

半导体科学与技术丛书

微电子机械微波通讯 信号检测集成系统

廖小平 张志强 易真翔 闫浩 著



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

微电子机械微波通讯信号 检测集成系统

廖小平 张志强 易真翔 闫浩 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分为 12 章,从第 1 章共性的设计理论和实现方法出发,对 MEMS 微波器件进行了一系列设计、实验和系统级 S 参数模型的研究。这些器件包括:第 2 章的一分为二微波功分器,第 3 章的间接加热热电式功率传感器,第 4 章的直接加热热电式功率传感器,第 5 章的电容式功率传感器,第 6 章的电容式和热电式级联功率传感器,以及集成 MEMS 系统,第 7 章的在线电容耦合式微波功率检测器,第 8 章的在线定向耦合式毫米波功率检测器,第 9 章微波相位检测器和第 10 章微波频率检测器,第 11 章分别对微波功率、相位和频率检测器进行了封装研究;最后,第 12 章进行了总结和展望。由于集成的 MEMS 相位检测器和集成的 MEMS 频率检测器研究都是基于 MEMS 微波功率传感器技术,因此,本书用较大篇幅来诠释 MEMS 微波功率传感器及其集成的微波功率检测器的研究。

本书所涵盖的学术成果在本专业国际上的重要权威学术期刊,以及国际重要学术会议上已发表,同时,书中所提出的结构新颖,创新性突出,已获得中华人民共和国国家发明专利授权,应用价值高。本书适合高校电子、通讯和仪器专业的研究生和本科生作为教材和参考书,同时,也可作为相关专业的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微电子机械微波通讯信号检测集成系统/廖小平等著. —北京:科学出版社, 2016

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-051330-4

I. ①微… II. ①廖… III. ①微电子元件—信号检测 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 322713 号

责任编辑:鲁永芳 赵彦超/责任校对:邹慧卿

责任印制:张伟/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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:390 000

定价:128.00 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》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有烺

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《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 21 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做出自己的贡献。

《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

在微波通讯中,功率、相位和频率是用来表征微波信号的三大参数。例如,作为电子对抗、目标探测和信息采集的关键信息装备的雷达,在微波通讯中占有重要的地位,在雷达整机中,微波信号的产生、发射、传输、接收和处理等各个环节,都必须进行微波信号的检测。相控阵雷达的每一面阵中都有非常多的微波功率放大处理电路单元,每个单元都需要进行微波功率的检测,如何精确地进行检测一直是重要的课题;而随着微波频率的增加,信号的波长与电路中各种元器件尺寸越来越接近,电磁波通过微波器件时,除了会发生衰减,造成功率的变化外,同时还发生相移,引起相位的变化,检测并控制信号相位的变化有着非常重要的意义;同时,微波信号的频率同样已成为重要的检测参数,频率的标准及其计量方法具有最高的精度,其测量决定着其他相关参数的准确度。

低直流功耗、高抗烧毁水平、高灵敏度、高线性度、大动态范围、易集成、小体积和低成本的微波通讯信号检测集成系统已成为军用和民用微波通讯技术发展的重要装备之一,针对军用和民用微波通讯装备的以上需求,应用 RF MEMS (射频微电子机械系统) 技术,东南大学 MEMS 教育部重点实验室 RF MEMS 课题组从 2003 年开始了微电子机械微波信号检测集成系统的研究。相对应微波信号的功率、相位和频率的检测,作为 RF MEMS 课题组负责人,我已经主持完成了三个国家自然科学基金面上项目:“在线式 MEMS 微波功率传感器的设计理论和实现方法的研究”(批准号:60676043,起止时间:2007 年 1 月~2009 年 12 月),“基于 MEMS 功率传感技术的单片微波相位集成检测系统的设计理论和实现方法”(批准号:60976094,起止时间:2010 年 1 月~2012 年 12 月),“基于 MEMS 微波功率传感器的无线接收式微波频率检测集成系统的设计理论和实现方法”(批准号:61076108,起止时间:2011 年 1 月~2013 年 12 月)。另外,已经主持完成了一项国家 863 计划(国家高技术研究发展计划)项目:“在线式 MEMS 微波功率传感器及其集成检测系统研究(批准号:2007AA04Z328,起止时间:2007 年 10 月~2010 年 5 月)。通过以上科研,基于 GaAs MMIC 兼容工艺,课题组研制了 MEMS 集成的在线式微波功率检测器和 MEMS 集成的微波相位检测器,以及 MEMS 集成的微波频率检测器,其创新性表现为:全是由无源器件集成,实现零直流功耗;采用 MEMS 电容式和热电式两种微波功率传感器级联结构,不仅扩展了测量动态范围,而且提高了灵敏度和抗烧毁水平;同时,具有高线性度、易集成、小体积和低成本等 MEMS 的鲜明特点。

