

微波与高速电路中的 电磁场理论及其数值方法

李征帆 曹 毅 著



科学出版社
www.sciencep.com

微波与高速电路中的 电磁场理论及其数值方法

李征帆 曹 毅 著

科 学 出 版 社

2002

内 容 简 介

本书以研究成果及部分搜集的资料作为素材,以电磁场理论及相应的数值方法,对微波与高速电路组件和芯片中的传输线、互连布线、封装结构以及无源元件的电磁建模、参数提取和电磁场模拟进行了系统的阐述。本书涉及的问题是高速电路系统信号完整性分析以及现代微波与高速电路设计中的重要部分。全书共分8章,分别叙述传输线和互连线的静态二维参数提取、互连和封装结构的静态三维参数提取、复杂系统的PEEC建模、全波参数提取以及芯片中传输线和无源元件的分析。

本书既反映了近期的研究工作,又具有一定系统性,可供相关研究单位研究人员及企业研发部门科技人员参考,也可作为高校教师和研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

微波与高速电路中的电磁场理论及其数值方法/李征帆,曹毅著. —北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-010324-6

I. 微… II. ①李…②曹… III. ①微波电路-电磁场-理论②微波电路-电磁场-数值计算 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 018802 号

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年7月第 一 版 开本:720×1000 B5

2002年7月第一次印刷 印张:23 3/4

印数:1—2 000 字数:447 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

前 言

近几年来由于无线通信等应用领域的推动,微波电路又开始成为信息技术领域的一个热门部分。同时在亚微米和深亚微米技术的发展以及实际应用的推动下,数字和模拟集成电路正在向高速度和大规模发展,电路中波特性的呈现使之和微波电路之间产生一定的内在联系,在某种情况下两者之间的共同性已越来越多。

数字集成电路的电特性,一贯建立在逻辑设计的基础上,但在目前钟频已达到2GHz以上的情况下,电路系统中由互连和封装系统引起的寄生效应已可能严重影响预想的逻辑特性。在模拟集成电路中,当工作频率或速度很高时,同样的寄生效应使预想的波形或频率特性严重畸变,电路的性能受到影响甚至失常。上述情况可称为信号完整性(signal integrity)问题,目前在电路组件(如MCM和PCB)以至IC芯片中都日渐突出,是现代微电子系统设计必须解决的重要问题。

对微波与高速电路系统的分析,通常包含场与路两个部分,电磁场分析往往是电路分析的前提,两者之间有密切的关联。对于电路问题,已在最近出版的《微波与高速电路理论》(李征帆,毛军发 2001)一书中涉及,本书则对其中的电磁场问题作较详尽的叙述。鉴于近年来无论微波与高速电路系统都向高集成度和小型化的方向发展,电路结构上就具有一些新的特点,和前期的集成电路已有所不同,我们讨论的电磁场问题也主要针对这些新的电路结构。这里所涉及的电磁场问题除了解决微波与高速电路中一部分无源元件的设计外,主要针对上述信号完整性问题进行分析,通过对互连及封装系统进行电磁建模和参数提取,再在此基础上进行电路分析,或直接进行电磁场模拟,即可对电路系统的信号完整性做出较为精确的估算。

和已出版的《微波与高速电路理论》一样,本书也以我们在这一领域的研究成果为主要素材。几年来我们在微波与高速电路的电磁场领域(其中多数针对信号完整性问题)发表论文约50篇,其中有11篇发表于IEEE Transactions的MTT、CAD of IC and Systems、Advanced Packaging等专刊。为了全书的系统性,我们列入一部分基础性内容以及一部分和全书联系较为密切的、有代表性的文献资料内容。许多有价值的成果,包括国内兄弟单位一些很出色的工作,只在第1章略作介绍,不再详述,读者如有需要可自行参阅有关文献资料。

本书第1、2、4、7、8章由李征帆编写,第3、5、6章由曹毅编写。本书内容包含

了毛军发教授、金荣洪教授的部分研究成果,同时还包含相当多的历届研究生在学期间以及工作后取得的研究成果,他们有博士研究生赵进、郑戟、袁正宇、杨晓平、王德东、李富华、代文亮,硕士研究生朱辉、罗水平、方兴、蔡正辉、薛志勇、钱晓宁、姜祁峰、刘晨波、王玉洋,此外硕士研究生陈清华、王欣为本书绘制了插图,特此向他们表示深切的感谢。

