国、日本、欧洲各国启动的纳米技术研究中,多项研究内容已开始涉及纳机电器件。特别是在国防、军事等关系到国家安全的领域,一些发达国家已经意识到纳机电器件技术的重要性,并开始设立相关的研究项目。例如,在 2001 年美国制定 NNI 计划之后,美国国防部马上宣布从 2001 年起拨款支持纳米技术、特别是多学科交叉性质的纳米技术的研究,资助的 15 个纳米技术项目中有 4 个是与纳机电器件相关的。现在,美国国防部高级研究计划局(DARPA)等已将纳机电器件技术列为美国需要特别关注的未来新技术之一,在纳机电器件理论基础、制作技术以及器件样机方面资助了大量的研究项目。到目前,以美国加州理工学院(Caltech)、斯坦福大学、加州大学伯克利分校、佐治亚理工学院为代表的一批研究机构,开展了如下几方面的研究工作。

(1) 理论和基础方面

纳米尺度机构、运动和量子控制方法,纳米结构的量子效应、尺度效应、表面效应,纳米尺度的多域耦合问题,纳米结构的致动机理和测量方法,基于分子动力学的建模与仿真等。近年来发现了不少新现象和新效应。但未形成完整的理论体系,实际应用上还有很多待研究的课题。

纳米尺度新现象和新效应实例：

美国佐治亚理工学院的工作者发现了电特性在纳米尺度下呈现出的某些异常现象,如电子传导表现出弹道效应,即呈现量子传输特性,纳米碳管的电阻、电流强度与长度和直径无关;并发现纳米结构下的力学特性也发生了异常变化,如纳米碳管的弹性弯曲模量、杨氏模量等与直径的大小有关(图 1.2.1)。

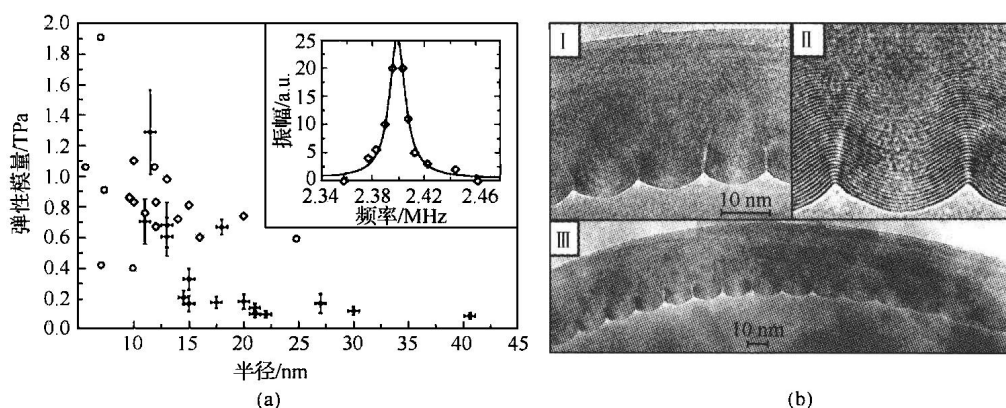


图 1.2.1 纳米碳管的弹性特性与内部弹性模式的表现

(a) 纳米碳管的弹性特性;(b) 内部弹性模式的表现

加州大学伯克利分校物理系的 Richard Packard 领导的课题小组于 1997 年首次发现了“量子声音”现象:当推动超流体通过微孔时,超流体会发生振动。这种现象也被称作“超流体的量子干涉效应”,利用这一原理可制成超高精度的量子陀螺仪[图 1.2.2(a)]。

