

微 纳 系 统 系 列 译 丛

RF MEMS
THEORY, DESIGN, AND TECHNOLOGY

RF MEMS 理论 · 设计 · 技术

[美国] Gabriel M. Rebeiz / 著

黄庆安 廖小平 / 译



东南大学出版社

RF MEMS

理论 · 设计 · 技术

RF MEMS
THEORY, DESIGN, AND TECHNOLOGY

[美国] Gabriel M. Rebeiz 著
黄庆安 廖小平 译

东南大学出版社

内 容 提 要

本书共分 15 章;内容主要包括:RF MEMS 器件的静态、动态和电磁模型;MEMS 开关的制备、封装、可靠性及功率处理能力;MEMS 开关的电路设计;MEMS 移相器、变容器、可调谐振荡器和电感器;可重构的 MEMS 网络、滤波器、天线和子系统;MEMS 电路、移相器和振荡器的相噪声分析;同时介绍了 RF MEMS 开关的应用领域、国际 RF MEMS 研究进展及未来的发展方向。

本书取材广泛、内容深刻,是本领域的权威著作。适合微电子技术、微波技术、微机电系统(MEMS)技术领域的高年级本科生、研究生及工程技术人员阅读。

本文中文简体与翻译版由 WILEY 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—2004—187

图书在版编目(CIP)数据

RF MEMS 理论·设计·技术/(美)雷茨(Rebeiz, G. M.)著;黄庆安,廖小平译.—南京:东南大学出版社, 2005.12

书名原文:RF MEMS Theory, Design and Technology
ISBN 7—5641—0197—0

I. R... II. ①雷... ②黄... ③廖... III. RF.
微机电 IV. TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 144941 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:宋增民

江苏省新华书店经销 兴化市印刷厂印刷

开本:700mm×1000mm 1/16 印张:26.5 字数:520 千字

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

印数:1~2000 册 定价:78.00 元

(若有印装质量问题,请同读者服务部联系。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控制电路等于一体的器件或系统。其特征尺寸一般在 $0.1\sim 100\ \mu\text{m}$ 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利用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。

RF MEMS是MEMS技术的重要应用领域之一。早在20世纪80年代初期,美国Peterson博士就已经研究了低频应用的MEMS开关,这种开关本质上是通过机械移动来实现传输线短路或开路的小型器件。随着MEMS技术的进步,在20世纪90年代初期,美国Larson博士研制出微波控制的MEMS开关(和变容器)。由于RF MEMS技术在军民两方面应用的巨大潜力,近10年的研究惊人增加, Motorola、Rockwell、Raytheon、ADI、TI、HRL、Omron、Samsung、NEC、Northrup Grumman、ST-Microelectronics等国际上的知名公司都开展了相关的研发工作。虽然国内外已经在RF MEMS技术方面取得了长足发展,但在功率处理能力、可靠性和封装方面仍存在一些问题。

到目前为止,国内还没有系统阐述RF MEMS技术方面的工具书。美国University of Michigan的G. M. Rebeiz教授所著的这本书,是根据他自己多年的研究成果总结的专著。其内容主要包括:(1) RF MEMS器件的静态、动态和电磁模型;(2) MEMS开关的制备、封装、可靠性及功率处理能力;(3) MEMS开关的电路设计;(4) MEMS移相器、变容器、可调谐振荡器和电感器;(5)可重构的MEMS网络、滤波器、天线和子系统;(6) MEMS电路、移相器和振荡器的相噪声分析;同时介绍了RF MEMS开关的应用领域、国际RF MEMS研究进展及未来的发展方向。总的来看,这本书基本概念比较清楚,内容深刻,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,这一次又适时地把这本书介绍到国内,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从事MEMS特别是RF MEMS技术研发的广大师生和科研人员有所帮助。

丁衡高
2005年7月

译者序

2003年10月我在 Toronto 参加第二届 IEEE 国际传感器会议 (IEEE International Conference on Sensors) 期间, 在会议的书展中看见 2003 年 John Wiley & Sons 出版社出版的《RF MEMS Theory, Design and Technology》一书。据我所知, 这是国际上第三本 RF MEMS 方面的书籍, 这三本书籍分别是:

(1) H. J. De Los Santos, *RF MEMS Circuit Design*, Artech House, Boston, 2002.

(2) V. K. Varadan, et al, *RF MEMS and Their Applications*, John Wiley & Sons, 2003.

