

微纳技术著作丛书

微纳系统技术与应用

姚 军 汪为民 编著



科学出版社

微纳技术著作丛书

微纳系统技术与应用

姚 军 汪为民 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述了微纳结构与系统的知识,主要包括微纳系统的基本概念、所用材料、加工方法、在多学科交叉领域的具体应用等。另外,本书还详细探讨了微纳系统领域内一些热点研究方向的最新成果,包括 MEMS 空间光调制器、MEMS 开关、光纤传感器、气体传感器等,并按照设计、加工、测试、封装这一完整流程阐述了研发的方法和技巧,通过实例对各个研发环节的实践经验进行了简明介绍,这都有助于读者在实际工作中的参考。

本书可供微机械、光学工程、自动控制、先进制造等相关专业的教学、科研和工程技术人员阅读参考,也可作为相应领域高年级本科生和研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

微纳系统技术与应用/姚军,汪为民编著. —北京:科学出版社,2011.8
(微纳技术著作丛书)
ISBN 978-7-03-032103-9

I. ①微… II. ①姚…②汪… III. ①微电子技术 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 168633 号

责任编辑:孙 芳 / 责任校对:朱光兰
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 8 月第一次印刷 印张:14

印数:1—2 500

字数:272 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在当代信息技术高速发展的形势下,微纳系统技术的研发逐渐成为信息产业和高科技交叉领域的创新源。微纳系统技术是微米和纳米尺度上的一门新兴科学技术,其研究涉及物理、化学、力学、光学、机械、电子及生物医学等基础学科和应用学科,具有集成化、微型化、智能化、成本低、大批量生产等典型特征。目前,微纳系统技术已广泛应用于通信、能源、环境、汽车、国防、航空航天等诸多领域。

微纳结构由于其尺度原因,经典物理中的某些理论、定律和常规的机械加工技术、光学显微检测手段已不再适用。因此,现代科技有针对性地发展了一套系统有效的研究方法来处理这一问题。本书即以此为基础,阐述了微纳结构与系统的原理、发展与应用。

全书共7章,第1章介绍了微纳系统技术的概念、研究领域、发展现状和前景;第2章阐述了微光学的基本理论和典型器件;第3章介绍了微机电系统的材料、传感器、执行器及几个典型应用;第4章介绍了微机电系统在微光学中的典型应用——微光机电系统;第5章概括了一些常见的微纳系统技术的微细加工技术;第6章介绍了纳机电系统;第7章通过实例对微纳系统技术的整个研发过程进行了分析。

本书是作者对微纳系统领域研究心得体会的凝练,既涵盖基础知识又涉及领域前沿,一些研究和成果是原创性的。同时,为了能有针对性地解决本领域研究中遇到的实际问题,本书以作者实际工作中的部分内容为例,讲解研发流程的要点,促进读者对全书内容的深入理解和熟练运用。

参加本书编写工作的有胡放荣、马文英、任豪、陈科帆、陶逢刚、罗吉、熊伟等。书中内容参考了国内外许多最新文献和著作,并获得了中国科学院、国家自然科学基金委员会和四川省科学技术厅等单位的科研项目及经费资助,在此一并表示衷心感谢。

微纳技术是一个新兴的领域,涉及范围和应用很广,限于作者的知识水平,书中可能存在纰漏或不当之处,望读者批评指正。

作 者

2011年5月于成都

目 录

前言

第 1 章 微纳系统技术概述	1
1.1 引言	1
1.1.1 微纳系统的概念	1
1.1.2 尺度效应	2
1.1.3 微纳系统的研究领域	6
1.2 研究现状	9
1.3 发展前景	11
1.4 本章小结	11
参考文献	12
第 2 章 微光学	13
2.1 光学基础知识	13
2.1.1 反射和折射定律	13
2.1.2 光的干涉	14
2.1.3 光的衍射	16
2.2 微光学基本理论	18
2.2.1 标量衍射理论	18
2.2.2 矢量衍射理论	20
2.3 微光学典型器件	23
2.3.1 衍射光学器件	23
2.3.2 亚波长光学元件	28
2.3.3 微光学波导器件——纳米光纤	34
2.3.4 自由空间微光学器件	36
2.4 本章小结	37
参考文献	38
第 3 章 MEMS 概述	40
3.1 MEMS 材料	42
3.1.1 基片材料	43
3.1.2 薄膜材料	46
3.2 MEMS 传感器	50

