

毫米波技术基础 研究进展

李嗣范 何立权

国家自然科学基金资助重大项目

RECENT ADVANCES ON
MILLIMETER WAVE THEORY AND TECHNOLOGY

东南大学出版社

国家自然科学基金重大项目

毫米波技术基础研究进展

项 目 编 号 9687002

主 持 人 李嗣范

学术领导小组成员 李嗣范

何立权

林德云

陈效健

夏冠群

子 课 题 负 责 人 李嗣范 陈水生 孙忠良

王蕴仪 何立权 高葆新

冯正和 章文勋 夏冠群

东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 简 介

本书论述了我国在三毫米波段固态器件及集成电路的基础理论、固态源和锁相源、低噪声前端、集成控制电路和调制器、六端口反射计、毫米波天线和毫米波电路 CAD 软件包等方面的最新研究成果。它是国家自然科学基金重大项目“三毫米波段的技术基础”的研究总结。书中还介绍了研制成功的最新成果。

本书可供从事毫米波技术的工程技术人员和有关专业的本科生、研究生和高等院校教师参考。

毫米波技术基础研究进展

李嗣范 何立权

东南大学出版社出版

南京四牌楼 2 号

江苏省新华书店发行 南京农业大学第二印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16.5 字数 381,2 千

1992 年 5 月第 1 版 1992 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—1500 册

ISBN7—81023—600—8

TN·56

定价: 12 元

序 言

随着我国毫米波技术的发展,八毫米波段技术已逐渐成熟,开拓三毫米波段技术不仅对国民经济和国防建设显得越来越迫切,而且具备了可能性。为此国家自然科学基金委在 1987 年经过专家论证后批准了“三毫米波段的技术基础研究”重大项目,该项目自 1987 年 7 月开始至 1990 年 12 月完成。项目总的奋斗目标是全面填补我国三毫米波段技术的空白,追赶国际先进水平,为我国开发三毫米频谱资源打下基础。具体地说,该项目研究三毫米波段固态器件及集成电路的基础理论,研究低噪声技术,设计和研究具有工程应用价值的高性能器件和电路部件,为今后全面开发三毫米波段的应用系统,使我国的电子、航天、制导、遥感、通信和成像技术跃上新台阶奠定良好的技术基础。

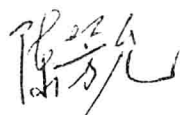
这一重大项目得到主持单位东南大学和联合研究单位的大力支持,在学术带头人李嗣范教授和学术领导小组有力的组织领导和各单位 140 名研究人员的共同努力下,三年多来在三毫米波段的技术基础研究方面取得了重大进展。研究人员对毫米波电磁理论进行了深入细致的研究,发展了一些新的分析方法,对新型传输线、各种不连续性进行了分析,研制了一系列无源部件。研制成快速、通用的毫米波电路 CAD 软件包,在非线性电路理论上,提出改进的谐波平衡法,编制了微波混频器通用分析软件包,研制成三毫米接收前端,研制了毫米波集成控制电路和调制器。在器件研制上,成功地研制了三毫米 IMPATT 管与振荡器,耿氏管功率合成器。准光功率合成器和两种固态锁相源。研制了八毫米梁式引线混频管。在测试手段上,研制了三毫米六端口反射计。在毫米波天线方面,对光栅天线、无辐射介

质波导天线和微带类天线作了多种分析与探索,这些研究工作,相互配套,形成从理论、分析与设计软件,器件与部件研制,天线和测试系统的系列成果。

该项目已发表学术论文 210 篇,其中在学术刊物上发表 95 篇,在国际学术会议上发表 63 篇。已鉴定或评议的成果 41 项,培养了博士后、博士生、硕士生共 73 人。该重大项目全面完成了研究任务,达到了预期目标。

作为国家自然科学基金资助的重大项目,三毫米波段技术基础研究具有重大科学意义和重要应用前景,该项目研究人员结合我国实际,研究内容布局系统性强而在许多关键技术上取得了重大进展,在相当多的方面达到国际先进水平,为我国开发三毫米波段在理论上与技术上奠定了良好的基础,完成了预期的目标。

本书汇集了该项目的研究总结报告,相信这些研究成果的推广、交流将大大地促进我国毫米波技术的发展。



1992. 3

前 言

近十几年来毫米波技术取得了迅速进展。随着固态毫米波器件和新型传输介质的开发,毫米波集成技术趋于成熟并得到了广泛的应用。为了开拓我国的三毫米波段技术,尤其是在三毫米波段的集成化技术方面追赶国际先进水平,国家自然科学基金委员会在 1987 年批准并资助由东南大学李嗣范教授主持的“三毫米波段的技术基础研究”重大项目。东南大学、清华大学、机械电子工业部第 55 研究所、中国科学院上海冶金研究所、中国科学院紫金山天文台和华中理工大学等单位的 140 名研究人员参加了研究工作。1991 年 11 月该项目通过了国家自然基金委组织的专家组验收,对该项目完成的综合评价为优秀。