(3) G. M. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, John Wiley & Sons, 2003.

比较这三本书的内容, 我认为 De Los Santos 博士所著书籍偏重 RF 系统; Varadan 教授等人所著则是 RF MEMS 的综合类书籍; Rebeiz 教授所著书籍内容较深、是 RF MEMS 方面的专著。东南大学 MEMS 教育部重点实验室有一个小组也在从事 RF MEMS 方面的研究工作, 因此, 决定组织翻译, 我们翻译书籍的目的主要有两个: (1) 使实验室的教师和研究生通过翻译工作系统地学习 RF MEMS 内容; (2) 让国内从事 RF MEMS 的科技人员及研究生作为参考书。要感谢 John Wiley & Sons 出版公司将简体中文版授权东南大学出版社, 才使本书中文版成为可能。同时, 也要感谢东南大学“985”工程对该书出版的帮助。

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中为本书中文版作序, 并对翻译工作给予鼓励, 在此表示感谢。

本书翻译由从事 RF MEMS 研究的廖小平教授和我负责组织, 东南大学 MEMS 教育部重点实验室 RF 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、附录 B、第 1、15 章)、廖小平(附录 A、第 14 章)、郑惟彬(第 5、8 章)、聂萌(第 2 章)、陈洁(第 3 章)、陆逸敏(第 4 章)、宋竟(第 6 章)、黄见秋(第 7 章)、严捷(第 9 章)、韩磊(第 10 章)、董乔华(第 11 章)、王彦丰(第 12 章)、蔡洁(第 13 章)。其中第 1~8 章由我审校、第 9~15 章由廖小平教授审校, 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
2005年7月

原 书 序

我想要做的就是写一本内容深刻的著作,当我散步的时候不停地告诉我自己,考虑写一本有关 RF MEMS 方面的专著。我的目的是想写一本书而不是将无数的“低水平技术手稿”集成起来。这本书应该以合理的深度覆盖 RF MEMS 的理论、设计和技术。1999 年 10 月,我开始写作,但又必须删除并重新写许多章节,因为,对 RF MEMS 电磁和机械分析的理解以及它们相关的可靠性与封装实际上在 2001 年才成熟。我同样想告诉读者我对该领域所知道的一切,我仅略去了由于保密和非公开协议所涉及的一小部分内容。

我希望读者认为本书在叙述 RF MEMS 技术的进展方面是切合实际的。我们从美国政府得到了专有合同项目的支持,到 2002 年 9 月,还没有私人对 RF MEMS 投资。确实,这是一种伟大的技术,但在功率处理能力、可靠性和封装方面仍存在问题,而且对于大量的商业应用,还不清楚 RF MEMS 是否能以每单元小于 1 美元的价格生产。本书列出了这些问题,并提出解决建议。

为了写作此书,我非常荣幸地与 RF MEMS 的团队一起工作,即我的研究生们。我学会了详细地倾听他们的讲述,并认可这样一种事实:关于他们研究的内容他们知道的比我曾经的研究工作多。我同样学会雇佣优秀的研究生,询问他们大量的研究工作,然后使用任何可能的方法,保护他们免受合同的监控,以便让他们深入探索多方面的研究工作。关于 RF MEMS 和微机械加工的实质问题,我们已经进行了长期的讨论,他们确信,我没有出错或遗漏。一些研究生帮助我计算或制图。这些学生是:Chen-Yu Chi, Thomas Budka, Gildas Gauthier, Andrew Brown, N. Scott Barker, Jeremy Muldavin, Joseph Hayden, Guan-Leng Tan, Laurent Dussopt, Jad Rizk, Bernhard Schoenlinner。到 2002 年夏天,所有研究生(除 Bernhard 外)将博士毕业。特别感谢 Guan-Leng 和 Jeremy,他们帮助画图并把整本书集成在一起。学生们将得到本书 50% 的利益。

如果没有工业界和科技界同事们的帮助,这样详细的书是不可能写出来的。我从他们那里学习了很多东西。特别感谢与下列专家们的私人讨论:

Professor Nick McGruer (Northeastern University), Rob Mihailovich (Rockwell Scientific), Captain Rob Reid (AFRL), Ezekiel Kruglick and Professor Kris Pister (University of California, Berkeley), Dan Hyman (Xcom Wireless), and Carl Bozler (MIT Lincoln Labs)。

同样要感谢下列人员:

Jeff DeNatale (Rockwell Scientific), Chuck Goldsmith, Andrew Malczew-

ki, and Brandon Pillans (all at Raytheon), Professors Linda Katehi, Clark, Nguyen and Khalil Najafi (University of Michigan), Pierre Blondy (University of Limoges), Ronn Kliger (Analog Devices), Professors Milton Feng and C. Liu (University of Illinois), Cliff Vaughan (Motorola), Craig Keast (MIT Lincoln Laboratories), Tomorono Seki (Omron, Japan), Veljko Milanovic (University of California, Berkeley), Nils Hoivik and Professor Y. C. Lee (University of Colorado), Hongrui Jiang and Norman Tien (Cornell University), Professor Darrin Young (Case Western Reserve University), Victor Lubecke (Lucent Technologies), Aleksander Dec and Professor Ken Suyama (Columbia University), Professor Chuck Wheeler (University of Arizona), Professor Jose Lopez-Villegas (University of Barcelona, Spain), Professor Joe Tauritz (University of Twente, Netherlands), Professor Yongwoo Kwon (Scul National University, Korea), Professor Euisik Yoon (KAIST, Korea), Cimoo Song (Samsung, Korea), Jae-Yeong Park (LG, Korea), Professor Gary Fedder (Carnegie Mellon University) and Professor Thomas Weller (University of South Florida)。他们都将自己研究工作的高分辨率文件寄给我。并用 e-mail 快速地回答了相关问题。

本书工作得到 DARPA (美国国防预先研究计划署)、NASA (美国航空航天局)、AFRL (空军实验室)、ARO (陆军研究办公室) 和 NSF (国家科学基金) 的资助。尤其是 DARPA 的 John Smith 博士在早期开发低损耗 RF MEMS 移相器和 RF MEMS 开关可靠性工作方面的支持。同样, 密歇根大学给我写作所需的时间并提供了计算机及打印设施。George Haddad 教授是我遇到的最好的系主任, 还有 Fawwaz Ulaby 教授给予了我一贯的支持。我非常幸运成为两个杰出科研机构的一分子: 加州理工学院和密歇根大学 (Ann Arbor 分校)。这两个大学对科技生活及她们在社会中作用的理念完全不同, 但是, 最终她们都努力成为最好的机构以发挥她们的作用。

还要感谢我的家人和朋友。

附言: 我们都会犯错误, 请原谅我们, 把你们的修改寄送下述地址:

Gabriel Michel Rebeiz
rebeiz@unich.edu
Ann Arbor, Michigan
2002 年 9 月

谨将本书献给

我的父亲

我的叔叔

我的兄弟

David B. Rutledge

Fawwaz T. Ulaby

Edward D. Surovell

本书合作者

N. Scott Barker

The University of Virginia

Laurent Dussopt

CEA-LETI, France

Joseph Hayden

Intel

Jeremy Muldavin

MIT Lincoln Laboratory

Jad Rizk

Intel

Bernhard Schoenlinner

The University of Michigan

Guan-Leng Tan

DSO National Laboratories, Singapore

上述合作者均是 Gabriel M. Rebeiz 教授的研究生或博士后

作者简介

Gabriel M. Rebeiz 于 1988 年在加州理工学院获得博士学位。目前担任密歇根大学 Ann Arbor 分校电气工程与计算机科学系的教授。他领导一个研究小组,从事 RF MEMS、高速 RF-IC 电子学、天线和系统的研究,已培养 20 余名博士、发表 200 余篇论文。

Rebeiz 教授担任了下列公司或机构的顾问: Intel, Agilent, DARPA, ESA(欧洲空间局), Lockheed Martin, Rockwell, Boeing, Samsung, Hitachi, Takata 等。他是电气电子工程师协会的会士(Fellow, IEEE)。由于他在 RF MEMS 开关和移相器研究方面的杰出贡献,获得 IEEE 2000 年度微波奖。

单位换算表

温度	$K = ^\circ C + 273$
长度	$1 \text{ m} = 10^{10} \text{ \AA} = 3.28 \text{ ft} = 39.4 \text{ in}$
	$1 \text{ mil} = 2.54 \times 10^{-5} \text{ m}$
压力	$1 \text{ Torr} = 133.322 \text{ Pa}$
质量	$1 \text{ lb} = 0.453\,592 \text{ kg}$
磁场强度	$1 \text{ Oe} = 79.577\,472 \text{ A/m}$

