



華夏英才基金學術文庫

童 玲 田 雨
高 博 年 夫 順 著

微波毫米波 平面电路理论



科学出版社



华夏英才基金学术文库

微波毫米波平面电路理论

童玲 田雨 高博 年夫顺 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以微波毫米波平面电路设计分析理论和测试技术为主要内容。概述了微波毫米波非理想平面电路设计的主要分析方法。针对微波毫米波平面电路设计中的典型非理想因素,详细介绍了屏蔽电路、有限导带厚度、有耗介质、有限接地及多层平面电路垂直互联等工程实际电路的分析设计基础理论和方法,以及微波、毫米波平面电路和介质材料测试技术。

本书可作为从事微波毫米波平面电路分析设计的研究人员和工程技术人员的工作参考用书,也可供高等院校电子科学与技术、电磁场与电磁波、电路与系统、测试技术等专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波毫米波平面电路理论 / 童玲等著. —北京: 科学出版社, 2016

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-050372-5

I. ①微… II. ①童… III. ①微波集成电路 ②极高频-集成电路
IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 257547 号

责任编辑: 姚庆爽 张海娜 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 249 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

1865 年 Maxwell 方程预测电磁波存在, 1888 年 Hertz 激发了电磁波, 至今已经过去一个多世纪。一百多年来, Maxwell 方程成为电磁场与电磁波的经典理论基础。现代电磁场与电磁波理论研究一直围绕着如何求解给定边界条件的 Maxwell 方程来开展研究工作, 无论是传统的解析方法, 还是现代数值计算方法, 无一不是如此。然而在工程实际应用中, 不是所有的电磁场问题都能用给定边界条件的 Maxwell 方程来获得解析解, 由于边界条件的不连续、不规则、不均匀以及表面材料和填充材料的多样性, 只有极少数电磁场问题能够直接从解 Maxwell 方程来获得。

随着现代电子信息技术以及移动通信技术的高速发展, 微波毫米波电路向宽频段、高密度、综合化、集成化方向推进。器件与电路、电路与封装壳体之间的物理尺度越来越小, 材料与电磁场、器件与电磁场、电路与环境的互相影响、互相作用问题日益突出。高频段、高集成度电路的出现使得微波毫米波平面电路和多层电路的各种非理想因素影响凸显。传统的分析理论和计算方法已渐渐不能满足现代微波毫米波平面电路和多层电路的设计需求。由于各种理想条件的假设, 通过半解析分析方法获得的微波毫米波平面电路和多层的电路分析计算数据与工程测试结果的差距随着应用频率的提升而逐渐加大。数值仿真计算也由于各种非理想因素而导致计算效率大幅度下降、部分非理想因素影响还无法引入, 设计人员只能凭个人“经验”借助于计算机的辅助分析进行设计和研制。微波毫米波平面电路工程设计只能通过“算”“试”“凑”和“调”等方式实现设计目的。

为此, 电子科技大学与中国电子科技集团公司第四十一研究所(以下简称中电科集团 41 所)合作, 在微波毫米波非理想平面电路以及多层电路垂直互联的分析理论和计算方法方面开展了深入的基础研究。在国家重大基础研究项目、通用测试技术预先研究计划项目、电子测试技术国防科技重点实验室基金、国家自然科学基金等研究计划支持下, 针对微波毫米波各种主要非理想因素和多层电路的垂直互联分析设计, 利用解析、半解析和数值仿真相结合的方法, 开展了全面、深入的基础研究。在微波毫米波非理想平面电路和多层电路垂直互联设计理论和技术方面取得了一定的研究成果。本书为作者所在研究团队的研究工作和成果的系统总结。

本书内容涉及的微波毫米波平面电路的主要非理想因素包括有限屏蔽空间、有

限导带厚度、有限接地线和有耗介质四类,介绍了针对每类非理想因素的半解析分析方法。在多层电路垂直互联分析方法中介绍了以电路外部结构和内部结构相结合的过孔、通孔和埋孔等各类垂直互联的仿真计算分析方法。同时本书还介绍了相应的电路介质材料测试技术和平面电路参数测试技术,展示了相应实验案例、测试结果和分析,可为相关电路、器件和系统设计提供参考。

