

微机电系统集成与 封装技术基础

■ 娄文忠 孙运强 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TN405.94

7

2007

微机电系统集成与 封装技术基础

娄文忠 孙运强 编著

机械工业出版社

本书主要介绍微机电系统集成与封装技术。全书包括三个部分,分别为:微机电系统集成技术基础、微机电系统封装技术基础、微机电系统集成与封装的应用。书中系统地叙述了微机电系统集成设计与封装技术的概念、体系结构、典型系统、所用的先进技术以及未来的发展趋势;书中对近年来国外微机电系统集成与封装最新技术动态加以归纳总结,对相关理论、技术进行深刻的阐述与分析。并以大量、详实的案例,在完整的微机电系统集成与封装知识体系下,面向应用,服务社会。

本书可供微电子、微机电系统等领域专业研究人员以及机械、物理和材料方面研究人员参考,亦可作为相关专业高年级本科生、研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

微机电系统集成与封装技术基础/娄文忠,孙运强编著.

—北京:机械工业出版社,2007.3

ISBN 978-7-111-20917-1

I. 微… II. ①娄…②孙… III. 微电子技术-封装工艺

IV. TN405.94

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第023735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:舒雯 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟

封面设计:马精明 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007年3月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·16印张·392千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-20917-1

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

前言

“进入 21 世纪，世界新科技革命发展的势头更加迅猛，正孕育着新的重大突破。信息科技将进一步成为推动经济增长和知识传播应用进程的重要引擎，生命科学和生物技术将进一步对改善和提高人类生活质量发挥关键作用，能源科技将进一步为化解世界性能源和环境问题开辟途径，纳米科技将进一步带来深刻的技术变革，空间科技将进一步促进人类对太空资源的开发和利用，基础研究的重大突破将进一步为人类认知客观规律、推动技术和经济发展展示新的前景。”

——胡锦涛在 2006 年 1 月 9 日在全国科学技术大会上的讲话。

进入 21 世纪，以微米、纳米技术为基础的微系统技术迅猛发展，并逐渐成为信息、生命与生物、能源、空间等高新技术研究的基础。

微系统是由微型机构、微型传感器、微型执行器，以及控制电路、接口、电源等构成的一体化微型器件或系统。它具有成本低、体积小、重量轻、可靠性强、可集成等特点，能够实现较为复杂的系统功能，可批量生产，具有广阔的应用前景。目前，微系统正在逐步形成一个新兴的产业。

广义上的微系统有微电子系统、微机电系统、微光电系统、微流体系统和射频系统等。微系统习惯术语主要有以北美为代表的 MEMS (Micro Electro-Mechanical System, 微机电系统) 或 MOEMS (微光机电系统)，欧洲的 MicroSystems (微系统)，日本的 Micro-Machine (微机械)。本书遵循国内业界惯例，统称为微机电系统。

微机电系统是“接力系统”。通过特征尺度为微米级的机电系统，为信息化数字世界与现实（模拟）世界提供接口，为信息、生物、化学、机械等多领域科技发展提供新的技术平台和研究方法。正是由于能够有效解决微观与宏观世界的互连问题，加之其跨学科、大交叉的特性，微机电系统正在逐步引领现代工业技术的第二次革命。

微机电系统工程包括系统本身以及相关配套设备的设计、制造和封装技术。虽然目前微机电系统在航空航天、国防、通信、生物技术、汽车制造等领域都有应用，但应用的深度和广度都不尽如人意。究其原因，主要是由于缺乏系统集成与封装的应用理论、标准制造流程和工艺，缺乏相关的科技人才，导致集成与封装技术滞后于器件技术的发展，成为制约微机电系统技术转化为现实生产力并且大规模推广应用的主要瓶颈。

微机电系统的发展需要培养创新型复合人才。在过去五年里，国内许多高

校开设了不同类型的微机电系统课程，但尚未开设专门的微机电系统集成与封装课程。同样，许多相关领域的科技人员也对微机电系统集成与封装技术表现出了浓厚的兴趣，希望获得相关的知识和经验。据笔者了解，目前国内外微机电系统教材及参考书目主要以设计理论和基础工艺为主，有关集成与封装的专门书籍，特别是适合国内高校教学及科研人员技术参考的书籍出版甚少，而需求非常迫切。基于上述原因，推动了我们尽早完成此书。

2003—2004年，受 Herbert heichl 教授邀请，笔者赴德国柏林工业大学和弗劳恩霍夫可靠性与微集成研究所（Fraunhofer IZM）学习。身处世界一流的学术团队之中，紧迫感与使命感促使笔者在留学期间，萌发了撰写一本介绍微机电系统集成与封装专业技术书籍的愿望。经过近四年的准备，终于在丁亥新年来临之际，书稿付梓。

本书可作为科研人员的参考用书，也可作为本科高年级或研究生教材。本书共分三篇 13 章，其中第 1、2 篇由北京理工大学宇航科学技术学院娄文忠副教授编写，第 3 篇由中北大学孙运强教授编写，娄文忠负责全书统稿工作。

