

微 纳 系 统 系 列 译 从

# MEMS MATERIALS AND PROCESSES HANDBOOK

## MEMS 材料与工艺手册

[美]利萨·格迪斯(Reza Ghodssi)著  
林斌彦(Pinyen Lin)译  
黄庆安等译

- 微系统封装基础 黄庆安 唐洁影 译  
FUNDAMENTALS OF MICROSYSTEMS PACKAGING Rao R. Tummala  
McGraw-Hill. 2001
- RF MEMS 理论·设计·技术 黄庆安 廖小平 译  
RF MEMS THEORY, DESIGN AND TECHNOLOGY Gabriel M. Rebeiz  
John Wiley & Sons. 2003
- CMOS MEMS 技术与应用 黄庆安 秦 明 译  
CMOS MEMS O. Brand G. K. Fedder  
Wiley-VCH. 2005
- MEMS 可靠性 宋 竞 尚金堂 唐洁影 黄庆安 译  
RELIABILITY OF MEMS O. Tabata T. Tsuchiya  
Wiley-VCH. 2008
- 能量收集技术 黄见秋 黄庆安 译  
ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIES S. Priya D. J. Inman  
Springer. 2009
- 光子微系统 黄庆安 于 虹 雷 威 汤勇明 译  
PHOTONIC MICROSYSTEMS Olav Solgaard  
Springer. 2009
- MEMS材料与工艺手册 黄庆安 等译  
MEMS MATERIALS AND PROCESSES HANDBOOK Reza Ghodssi Pinyen Lin  
Springer. 2011

图书上架建议：

电子 / 信息 / 高科技类

ISBN 978-7-5641-4053-3



9 787564 140533 >

定价：198.00 元

文字编辑：姜晓乐

史 静

责任编辑：张 莺

责任印制：张文礼

# MEMS 材料与工艺手册

MEMS Materials and Processes Handbook

[美] 利萨·格迪斯(Reza Ghodssi)  
林斌彦(Pinyen Lin) 著

黄庆安 等译

东南大学出版社  
·南京·

## 内 容 简 介

经过 20 多年的发展,微机电系统(MEMS)技术已经在消费类电子产品以及汽车等领域大规模应用。同时,微机电系统技术在医疗、生命科学、电信技术、国防等方面的应用方兴未艾。MEMS 是一个快速发展的前沿技术领域,使用的材料种类多、工艺方法复杂,需要系统地归纳、分析与整理,以便于读者查阅。本书针对这种需求,由国际学术界与工业界 35 名专家联合撰写。内容主要包括三个方面:(1)MEMS 中半导体材料、介质材料、金属材料、聚合物材料、压电材料、形状记忆合金材料以及封装材料等制备方法及其特性;(2)MEMS 中掺杂工艺、圆片键合工艺、表面处理与平坦化工艺、光刻工艺、湿法微机械加工工艺、干法微机械加工工艺等制造工艺;(3)MEMS 工艺集成方法以及国际学术界与工业界已经采用的工艺制程案例。

本手册是大型专业工具书,以查阅为主,适合于微电子技术专业、半导体技术专业、传感器技术专业、微机电系统专业、仪器仪表专业、物联网技术专业等领域的高年级本科生、研究生及工程科研技术人员阅读和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

MEMS 材料与工艺手册/(美)格迪斯(Ghadssi, R.), (美)林斌彦(Lin, P.)著; 黄庆安等译. —南京: 东南大学出版社, 2014. 3

书名原文: MEMS Materials and Processes Handbook

ISBN 978-7-5641-4053-3

I. ①M… II. ①格…②林…③黄… III. ①微电子技术—电子材料—手册②微电子技术—生产工艺—手册  
IV. ①TN4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 025975 号

东南大学出版社出版发行  
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人: 江建中  
网 址: <http://www.seupress.com>

全国各地新华书店经销      南京玉河印刷厂印刷  
开本: 700 mm×1000 mm  1/16  印张: 62.75  字数: 1192千  
2014 年 3 月第 1 版  2014 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5641-4053-3  
印数: 1~2 000 册      定价: 198.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真): 025-83791830

# 《微纳系统》译丛总序

微机电系统(MEMS)出现于 20 世纪 80 年代中后期,是指可以批量制造的集微结构、微传感器、微执行器以及信号处理和控制电路等于一体的器件或系统。其特征尺寸一般在  $0.1\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 。目前国际上通常将 MEMS 冠以 Inertial-, Optical-, Chemical-, Bio-, RF-, Power- 等前缀以表示其不同的应用领域。MEMS 集约了当今科学技术的许多尖端成果,更重要的是它将敏感与信息处理及执行机构相结合,改变了人们感知和控制外部世界的方式。

MEMS 技术经过 20 多年的发展,诸如喷墨打印机中的喷嘴阵列,手机中的振荡器、陀螺、加速度传感器、磁场传感器,投影显示器中的微镜阵列等消费类电子产品以及汽车防撞气囊中的加速度传感器、胎压检测系统中的压力传感器等已经进入大规模生产阶段。近年来我国出现了不少 MEMS 高新技术企业,很多大学也开设了 MEMS 课程,因此,无论是 MEMS 教学或科学的研究,还是工业化产品开发,都迫切需要 MEMS 技术方面的信息资料,而 MEMS 是一个快速发展的前沿技术领域,信息资料分散于期刊论文、专利以及会议文集中,缺乏系统的归纳、分析与整理,不成体系。因此,出于我国 MEMS 发展的需求,特别需要这方面的专著。虽然我国一些出版社已经购买版权并翻译出版了部分国外书籍,对我国 MEMS 技术的发展起到了积极推动作用,但这些书籍是零散的,缺乏整体规划,而发达国家的出版社在 MEMS 书籍方面进行了有效的组织和规划,例如:Springer 出版社 2005 年出版了《MEMS/NEMS Handbook: Techniques and Applications》(共 5 卷)、2007 年开始出版《MEMS Reference Shelf》系列(目前已经出版 9 本);Wiley-VCH 出版社 2004 年开始出版《Advanced Micro and Nanosystems》系列(目前已经出版 7 本)。面对国外 MEMS 快速发展的形势和我国对 MEMS 书籍的迫切需求,及时系统地规划、遴选、组织并翻译出版国外 MEMS 书籍很有必要,东南大学出版社 2005 年开始出版的《微纳系统》系列译丛就是这方面的尝试。

MEMS 设计、制造、封装、可靠性以及测试等共性技术推动了 MEMS 技术的发展,市场与应用需求则牵引了 MEMS 技术的进步,而微米与纳米技术的结合给 MEMS 带来了许多新的机遇。

## 设计

MEMS 工作过程涉及机械能、电能、磁能、热能和化学能等及其之间的耦合，工作原理复杂，因此理解其工作过程，提高或优化其性能，需要有效的设计工具。另一方面，MEMS 制造工艺的建模与模拟可降低试制成本，优化工艺流程。总而言之，MEMS 设计技术与工具的发展能够优化产品性能，降低产品研发成本，缩短产品研发周期。