单位词头

吉,G	10^9
兆,M	10^6
千,k	10^3
厘,c	10^{-2}
毫,m	10^{-3}
微, μ	10^{-6}
纳,n	10^{-9}

注:为保留原书书的原始数据,书中使用的非法定计量单位可按单位换算表换算。

目 录

1 微波应用的 RF MEMS 导论	1
1.1 RF MEMS 的起源	1
1.2 RF MEMS 的构造	3
1.3 MEMS 开关和 GaAs PIN 二极管及晶体管开关比较	4
1.4 RF MEMS 的应用领域	5
1.5 RF MEMS 实例研究	7
1.5.1 实例 1: 开关网络中的 RF MEMS	7
1.5.2 实例 2: 低噪声低功耗电路中的 RF MEMS	8
1.5.3 实例 3: 便携式无线系统中的 RF MEMS	9
1.5.4 实例 4: 相控阵中的 RF MEMS	11
1.6 国际 RF MEMS 的研究状况	13
1.7 RF MEMS 与 Si 或 GaAs 电路的集成	15
1.8 线性度和互调分量	15
1.9 气密或非气密封装	16
1.10 功率处理能力和可靠性	17
参考文献	17
2 MEMS 器件的力学模型: 静态特性分析	19
2.1 固支梁的弹性系数	19
2.1.1 残余应力引起的弹性系数部分	22
2.1.2 弹性系数的非线性拉伸部分	24
2.1.3 固支梁的临界应力	24
2.1.4 不同材料构成的梁的残余应力和杨氏模量	25
2.1.5 梁孔的影响	25
2.2 低 k 梁的弹性系数	26
2.3 悬臂梁的弹性系数	27
2.4 圆膜的弹性系数	29
2.5 应力梯度引起的梁弯曲	30
2.6 静电激励	31

2.7	静电激励下变形梁的形状	34
2.8	MEMS 固支梁与悬臂梁的直流压紧维持电压	35
2.9	作用在 MEMS 梁上的力	37
2.10	MEMS 电容开关的自激励现象	38
2.11	MEMS 电容开关的 RF 压紧维持电压	39
2.12	模拟模式中的电容比	40
2.13	静电激励梁的稳定性	42
2.14	MEMS 器件中的电压击穿	45
2.15	温度变化的影响	46
2.16	加速度力和声波力的影响	46
2.17	MEMS 分析软件	47
	参考文献	48
3	MEMS 器件的力学模型:动态特性分析	50
3.1	MEMS 梁的线性(小位移)动态分析	50
3.2	气体基础	51
3.3	阻尼系数/品质因数	53
3.4	MEMS 梁非线性(大变形)动态分析	54
3.5	开关和释放时间的计算	56
3.5.1	开关时间	56
3.5.2	释放时间	58
3.6	MEMS 梁的开关特性	59
3.6.1	稳态情况	59
3.6.2	速度、加速度和电流	59
3.6.3	边缘电容的影响	61
3.6.4	阻尼的作用	61
3.6.5	渐降驱动电压	62
3.7	开关能量	62
3.8	不同激励下的响应	64
3.8.1	单信号激励下的响应	65
3.8.2	多信号激励下的响应	66
3.8.3	调幅信号激励下的响应	67
3.8.4	调频信号激励下的响应	68
3.9	MEMS 梁的动态自激励和释放分析	68

3.10	互调分量的生成	69
3.11	布朗噪声分析	71
	参考文献	72
4	MEMS 开关的电磁模型	74
4.1	引言	74
4.2	MEMS 电容式并联开关的物理描述	74
4.3	MEMS 电容式并联开关的电路模型	75
4.4	MEMS 并联开关的电磁模型	76
4.4.1	up 态电容	76
4.4.2	down 态电容和电容比	77
4.4.3	电流的分布	79
4.4.4	串联电阻	80
4.4.5	电感	81
4.4.6	损耗	82
4.5	MEMS 并联电容开关的 CLR 参数与 S 参数的拟合	83
4.5.1	up 态电容	83
4.5.2	down 态下的电容和电感	85
4.5.3	MEMS 梁的串联电阻	86
4.6	直接接入式 MEMS 电容并联开关	87
4.7	DC 接触式 MEMS 并联开关	88
4.8	MEMS 串联开关的物理描述	90
4.9	MEMS 串联开关的电磁模型	91
4.9.1	up 态电容	91
4.9.2	电流的分布	93
4.9.3	down 态电阻	94
4.9.4	损耗	94
4.9.5	电感	95
4.10	DC 接触式串联开关的 CLR 参数与测量的拟合	97
4.10.1	up 态电容	97
4.10.2	down 态电阻和电感	99
4.11	实例:Rockwell 公司 MEMS 串联开关	100
4.12	CLR 参数与电容式串联开关的参数拟合	101
4.13	结论	101