3.2.1 物理传感器	51
3.2.2 化学传感器	61
3.2.3 生物传感器	63
3.3 MEMS 执行器	66
3.3.1 静电执行器	66
3.3.2 压电执行器	71
3.3.3 电磁执行器	75
3.3.4 电热执行器	78
3.4 MEMS 应用	80
3.4.1 MEMS 开关	80
3.4.2 MEMS 滤波器	87
3.4.3 微陀螺仪	93
3.5 本章小结	96
参考文献	97
第4章 MOEMS	99
4.1 MOEMS 概述	99
4.1.1 研究领域	99
4.1.2 研究进展	99
4.2 光通信器件	100
4.2.1 光源器件	100
4.2.2 光开关	100
4.2.3 VOA	109
4.3 MOEMS 显示器件	111
4.3.1 DMD	111
4.3.2 光栅光阀	116
4.4 变形镜	119
4.4.1 变形镜概述	119
4.4.2 微机械薄膜变形镜	123
4.4.3 表面微机械分立和连续镜面变形镜	125
4.5 本章小结	136
参考文献	136
第5章 微细加工技术	140
5.1 微细加工技术基础	140
5.1.1 光刻	140
5.1.2 沉积	141

5.1.3 刻蚀	144
5.2 表面微加工技术	145
5.2.1 概述	145
5.2.2 表面工艺中的主要问题及其解决办法	147
5.2.3 实例解析	152
5.3 其他微加工技术	154
5.3.1 掺杂技术	154
5.3.2 LIGA 技术	155
5.3.3 纳米加工技术	156
5.3.4 封装技术	158
5.4 本章小结	160
参考文献	161
第 6 章 NEMS 概述	163
6.1 概述	163
6.1.1 NEMS 的特点	163
6.1.2 NEMS 的制造技术	165
6.1.3 NEMS 的检测与表征	167
6.2 NEMS 器件	167
6.2.1 谐振器	167
6.2.2 悬臂梁生化传感器	168
6.3 NEMS 在微流体中的应用	169
6.3.1 微流体特性	169
6.3.2 微驱动	171
6.3.3 微通道	173
6.3.4 微泵	174
6.3.5 微阀	175
6.4 芯片实验室	176
6.4.1 加工	176
6.4.2 常用的检测技术	178
6.4.3 生化单分子检测	180
6.5 纳米传感器	181
6.5.1 LSPR 传感器	181
6.5.2 光纤消逝场生化传感器	182
6.5.3 平板波导生化传感器	185
6.6 NEMS 展望	186

6.7 本章小结	187
参考文献	187
第7章 MEMS 实例分析	191
7.1 设计目标	191
7.2 结构设计	192
7.2.1 工作原理	192
7.2.2 建立模型	193
7.3 工艺设计	194
7.4 参数优化	198
7.4.1 物理模型分析	198
7.4.2 工程力学分析	199
7.4.3 计算机辅助工程分析	199
7.4.4 参数优化实例	201
7.5 器件加工	206
7.5.1 版图绘制	206
7.5.2 加工过程	206
7.5.3 其他标准工艺	207
7.6 样品测试	207
7.6.1 MEMS 测试概述	207
7.6.2 样品测试实例	208
7.7 封装与系统集成	213
7.7.1 MEMS 封装概述	213
7.7.2 Sandia 国家实验室变形镜的封装与集成	213
7.8 本章小结	215
参考文献	216

第 1 章 微纳系统技术概述

1.1 引言

1.1.1 微纳系统的概念

本书所指的系统与一般的名词“系统”不同,主要是指机械电子系统(electro-mechanical system,简称机电系统),它是由多个部件组成、各部件分别执行不同的功能且相互配合、致力于同一个目标、能完成一个完整的功能或应用的器件。

