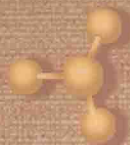


“十二五”国家重点图书出版规划项目



国防科技图书出版基金

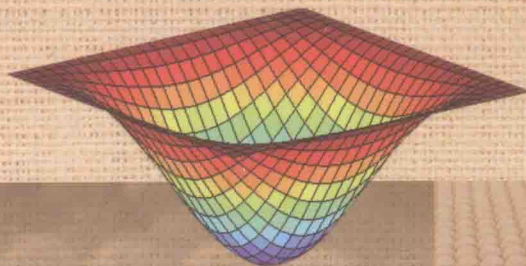


微米纳米技术丛书
MEMS与微系统系列

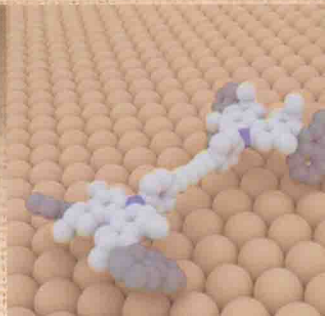
MEMS集成 设计技术及应用

MEMS Integrated Design
Technologies and Their Applications

■ 苑伟政 谢建兵 焦文龙 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press





国防科技图书出版基金

微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列

MEMS 集成设计 技术及应用

MEMS Integrated Design Technologies and
Their Applications

苑伟政 谢建兵 焦文龙 著

国防工业出版社

·北京·

TN4

120

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 集成设计技术及应用/苑伟政,谢建兵,焦文龙
著. —北京:国防工业出版社,2014. 11

(微米纳米技术丛书·MEMS 与微系统系列)

ISBN 978-7-118-09583-8

I. ①M... II. ①苑... ②谢... ③焦... III. ①微
电子技术—研究 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 254087 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

※

开本 787×1092 1/16 印张 20½ 字数 349 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 99.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第七届评审委员会组成人员

| | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 主任委员 | 王峰 | | | |
| 副主任委员 | 吴有生 | 蔡镛 | 杨崇新 | |
| 秘书长 | 杨崇新 | | | |
| 副秘书长 | 邢海鹰 | 贺明 | | |
| 委员 | 才鸿年 | 马伟明 | 王小谟 | 王群书 |
| (按姓氏笔画排序) | 甘茂治 | 甘晓华 | 卢秉恒 | 巩水利 |
| | 刘泽金 | 孙秀冬 | 陆军 | 芮筱亭 |
| | 李言荣 | 李德仁 | 李德毅 | 杨伟 |
| | 肖志力 | 吴宏鑫 | 张文栋 | 张信威 |
| | 陈良惠 | 房建成 | 赵万生 | 赵凤起 |
| | 郭云飞 | 唐志共 | 陶西平 | 韩祖南 |
| | 傅惠民 | 魏炳波 | | |

《微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列》

编写委员会

主任委员 丁衡高

副主任委员 尤 政

委 员 (以拼音排序)

邓中亮 丁桂甫 郝一龙 黄庆安

金玉丰 金仲和 康兴国 李佑斌

刘晓为 欧 黎 王晓浩 王跃林

温志渝 邢海鹰 杨拥军 张文栋

赵万生 朱 健

序

1994年11月2日,我给中央领导同志写信并呈送所著《面向21世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,提出微米纳米技术是一项面向21世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,应大力倡导在我国及早开展这方面的研究工作。建议得到了当时中央领导同志的高度重视,李鹏总理和李岚清副总理均在批示中表示支持开展微米纳米技术的跟踪和研究工作。

国防科工委(现总装备部)非常重视微米纳米技术研究,成立国防科工委微米纳米技术专家咨询组,1995年批准成立国防科技微米纳米重点实验室,从“九五”开始设立微米纳米技术国防预研计划,并将支持一直延续到“十二五”。

2000年的时候,我又给中央领导写信,阐明加速开展我国微机电系统技术的研究和开发的重要意义。国家科技部于当年成立了“863”计划微机电系统技术发展战略研究专家组,我担任组长。专家组全体同志用一年时间圆满完成了发展战略的研究工作,这些工作极大地推动了我国的微米纳米技术的研发和产业化进程。从“十五”到现在,“863”计划一直对微机电系统技术给以重点支持。