衷心感谢恩师马宝华教授、谭惠民教授的谆谆教诲，感谢北京理工大学机电工程与控制国家重点实验室石庚辰教授、范宁军教授等同仁的大力支持和帮助。感谢北京理工大学和国家留学基金委的资助。感谢南京理工大学朱军副教授对部分书稿的审核。同时，在本书的撰写过程中，于秀丽博士以及硕士研究生马婷、齐斌、乔杰、李庭伟、李鑫同学做了大量具体烦琐的工作，在此一并致谢。

书中引用了大量国外参考文献，在此对相关文献作者致以诚挚的谢意。

本书成稿有两难：一是该领域发展迅速，学术研究活跃，新技术、新方法不断涌现，难以一言以蔽之；二是国内研究基础薄弱，加之作者才疏学浅，难免有所疏漏。为此，书中谬误之处，祈望国内外同行不吝赐教。

娄文忠

目 录

前言

第 1 篇 微机电系统集成技术基础

第 1 章 引言	1	2.4.2 封装的选择	32
1.1 微系统与微机电系统	1	2.4.3 芯片连接	32
1.2 微机电系统封装的背景	3	2.4.4 电连接和密封	34
1.3 微机电系统集成与封装中 的重要问题	5	2.4.5 封装区域的清洁	34
1.3.1 界面问题	6	2.5 一些特殊的 MEMS 封装问题	35
1.3.2 集成与封装的精度	7	2.6 最新研究热点	35
1.3.3 可靠的拾取工具	7	2.7 小结	38
1.3.4 检测与评价	8	参考文献	38
1.4 MEMS 封装技术	8	第 3 章 微系统热管理技术	39
1.4.1 晶圆切片	8	3.1 热管理的概念	39
1.4.2 互连技术	8	3.2 微系统热管理的重要性	39
1.4.3 密封	14	3.2.1 微系统热管理的紧迫性	39
1.4.4 封装材料	16	3.2.2 微机电系统封装的热耗散	41
1.4.5 MEMS 封装的稳定性 与可靠性	17	3.2.3 温度与失效率	43
1.5 微组装技术	18	3.3 热管理的理论基础	43
1.6 微机电系统封装测试标准	19	3.3.1 热传导	43
1.7 小结	20	3.3.2 对流换热	45
参考文献	20	3.3.3 热辐射	47
第 2 章 微机电系统集成与封装 设计基础	21	3.4 IC 和 PCB 的热模型	49
2.1 封装设计的系统分析	22	3.4.1 IC 板的热模型	49
2.2 微机电系统封装的三个等级	22	3.4.2 PCB 的热模型	50
2.2.1 芯片级封装	23	3.5 热管理技术	51
2.2.2 器件级封装	24	3.5.1 肋片式散热器	51
2.2.3 系统级封装	25	3.5.2 浸没冷却	52
2.3 微机电系统封装的设计 与工艺流程	26	3.5.3 热管	54
2.3.1 微机电系统封装的设计	26	参考文献	57
2.3.2 封装内部的环境控制	30	第 4 章 微机电系统封装主动制冷 与热仿真技术	58
2.3.3 封装流程	31	4.1 主动制冷技术	58
2.4 基本 MEMS 封装过程	32	4.1.1 冷板技术	58
2.4.1 表面微加工	32	4.1.2 热电制冷	59
		4.1.3 微尺度换热器的研究及探讨	63
		4.2 封装热模型的建立	65
		4.3 有限元技术	67

4.3.1 FLOTHERM 软件及仿真实例	69	5.4.2 湿度传感器	90
4.3.2 ANSYS 软件及仿真实例	72	5.5 光学传感器	91
参考文献	78	5.5.1 发光二极管 (LED)	91
第 5 章 微传感器集成封装技术	79	5.5.2 PerkinElmer 红外传感器	92
5.1 微压力传感器	79	5.5.3 PEL 红外传感器微系统	93
5.1.1 KP100 压力传感器	79	5.5.4 英飞凌公司红外传感器 微系统	93
5.1.2 MS5534B 压力传感器	80	5.6 磁传感器	94
5.1.3 MPX4115A 系列压力传感器	81	5.6.1 Pel 电流监控器	95
5.1.4 典型微压力传感器封装特性	82	5.6.2 英飞凌公司差分霍尔 效应传感器	95
5.2 加速度计和陀螺仪	82	5.7 微声传感器	97
5.2.1 加速度计	82	5.8 微流体设备	98
5.2.2 陀螺仪	83	5.8.1 微泵	98
5.3 流量传感器	85	5.8.2 微化学分析系统	99
5.3.1 热流量传感器	85	5.8.3 集成微流体系统互连技术	99
5.3.2 空气流量计	89	参考文献	100
5.4 化学传感器	89		
5.4.1 金属氧化物或半导体氧化物 气体传感器	89		