机电系统的主要部分是机械结构,同时具有电路控制部分,从而能够独立自主接收并执行任务,其涉及的学科领域非常广泛,如自动化、电子、信息、力学、土木、水利等,包括了几乎全部的工程类学科,大到汽车、飞机,小到笔记本电脑、电子词典,均是人们非常熟悉的机电系统的典型应用。

除了机械和电子部分外,机电系统应用到不同领域时会添加不同的元器件,如数码相机,它是集成了光学器件的机电系统,一般称为光机电系统(opto-electro-mechanical system, OEMS)。除了光机电系统,还有气体传感器这样的化学机电系统,生物芯片这样的生物机电系统,移动电话这样的射频(radio frequency, RF)机电系统等应用于不同领域的机电系统。其实,在任何一个学科领域里,都可能用到由电路组成的处理和控制系统及外部支撑和执行的机械结构。

微纳机电系统(micro/nano electro-mechanical system,简称微纳系统)是指微米和纳米尺度的系统,其组成部分可用图 1-1 来表示。相比于传统的宏观系统而言,它们既有相同点又有不同点。首先从相同点来说,与宏观系统一样,微纳系统作为单一系统也具备了完善的结构与功能,可谓“麻雀虽小,五脏俱全”;但同时它又有不同于常规宏观系统的特点,由于微纳系统的尺寸很小,如图 1-2 所示的就是由波士顿大学制造的 1024 单元微变形镜(deformable mirror, DM),因此它的功耗更低、反应更快,相对于常规宏观系统,其易于提升整体性能,且可采用类似于集成电路工艺的微细加工技术进行全系统整体制造,而不像常规系统那样制造出单一器件再进行组装,这样的加工方法不但降低了成本还提高了可靠性,是传统机械加工技术的巨大进步。

