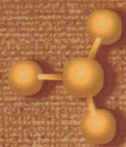


“十二五”国家重点图书出版规划项目

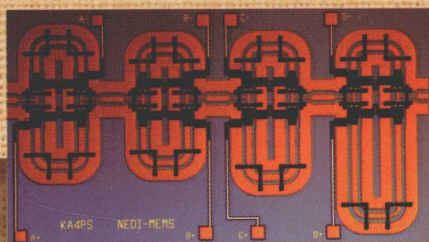


微米纳米技术丛书  
MEMS与微系统系列

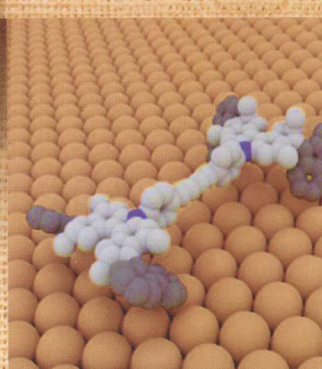
# RF MEMS器件 设计、加工和应用

RF MEMS Devices  
Design, Fabrication, and Application

朱健 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国家科学技术学术著作出版基金资助出版  
微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列

# RF MEMS 器件设计、 加工和应用

RF MEMS Devices Design, Fabrication,  
and Application

朱健 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

RF MEMS 器件设计、加工和应用/朱健编著. —北京:  
国防工业出版社, 2012. 12

(微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列)

ISBN 978-7-118-08501-3

I. ①R... II. ①朱... III. ①微电子技术—元器件  
IV. ①TN6

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第038848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)

三河市腾飞印务有限公司

新华书店经售



\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19 3/4 字数 349 千字

2012年12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



此书同时获得

**总装备部国防科技图书出版基金资助**

## 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  
第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	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)

丁桂甫 邓中亮 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

射频微机电系统(RF MEMS)是指利用 MEMS 技术制作各种用于电子通信的射频器件或系统,频段覆盖 100kHz ~ 300GHz,最终目标是把半导体有源器件、微加工元件和 MEMS 器件集成到一块芯片上或微系统上,从而实现单芯片上的射频系统,完成信息的获取、传输、处理和执行等功能。RF MEMS 器件与传统电子器件相比,具有低插损、高隔离度、宽带、极低互调失真、近零驱动功耗、低成本集成能力的优势,可以实现各个通信部件的微型化和集成化,可以提高信号的处理速度和缩小整个雷达通信系统的功耗和体积,是无源器件的革命性改革,通过对高性能无源元件的单片集成,实现单芯片的射频系统,彻底改革了射频信号的处理方式。

为了便于国内 MEMS 科研人员了解和学习当前国际 RF MEMS 技术发展状况和最新进展,促进国内 RF MEMS 技术的研究进程,特地编写了《RF MEMS 器件设计、加工和应用》一书。本书从介绍 RF MEMS 的发展历史开始,系统地介绍了 RF MEMS 技术所涵盖的各类器件,以 RF MEMS 理论设计和工艺实现为基础,阐述了 RF MEMS 器件的模型设计、结构制备等,详细论述了 RF MEMS 开关、电感、电容、移相器、谐振器、振荡器、滤波器、天线等 RF MEMS 设计方法、技巧以及工艺技术,论述了 RF MEMS 器件的封装技术和可靠性问题。

本书是第一部由国内作者编著的 RF MEMS 技术专业著作,在介绍 RF MEMS 理论上,侧重工程应用的设计方法及工艺技术,首次系统公布了南京电子器件研究所近十年来在 RF MEMS 领域的研究成果,包括获得国家技术专利的 RF MEMS 理论研究成果和工艺技术,代表我国 RF MEMS 技术的最新成果和最前沿技术。

本书是南京电子器件研究所微纳米研发部全体成员共同努力的成果,全书由我负责各章节的编写和审校,同时参与编写的有郁元卫(第 2 章、6 章、8 章),贾世星(第 3 章)、陆乐(第 4 章)、侯智昊和张龙(第 5 章、7 章)、侯芳(第 9 章)、吴璟和姜理利(第 10 章),高涛和陈辰(第 11 章),侯智昊负责了全书格式审校。在这里对所有参加编写的同事们表示感谢!

本书工作得到了总装备部中国微纳米技术专业组的支持,得到了国家科学技术学术著作出版基金委员会的资助,在此表示感谢!