MEMS 设计通常包括：

### (1) 器件级设计

器件级设计是根据器件结构，建立器件工作的微分方程，利用有限元或边界元等数值方法，采用合适的边界条件，进行偏微分方程的求解，从而给出器件的性能，这是 MEMS 设计最早发展的技术，目前已经有商用软件 Coventor 和 IntelliSense 等可以使用。另一方面，由于 MEMS 器件特征尺寸通常在微米量级，宏观的物理规律仍可应用，因此如 ANSYS、ABAQUS、CFD-X 等传统的偏微分方程求解器也在 MEMS 器件设计中广泛使用。器件级模拟计算量大、设计周期长，但是精度高。

### (2) 系统级设计

器件往往不能单独使用，必须与驱动、检测或控制电路一起工作。系统级设计的前提条件是建立能够与电路分析工具实现无缝联接的 MEMS 器件的宏模型。宏模型是根据器件结构，采用合适的近似或算法，将器件工作的偏微分方程降阶为常微分方程，进而对常微分方程求解，给出器件的终端特性。这种方法通常速度快，但精度低。系统级模型容易对器件进行优化设计，且可与电路一起进行分析和优化，为激励-响应-控制(反馈)的闭环系统设计提供有效手段。系统级模拟运行的平台包括 SABER、SPICE、Simulink 等。

### (3) 工艺级设计

根据器件级或系统级设计所确定的几何结构，就可选择合适的工艺进行制造，工艺级设计包括工艺流程设计和工艺模拟。工艺模拟是通过建立每一步制造工艺的物理模型，采用合适的数值算法，结合掩膜版图和工艺流程文件，模拟出 MEMS 器件的拓扑结构。目前 Coventor、IntelliSense 等设计工具的工艺模拟模块只能完成部分单步工艺模拟，尚不能提供由不同工艺次序所完成的器件结构及其分析，因此不能分析工艺偏差、材料参数偏差对 MEMS 结构或器件性能的影响。

目前,限于 MEMS 设计工具的能力, MEMS 设计主要依靠使用者的知识与专业水平。由于不同层次的设计过程存在着相互脱节的问题,还没有形成有机集成的设计环境,不能够完整地实现自上而下(Top-down)的 MEMS 设计过程,设计效率比较低。MEMS 设计者的目的是希望制造出性能符合要求的器件或系统。而制造过程中几何尺寸偏差、材料参数偏差等会使其偏离设计者的允许范围,因此“试差”的设计方法仍然占据主流。在高性能 MEMS 研制方面,设计者需要与制造工艺紧密结合。同时,由于目前的 MEMS 设计工具是从现有微电子设计工具或机械设计工具衍生而来,无论从市场角度看还是从工具性能看,都需要与大型设计工具集成。

#### (4) NEMS 设计

在 20 世纪 90 年代后期开始发展的纳机电系统(Nanoelectromechanical System, NEMS)是纳米科学技术的重要分支之一。NEMS 是指以纳米材料或结构所产生的量子效应、界面效应、局域效应和纳米尺度效应为工作特征的器件和系统,可实现超高灵敏度或选择性的敏感、探测与执行。

描述 MEMS 工作的模型是基于连续介质的理论,在物理上的连续意味着在数学上可采用微积分,因此 MEMS 模型、模拟及其设计方法主要是以有限元为代表的数值方法。固体、液体和气体都被分解为分子(或原子)的聚集体,而原子又被分解为原子核和电子,表面/界面上的分子(或原子)不同于内部,纳米材料独特的性质和优异的性能由其尺寸、表面结构及其粒子间的相互作用决定。例如长、宽、厚度分别为 100 nm、10 nm、10 nm 的硅纳米线,约有 10% 的原子在物体表面或者靠近物体表面,表征材料力学特性的杨氏模量、热学特性的热导率等与表面性质相关并出现尺寸依赖现象,而电学特性、磁学特性、光电特性等出现量子限制。

连续介质的描述忽略了粒子的个性,而微观粒子具有波粒二象性,就计算模型而言,经典粒子的运动由玻耳兹曼方程描述,而粒子的波动性由薛定谔方程描述。以纳米线为例,长度方向尺度远大于原子间距,可认为是连续介质,而截面尺度在纳米尺度范围,原子特性显现。在描述力学特性时,我们原则上可以用分子动力学方法计算每个原子与其他原子的相互作用行为,进而了解其力学性质,但是这种情况下的原子数太多以至于无法实现。因此,在处理这类问题时,需要原子模拟方法和连续介质的有限元方法相结合。在描述其电学特性时,在长度方向电子是自由的,因而能量是连续的,而在截面方向,由于尺度限制,能量是量子化的。对于纳米线结构,局部尺度是纳米,可以用原子模拟方法,而纳米线的两端与微米尺度结构

相连,这种微米尺度区域需要连续介质理论描述。因此,在 NEMS 器件中,几何空间的多尺度导致使用不同的物理描述方法,如密度泛函、分子动力学、Monte Carlo 方法等。

## ■ 制造

MEMS 所用材料主要有半导体硅、玻璃、聚合物、金属和陶瓷等。由于所用材料不同,习惯上,将 MEMS 制造分为 IC(集成电路)兼容的制造技术和非 IC 兼容的制造技术。IC 所完成的功能主要利用了硅单晶的电学特性,而硅单晶也有良好的机械特性,例如硅单晶的屈服强度比不锈钢的高,努氏硬度比不锈钢的强,弹性模量与不锈钢的接近,同时,硅单晶几乎不存在疲劳失效。硅单晶良好的机械特性以及微电子已经建立起来的强大工业基础设施,使其成为 MEMS 的主流材料。

### (1) IC 兼容的微制造技术

由于微电子制造技术基本上是一种平面制造工艺,为在芯片上制造可动部件,需要微机械加工技术。

硅微机械加工技术主要包括硅表面微机械加工技术、硅体微机械加工技术、硅片直接键合技术以及这些技术的相互融合。

1965 年,美国 Westinghouse 电气公司的 H. C. Nathanson 等人提出硅表面微机械加工技术,在 20 世纪 80 年代中后期得到发展;20 世纪 90 年代出现的气相 HF 牺牲层释放技术大大提高了表面微机械加工技术的生产成品率和效率。利用表面微机械加工技术制造的典型产品有 ADI 公司的加速度传感器、TI 公司的微镜阵列投影显示器等等。

硅体微机械加工技术包括湿法刻蚀和干法刻蚀,KOH 湿法各向异性刻蚀于 1967 年由美国 Bell Lab 的 H. A. Waggener 等人提出,在 20 世纪 80 年代中后期得到发展;20 世纪 90 年代由日本京都大学 O. Tabata 等人发明的 TMAH 湿法各向异性刻蚀与 IC 工艺线兼容,进入工业化应用;反应离子刻蚀(RIE)是 IC 工艺,1994 年,德国 Bosch 公司采用电感耦合等离子(ICP)方法发明了 DRIE(深反应离子刻蚀)技术,它是硅体微机械加工的基本技术之一。利用体微机械加工技术制造的典型产品有 Freescale 公司的压力传感器、ST-microelectronics 公司的加速度传感器、Akustica 公司的麦克风、SiTime 公司和 Discera 公司的振荡器、HP 公司的喷墨打印机微喷嘴阵列等等。