微纳系统技术发展的历史并不长,但这是一项学科交叉性和综合性都很强且极具发展潜力的高新技术,开展这个领域的科学技术研究,既可以带动一些重要的

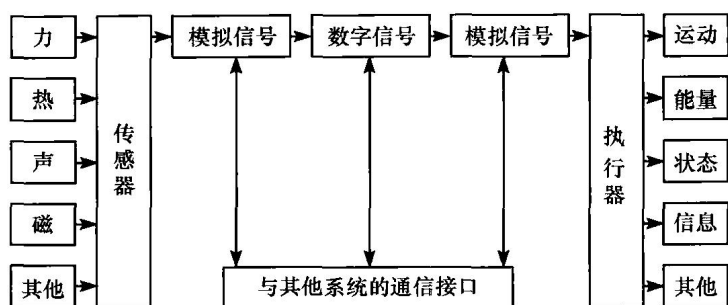


图 1-1 微纳系统组成部分

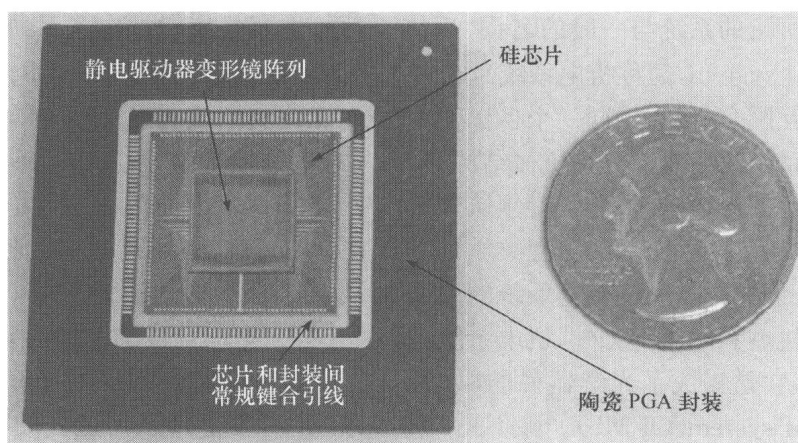


图 1-2 波士顿大学制造的 1024 单元微变形镜

基础课题研究,又可以带动大量概念全新的功能部件开发,因此,目前其已成为世界各国都看好的研究热点之一。

虽然微纳系统已经在许多领域得到了广泛应用,但它仍然面临着许多问题,如目前绝大部分商业化的微纳系统实际上是单一的微纳器件,完整的系统并没有能够成为市场的主流;微纳系统技术缺乏如集成电路具有的设计、制造、检测等标准,而是各个制造商、工厂根据特有的工艺流程、检测设备设定自己的标准,这大大限制了微纳系统技术的通用性。

微纳系统技术的飞速发展及其应用领域的不断拓展已经引起人们的关注和期待,其技术必将极大地带动现代社会的科技进步与生产力发展。

1.1.2 尺度效应

尺度效应,也称尺寸效应,是指当尺度减小到一定程度时,微观系统或物体的各项物理或化学性质会发生根本性的变化,而不是像宏观物质那样,尺寸大小变化后各项性质只是跟随渐变。例如,量子效应就是宏观不可能发生的现象。

尺度效应在宏观状态下不存在或者不明显,对于宏观物体一般不予考虑。物质的物理和化学属性跟它们的尺寸有一些关系,如下:

$$\text{表面积 } S \propto L^2$$

$$\text{体积 } V \propto L^3$$

$$\text{质量 } m = \rho V \propto L^3$$

$$\text{转动惯量 } I = mR^2 \propto L^5$$

$$\text{扭矩 } \tau = Rmg \propto L^4$$

$$\text{谐振频率 } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \propto \frac{1}{L} = L^{-1}$$

由上可知,物质的各种属性受尺寸的影响是很不相同的,因此,在不同尺度范围内会有不同的属性占主导地位,这就是尺度效应的物理本质。在宏观系统中,当物体的尺寸减小时,在万有引力系统中表现出来的是其质量减小、重量变轻,而在微纳系统中,物体的质量非常小,这时在主导地位的可能是原子、分子之间的相互作用力,如范德瓦尔斯力,此时重力的影响微乎其微。在微纳系统中,尺度效应是必须首先考虑的,这也是微纳系统不同于宏观系统的一个显著特点。

1. 力的尺度效应

首先看一看常见的各种力的尺度效应。

$$\begin{aligned} \text{重力 } G = mg &\propto L^3 & \text{压电力 } F = \frac{3dEbhV}{4L} &\propto L & \text{压力 } f = pS &\propto L^2 \\ \text{摩擦力 } F = \frac{\mu S}{d} \frac{dx}{dt} &\propto L^2 & \text{弹性力 } F = ES \frac{\Delta L}{L} &\propto L^2 & \text{惯性力 } f = ma &\propto L^4 \\ \text{电磁力 } F = \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial x} &\propto L^4 & \text{静电力 } F_e = -\frac{\partial U}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 WL V^2}{(d-z)^2} &\propto L^0 \end{aligned}$$

由上可知,宏观状态下非常显著的一些作用力在微观状态下可能变得微不足道,而宏观状态下可忽略的作用力在微观状态可能会起主要作用,如微纳系统中往往忽略重力的影响。宏观系统中,静电力常常可以忽略,而在微观情况时发生了很大变化,静电力有了大有作为的空间,静电力驱动的微机电系统(micro electro-mechanical system, MEMS)执行器得到了广泛的使用。同样的,压电驱动方式也像静电驱动方式一样,在微纳系统中成为常用的驱动力来源方式。电磁力是宏观系统中常用的驱动力,各种马达和驱动器几乎都采用电磁力作为动力来源,应用十分广泛。而在微观领域,由于产生电磁力的微结构制作工艺相对复杂,电磁力的应用受到了很大的限制,远远不及静电驱动、压电驱动等几种常见方式。另外,黏性力和摩擦力的尺度效应表明其在微观领域较宏观领域影响更为显著,微纳系统的摩擦和耗散是一个需要特别关注的问题,尤其是当系统周围介质为流体时,受到的