微波毫米波平面电路以及多层电路垂直互联的分析理论是器件、系统设计的基础,尽管作者及所在研究团队多年来在此方面开展了大量研究,积累了一定成果和经验,但仍存在未尽工作和不完善之处,所持观点仅为一家之言。在此抛砖引玉,愿能为学界同仁的研究尽绵薄之力。

电子科技大学的童玲教授、田雨副教授、高博副教授和中电科集团 41 所的姜万顺研究员负责本书编写。电子科技大学四川省对地观测工程技术研究中心的博士研究生赵权、李大帅等同学参与了本书的校对和绘图工作,在此深表感谢。本书涉及的实验验证、测试是在中电科集团 41 所姜万顺研究员、刘金现研究员等同仁的帮助下完成的,在此深表感谢。本书还参考了大量相关资料,在此对这些文献的作者表示感谢。

本书的出版得到华夏英才基金的支持,在此深表感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

童 玲

2016 年 5 月于电子科技大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微波毫米波平面电路	1
1.2 微波毫米波平面电路类型	3
第 2 章 微波平面电路数值分析方法	9
2.1 直线法	10
2.2 谱域法	12
2.3 矩量法	16
2.4 时域有限差分	19
2.5 有限元法	21
参考文献	24
第 3 章 非理想微波平面传输线	25
3.1 非理想微波平面传输线概述	25
3.2 有限空间微波平面传输线	27
3.2.1 有限空间微波平面传输线概述	27
3.2.2 有限空间微波平面传输线的直线法分析	27
3.2.3 有限空间对微波平面传输线电磁特性的影响	34
3.3 有限接地面积微波平面传输线	43
3.3.1 有限接地面积微波平面传输线概述	43
3.3.2 有限接地面积微波平面传输线的直线分析法	44
3.3.3 有限接地面积对微波平面传输线电磁特性的影响	54
3.4 有限导带厚度微波平面传输线	60
3.4.1 有限导带厚度微波平面传输线概述	60
3.4.2 有限导带厚度微波平面传输线分析	61
3.4.3 导带厚度对微波平面传输线的影响	67
3.5 有限介质基板宽度微波平面传输线	71
3.5.1 有限介质基板宽度微波平面传输线概述	71
3.5.2 介质基板宽度对微波平面传输线电磁特性的影响	72
3.6 多层介质、多层金属微波平面传输线	73

3.6.1 多层介质、多层金属微波平面传输线概述.....	73
3.6.2 多层介质对微波平面传输线电磁特性的影响.....	74
3.6.3 多层介质、多层金属对微波平面传输线电磁特性的影响.....	77
参考文献.....	81
第4章 平面电路层间互连.....	86
4.1 平面电路层间信号传输.....	86
4.2 垂直互连结构分析方法.....	91
4.2.1 过孔外部结构研究方法.....	91
4.2.2 过孔内部结构分析方法.....	93
4.2.3 矩阵束法.....	95
4.3 垂直互连结构电磁特性.....	98
4.3.1 过孔外部结构分析.....	98
4.3.2 RWG 基函数分析方法.....	100
4.3.3 过孔内部结构分析.....	111
4.3.4 多层电路垂直过孔电磁特性分析.....	124
4.3.5 多层结构仿真计算.....	127
4.4 层间互连结构优化.....	130
4.4.1 短路孔对过孔信号传输的影响.....	130
4.4.2 接地孔对于信号孔间串扰的影响.....	132
4.4.3 过孔阵列中过孔传输特性的分析.....	134
参考文献.....	135
第5章 微波平面电路介电常数测量.....	138
5.1 微波介质材料的介电特性.....	138
5.1.1 电介质的介电常数及特点.....	138
5.1.2 微波平面电路复合介质基板的特点及非理想因素.....	141
5.2 微波介质材料介电常数的测量方法.....	146
5.2.1 平行板法.....	146
5.2.2 传输线法.....	149
5.2.3 同轴探针法.....	150
5.2.4 谐振法.....	152
5.2.5 自由空间法.....	153
5.2.6 带状线谐振器法.....	155
5.2.7 微带线差分相位长度法.....	155
5.2.8 全片谐振测试法.....	157
5.2.9 分离介质谐振器法.....	157