1986 年,美国 IBM 公司的 J. B. Lasky 等人和日本东芝公司的 M. Shimbo 等

人分别独立开发出硅片直接键合技术,它是硅三维结构制造的主要技术之一。利用硅片直接键合技术制造的典型产品有 NovaSensor 公司的压力传感器等。

### (2) 单片集成化制造技术

MEMS 微传感器需要信号放大、信号处理和校准, MEMS 微执行器需要驱动和控制。因此,在应用中, MEMS 器件需要和微电子专用集成电路(ASIC)集成,这种集成可以是单片集成也可以是多片集成,至于采用哪种方式集成,取决于系统要求和成本。单芯片集成是将传感器及执行器与处理电路及控制电路同时集成在一块芯片上,多片集成实际上涉及了封装技术。

CMOS MEMS 技术是一种单芯片集成技术,它利用集成电路的主流 CMOS 工艺制造 MEMS。MEMS 器件与电路单片集成的主要优点有:

① 可以实现高信噪比。一般而言,随着传感器的面积减小,其输出的信号也变小,对于输出信号变化在 nA(电流输出)、 $\mu$ V(电压输出)或 fF(电容输出)量级的传感器,敏感位置与外部仪器引线的寄生效应会严重影响测量,而单片集成可降低寄生效应和交叉影响。

② 可以制备大阵列的敏感单元。大阵列的单元信号连接到片外仪器时,互连线制备及可靠性是主要问题。对于较小阵列,引线键合等技术就可以满足要求,但对于较大阵列,互连问题会影响生产成本和器件成品率,甚至不可能实现大的阵列。因此,采用片上多路转换器串行读出,不仅降低了信号调理电路的复杂性,而且大大降低了键合引线的数量,提高了可靠性和成品率。

③ 可以实现智能化。除信号处理功能外,诸如校准、控制以及自测试等功能也可以在芯片上实现。单片集成方式已经促成了多种 MEMS 产品商业化,如加速度传感器、数字光处理器以及喷墨头。

但是,若使用 CMOS MEMS 技术,可用材料被限制到 CMOS 材料以及和 CMOS 工艺兼容的材料,其制备与封装工艺也有较多限制。

硅基 MEMS 的发展基本上是借鉴了 IC 工业的成功之处,即集中化批量制造,提供高性价比产品。但 MEMS 又与 IC 有较大的差别,IC 有一个基本单元,即晶体管,利用这个基本单元的组合并通过合适的连接,就可以形成功能齐全的 IC 产品;在 MEMS 中,不存在通用的 MEMS 单元,而产品种类繁多,因此 MEMS 加工不可能采用 IC 产业集中化制造的模式,而适合于分类集中制造。

### (3) 非 IC 兼容的微制造技术

由于硅材料耐磨性差以及特殊环境的使用问题,非 IC 兼容加工技术的发展可

满足 MEMS 不同材料和结构的需要以及特定应用(如生物化学环境和高温环境等)的需要,1985 年德国 W. Ehrfeld 小组开发出的 LIGA(光刻电铸成型)技术以及后来发展起来的 UV-LIGA(紫外光-光刻电铸成型)技术是非 IC 兼容的主要加工技术,此外还有激光三维加工技术、微细电火花加工技术、热压/注射成型加工技术、微纳米压印技术等。

#### (4) 纳米制造

纳米制造为 NEMS 发展提供支撑。目前,纳米制造的方式可分为由上而下和由下而上两大类。由上而下的技术路线是传统微制造工艺向纳米尺度延伸的必然产物;由下而上的方法则另辟蹊径,利用原子、分子组装构筑出复杂的结构。

光学光刻技术不但是微制造的主要技术,也是纳制造的主要手段。虽然光学光刻技术一度成为微纳结构加工的主要限制因素,但是随着短光波长技术的应用以及移相掩膜、光学临近校正、浸没式光刻、多重曝光等新技术的发展,光学光刻在大批量生产中已经达到 22nm 的工艺水平。22 nm 工艺仍采用深紫外浸没式光刻技术,该技术结合多重曝光有望延伸到 16nm 甚至 11nm 技术节点,但是能否支撑足够高成本代价仍有待观察。此外,极紫外光刻、离子束光刻、电子束光刻、纳米压印等下一代光刻或光刻替代技术有望取代目前的光学光刻成为 10 nm 以下大批量加工的关键技术。其中,极紫外光刻技术甚至有可能在 16 nm 工艺中率先被采用。

电子束、离子束不但可以用来光刻,也可以直接将固体表面的原子溅射剥离,被更广泛地作为一种直写式加工工具;此外,与化学气体配合还可以在衬底材料表面直接沉积出相应结构,成为一种用途广泛的纳制造工具。无论是溅射剥离还是辅助沉积,加工精度与束斑尺寸直接相关。目前的电子束系统、离子束系统分别能够轻易获取 5 nm 的电子束、离子束,透射电子显微镜系统中甚至可以得到 0.5 nm 的电子束斑。尽管电子束加工已经能够普遍实现 2~6 nm 线宽的雕刻加工,10~20 nm 线宽的结构沉积,最小 2~3 nm 的量子点沉积,聚焦离子束加工能够实现 3~5 nm 的雕刻,但是该类加工方法受限于加工效率,仅适用于单个器件的加工,短期内还难以应用于大批量生产。电子束、离子束加工技术为更小尺寸结构加工提供了一种可能的发展方向。

由下而上的技术思想经历了近 20 年的发展,形成了一系列以分子自组装为基础的加工技术。当然,目前自组装技术作为纳加工手段还相当原始,大多数情况下还是与纳米光刻等传统技术相结合,以此进入主流纳加工技术领域。纳米球光刻就是由上而下和由下而上技术相结合的典型技术,它利用自组装技术形成的纳米

球阵列作为掩膜进而加工高密度点阵图形。目前,通过纳米球光刻制作的阵列点最小可以达到 10 nm 左右。另外,蘸笔纳米光刻是两种加工思想相结合发展起来的又一种纳加工技术。该技术利用蘸有特殊液体的扫描探针直接书写出光刻图形,经历了 10 余年的发展,已经能够制作出最小线宽在 10~15 nm 的图形。尽管还不完善,但随着加工尺度的进一步缩小,由下而上的加工技术越来越显示出它的优越性,重新受到纳米加工界的关注。

此外,只有将纳米结构与微米结构互连后,才能与宏观世界联系起来,因此同时实现纳米尺度制造和微米尺度制造的跨尺度制造方法也是值得关注的方向。

## ■ 封装

MEMS 封装的目的是为其提供物理支撑和散热,保护其不受环境的干扰与破坏,同时实现与外界信号、能源及接地的电气互连。MEMS 含有可动结构或与外界环境直接接触,因此 MEMS 封装比 IC 封装更复杂。一般来说,IC 制造中采用的低成本封装技术只能适用于一部分 MEMS,而大多数 MEMS 器件中含有可活动部件,往往需要采用特殊的技术和材料才能实现其电信号与非电信号的相互作用,而且器件种类繁多,大大增加了封装的难度和成本。MEMS 封装包括单芯片封装、多芯片封装、圆片级封装和系统封装(SiP)等封装技术,可实现非气密、气密和真空封装,封装过程需要考虑电性能、电磁性能、热性能(等物理场)、可靠性等问题。MEMS/NEMS 封装设计与模型、封装材料选择、封装工艺集成以及封装成本都是在开发新型 MEMS/NEMS 封装技术需要考虑的问题。