阻力更大,在器件和系统的设计阶段需要进行考虑。

此外,力的尺度效应也会对系统的动态行为产生影响,如谐振频率 $f \propto L^{-1}$ 。可见,尺度越小,谐振频率越高,系统响应越快,这一点可以从物体的一个特有性质——惯性的角度去理解,由于重力和惯性正比于 L^3 ,它们对微纳系统元器件的作用非常微弱,物体由于惯性而产生的滞后效应就会大大减轻,因此,尺寸越小的器件具有更高的响应速度和更大的谐振频率。详细的解释可用下面的理论计算来阐述。

设系统受到的阻力与速度成正比,比例系数为 f ,受到的驱动力为 F ,运动速度为 v ,系统质量为 m ,则运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} + fv = F \quad (1-1)$$

对微分方程进行求解,得到

$$v = \frac{F}{f} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-2)$$

式中, $\tau = \frac{m}{f}$ 。由式(1-2)易知,速度的变化为一个指数上升的形式,开始快后来慢,

当时间趋向于无穷大时,速度趋向于一个最大值 $\frac{F}{f}$,虽然达到最大值所需的时间为无穷大,但过了 τ 时刻后,速度已经相当接近最大值, τ 就是响应时间的尺度。若 f 为一个与尺度无关的常量,则可见 $\tau \propto m \propto L^3$,即随着尺寸的减小, τ 会快速减小,因而微观尺度下响应时间更快。

动态行为,即滞后和响应,是机电系统很重要的一个指标,微纳系统在这方面比起宏观系统有着无可比拟的天然优势,这也是微纳系统能够引起广泛关注的原因之一。

2. 能量的尺度效应

动量 $p = mv \propto L^4$, 动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 \propto L^5$, 可见它们受尺寸的影响很大。对于微纳尺度的执行器来说,动能较小,达到同样的位移、速度或加速度所消耗的能量比较少;对于传感器而言,动能较小则意味着传感换能时所需要的能量较低,可探测的能量也较低,因此,灵敏度更高。由此可见,能量的尺度效应从理论上为微纳系统的应用从能耗角度给出了有力的支持。

3. 热的尺度效应

考虑热的影响在微纳系统设计时是十分重要的。常规的热传递有三种主要的方式,即传导、对流和辐射,分别正比于 L 、 L^2 、 L^2 。在宏观尺寸下,对流和辐射更多

情况下占主导地位,而在微观状态下,热传导成为热传递的主要方式,热量较多地从微观系统的表面向周围介质传导,因此,散热会比较依赖于器件、系统的表面积及周围介质的运动速度,CPU 风扇就是加速空气流动以散热的典型应用。

另外,大分子和微观粒子的布朗运动,即无规则热运动,也是热尺度效应的一部分。在宏观情况下,这种无规则热运动本身并不会有任何影响,但在微观情况下,由于整体尺度的减少,布朗运动的影响会显著得多,不能再像宏观条件下那样对其置之不理了,此时,微观粒子的运动考虑起来就会复杂得多。

4. 电的尺度效应

导体的电阻及电阻功率损耗可用公式表示为

$$R = \frac{\rho L}{S} \propto L^{-1} \quad (1-3)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \propto L \quad (1-4)$$

式中, L 为电阻长度; S 为电阻截面积; V 是电压; ρ 是电阻率。它们均与尺度无关。

由此可见,导线上的功率损耗在微尺度下的影响是非常显著的,其与之前提到的其他尺度效应不同的是:电尺度效应在微电子学中也普遍存在,是 IC 工艺所面临的一个主要问题。随着集成度越来越高,芯片上单位面积的微电子器件数目越来越多,其 I/O 能耗已经占了目前集成电路总能耗的 50% 以上,预计将会上升到 80%,这已经成为影响集成度增加和摩尔定律预言的最重大威胁。

