

微 纳 系 统 系 列 译 丛

CMOS MEMS

CMOS MEMS 技术与应用

[美国]O.Brand G.K.Fedder / 著

黄庆安 秦明 / 译



东南大学出版社

# CMOS MEMS 技术与应用

[美国] O. Brand G. K. Fedder 著

黄庆安 秦 明 译

东南大学出版社

## 内 容 简 介

本书是目前国内外唯一叙述集成化 MEMS 的专著。CMOS 电路技术是当今微电子的主流技术,本书主要介绍如何将 MEMS 与 CMOS 电路集成的方法和应用。内容包括 CMOS MEMS 的制备工艺、材料表征及其与电路或系统的集成化技术;CMOS MEMS 技术在惯性传感器、压力传感器、指纹传感器系统、化学传感器、生化传感器、热传感器和 RF 器件及系统中的应用。

本书由国际上 20 余位知名专家撰写,内容丰富,参考文献全面。适合于微电子技术、微机电系统(MEMS)技术、传感器技术、通讯技术等相关领域的高年级本科生、研究生和工程技术人员参考。

本书中文简体字翻译版由 WILEY-VCH 授权东南大学出版社独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,翻印必究。

**图字 10 - 2006 - 125 号**

**图书在版编目(CIP)数据**

CMOS MEMS 技术与应用/(美)布兰德(Brand, O.),  
(美)费德(Feder, G. K.)著;黄庆安,秦明译. —南京:  
东南大学出版社,2007. 6

(微纳系统系列丛书)

ISBN 978 - 7 - 5641 - 0784 - 0

I. C... II ①布... ②费... ③黄... ④秦...

Ⅲ. 互补 MOS 集成电路—微机电—电路设计

Ⅳ. TN432 TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 075823 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 汉

江苏省新华书店经销 兴化市印刷厂印刷

开本: 700 mm×1000 mm 1/16 印张: 32.25 字数: 632 千字

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5641 - 0784 - 0/TN·7

印数: 1~2000 册 定价: 78.00 元

(凡有印装质量问题,可直接向读者服务部调换。电话: 025 - 83792328)

# 序

微机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)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电路等于一体的器件或系统。其特征尺寸一般在 $0.1\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ 范围。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集成了当今科学技术的许多尖端成果,更重要的是它将信息处理与敏感及执行机构相结合,改变了人们感知和控制外部世界的方式。

CMOS MEMS技术是一种集成技术,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)、 $\mu\text{V}$ (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、成品率甚至大阵列不可能实现。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。但是,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。

到目前为止,国内还没有CMOS MEMS技术方面的工具书。美国Oliver Brand和Gary K. Fedder两位教授组织专家所著的《CMOS MEMS技术与应用》一书,是目前本领域唯一的著作。其内容主要包括两个方面:(1)CMOS MEMS的加工技术、材料表征及电路与系统的集成;(2)CMOS MEMS技术的具体应用:如压力、惯性、热、化学、生化、指纹等传感器以及RF-MEMS。该书分类综述并分析了采用CMOS MEMS技术实现的各种MEMS器件进展和问题,引用参考文献量大面广、归纳精练,具有一定的参考价值,适合于高年级本科生、研究生和相关科技人员阅读。

东南大学黄庆安教授长期从事MEMS教学和科研工作,对国内MEMS技术研发和产业化发展常有独到而敏锐的见解,时常关注国际上有关MEMS技术信息,已经翻译出版《微系统封装基础》《RF-MEMS理论、设计与技术》,这一次又适时地把《CMOS MEMS技术与应用》一书介绍到国内,值得赞赏,同时也向为翻译该书付出辛勤劳动的有关师生表示敬意。

希望该书的翻译出版对有志于从事MEMS研发特别是单片集成MEMS技术的广大师生和科研人员有所帮助。

丁衡高  
2006年5月

## 译者序

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,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,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。

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之中为本书中文版作序,并对翻译工作一直给予鼓励,在此表示感谢。

本卷所选择的 CMOS MEMS (O. Brand, G. K. Fedder, Wiley-VCH, 2005) 是 Wiley-VCH 出版社《Advanced Micro and Nanosystems》丛书的第二卷。

