

半导体科学与技术丛书

微机电系统设计

——建模、仿真与可视化

卢桂章 赵 新 著



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

微机电系统设计

——建模、仿真与可视化

卢桂章 赵 新 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书建立了一种微电子机械器件的设计方法,对现有设计系统功能作了一些重要的补充和完善,其基本思路是在设计阶段,当版图和工艺设计完成后,通过建立运动部件的动态模型,进行三维可视化仿真,形成器件在虚拟环境中运行,从而对器件的运动功能进行评测。这种功能主要体现在:应用三维可视化技术得到器件加工后的三维实体模型和进行可加工性验证;对此实体模型进行动态建模,并进行虚拟运行,以考察其运动性能;建立基于IP库的设计系统,提供了一种自顶向下和自底向上相结合的设计手段。系统是开放的,各种功能都有延伸发展的空间。

本书可供微电子机械设计人员参考使用,也可作为相关专业高年级本科生和研究生的专业课教材和学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微机电系统设计:建模、仿真与可视化/卢桂章,赵新著. —北京:科学出版社,2010

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-029220-9

I. 微… II. ①卢… ②赵… III. 微电机-系统设计 IV. TM380.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 199127 号

责任编辑:张 静 于宏丽/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年10月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年10月第一次印刷 印张: 18 1/4

印数: 1—2 500 字数: 350 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我国国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业作出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

前 言

微电子技术已经是当今科技发展的重要的核心技术,由此而生的集成电路(IC)已经是无人不晓,无处不在,无所不能的标志性技术。1987年伯克利加州大学的科学家研制成功了基于表面牺牲层技术的转子直径为 $60\sim 100\mu\text{m}$ 的硅静电马达,使人们看到了如何用大机器制造小机器的奇妙天地,微电子机械系统(MEMS)这一充满了活力的新技术方向也就应运而生,成为21世纪的关键技术。

MEMS虽然也是用硅微电子工艺制作,但它与IC却有着许多重要不同:MEMS的结构是三维的,而集成电路是平面结构的;MEMS有机械运动功能,所以MEMS在运行中,它的某些部件是要产生形变的,而集成电路则没有;对MEMS运动的分析是多个物理过程(电、热、力、磁……)的综合,而集成电路主要是电的过程。

由于以上原因, MEMS的设计就产生了一些在IC设计中没有的新问题,主要问题之一是在设计中如何对器件的运动功能进行评测。IC设计已有非常完善的各层次的仿真工具,但还缺乏对由于变形而形成的运动功能的仿真。问题之二是所设计的器件经加工后,是否能准确地保持设计的三维形状(因为器件有运动功能,形状的小改变就有可能产生重大影响),这也是MEMS设计者关心的新问题。MEMS器件涉及多能域的耦合和转换又是另一个IC设计中没有的新问题,等等。本书的内容主要就是围绕这些问题展开的。

如何对MEMS器件的机械运动进行仿真?这是MEMS设计系统要解决的核心问题之一。由于是在设计阶段进行仿真,并不能直接考察实际器件的运行。因此,必须构筑一个器件能“运行”的虚拟环境,建立描述所设计器件机械运动(当然也包含由此带来的电、热、光、磁等多能域的运动)的数学模型,建模是对器件性能进行评测的基础。被设计的器件用描述它的运动的动态模型的解随时间的演化来表征它的状态,这种状态(动态模型的解)用三维可视化技术,表现出器件的运动,就可以使器件在虚拟环境中“运行”起来,这个仿真过程称为“虚拟运行”。

根据设计好的版图和工艺文件去进行器件加工,加工出来的器件和所设计的器件是否一致?设计者希望能在实际加工前就能有一个比较清楚的了解。虚拟工艺就是实现这一目标的工具,虚拟工艺就是以设计出来的版图和工艺文件作为输入,输出则是加工出来的器件的可视化三维实体形状。由于每条加工线对结果的影响是不一样的,所以任何一个虚拟工艺系统都是针对一个特定的工艺流程。为了使虚拟工艺的结果能尽可能接近真实情形,就需要积累有关该工艺流程多种工艺处理结果的数据,归纳成专家知识,在此基础上建立专家系统,通过专家系统的推理机