由于微纳系统中的功率器件有功率损耗,因此会产生热效应,这将严重影响器件和系统的功能。例如,微纳系统中的典型热驱动器如图 1-3 所示,电流通过两个焊盘流过整个器件,由于器件有电阻会发热,同时热胀冷缩效应会产生热形变,器件中有两个粗细不同的臂,在电阻率相同的情况下电阻并不相同,因而发热也不同,产生的形变也不一样,因此,两臂的末端会向膨胀少的臂那一端移动,产生驱动力,如图 1-3 所示,这就是热驱动器的原理。

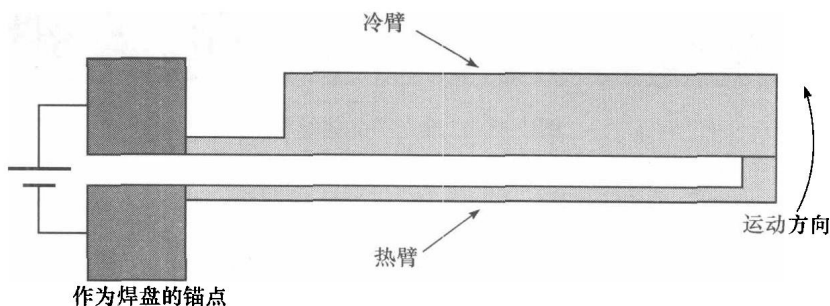


图 1-3 热驱动器原理图

1.1.3 微纳系统的研究领域

微纳系统的研究领域非常广泛,不但涵盖了宏观系统的所有研究领域,而且还包括由尺度效应产生的、与宏观状态不同的新研究领域和方向,下面简单介绍几个典型的微纳系统研究领域。

1. 微纳结构

微纳结构是指微纳器件或系统的基本结构,一般是要研究它所产生的新功能及其应用。微纳结构的研究内容涉及多个学科,是一个很大的研究领域,也是微纳系统研究中一个非常重要的组成部分。

简单地讲,微纳结构的研究可分为两大类:一类是传统宏观机械结构的微型化,如微型弹簧、微悬臂梁、微薄膜、微流体通道等结构,主要研究这类微纳机械结构作为环境构造或机械支撑结构在各种物理、化学或生物反应条件下的特性;另一类则是研究微纳结构由于尺度效应造成的新物理、化学或生物等效应,如电磁波在小于波长尺度的微纳结构中的传播现象就是一个前沿的研究领域,在可见光和太赫兹波段的光子晶体(如图 1-4 所示,参见 2.3.2 节)及微波波段的 Meta 材料(或者称为新型人工电磁材料)就是两个很典型的例子。

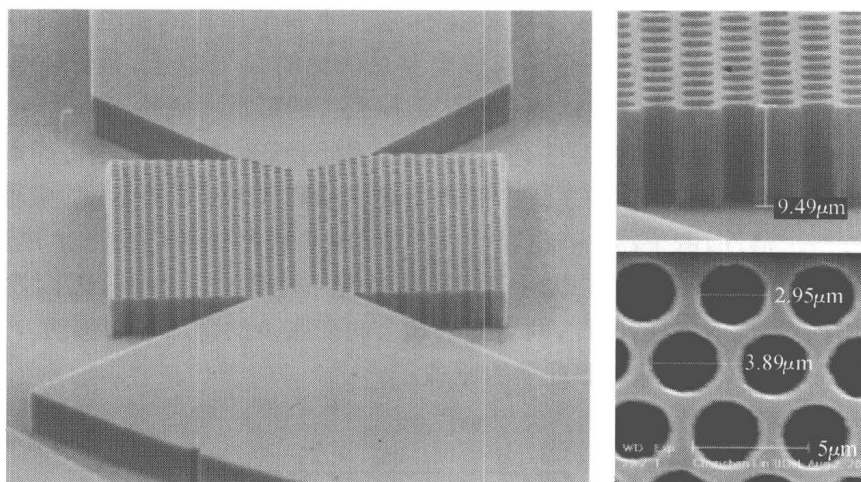


图 1-4 二维光子晶体结构

2. 功能材料

近些年来,随着科学技术在信息产业、生物医疗等方面的发展和进步,新型先进功能材料的研究得到了广泛关注,在材料合成和表征方面提出了许多新思路、新

概念和新方法。目前,在材料制备和表征方面的研究已经从微米向纳米和原子尺度发展,展现出了许多优异的性能,呈现出向信息、生物等研究领域迅速扩展、应用的趋势。因而,微纳新型功能材料也成为微纳系统研究的一个很重要的方面。