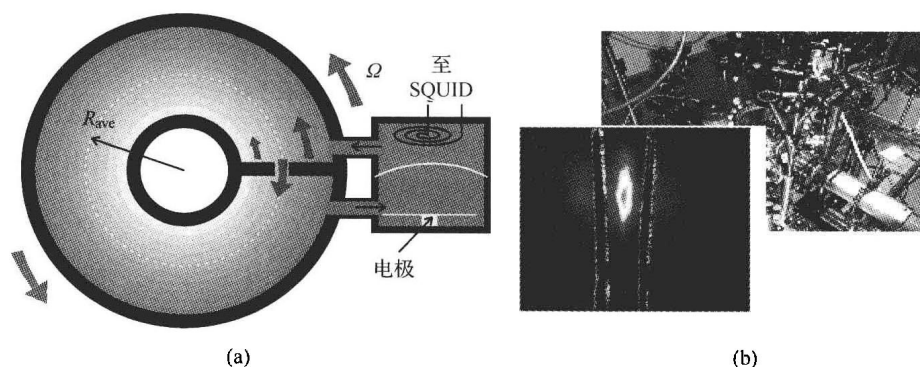


图 1.2.2(另见彩图)

(a) 量子陀螺;(b) 原子波导效应陀螺

佐治亚理工学院物理系超低温原子物理研究组的 Michael Chapman 等利用世界上最小的原子存储环首次成功地实现了超冷中性原子的导引。由于原子波衍射陀螺的灵敏度正比于干涉计包围的面积和粒子的质量,而原子的质量比光子的相

对论质量高 10 个数量级,因此利用原子的量子机械波在原子波导管中可同时向两个方向传播的特性,可制成超高灵敏度、超低功耗、超小尺寸的低成本原子波纤陀螺[图 1.2.2(b)]。

(2) 制作方法方面

硅基纳米制作、纳米级 LIGA 加工、聚合物纳米制作、单原子操纵、碳纳米管操纵和组装、自组装技术等,如图 1.2.3 所示。但在一致性、重复性、适应批量生产方面还很不够。

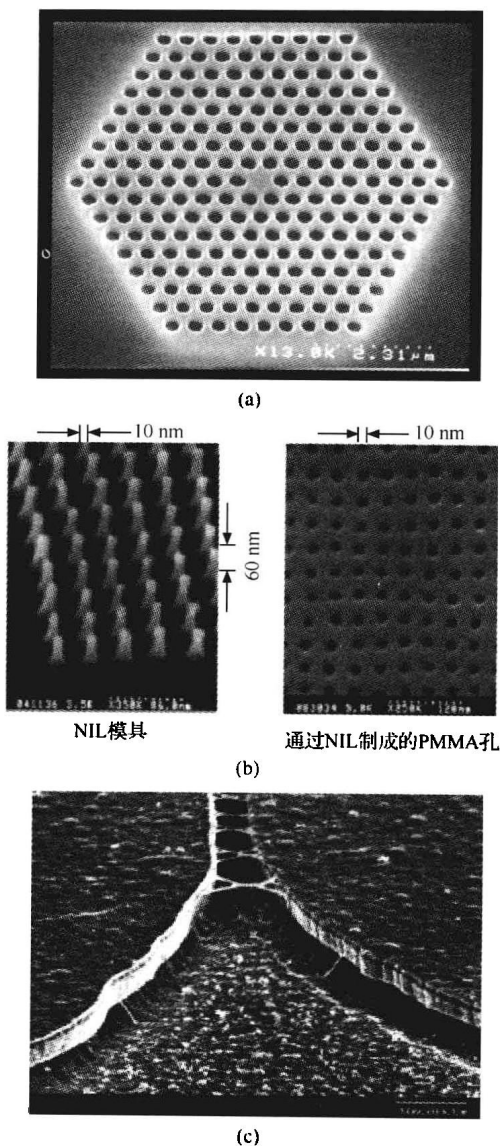


图 1.2.3

(a) 纳米级硅加工;(b) 纳米压印;(c) 硅结构间隙上沉积碳纳米管

纳机电制造研究实例:围绕具体纳机电器件(如谐振器、纳探针及其阵列、微小力测量器件、热传导器件、静电计等)的研制来研究新的工艺方法;建立了一些基于Si、SOI、SiC、GaAs等半导体材料的纳机电器件结构的加工制作方法;应用于制造纳机电器件结构的关键工艺技术有:光刻技术,如电子束光刻等;纳米尺度局域化处理技术,如局域化氧化钝化、刻蚀等;封装组装技术等。