随着 MEMS/NEMS 技术在消费类电子产品、医疗以及无线传感网等中的广泛应用,为了实现低功耗和小体积,要求将完整的电子系统或子系统高密度地集成在只有封装尺寸的体积内,即 SiP 技术。封装内包含各种有源器件,如数字集成电路、射频集成电路、光电器件、传感器、执行器等,还包含各种无源器件,如电阻、电容、电感、无源滤波器、耦合器、天线等。未来电子产品将所有的功能集成在一个很小的体积内,因此非常窄节距的倒装芯片凸点、穿透硅片的互连技术、薄膜互连技术、三维芯片堆叠技术、封装堆叠技术、高性能的高密度有机衬底技术以及芯片、封装和衬底协同设计与测试技术等成为 SiP 的关键技术。

## ■ 可靠性

MEMS 可靠性是指 MEMS 器件在实际环境中无故障工作的能力。MEMS 可

可靠性一般分为制造过程中的可靠性(包括制造过程、划片、超声键合引线、封装等)、工作过程中的可靠性以及环境影响可靠性。为了保证 MEMS 的可靠性,还需要对材料、工艺、器件、系统等的可靠性进行测试、表征和预测。MEMS 在工作过程中的可靠性可以分为 4 类:

- ① 没有可动的部件(例如压力传感器、微喷嘴等);
- ② 有可动但没有摩擦或表面相互作用的部件(例如谐振器、陀螺等);
- ③ 有可动和表面相互作用的部件(例如继电器、泵等);
- ④ 有可动并有摩擦和表面相互作用的部件(例如光开关、光栅等)。

在 MEMS 器件的设计过程中,为了避免失效从而提高器件的可靠性,往往根据器件的某些失效机理来改进设计方案。常见的可靠性设计包括:为了避免粘附引入凸点和防粘附层;为了避免断裂设计平滑过渡的变截面;为了避免介电层电荷注入而取消介电层或改变介电层的位置;为了避免可动结构的粘附和断裂而引入止档结构等。这些设计在很大程度上改善了相应的失效,从而提高了器件的可靠性。

MEMS 器件在制造过程中也会引入各种失效因素,进而影响器件的成品率以及使用中的隐患。这些因素主要包括:制造工艺中的各种残留污染、材料沉积或刻蚀中形成的各种缺陷、不同材料构成的 MEMS 结构中的残余应力、热失配引入的热应力、圆片切割和处理造成的碎屑污染和划痕、封装、微互连中的热机械效应以及气密性等引起的环境条件变化和污染。

机械装置的运动包括弹性运动和刚体运动(或整体运动),弹性装置借助柔性结构(如弹簧和扭转杆等)运动,而刚体装置借助铰链和轴承运动。刚体装置允许部件积累位移,而弹性装置将部件限制在固定点或固定轴附近运动。由于 MEMS 器件表面接触、滑动和摩擦引起的诸多问题还没有解决,因此目前 MEMS 产品均使用了柔性连接方式。

## 应用

MEMS 具有微型化的特征以及可高精度批量制造,与其他科学技术结合,会产生新的应用领域,例如:

1970 年,美国 Kulite 公司研制出硅加速度传感器原型;1991 年,美国 Draper 实验室 P. Greiff 等人发明硅微机械陀螺。陀螺传感器与加速度传感器构成了惯性传感器及其系统,目前在电子类消费品、汽车、航空航天以及军事等领域有广泛

应用。

1987 年,美国 UC Berkeley 的 R. S. Muller 小组和 Bell Lab 的 W. N. S. Trimmer 小组利用多晶硅表面微机械加工技术,研制出自由移动的微机械结构(微马达、微齿轮);1991 年,美国 UC Berkeley 的 K. J. Pister 小组研制出多晶硅铰链结构。自此,微机械操作、微组装、微机器人成为新的研究分支。

1989 年,美国 UC Berkeley 的 R. T. Howe 小组研制出横向驱动梳状谐振器,它是目前微机械振荡器、微机械滤波器、加速度传感器、角速度传感器(陀螺)、电容式传感器等的基本结构。

1980 年,美国 IBM 公司的 K. E. Petersen 发明硅扭转扫描显微镜,它是光学扫描仪、数字微镜器件、光学开关等的基本结构;1992 年,美国 Stanford 大学 O. Solgaard 等人发明 MEMS 光栅光调制器,实现了微机械对光的操作。自此,Optical MEMS(光微机电系统)分支出现。光微机电系统在光通信技术、显示技术、光谱分析技术等领域有广泛应用。

1990 年,美国 Hughes 实验室的 L. E. Larson 等人研制出微机械微波开关。自此,RF MEMS(射频/微波微机电系统)分支出现,用微机械加工技术制造芯片上无源元件(电容、电感、开关等)、组件(滤波器、移相器)以及单芯片微波系统研究进入热潮。RF MEMS 在雷达、通信等领域有广阔的应用前景。

1990 年,瑞士 Ciba-Geigy 制药公司的 A. Manz 等人研制出微全分析系统( $\mu$ TAS)或称为芯片上实验室(Laboratory on a chip),这是目前微流控分析芯片的原型。自此,开始了微型泵、微型阀门、微型混合器、微型通道等对微尺度下的流体操作器件的研究。微流控在生物领域的应用是近年来 MEMS 最活跃的方向之一,具有降低分析成本、缩短反应时间、提高精度、多功能集成等优点,在分析化学、医疗、药物筛选等领域有广阔的应用前景。

1995 年,美国 MIT 的 J. H. Lang, A. H. Epstein 和 M. A. Schmidt 等人开始了微型气动涡轮发动机研究;2000 年,美国 Minnesota 大学 Kelley 小组研制出基于 MEMS 技术的微型直接甲醇燃料电池原型。另外,诸如压电振动能量收集、热电能量收集、电磁能量收集等技术的发展,促进了 Power-MEMS(动力微机电系统)分支出现。动力微机电系统在无线传感网、医疗、土木工程结构健康监测等领域有广阔的应用前景。

## ■ 微米/纳米技术的结合

试验已经证实,硅基 NEMS 器件能够提供高达  $10^9$  Hz 的频率、 $10^5$  的品质因

数、 $10^{-24}$  N 的力感应灵敏度、低于  $10^{-24}$  J/(kg · K) 的热容、小到  $10^{-15}$  g 的质量以及  $10^{-17}$  W 的功耗。由于纳米尺度材料或结构的量子效应、局域效应以及表面/界面效应所呈现的奇特性质,可以大幅度提高 MEMS/NEMS 的性能,也可能使以前不可能实现的器件或系统成为可能。例如,2004 年英国 Manchester 大学的 K. S. Novoselov 和 A. K. Geim 成功制备出可在外界环境中稳定存在的单层石墨烯(Graphene),其特异的性质如量子霍耳效应、超高迁移率、超高热导率和超高机械强度已经引起人们的广泛重视,是目前材料和凝聚态物理领域的研究热点之一,而当气体分子吸附在石墨烯表面时,吸附的分子会改变石墨烯中的载流子浓度,引起电阻突变,可实现单分子检测。但实际上,只有将纳米结构与微米结构互连后,才能与宏观世界联系起来,通过微米技术进行集成,可将基于纳效应的功能和特性转变成新的器件和系统,因此 MEMS 技术可作为纳米科学走向纳米技术的桥梁。例如,20 世纪 80 年代出现的隧道扫描显微镜、原子力显微镜以及近场显微镜等,它的探针最前面的部分是“纳”,后面就是“微”和“电”,三者集成在一起,协调工作。因此,微米纳米技术相互融合已成为趋势和发展主流。