参考文献	101
5 MEMS 开关库	102
5.1 Raytheon 公司 MEMS 并联电容开关	102
5.2 Michigan 大学 MEMS 并联电容开关	103
5.2.1 低压(低弹性系数)开关	103
5.2.2 低间距(高弹性系数) Ti/Au 开关	104
5.3 韩国 LG 公司高电容比 MEMS 并联开关	105
5.4 Illinois 大学 DC 接触式 MEMS 并联开关	106
5.5 Michigan 大学直接插入式 DC 接触式 MEMS 并联开关	108
5.6 台湾大学 MEMS 电容和 DC 接触式并联开关	109
5.7 其他 MEMS 并联开关	110
5.8 Rockwell Scientific 公司 DC 接触式 MEMS 串联开关	111
5.9 Motorola 公司 DC 接触式 MEMS 串联开关	112
5.10 HRL DC 接触式 MEMS 串联开关	113
5.11 Northeastern 大学和 Radant 公司直接插入 DC 接触式串联开关 ..	115
5.12 Lincoln 实验室直接插入 DC 接触式和电容接触式串联开关	116
5.13 Omron 公司 DC 接触式 MEMS 串联开关	118
5.14 Michigan 大学全金属 MEMS 串联开关	120
5.15 Samsung 公司低压 DC 接触式 MEMS 串联开关	121
5.16 UC Berkeley MEMS 串联和并联式开关	122
5.17 推一拉 DC 接触式 MEMS 串联开关	123
5.18 CEA/LETI ST 微电子公司热-静电 DC 接触式开关	124
5.19 磁驱动; Microlab 公司门闩式串联开关	125
5.20 Cronos 集成微系统公司横向 DC 接触式串联开关	126
5.21 UC Davis 横向 DC 接触开关	128
5.22 压电驱动	128
5.23 HRL MEMS 旋转开关	129
5.24 其他 MEMS 串联式开关	130
参考文献	130
6 MEMS 开关的加工和封装	135
6.1 引言	135
6.2 MEMS 电容式开关的加工工艺	135

6.3	MEMS DC 接触式串联开关的加工	139
6.4	横向 DC 接触式开关	141
6.5	MEMS 释放工艺	142
6.6	衬底转移工艺	143
6.7	Omron 公司 DC 接触式串联开关的加工、衬底转移和封装工艺	145
6.8	MEMS 开关的常规气密性封装	147
6.9	MEMS 开关的圆片级气密性封装	148
6.10	圆片级气密性封装的引出	155
6.11	总结	156
	参考文献	156
7	MEMS 开关可靠性与功率处理能力	159
7.1	MEMS 电容式开关的失效机理	159
7.2	介质层电荷注入问题的解决方法	162
7.3	DC 接触式开关的失效机理	164
7.4	接触材料问题	169
7.5	中低功率的可靠性测试	170
7.6	中高功率条件下的 MEMS 开关	172
7.6.1	串联与并联开关的开路维持电压	173
7.6.2	高功率应用的 SPST 与 SPDT 开关电路	174
7.6.3	DC 接触式开关的热开关与冷开关情况	175
7.7	电容式开关:高功率情况	175
7.7.1	电容式并联开关	175
7.7.2	电容式串联开关	180
7.8	DC 接触式开关:高功率情况	180
7.8.1	DC 接触式串联开关	180
7.8.2	DC 接触式并联开关	182
7.9	提高 DC 接触式开关的电流负载能力	182
7.10	DC 接触式开关的大电流可靠性测试	184
7.11	总结	184
	参考文献	185
8	MEMS 开关电路的设计	188
8.1	引言	188