东南大学 MEMS 教育部重点实验室在上世纪 80 年代中期开始了 CMOS 集成传感器研究,如研究论文 Tong QY, Huang JB, “A novel CMOS flow sensor with constant chip temperature (CCT) operation,” *Sensors and Actuators*, (12)1, 9(1987); Huang JB, Tong QY, “Integrated multi-function sensor for flow velocity, temperature and vacuum measurements,” *Sensors and Actuators*, (19)1, 3(1989);从 2000 年开始,我们采用 CMOS MEMS 后处理技术研制了温度、湿度、气压、风速风向、磁场等传感器。如研究论文:Gu L, Huang QA, Qin M, “A novel capacitive-type humidity sensor using CMOS fabrication technology,” *Sensors and Actuators B*, 99(2-3): 491(2004); Zhou MX, Huang QA, Qin M, “A novel capacitive pressure sensor based on sandwich structures,” *J. Microelectromechanical Sys.*, 14(6): 1272(2005); Gao DH, Qin M, Chen HY, Huang QA, “A self-packaged thermal flow sensor by CMOS MEMS technology,” *Proc. The 3rd IEEE International Conference on Sensors, Austria, 2004*, p. 879。

本书翻译由从事 CMOS MEMS 技术研究的秦明教授和我负责组织,东南大学 MEMS 教育部重点实验室 CMOS MEMS 课题组的研究生参加,具体翻译分工如下:黄庆安(序言、目录、第 7、9 章)、秦明(第 4、8 章)、姚素瑜(第 1 章)、沈广平(第 2 章)、刘娜(第 3 章)、袁晓林(第 5 章)、魏译文(第 6 章)、潘军(第 10 章)、丁高飞(第 11 章)。其中第 2~6、8、11 章由我审校,第 1、7、9、10 章由秦明教授审校,我对全书进行了统稿。在这里对参加翻译的研究生们表示感谢。

在翻译过程中,我们对书中专用名词、术语及相关问题进行定期讨论与商榷,但由于翻译水平有限、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  
2006 年 5 月

## 原 书 序

本书是《先进微纳系统》丛书的第二卷,我们作为本卷《CMOS MEMS》的编辑,欢迎你阅读本卷。MEMS 从 IC 技术借鉴了许多材料和工艺,因此在开发 MEMS 和开发硅集成电路方面采用了非常相同的方法。30 多年前,即 MEMS 发展的早期,研究者就已经尝试把 MEMS 器件与双极或 CMOS 电路集成。本书的目的就是介绍 CMOS 集成 MEMS(或缩写为 CMOS MEMS)领域研发中的成就、挑战及前景。CMOS 工艺与微机械加工技术相结合可制备各种微系统,包括物理类传感器(如压力与惯性传感器)及其化学与生化敏感系统。

CMOS MEMS 的研究可追溯到上世纪 80 年代中期,但近 10 年的研究有惊人的发展。CMOS MEMS 早期的实例是由 NEC 公司开发的 CMOS 压阻式压力敏感系统,其论文发表在 1987 年的 *IEEE Journal of Solid State Circuits* 上。而采用双极电路的集成压力传感器则在上世纪 70 年代后期就已经研发出来,如 University of Michigan 和 Case Western University 研制的集成压力传感器。1993 年,Analog Devices 公司第一代 CMOS 集成的表面微加工加速度计(即 ADXL-50)实现了产业化。最近,该公司公开了第一代 CMOS 集成陀螺,其片上电路可以探测约  $10^{-21}$ F 电容的变化。另一个集成微系统的实例是 Texas Instruments 公司的数字微镜器件(DMD),该系统在一个芯片上容纳了 130 万个可寻址微镜。如果没有片上 CMOS 可寻址电路,这种系统几乎就不可能实现。利用业已建立的制备技术,并与强大的模拟和数字电路集成,那么使用 CMOS 技术开发 MEMS 的主要优势是可以制备较大的传感器阵列。除这些经典的应用外,最近几年,CMOS MEMS 也进入了新的应用领域,包括:化学与生化敏感、仿生学、声学和 RF 元件。

本卷分为 11 章,对 CMOS MEMS 领域过去和现在的进展进行广泛的综述。就我们所知,这是 CMOS MEMS 领域的第一本书,希望成为有价值的参考书。

第 1 章,Oliver Brand 对 CMOS MEMS 制造方法进行了综述。根据微机械加工工艺步骤在 CMOS 标准生产线上所使用的次序,分为:前 CMOS 工艺、内 CMOS 工艺和后 CMOS 工艺。CMOS MEMS 的设计不仅需要材料的电学特性,也需要热学和机械特性。