制结合图形学的工具来产生“虚拟”的器件三维结构图形,这就是建立虚拟工艺的技术路线。虚拟工艺还将进行设计器件可加工性检查,这将使设计的成功率大为提高。对设计出来的器件(或它的一部分结构)通过虚拟工艺得到它的三维实体形状,再经过评测,如果它的性能符合设计要求,就在下一步的设计中将它作为 IP 模块来应用,这样就可以用最简便的方式和最短的时间弥补 IP 模块的不足。这对推进 MEMS 的发展无疑是有重要意义。

以上内容都是作者的科研团队多年来工作的积累,从 1994 年参加国家攀登计划“微电子机械系统”项目开始,随后又在“973”计划、“863”计划、国家自然科学基金等的支持下持续地进行研究,至今已有 15 个年头了。MEMS 技术的飞速发展给了我们持续的动力,国内外同行间有益的切磋也给我们很有力的支持和帮助。多年来,我们的研究生们做了大量的实际工作,这些工作是技术积累最肥沃的土壤,本书中不少内容都采自他们的学位论文,比较重要的论文都在绪论的参考文献中列出。这些研究生包括:谭宜勇、孙广毅、王凯、王磊、李亚威、任亮、金桐、何维玮等,现在学的研究生李毅堂、张鹏鹏、李欣、郭春艳在内容的补充和书稿的整理、排版工作中也做了很多有益的工作。

在最初参加攀登计划时,我们的工作刚刚开始,一些概念也还在形成中,首席科学家、上海冶金研究所(现在的中国科学院上海微系统与信息技术研究所)的王渭源先生给了许多支持和帮助,王先生已经离我们而去了,这本书稿的完成也算是对王先生的一点怀念。

最后还要感谢丛书的主编和科学出版社,以及本书的责任编辑张静女士,没有他们的鼓励和大力支持,书稿是很难完成的。

作 者

2010 年 4 月于南开大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 MEMS 发展历史的简要回顾	2
1.2 MEMS 应用一瞥	3
1.2.1 传感微系统	4
1.2.2 微执行器	4
1.2.3 信息微系统	4
1.2.4 生物微系统	5
1.2.5 军事用 MEMS 器件	5
1.3 MEMS 设计现状概述	5
1.3.1 系统级仿真	7
1.3.2 器件级仿真	7
1.3.3 工艺级仿真	8
1.4 当前 MEMS 设计存在的问题及其解决途径	8
1.4.1 MEMS 与 IC 的差别及其对设计的影响	9
1.4.2 动态性能的建模仿真与虚拟运行	9
1.4.3 IP 库与虚拟工艺	10
1.4.4 关于设计方法学的一些思考	11
参考文献	13
第 2 章 微机电系统工艺级仿真 —— 虚拟工艺技术	14
2.1 虚拟工艺的一般概念	14
2.1.1 MEMS 的工艺仿真	14
2.1.2 什么是虚拟工艺	15
2.1.3 虚拟工艺的两种技术路线	16
2.2 微机电系统制造工艺	16
2.2.1 光刻	17
2.2.2 表面硅工艺	19
2.2.3 体硅工艺	20
2.2.4 键合工艺	23

