

微波集成电路的 格林函数法计算

张卫群 编著

国防工业出版社

微波集成电路的格林函数法计算

余显烨 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

9610205

图书在版编目(CIP)数据

微波集成电路的格林函数法计算/余显烨编著. —北京:
国防工业出版社, 1996. 4

ISBN 7-118-01411-7

I. 微… II. 余… III. 格林函数-计算方法-应用-微波
集成电路 IV. TN454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 00158 号

DT71/15
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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{1}{8}$ 235 千字

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1 1600 册 定价: 14.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

80801200

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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,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工业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

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员
主任委员
副主任委员

秘书长
委员

(按姓氏笔划为序)

怀国模		
黄 宁		
殷鹤龄	高景德	陈芳允
曾 铎		
刘琯德		
尤子平	朱森元	朵英贤
刘 仁	何庆芝	何国伟
何新贵	宋家树	张汝果
范学虹	胡万忱	柯有安
侯 迁	侯正明	莫梧生
崔尔杰		

前 言

微波集成电路已广泛用于各种微波系统,特别是 70 年代以来又掀起了单片微波集成电路的研究高潮,使微波技术进入了一个新的发展阶段。微波集成电路的电磁场计算是研究微波集成电路及进行微波计算机辅助设计的基础,本书着重介绍了近年发展很快的一种方法——格林函数法。此法计算量较小,实用性大,适于计算各种常用的微带电路。本书深入浅出、推导严谨,力求在阅读本书后即能用这种方法在计算机上自行进行计算。大学高年级学生、研究生及微波专业技术工作人员可用本书作教本或自学参考书。

在 1983 年初到 1985 年中这段时间,作者在加拿大滑铁芦大学周雍(Y. L. Chow)教授处工作,直接参与了用这种方法(特别是其中的空域镜像格林函数法)计算集总元件、单片微波集成电路和编制计算程序的工作。回国后继续从事微波集成电路;主要是微带电路的计算和测试研究工作与电磁场数值计算工作,编写了研究生课程讲义,并指导硕士生进行微波电磁场计算和分析。在此基础上于 1991 年写成《微波集成电路的电磁场计算》一书,对微波集成电路的各种计算方法进行比较全面的介绍。近几年来,根据读者的反映及意见,吸收最新研究成果,对原书进一步进行修改,突出其主要部分即格林函数法,增加部分内容,而把其它方法的介绍全部剔除,使篇幅缩小、内容更加突出,并予以公开出版。

在本书写作过程中得到我所有关部门的支持,作者表示深切的谢意。感谢南京理工大学方大纲教授、上海科技大学李英教授、我所林守远研究员对作者写作的鼓励和对本书内容提出的精辟意见,感谢滑铁芦大学周雍教授向作者提供了他多年的研究成果。

魏克珠高工和胡述春工程师为本书的出版和整理、誊写作了很多工作,作者并致谢忱。

由于水平所限,错误在所难免,敬请读者不吝指正。

余显烨

1994 年 10 月于南京电子技术研究所

内 容 简 介

本书主要介绍用格林函数计算微波集成电路的方法。重点叙述近年发展起来的镜象格林函数,它在经典镜象法的基础上引进模拟镜象及复镜象后,使原来格林函数的计算大为简化,然后通过变分法和矩量法,就能有效地用来计算微波集成电路。这是一种极富有生命力的计算方法。本书按静态、准静态、准动态、动态全波这个次序全面地进行叙述,力求深入浅出,准确严密。书中附有很多算例,使读者能迅速掌握此种算法。

本书适合于通信、微波、天线专业的技术人员和有关专业的大专院校师生参考。

ISBN 7-118-01411-7/TN·228

定价:14.00元

目 录

引言	1
第一章 微波集成电路中电磁波的传播模式	4
1.1 准 TEM 模	4
1.2 波导模、表面模及其它模式	6
第二章 标量、并矢和矢量格林函数	16
2.1 标量格林函数及其分类	16
2.2 并矢格林函数和矢量格林函数	18
2.3 无界自由空间电磁场方程在变换域下的格林函数	23
第三章 用保角变换法解双导体传输线 TEM 波的近似特性 阻抗	30
3.1 几种最常用的保角变换	31
3.2 内导体为圆形的双导体传输线的近似特性阻抗	33
3.3 外导体为圆形的双导体传输线的近似特性阻抗	36
3.4 任意形状双导体传输线的近似特性阻抗	38
第四章 求静态电容的变分法	43
4.1 电容的空域泛函表达式及其应用	43
4.2 电容的谱域泛函表达式及其应用	57
第五章 优化模拟镜象法	72
5.1 优化模拟镜象法概述	72
5.2 结合镜象理论的模拟镜象法	74
5.3 结合保角变换的模拟镜象法	77
第六章 静态矩量法	80
6.1 静态矩量法求解过程	80
6.2 任意导体、介质形状的微带传输线解法	82
6.3 平面分层介质的镜象格林函数法	88