目前,先进功能材料研究的范围很广,包括磁性材料、超导材料、半导体材料、铁电材料、红外材料、聚合物材料、光波导材料、封装材料、功能薄膜材料、信号处理材料、纳米材料等许多领域,这些领域虽然各不相同但却涉及许多交叉学科,成为大量新研究方向的出发点。例如,聚合物材料就在 MEMS 领域获得了广泛关注,除了常见的作为绝缘材料、光刻胶材料,高性能聚合物材料已经应用于 MEMS 结构材料的研究中了。

3. 微纳光学

光学是一门古老的学科,经过几百年的发展,它在当今许多领域都得到了广泛应用。随着集成电路微细加工工艺的不断进步,20 世纪 80 年代在美国 MIT 林肯实验室产生了一门新的光学分支——微纳光学(micro-nano-optics)。

微纳光学是微纳尺度的光学,这一尺寸已处于可见光波长量级,因而光在其中的传播、干涉等都具有了新的现象,常规光学的理论方法已不再实用,需要开发出新的研究理论和工具。微纳光学涉及多个学科的交叉,是一个非常前沿且知识密集、技术先进的学科分支,其不仅作为一门技术而且作为一门学科迅速地受到学术界和工业界的青睐,在国际上掀起了微光学、纳光学的研究热潮。

微纳光学元器件因其在实现光波变换上具有许多卓越的、传统光学器件难以实现的功能,而有利于促进光学系统实现微型化、阵列化和集成化,开辟了光学领域的新视野。

4. 微纳电子

微电子技术是当今信息技术革命的基石,电子工业已成为世界上规模最大的产业。微电子技术就是将电路和电子学器件(如晶体管等)使用微纳工艺手段集成制造在单一芯片上,单个器件尺寸在微米纳米尺度。正是由于微电子技术在原理、设计和制造工艺上的巨大突破,才促进了微纳系统这一学科领域的形成和发展。因此,相对于微纳系统的其他研究领域,微电子是比较成熟、完善的,而且在此基础上,纳电子学的研究和应用也成为最有前景的领域之一。

纳电子学研究领域主要包括电子波器件、单电子器件/电路、纳米 MOS 器件/电路、分子电子器件/电路等。目前,人们仍在不断发展制造更小尺寸器件和系统的工艺技术,并致力于解决在纳米尺度集成电路中棘手的寄生参量(如电阻、电容、电感)和由此产生的信号传输延迟、串扰等问题。随着这些问题的攻克,纳电子学必将走向成熟,成为促进科技进步的革命性推动力之一。

5. 微纳加工

微纳加工是指微纳系统的加工制备手段,它是微纳系统研究的重中之重,只有微纳加工工艺的进步才能带来微纳系统研究与开发的每一次巨大飞跃。

简单地说,微纳加工工艺可以分为三类:硅微机械加工技术、LIGA 工艺和超精密机械加工技术。

(1) 硅微机械加工技术以美国为代表,是从传统微电子集成电路制造工艺发展而来,可分为体微机械工艺(bulk micromachining)和表面微机械工艺(surface micromachining),主要包含薄膜沉积、光刻、刻蚀三个工艺步骤,还包括牺牲层刻蚀、湿法腐蚀、阳极键合、掺杂等工艺步骤。硅微机械加工技术的优点是可批量生产、成本低廉、与集成电路制造工艺相兼容;缺点在于:制作多结构层器件时,工艺步骤较多、工艺复杂,而且不易于制造高深宽比的三维结构。