## ■ 市场

据有关咨询机构(例如 Yole, iSuppli, SPC, MANCEF, NEXUS, ITRS)的统计与预测分析, MEMS 产业在 2000 年全球销售总额约为 40 亿美元,2005 年约为 68 亿美元,2010 年约为 100 亿美元。目前的主要产品包括微型压力传感器、惯性测量器件、微流量系统、读写头、光学系统、打印机喷嘴等,其中汽车工业和信息产业的产品居主导地位,占总销售额的 80% 左右。

值得关注的是,2012 年 5 月由美国 MEPTEC(微电子封装和测试工程委员会)在 San Jose 举办的第 10 届国家 MEMS 技术讨论会中,研讨的主题是“Sensors: A Foundation for Accelerated MEMS Market Growth to \$1 Trillion”。这次研讨会聚集了来自学术界、工业界、咨询公司以及设备供应商的代表,他们认为以物联网为主要代表的市场的快速增长正对传感器提出巨大需求,估计在 2020 年左右其产业链达到 1 万亿美元,而且计算、通信和感知技术的融合有可能成为第三次工业革命。而目前 MEMS 制造、封装和测试缺乏工业标准,产品研发周期较长,是通向 1 万亿美元产业的瓶颈。

一方面,MEMS 前期开发的技术已经开始进入产业化;另一方面,MEMS 与纳米技术等其他新技术的交叉研究方兴未艾。面临这种发展趋势,无论是高等学校

教学或科学的研究,还是工业部门产品开发,都需要及时系统地学习并总结前人的知识和经验。

东南大学黄庆安教授长期从事 MEMS 教学和科研工作,经常关注国际微米/纳米技术的最新进展及有关 MEMS 技术信息,他带领的团队在 MEMS CAD、RF MEMS、CMOS MEMS、MEMS 可靠性、NEMS 以及微传感器等方面进行了长期研究,此次东南大学 MEMS 教育部重点实验室与东南大学出版社合作,组织翻译出版《微纳系统》系列译丛,将会促进我国 MEMS 教学、科研以及产业化的发展。《微纳系统》系列译丛涉及面广,从选题、翻译、校对到出版等工作量巨大,为此,向为翻译该书付出辛勤劳动的师生们表示敬意。

希望《微纳系统》系列译丛的出版对有志从事微米/纳米技术及 MEMS 研发的广大师生和科研人员有所帮助。

中国工程院院士 丁衡高

2010 年 10 月

## 译者序

自 MEMS 技术出现后,一直倡导、关心和支持我国 MEMS 发展的丁衡高院士在百忙中为本套书中文版作序,并对翻译工作一直给予鼓励,使我们深感鼓舞。

从 2004 年开始,东南大学 MEMS 教育部重点实验室与东南大学出版社合作,组织出版《微纳系统》系列译丛,我们在选择国际上出版的书籍时,主要基于以下考虑:(1)书籍是国际知名专家所写,以保证内容的权威性;(2)书籍是近期出版的,以保证技术的先进性;(3)国内还没有同类书籍翻译,以避免重复引进;(4)本实验室也在进行该方向的研究,以保证翻译质量。

《微纳系统》译丛将覆盖 MEMS 设计、制造、封装、可靠性及测试等共性的技术以及射频 MEMS、光 MEMS、动力 MEMS 等各种应用的技术。

MEMS 技术仍处在快速发展之中,而我国 MEMS 产业已经起步,面对这种发展态势,对经过研究验证并进入规模化生产中的材料和技术需要适时的总结和归纳,但由于 MEMS 涉及众多的材料与工艺,使这种工作面临巨大的挑战。令人高兴的是,美国 Maryland 大学的 Reza Ghodssi 和台湾 Touch Micro-system Technology 公司的 Pinyen Lin 两位学者组织国际学术界与工业界的 35 名专家历时 5 年完成了这一任务。

要感谢 Springer 出版公司将简体中文版授权东南大学出版社,才使该书中文版成为可能。

MEMS 涉及的专业知识宽广而又深入,翻译该书一样面临巨大的挑战,好在东南大学 MEMS 教育部重点实验室长期从事 MEMS 教学与研究工作,各课题组教师从事不同的 MEMS 研究与开发方向,也使这本书的翻译成为可能。

本书具体翻译分工如下:周再发(第 1 章)、张志强/廖小平(第 2 章)、唐

洁影(第3、13章)、尚金堂、徐佳峰、陈友鹏和邹羽(第4、12章)、黄见秋(第5、14章)、宋竞(第6章)、韩磊(第7章)、秦明(第8、11章)、于虹(第9章)、李伟华(第10章)。我对全书进行了统稿。在这里对参加翻译的教师和研究生们表示感谢。

由于翻译水平有限,加之时间紧迫,译书中肯定有这样或那样的错译、误译或不恰当之处,恳请读者批评指正。

黄庆安

东南大学MEMS教育部重点实验室

2010年10月

# 原书序

尽管 MEMS 的历史相对较短,但已经取得了与器件制造相关的重要进展和技术发明。MEMS 发展初期使用了改进的 IC 技术,而目前已经发展出诸如利用感应耦合等离子体(ICP)的深反应离子刻蚀(DRIE)技术等专用加工技术,MEMS 研究者还在扩大基于圆片制造技术的能力。这些技术已在新器件和应用中得到验证,例如 TI 公司的数字微镜器件(DMD)、MIT 的微型涡轮机、ADI 公司的加速度计等等,并且出现了新的研发领域:生物 MEMS、微流控器件和光 MEMS。

到目前为止,关于一般性制造技术和材料的书籍已经出版了许多,而有关这些技术和材料与 MEMS 设计之间联系的讨论却很少。由于 MEMS 技术的多样性和交叉学科的本质,它与 IC 制造和设计面临的挑战非常不同。MEMS 研发者的诸多努力往往集中在开发 MEMS 结构制造的内部技巧和特定工艺以及相关的系列表征技术,每次都冒着浪费研发努力的风险甚至重复别人的发明。MEMS 领域已存在大量技术,通过与同行交流讨论容易获得大部分这类技术,但内容是非正式,且没有分类的。本书的作者认为,花费时间贯通这些技术比花费时间提出新想法或开拓尚未开发的应用领域更重要。本书正是基于这种设想。

对现在和未来的 MEMS 研究者和工程师而言,基础且综合的 MEMS 参考书是重要的资源。MEMS 使用了大量的技术,而本书只包括材料和工艺。本书之目的是为读者提供 MEMS 材料和工艺的基本知识,同时,也深入透析实验室和生产线中已完成的工作和标准流程。每章都有案例研究,用来逐步说明由工业界和科技界专家提出的实例和技巧。尤其是本书讨论了加工条件对材料特性的影响,揭示 MEMS 制造的独立性和多学科交叉的本质。每章包括每个主题的基本信息并带有大量经典和现代参考文献,以便读者深入了解。最终,我们的目的是为熟悉 MEMS 的研究者或 MEMS