第 2 章,Patrick Ruther 和 Oliver Paul 综述了提取薄膜材料参数的相关测量技术,并把收集的大量材料特性数据整理成了表格。

第 3 章,Gary Fedder, Junseok Chae, Haluk Kulah, Khalil Najafi, Tim Denison 和 Steve Lewis 详细综述了 CMOS 集成的加速度计和陀螺,其中包括一些最成功的 CMOS MEMS 产品。小型化的声学器件,即在我们日常生活中处处可见

的扬声器和麦克风,在电话、计算机以及儿童玩具中都能看见。因此,第4章, John Neumann 和 Kaigham Gabriel 讨论了 CMOS 声学器件的最新进展。

CMOS 晶体管中每一种新技术的使用都会使之达到更高的工作频率,而使用 CMOS MEMS 技术建造 RF MEMS 器件(如开关及高频变容器)具有把整个无线系统集成到一个芯片上的潜力。第5章, Tamal Mukherjee 和 Gary Fedder 综述了最近开发的 RF CMOS MEMS 元件和电路。

压力传感器是第一个批量商业化的 MEMS 产品,因此,过去 20 多年中,开发了大量的 CMOS 集成压力传感器。第6章, Hans-Jörg Timme 综述了微机械加工压力传感器的理论背景,并比较了各种 CMOS 实现方案。

第7~9章集中介绍了 CMOS MEMS 在化学和生物方面的应用。由于可以实现传感器阵列和单片模拟及数字电路, CMOS 微系统尤其适合于小型化和手持装置的应用,例如在化学安全及对生物医学诊断的保密性和存取通路控制方面的应用。第7章, Andreas Hierlemann 讨论了基本化学传感器概念并综述了 CMOS 化学传感器。存取控制在我们日常生活中起重要的作用,人们期望安全的仿生存取控制系统在某些时候无需记忆很多的口令。第8章, Christofer Hierold, Gerd Hribernic 和 Thomas Scheiter 分析了电容式指纹传感器系统,不仅讨论了实际的 CMOS 指纹传感器,而且也给出了正在开发的生物计量鉴别系统中的有关问题。最后,第9章, Jan Lichtenberg 和 Henry Baltes 讨论了相对较新的 CMOS 生物敏感系统领域,包括生物传感器阵列和基于细胞的检测。

微机械加工技术可用来加工硅衬底,并可提供具有优良热隔离的微结构。除此之外,热传感器不仅常常需要电阻性单元,而且容易与 CMOS 技术集成。第10章, Tayfun Akin 讨论了热辐射传感器、热流量传感器和热转换器的最新进展。第11章, Christoph Hagleitner 和 Kay-Uwe Kirstein 讨论了电路和系统集成问题,包括集成传感器的公共模拟前端电路结构、CMOS MEMS 的基本单元,如滤波器、模数转换器、电流/电压参考电路及校准/数据接口电路。

Henry Baltes 是丛书的编辑之一,要特别感谢 Henry Baltes 对《先进微纳系统》新一卷及其先驱性刊物《Sensors Update》的许多贡献。

Oliver Brand, *Georgia Institute of Technology*

Gary K. Fedder, *Carnegie Mellon University*

2004, USA

.....  
作者简介:

Oliver Brand: 1990年在德国 Technical University of Karlsruhe 获硕士学位, 1994年在瑞士 ETH Zurich 获博士学位, 目前是 *Georgia Institute of Technology* 教授。其主要研究方向是 CMOS 微纳系统、MEMS 制造技术、微系统封装, 在这些领域发表 100 余篇论文, 2 本著作, 目前担任国际期刊《Sensors and Materials》编委及许多 MEMS 相关的国际会议程序委员会委员。