感谢杨乃彬和高涛所长,是他们给了我一个施展才华的平台,不断地鞭策我;感谢我的恩师周百令、林金庭、林立强和冯耀兰,是他们给了我扎实的理论知识;感谢我的家人,特别是我的儿子朱天元,有多少个应该陪在他们身边的日日夜夜,由于工作忙而不能相伴;感谢我的好友何爱文(HELL Erwin),在键合工艺上给了我们团队最大的帮助;感谢多年来一直支持我的同仁和朋友们。

因本书是在我们团队承担大量科研任务的同时编写的,所以肯定有这样或那样的撰写错误,敬请指正和谅解。

谨将本书献给

我的恩师、引路人——丁衡高院士!

本书合作者

高涛、郁元卫、贾世星、陆乐、侯智昊、侯芳、吴璟、姜理利、陈辰、张龙。

朱健

2013年2月

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 RF MEMS 的内涵 .....	1
1.2 RF MEMS 的发展历程 .....	1
1.2.1 国外 RF MEMS 技术发展路线 .....	1
1.2.2 国内 RF MEMS 技术发展路线 .....	6
1.3 RF MEMS 的优势和市场前景 .....	9
1.3.1 RF MEMS 技术的优势 .....	9
1.3.2 RF MEMS 技术的作用 .....	11
1.3.3 RF MEMS 技术的市场前景 .....	14
1.4 结论 .....	16
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 RF MEMS 设计技术</b> .....	17
2.1 RF MEMS 牵涉的力学和尺度效应 .....	18
2.1.1 静电力 .....	19
2.1.2 电磁力 .....	21
2.1.3 压电力 .....	22
2.1.4 电热力 .....	23
2.1.5 范德瓦尔斯力和卡西米尔力 .....	24
2.1.6 力的尺度效应 .....	25
2.2 RF MEMS 器件的力学模型 .....	25
2.2.1 固支梁微结构 .....	26
2.2.2 悬臂梁微结构 .....	27
2.2.3 膜桥微结构 .....	28
2.2.4 RF MEMS 开关时间计算 .....	30
2.2.5 RF MEMS 开关能量消耗 .....	31
2.3 RF MEMS 器件的电磁模型 .....	32



2.3.1	射频设计基础 .....	32
2.3.2	RF MEMS 并联电容式开关 .....	34
2.3.3	直接接触式 RF MEMS 串联开关 .....	35
2.3.4	MEMS 机械滤波器 .....	36
2.4	计算仿真实例分析 .....	37
2.4.1	设计流程 .....	38
2.4.2	结构设计 .....	40
2.4.3	射频设计 .....	48
2.4.4	实测结果分析 .....	49
2.4.5	电磁模型拟合结果 .....	50
	参考文献 .....	52
<b>第 3 章</b>	<b>RF MEMS 工艺技术</b> .....	<b>54</b>
3.1	RF MEMS 工艺技术的发展 .....	54
3.2	表面牺牲层工艺 .....	56
3.2.1	高温表面牺牲层工艺 .....	56
3.2.2	低温表面牺牲层工艺 .....	60
3.2.3	黏附机制和抗黏附方法研究 .....	68
3.3	RF MEMS 器件体硅工艺流程 .....	70
3.4	RF MEMS 典型工艺介绍 .....	72
3.4.1	湿法腐蚀工艺 .....	72
3.4.2	干法刻蚀工艺 .....	72
3.4.3	通孔与填孔工艺 .....	74
3.4.4	圆片键合工艺 .....	77
3.4.5	圆片减薄抛光工艺 .....	79
3.4.6	衬底转移工艺 .....	82
3.5	GaAs 基 RF MEMS 工艺技术 .....	82
3.6	新材料 新工艺 .....	84
3.6.1	聚合物材料 .....	84
3.6.2	LIGA .....	86
3.6.3	纳米压印 .....	88
	参考文献 .....	92

<b>第 4 章 RF MEMS 开关</b> .....	93
4.1 RF MEMS 开关概述 .....	93
4.1.1 RF MEMS 开关的特性 .....	93
4.1.2 RF MEMS 开关的分类 .....	94
4.1.3 RF MEMS 开关的激励方式 .....	95
4.1.4 RF MEMS 开关的设计 .....	97
4.2 RF MEMS 电容式开关 .....	101
4.2.1 RF MEMS 电容式开关基本原理 .....	102
4.2.2 RF MEMS 单膜桥开关 .....	103
4.2.3 RF MEMS 双膜桥开关 .....	106
4.3 RF MEMS 接触式开关 .....	107
4.4 RF MEMS 开关优化设计 .....	109
4.4.1 高隔离度设计 .....	109
4.4.2 驱动信号与微波信号物理隔离的 RF MEMS 开关优化 .....	110
4.5 RF MEMS 开关产品 .....	110
4.5.1 RMI 公司的 RF MEMS 开关 .....	110
4.5.2 原 TeriVicta 公司的 RF MEMS 开关 .....	112
4.5.3 Omron 公司的 RF MEMS 开关 .....	113
4.5.4 Panasonic 公司的 RF MEMS 开关 .....	115
4.5.5 南京电子器件研究所的 RF MEMS 开关 .....	116
参考文献 .....	117
<b>第 5 章 RF MEMS 电容和电感</b> .....	118
5.1 概述 .....	118
5.2 结构设计 .....	118
5.2.1 电容和电感的 $Q$ 值与寄生效应 .....	119
5.2.2 电容结构 .....	121
5.2.3 电感结构 .....	124
参考文献 .....	127
<b>第 6 章 RF MEMS 移相器</b> .....	129
6.1 概述 .....	129
6.2 DMTL 型移相器 .....	130
6.2.1 基本原理 .....	130
6.2.2 模拟 DMTL 移相器 .....	133