2.2.5	LIGA 工艺	23
2.2.6	其他工艺	24
2.3	基于专家知识的工艺流程仿真	24
2.3.1	基于体块模型的虚拟工艺	24
2.3.2	基于体素 (voxel) 模型的虚拟工艺	37
2.4	基于物理模型的 MEMS 工艺仿真	56
2.4.1	投影式光学光刻工艺仿真	57
2.4.2	DRIE 工艺仿真	62
2.5	小结	72
	参考文献	73
第 3 章	微机电系统的行为级仿真建模方法	76
3.1	基于机理的动态模型建模方法	77
3.1.1	微悬臂梁动力学模型	77
3.1.2	微加速度计的动态模型	81
3.1.3	微马达的动态模型	85
3.2	基于系统辨识的动态模型建模方法	88
3.2.1	基于系统辨识的建模方法	89
3.2.2	基于系统辨识的建模方法的实施过程	90
3.3	MEMS 器件动态模型建模实例	92
3.3.1	电容式微加速度计的动态模型	92
3.3.2	微流量泵的动态模型	98
3.4	基于标准等效结构的建模方法	107
3.4.1	基本思路和一些概念	108
3.4.2	等效到机械域的等效结构建模方法	109
3.5	电路标准等效模型的建模与仿真方法	119
3.5.1	基本思路和一些概念	120
3.5.2	标准等效结构模型	121
3.5.3	静电换能器模型	124
3.6	采用 VHDLAMS 语言的建模与仿真方法	132
3.6.1	VHDLAMS 建模方法	132
3.6.2	微加速度计的 VHDLAMS 语言建模与仿真	134
3.7	小结	138
	参考文献	140
第 4 章	微机电系统的虚拟运行	142
4.1	虚拟运行的实现框架	142

4.1.1	什么是虚拟运行	142
4.1.2	虚拟运行的入口 —— 虚拟组装	143
4.1.3	虚拟运行的流程	144
4.1.4	动态模型求解	145
4.1.5	三维可视化技术	150
4.2	虚拟运行实例	152
4.2.1	微悬臂梁机理模型求解与虚拟运行	152
4.2.2	微马达机理模型数值解与虚拟运行	161
4.2.3	微流量泵的模型与虚拟运行	163
4.3	小结	170
	参考文献	171
第 5 章	基于 IP 库的 MEMS 设计系统	172
5.1	基于 IP 库的 MEMS 设计方法	173
5.1.1	IP 库的概念	173
5.1.2	基于 IP 库的 MEMS 设计流程	175
5.2	可视化建模方法 —— 虚拟组装	179
5.2.1	虚拟组装的基本流程	179
5.2.2	基于节点分析法的虚拟组装	181
5.2.3	基于节点分析法的虚拟组装的实现	190
5.3	基于 IP 库的 MEMS 设计系统的形式化描述	195
5.3.1	IP 库的形式化描述	195
5.3.2	系统功能形式化描述	197
5.3.3	设计系统的形式化描述	199
5.4	基于 IP 库的 MEMS 设计系统实现	202
5.4.1	基于 IP 库的 MEMS 设计系统的总体框架	203
5.4.2	IP 模块及 IP 库的实现	203
5.4.3	微泵设计过程的实现	208
5.4.4	基于 IP 库的 MEMS 设计系统的器件设计	215
5.5	小结	221
	参考文献	221
第 6 章	MEMS 器件设计案例	222
6.1	微镜光开关的设计	222
6.1.1	微镜光开关的总体设计	222
6.1.2	静电驱动光开关模型	223

6.1.3	光开关结构模态分析	226
6.1.4	光开关虚拟运行	226
6.1.5	虚拟工艺	226
6.2	硅微加速度计的设计	229
6.2.1	硅微加速度计概述	229
6.2.2	电容式微加速度计结构设计与分析	230
6.2.3	双端四梁微加速度计的虚拟工艺仿真	236
6.2.4	双端四梁微加速度计的虚拟组装	240
6.2.5	双端四梁微加速度计的虚拟运行	242
6.2.6	加工结果及机械性能检验	245
6.2.7	封装及电路测试	252
6.3	静电驱动式微夹钳的设计	252
6.3.1	静电驱动式微夹钳概述	253
6.3.2	静电驱动式微夹钳结构设计与分析	254
6.3.3	虚拟工艺仿真	260
6.3.4	基于机械域等效结构的虚拟组装	264
6.3.5	基于电域的基本等效结构模型的虚拟运行	266
6.3.6	实际加工结果及其精度验证	272
6.4	小结	277
	参考文献	278
	《半导体科学与技术丛书》已出版书目	279