Gary K. Fedder: 分别于 1982 和 1984 年在 MIT 获得学士和硕士学位, 1994 年在 UC Berkeley 获博士学位, 并研制出第一个用  $\Sigma$ - $\Delta$  多模态静电伺服控制的微结构; 目前是 Carnegie Mellon University 教授。其主要研究兴趣是 MEMS 建模、模拟与综合, MEMS CMOS 集成, 微传感器设计, 微执行器控制系统。目前担任国际期刊《Journal of Microelectromechanical Systems》《Journal of Micromechanics and Microengineering》编委及许多 MEMS 相关的国际会议程序委员会委员。

.....  
译者简介

黄庆安: 1991 年在东南大学获博士学位, 并留校任教, 1997—1998 年在香港科技大学做访问学者, 2003 年获国家杰出青年科学基金, 2004 年被聘为长江学者特聘教授。现担任东南大学 MEMS 教育部重点实验室主任、教授、博士生导师。

在 MEMS 研究领域, 获教育部自然科学一等奖 2 项; 授权中国发明专利 20 余项; 在国际期刊发表论文 40 余篇、国际会议 70 余篇; 出版专著 1 本、译著 5 本、国际专著 1 章。论文/论著被国内外引用 200 余次, 其中包括 5 本国外著作的引用与转述; 2001 年担任 *SPIE Micromachining and Microfabrication Process Devices and Technology* 国际会议主席; 2002—2007 任 *IEEE International Conference on Sensors* 年会程序委员会委员、分会场主席; 还担任 *Journal of Microelectromechanical Systems*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, *IEEE Sensors Journal*, *Sensors and Actuators*, *IEEE Electron Device Letters*, *Journal of Applied Physics*, *Applied Physics Letters* 等多种国际期刊审稿人; 《传感技术学报》主编, 《电子学报》、《半导体学报》等多种期刊编委。

秦 明: 1997 年在东南大学获博士学位, 并留校任教, 1998—1999 年在香港科技大学电子与电机工程系进行博士后研究工作。教育部首批新世纪人才。现担任东南大学 MEMS 教育部重点实验室副主任、教授、博士生导师。

在 MEMS 研究领域, 获教育部自然科学一等奖 1 项、技术发明二等奖 1 项; 已授权中国发明专利 10 余项; 在 *Journal of Microelectromechanical Systems*, *Journal of the Electrochemical Society*, *Sensors and Actuators*, *Thin Solid Films* 等国际期刊发表论文 20 余篇; 中国仪器仪表学会传感器分会常务理事; 《传感技术学报》、《电子器件》等期刊编委。



# 目 录

<b>1 制造工艺</b> .....	(1)
1.1 CMOS 工艺 .....	(2)
1.1.1 基本的微加工步骤 .....	(3)
1.1.2 CMOS 工艺流程 .....	(8)
1.1.3 用于微纳系统的 CMOS 材料 .....	(9)
1.1.4 CMOS 微系统 .....	(12)
1.2 CMOS 兼容的微机械加工工艺模块 .....	(15)
1.2.1 体微机械加工 .....	(16)
1.2.2 表面微机械加工 .....	(20)
1.3 MEMS 和 NEMS 的 CMOS 兼容设计 .....	(21)
1.3.1 可容许的工艺修改 .....	(21)
1.3.2 设计规则的修改 .....	(23)
1.3.3 电路和 MEMS 模拟 .....	(24)
1.4 CMOS 和微机械加工 .....	(25)
1.4.1 前 CMOS 微机械加工 .....	(29)
1.4.2 内 CMOS 微机械加工 .....	(33)
1.4.3 后 CMOS 微机械加工 .....	(38)
1.5 结束语 .....	(50)
1.6 参考文献 .....	(51)
<b>2 材料表征</b> .....	(61)
2.1 引言 .....	(62)
2.1.1 CMOS 材料的换能效应 .....	(63)
2.1.2 测试结构 .....	(67)
2.2 电特性和热电特性 .....	(69)
2.2.1 电阻率和方块电阻 .....	(69)
2.2.2 材料电特性数据 .....	(71)
2.2.3 热电动势 .....	(72)
2.2.4 热电材料特性数据 .....	(75)
2.3 热特性 .....	(77)
2.3.1 热导率 .....	(77)
2.3.2 热容 .....	(83)