5.2.10	边缘耦合微带线谐振结构测量方法.....	159
5.2.11	材料介电常数测量方法总结.....	160
5.3	微波介质材料介电常数测量方法研究.....	160
5.3.1	传输线法测量粉末材料介电常数的测量系统设计.....	160
5.3.2	传输线法测量粉末材料介电常数的校准方法.....	163
5.3.3	粉末材料介电常数反演.....	165
5.3.4	粉末材料样品介电常数测量系统.....	167
5.3.5	粉末样品材料介电常数测量系统验证及样品实验结果.....	169
	参考文献.....	172
第 6 章	平面电路测试及去嵌入技术.....	174
6.1	散射参数及其测试.....	174
6.2	微波平面电路测试系统.....	177
6.2.1	时域测试.....	177
6.2.2	频域测试系统误差模型.....	181
6.2.3	平面电路测试去嵌入技术.....	183
	参考文献.....	188

第1章 绪 论

1.1 微波毫米波平面电路

微波通常是指频率在 $300\text{MHz}\sim 300\text{GHz}$ 的信号,其波长对应为 $1\text{m}\sim 1\text{mm}$ 。依据波长划分,又可将微波进一步细分为分米波、厘米波和毫米波。从广义来讲, $300\sim 3000\text{GHz}$ 的信号亦可归于微波的范畴,但是由于该波段的信号频率过高,向上已和近年来研究热点太赫兹技术相重合,因此本书主要讨论 300GHz 以内的信号。在相关学术著作中,舍弃了频率 1GHz 以下的研讨,因为此频段的信号和通常意义上的射频信号重叠,其研究方法和实现技术与常规意义的微波技术略有不同。

所谓微波毫米波电路和器件的提法主要是为了明确电路或者器件处理和传输信号的频率位于微波毫米波波段。从是否需要外界提供能源区分,可将微波毫米波电路和器件分为有源及无源两类;从使用有源器件的类型分类,可分为真空管电路和固态电路两大类;从实现微波毫米波电路所使用的技术角度考虑,又可分为印制电路板电路、混合集成电路、单片集成电路等;从实现功能区分又可将微波毫米波电路和器件分为放大器电路、衰减器电路、滤波器电路、功率分配器电路以及混频器电路等;依据特殊性能指标分类,又可分为诸如低噪声电路、高功率电路等;依据传输结构不同,又可分为波导电路、同轴线电路、带状线电路、微带电路、共面波导电路等;依据电路物理参数与信号波长的关系,又可分为集总参数电路、分布参数电路、平面电路、波导电路和长波导电路五类。

物理参数分类方法最早是由日本科学家 Okoshi 在其专著中提出。假设电路或器件处于笛卡儿直角坐标系中,信号传输方向默认为 z 方向,那么根据电路在 x, y, z 三个方向上的物理尺寸与波长之间的关系得出如下的五类电路:

(1) 集总参数电路。电路或元器件尺寸在 x, y, z 三个方向上都远小于信号波长,可认为元器件参数不随空间尺寸发生变化,通常电阻、电容、电感等都属于该类型。

(2) 分布参数电路。电路或元器件尺寸在 x, y 方向上远小于信号波长,但在 z 方向与信号波长上可比拟,如同轴谐振器、同轴衰减器等属于该类型。

(3) 平面电路。在 z 方向上远小于波长, 在 x, y 方向上与波长可比拟, 该情况可认为是平面电路, 例如, 微波多层电路中层与层之间传输信号的通孔就属于平面电路的范畴。

(4) 波导电路。在 x, y, z 三个方向上都与波长可比拟, 一般腔体电路都属于该类型。

(5) 长波导电路。在 x, y 方向上与波长可比拟, 而在 z 方向上远大于波长的类型属于长波导电路, 例如, 梳状滤波器属于长波导电路。

波导电路和长波导电路主要由各类波导及其衍生结构组成, 20 世纪 40 年代出现的最早微波电路形式即是由波导传输线、波导元件、谐振腔和微波电子管等组成。可以说早期的微波电路基本是以腔体电路的形式出现的。随着微波固态器件技术和微波平面传输线技术的发展, 在 20 世纪 60 年代出现了混合微波集成电路(hybrid microwave integrated circuit, HMIC), 它的特点是将无源微波器件和有源微波元件制作在一块半导体基片上, 与立体微波电路相比具有体积小、重量轻的优点, 并且回避了复杂的波导机械加工工艺; 随后又出现了单片微波集成电路(monolithic microwave integrated circuit, MMIC), 与 HMIC 相比, MMIC 具有体积小、可靠性高、噪声低、功耗小、工作频率高的优点, 在此基础上发展出了可用于毫米波波段的 MMIC, 即微波与毫米波单片集成电路(MIMIC)。近年来, 体积更小、集成度更高的微波多芯片组件(microwave multi-chip modules, MMCM)取得了迅猛发展, 它将多个芯片和其他微波元器件高密度地组装在三维微波多层电路互连基板上, 以形成高密度、高可靠和多功能的电路组件。总体来看, 微波和毫米波电路经历了从腔体到平面、从低频到高频、从单层到多层的发展过程。