2005年,中国微米纳米技术学会经民政部审批成立。中国微米纳米学术年会经过十几年的发展,也已经成为国内学术交流的重要平台。

在总装备部微米纳米技术专家组、“863”专家组和中国微米纳米技术学会各位同仁的持续努力和计划的支持下,我国的微米纳米技术已经得到了长足的发展,建立了北京大学、上海交通大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等加工平台,形成了以清华大学、北京大学等高校和科研院所为主的优势研究单位。

十几年来,经过国防预研、重大专项、国防“973”、国防基金等项目的支持,我国已经在微惯性器件、RF MEMS、微能源、微生化等器件研究,以及微纳加工技术、ASIC技术等领域取得了诸多突破性的进展,我国的微米纳米技术研究平台已经形

成,许多成果获得了国家级的科技奖励。同时,已经形成了一支年富力强、结构合理、有影响力的科技队伍。

现在,为了更有效、有针对性地实现微米纳米技术的突破,有必要对过去的研究工作做一阶段性的总结,把这些经验和知识加以提炼,形成体系传承下去。为此,在国防工业出版社的支持下,以总装备部微米纳米技术专家组为主体,同时吸收国内同行专家的智慧,组织编写一套微米纳米技术专著系列丛书。希望通过系统地总结、提炼、升华我国“九五”以来微米纳米技术领域所做出的研究工作,展示我国在该技术领域的研究水平,并指导“十二五”及以后的科技工作。

丁衡高

2011年11月30日

前 言

从1959年Richard Feynman发表“底层大有可为”的演说至今,走过了50多年发展历程的微机电系统(MEMS)逐步走出研究者的实验室,进入产业化阶段,并融入到了人们的生产生活中。从手机中的倾角加速度计,玩具手柄中的陀螺到汽车中的胎压传感器,微机电系统无不体现着其优势以及对人们生活的改变。

设计技术是人们从概念到产品的一个桥梁。这座桥梁承担了产品功能实现、优化、降低成本、提高设计效率等作用,是现代生产中不可或缺的一个环节。计算机的出现和发展促进了设计技术的进步,并产生了计算机辅助设计这一领域。现在,计算机辅助设计已在机械、电子、出版等领域得到了广泛应用,并取得了巨大的经济和社会效益。微机电系统是一个新的交叉学科,它源于机械和微电子,并涉及生物、化学、光学等领域,其计算机辅助设计具有多学科交叉等独有的特点,这决定了微机电系统的设计技术具有其特殊性。微机电系统的设计技术借鉴于电子设计自动化技术和机械设计自动化技术,它不是两种设计技术的简单结合,而是在不同学科领域基础之上,在科学的设计理论指导下,融合了两种设计技术的集成设计技术,是微机电系统专有的设计技术。

本书作者长期开展了微机电系统集成设计技术研究和设计工具的实现工作,提出了泛结构化集成设计技术,并建立了微机电系统集成设计工具MEMS Garden。本书首先简要论述MEMS集成设计技术及设计工具;然后对MEMS集成设计中的关键技术进行了详细讲解;最后,对作者开发的MEMS集成设计工具MEMS Garden做简要介绍,并以示例的形式详细介绍了其使用方法以及应用。本书内容主要面向微机电系统集成设计工具的开发人员和MEMS Garden的用户;本书亦可作为微机电系统或相近专业的教材,用于高校本科生和研究生教学。

本书中的研究成果是在高技术研究计划(863计划)、国家自然科学基金等项目多年的支持下完成的,在此表示衷心的感谢。另外,对陕西省微/纳米系统重点实验室参与微机电系统设计技术研发工作的其他老师和同学表示感谢。