第 2 篇 微机电系统封装技术

第 6 章 引线键合技术	103	7.1.5 技术成熟度	127
6.1 概述	103	7.1.6 倒装焊简述	127
6.1.1 引线键合过程	103	7.1.7 可靠性	129
6.1.2 引线键合形式	103	7.1.8 检测	129
6.1.3 引线键合技术的发展历史 及应用	104	7.2 技术指导	129
6.1.4 成本	105	7.2.1 使用锡焊倒装焊的设计问题	129
6.1.5 引线键合技术的局限性	105	7.2.2 使用锡焊倒装焊的生产问题	133
6.2 技术特征	105	7.2.3 热压倒装焊的设计问题	134
6.2.1 引线键合技术	105	7.2.4 热压倒装焊的生产问题	135
6.2.2 引线和典型冶金系统	107	7.2.5 热声倒装焊的生产问题	135
6.2.3 焊接设备	109	7.2.6 使用粘结剂的倒装芯片法 的设计问题	136
6.2.4 引线键合基本工艺过程	110	7.2.7 使用粘结剂的倒装芯片法 的生产问题	138
6.2.5 引线键合失效机制	116	7.2.8 环境问题	139
参考文献	120	参考文献	139
第 7 章 倒装芯片技术	125	第 8 章 聚合物键合	141
7.1 倒装芯片技术的介绍	125	8.1 聚合物键合技术	141
7.1.1 使用倒装芯片技术的原因	125	8.1.1 聚合物键合简介	141
7.1.2 倒装芯片技术的主要优点 和缺点	125	8.1.2 粘结剂的选择	142
7.1.3 相关成本的比较	126	8.1.3 导电粘结剂的主要优点 和局限性	142
7.1.4 元件的实用性	126		

8.1.4 导电粘结剂综述	142	9.2.2 生产问题	173
8.1.5 导电粘结剂的基本类型	144	9.3 BGA 封装技术概述	173
8.1.6 开发焊料替代物的主要原因	145	9.4 BGA 技术指导	177
8.2 技术指导	146	9.4.1 技术问题	177
8.2.1 设计和生产问题	146	9.4.2 生产问题	180
8.2.2 导电粘结剂的基本性能	146	参考文献	183
8.2.3 粘结剂性能评估的相关参数	152	第 10 章 多芯片组件 (MCM)	184
8.2.4 刚性 PCB 上的 SMT 粘结剂技术 的发展	155	10.1 MCM 概述	184
8.2.5 可靠性	158	10.1.1 什么是 MCM	184
8.2.6 失效原因	159	10.1.2 MCM 的市场前景	184
8.2.7 内部和外部环境影响	159	10.1.3 技术的选择	185
参考文献	161	10.1.4 基板技术	186
第 9 章 CSP 与 BGA 技术	163	10.1.5 MCM 的组装技术	189
9.1 概述	163	10.1.6 组件封装技术	190
9.1.1 CSP 的定义	163	10.1.7 检测技术	191
9.1.2 CSP 的分类	163	10.1.8 缩略语列表	192
9.1.3 CSP 技术发展的推动力	163	10.2 技术指导	193
9.1.4 CSP 的优缺点	163	10.2.1 MCM-L	193
9.1.5 标准惯例	165	10.2.2 MCM-C	203
9.1.6 成本	166	10.2.3 MCM-D	213
9.2 CSP 技术指导	166	10.2.4 IBM 公司的陶瓷薄膜	217
9.2.1 技术问题	166	参考文献	220

第 3 篇 微机电系统封装的应用

第 11 章 微机电系统封装在生命科学 中的应用	221	11.5.1 生物传感器	227
11.1 概述	221	11.5.2 生物医学传感器	228
11.2 MEMS 在生命科学中的应用	221	11.6 小结	229
11.3 医学应用的封装	222	参考文献	229
11.3.1 一次性的压力转换器	222	第 12 章 微机电系统封装在通信及相关 领域中的应用	230
11.3.2 可深植 MEMS	222	12.1 概述	230
11.3.3 其他医学应用和管理条例	223	12.2 射频封装基础	231
11.4 生物芯片封装	224	12.2.1 RF 概述	231
11.4.1 生物芯片的介绍	224	12.2.2 RF 基础	231
11.4.2 微阵列器件	225	12.2.3 RF 封装	232
11.4.3 成本划分	225	12.2.4 RF 测量技术	233
11.4.4 微流体、化学、电子和光学器 件在芯片上的集成	225	12.3 光电子基础	234
11.4.5 化学特性带来的限制性——材料 和探测方法	226	12.3.1 光学的 MEMS 封装	234
11.5 生物医学传感器和生物传感器	227	12.3.2 光互连系统结构	234
		12.3.3 光学封装实例	235
		12.4 封装仿真	236

参考文献	237	13.2.5 空间和军用微型机器人	241
第 13 章 微机电系统封装在军事上的应用		13.2.6 纳米科技战士	242
及未来发展方向	238	13.2.7 小结	242
13.1 引言	238	13.3 微机电系统封装未来的发展	242
13.2 微机电系统封装在军事		13.3.1 国内发展现状	242
上的应用	238	13.3.2 国外发展现状	243
13.2.1 简介	238	13.3.3 目前存在的问题	244
13.2.2 微纳卫星	239	13.3.4 技术展望	244
13.2.3 微型飞行器	239	参考文献	245
13.2.4 制导弹药	241		