6.4 几种特殊的静态矩量法	112
第七章 准动态空域镜象格林函数法	122
7.1 水平方向的赫芝偶极子	122
7.2 准动态空域镜象格林函数	149
7.3 格林函数和微带传输线	151
7.4 微带电路计算	160
7.5 直微带线的特性阻抗和传播常数	164
7.6 微带电路的输入阻抗及不连续性的计算	170
7.7 计算 $\lambda/4$ 阻抗变换器	177
7.8 微带线的损耗计算	180
7.9 计算微带环的自感和互感	187
7.10 计算微波单片集成电路	191
7.11 在磁性介质基片上的准动态矩量法	197
7.12 准动态空域镜象格林函数适用范围	200
第八章 空域混合位势积分方程法	202
8.1 混合位势积分方程的导出及其分类	202
8.2 用矩量法解积分方程	206
8.3 用复镜象技术解动态情况下的微带空域格林函数	211
8.4 激励的数学模型及计算结果	218
第九章 电场积分方程法	222
9.1 由伽略金法得到的矩阵方程	222
9.2 用电场积分方程计算微带不连续性	226
9.3 电场积分方程的平面波表示式	234
第十章 微波集成电路中集总元件计算	245
10.1 集总电容器	246
10.2 集总电感器	258
参考文献	276

引 言

一、微波集成电路

在过去的 30 年里,微波集成电路有着高速的发展,越来越多的微波系统采用微波集成电路来代替过去的波导和同轴线。微波集成电路的优越性在于体积小、重量轻、性能可靠,特别是它和半导体器件、铁氧体器件的连接都很方便,寄生参量较小。主要的微波集成电路传输线有四种:带线、微带线、共面波导和槽线。这四种传输线的性能比较如表 1 所示。表 1 的“难”和“易”是就四种传输线相互比较而言。

表 1 性能比较^[1]

特 性	带 线	微带线	共面波导	槽 线
衰减	小	小	中等	大
色散	低	低	中等	高
特性阻抗(Ω)	10~100	15~110	25~125	50~300
并联集成元件	难	难	易	易
串联集成元件	中等	易	易	难
制作	中等	易	易	易
激励	易由同轴激励	易由同轴激励	易由波导激励	易由波导激励

随着微波工作频率的进一步提高,毫米波和亚毫米波技术也获得巨大的进展,一般微波集成电路让位于介质波导型集成电路。不过目前在微波技术中所使用的大部分频率皆低于毫米波,所以在本书中主要针对微波集成电路的电磁场问题进行计算。

一般来说,微波集成电路的电磁场问题要比波导、同轴问题复杂,是不均匀介质问题。随着理论研究的深入,也随着计算技术的

发展,许多电磁场问题逐步得到解决,微波计算机辅助设计已有多
种商品软件在市场出售。这说明微波集成电路的某些电磁场计算
已达到实用阶段,过去“猜试—纠错”的调试微波元件传统方法已
逐步由计算机辅助设计的新方法所代替,也就是用“模拟器”的仿
真计算逐步替代调试工作台上的测试和实验。但是也要看到,还有
很多集成电路电磁场问题尚未解决,集成电路的电磁场解法一直是
近年来学术会议和专业杂志上的“热点”。微波软件的研制当然
要知道各种电磁场问题的解法,而要用好现成的微波软件,实践证
明也需要对电磁场问题解法有较深的了解,才能使软件很好地发
挥作用。

二、本书的目的和结构

由于计算机技术的发展使微波集成电路的电磁场理论在近几年
有飞速的发展,最显著的是谱分析技术和矩量法,这两种技术使
微波集成电路计算大大向前推进了一步。本书目的在于使读者对
近几年发展起来的基本电磁场问题数值解法有进一步的了解。

本书的结构基本上以矩量法为核心通过各类格林函数变化按
静态(或准静态)、准动态、动态、全波这个秩序逐章叙述微波集成
电路的格林函数法计算。

为了计算格林函数,运用镜象法是关键。本书结合静态矩量法
分别介绍了经典镜象和模拟镜象,实镜象和复镜象。近年的大量计
算实例表明,运用镜象法能大大简化格林函数的计算,且能达很高
的精度。因此,本书对镜象格林函数作了详尽的论述。

书中第一章先介绍微波集成电路中准 TEM 波及其它电磁波
传播模式。第二章介绍各种类型及标量、并矢及矢量形式的格林函
数,这两章是矩量法计算集成电路的基础。第三章到第六章是静态
或准静态下的各种计算方法,介绍了保角变换法、变分法、优化模
拟镜象法及静态矩量法,中心问题是计算电容。由于矩量法也是一
种变分法,所以保角变换、变分法可说是静态计算的基础。第七章
是准动态矩量法,它的计算采用近场近似格林函数,因而比动态格
林函数大大简化,而适用范围却远较静态格林函数为广,书中提供

2050180

大量的算例。第八、九章是动态、全波的矩量法,可对微带电路作全波分析。第十章是集总元件计算,运用静态、准静态矩量法计算集总电容、电感。在单片微波集成电路计算机辅助设计中集总元件计算是很活跃的领域。