本书试图为读者提供一套系统详细介绍微机电系统集成设计工具的图书,但鉴于作者水平,书中必有不当和疏漏之处,恳请读者批评指正。

作者

目 录

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 MEMS 集成设计技术 | 2 |
| 1.3 MEMS 集成设计工具现状与发展趋势 | 3 |
| 1.4 国外主要 MEMS 集成设计工具 | 5 |
| 1.4.1 CoventorWare | 5 |
| 1.4.2 MEMS + | 6 |
| 1.4.3 MEMS Pro/MEMS Xplorer | 7 |
| 1.4.4 IntelliSuite | 7 |
| 1.5 国内 MEMS 集成设计工具 | 9 |
| 1.6 MEMS 集成设计关键技术 | 10 |
| 参考文献 | 10 |
| 第 2 章 MEMS 系统级仿真平台构建技术 | 12 |
| 2.1 引言 | 12 |
| 2.2 MEMS 系统级前处理器技术 | 12 |
| 2.2.1 系统级模型的图形化建模平台技术 | 13 |
| 2.2.2 系统级异构建模技术 | 14 |
| 2.2.3 系统级模型网表生成技术 | 18 |
| 2.3 MEMS 系统级求解器技术 | 18 |
| 2.3.1 外部网表文件直接求解技术 | 18 |
| 2.3.2 模拟信号求解技术 | 20 |
| 2.3.3 MEMS 与接口电路的跨尺度混合信号仿真技术 | 25 |
| 2.3.4 系统级设计优化技术 | 28 |
| 2.4 MEMS 系统级后处理器技术 | 40 |
| 2.4.1 系统级解算结果波形显示技术 | 40 |
| 2.4.2 系统级仿真结果的三维可视化技术 | 41 |
| 参考文献 | 43 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 第 3 章 MEMS 系统级多端口组件建模技术 | 44 |
| 3.1 引言 | 44 |
| 3.2 多端口组件模型的建立 | 45 |
| 3.2.1 多端口组件的一般形式 | 45 |
| 3.2.2 多端口组件网络 | 50 |
| 3.2.3 基于硬件描述语言的编码技术 | 51 |
| 3.2.4 MEMS 的多端口三维组件库 | 52 |
| 3.2.5 结构域组件行为建模方法 | 55 |
| 3.2.6 多域耦合组件行为建模方法 | 64 |
| 3.2.7 微流控芯片组件行为建模方法 | 73 |
| 3.3 多端口组件模型的自主定义与扩展方法 | 81 |
| 3.3.1 组件构成及其行为方程 | 82 |
| 3.3.2 组件自主定义软件 | 83 |
| 参考文献 | 84 |
| 第 4 章 MEMS 器件级仿真平台构建技术 | 87 |
| 4.1 引言 | 87 |
| 4.2 MEMS 器件级仿真模型库构建技术 | 87 |
| 4.2.1 基于算例库的 MEMS 器件级仿真模型库构建技术 | 87 |
| 4.2.2 有限元形函数库的建立方法 | 101 |
| 4.3 器件物理方程自主定义与求解技术 | 108 |
| 4.4 MEMS 器件级求解器技术 | 109 |
| 4.4.1 单能量域分析求解技术 | 109 |
| 4.4.2 多域耦合分析求解技术 | 124 |
| 4.5 器件级设计优化技术 | 129 |
| 4.6 器件级仿真结果可视化技术 | 131 |
| 4.6.1 数据处理方法 | 131 |
| 4.6.2 数据显示方法 | 133 |
| 4.6.3 数据保存方法 | 136 |
| 参考文献 | 137 |
| 第 5 章 宏建模技术 | 138 |
| 5.1 引言 | 138 |
| 5.2 大规模线性系统的动态宏建模方法 | 138 |
| 5.2.1 基于 Krylov 子空间投影的宏建模原理 | 139 |