课题组深入地进行了模拟、设计、制备、测试和封装等工作,最终建立了一整套微电子机械微波通讯信号检测集成系统的设计理论和实现方法,包括:

①MEMS 热电堆、MEMS 固支梁和悬臂梁、功率分配器和功率合成器、耦合器和移相器等的微波集成设计,以及 MEMS 微波功率传感器、相位和频率检测器的电-热-电转换模型和电-力-电转换模型建立的设计理论研究;②应用理论研究成果指导微波通讯信号检测集成系统的设计,与 GaAs MMIC 工艺兼容的 MEMS 工艺进行的单片系统集成、测试和封装;③实验结果验证微电子机械微波通讯信号检测集成系统设计理论和实现方法的有效性。

课题组在微电子机械微波信号检测集成系统方面已获得中华人民共和国国家发明专利授权 60 余项,同时,在 *IEEE TED\EDL\MWCL\JMEMS* 国际重要专业期刊和 *IEEE Sensor\JMM\SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL* 等权威专业期刊已发表 50 多篇学术论文,在重要国际学术会议上也发表了 10 多篇学术论文,具有较好的国际影响力。我们一直活跃在国际上本专业的研究前沿,引起了国内外同行的广泛关注。

课题组在微电子机械微波信号检测集成系统的理论和技术方面已经进行和正在充分的国际上的展示,现在到了回报国家自然科学基金委和国家 863 计划,以及感谢国内专家和同行十来年支持的时候,我和我的三个学生(现留在东南大学 MEMS 教育部重点实验室任教的张志强博士 (zqzhang@seu.edu.cn) 和易真翔博士 (xp@seu.edu.cn),以及还正在攻读博士学位的闫浩博士生 (yanhao@seu.edu.cn)),基于以上科研和学术成果,齐心协力,通力合作,各尽其能,付出相同的工作量,完成了这本微电子机械微波信号检测集成系统的专著,以奉献给国内的同行和高校学子。

在此感谢国家自然科学基金和国家 863 计划的资助!感谢中国电子科技集团第 55 研究所陈堂胜研究员和第 29 研究所赵满高工分别在 MMIC 工艺加工和微波封装方面的大力支持!感谢清华大学尤政院士、北京邮电大学的邓中亮教授和东南大学洪伟教授在科研中所提出的宝贵建议!感谢东南大学 MEMS 教育部重点实验室和电子科学与工程学院,以及其他各有关院系和机关领导及同事的支持!黄庆安教授一直在科研方向、仪器设备和国际学术交流等方面非常支持 RF MEMS 课题组的发展,李伟华教授在本书的写作方面给予了许多有益的建议。

感谢科学出版社和责任编辑鲁永芳老师和责任校对邹慧卿老师的大力支持!感谢江苏高校品牌专业建设工程资助项目在出版经费方面的资助!

感谢过去和现在的东南大学 MEMS 教育部重点实验室 RF MEMS 课题组的研究生!我们不但拥有这个共同的名字,而且也拥有这个共同的科研和学术经历。过去的十来年,RF MEMS 理论和技术在我们师生眼前呈现了一个多学科交叉的、可充分发挥想象力和聪明才智的研究平台,赋予了我们突破传统微波通讯信号检

测集成系统研究瓶颈的信心和能力；科研中我们提出了许多创新性的器件结构，学术上我们建立了许多有自己思想和见解的理论模型，最终形成了这一整套微电子机械微波通讯信号检测集成系统的设计理论和实现方法。课题组将继续从事这个我们一直认为非常有趣，也非常有学术发展潜力和实际应用价值的微电子机械微波信号检测集成系统的研究工作。最后，感谢我们的家人的支持和帮助！

RF MEMS 领域内容广泛，日新月异，微电子机械微波通讯信号检测集成系统的设计理论和实现方法的发展将越来越迅速。由于作者学识和水平有限，书中的疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