第1章 绪 论

1959年12月,在加州理工学院的物理年会上,著名的物理学家 R. P. Feynman 做了一个富有想象力和前瞻性的报告“底层有广阔的空间”(there's plenty of room at the bottom),预言系统的微型化将具有广阔的发展空间和重要意义,从而揭开了人们认识和掌握微纳米科技的序幕^[1]。在此后的几十年,随着微观测量和操纵技术的不断进步, Feynman 的预言正在逐步成为现实,其微制造和微机械等方面的思想引发了一场微型化的革命^[2]。一方面人们利用物理化学方法将原子和分子重组,形成具有一定功能的微纳米结构;另一方面人们利用精细加工手段加工出微纳米级结构。前者导致了纳米生物学、纳米化学等边缘学科的产生;后者则在小型机械制造领域开始了一场新的革命,导致了微电子机械系统 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 的诞生^[3]。

微电子机械系统 (MEMS) 是在微电子技术的基础上发展起来的,采用了硅微加工、LIGA(德文 lithographie galvanformung und abformung 的缩写,即光刻-电镀-模铸)技术和精密机械加工等多种微加工技术,是可以批量制作的,集微型传感器、微型机构、微型执行器以及信号处理和控制电路、接口、通信等于一体的微型器件或微型系统,它包括感知和控制外界信息(力、热、光、生、磁、化等)的传感器和执行器,以及进行信号处理 and 控制的电路。

微电子机械系统是一个综合系统,它涉及机械、电子、化学、物理、光学、生物、材料以及电路和控制等多种学科的交叉融合以及新原理和新结构的探索等,是近年来发展起来的一种多学科交叉的新型技术。对这一新兴领域,各国的学者使用不同的术语来表述。在美国,微电子机械系统建立在半导体技术基础上,称为 MEMS,顾名思义,就是由微机械和微电子电路组成的系统;在日本,具有精密机械加工的传统优势,通常称之为微机械 (micro machine);在更强调系统概念的欧洲,称之为微系统 (microsystems);国内一般称为微电子机械系统或微机电系统 (MEMS)^[3]。它们都以微小 (micro) 为特征,有的强调机械,有的强调系统,但当前人们常不加区别地统称为 MEMS^[4]。

如今, MEMS 技术是建立在微纳米技术 (micro/nanotechnology) 基础上的 21 世纪前沿技术,是对微纳米材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术。它可将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成成为一个整体的微型系统。这种 MEMS 不仅能够采集、处理与发送信息或指令,还能够按照所获取的信息自主地或根据外部的指令采取行动。它用微电子技术和微加工技术(包括体硅微加工、表面

硅微加工、LIGA 相结合的制造工艺), 制造出各种性能优异、价格低廉、微型化的传感器、执行器、驱动器和微系统。MEMS 以其微型化的优势, 在汽车、电子、家电、机电等行业以及军事和生物医学领域有着极其广阔的应用前景, 将是未来的主导产业之一。

1.1 MEMS 发展历史的简要回顾

回顾 MEMS 的发展历程, 它的技术基础最早可以追溯到 19 世纪, 照相制版技术衍生出了光刻技术。20 世纪 60 年代, 美国相继开发了结晶异方向腐蚀、杂质浓度依存性腐蚀、阳极键合等基本微加工技术。1954 年 C.S.Smith 研究发现了半导体材料硅、锗的压阻效应, 从此开始用硅制造压力传感器。进入 70 年代, 已经有人利用硅平面加工技术制造微梁和压力传感器。到了 80 年代, 硅传感器有了很大发展, 同时利用微加工技术 (micro-machining) 制作出了多种微小尺寸的机械零部件。

1987 年美国加州大学伯克利分校^[5] 研制了基于表面牺牲层技术的, 转子直径为 $60\sim 100\mu\text{m}$ 的硅静电微马达 (见图 1.1.1), 这是最早的、标志性的 MEMS 器件, 引起了国际学术界的轰动, 推动了微电子机械系统的研究热潮。由此, 人们看到了电路与执行部件集成制作的可能性, 从而形成了 MEMS 的核心技术思想。同年, 美国的一些著名大学和企业及美国国家基金会 (NSF) 的 15 名科学家向美国政府提出了“小机器、大机遇, 关于新兴领域——微动力学 (微系统)”的建议书。美国国家基金会于 1989 年召开了研讨会, 其中有报告提出了“微电子技术应用于电机系统”。自此, MEMS 一词就逐渐成为一个国际通用的学术用语, MEMS 作为一门新兴技术也开始受到世界各国的广泛重视。