第 1 篇 微机电系统集成技术基础

第 1 章 引 言

1.1 微系统与微机电系统

21 世纪,以微米、纳米技术为代表的“尺度革命”已成为最热点的问题。新材料科学、信息技术与通信技术——技术进步的推动器、能源和环境技术—21 世纪全球面临挑战、生命科学—21 世纪主旋律,它们共同被称为现代人类文明的四大支柱。微系统技术已经渗透到各个领域,成为四大支柱技术基础。在德国弗劳恩霍夫协会主席布凌格(Bullinger)教授 2004 年主编的《未来世界的 100 种变化》一书中,德国科学家预测的未来世界的 100 种变化当中,80% 以上的内容与微系统技术直接相关。信息高速公路的速度一直在不断提高,光纤拉伸、现代高频技术、芯片和处理器已提供了几吉赫(兹)的传输速率,但是这种速率在数据结点上几乎不能实现——无论是个人电脑,还是服务器,都延缓了传输速率。问题在于芯片之间的印制电路板和钎焊连接。尽管现代处理器的时钟频率已达到几吉赫(兹),但在存储芯片和处理器之间的最快电子总线只有几百兆赫(兹)。一个优先有效的替代方案就是光互连。微系统技术可以应用于许多领域,如电信、数据通信、可视化技术和传感技术,其重要性显而易见。

高度集成化、微型化的电磁传感器与传统的条形伸缩测量的传感器相比,具有明显的灵敏度方面的优势。将来研究的重点是将这种传感器集成在微机电系统中,制成微机电应力传感器,以便能通过传感单元、微机械应力传感器和微电子电路的结合来制造新型的传感系统,这样就可以大批量、低成本地进行生产。

生物学的基础研究在很短的时间内就带来了科学的巨大进步。可以说,21 世纪是生物学的世纪,现代分子生物学给我们提供了层层揭开生命秘密的手段,“芯片实验室”(lab-on-chip)则给我们提供了一种很有前途的自动化、非接触操纵细胞的方案。

典型微系统构成如图 1-1 所示。

微系统广义的含义是微电子系统、微机械系统、微光学系统、微流体系统、射频/无线系统的集成。图 1-2 是一个典型的微系统。

微机电系统是继电子技术之后的最新技术热点。微机电系统在国外有不同的定义,在欧洲称为微系统(Microsystems),在美国称为微机电系统(Micro-Electronic-Mechanical System, MEMS),而在日本称为微机械(Micromechanical)。本书为统一标准,遵循读者习惯,统一将广义的微系统命名为微机电系统。