廖小平 (xpliao@seu.edu.cn)

东南大学 MEMS 教育部重点实验室，南京

2016 年 9 月 28 日

目 录

第 1 章 设计理论和实现方法	1
1.1 共面波导的设计理论和实现方法	1
1.2 模型的建立方法	3
1.2.1 微波集总模型	3
1.2.2 微波-热-电转换模型	4
1.2.3 微波-力-电转换模型	5
1.3 与 GaAs MMIC 兼容的 MEMS 工艺	6
1.4 微波、热电势和力的测试平台	6
1.5 系统级 S 参数模型	9
1.6 MEMS 集成的微波功率检测器在微波接收机前端的应用	9
1.7 MEMS 集成的微波相位检测器在锁相环中的应用	10
1.8 MEMS 集成的微波频率检测器在微波接收检测中的应用	11
1.9 小结	15
参考文献	15
第 2 章 微波功率分配器	17
2.1 引言	17
2.2 微波功率分配器的模拟和设计	17
2.3 微波功率分配器的性能测试	22
2.4 微波功率分配器的系统级 S 参数模型	25
2.5 小结	31
参考文献	31
第 3 章 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器	32
3.1 引言	32
3.2 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器	32
3.2.1 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的模拟和设计	32
3.2.2 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的性能测试	42
3.2.3 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的系统级 S 参数模型	47
3.3 频率补偿型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器	53
3.3.1 频率补偿型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的模拟和设计	53
3.3.2 频率补偿型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的性能测试	55

3.4 无线接收型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器	60
3.4.1 无线接收型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的模拟和设计	60
3.4.2 无线接收型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的性能测试	62
3.5 三通道型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器	68
3.5.1 三通道型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的模拟和设计	69
3.5.2 三通道型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的性能测试	72
3.6 小结	75
参考文献	76
第 4 章 MEMS 直接加热热电式微波功率传感器	78
4.1 引言	78
4.2 MEMS 直接加热热电式微波功率传感器的模拟和设计	78
4.2.1 结构和原理	78
4.2.2 模拟和设计	80
4.3 MEMS 直接加热热电式微波功率传感器的测试	85
4.3.1 微波性能的测试	86
4.3.2 灵敏度的测试	87
4.3.3 响应时间的测试	88
4.4 MEMS 直接加热热电式微波功率传感器的系统级 S 参数模型	90
4.4.1 系统级 S 参数模型的建立	90
4.4.2 微波频率、隔直电容和热电堆的电阻对模型的影响	91
4.5 小结	95
参考文献	95
第 5 章 MEMS 电容式微波功率传感器	96
5.1 引言	96
5.2 MEMS 固支梁电容式微波功率传感器	96
5.2.1 MEMS 固支梁电容式微波功率传感器的模拟和设计	96
5.2.2 MEMS 固支梁电容式微波功率传感器的性能测试	107
5.3 MEMS 悬臂梁电容式微波功率传感器	114
5.3.1 MEMS 悬臂梁电容式微波功率传感器的模拟和设计	114
5.3.2 MEMS 悬臂梁电容式微波功率传感器的性能测试	119
5.4 MEMS 电容式微波功率传感器的系统级 S 参数模型	124
5.5 小结	128
参考文献	128
第 6 章 MEMS 级联微波功率传感器	130
6.1 引言	130