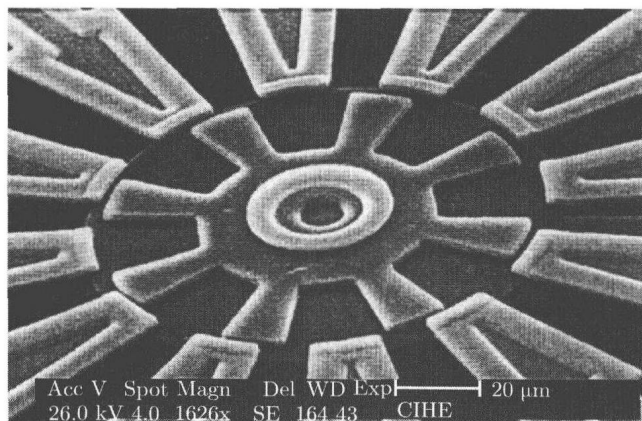


图 1.1.1 多晶硅静电微马达

1993 年, 美国 ADI 公司采用 MEMS 技术成功地将微型加速度计商业化, 广泛

应用于汽车防撞安全气囊, 是 MEMS 技术走向商业化的标志。

在一些科技发达的国家, 不只是大学和研究所参与研究微机械, 企业部门也投资参与或组成联合体投资 MEMS 研究。他们对将会影响 21 世纪社会经济发展和国家防务的 MEMS 的发展十分重视, 在原来将传感器列为优先发展的关键技术基础上, 又制定了继续把 MEMS 作为关键技术发展的政策。迄今为止, 已研究出几百种 MEMS 产品, 其中微电子传感器占大部分。美国国会把 MEMS 作为 21 世纪重点发展的学科之一。日本在 MEMS 方面的研究虽然起步晚于美国, 但目前注重程度和投资强度均很大。德国创建了 LIGA 工艺技术, 可制造深宽比大于 200 的三维立体结构, 并可实现大批量生产。西欧和加拿大等国家也相继投资进行 MEMS 研究。

国内在 20 世纪 90 年代初就已将 MEMS 列入攀登计划得到国家的支持。在“八五”和“九五”期间, 国家有关部门先后在该领域投入了大量的经费, 扶持了一批重点 MEMS 项目。经过十余年的发展, 我国在多种微型传感器、微型执行器和若干微系统样机等方面已有一定的基础和技术储备^[6], 已有一批高等院校和研究院所开展了此项研究。在 2003 年 3 月出台的国家“十五”、“863”先进制造与自动化技术领域 MEMS 重大专项课题申请指南中指出了我国在 MEMS 领域的指导方针和原则: 针对国际 MEMS 发展趋势和未来的产业化前景, 结合国家竞争前沿核心技术的发展战略, 围绕生物化学分析、工业自动化、信息技术等行业的的社会经济发展需要, 以发展我国 MEMS 产业化基础的关键技术作为切入点, 通过 MEMS 相关的设计、加工、测试、封装、装配和系统集成等方面的具有自主知识产权的理论方法和关键技术的掌握, 开发出若干成批量、多品种、高质量的 MEMS 器件及系统, 逐步建立起我国 MEMS 研发体系和产业化基地, 提高我国在 MEMS 领域的核心竞争力, 为推动 MEMS 的可持续发展和产业化打下良好的基础, 并在某些方面进入国际领先水平。这是发展 MEMS 技术的指导战略。经过调整后的重大专项主要研究的三个领域分别是 MEMS 设计方法、MEMS 制造技术和 MEMS 器件及微系统^[6]。

1.2 MEMS 应用一瞥

美国国家关键技术计划把“微米级和纳米级制造”列为“在经济繁荣和国防安全两方面都至关重要的技术”。MEMS 技术有着广泛的应用前景, 当前, 多种重要的成功应用正显现出勃勃生机, 呈现出高技术发展的强劲势头。MEMS 的应用已渗透到各个技术领域。