2.4	机械特性	(88)
2.4.1	鼓胀测试	(89)
2.4.2	圆片曲率	(100)
2.4.3	被动测试结构	(101)
2.4.4	静电驱动梁	(103)
2.4.5	微张力测试	(104)
2.4.6	纳米压痕	(106)
2.4.7	桥弯曲	(106)
2.4.8	机械材料数据库	(108)
2.5	结束语	(108)
2.6	参考文献	(115)
3	单片集成惯性传感器	(120)
3.1	引言	(121)
3.1.1	应用与发展动力	(121)
3.1.2	加速度计的工作原理	(121)
3.1.3	振动速率陀螺仪的工作原理	(125)
3.1.4	集成惯性传感器的研究内容	(126)
3.2	集成多晶硅惯性传感器	(127)
3.2.1	概述	(127)
3.2.2	Analog Devices 公司集成多晶硅惯性传感器	(127)
3.2.3	Robert Bosch 公司外延多晶硅加速度计	(139)
3.2.4	Sandia 国家实验室	(139)
3.2.5	UC Berkeley(UCB)	(139)
3.2.6	英国国防评估与研究部	(145)
3.3	采用 CMOS 标准工艺加工的薄膜惯性传感器	(145)
3.3.1	概述	(145)
3.3.2	Siemens 公司多晶硅栅加速度计	(146)
3.3.3	UCB 压阻式 CMOS-BEOL 加速度计	(147)
3.3.4	Carnegie Mellon 大学 CMOS-BEOL 惯性传感器系列	(147)
3.3.5	MEMS IC 公司热加速度计	(152)
3.4	金属惯性传感器	(153)
3.4.1	概述	(153)
3.4.2	电镀金属加速度计	(154)
3.4.3	振动金属环陀螺仪	(155)

3.5	体硅加工集成 MEMS 惯性传感器 .....	(157)
3.5.1	压阻式体硅加速度计 .....	(157)
3.5.2	ADI 公司 SOI MEMS .....	(159)
3.5.3	Michigan 大学玻璃上硅(SOG)加速度计 .....	(161)
3.5.4	Carnegie Mellon 大学 DRIE-Si CMOS MEMS .....	(162)
3.6	发展趋势 .....	(163)
3.7	参考文献 .....	(163)
<b>4</b>	<b>CMOS MEMS 声学器件 .....</b>	<b>(168)</b>
4.1	引言 .....	(169)
4.2	麦克风 .....	(170)
4.2.1	小尺寸设计 .....	(171)
4.2.2	麦克风设计和制造 .....	(174)
4.2.3	CMOS MEMS 麦克风的声学模型 .....	(176)
4.2.4	实验结果 .....	(177)
4.3	扬声器 .....	(180)
4.3.1	传统扬声器与 MEMS 扬声器比较 .....	(181)
4.3.2	制造 .....	(182)
4.3.3	封闭耦合器中的声学 .....	(183)
4.3.4	结果 .....	(183)
4.3.5	数字声音重现 .....	(186)
4.4	超声 .....	(188)
4.4.1	制造 .....	(189)
4.4.2	水下声学和实验装置 .....	(190)
4.4.3	测量和结果 .....	(191)
4.4.4	相控阵特性 .....	(192)
4.5	结论 .....	(193)
4.6	参考文献 .....	(193)
<b>5</b>	<b>CMOS RF MEMS .....</b>	<b>(195)</b>
5.1	RF 集成的发展简史 .....	(196)
5.2	用于 RF 结构的 MEMS .....	(196)
5.2.1	接收机结构 .....	(197)
5.2.2	多波段收发机结构 .....	(198)
5.3	微机械加工的 RF 元件 .....	(199)
5.3.1	RF MEMS 开关 .....	(199)
5.3.2	可调电容 .....	(203)
5.3.3	悬浮电感 .....	(207)