《三毫米波段的技术基础研究》重大项目分为九个课题,它们是:毫米波电磁理论基础研究、三毫米固态功率源、三毫米固态锁相源、毫米波混合集成低噪声接收机前端的研究、毫米波集成控制电路和调制器、三毫米六端口网络测试技术、毫米波天线和三毫米梁式引线二极管。现将各个课题的研究工作总结、成果汇编出版本书,以使研究成果推广、交流。

本书在编写过程中得到了各个子课题负责人和东南大学电磁场与微波技术教研室老师们的支持和帮助,本项目执行过程中得到了国家自然科学基金委员会信息学部毛士艺教授和张志健高工等的指导,得到了以学部委员陈芳允教授为首的专家评审组和以吴泳诗教

授为首的专家验收组的专家们热情指导和帮助,仅此表示诚挚的感谢。

何立权

1992年3月

目 录

(一)毫米波电磁理论基础研究·····	(1)
(二)三毫米固态功率源 ·····	(31)
(三)三毫米固态锁相源 ·····	(65)
(四)毫米波混合集成低噪声接收机前端的研究 ···	(85)
(五)毫米波集成控制电路和调制器·····	(103)
(六)毫米波电路 CAD 软件研究 ·····	(151)
(七)三毫米六端口网络测试技术·····	(171)
(八)毫米波天线·····	(205)
(九)三毫米梁式引线混频管·····	(231)

(一)

毫米波电磁理论基础研究

本课题的研究内容包括:电磁场边值问题方法论研究与改进,毫米波传输线特性研究,毫米波传输线不连续性等效电路的研究、3mm 波段滤波器理论计算及模型,3mm 波段定向耦合器理论计算及模型,部分或全部为各向异性介质基片的毫米波传输线特性研究,毫米波鳍线隔离器和环行器的研究以及毫米波非互易器件的理论和实验研究。

本课题的总结报告由下列四个方面的构成:

I. 电磁场边值问题方法论研究及其在毫米波电路分析中的应用。由东南大学陈忆元执笔。

II. 3mm 波段滤波器及定向耦合器的研究。由东南大学陈忆元执笔。

III. 各向异性媒质在毫米波集成电路中的应用研究。由东南大学杨铨让执笔。

IV. 毫米波非互易器件的理论和实验研究。由华中理工大学漆兰芬执笔。

本课题由东南大学 李嗣范 主持杨铨让,漆兰芬等负责了部分专题的研究。

目 录

I	电磁场边值问题方法论研究及其在毫米波电路分析中的应用	5
	一、概述	
	二、电磁场数值方法论的研究	
	三、毫米波电路二维电磁场边值问题的研究	
	四、毫米波电路三维电磁场边值问题的研究	
II	3mm 波段滤波器及定向耦合器的研究	8
	一、概述	
	二、鳍线滤波器的研制	
	三、鳍线定向耦合器的研制	
III	各向异性媒质在毫米波集成电路中的应用研究	9
	一、研究目的意义	
	二、研究内容及技术关键	
	三、研究成果	
	四、结论	
	五、参考文献	
IV	毫米波非互易器件的理论和实验研究	16
	一、课题意义及列题背景	
	二、NRD 波导及 GNRD 波导环行器的研究	
	三、3mm 波导环行器的研究	
	四、改进的意见与建议	
	参考文献	
V	结论	20
VI	毫米波电磁场理论基础研究的论著目录	21
VII	毫米波电磁场理论基础研究的成果简介	25
	一、8mm 波段鳍线定向耦合器	
	二、8mm 波段宽带波导 Y 结环行器	
	三、Ka 和 W 波段 E 面带通滤波器	
	四、3mm 波段鳍线定向耦合器	
	五、毫米波无源电路的数值分析与应用	
	六、毫米波非互易器件的理论和实验研究	