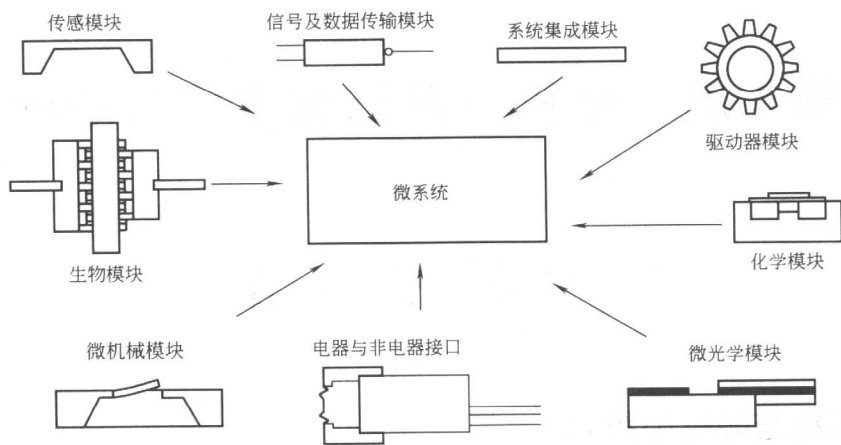


图 1-1 微系统构成

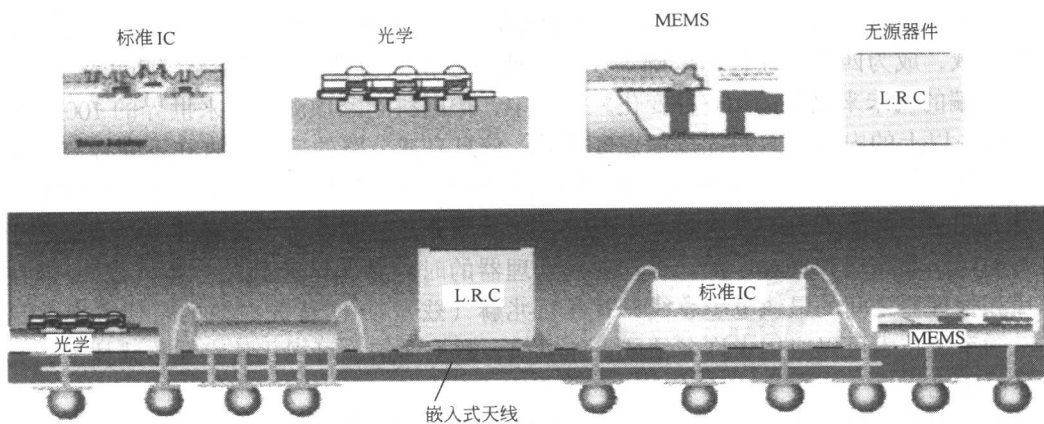


图 1-2 集成 IC、光、微机电、嵌入式天线的微系统

1997 年, NRC 协会发表的“微机电系统”报告中, 提到“测试、封装、界面连接以及组合已成为 MEMS 在商业和军事方面开发和生产的重大障碍”。同年, 美国国家研究委员会将微机电系统的封装范围拓展为“组合、封装与检测”(Assembly, Packaging and Testing, APT), 因此微机电系统的封装准确描述已拓展为微机电系统集成与封装技术。本书统一称集成与封装技术为封装技术。

2004 年统计, 集成与封装占芯片总成本 50% 以上, 微系统集成与封装在全球市场的产值为 1250 亿美元, 从业人员超过一百万, 其中 80% 是微电子系统封装。微机电系统近年呈快速发展趋势。微机电系统封装依托成熟的微电子系统封装理论, 并借助不断涌现的最新工艺与技术, 发展成为机电行业目前最活跃的技术领域。微机电系统通常定义为: 尺寸大小从 $1\mu\text{m}$ 到 1mm , 具有电、机械动作功能的部件和装置。

MEMS 包括微传感器、所有类型的微驱动器和附加集成电路、功能控制系统等, 可以用

来运行复杂的工程功能，但不一定限制在电机机械的自然属性之中。MEMS 技术已经渗透到现代生活每个层面中，而且在未来将会起到更大的作用。

1.2 微机电系统封装的背景

微机电系统（MEMS）是微电子学与微机械学相互融合的产物，它将集成电路制造工艺中的硅微细加工技术和机械工业中的微机械加工技术结合起来，制造出机、电一体，甚至光、机、电一体的新器件。经过十几年的发展，MEMS 器件技术已经相当成熟，但是很多芯片却没有作为产品得到实际应用，其主要原因是没有解决封装问题。事实上只有已封装的 MEMS 器件才能成为产品，才能投入使用，否则只能停留在实验室阶段。

MEMS 封装难度较大。目前 MEMS 封装技术大都是由集成电路封装技术发展和演变而来的，但是与集成电路封装相比有很大的特殊性，不能简单地用集成电路封装技术直接去封装 MEMS 器件。

微系统领域中的许多专家都承认，集成与封装中遇到的问题，是目前将产品成功商业化所要克服的最主要问题。封装已占据了每个 MEMS 系统大部分的制造费，特别是用在高环境应力、温度变化大和恶劣极端环境下的产品封装。有些简单的塑料封装可能会占到总成本的 20%，但精密器件需要的特别封装有时甚至可以占到总制造成本的 95% 之多。能否降低高昂的封装费用，决定了生产商是否能更好地解决成本问题，进而提高产品的市场竞争力。

图 1-3 是一个典型的从芯片设计到封装成产品的过程。

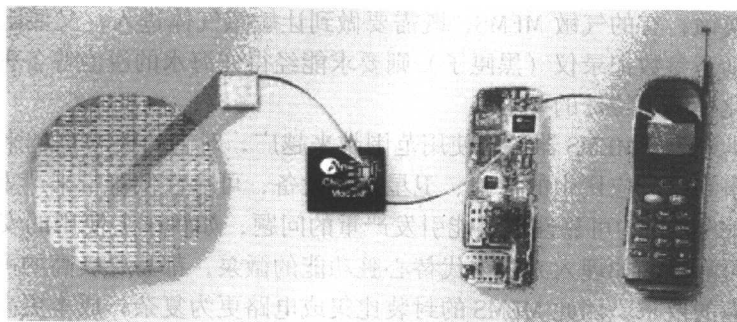


图 1-3 典型的从芯片设计到封装成产品的过程

Tai-Ran Hsu 教授主编的《MEMS Packaging》一书，将造成多数 MEMS 封装价格高的因素总结为以下几点：

(1) 微系统中的部件的体积大部分是小于毫米，甚至微米级的。因此，在如此精细的数量级上，任何复杂几何形态的 MEMS 元件的生产加工都需要特殊的工具和固定物。同样，设计和制造这些所用工具，也需要微系统的技术，而且几乎没有任何先前的知识和经验，可以让工程师在设计和制造中借鉴学习。现在的情况是，大多数的封装和集成都只能在高倍显微镜之下由人工进行。