MEMS 的器件研究主要集中在传感器、光学 MEMS、射频 MEMS、微流体与生物 MEMS 等多个方面^[7]。人们不仅要开发制造 MEMS 的各种技术, 更重要的是要将制成的 MEMS 器件用于实际系统中, 并从中受益。目前可以预见的应用领域

十分广泛,其中包括汽车、航空航天、信息通信、生物化学、医疗、自动控制、消费品及国防安全等。

1.2.1 传感微系统

MEMS 微传感器是微系统的重要组成部分,如压力传感器,生物传感器,化学传感器 (pH 值, 气体等), 温度、磁场、光强等传感器和流量计、加速度计等, 很多已经实用化, 成为了最基本的电子元器件, 并广泛应用于军事、航天、生命科学等等, 并逐渐地渗入人们的生活。这些器件有的与 IC 集成在一起, 形成灵巧传感器 (smart-sensor), 朝着集成化、智能化、网络化方向发展。ADI 公司早在 1991 年就推出了首款基于 MEMS 技术的完全集成的单片加速度计 ADXL50^[7], 产品化后大量用于汽车防撞气囊中。器件的核心部分质量块与平衡式电容器由多晶硅组成, 用表面微加工技术制造。该器件工作量程达 50g, 电源电压为 5V, 芯片尺寸为 3mm×3mm, 封装在 TO-100 管壳内, 售价仅为几美元。图 1.2.1 所示是 ADI 公司最早商品化的微加速度计, 大小不超过 1cm²(图 1.2.1(a)), 深度不超过 60μm(图 1.2.1(b))。

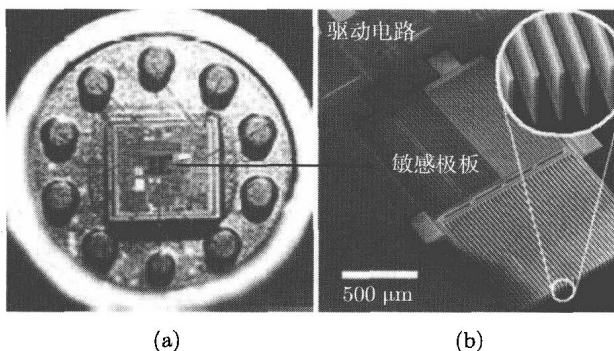


图 1.2.1 最早商品化的微加速度计 (1991年, ADI 公司)

1.2.2 微执行器

微执行器是 MEMS 器件中的执行机构, 完全是为了执行某种操作需要而设计的, 例如, 微泵、微马达、微麦克风、光开关、微喷嘴、微阀等, 微管道和微泵已组成微化学分析系统和 DNA 反应室。此外, 微小型机动车, 乃至磁场中可以飞行的小蝴蝶等系统在实验室中也已研制成功。目前已形成产业的微执行器主要有微加速度计、微陀螺和微数字转镜器件阵列 (DMD) 等。

1.2.3 信息微系统

通信技术是信息技术的重要领域, 目前的发展重点是移动通信和光通信。未来的发展方向是全光通信, 实现光纤进家, 基于 MEMS 技术制作的微型光开关正是

实现全光通信的核心器件。信息 MEMS 的研究范围包括一切可以用 MEMS 技术制作的 RF 器件和光学器件, 这些器件可以取代现代信息领域中所采用的庞大的 RF 器件和光学器件, 实现系统的微小型化和性能的更新换代。基于 MEMS 技术的新型路由器已经研制成功, 并开始在大西洋网上试用。

显示技术是信息的另一关键, 用 MEMS 技术制作的微数字转镜器件阵列是显示技术的重大发展, 其中, TI 公司的 DMD^[8] 已成功得到应用。其结构分为上下两层, 上层为 768×576 个铝面微转镜组成的阵列, 每个转镜可在 $\pm 10^\circ$ 内转动, 分别受控于下层对应的 CMOS 静态存储器单元, 微运动机构 (镜子) 与电路由硅基微加工技术一体制成。铝镜偏转时可将入射的激光束反射到屏幕上, 从而得到显示。存储器的读写时间小于 $1\mu\text{s}$, 转镜偏转时间小于 $10\mu\text{s}$, 所以屏幕可以显示动态彩色图像画面。DMD 是一种大屏幕彩色 TV 投影显示的优质器件, 2048×1152 高分辨率 DMD 正在研制中。