5.3.4	微机械加工的分布式电磁谐振器	(211)
5.3.5	微机械谐振器和滤波器	(212)
5.4	基于 CMOS RF MEMS 的电路	(215)
5.5	结束语	(218)
5.6	参考文献	(218)
<b>6</b>	<b>CMOS 压力传感器</b>	(224)
6.1	引言	(225)
6.2	微机械压力传感器	(227)
6.2.1	弹性固体的胡克定律	(227)
6.2.2	平面应力近似	(235)
6.2.3	压力敏感膜的挠度	(236)
6.2.4	压阻效应	(243)
6.2.5	惠斯通电桥中的压阻器	(258)
6.3	CMOS 集成压力传感器	(261)
6.3.1	CMOS 与 MEMS 集成的动机	(262)
6.3.2	薄膜加工中的厚度控制	(264)
6.3.3	工艺集成方法	(266)
6.3.4	多晶硅电容式压力传感器	(273)
6.3.5	高温压力传感器	(282)
6.3.6	微机械 Pirani 压力计	(283)
6.3.7	微机械压力传感器总结	(284)
6.4	结束语	(286)
6.5	参考文献	(286)
<b>7</b>	<b>CMOS 化学传感器</b>	(294)
7.1	化学传感器	(295)
7.1.1	简单的吸附/吸收	(297)
7.1.2	化学反应	(298)
7.1.3	电荷转移与电化学反应	(298)
7.2	用于化学传感器的 CMOS 技术	(298)
7.3	CMOS 化学传感器	(300)
7.3.1	化学机械传感器	(300)
7.3.2	热传感器	(305)
7.3.3	光传感器	(309)
7.3.4	电化学传感器	(313)
7.3.5	CMOS 多传感器系统	(329)
7.4	参考文献	(334)

<b>8 生物测定 CMOS 电容式指纹传感器系统</b> .....	(343)
8.1 引言 .....	(344)
8.1.1 生物测定系统类型 .....	(345)
8.1.2 生物测定系统的要求 .....	(347)
8.2 CMOS 指纹传感器: 从指纹表面到传感器信号 .....	(349)
8.2.1 指纹传感器系统的类型 .....	(349)
8.2.2 电容式指纹传感器的发展 .....	(351)
8.3 CMOS 电容式指纹传感器: 从传感器信号到原始图像数据 .....	(353)
8.3.1 CMOS 指纹传感器芯片 .....	(353)
8.3.2 质量要求 .....	(357)
8.4 图像处理、特征提取和软件解决方案: 从原始图像 数据到个人识别 .....	(362)
8.4.1 图像处理任务 .....	(362)
8.4.2 生物测定系统的性能 .....	(370)
8.4.3 系统集成 .....	(377)
8.4.4 指纹系统的推广 .....	(382)
8.5 结束语 .....	(385)
8.6 参考文献 .....	(386)
<b>9 CMOS 生化敏感系统</b> .....	(389)
9.1 引言 .....	(390)
9.1.1 生化敏感器件的小型化 .....	(390)
9.1.2 生化传感器和传感器系统 .....	(390)
9.1.3 用于生物敏感系统的集成电路 .....	(392)
9.2 生物传感器阵列 .....	(394)
9.2.1 电化学读出 .....	(394)
9.2.2 光读出 .....	(396)
9.3 基于细胞的监测 .....	(397)
9.3.1 细胞操作 .....	(398)
9.3.2 带电细胞与 IC 的接口 .....	(400)
9.4 发展趋势 .....	(409)
9.4.1 扫描探针技术 .....	(409)
9.4.2 基于悬臂梁的传感器 .....	(410)
9.4.3 生化样品的预处理 .....	(410)
9.4.4 传感器封装 .....	(411)
9.5 结束语 .....	(411)
9.6 参考文献 .....	(411)

<b>10 CMOS 热传感器</b> .....	(416)
10.1 引言.....	(417)
10.2 热辐射传感器.....	(417)
10.2.1 热(非冷却)红外探测器 .....	(418)
10.2.2 热(非冷却)红外探测器的类型.....	(419)
10.3 热转换器.....	(435)
10.4 热流量传感器.....	(437)
10.5 参考文献.....	(441)
<b>11 电路和系统集成</b> .....	(447)
11.1 引言.....	(448)
11.1.1 接口电路的制造工艺.....	(448)
11.1.2 接口电路和系统结构的指标.....	(452)
11.2 模拟前端电路.....	(453)
11.2.1 模拟前端电路的关键参数.....	(454)
11.2.2 电阻式传感器.....	(458)
11.2.3 电容式传感器.....	(460)
11.2.4 热电、压电和热释电器件 .....	(463)
11.3 CMOS MEMS/NEMS 的电路结构模块.....	(468)
11.3.1 模拟滤波器.....	(468)
11.3.2 模数转换器(ADC) .....	(472)
11.3.3 数模转换器(DAC) .....	(476)
11.3.4 数字滤波器.....	(478)
11.3.5 校准和数据接口.....	(480)
11.3.6 电流与电压参考源.....	(481)
11.4 系统集成.....	(484)
11.4.1 系统级电路的参数灵敏度和功耗.....	(484)
11.4.2 可测性设计.....	(486)
11.4.3 微系统验证 .....	(488)
11.5 实例:单片集成气体探测系统.....	(490)
11.5.1 设计流程和版图验证.....	(491)
11.5.2 电容式化学传感器.....	(491)
11.5.3 量热式传感器.....	(493)
11.5.4 质量敏感谐振梁.....	(494)
11.5.5 控制器和数字接口.....	(495)
11.6 参考文献.....	(496)