6.2 MEMS 电容式和热电式级联微波功率传感器	130
6.2.1 MEMS 电容式和热电式级联微波功率传感器的模拟和设计	130
6.2.2 MEMS 电容式和热电式级联微波功率传感器的性能测试	131
6.2.3 MEMS 电容式和热电式级联微波功率传感器的系统级 S 参数模型	137
6.3 MEMS 在线式和热电式级联微波功率传感器	138
6.3.1 MEMS 在线式和热电式级联微波功率传感器的模拟和设计	138
6.3.2 MEMS 在线式和热电式级联微波功率传感器的性能测试	139
6.3.3 MEMS 在线式和热电式级联微波功率传感器的系统级 S 参数模型	142
6.4 小结	143
参考文献	143
第 7 章 MEMS 在线电容耦合式微波功率检测器	145
7.1 引言	145
7.2 MEMS 在线电容耦合式微波功率检测器的模拟和设计	145
7.2.1 结构和原理	146
7.2.2 模拟和优化	151
7.3 MEMS 在线电容耦合式微波功率检测器的测试	153
7.3.1 具有阻抗匹配和开路传输线补偿电容结构	154
7.3.2 具有阻抗匹配、开路传输线补偿电容和状态转换开关结构	158
7.4 MEMS 在线电容耦合式微波功率检测器的系统级 S 参数模型	163
7.4.1 考虑损耗和相移的微波集总模型的建立	163
7.4.2 MEMS 膜对微波信号幅度和相位的影响	166
7.4.3 实验验证和误差讨论	167
7.5 小结	171
参考文献	171
第 8 章 MEMS 在线定向耦合式毫米波功率检测器	173
8.1 引言	173
8.2 MEMS 在线定向耦合式毫米波功率检测器的模拟和设计	173
8.2.1 结构和原理	173
8.2.2 基于 MEMS 技术 CPW 定向耦合器的设计	176
8.2.3 MEMS 在线定向耦合式毫米波功率检测器的模拟	181
8.3 MEMS 在线定向耦合式毫米波功率检测器的测试	185
8.3.1 毫米波性能的测试	185
8.3.2 电容式传感器的灵敏度测试	187
8.3.3 热电式传感器的灵敏度测试	188
8.4 MEMS 在线定向耦合式毫米波功率检测器的系统级 S 参数模型	190

8.5 小结	192
参考文献	193
第 9 章 MEMS 微波相位检测器	194
9.1 引言	194
9.2 单端口 MEMS 微波相位检测器	194
9.2.1 单端口 MEMS 微波相位检测器的模拟和设计	194
9.2.2 单端口 MEMS 微波相位检测器的性能测试	196
9.2.3 单端口 MEMS 微波相位检测器的系统级 S 参数模型	202
9.3 双端口对称式 MEMS 微波相位检测器	211
9.3.1 双端口对称式 MEMS 微波相位检测器的模拟和设计	211
9.3.2 双端口对称式 MEMS 微波相位检测器的性能测试	216
9.3.3 双端口对称式 MEMS 微波相位检测器的系统级 S 参数模型	221
9.4 小结	227
参考文献	227
第 10 章 MEMS 微波频率检测器	229
10.1 引言	229
10.2 一分二式 MEMS 微波频率检测器	229
10.2.1 一分二式 MEMS 微波频率检测器的模拟和设计	229
10.2.2 一分二式 MEMS 微波频率检测器的性能测试	234
10.2.3 一分二式 MEMS 微波频率检测器的系统级 S 参数模型	237
10.3 一分三式 MEMS 微波频率检测器	242
10.3.1 一分三式 MEMS 微波频率检测器的模拟和设计	242
10.3.2 一分三式 MEMS 微波频率检测器的性能测试	246
10.3.3 一分三式 MEMS 微波频率检测器的系统级 S 参数模型	249
10.4 MEMS 在线式微波频率检测器	254
10.4.1 MEMS 在线式微波频率检测器的模拟和设计	254
10.4.2 MEMS 在线式微波频率检测器的性能测试	257
10.4.3 MEMS 在线式微波频率检测器的改进结构	259
10.5 小结	261
参考文献	262
第 11 章 MEMS 封装	263
11.1 引言	263
11.2 MEMS 微波功率传感器的封装研究	263
11.2.1 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器的封装与测试	263
11.2.2 频率补偿型 MEMS 间接加热热电式微波功率传感器封装与测试	265

11.3 MEMS 在线电容耦合式微波功率检测器的封装研究	275
11.4 MEMS 微波相位检测器的封装研究	286
11.5 MEMS 微波频率检测器的封装研究	289
11.6 小结	290
参考文献	290
第 12 章 总结和展望	292
12.1 总结	292
12.2 展望	293
参考文献	294

第1章 设计理论和实现方法

本章介绍微电子机械 (MEMS) 微波通讯信号检测集成系统中微波器件及其集成的检测器的结构模拟和设计、模型建立、与 GaAs MMIC 兼容的 MEMS 工艺、测试平台和系统级散射 (S) 参数模型, 以及在微波通讯中应用方向的一个从具体到普适的设计理论和实现方法的流程, 各个环节紧密联系, 从设计到实验前向的研究完成了设计功能的实现, 而从实验到设计逆向的研究有助于分析和验证设计的有效性。