初学者提供一本有用的设计参考书。我们希望本书能为读者提供重要的信息并激励读者发明新的器件和工艺。

MEMS 器件基本上是集成有结构和自由空间的微系统。本书的作者把材料和工艺看作制造这些结构和空间的基本单元。因此,根据这种考虑,本书共分两个部分:第 2~6 章主要论述材料;第 7~13 章主要论述工艺。此外,第 1 章讨论一般的 MEMS 设计,第 14 章处理 MEMS 工艺集成。

第 1 章介绍了 MEMS 系统和工艺设计的基本框架,我们建议一定要在深入阅读本书材料和工艺部分之前阅读。第 2 章概述了半导体和介质薄膜淀积的方法,尤其是 MEMS 制造中最常用的半导体和介质薄膜。其中主要包括化学气相淀积、外延、物理气相淀积、原子层淀积以及旋涂技术。第 3 章详细讨论了金属材料的添加工艺,特别是 MEMS 制造中常用的电镀和化学镀工艺中的厚金属淀积。第 4 章专门讨论了 MEMS 聚合物材料的应用。聚合物,如聚二甲基硅氧烷(PDMS),是大量器件的重要材料,除可用作触觉传感器的封装外,更促进了新兴生物 MEMS 技术的发展。第 5 章讨论的压电薄膜是 MEMS 技术的重要组成部分,可用于传感器和执行器,主要介绍了这种材料的基本特性及工作的物理基础,同时还介绍了实际淀积和制造的方法。第 6 章着重介绍了形状记忆合金(SMA)的制造和集成,它为 MEMS 提供高驱动力和大位移执行器机构。

第 7 章介绍用于 MEMS 材料的加工工艺,主要包括干法刻蚀工艺(如 DRIE)等,特别是不同参数对刻蚀配比的影响。与干法刻蚀相对应,MEMS 微机械加工湿法腐蚀工艺将在第 8 章介绍,包括了综合的配比及参考文献,有助于寻找硅及 III-V 族半导体材料的刻蚀速率和刻蚀选择性。

第 9 章介绍了光刻工艺及相关技术,包括传统的接触式光刻、投影及 X 射线光刻,还有更独特的直写式和印刷光刻技术。第 10 章综述了 MEMS 中典型的掺杂工艺,该工艺可用于控制电学特性以及刻蚀等,与之相对应的表征技术也将一并论述。第 11 章详细叙述了圆片键合工艺,它是硅 MEMS 封装和结构制造中的关键技术,着重论述了直接键合和带有中间层的键合方法。

第 12 章讨论了正在发展中的 MEMS 封装技术,并指出了它与当前微

电路封装技术的差别,特别强调了 MEMS 器件相对于传统微电路所面临的独特挑战。第 13 章主要讨论了 MEMS 器件的表面处理,涵盖了抗粘附涂层和平坦化涂层、生物应用和光学应用中的表面功能化以及化学机械抛光(CMP)。第 14 章讨论了将上述部分工艺和材料集成为一套可兼容的高效工艺流程,称之为工艺集成。还讨论了工艺集成的经济问题和实际问题,并列举了一些商业化 MEMS 器件案例。

如果没有 MEMS 学术界与工业界同行的协助,本书是不可能完成的。在过去五年里承蒙 Stephen (Steve) Senturia 凭借其敏锐的洞察力给予了我们不尽的支持与指导,并细心审阅了本书,而副主编 Roger Howe 和 Antonio (Tony) Ricco 精心审查各章节并提出有益的建议,还举荐了优秀撰稿人,对此我们表示最诚挚的感谢。同时还要感谢来自 Springer 的 Steven (Steve) Elliot,他耐心地联系 35 位专家并与每一位探讨,大力推动了该书的出版。最后,对于所有 35 位撰稿人表示由衷的感谢,他们无私投入大量时间、精力、汗水以及才智,使得本书颇具特色,对 MEMS 产业的长足发展做出了极大的贡献,同时本书对于专业人员的学习以及高等院校的教学也有很好的辅助作用。

编写本书的想法源于在韩国首尔举办的 Transducers 2005 大会期间,完成于 Hilton Head 2010 研讨会。五年的相互合作,最终完成了本书的创作,好的想法终可实现。这也是我们想通过此书的撰写来传达的,只有齐心合作才可将 MEMS 发扬光大。

Reza Ghodssi, University of Maryland  
Pinyen Lin, Touch Micro-system Technology Corp

# 原书前言

众所周知, MEMS(微电子机械系统)领域是集成电路产业的一个分支,但是这个分支却是沿着完全不同于集成电路的道路和方向发展的。如今MEMS作为一个高度专业化的独立学科,不仅利用所有传统微电子技术,还利用新型加工方法并使用非微电子材料来制造机械、流控、生物化学或光学等不含晶体管的器件。这里的关键词是传感器和执行器,它们与微电子(或不需要微电子)结合构成复杂微系统。MEMS器件和微系统已遍布各行各业,如汽车、喷墨打印机、电子游戏机、移动电话、法医实验室、工厂、进入太空的精密仪器系统、手术室以及临床门诊等。这个“精灵”已经破罐而出,MEMS器件已无处不在。

由于MEMS极具多元性,几乎没有一本书可以完全把握整个领域的精髓。但所有的MEMS器件最终都可归结为两个关键问题:“怎么做”以及“用什么材料做”,即工艺与材料。由于几乎所有MEMS器件都面临这两个问题,所以汇集近几十年来有关“怎么做”以及“用什么材料做”的相关经验,并编撰成一本数据充实、加工细节明了的纲领性手册就显得尤为重要。这就是该手册问世的理由和目的,即对MEMS工艺和材料的使用进行足够细致的描述与讲解,使其具有实际应用价值。

衷心感谢合作编辑 Reza Ghodssi 和 Pinyen Lin, 以及顾问编辑和所有编著者,是他们的勤奋、毅力、细心以及才能,才使此书得以出版。此书云集了众多知识、智慧以及相关经验,诚挚地期望全球MEMS领域人员可以从中获益。

Stephen D. Senturia  
Brookline, Massachusetts  
2010年6月

# 目 录

<b>1 MEMS 设计流程</b>	1
1.1 引言	1
1.1.1 设计流程	4
1.2 MEMS 设计方法	6
1.2.1 设计方法学的历史背景	6
1.2.2 MEMS 的结构化设计方法	8
1.3 头脑风暴	9
1.4 麦克风案例	9
1.4.1 麦克风的历史背景	9
1.4.2 Avago 的故事	10
1.4.3 Knowles 公司的故事	18
1.4.4 关键构思总结	20
1.5 材料和工艺选择	21
1.5.1 材料选择	21
1.5.2 工艺选择	21
1.6 评估设计构思	25
1.6.1 建模	25
1.7 优化和其他设计方法	26
1.7.1 设计优化	26
1.7.2 不确定性分析	26
1.7.3 失效模式及影响分析	26
1.7.4 设计方法时序	27
1.8 总结	28
参考文献	28
<b>2 半导体和介质材料的添加工艺</b>	32
2.1 概述	32
2.2 热转换	33
2.2.1 工艺概述	33