1.2.4 生物微系统

MEMS 与生物技术紧密结合诞生的以 DNA 芯片等为代表的生物芯片将是 21 世纪 MEMS 领域的另一个热点和新的经济增长点。DNA 芯片的基本思想是通过生物反应或施加电场等措施使一些特殊的物质能够反映出某种基因的特性从而起到检测基因的目的。目前研究人员已经利用 MEMS 技术在硅片或玻璃片上制作出了 DNA 芯片。DNA 芯片的作用非常巨大, 其应用领域也非常广泛, 它不仅可以用于基因学研究、生物医学等, 而且随着 DNA 芯片的发展还将形成微电子生物信息系统, 并广泛应用到农业、工业、医学和环境保护等人类生活的各个方面。

1.2.5 军事用 MEMS 器件

MEMS 器件的巨大作用还体现在军事领域。MEMS 已经成为发展新型高科技武器装备的方向, 目前在若干领域中采用 MEMS 技术提高武器性能, 已初见成效。微加速度计的广泛应用, 不仅极大改进了常规武器的性能, 使现有武器的作战效率得到极大提高, 而且可以用来制造一些以往无法制造的武器装备, 提供新的军事应用。以炮弹引信为例, 采用 MEMS 技术进行弹道修正后, 常规炮弹的性能极大改善, 命中率数十倍地提高。MEMS 技术可用于制作穿透多层防护墙后引爆的智能导弹; 还可用于制作质量小于 250g 、代表未来航天领域发展方向的新型皮、纳卫星。

1.3 MEMS 设计现状概述

MEMS 设计包含三个方面: ① MEMS 器件的功能和结构 (包括版图和工艺流程) 设计; ② 系统外围电路以及电路与 MEMS 元件的相互作用; ③ 对 MEMS 元件

或子系统的封装,使之适用于实际应用。因此,计算机辅助 MEMS 设计方法应该从 IC 设计和机械设计中借用不同的工具。本书的内容主要是与第一方面有关。

要想得到一个理想的可用的 MEMS 器件,最主要的基础是要有一个理想的设计。设计方法和工具是设计者关注的核心问题。本书要讨论的是基于硅加工工艺制作的 MEMS 器件的设计问题。同样用硅加工工艺制作的 IC 已经非常成熟了,所以, MEMS 设计有许多方面可以从 IC 设计得到启发,并可借鉴 IC 设计的一些思路和方法。最核心的问题就是如何在设计过程中通过各个层次的仿真手段来考察设计方案,力求在设计阶段尽可能多地发现设计中的缺陷,使之在设计中得到纠正,而不带到制作过程中去,从而使设计的成功率得到提高,设计得到优化。

MEMS 是微电子技术的拓宽和延伸,它是一种典型的多学科交叉的学科领域。MEMS 设计开发过程的涉及面很广,包括动力学、电子、微流体、光学、电磁场等多个技术领域。与 IC 和机械设计一样,采用计算机辅助设计和仿真技术可以极大地提高 MEMS 器件的性能和可靠性,同时缩短开发周期和降低成本。IC 和机械设计都已有了很成功的商业软件,而 MEMS CAD 还处在初级发展阶段。在电子产品设计方面,EDA(electronic design automation)软件工具既可以做 IC 设计,又可以做计算模拟,如著名的 SPICE、SABER、Simulink 等;在机械产品领域,MDA(mechanical design automation)也有了许多技术相当先进的计算机辅助设计、制造和分析等一体化的大型通用软件,如 IDEAS、UGII、ProEngineer 等等。而 MEMS 的性质、设计、制造及使用特性决定了它需要一种不同于 EDA 与 MDA 这两个领域的设计工具如图 1.3.1 所示,它需要在用微电子工艺加工的器件上考察其某些机械性能是否符合设计要求。此外,由于加工出来的都是微小尺度的器件,实际运行中产生的机械运动也是微小的,这些都是难以直接观察到的,所以需要一种有针对性的仿真技术,使得器件及其运动在虚拟环境中有一个真实的可视化效果。这就是本书对 MEMS 设计要讨论的两个重点。