6.2.3	数字 DMTL 移相器 .....	134
6.3	反射型 MEMS 移相器 .....	135
6.3.1	并联式开关实现的数字移相器 .....	135
6.3.2	串联式开关实现的数字移相器 .....	137
6.4	开关线型 MEMS 移相器 .....	138
6.4.1	并联式开关实现的开关线数字移相器 .....	139
6.4.2	串联式开关实现的数字移相器 .....	140
6.4.3	基于 SP4T 开关实现的数字移相器 .....	142
6.5	开关网络型 MEMS 移相器 .....	144
6.6	MEMS 数字延迟线 .....	147
6.7	MEMS 移相器集成和系统 .....	148
	参考文献 .....	152
<b>第 7 章</b>	<b>RF MEMS 谐振器</b> .....	<b>154</b>
7.1	概述 .....	154
7.2	MEMS 谐振器 .....	156
7.2.1	MEMS 谐振器基础 .....	156
7.2.2	梳状谐振器 .....	157
7.2.3	梁式谐振器 .....	160
7.2.4	薄膜体声波谐振器 .....	164
7.3	基片集成波导型谐振器 .....	166
7.3.1	SIW MEMS 谐振器 .....	167
7.3.2	SIW MEMS 谐振器的制作工艺 .....	169
7.4	MEMS 压控振荡器 .....	170
	参考文献 .....	171
<b>第 8 章</b>	<b>RF MEMS 滤波器</b> .....	<b>174</b>
8.1	概述 .....	174
8.1.1	HTS 滤波器 .....	175
8.1.2	LTCC 滤波器 .....	175
8.1.3	RF MEMS 滤波器 .....	176
8.2	微机械传输线 .....	177
8.2.1	薄膜支撑型微机械传输线 .....	177
8.2.2	微屏蔽微机械传输线 .....	178

8.2.3	悬浮型微机械传输线 .....	179
8.2.4	同轴线型微机械传输线 .....	180
8.2.5	波导型微机械传输线 .....	181
8.3	微机械滤波器 .....	181
8.3.1	微机械谐振滤波器 .....	181
8.3.2	BAW 滤波器 .....	182
8.3.3	薄膜腔体型微机械滤波器 .....	182
8.3.4	硅基微小型 MEMS 滤波器 .....	183
8.3.5	基片集成波导型 MEMS 滤波器 .....	189
8.3.6	硅腔 MEMS 滤波器 .....	192
8.4	可调滤波器 .....	193
8.4.1	HF - UHF MEMS 可调谐滤波器 .....	193
8.4.2	2GHz ~ 18GHz MEMS 可调谐滤波器 .....	193
8.4.3	毫米波 MEMS 可调滤波器 .....	194
	参考文献 .....	195
<b>第 9 章</b>	<b>RF MEMS 天线</b> .....	<b>197</b>
9.1	RF MEMS 天线概述 .....	197
9.1.1	MEMS 天线种类 .....	197
9.1.2	MEMS 天线的结构 .....	198
9.1.3	MEMS 天线的性能 .....	198
9.2	MEMS 天线的理论与设计 .....	199
9.2.1	MEMS 天线馈电方式 .....	199
9.2.2	MEMS 天线辐射原理 .....	200
9.2.3	MEMS 天线设计方法 .....	203
9.3	RF MEMS 天线的制作 .....	207
9.3.1	RF MEMS 天线制作的主要工艺 .....	207
9.3.2	典型的 MEMS 天线制作工艺流程 .....	209
9.4	RF MEMS 天线测试 .....	209
9.4.1	MEMS 天线电路性能的测试 .....	209
9.4.2	MEMS 天线辐射性能的测试 .....	210
9.5	新型 MEMS 天线 .....	211
9.5.1	新型 MEMS 天线 .....	211