(3) 器件方面

传感和信息器件是纳机电器件的重要研究内容之一。纳机电传感器主要有基于纳米探针的传感器,如:隧道效应传感器、场致发射传感器、近场光学传感器等;基于纳米梁谐振的传感器,测量分子自旋电磁力、生物机械力、质量传感、惯性力、单分子、单DNA检测等;基于纳米热丝的传感器,如:红外测辐射热仪等。如图1.2.4所示。纳机电声传感器是国际上新的研究方向。另外,还有RF谐振器、滤波器,微/纳探针高密度存储器,纳米磁柱高密度存储器,纳机电生化分析系统(N-TAS),机械单电子器件,生物电机等。器件研究方面的报道虽不少,但尚未出现能实际应用的器件,还有待创新性的突破。

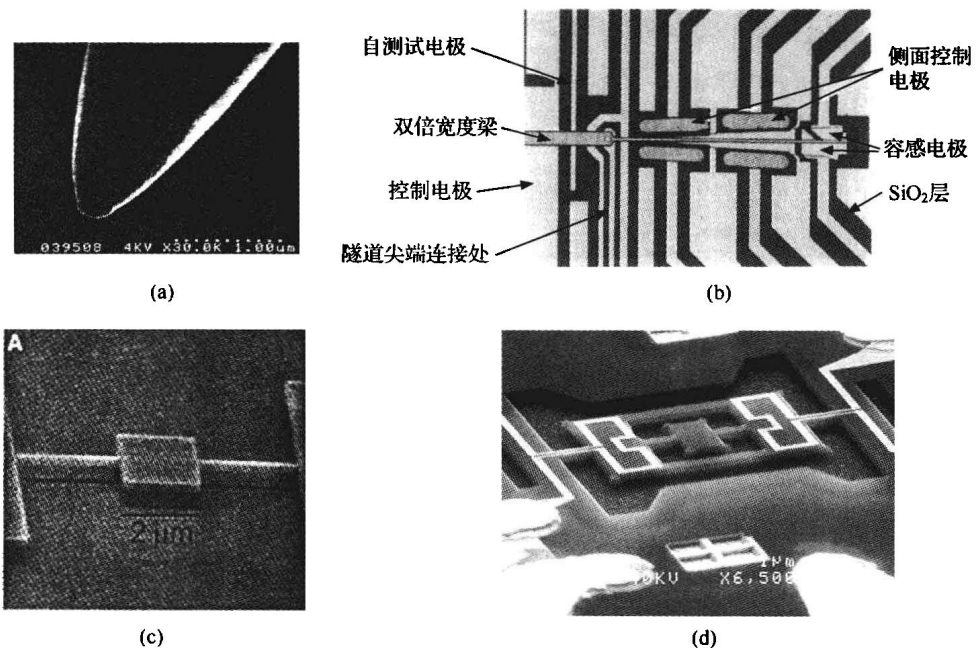


图 1.2.4

(a) 近场光学的光生化传感器;(b) 基于隧穿效应的陀螺;(c) 纳米梁谐振器;(d) 纳机电谐振器

由于MEMS技术的局限,射频MEMS谐振器的频率大多数停留在几十到几百千赫兹的范围,无法跟上无线通信和集成电路技术发展的步伐。而对于尺度为纳米级的纳机电谐振器,其谐振频率可达GHz的水平,Q值可达数万到十几万(见

表 1.2.1),从而满足射频通信系统的要求,有可能发展出新型射频通信系统。目前,国际上已有一些研究部门在进行这方面的基础研究。如美国加州理工学院(Caltech)的胡克研究室在 2000 年北美传感器和执行器会议上介绍了利用纳机电器件形成高频谐振器的思路,即 RF NEMS(见图 1.2.5)。