# 1

## 制造工艺

*O. Brand, School of Electrical and Computer Engineering,  
Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA*

**摘要:** 本章综述了基于 CMOS 的微机电系统 (MEMS) 制造工艺。第一部分简要地介绍了基本的微加工步骤,重点给出了 CMOS 工艺流程以及如何将 CMOS 材料用于微系统设计中。尽管许多微系统可以用常规的 CMOS 工艺流程制造,但本章关注的焦点是结合 CMOS 工艺和微机械加工模块的工艺技术。本章的第二部分介绍了与 CMOS 工艺兼容的体微机械加工技术和表面微机械加工技术,以及在同一衬底上集成机械微结构和电子器件所面临的设计挑战。微机械加工模块可以放在标准 CMOS 工艺步骤的前面 (pre-CMOS)、后面 (post-CMOS) 或者中间 (intra-CMOS)。本章最后一部分广泛综述了文献中所报道的各种 CMOS MEMS 加工方法。

**关键词:** 微机械加工, 基于 CMOS 的 MEMS, MEMS 制造, 微系统制造

## 1.1 CMOS 工艺

目前最先进的 CMOS 工艺,例如 IBM 的 9S2 工艺是基于 300 mm 圆片的 SOI (绝缘层上硅)技术,其主要特征是最小物理栅长小于 100 nm 和(铜)金属化多达 8 层(如图 1.1 所示<sup>[1]</sup>)。对制造当今或未来千万个晶体管所构成的单片微处理器来说,这种先进的 CMOS 工艺是必需的。例如苹果计算机公司(Apple Computer)的 64 位 PowerPC-G5 处理器,它由五千八百多万个晶体管构成<sup>[2]</sup>,就是采用 IBM 的 90 nm CMOS 工艺制造而成的。

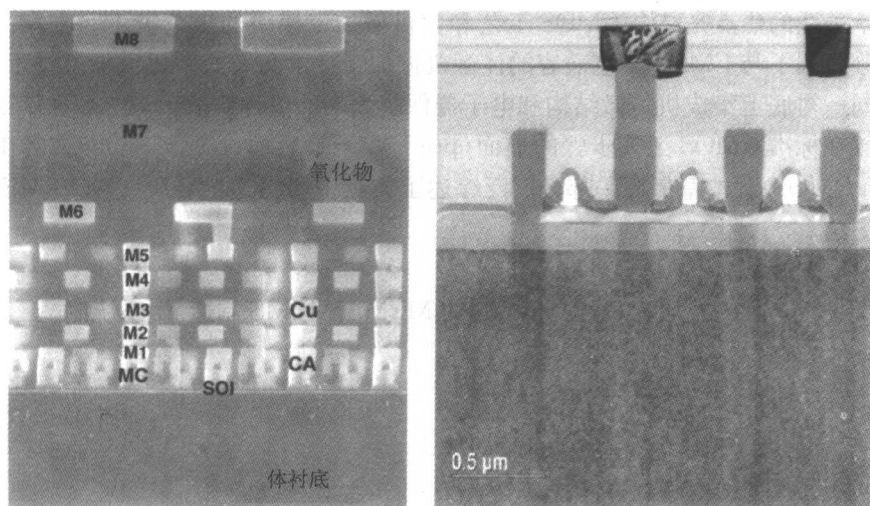


图 1.1 IBM 90nm CMOS 工艺 9S2 的截面图, 上有 8 层铜金属化(标有 M1-M8)和三个金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFETs)(承 IBM 许可)