I 电磁场边值问题方法论研究

及其在毫米波电路分析中的应用

一、概述

在对毫米波电路的分析研究中,毫米波传输线及其不连续性的研究是两个基本的课题。传统上,毫米波传输线仍沿用厘米波段广泛使用的波导。由于波导具有规则的边界以及波导内的介质材料是均匀的,因而波导的场可以找到解析解,这给分析波导电路带来很大的方便。但是,在毫米波段,波导尺寸显著缩小,加工精度要求提高,使成本增加。近年来各种类型的毫米波集成电路不断涌现,例如鳍线,悬置微带线,共面线…等,这些新型的传输线给毫米波电路的研究带来了新的活力。然而我们看到,这些新类型的传输线存在不规则边界及不均匀的介质,因而使得对这些传输线的分析变得十分困难。多年来,人们一直在探索分析这些电路的各种数值方法。本课题以毫米波传输线的二维问题、三维问题及其应用为主要内容着重研究集成电路,以数值方法为主结合解析法、或将不同的数值方法结合起来,或者提出了一些新的数值方法,这些方法有效地解决了毫米波电路中多种类型的问题。

二、电磁场数值方法论的研究

由上所述,由于毫米波集成电路边界的复杂性及介质的不均匀性,要得到毫米波传输线及其不连续性等效电路的解析解是非常困难的,随着计算机应用的普及,各种数值方法

应运而生,这些数值方法归纳起来大致有十种,用这十种数值方法已经解决了一系列毫米波集成电路中的电磁边值问题。然而,我们看到,没有一种数值方法是完美的,某种数值方法对解某类问题显示其优越性,却对另一类问题显得不合适或者该方法本身存在某种不足。因此有必要寻找新的方法或者将已有的数值方法分别结合起来,派生出新的方法,扬长避短,使新的方法更具活力。

在本课题的研究中,利用横向谐振法结合谱域法,横向谐振法结合奇异积分方程技术,横向谐振法结合变分技术,矩量法结合一般的网络分析技术,矩量法结合应用电磁场中的感应定理,Galerkin 模式展开结合配置法等派生出的新的方法,解决了一系列毫米波集成电路中的二维和三维电磁场问题。提出了一种计算量小,精度高的分析方法—修正边界元法用于分析波导单模、混合模和不连续性问题,该方法采用满足部份边界条件的修正格林函数,从而将边界积分方程压缩到另一部份边界上,分段数和矩阵阶数大幅度减小,计算量随之降低。另外还提出了无正交变换的直线法,给出了一种 $O(h^4)$ 的高精度离散化格式,并将这种方法推广应用于复合矩形域,曲边矩形域上二维电磁场边值问题的分析和波导不连续性的分析。这种方法的突出优点是所需计算机存储空间和计算量小,且无相对收敛问题。该课题的研究中还提出了一种分析任意截面波导的新方法—辅助位法。这种方法用一外接规则波导的本征模作为辅助位,利用格林第二定理建立了关于原问题位函数的积分方程,然后对积分方程进行求解,其优点是简单,计算量小。

三、毫米波电路二维电磁边值问题的研究

这类问题的研究中,利用不等距直线法原理,导出了实对称三对角矩阵形式的特征方程,从中可以得到 E 面介质填充矩形波导中的系列本征模;引伸直线法的基本思想,导出了不同介质区中电磁场的递推关系,研究了多层介质屏蔽平面传输线的色散特性,同时对这类传输线,又提出了一种推导多层介质结构谱域格林函数的简单而有效的方法;利用矩量法并结合感应定理,研究了金属层厚度、波导壁槽以及介质衬底截面对传输线传输特性的影响;利用二次谐振及网络原理给出了一种分析一般型矩形介质波导的有效分析方法,方法原理简单,计算量小。

四、毫米波电路三维电磁边值问题的研究

毫米波电路中,除了各种类型的传输线作为电磁波的传输媒介以外,还要利用这些传输线的不连续性构成各种毫米波元件,求得这些不连续性的等效电路参量是设计各种毫米波元件的基础。本课题利用已有的或新提出的各种数值方法及其它们之间的相互组合,求解分析了各种不连续性的三维电磁场问题,主要包括:

1. 全高度 E 面膜片不连续性的研究

全高度 E 面膜片不连续性是构成毫米波滤波器的基础。本课题利用横向谐振原理,把不连续性部分用假想的短(开)路面封闭,从而把不连续性问题转化成谐振腔问题,其最大优点在于:在确定不连续性对主模场的影响时,可以避免繁冗的高次模计算。谐振腔中的场可用适当的位函数描述,然后通过确定满足适当边界条件的位函数计算谐振腔处于谐振状态下的短(开)路面位置。我们提出了二种数值方法解谐振腔中的位函数:一是奇异