表 1.2.1 谐振频率与器件尺寸的关系

尺寸 $L \times w \times t$ $/(\mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m})$	$Q=10\,000(100\,000)$ 时,谐振器的属性							
	频率 $\omega_0/2\pi$	K_{eff} $/(N/m)$	$S_x^{1/2}(\omega_0)$ (300K 时) $/(m/Hz)$	非线性 初始值 $\{x_N\}/m$	线性 DR/dB	$S_F^{1/2}(\omega_0)$ (300K 时) $/(N/Hz)$	有效 质量	感应到的 近似质量 $/\text{Da}^*$
$100 \times 30 \times 0.1$	77kHz	0.007	$2 \times 10^{-10} (7 \times 10^{-10})$	5×10^{-7}	51(51)	$2 \times 10^{-10} (7 \times 10^{-10})$	40pg	$10^8 (10^8)$
$10 \times 0.2 \times 0.1$	7.7MHz	0.5	$3 \times 10^{-12} (8 \times 10^{-12})$	5×10^{-7}	68(68)	$2 \times 10^{-10} (7 \times 10^{-10})$	0.3pg	$10^7 (10^6)$
$1 \times 0.05 \times 0.05$	380MHz	16	$7 \times 10^{-14} (2 \times 10^{-13})$	3×10^{-8}	59(59)	$2 \times 10^{-10} (7 \times 10^{-10})$	3fg	$10^5 (10^4)$
$0.1 \times 0.01 \times 0.01$	7.7GHz	25	$4 \times 10^{-14} (1 \times 10^{-13})$	5×10^{-9}	35(35)	$2 \times 10^{-10} (7 \times 10^{-10})$	10ag	$10^3 (10^2)$

* 非法定单位。1 Da=1 u=1.660 54×10⁻²⁷ kg。

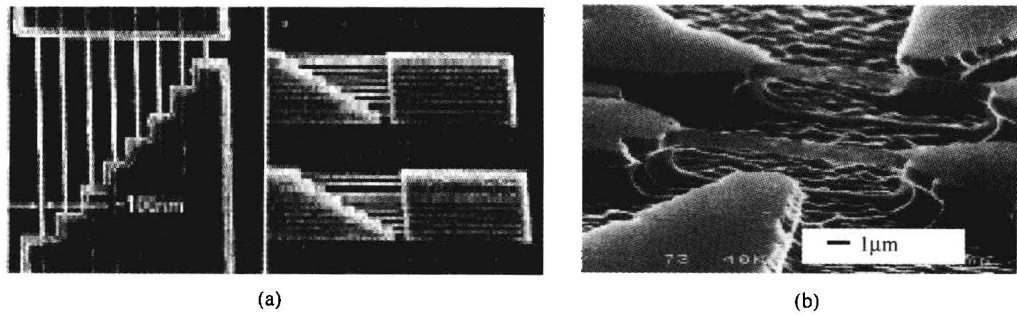


图 1.2.5

(a) SiC 纳机电谐振器件;(b) 加州理工学院的纳机电谐振器

近年来,新的纳米结构的不断出现,利用纳米结构表现出的独特的电、热、光、磁等性能进行新型纳米传感器和执行器的研究也逐渐成为纳机电器件研究的一个热点,其中以一维纳米结构的应用尤为突出,利用一维纳米结构制作传感器和驱动器的研究已有相应的进展。例如,美国佐治亚理工学院王中林教授等利用多壁纳米碳管研制出纳谐振器[图 1.2.6(d)],通过其共振频率的变化可称出 30fg(1fg=10⁻¹⁵g)的碳微粒的质量[图 1.2.6(a)],这种谐振器可作为分子秤检测分子或细菌的质量。美国西北大学的 Jae-Hyun Chung 等通过将单根多壁碳纳米管精确组装在 MEMS 工艺加工的结构中,实现了对化学气体及其流量的传感[图 1.2.6(b)]。哈佛大学利用纳米碳管制作了纳米镊子,当施加电压时,纳米碳管制作的镊子头会互相靠近,当电压达到一定值时镊子闭合[图 1.2.6(c)]。再如,美国联信(Allied Signal)公司的 Ray H. Baughmand 等研制出低电压驱动的碳纳米管驱动器,如