2.2.2 硅热氧化的材料特性和工艺选择指南 .....	37
2.2.3 实例研究 .....	38
<b>2.3 化学气相沉积 .....</b>	<b>39</b>
2.3.1 概述 .....	39
2.3.2 LPCVD 多晶硅 .....	45
2.3.3 LPCVD 二氧化硅 .....	55
2.3.4 LPCVD 氮化硅 .....	58
2.3.5 LPCVD 多晶 SiGe 和 Ge .....	62
2.3.6 LPCVD 多晶碳化硅 .....	66
2.3.7 LPCVD 金刚石 .....	73
2.3.8 APCVD 多晶碳化硅 .....	77
2.3.9 PECVD 硅 .....	77
2.3.10 PECVD 二氧化硅 .....	78
2.3.11 PECVD 氮化硅 .....	81
2.3.12 PECVD 锗硅 .....	84
2.3.13 PECVD 碳化硅 .....	87
2.3.14 PECVD 碳基薄膜 .....	90
<b>2.4 外延 .....</b>	<b>90</b>
2.4.1 工艺概述 .....	90
2.4.2 外延多晶硅 .....	92
2.4.3 外延碳化硅 .....	93
2.4.4 III~V 族材料和氮化镓 .....	95
<b>2.5 物理气相沉积 .....</b>	<b>98</b>
2.5.1 工艺概述 .....	98
2.5.2 溅射-沉积硅 .....	99
2.5.3 溅射-沉积碳化硅 .....	100
2.5.4 溅射-沉积 $\text{SiO}_2$ .....	101
2.5.5 溅射-沉积类金刚石碳(DLC) .....	101
2.5.6 脉冲激光沉积(PLD)碳薄膜 .....	102
<b>2.6 原子层沉积 .....</b>	<b>102</b>
2.6.1 工艺概述 .....	102
2.6.2 工艺选择指南和材料特性 .....	103
<b>2.7 旋涂薄膜 .....</b>	<b>105</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>106</b>

<b>3 金属材料的添加工艺</b>	119
3.1 引言	119
3.1.1 概述	119
3.1.2 制造方法的折中	120
3.2 物理气相沉积	122
3.2.1 蒸发	122
3.2.2 溅射	123
3.2.3 脉冲激光沉积	126
3.3 电化学沉积	126
3.3.1 电镀	127
3.3.2 化学镀	138
3.3.3 电镀和化学镀的比较	143
3.4 LIGA 和 UV-LIGA 工艺	144
3.4.1 制备过程	144
3.4.2 LIGA 技术和 UV-LIGA 技术微结构的电镀	145
3.4.3 多层金属结构	147
3.5 金属材料特性和工艺选择指南	150
3.5.1 附着性	150
3.5.2 电气性能	152
3.5.3 机械性能	153
3.5.4 热性能	154
3.5.5 磁性能	155
参考文献	156
<b>4 聚合物材料的添加工艺</b>	162
4.1 SU-8	162
4.1.1 材料性能	164
4.1.2 加工种类	165
4.1.3 课程学习	167
4.1.4 SU-8 的应用实例	168
4.2 PDMS	169
4.2.1 材料特性	170
4.2.2 加工技术	171
4.2.3 生物应用	173
4.2.4 案例研究	175

4.3 聚酰亚胺	178
4.3.1 材料特性	178
4.3.2 加工种类	179
4.3.3 课程学习	181
4.3.4 案例研究	181
4.4 水凝胶	182
4.4.1 明胶	182
4.4.2 壳聚糖	183
4.4.3 聚乙二醇	185
4.4.4 案例研究	186
4.5 聚对二甲苯	187
4.5.1 材料特性	188
4.5.2 加工工艺	188
4.5.3 课程学习	189
4.5.4 案例研究	189
4.6 导电聚合物	190
4.6.1 材料特性	191
4.6.2 驱动机制和理论	192
4.6.3 应用	193
4.6.4 加工工艺	194
4.6.5 案例研究	196
4.7 其他聚合物	197
4.7.1 苯并环丁烯	197
4.7.2 液晶聚合物	200
4.8 聚合物的压塑和模塑	201
4.8.1 工艺概述	201
4.8.2 衬底材料选择	202
4.8.3 设备选择	203
4.8.4 模具材料的选择和制造	204
4.8.5 传统的模具加工方法	206
4.8.6 工艺发展	207
4.8.7 最小衬底厚度	208
4.9 材料特性	208
参考文献	209

<b>5 压电材料的添加工艺:压电 MEMS</b>	230
5.1 压电薄膜简介	230
5.1.1 正压电效应和逆压电效应	231
5.1.2 材料——铁电材料和非铁电材料	232
5.1.3 基本设计方程与模型	236
5.1.4 材料选择指南	249
5.1.5 应用	249
5.2 极性材料:AlN 和 ZnO	250
5.2.1 材料淀积	250
5.2.2 图案化技术	253
5.2.3 器件设计要点	255
5.2.4 器件实例	257
5.2.5 案例研究	260
5.3 铁电材料:PZT	262
5.3.1 材料淀积	262
5.3.2 图案化技术	267
5.3.3 器件设计要点	270
5.3.4 器件实例	274
5.3.5 采用 PZT 薄膜执行器的 RF MEMS 开关设计及工艺案例研究	277
5.4 总结	282
致谢	282
参考文献	283
<b>6 形状记忆合金材料与工艺</b>	292
6.1 引言及原理	292
6.1.1 基本原理	292
6.1.2 TiNi 和 TiNi 基三元合金介绍	293
6.1.3 超弹性效应	295
6.1.4 单程型、双程型、全程型 SMA	296
6.2 SMA 执行器的材料特性与制造工艺	296
6.2.1 体材料	297
6.2.2 薄膜	297
6.2.3 微机械加工	299
6.2.4 刻蚀和剥离	300
6.2.5 组装	302

6.2.6 材料和工艺选择指导 .....	304
6.3 应用和器件 .....	309
6.3.1 医疗应用 .....	309
6.3.2 流体器件 .....	316
6.3.3 光纤开关 .....	319
6.3.4 触觉触点显示 .....	320
6.3.5 AFM 悬臂梁 .....	321
6.3.6 案例研究 .....	322
6.4 总结 .....	325
致谢 .....	325
参考文献 .....	325
 7 微机械加工中的干法刻蚀 .....	330
7.1 干法刻蚀 .....	330
7.1.1 刻蚀指标 .....	331
7.2 等离子体刻蚀 .....	334
7.2.1 刻蚀的类型 .....	335
7.2.2 等离子体源 .....	338
7.3 等离子体的工艺参数与控制 .....	342
7.3.1 能量驱动型各向异性刻蚀 .....	343
7.3.2 抑制驱动型各向异性刻蚀 .....	344
7.3.3 等离子体刻蚀的选择比 .....	345
7.4 实例:硅、二氧化硅和氮化硅刻蚀 .....	346
7.5 实例分析:高深宽比硅刻蚀工艺 .....	350
7.5.1 低温干法刻蚀 .....	350
7.5.2 Bosch 工艺 .....	351
7.5.3 DRIE 发展趋势 .....	354
7.6 压电材料的高深宽比刻蚀 .....	356
7.6.1 实例:玻璃(Pyrex)和石英的高深宽比刻蚀 .....	356
7.6.2 压电材料的高深宽比刻蚀 .....	359
7.7 化合物半导体的刻蚀 .....	361
7.7.1 实例:GaAs 和 AlGaAs 的刻蚀 .....	362
7.7.2 实例:InP、InGaAs、InSb 和 InAs 的刻蚀 .....	365
7.8 实例:离子束刻蚀 .....	367
7.9 总结 .....	369