通常认为集总参数器件以及集总参数电路的分析设计方法在微波电路中是不适用的。在早期工艺和材料水平条件限制下, 微波波段电路或者元器件的尺寸在 x, y, z 三个方向上都是远大于信号波长的, 不满足集总参数电路条件。随着光刻技术以及薄膜材料技术的发展, 电容、电感等常见的集总参数元件的尺寸大大缩小, 已经可以直接运用于 20GHz 以下的电路, 在很多的微波集成电路中都会运用集总参数的元件, 其分析设计方法也适用于微波电路。

本书讨论的微波毫米波平面电路主要指借助印制电路板(printed circuit board, PCB)技术以各种形式的金属带线实现的电路。与腔体电路相比, 平面电路加工难度和成本都会得到显著降低, 而且, 结合成熟并得到大量应用的微波固态器件, 电路乃至系统的体积会大大降低, 这一点在目前大量便携式智能设备应用上体现的尤其明显。但是需要引起注意的是, 即使同样采用印制电路板技术, 微波毫米波平面电路的设计和分析与常规意义的低频、高频等电路仍有非常大的区别, 其

具体体现在介质基材的选择、金属传输线的设计等方面。有源器件(主要包括各类晶体管、二极管等)在微波频率下使用的是特殊设计甚至采用了完全不同的物理原理;在低频段可以忽略不计的各类有源、无源器件的寄生电感、寄生电容等效应应在微波电路中必须加以考虑。

1.2 微波毫米波平面电路类型

微波毫米波平面电路是结合微波平面传输线以及印制电路板技术发展而来的,甚至可以说,微波毫米波平面电路实质就是使用了微波毫米波平面传输线的电路总称。微波平面传输线主要包括带状线、微带线、槽线以及共面波导几种主要类型,其重要的指标参数包括有效介电常数、特征阻抗、色散特性、损耗以及工作频率。在常规的微波毫米波平面电路中,通常会选用其中一种或者几种平面传输线组合,尤其在多层电路技术下,微带线和带状线的应用尤其普遍。与波导和同轴形式的微波毫米波电路相比,微波毫米波平面电路体积小、重量轻、成本低、制造工艺简单的优点,尤其重要的优点是容易与微波固体器件配合使用,构成各类微波集成电路。

(1) 带状线。图 1.1 所示为带状线的横截面示意图,其主体结构有金属层和介质层两部分构成。金属层由两块宽度为 a 、相距为 b 的接地板和中间宽度为 W 、厚度为 t 的金属导带构成,在接地板之间填充有介电常数为 ε_r 的均匀介质。带状线的上下接地面形式,决定了在理想情况下工作模式为 TEM 波,但其结构特点使其仍然会输出高次 TM 和 TE 模。

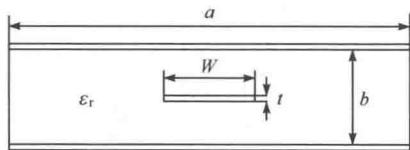


图 1.1 带状线横截面示意图

为了避免出现高次模,结构尺寸应满足如下关系:

$$b < \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad W < \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad 5W \leq a \leq 6W$$

其中 $\lambda_{\min}$ 是带状线的最小工作波长。设计带状线时,首先需要确定工作频段,其次在选择带状线物理尺寸时需要考虑工作频率、介质类型等相关参数。

在均匀介质中带状线的相位常数 β 由如下公式给出:

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r} = \sqrt{\varepsilon_r} k_0 \quad (1.1)$$

其中 ω 为角频率; v_p 是沿带状线的波传播的速度; μ_0 是自由空间的磁导率; ε_0 是自由空间的介电常数; ε_r 是带状线结构中介质材料的相对介电常数; k_0 是自由空间的相位常数。

传输线的特征阻抗为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{v_p C} \quad (1.2)$$