| | | |
|--------------|-----------------------------------|------------|
| 5.2.2 | 基于迭代 IRS 技术的动态宏建模方法 | 151 |
| 5.3 | 非线性系统的动态宏建模方法 | 154 |
| 5.3.1 | 大变形非线性 | 154 |
| 5.3.2 | POD - Galerkin 方法 | 156 |
| 5.4 | 多域耦合系统的动态宏建模方法 | 160 |
| 5.4.1 | Hamilton 原理与 Lagrange 动力学方程 | 160 |
| 5.4.2 | 线性 MEMS 的模式叠加原理 | 162 |
| 5.4.3 | 多域耦合 MEMS 宏模型提取 | 164 |
| 5.5 | 参数化宏建模技术 | 167 |
| 5.5.1 | 角度参数化 | 167 |
| 5.5.2 | 材料属性参数化 | 169 |
| | 参考文献 | 175 |
| 第 6 章 | MEMS 工艺级建模与仿真技术 | 180 |
| 6.1 | 引言 | 180 |
| 6.2 | MEMS 工艺级仿真模型库构建技术 | 181 |
| 6.2.1 | 典型 MEMS 组件的参数化版图库构建技术 | 181 |
| 6.2.2 | 设计规则检查技术 | 183 |
| 6.2.3 | 工艺规则检查技术 | 188 |
| 6.2.4 | 材料数据库构建技术 | 190 |
| 6.3 | MEMS 工艺级几何仿真技术 | 192 |
| 6.3.1 | 工艺编辑器技术 | 192 |
| 6.3.2 | 工艺过程动态可视化技术 | 196 |
| 6.3.3 | 任意区域版图的实时三维可视化技术 | 196 |
| | 参考文献 | 199 |
| 第 7 章 | MEMS 集成设计工具转换接口构建技术 | 200 |
| 7.1 | 引言 | 200 |
| 7.2 | 系统级到工艺级转换技术 | 201 |
| 7.3 | 系统级到器件级转换技术 | 204 |
| 7.4 | 器件级到工艺级转换技术 | 206 |
| 7.5 | 器件级到系统级转换技术 | 209 |
| 7.6 | 工艺级到器件级转换技术 | 212 |
| 7.7 | 工艺级到系统级转换技术 | 215 |
| | 参考文献 | 219 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 第 8 章 MEMS Garden 及使用 | 220 |
| 8.1 引言 | 220 |
| 8.2 MEMS Garden 软件框架 | 220 |
| 8.3 MEMS Garden 特色 | 222 |
| 8.4 软件操作实例 | 224 |
| 8.5 工程的创建 | 225 |
| 8.6 系统级仿真 | 225 |
| 8.7 器件级仿真 | 233 |
| 8.8 含降阶宏模型的系统级仿真 | 240 |
| 8.8.1 矩阵输出 | 240 |
| 8.8.2 降阶宏模型生成 | 244 |
| 8.8.3 系统级仿真 | 244 |
| 8.9 工艺级设计 | 247 |
| 参考文献 | 250 |
| 第 9 章 MEMS Garden 器件设计实例 | 251 |
| 9.1 引言 | 251 |
| 9.2 微机械扭转镜 | 251 |
| 9.3 谐振式压力传感器 | 256 |
| 9.4 压阻式压力传感器 | 260 |
| 9.5 浮动式剪应力传感器 | 264 |
| 9.6 热敏剪应力传感器 | 269 |
| 9.7 合成射流器 | 271 |
| 9.8 细胞分选微网筛 | 274 |
| 9.9 Z 轴微机械陀螺 | 278 |
| 9.10 微机械加速度计 | 284 |
| 9.11 MEMS 光开关 | 288 |
| 缩略语 | 291 |

Contents

| | |
|--|----|
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Foreword | 1 |
| 1.2 Integrated Design Technologies of MEMS | 2 |
| 1.3 Status and trends of MEMS Integrated Design Tools | 3 |
| 1.4 Major Foreign MEMS Integrated Design Tools | 5 |
| 1.4.1 CoventorWare | 5 |
| 1.4.2 MEMS + | 6 |
| 1.4.3 MEMS Pro/MEMS Xplorer | 7 |
| 1.4.4 IntelliSuite | 7 |
| 1.5 Domestic MEMS integrated design tools | 9 |
| 1.6 Key Technologies of MEMS integrated design tools | 10 |
| References | 10 |
| Chapter 2 System Level Simulation Platform Technologies of MEMS .. | 12 |
| 2.1 Foreword | 12 |
| 2.2 System Level Pre – processor Technologies of MEMS | 12 |
| 2.2.1 Graphical Modeling Technologies of System Level Models | 13 |
| 2.2.2 Hybrid Modeling Technologies of System Level | 14 |
| 2.2.3 Netlist Creation Technologies of System Level | 18 |
| 2.3 Technologies of MEMS System Level Solver | 18 |
| 2.3.1 Solving Technologies of External Netlist | 18 |
| 2.3.2 Solving Technologies of Analog Signal | 20 |
| 2.3.3 Multi – Scale Mixed – Signal Simulation Technologies of MEMS and Interface Circuits | 25 |
| 2.3.4 Optimization Technologies of System Level Design | 28 |
| 2.4 System Level Post – Processor Technologies of MEMS | 40 |
| 2.4.1 Waveform Display Technologies of System Level Simulation Results | 40 |
| 2.4.2 3D Visualization Technologies of System Level Simulation Results | 41 |