(2) MEMS 产品多种多样，即使是同类产品的结构也有很大区别，造成了产品和产品之

间封装的巨大差异。举例来说,压力传感器的封装,与在汽车气囊配置系统中使用的加速度传感器就有很大不同,因为后者的封装要满足移动系统密封的需求,而且在恶劣的环境中使用,对封装提出了不同的要求。同样,在微流体和微光学的转换系统中,密封的需求比其他微装置更加严格也更迫切。对许多 MEMS 产品,通常采用真空封装,但按客户需求定制的封装也对新 MEMS 产品的封装造成难度。新的方法和工具的使用都需要很大的人力、财力及技术的投入。

(3) 元件的微小尺寸在封装和集成中产生许多特殊的问题。许多加工过程中采用了特殊的物理化学方式,这些方式常常造成精细部分不良效果,例如静摩擦、扭曲和分层。在可靠性要求方面,也缺乏标准。因此,集成过程只能由手工完成。缺乏精密的拾取工具,使小批量产品自动化集成很难实现。同样, MEMS 在功能和可靠性测试中出现的问题,又加大了产品的封装费用。

(4) IC 芯片是用平面工艺完成的,加工好的芯片本身是一个“实体”。除了金属、陶瓷管壳封装外,对于塑封的集成电路,即使引线键合时有几十、几百根引线是悬空的,经过塑封后,管芯、引线和引线框架都被环氧树脂固化成一个整体。MEMS 则完全不同,有的带有腔体,有的带有悬梁。这些微机械结构的尺寸很小,强度极低,容易因机械接触而损坏或因暴露而被污染,特别是单面加工的器件,是在很薄的薄膜上批量加工的,结构的强度更低,它能承受的机械强度远远小于 IC 芯片。

(5) 封装的一个重要作用就是保护芯片,而很多情况下需要腔体开口的 MEMS 封装,面临一个如何保护芯片的问题,外界环境因素对器件的影响十分明显。有的 MEMS 器件甚至要直接用于腐蚀性环境,如用于医学的 MEMS 器件,要进入人体这个酸性环境,它就需要特殊的保护以抗酸性腐蚀;有的气敏 MEMS,既需要做到让敏感气体进入,又要阻止有害气体的侵蚀;飞机上的动态参数记录仪(黑匣子)则要求能经得住海水的浸泡等各种恶劣环境。这些都对芯片的钝化提出了特殊的要求。

(6) 随着技术进步, MEMS 器件的使用范围越来越广,对它的要求也越来越高,尤其是可靠性。例如军事和航天应用中的导弹、卫星携带设备,可靠性低将带来严重的后果。即使在民用方面, MEMS 器件的可靠性也可能引发严重的问题,如轿车上使用的气囊压力传感器,必须十分可靠;又如埋入人体内代替心脏功能的微泵,都需要极高的可靠性。这些都对封装提出了更高的要求。因此 MEMS 的封装比集成电路更为复杂,成本更高。此外,必须在芯片设计阶段同时考虑其封装问题。如果在 MEMS 芯片做好后再考虑如何封装,必将加大成本,甚至不能达到预期目标。

(7) 大多数 MEMS 器件的外壳上需要有非电信号的通路,所以不能简单地把 MEMS 芯片密封在封装体里,必须留有同外界直接相连的通道,用来传递光、热、力等物理信息。对这种 MEMS 封装,不同的器件需要具有不同的与外界连通特性的外壳,因此对外壳材料本身也有要求。像磁敏 MEMS 器件,虽然可以密封在管壳里,但是它要求外壳必须是非导磁材料,常见的用铁镍合金作为引线框架的管壳就不能使用;像微麦克风 MEMS 器件,则要求外壳既有开口,可以接受外界的声音,又能屏蔽电磁干扰信号,以避免其对微弱的麦克风输出信号的干扰,普通的塑料封装就不适用。

微机电系统封装技术目前虽然主要借助集成电路封装技术,但两种技术有着根本的差别,具体比较见表 1-1。

表 1-1 微机电系统和集成电路的比较

微机电系统(以硅为基础的)	集成电路
三维结构	二维结构
多数系统含可动的固体或液体	固定的薄固体
需要精细构造的连接与定位	无需很精细的连接与定位
多样性功能:生物的、化学的、光学的、电子和机械学的许多部件	满足特定的电功能即可
需要与外界环境发生接触	与外界环境隔离
使用材料多样性,包括单晶硅、硅的混合物、GaAs、石英、金属	比较少的材料,包括单晶硅、硅混合物、塑料和陶瓷
许多元件需要装配到一起	集成比较少的元件
相对在基板上的式样较简单	复杂的高密度元件基板
比较少的电气通孔与回路	大量的电气通孔与回路
工程上缺乏设计方法学 and 标准	已确立设计方法学 and 标准
封装技术处于开始阶段	成熟的封装技术
手工集成	自动化集成
稳定性差,测试标准相对缺乏	成熟的标准和程序
制造业基础差	制造业技术非常成熟
在设计、封装和测试中没有工业标准	整个流程已确立成熟的设计方法和标准

欧美发达国家在 20 世纪 80 年代末，系统地推出微电子封装理论，各顶尖大学迅速开设了相关课程。进入 21 世纪，又推出微系统封装理论，全球范围内建立了数十个顶尖微系统封装研究中心。目前欧美发达国家与地区，在微机电系统方面已形成庞大的产业链，微机电产品已成功地大量运用在汽车、消费电子、医学及生物工程、国防等领域，而我国仍处在实验室摸索阶段。