其中 L 和 C 是传输线单位长度的电感值和电容值。为了简化计算,一般采用如下近似公式计算:

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{b}{W_e + 0.441b} \quad (1.3)$$

其中 W_e 和 b 满足如下关系式:

$$\frac{W_e}{b} = \frac{W}{b} - \begin{cases} 0, & \frac{W}{b} > 0.35 \\ \left(0.35 - \frac{W}{b}\right)^2, & \frac{W}{b} < 0.35 \end{cases} \quad (1.4)$$

在设计带状线时常常面临的问题是已经给定了带状线的特征阻抗、接地板之间的距离 b 以及介质的介电常数 ε_r , 计算带状线的宽度 W 。由上述公式得出

$$\frac{W}{b} = \begin{cases} x, & \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 < 120 \\ 0.85 - \sqrt{0.6 - x}, & \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 > 120 \end{cases} \quad (1.5)$$

其中 x 满足下面的条件:

$$x = \frac{20\pi}{\sqrt{\varepsilon_r} Z_0} - 0.441 \quad (1.6)$$

带状线的损耗由介质损耗 α_d 和金属损耗 α_c 两部分组成。由于带状线传输的是 TEM 模式, 介质损耗的计算与其他传输 TEM 波的传输线(如同轴线)形式相同:

$$\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2} \quad (1.7)$$

其中 $\tan \delta$ 为损耗角正切。

金属损耗 α_c 可通过以下公式进行计算:

$$\alpha_c = \begin{cases} \frac{2.7 \times 10^{-3} R_s \varepsilon_r Z_0}{30\pi(b-t)} A, & \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 < 120 \\ \frac{0.16 R_s}{Z_0 b} B, & \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 > 120 \end{cases} \quad (1.8)$$

其中 R_s 为金属的表面电阻；参数 A 和 B 满足下列两式：

$$A = 1 + \frac{2W}{b-t} + \frac{1}{\pi} \frac{b+t}{b-t} \ln \left(\frac{2b-t}{t} \right) \quad (1.9)$$

$$B = 1 + \frac{b}{(0.5W + 0.7t)} \left(0.5 + \frac{0.414t}{W} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4\pi W}{t} \right) \quad (1.10)$$

(2) 微带线。微带线是微波毫米波平面传输线和电路中最常见的形式，在混合微波集成电路和单片微波集成电路中几乎都会使用到微带线结构。图 1.2 为微带线的横截面示意图。与带状线相比，微带线结构和制造工艺更为简单。一个介质基板介质一面是接地层，另一面是金属导带，金属导带的顶层暴露于空气中，可将金属导带视作被介电常数为 ε_r 的介质基板和空气组成的非均匀介质环绕的情况。由于没有中心导体，微带线无法传输纯 TEM 波，但为了计算和设计方便，通常近似认为微带线传输的是准 TEM 波。

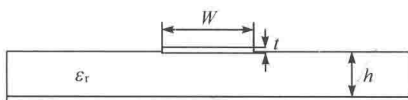


图 1.2 微带线示意图

微带线最大的优点是制造工艺简单、制造成本低廉。其金属导带属于开放结构，易于和其他有源或者无源器件的引脚或者底座相连接，故适于与其他微波器件进行互连构成各类集成电路和功能电路。但微带线也有显著的缺点，如具有较高的损耗、较大的辐射和色散、组件之间较多的寄生耦合。

由于微带线的金属导带位于非均匀介质中，因此在研究和使用时，需要引入一个特殊参数——有效介电常数 ε_{eff} ，其意义在于将非均匀介质转换为均匀介质，如图 1.3 所示，在微带线电路设计中具有重要意义。

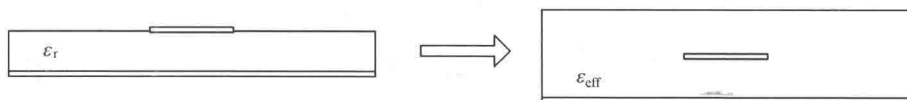


图 1.3 微带线介电常数的等效

ε_{eff} 可通过以下公式计算：

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

其中 h 是微带线结构中介质基板的厚度； W 是金属导带的宽度； ε_r 是介质基板的介电常数。

微带线的特征阻抗 Z_0 是非常重要的参数, 其大小和计算公式与微带线的物理尺寸 W 和 h 有关, 可通过以下公式计算:

当 $\frac{W}{h} < 3.3$ 时,

$$Z_0 = \frac{119.9}{\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}} \left[\ln \left(4 \frac{h}{w} + \sqrt{16 \left(\frac{h}{W} \right)^2 + 2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \right] \quad (1.12)$$

当 $\frac{W}{h} > 3.3$ 时,

$$Z_0 = \frac{119.9\pi}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \left[\frac{W}{2h} + \frac{\ln 4}{\pi} + \frac{\ln \left(\frac{e\pi^2}{16} \right)}{2\pi} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r^2} \right) + \frac{\varepsilon_r + 1}{2\pi\varepsilon_r} \left(\ln \frac{\pi e}{2} + \ln \left(\frac{W}{2h} + 0.94 \right) \right) \right]^{-1} \quad (1.13)$$

上面公式中, e 大小为 2.71828。同带状线的情况类似, 在大多数设计中需要指定微带线特性阻抗 Z_0 大小和介质基板的相对介电常数 ε_r , $\frac{W}{h}$ 的值可以通过公式(1.14)~式(1.16)估算。

当 $Z_0 < 44 - 2\varepsilon_r$ 时,

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{e^A}{8} - \frac{1}{4e^A} \right)^{-1} \quad (1.14)$$

其中 A 的表达式如下:

$$A = \frac{Z_0 \sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad (1.15)$$

当 $Z_0 > 44 - 2\varepsilon_r$ 时,

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{2}{\pi} \right) \left[(B - 1) - \ln(2B - 1) \right] + \frac{\varepsilon_r - 1}{\pi\varepsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.293 - \frac{0.517}{\varepsilon_r} \right] \quad (1.16)$$

其中

$$B = \frac{59.95\pi^2}{Z_0 \sqrt{\varepsilon_r}}$$

(3) 共面波导传输线。共面波导传输线是一种结构非常特殊的传输线结构。与微带线的导带和接地层分别位居介质基板两侧不同, 其导带和接地面位于介质基板的同一侧。图 1.4 所示为常规共面波导传输线的结构示意图。

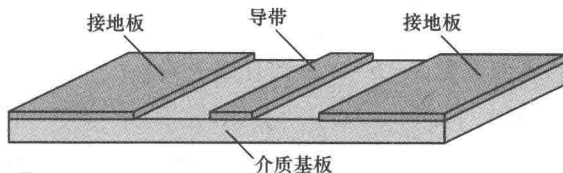


图 1.4 共面波导结构示意图

在对共面波导的分析和设计中为了简化理论分析，通常假设介质基板的相对介电常数 ϵ_r 远远大于 1，故可将介质基板视为无穷厚。但是实际上 ϵ_r 和介质基板的厚度都是有限的(如图 1.5 所示)，同时考虑到接地板的宽度有限的情况(如图 1.6 所示)，此结构共面波导称为有限地共面波导；此外，实际应用中为了增强共面波导的机械强度和功率容量，在介质基板的另一面会增加一金属层(如图 1.7 所示)，该类型的共面波导被称为金属底板共面波导。

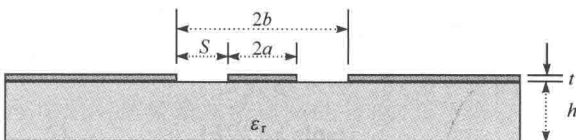


图 1.5 共面波导

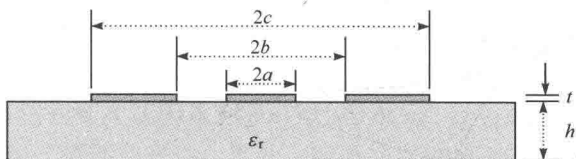


图 1.6 有限地共面波导

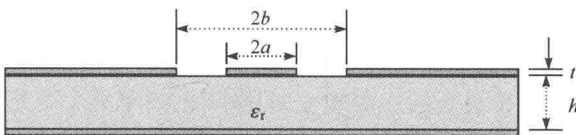


图 1.7 金属底板共面波导

无限地共面波导单位长度有效介电常数为

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (1.17)$$

特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (1.18)$$

两个变量 k_1 和 k_2 是通过其物理尺度参数决定的。若导带宽度为 $W = 2a$ ，导带与接地板之间的缝隙宽度 $S = b - a$ ，则有如下关系：

$$k_1 = \frac{a}{b} \quad (1.19)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a / 2h)}{\sinh(\pi b / 2h)} \quad (1.20)$$