本书除某些算例外,均采用我国法定计量单位,时谐因子取 $\exp(j\omega t)$ 。

第一章 微波集成电路中电磁波的传播模式

现考虑一个二维的微波集成电路的横截面(图 1-1),在传播方向假定是均匀的。在集成电路内可有金属导体,也有各种介质,介质、金属都能是任意形状的。对这样一种最一般的情况,首先考虑频率很低时,其中传播的模式近似于 TEM 模,这种模式叫准 TEM 模。分析这种模式的方法比较简单,完全可按二维静态场的方法来处理。在频率增高时这种近似就不能适合,而必须考虑各种混合模式。对单个微带线来说这种混合模式可能是波导模及表面模等。

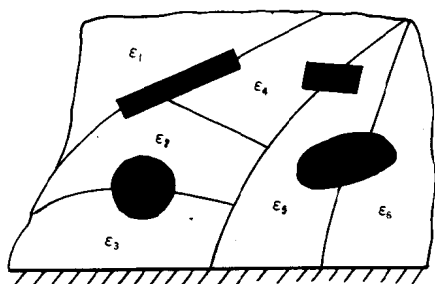


图 1-1 二维微波集成电路横截面。
(图中黑色表示金属导体)

1.1 准 TEM 模

在各金属导体之间,金属导体和接地板之间有电容存在。设有 N 个导体,其电位和单位长度的电量之间有如下关系式:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}V_1 + C_{12}V_2 + \cdots + C_{1N}V_N \\ q_2 = C_{21}V_1 + C_{22}V_2 + \cdots + C_{2N}V_N \\ \dots\dots\dots \\ q_N = C_{N1}V_1 + C_{N2}V_2 + \cdots + C_{NN}V_N \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, q_i 为导体 i 的电量; V_i 为电位; C_{ii} 称为电容系数; $C_{ij} (i \neq j)$ 称为静电感应系数, 它是指除 j 以外的导体都全部接地时, 为了使导体 j 的电位为 $1V$, 所必须给予导体 i 的电量, 即

$$C_{ij} = \left. \frac{q_i}{V_j} \right|_{V_k=0 (k=1, 2, \dots, N \quad k \neq j)} \quad (1-2)$$

C_{ij} 组成矩阵 $[C]$, 称为静电感应矩阵。若各金属导体间的介质换成自由空间, 金属导体、接地板都不变, 则此时的静电感应矩阵叫自由空间静电感应矩阵 $[C_0]$ 。单位长度的电感矩阵 $[L]$ 为

$$[L] = \mu_0 \epsilon_0 [C_0]^{-1} \quad (1-3)$$

仿照一般的传输线方程, 设传输方向为 z , 对 N 根导体的传输线可得矩阵传输方程:

$$\begin{cases} \frac{d[V]}{dz} = -j\omega[L][I] \\ \frac{d[I]}{dz} = -j\omega[C][V] \end{cases} \quad (1-4)$$

式中, $[V]$ 、 $[I]$ 为各导体的电位、电流列矩阵, 由此推得电报矩阵方程:

$$\frac{d^2[V]}{dz^2} + \omega^2[L][C][V] = 0 \quad (1-5)$$

把接地板电位作零, 则 $[V]$ 也是电压列矩阵。上式代表一耦合的常微分方程组, 经过下列的线性变换

$$[V] = [M][e] \quad (1-6)$$

式中, $[M]$ 是变换矩阵; $[e]$ 是变换后的电压列矩阵。式 (1-5) 经过变换后得到一非耦合的常微分方程组:

$$\frac{d^2[e]}{dz^2} + [\beta][e] = 0 \quad (1-7)$$

式中

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \beta_1^2 & & & \\ & \beta_2^2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \beta_N^2 \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

$\beta_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为 N 个导体传输线系统的 N 个准 TEM 模的相移常数, 而传播常数

$$\gamma_i = j\beta_i \quad (1-9)$$

显然 γ_i^2 是矩阵 $\omega^2[L][C]$ 的特征值。

1.2 波导模、表面模及其它模式

准 TEM 模把微波集成电路用静态问题来处理, 当然没有考虑色散、辐射等问题, 要分析必须考虑其它模式, 现以简单的微带线为例进行分析(图 1-2)。微带中除准 TEM 模外, 还存在各种波导型 TE、TM 模及表面波 TE、TM 模, 使微带中波的传播速度随频率而变, 特性阻抗 Z_0 和有效介电常数 ϵ_0 亦随频率变化, 这就是微带的色散特性。由于它是开放型传输线, 所以还存在辐射波模式。这些杂散模式的作用在频率增高或基片厚度增加时相应地要增大。

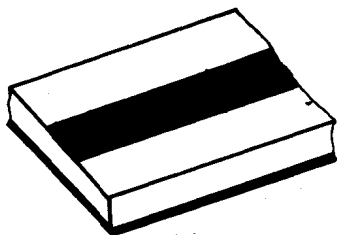


图 1-2 微带线

1.2.1 波导型波

当频率增高, 微带的基片高度 d 和导带宽度 W 与传播波长可比拟时, 将激励横向的 TE、TM 等波导波型, 特别对导带宽度大的微带线波导波型波激励更为明显。