(2) LIGA 工艺以德国为代表,是由德国 Karlsruhe 核研究中心首先发明的。LIGA 是德文光刻(lithografie)、电铸(galvanik)、注塑(abformung)三个单词的缩写,是采用 X 射线进行光刻进而电铸成型的一种微纳系统加工方法,其优点在于:可使用的材料种类很多,加工的结构深宽比较大;缺点在于:X 射线同步辐射源不常用,加工成本较高,不易与微电子加工工艺兼容。

(3) 超精密机械加工技术以日本为代表,并不是一种全新的加工方法,而是建立在传统的机械加工方法之上的。简单地说,就是用大机器制造小机器,小机器制造微机器。目前,超精密机械加工采用的技术有电火花加工、超声加工、电化学加工、能量束(电子束、离子束、激光束)加工等,其优点在于可制造复杂的三维结构,而缺点则是效率不高,加工不易控制。

微纳加工技术是微纳系统的基础,也是微纳系统中最受关注、难度最大的研究领域。虽然微纳加工技术已经取得了巨大的成果,但人们对尺寸更小、功能更多、价格更便宜的微小型系统的不断追求驱动着微纳加工技术不断进步。

6. 微纳表征

微纳表征技术就是以技术手段对微纳器件或系统的各项参数、功能进行详细准确的表征,这是微纳系统研究所必备的技术。

微纳表征技术是微纳系统研究的关键技术之一,但相对微纳系统的其他研究领域来说,目前它的发展是比较落后的。这是因为微纳表征技术涉及内容太广,需要检测几何量、电学量、机械量、材料特性等许多参数,因而在很多情况下,微纳表征已经不局限于微纳系统研究,而成为一个比较独立、完整的研究领域。

目前,微纳结构的检测手段是比较丰富的。由于传统的接触式机械探针检测方式对微纳结构的表面会有一定损伤,应用受到了一定限制,因此发展了许多无损

检测手段,如非接触式光学检测(optical non-contact measurement)、干涉显微术(microscopic interferometry)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)及高分辨率扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)、原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)等。此外,还发展了实现微纳结构动态行为测量的方法,如美国加州大学伯克利分校发明了频闪照明技术,MIT 提出了计算机微视觉系统,Polytec 公司则制造了激光多普勒测振仪,这些方法和系统各有优势,功能既有区别又有交叉。

除了微纳结构之外,电学量的检测是微纳表征中比较成熟的技术,这是因为它受尺度效应的影响较小。对于其他参数测量,目前手段还不是很丰富,大多是利用各式各样的传感器来完成的,如加速度传感器、压力传感器、生物传感器、光学传感器等。

随着微纳系统设计和制造技术的不断提高,与它们相辅相成的微纳检测技术将会得到进一步的发展。

7. 系统集成

将单一元器件集成为单片系统是微纳系统研究的目标。单纯的电路集成已经得到了广泛的研究和应用,但将电子部分和机械部分进行集成的方案对微纳加工工艺提出了更高的要求。

封装是系统集成的一个重要组成部分。微纳系统的封装需要考虑许多因素,如传感器的传感方式不同就需要面对不同的工作介质与环境,如高温、高压、有毒化学物质等,执行器不同的能量转换方式也需要不同的接口。目前,封装技术还没有形成一个统一的标准,对不同功能的器件需要采取不同的封装材料和结构,其成本占到了总成本的 70%~90%。因此,将微纳器件集成为实用化的系统,封装技术的研究是非常关键的。

1.2 研究现状

近年来,微纳系统在世界范围内得到了广泛研究,这并不仅仅是在高校和研究室的实验室里,还有大量研发人员在各种企业的生产线上参与微纳系统的研究。TI 公司的 DMD(digital mirror device,数字微镜器件)就是一个具有革命意义的数字光学投影仪,它含有 100000 个可以独立寻址的、微镜组成的光调制芯片,每一个微镜的面积约为 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$,可以倾斜的角度为 $\pm 7.5^\circ$,当入射光照在微镜阵列上时,处在合适角度的微镜就可以反射光到屏幕上,因而微镜阵列就可投影出所要显示的图像。图 1-5 就是所述的这种微镜阵列。