参考文献 .....	371
<b>8 MEMS 湿法腐蚀工艺和过程 .....</b>	<b>376</b>
8.1 引言 .....	376
8.2 湿法腐蚀原理和工艺架构 .....	378
8.2.1 表面反应和反应物/副产品传输 .....	382
8.2.2 腐蚀剂选择性和掩膜考虑 .....	385
8.2.3 直接腐蚀和剥离技术 .....	386
8.2.4 去除牺牲层 .....	387
8.2.5 减薄和去除衬底 .....	388
8.2.6 工艺架构的影响 .....	388
8.2.7 湿法腐蚀工艺的开发 .....	389
8.2.8 其他考虑和替代品 .....	392
8.3 湿法腐蚀设施和工艺的评估和开发 .....	394
8.3.1 设施要求 .....	394
8.3.2 圆片操作考虑 .....	396
8.3.3 安全问题 .....	397
8.3.4 培训 .....	398
8.4 IC 兼容材料和湿法腐蚀 .....	398
8.4.1 氧化物和绝缘体的刻蚀 .....	399
8.4.2 硅、多晶硅、锗各向同性腐蚀 .....	406
8.4.3 标准金属腐蚀 .....	411
8.4.4 光刻胶去胶技术与圆片清洗工艺 .....	416
8.4.5 实例:IC 兼容材料的湿法化学腐蚀 .....	421
8.5 非标准材料和湿法腐蚀 .....	424
8.5.1 非标准介质、半导体和金属刻蚀 .....	424
8.5.2 塑料和聚合物的腐蚀 .....	475
8.5.3 实例:非标准材料的湿法化学腐蚀 .....	475
8.6 硅各向异性腐蚀和硅腐蚀自停止 .....	477
8.6.1 硅的各向异性腐蚀 .....	478
8.6.2 重掺杂硅腐蚀自停止 .....	479
8.6.3 轻掺杂硅和锗硅腐蚀自停止 .....	485
8.6.4 离子注入硅腐蚀自停止 .....	486
8.6.5 电化学腐蚀和电化学腐蚀自停止 .....	487
8.6.6 光助硅腐蚀和腐蚀自停止 .....	492

8.6.7 薄膜腐蚀自停止 .....	494
8.6.8 实例:湿法化学和电化学腐蚀自停止 .....	496
<b>8.7 牺牲层腐蚀 .....</b>	<b>497</b>
8.7.1 牺牲层去除技术 .....	498
8.7.2 多晶硅微结构中牺牲氧化层的去除 .....	499
8.7.3 替代的牺牲和结构层组合 .....	500
8.7.4 用于增强牺牲层去除的腐蚀加速层 .....	504
8.7.5 漂洗液去除和抗粘附涂层 .....	505
8.7.6 实例:牺牲层去除和结构层释放 .....	508
<b>8.8 湿法化学腐蚀形成多孔硅 .....</b>	<b>508</b>
8.8.1 纳米多孔硅、中孔硅和大孔硅的形成 .....	509
8.8.2 选择性去除多孔硅 .....	511
8.8.3 实例:多孔硅形成 .....	512
<b>8.9 湿法腐蚀的层分显和缺陷检测 .....</b>	<b>513</b>
8.9.1 采用湿法腐蚀剂确定掺杂水平和缺陷 .....	514
8.9.2 采用化学腐蚀剂的层显 .....	517
8.9.3 例:层显和缺陷检测 .....	518
<b>参考文献 .....</b>	<b>518</b>
<b>9 MEMS 光刻和微加工技术 .....</b>	<b>545</b>
<b>9.1 引言 .....</b>	<b>545</b>
<b>9.2 紫外线(UV)光刻 .....</b>	<b>549</b>
9.2.1 光掩膜 .....	549
9.2.2 光学投影系统 .....	554
9.2.3 光刻胶 .....	558
9.2.4 衬底 .....	562
9.2.5 紫外线光刻的工艺步骤 .....	563
<b>9.3 灰度光刻 .....</b>	<b>567</b>
9.3.1 光掩膜的像素化 .....	569
9.3.2 灰度光刻的光刻胶特性 .....	569
<b>9.4 X射线光刻 .....</b>	<b>571</b>
9.4.1 X射线掩膜 .....	572
9.4.2 X射线光刻胶 .....	574
9.4.3 曝光 .....	574
9.4.4 显影 .....	575

9.5 直写式光刻 .....	576
9.5.1 电子束光刻 .....	576
9.5.2 离子束光刻和聚焦离子束(FIB) .....	579
9.5.3 气体辅助电子和离子束光刻 .....	582
9.5.4 蘸笔光刻(DPN) .....	582
9.5.5 激光直写 .....	583
9.5.6 立体光刻和微立体光刻 .....	584
9.6 印刷/压印光刻 .....	587
9.6.1 喷墨印刷 .....	588
9.6.2 软光刻 .....	589
9.6.3 纳米压印光刻(NIL) .....	590
9.6.4 转印 .....	591
9.7 案例研究 .....	594
9.7.1 案例研究 1:衬底清洗——RCA Clean(s) .....	595
9.7.2 案例研究 2:衬底清洗,O <sub>2</sub> 等离子体清洗 .....	595
9.7.3 案例研究 3:衬底清洗,溶剂清洗 .....	596
9.7.4 案例研究 4:正光刻胶加工:对于 Shipley 1800 系列光刻胶的一般处理 .....	596
9.7.5 案例研究 5:正光刻胶加工:对 Shipley S1813 的特殊加工 .....	597
9.7.6 案例研究 6:正光刻胶加工:对 OiR 906-10 的特殊加工 .....	598
9.7.7 案例研究 7:负光刻胶加工:对 NR7-1500PY 的特殊加工 .....	599
9.7.8 案例研究 8:电子束光刻 .....	600
9.7.9 案例研究 9:PDMS 模板的制作 .....	602
9.7.10 案例研究 10:光掩膜的制造 .....	603
9.7.11 案例研究 11:多光子吸收聚合(MAP) .....	606
9.7.12 案例研究 12:用聚焦离子束进行光刻 .....	607
参考文献 .....	609
10 MEMS 中的掺杂工艺 .....	619
10.1 引言 .....	619
10.2 应用 .....	619
10.2.1 电特性 .....	619
10.2.2 腐蚀停止技术 .....	627
10.2.3 材料和工艺选择指南:腐蚀停止技术 .....	632
10.3 原位掺杂 .....	635
10.3.1 化学气相沉积 .....	635