对于实际应用中更常见的有限地共面波导，有效介电常数和特征阻抗计算公式同上，但是需要将 k_1 和 k_2 用 k_3 和 k_4 替代。 k_3 和 k_4 为

$$k_3 = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{1 - b^2 / c^2}{1 - a^2 / c^2}} \quad (1.21)$$

$$k_4 = \frac{\sinh(\pi a / 2h)}{\sinh(\pi b / 2h)} \sqrt{\frac{1 - \sinh^2(\pi b / 2h) / \sinh^2(\pi c / 2h)}{1 - \sinh^2(\pi a / 2h) / \sinh^2(\pi c / 2h)}} \quad (1.22)$$

对于金属底板共面波导形式，引入参数 k_5 ：

$$k_5 = \frac{\tanh(\pi a / 2h)}{\tanh(\pi b / 2h)} \quad (1.23)$$

有效介电常数 ε_{eff} 计算公式如下：

$$\varepsilon_{\text{eff}} = 1 + (\varepsilon_r - 1) \frac{K(k_5) / K'(k_5)}{K(k_1) / K'(k_1) + K(k_5) / K'(k_5)} \quad (1.24)$$

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \frac{1}{K(k_1) / K'(k_1) + K(k_5) / K'(k_5)} \quad (1.25)$$

其中函数 $\frac{K(k)}{K'(k)}$ 为第一类椭圆积分，定义为

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln \left[\frac{2(1 + \sqrt[4]{1 - k^2})}{(1 - \sqrt[4]{1 - k^2})} \right]} , \quad 0 \leq k < 0.707 \quad (1.26)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\ln \left[\frac{2(1 + \sqrt{k})}{(1 - \sqrt{k})} \right]}{\pi} , \quad 0.707 \leq k \leq 1 \quad (1.27)$$

第2章 微波平面电路数值分析方法

自从20世纪微波平面电路被提出之日起,人们就开始对如何通过计算准确获得其电磁特性参数展开了广泛的研究,并获得了大量的研究成果,如理论分析方法、近似计算公式、分析软件等。这些研究成果为微波毫米波电路的发展和应用做出了巨大的贡献。其中对于微波毫米波平面电路的分析方法,按照其数值化程度的高低,可以分为三类,分别为:纯解析分析方法、半数值半解析分析方法、纯数值分析方法。

纯解析分析方法,如保角变换法^[1,2],以理论推导为基础,通过引入一定的近似,可以得到所分析对象的理论计算公式。由于不需要大量的计算机辅助计算,这类方法最早被应用于对微波毫米波电路的分析。其所得理论计算公式使用简单、物理概念较强,因此至今仍然被广泛使用。但是由于这类方法理论推导复杂,很难用于对电路的整体性能进行综合分析。并且由于在理论推导过程中引入了较多的近似,其结果的适用范围会受到一定的限制。

近年来随着微波平面电路的不断发展,微波毫米波电路尤其是微波单片集成电路(MMIC)在电路加工成型后几乎不可能进行调整,这就对微波毫米波平面电路分析计算精度提出了更高的要求。另外,随着计算机技术的不断发展,纯数值分析方法在过去的几十年中得到了极大的发展,出现了一系列以之为基础的商业电磁仿真软件,如CST、HFSS、Sonnet等。矩量法、时域有限差分法、有限元法等都是具有代表性的、被广泛应用的纯数值计算方法。这类方法通过将被分析的复杂结构划分为很多个简单的小网格(如立方体、四面体等),来实现对任意复杂问题的精确分析。但是这类方法计算量庞大、占用计算资源多、计算时间长,在应用上具有一定局限性。

近年来针对微波毫米波平面电路的结构特点,出现了若干半数值半解析的分析方法。这类方法可以在保证计算精度的前提下较大地减小所需的计算量,如直线法、谱域法等。此类方法可以容易和快速地分析一些纯数值方法分析较为困难或所需计算量较大的问题。在本书的第3章非理想微波平面传输线中,就利用直线法对微波平面电路中所涉及的几种主要的非理想情况的影响进行了分析,从中可以看出直线法的引入使得计算量和计算难度大为降低。

目前能够用来对微波毫米波平面电路进行研究的分析方法很多,本章中主要