本书各章节将针对具体的 MEMS 微波器件及其集成的微波信号功率、相位和频率检测器进行详细的设计理论和实现方法的研究。本章只是从设计、模型、工艺、测试、系统级建模和应用方向几个方面, 总结在微电子机械微波信号检测集成系统的研究中提炼出的共性设计理论和实现方法, 完成一个从具体到普适的升华。

1.1 共面波导的设计理论和实现方法

MEMS 微波信号检测集成系统均采用共面波导 (CPW) 传输线作为微波输入和输出端口。CPW 是由三个在同一面的导体构成, 其中中间导体为 CPW 信号线, 两边导体为 CPW 地线, 其设计灵活, 制备简单, 不需要过孔, 方便连接, 辐射损耗小, 隔离度好^[1]。CPW 的特征阻抗主要取决于信号线的宽度, 以及信号线和地线之间的间距, 可根据具体情况调整这些尺寸以实现相同的特征阻抗值, 因而 CPW 尺寸的缩小没有绝对的限制。

图 1-1 为 CPW 传输线和 MEMS 固支梁的示意图, 对于 MEMS 微波器件的设计, 可利用 MEMS 固支梁实现被分隔传输线 (如地线) 的连接。MEMS 固支梁悬浮在衬底之上, 在其下方可设计其他元件, 而不会造成各元件之间相连或者较大的寄生电容, 从而实现了跨线连接, 片上 MEMS 固支梁与传统的片外键合线相比具有更高的集成度。在下面各章节中, 将依次具体介绍各种不同的 MEMS 微波器件性能和所构成器件整体性能的设计。

在软件方面, 采用 HFSS 电磁仿真软件设计 MEMS 微波器件及其集成检测器的微波性能, 采用 ANSYS 有限元软件分析其热学分布, 利用 ADS 电路仿真软件模拟其等效电路结构。在设计时, 各软件之间相互交错使用, 以快速地达到设计

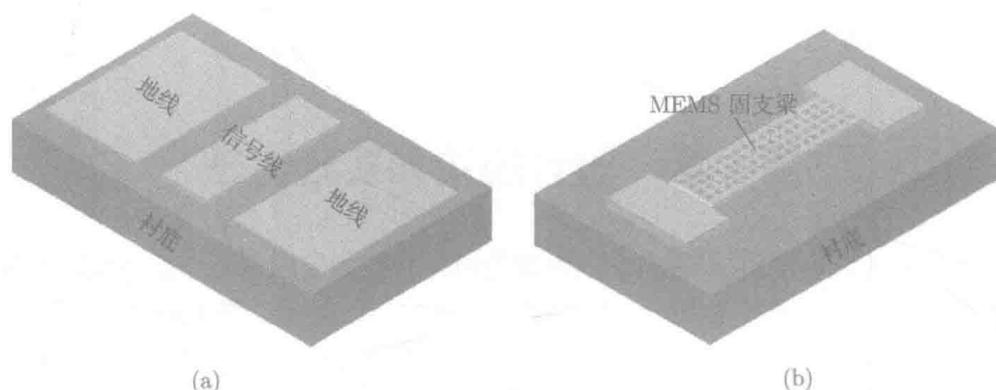


图 1-1 CPW 传输线和 MEMS 固支梁的示意图

(a) CPW; (b) MEMS 固支梁

目标。例如，对于一个特征阻抗为 50Ω 的 CPW 设计而言，先采用 ADS 软件附带 lineCal 工具计算出 CPW 信号线宽度、信号线和地线之间的间距等结构参数。图 1-2 为在 ADS 软件中 lineCal 模块计算得到的 CPW 尺寸，当一个 $2.3\mu\text{m}$ 厚的 CPW 被制作在 $100\mu\text{m}$ 厚的 GaAs 衬底时，在 10GHz 时 CPW 特征阻抗设置为 50Ω ，可得 CPW 信号线的宽度为 $100\mu\text{m}$ ，以及信号线和地线之间间距为 $58\mu\text{m}$ ；接着，再由 HFSS 软件对计算出的 CPW 结构参数进行优化；最终得出精确的 CPW 结构尺寸，图 1-3 为 HFSS 模拟的 CPW 端口特征阻抗和 S 参数。