| | |
|--|-----------|
| References | 43 |
| Chapter 3 System Level Multi Port Element Network Modeling | |
| Technologies of MEMS | 44 |
| 3.1 Foreword | 44 |
| 3.2 Creation of Multi Port Element Network Models | 45 |
| 3.2.1 General Form of Multi Port Elements | 45 |
| 3.2.2 Multi Port Element Network | 50 |
| 3.2.3 Hardware Description Language Based Coding Techniques | 51 |
| 3.2.4 MEMS 3D Multi Port Elements Library | 52 |
| 3.2.5 Behavioral Modeling Method of Structure Domain Elements | 55 |
| 3.2.6 Behavioral Modeling Method of Multi Energy Domain Coupling Elements | 64 |
| 3.2.7 Behavioral Modeling Method of Microfluidic Chip Elements | 73 |
| 3.3 Custom Definition and Extend of Multi Port Element Network Models | 81 |
| 3.3.1 Constitution of Elements and Their Behavioral Equations | 82 |
| 3.3.2 Custom Definition Software | 83 |
| References | 84 |
| Chapter 4 Device Level Simulation Platform Technology of MEMS | 87 |
| 4.1 Foreword | 87 |
| 4.2 MEMS Device Level Simulation Model Library Creation Technologies | 87 |
| 4.2.1 MEMS Device Level Simulation Model Library Creation Technologies Based on Example Libraries | 87 |
| 4.2.2 Creation Methods of Finite Element Shape Function Libraries | 101 |
| 4.3 Custom Definition and Solving Technologies of Device Physical Equations | 108 |
| 4.4 Technologies of MEMS Device Level Solver | 109 |
| 4.4.1 Solving Technologies of Single Energy Domain | 109 |
| 4.4.2 Solving Technologies of Multi Energy Domains | 124 |
| 4.5 Optimization Technologies of Device Level Design | 129 |
| 4.6 Visualization Technologies of Device Level Simulation Results | 131 |
| 4.6.1 Data Processing Method | 131 |
| 4.6.2 Data Display Method | 133 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| 4.6.3 | Data Storing Method | 136 |
| References | | 137 |
| Chapter 5 | Macro Modeling Technologies | 138 |
| 5.1 | Foreword | 138 |
| 5.2 | Dynamic Macro Modeling Technologies of Large Scale linear Systems | 138 |
| 5.2.1 | Macro Modeling Principle Based on Krylov Subspace Projection | 139 |
| 5.2.2 | Dynamic Macro Modeling Method Based on Iterative IRS Technologies | 151 |
| 5.3 | Dynamic Macro Modeling Methods of Nonlinear Systems | 154 |
| 5.3.1 | Large Deflection Nonlinearity | 154 |
| 5.3.2 | POD – Galerkin Method | 156 |
| 5.4 | Dynamic Macro Modeling Methods of Multi Energy Domain Coupling Systems | 160 |
| 5.4.1 | Hamilton Principle and Lagrange Kinetic Equation | 160 |
| 5.4.2 | Modal Superposition Principle of linear MEMS Systems | 162 |
| 5.4.3 | Macro Model Extraction of Multi Energy Domain Coupling MEMS | 164 |
| 5.5 | Technologies of Parametric Macro Modeling | 167 |
| 5.5.1 | Angular Parameterization | 167 |
| 5.5.2 | Material Characteristic Parameterization | 169 |
| References | | 175 |
| Chapter 6 | Process Level Modeling and Simulation | |
| | Technologies of MEMS | 180 |
| 6.1 | Foreword | 180 |
| 6.2 | MEMS Process Level Simulation Model Library Creation Technologies | 181 |
| 6.2.1 | Parametric Layout Library Creation Technologies of Typical MEMS Components | 181 |
| 6.2.2 | Design Rule Checking Technologies | 183 |
| 6.2.3 | Process Rule Checking Technologies | 188 |
| 6.2.4 | Creation Technologies of Material Data Base | 190 |
| 6.3 | Geometry Simulation Technologies of MEMS Process Level | 192 |
| 6.3.1 | Technologies of Process Editor | 192 |
| 6.3.2 | Dynamic Visualization Technologies of Process Procedure | 196 |