积分方程技术,该方法在处理该问题时显示了快速收敛的特点,对于通常的结构参数,一般只需阶数为 2×2 的特征方程就可获得相当高精度的结果;二是谱域法,我们用该方法首次研究了纵向不等长双侧 E 面膜片不连续性,因为谱域格林函数和待定的带上未知电流可以采用类似解准 TEM 波传输线静态参量的途径获得,因而该方法显得十分简洁。研究结果表明:在结构参数相同的前提下,单侧 E 面膜片不连续性的电抗参量总是大于双侧 E 面膜片不连续性的电抗参量。

矩量法结合一般的网络分析技术是我们提出的研究全高度 E 面膜片不连续性的第三种分析方法,该方法的基本原理是:引入广义波导概念,将含有 E 面膜片的部分视为一个广义矩形波导,把有限长 E 面膜片不连续性等效成被一段有限长均匀传输线联结的二个矩形波导接头,然后用矩量法求出接头的广义散射参量,用网络分析技术计算有限长 E 面膜片总的散射参量。该方法考虑了膜片的厚度效应,由于它需要高次模信息,为此,我们还提出了一个确定 E 面多层介质填充矩形波导系列本征模的方法。在研究该类不连续性的基础上,我们还提出了一种毫米波窄壁 E 面槽定向耦合器结构,并把上述第三种方法推广,研制了该定向耦合器软件,并制成了实验样品。

2. 一般平面传输线不连续性的研究

该类不连续性常见形式有:微带和悬置微带线间隙、阶梯和开路终端,部分高度 E 面带,槽线 E 面带,阶梯和短路终端等。我们采用的分析方法主要是横向谐振法结合变分技术,该法有效地避免了高次混合模的计算。首先,我们用数学方法证明了一般型谐振腔的变分方程,揭示了在谐振腔内部出现不连续性分界面时,只要试探电磁场在除去该分界面的其它区域满足无源形式的 Maxwell 方程,变分方程即可表示为不连续性分界面上的面积分形式。把得到的变分方程一般形式具体应用到由平面传输线不连续性构造出的平面谐振器结构,可以得到仅以带上电流和(或者)槽中电场为未知参量的特征方程,具有稳定的性质,这样就减少了三维电磁场边值问题的计算工作量。在起初的研究中,我们大都假定了金属带厚度为零且屏蔽波导为理想矩形,最近我们放宽了这一限制,研究金属带厚度和波导壁槽对不连续性电路参数的影响。

3. 波导不连续性的研究

该项研究中,推广了直线法的应用,研究了波导中任意形状的多个感性金属杆和有限厚度的多个容性膜片,其基本原理是:在距离中心面整数倍波导波长的地方引入假想参考面,用直线法解奇偶模激励下的该假想参考面处的输入导纳。该方法的优点在于计算量几乎与金属杆或膜片数量无关。此外还利用奇异积分方程法研究了敷于介质基片上的容性和感性膜片窗口。该方法的原理是:将波导中的主模场和由不连续性激发的高次场模迭加,用窗口面上的场表示,并引入辅助位函数,构造出标准形式的奇异积分方程,以得到具有快速收敛性的特征方程。

4. 毫米波振荡器外电路阻抗的分析

常用的同轴波导型毫米波振荡器结构由同轴线,径向线和带短路活塞的矩形波导立体交叉而成,因此从有源器件向外看去的外电路阻抗计算本质上是解决一定义在矩形与圆柱坐标系中的复杂边值问题。针对问题的复杂性,我们提出了一种由 Galerkin 法,点配法和模式展开法相结合的混合分析方法。从而对若干毫米波振荡器的实际结构进行了场

分析。

II 三毫米波段滤波器及定向耦合器的研究

一、概述

滤波器和定向耦合器是两种基本的毫米波无源元件,是 3mm 波段频谱资源开发与利用中的一个重要组成部份。国内目前在 3mm 频段,对这两种元件的研究刚刚开始,其中定向耦合器虽然已有波导孔耦合形式的出现,但这种形式的定向耦合器存在着成本高,加工困难,体积大的缺点。集成形式的 3mm 波段滤波器和定向耦合器尚未见到。

本课题着重研究了 3mm 波段集成滤波器和定向耦合器,这两种元件皆采用近年来流行的毫米波集成传输线—鳍线,因而使所研制的滤波器和定向耦合器具有体积小,加工简单,成本低,插损小等优点,而性能指标完全符合任务规定的要求。

二、鳍线滤波器的研制

鳍线滤波器的结构示意图如图 1 所示。这里选用了双侧鳍线膜片结构,选择这种结构的考虑之一是频率漂移效应可减小。可以看到,这种滤波器构成的基本单元为鳍线纵向膜片结构,我们提出了若干有效的数值分析方法,解决了鳍线纵向膜片不连续性等效电路参数的计算。