虽然我国目前具备一定的芯片设计及加工能力，但一直没有掌握最新的集成及封装技术，没有系统的人才培养体系与可用教材。但据专家预计，到 2010 年我国在该领域的产值将可能达到 200 亿美元。

1.3 微机电系统集成与封装中的重要问题

集成与封装后的微机电系统是用户可以直接使用的产品，其内部结构很复杂，但对用户而言，只需了解其特性即可。集成与封装后的典型微机电系统如图 1-4 所示。

集成与封装对微机电系统有四大基本职能，分别为供电、热管理、信号传递与保护。

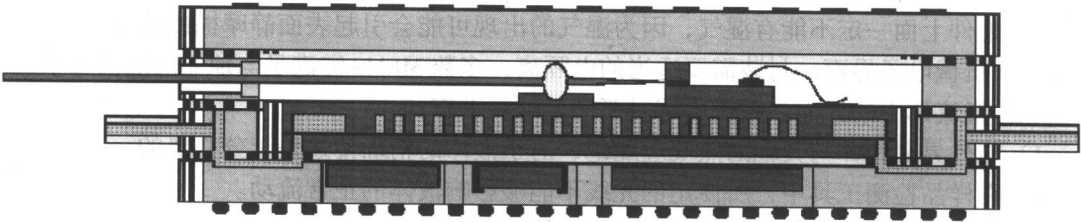


图 1-4 集成与封装后的典型微机电系统

在微机电系统集成与封装方面，目前主要需要解决的问题有以下四个方面。

1.3.1 界面问题

界面的问题是从 1997 年开始被大家逐渐关注的。MEMS 中的部件与外界经常发生接触，特别是恶劣环境，因此也就将 MEMS 和普通集成电路的封装区别开来。普通集成电路的信号界面较单一，通常只有电信号，所以一般情况下，芯片本身都密封在封装体里，封装的作用主要就是保护芯片和完成电气互连。MEMS 的输入信号界面复杂，它的输入信号有电信号；根据芯片作用的不同，也有光信号（光电探测器）、磁信号（磁敏器件）；还有机械力的大小（压力传感器）、温度的高低（温度传感器）、气体的成分（敏感气体探测器）等。这种复杂的信号界面给封装带来很大的难度。微机电系统界面设计如图 1-5 所示。

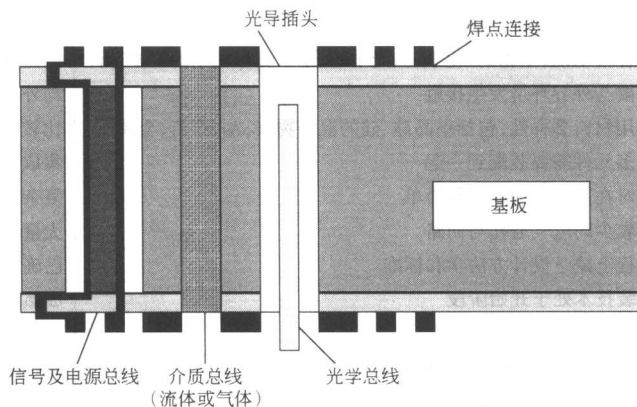


图 1-5 微机电系统界面设计

主要界面问题包括：

(1) 生物医学界面。系统一定要和它工作所在的人体系统和谐共存，不产生负面反应。要满足的要求有：

- 1) 封装在使用期间要具有良好的化学惰性，防止与外界发生反应。
- 2) 如果是生物传感器，那么它不能和其他生物性细胞发生反应，例如心律调整器不能造成生物机体的损害。
- 3) 不能引起不必要的化学药品（例如腐蚀体液、伤口上的薄纱织品和细胞）发生反应。许多生物医学的装置和系统都需要得到政府的许可。

(2) 光学界面。系统应用时要满足的要求有：

1) 光线的适当通道，例如光纤在光 MEMS 中常常用来当作光导管，在这样的情况下，这些导管的封装和与外界隔离的问题就变得很重要。

2) 光界面上所用到的涂料必须具有高效率和良好的反射光能力。

3) 表面的涂料质量在整个工作时间内要保持质量不变。

4) 表面一定不能有外界的污染物质。

5) 附件上面一定不能有湿气，因为湿气的出现可能会引起表面静摩擦的改变。

(3) 机械电子界面。封装需要适当的电隔离，多数 MEMS 需满足与地面的隔离要求。

(4) 微流体中的界面。系统应用时要满足的要求有：

- 1) 与外界隔绝并与其他的热反应隔绝，对于液体的精确传送是十分必要的。
- 2) 在样品检测工具中，所使用的光线不能够影响液体的正常流动。
- 3) 微通道的材料要保证不与通道中的液体反应。
- 4) 微通道和外界环境之间的密封要处于最佳状态。