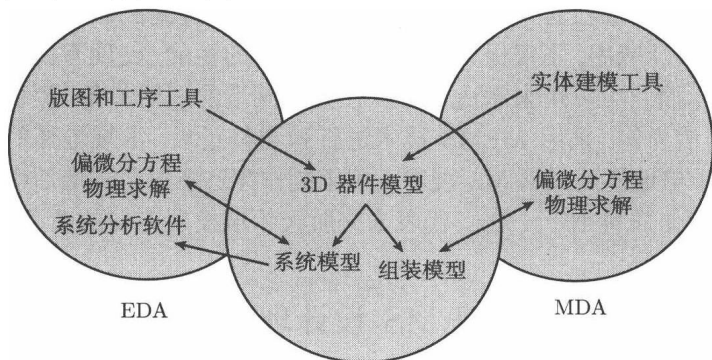


图 1.3.1 MEMS 设计系统是 EDA 和 MDA 的综合和继承

从纵向结构层次来说,计算机辅助 MEMS 设计方法又有不同的层次:系统级、

器件级、物理级、工艺级,如图 1.3.2 所示。根据建模层次的先后,设计流程分为自顶向下和自底向上两类。在器件以下的层次, MEMS 设计方法/系统的内容包括了器件建模及仿真、工艺仿真、器件掩膜版图设计与综合等方面。在设计工具方面,系统级仿真由较成熟的 EDA 软件如 Cadence 等设计软件完成;然而,在器件级以下的仿真工具,自动化程度比 EDA 低的,目前还存在很多问题(这些问题将在下一节具体分析),仍处在研究发展阶段。因此器件级设计研究是最急需改进的部分。

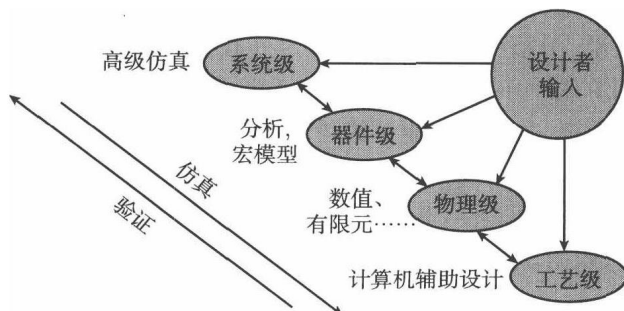


图 1.3.2 计算机辅助 MEMS 设计方法

1.3.1 系统级仿真

MEMS 设计的最终结果是将控制、测量电路与器件一起集成为系统。MEMS 系统主要由传感器、控制器和执行器等功能模块组成。在系统级建模上, MEMS 器件涉及的多能量域,这将是人们关注的重要问题。

进行系统级仿真,关键在于系统级建模(因为电路仿真已经很成熟了,有非常有效的软件工具可用),用于仿真的建模是在忽略某些结构上的细节的情况下,重点在于描述器件的运动学和动力学等关键特性,即在可接受的误差范围内,对器件结构进行简化而生成的数学模型。这种器件结构是 MEMS 性能分析的基础。由于 MEMS 器件的多样性,器件建模还有很多困难,目前可用的结果还非常有限。尽管如此,许多 MEMS 研究者还是付出了艰辛的努力。已经提出来的建模方法有理论建模方法、基于实验数据的系统辨识方法、标准等效结构建模方法等^[9-11],这些方法都是行之有效的,但是在深度和广度上都还有很大的拓展空间。本书将在第 3 章中详细讨论。

1.3.2 器件级仿真

MEMS 设计系统应该包括设计器件在相关物理域的仿真,可以对各种物理域分析,如有限元结构分析、动态流体计算分析、热模拟分析。这些物理域涉及静电、静磁、机械结构、热学、液流体、气流体、半导体器件物理。这些物理域之间也有可能产生耦合效应。