在微波波段或毫米波段的低端,由于金属条带的厚度和支撑介质基片的波导宽壁槽相对波长来说较小,我们近似略去了它们的影响,利用谱域法结合横向谐振法,计算了鳍线膜片不连续性的等效电路参数。该方法对于较为广泛的一类鳍线膜片不连续性均适用,尤其是可方便地研究双侧鳍线膜片不连续性中两侧膜片中心位移后对电路性能的影响,这是目前其它方法无法或难以胜任的。该项研究内容发表在 1987 年 IEEE MTT-S Digest 中。

在 3mm 波段,由于波长缩短,金属带厚度和波导宽壁槽的效应不可忽略。我们在设计 3mm 波段鳍线滤波器时,考虑了这一因素的影响,利用等效原理,把原问题分解成三个既独立又相互依赖的辅助问题,分别求解每个辅助问题中的电磁场后,通过分界面上切向电磁场的连续性条件建立了三个辅助问题中的电磁场关系,然后用矩量法求解。该项研究内容发表在 1990 年 Electronics Letters No. 15 上。

项目中所研制的 8mm 频段和 3mm 频段鳍线滤波器已于 1988 年底通过江苏省教委主持的鉴定,图 2 和图 3 分别为 8mm 频段和 3mm 频段鳍线滤波器的测试特性曲线。

三、鳍线定向耦合器的研制

目前国内外毫米波定向耦合器仍以波导形式为主,波导形式的定向耦合器存在体积大,加工复杂,价格昂贵等缺点。近年来国外实验室已有集成形式的定向耦合器报道,采用

鳍线结构,频段为 8mm 波段,耦合度仅有 3dB 一种形式。

为了开发 3mm 波段频谱资源的需要,有必要研制 3mm 频段的集成鳍线定向耦合器,同时,由于 3dB 一种耦合度也不能满足需要,我们在该项目研究中成功地研制出 3mm 波段 3dB,6dB,10dB 三种耦合度的鳍线定向耦合器。

鳍线定向耦合器的电路形式如图 4 所示。

显然这种形式的电路为分布耦合电路,由于对称性,在该电路中 can 存在奇模和偶模两种模式,这两种模式电压将分别以不同的传播常数 β_e 和 β_o 沿耦合鳍线传播,根据叠加原理,可以得到端口 2 和 3 的电压为

$$V_2 = \cos \frac{\beta_e - \beta_o}{2} L$$

$$V_3 = \sin \frac{\beta_e - \beta_o}{2} L$$

当耦合区长度确定时,耦合电压仅仅取决于奇偶模的相速差。因此,当我们选择不同的结构参数时,原则上可得到任意一种耦合度的鳍线定向耦合器,然而,我们看到,由于分布耦合的特点,实现弱耦合往往比强耦合困难,这主要是结构工艺方面的原因。鉴于以上的考虑,在设计 6dB 和 10dB 两种弱耦合度定向耦合器时,采用了过耦合方案,即在 1 端作为输入端的情况下,让大部份能量耦合到 3 端,即 3 端作为直通端,2 端作为耦合端,这实际上是一种更强耦合的方案,结构工艺上实现更为方便。

一种实际的鳍线定向耦合器电路如图 5 所示。耦合鳍线奇偶模传播常数 β_e, β_o 用谱域法计算。3mm 波段鳍线定向耦合器的测试结果如图 6,图 7,图 8 所示,耦合度分别为 3dB,6dB,10dB。

该项目研制的 3mm 波段鳍线定向耦合器已于 1989 年通过江苏省教委主持的鉴定,并发表于 1990 年 IEEE MTT-S Digest p. 379 上。

III 各向异性媒质在毫米波集成电路中的应用

一、目的意义

在毫米波电路或应用系统中非互易元件是十分关键的部件。一般而言,毫米波非互易元件主要指应用最广的隔离器和环行器等。在毫米波波段金属波导非互易元件的研究时间最早也较成熟,H 面波导非互易元件的应用已十分广泛。集成非互易元件主要是微带、鳍线和介质波导等结构形式,这些集成非互易元件的研究工作方兴未艾,还有许多工作要做。

鳍线自七十年代中期提出来以它特有的优点在毫米波集成电路中得到推广应用。但鳍线隔离器的研究工作在国内报导极少。鳍线环行器的理论研究至今未见报导,国外也只是实验研究。因此,从理论上和实验上对其进行分析和研究十分重要。