5) 在管壁中流动的液体, 要做好电隔离工作, 以避免发生短路或出现带离子的液体。

(5) 恶劣环境界面。有时候, 微系统中精密的部件在和外界环境接触时, 看起来并不会产生某些不良后果, 但实际上则不然。举例来说, 在真空封闭封装中的连接剂在封装完成后, 会逐渐释放气体。这些气体有可能渗入到封装内部, 引起封装部件的腐蚀。在宇宙中使用的微系统, 大量的宇宙微粒和离子会对部件造成严重损害。在某些情况下, 封装设计还要考虑外界环境可能引起的强烈振动和剧烈的温度变化, 以及氧气等气体的腐蚀。

1.3.2 集成与封装的精度

通常在工程中, 要连接和装配的产品都要考虑精度问题。高精度对于封装和集成不但是重要的, 而且是必需的。差的精度有可能导致部件不适应外界的压力, 结果使连接处在受到过度压力后造成永久性失效。另外, 过高的精度要求会给加工与装配带来困难。因此, 对于微加工, 适当的精度是很重要的。

通常 MEMS 技术的精度分为三种类型, 分别是空间精度、几何精度、对准精度。空间精度是在制造方面允许的线性尺寸的精度, 空间精度表面上是系统整个精度中很小的一部分, 实际上并非如此。因为 MEMS 产品的尺寸仅仅是微米量级的, 所以任何微小的偏差都是不允许的。对于微小系统, 如何设定适当的空间精度已成为业界一个非常棘手的问题, 其重要性不亚于整个 MEMS 的功能和结构完整性。但是, 现在与空间精度相关的信息与经验是非常短缺的。典型微细加工过程的尺寸精度如表 1-2 所示。

表 1-2 典型微细加工过程的尺寸精度

微制作工艺过程	材 料	最小/最大尺寸	尺寸精度/ μm
湿法各向异性刻蚀	硅、砷化镓、石英、碳化硅、磷化铟	微米级/芯片最大尺寸	1.0
干法蚀刻	硅、砷化镓、石英、碳化硅、磷化铟	亚微米级/芯片最大尺寸	0.1
多晶硅表面微细加工	多晶硅、铝、钛	亚微米级/芯片最大尺寸	0.5
硅绝缘体	硅晶体	亚微米级/芯片最大尺寸	0.1
LIGA 工艺	镍、聚甲基丙烯酸甲酯、金、陶瓷等	$02\mu\text{m}/10 \times 10\text{cm}$ (或更大)	0.3

另外, 几何精度和对准精度, 对于 MEMS 的封装和集成也是很重要的, 微加工工艺和微产品的类型都会影响到这两种精度。

对准精度在封装微光学 MEMS 方面是最重要的。来自输入光纤的光束, 一定要恰当地对准转换部件(镜子或透镜), 使其才能折射到目标光纤。

1.3.3 可靠的拾取工具

MEMS 封装需要将微小部分拾取, 放在需要的位置上。大部分封装工作是在高倍显微镜之下进行的人工操作。在封装过程中, 狭小的工作区域只允许极小的操作间距, 常常在毫米范围内, 因此无法使用自动化的拾取工具。另外一个主要问题是用于拾取操作的许多微夹子会产生抓紧摩擦力, 摩擦力主要由静电和范德华力引起。这些特殊的问题使得实现拾取自动化非常困难。

1.3.4 检测与评价

由于 MEMS 和微系统加工生产和封装过程中,不可避免地会出现许多不确定性因素,因此产品的测试与评估就显得相当的重要。然而,由于 MEMS 和微系统高度的多样性,大多数的测试都是要基于客户要求定制的,因此并没有一个统一的测试稳定性的标准。

1.4 MEMS 封装技术

由于 MEMS 的封装和集成在整个产品中所扮演的重要角色,越来越被人们所重视,这个领域也吸引了越来越多研究者的兴趣。许多新的封装技术近几年来一直不断发展。MEMS 封装的主要过程如图 1-6 所示。



图 1-6 MEMS 封装的主要过程

1.4.1 晶圆切片

MEMS 系统首先放在透明的遮光板上或使用影印石版技术永久地印在晶圆表面上。这些晶圆,无论它们上面是相同的单元(如图 1-7a 所示),或在一片晶圆上生产不同的单元(如图 1-7b 所示),都需要切割成独立的小块,这个过程叫做晶圆切片。

由钻石-树脂或钻石-镍合成物制作的锯齿刀用来切割晶圆。晶圆压在有粘性的带子上,沿着点线切割,相邻 $50\mu\text{m}$ 的距离使用厚度为 $20\mu\text{m}$ 的锯齿刀。

1.4.2 互连技术

互连技术在微机电系统封装技术中占有重要的位置。尽管微机电系统的元件和微电子元件在作为单独的元件时,技术上并不兼容,但通过封装和互连技术可以将它们组合在一起。数十年来,微机电系统封装技术一直随着 IC 技术的发展而前进,表面安装技术(SMT)的发展则更加促进了微机电系统封装技术不断达到新的水平。20 世纪 60 年代,中小规模 IC 曾