8.2	MEMS 开关的偏置电路	188
8.3	CPW MEMS 并联电容开关的设计	190
8.3.1	C 波段到 X 波段设计	190
8.3.2	毫米波设计	191
8.3.3	W 波段设计	192
8.4	并联电容式开关的电感匹配	193
8.4.1	T 型匹配	193
8.4.2	π 型匹配	195
8.5	微带线结构中的 MEMS 并联开关	196
8.6	DC 接触式 CPW MEMS 并联开关设计	198
8.7	DC 接触式 MEMS 串联开关设计	199
8.8	MEMS 电容式串联开关设计	200
8.9	MEMS 串/并联开关设计	202
8.10	单刀多掷开关设计	203
8.10.1	串联设计	203
8.10.2	并联设计	205
8.11	双刀双掷(变换)开关设计	207
8.12	吸收式 MEMS 开关设计	207
8.13	电感谐振高隔离度 X 波段电容式并联开关	209
8.14	高隔离度并联和串联开关测试	210
8.14.1	Ka 波段调谐开关	211
8.14.2	Ka 波段“十字型”开关	212
8.14.3	W 波段高隔离开关	213
8.14.4	0.1~40 GHz 串/并联开关	214
8.14.5	0.1~26.5 GHz MEMS 吸收式开关	215
8.15	总结	216
	参考文献	216
9	MEMS 移相器	218
9.1	引言	218
9.2	反射型移相器	221
9.2.1	并联式开关实现的 N 位移相器	222
9.2.2	串联式开关实现的 N 位移相器	223
9.2.3	1 位/ N 位反射线型移相器	223

9.3	开关线型移相器	225
9.4	负载线型移相器	226
9.5	基于变容二极管和开关式电容阵列的移相器	230
9.6	基于开关网络的移相器	232
9.7	基于 1:N 开关的移相器	234
9.8	基于天线馈入的移相器	235
9.9	MEMS 移相器库	236
9.9.1	Raytheon 公司 X 波段反射线型移相器	236
9.9.2	HRL 的 X 波段反射一短截线型移相器	238
9.9.3	Rockwell 公司 0.1~40 GHz 宽带开关线型移相器	240
9.9.4	Michigan 大学/Rockwell 公司 1:N 开关线型移相器	242
9.9.5	Raytheon 公司 Ka 波段开关线型移相器	244
9.10	其他移相器设计	245
	参考文献	246
10	分布式 MEMS 移相器和开关	250
10.1	引言	250
10.2	分布式 MEMS 传输线的分析	250
10.2.1	电感对布拉格频率的影响	252
10.2.2	损耗	253
10.3	分布式 MEMS 传输线的测量	253
10.4	DMTL 的实现	255
10.5	DMTL 的相移	257
10.6	电容负载分布式传输线的设计	257
10.6.1	最优化	259
10.6.2	负载电容的影响	260
10.6.3	布拉格频率的影响	262
10.6.4	推广到其他频率的设计	264
10.7	X 波段 2 位 DMTL 共面波导移相器	265
10.8	X 波段 4 位 DMTL 微带线移相器	267
10.9	模拟和数字式 Ka/V 波段和 W 波段 DMTL 移相器	269
10.9.1	模拟式 Ka/V 波段和 W 波段移相器设计	269
10.9.2	数字式 2 位 Ka 波段移相器	270
10.10	宽带分布式 MEMS 开关	271

10.11 总结	272
参考文献	273
11 MEMS 变容器和可调振荡器	276
11.1 引言	276
11.2 品质因数基础的回顾	277
11.3 可调静电平行板电容器	279
11.4 可调的热执行和压电平行板电容器	288
11.5 可调叉指型电容器	290
11.6 MEMS 开关式电容	294
11.7 用分离定位控制的 MEMS 变容器	297
11.8 基于 MEMS 的电压控制型振荡器	299
11.9 MEMS 变容器的可靠性	301
11.10 总结	301
参考文献	302
12 微机械电感	304
12.1 引言	304
12.2 电感模型和品质因数 Q	305
12.2.1 平面电感的频率响应	305
12.2.2 平面电感的 Q 值	307
12.2.3 测量平面电感的 Q 值	308
12.2.4 金属厚度的影响	308
12.2.5 寄生电容的影响	310
12.2.6 微机械电感的设计目标	311
12.3 使用厚金属层的微机械电感	311
12.4 使用衬底腐蚀的微机械电感	312
12.5 使用自组装技术的微机械电感	315
12.6 高架平面铜电感和螺线管铜电感	316
12.7 总结	320
参考文献	320
13 可重构 MEMS 网络、滤波器、天线和子系统	323
13.1 引言	323