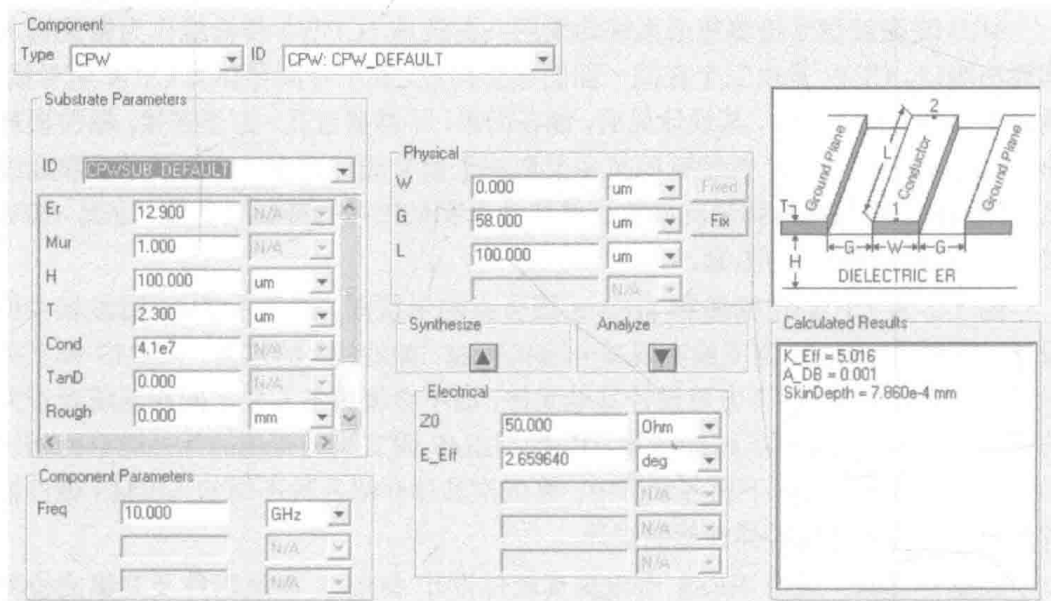


图 1-2 在 ADS 软件中 lineCal 模块计算得到的 CPW 尺寸

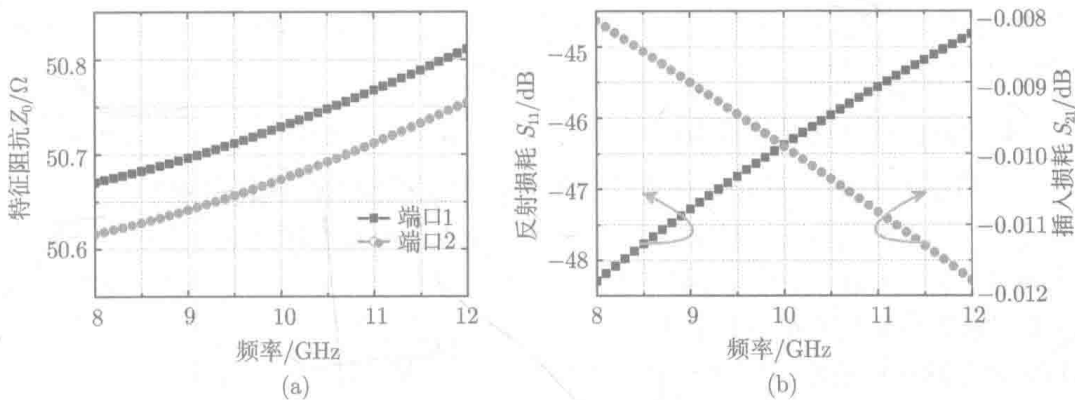


图 1-3 HFSS 模拟的 CPW 端口特征阻抗和 S 参数

(a) 特征阻抗; (b) 反射损耗 S_{11} 和插入损耗 S_{21}

1.2 模型的建立方法

1.2.1 微波集总模型

MEMS 微波器件均可看作二端口微波网络, 建立其微波模型的主要步骤包括: 首先, 对 MEMS 微波器件建立二端口集总等效电路模型; 接着, 将建立的等效电路模型划分成多个基本的二端口等效电路单元; 然后, 将多个单元网络进行级联分析; 最后, 根据各网络参量之间的相互转换关系, 得到 MEMS 微波器件的微波模型, 即散射 (S) 参数。其中, 在第一步中, MEMS 微波器件的集总等效电路模型的建立是至关重要的, 一个好的集总电路模型是指能够反映器件的各个部分的微波特性, 从而由模型计算的结果能够最大程度地接近实际结果; 在第二步中, 采用常见的二端口等效电路单元^[2], 有利于简化计算; 在第三步中, 在阻抗 ($[Z]$)、导纳 ($[Y]$) 和转移 ($[A]$) 三个反映网络参考面上电压与电流关系的参量中, 采用转移参量矩阵分析级联网络, 转移参量矩阵能够用来建立网络输出端口的电流和电压与输入端口的电流和电压关系。对于 N 级非归一化或归一化转移参量矩阵, 分别为 $[A]_1, [A]_2, \dots, [A]_N$, 则它们的级联网络的非归一化或归一化转移参量矩阵为

$$[A]_{\text{总}} = [A]_1[A]_2 \cdots [A]_N \tag{1-1}$$

在第四步中, 根据转移和散射参量的转换关系, 可得 MEMS 微波器件的反射损耗 S_{11} 和插入损耗 S_{21} , 其分别表示为

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{A + B - C - D}{A + B + C + D} \\ S_{21} = \frac{2}{A + B + C + D} \end{cases} \tag{1-2}$$