最近, IBM 的 T. J. Watson Research Center 的研究者们采用现代 CMOS 工艺中的铜互连技术来制造 RF 开关和谐振器<sup>[3,4]</sup>等微机械器件。然而到目前为止, 大多数商用微系统采用 4 in. 或 6 in. 硅片以及最小特征尺寸在 0.5~3 μm 的 CMOS 或 BiCMOS 工艺将(微机械加工的)传感器单元和集成电路单片集成。尽管这种 CMOS 工艺已存在 10~15 年之久, 但它们的能力仍然能够满足大多数的微系统应用。例如 Infineon Technologies 公司的压力传感器 KP100, 它是由表面微机械加工的压力传感器阵列、用于信号处理的片上电路、A/D 转换器、校准和系统诊断器构成, 并且基于 6 in. 0.8 μm BiCMOS 工艺<sup>[5]</sup>。

用于制造 CMOS MEMS 的亚微米(0.5~1.0 μm) CMOS 工艺典型截面图如图 1.2 所示<sup>[6]</sup>。这种双阱工艺基于 6 in. p 型硅片, 并采用多晶硅/硅化物栅, 用以



形成源漏区的低掺杂漏(LDD)技术,硅化物源/漏区接触以及基于钨塞和铝互连的双层金属化。热氧化层用以隔离相邻的晶体管,化学气相淀积(CVD)二氧化硅层作为金属化层之间的介质层,PECVD(等离子体增强 CVD)氮化硅层或者二氧化硅、氮化硅三明治结构作为钝化层。在 1.1.2 节中将对 CMOS 制造流程作一个简要地介绍,更详细的工艺描述可以在许多微电子课本中找到<sup>[6~8]</sup>。

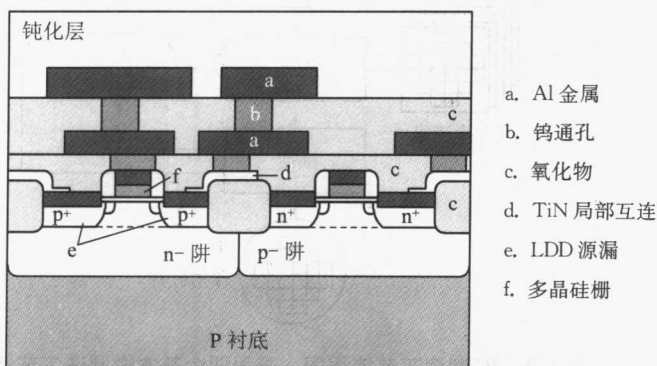


图 1.2 典型亚微米(0.5~1.0  $\mu\text{m}$ )CMOS 工艺的截面示意图。采用双层铝金属化和 TiN 局部互连<sup>[6]</sup>

当设计 CMOS MEMS 或微系统时,为了保证片上电子器件的性能,设计者在很大程度上必须坚持选择 CMOS 工艺流程。这就限制了设计集成微系统时可利用的“设计空间”,因为材料、材料特性和层厚等方面已被 CMOS 工艺确定。下面将对集成电路制造做一个简要的介绍:1.1.1 节重点介绍基本的制造步骤,1.1.2 节总结 CMOS 工艺流程,1.1.3 节讨论如何将不同的 CMOS 材料和薄层应用于微纳米系统中去,1.1.4 节描述能在标准的 CMOS 工艺中完全制造出来的微系统。

### 1.1.1 基本的微加工步骤

利用 CMOS 或 BiCMOS 工艺的集成电路(ICs)制造是基于以下四个基本的微制造技术:淀积、光刻、掺杂和刻蚀。图 1.3 描述了如何将这些技术结合起来逐层地制成一个 IC:首先在衬底即硅片上淀积一层薄膜,如绝缘二氧化硅膜;然后在薄膜上淀积一层感光性光刻胶,利用光刻技术进行图形转移;最后通过刻蚀工艺将光刻胶上的图形转移到二氧化硅层上。将剩余光刻胶去除之后,再淀积和光刻加工下一层材料,等等。通过离子注入对半导体材料进行掺杂是二极管和晶体管制造的关键步骤,它可以在光刻之后直接进行(也就是将光刻胶层作为掩膜),也可以在刻蚀注入掩膜(例如:二氧化硅层)之后进行。

硅是 IC 制造的标准衬底材料,因此,它通常也是微制造中最常用的衬底材