其中, S_{11} 为当端口 2 连接匹配负载时在端口 1 处的反射损耗; S_{21} 为从端口 1 到端口 2 的插入损耗。

1.2.2 微波-热-电转换模型

所设计的 MEMS 热电式微波功率传感器需要考虑微波-热转换模型和热-电转换模型, 对于微波-热转换模型, 输入的微波功率完全被终端负载电阻吸收而转化为热量。图 1-4 为一个终端连接负载电阻的传输线示意图, 假设不考虑传输线上的损耗, 当该传输线连接的负载 $Z_0 \neq R_L$ 时, 负载上的电压和电流之比则为 R_L , 此时大部分功率被负载吸收而转化为热量, 但由于传输线和负载电阻之间的不匹配产生了一部分的反射功率; 而当该传输线连接的负载 $Z_0 = R_L$ 时, 传输线与负载电阻之间匹配, 此时全部功率被负载电阻吸收而转化为热量, 反射损耗 S_{11} 为零。当输入微波功率为 P_{in} , 可得在终端负载上的热功率 P_{th} 表示为

$$P_{th} = P_{in} \cdot S_{21} \quad (1-3)$$

值得注意的是, 在式 (1-3) 中包括了插入损耗 S_{21} , 表示从输入端传输到负载上的功率比。对于热-电转换模型, 将终端电阻产生的热量转化为直流电压。可采用热电堆元件, 基于 Seebeck 效应^[3] 将热能转化为直流热电势, 热电堆是由一系列热电偶串联连接构成的, 其输出热电势 V_{th} 表示为

$$V_{th} = \alpha \sum_i^{N_{th}} (T_h - T_c) \quad (1-4)$$

其中, α 为 Seebeck 系数, T_h 和 T_c 分别为热电堆的热端和冷端的温度, N_{th} 为热电偶的数量。根据稳态热传导方程, 可建立热功率 (P_{th}) 与温差 ($T_h - T_c$) 之间的一维解析方程。

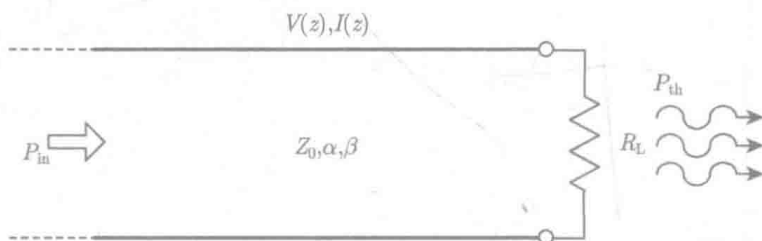


图 1-4 一个终端连接负载电阻的传输线示意图

因此, 由式 (1-2), 实现了 MEMS 微波器件的微波集总模型; 而由式 (1-2) ~ 式 (1-4), 实现了 MEMS 集成微波检测器的微波集总模型以及微波-热-电转换模型。在下面各章节中, 将分别建立 MEMS 微波器件的微波集总模型, 并给出相应的分析和讨论, 最后通过模拟和实验验证模型的正确性。