作 者

2001 年 12 月 25 日

于上海交通大学电子信息学院

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 微波与高速电路技术的进展	1
1.2 微波与高速电路中的电磁场问题	6
1.3 近几年来本领域的国内外研究概况	9
1.4 微波与高速电路中电磁场问题的研究方法	12
1.5 本书的特点与内容安排	13
第 2 章 多层介质多导体传输线的静态场二维参数提取——源区解法	18
2.1 引言	18
2.2 电容参数提取的静电场基本解法——源区解法和场区解法	20
2.3 源区解法的积分方程和格林函数	22
2.4 积分方程的数值解与矩量法	28
2.5 以全电荷格林函数结合矩量法进行二维电容参数提取	30
2.6 多导体线二维电容参数提取——Pade 逼近的介质格林函数法	40
2.7 多层平介质面二维谱域静电格林函数	49
2.8 谱域格林函数反变换和矩量法相结合提取分布电容参数	58
2.9 谱域和空域格林函数相结合提取多层介质多导体线的分布电容参数	64
第 3 章 多层介质多导体传输线的静态二维参数提取——场区解法	70
3.1 引言	70
3.2 有限差分法和有限元法求解二维拉普拉斯方程	71
3.3 截断边界条件和测度不变方程(MEI)法	74
3.4 结合等效源的测度不变方程法用于二维静态电容提取	79
3.5 多层平面介质多导体传输线的直线法求解	87
3.6 有限厚度多导体传输线系统的二维直线法电容提取	94
第 4 章 多导体系统导体损耗参量的计算	106
4.1 引言	106
4.2 以微扰法提取多导体系统分布电阻矩阵	108

4.3	计算多导体线频变分布电阻矩阵和分布电感矩阵的导体截面积矩 量法	114
4.4	计算多导体线频变分布电阻和电感的边界积分方程算法	122
第 5 章	三维微波与高速电路结构的电磁参数提取	136
5.1	引言	136
5.2	平行分层介质中三维空域格林函数的计算	138
5.3	基于多分辨率矩阵稀疏化的三维电容提取	144
5.4	带网孔接地板的互连传输线的三维静态场分析	155
5.5	多极加速三维电容提取 FastCap	162
5.6	微波与高速电路中三维电感参数的提取	184
5.7	MCM 集成电感元件的电感参数计算	194
第 6 章	高速电路分析中的 PEEC 三维建模	201
6.1	引言	201
6.2	无时延部分元等效电路(PEEC)模型	203
6.3	引入时间延迟的时域和频域 rPEEC 模型	208
6.4	PEEC 模型中的参数提取	211
6.5	改进的(L_p, A, R, ϵ_f)PEEC 模型	215
6.6	PEEC 模型用于共面结构多层印刷板的分析	229
6.7	PEEC 模型用于高速电路电源地网络同步开关噪声的研究	237
6.8	平面电路系统的二维类似 PEEC 等效电路模型	243
6.9	平面电路 PEEC 模型的奇偶模分割	254
第 7 章	多导体线和复杂电路系统的全波模拟和频变参数的提取	259
7.1	引言	259
7.2	多层介质带状导体传输线的全波谱域法解	260
7.3	多导体线的全波谱域法分析	277
7.4	时域有限差分法(FDTD)的基本原理	282
7.5	多层介质多导体传输线全波参量的 FDTD 法提取	290
7.6	MCM 带网孔接地板传输线分布参数的 FDTD 法提取	298
7.7	集中和分布参数混合电路的 FDTD 模拟	302
第 8 章	集成电路芯片传输线和无源元件的电磁建模和参数提取	309
8.1	芯片传输线和无源元件及其参数提取的特点	309
8.2	芯片中贴片硅衬底传输线的电磁特性分析	312
8.3	贴片硅衬底传输线分布参量的二维准静态场提取	316

8.4 贴近硅衬底传输线分布参量的三维 FDTD 提取	333
8.5 贴近硅衬底传输线分布参量的二维 FDTD 提取	339
8.6 多层布线芯片传输线电感和电阻参数提取	349
8.7 多层布线芯片传输线电容参数的提取	354
8.8 芯片集成电感元件的建模和参数计算	361

第 1 章 概 论

1.1 微波与高速电路技术的进展

近几年来电子信息技术有了突飞猛进的发展,究其原因,除了信息技术应用面的拓广,使其遍及国民经济和国防技术的各个领域外,作为信息技术的载体或传输介质,例如各种高性能的电路、各种高效传输介质(光纤、空间电波传播等)的迅速发展亦起了基础性的重要作用。本书将针对其中的微波电路与高速集成电路,特别是其中的电磁场问题做比较详尽而系统的叙述。

微波电路最初伴随雷达技术共同诞生,主要以波导或硬同轴线的形式出现,其中无源微波电路元件有微波滤波器、定向耦合器(具有小孔耦合、隙缝耦合等形式)、匹配器(具有销钉、窗、分支短路开路线、四分之一波长变阻器等形式)、魔 T 或 3dB 隙缝电桥、吸收负载、谐振腔体等,有源电路元件则有微波混频器、微波磁控管振荡器、微波速调管振荡器、微波双工器(收发开关)、行波管放大器等。上述微波电路元件的特点是体积笨重,制造工艺和调试过程复杂,可靠性差,而应用范围则比较有限,其发展水平和当时信息的整体发展水平相适应。

微波电路技术的第一个大发展阶段是 20 世纪 60 年代后期至 70 年代初期,当时以陶瓷材料作为衬底的混合微波集成电路(MIC)开始发展起来,尽管由于其基本结构为无源微带线和有源微波固体器件通过焊接在陶瓷衬底上的组合,其集成度不能和同时期的 IC 相比(虽然此时 IC 亦处在发展初期),但相对于原来的微波电路在小型化方面已迈进了一大步,在性能、成本、可靠性等方面也有明显的改善。同时由于相应的微波固体器件的发展,微波集成电路的种类也有所增加,变容管参量放大器、微波晶体管放大器、阶跃管和变容管倍频器和上变频器、微波固体控制电路元件(PIN 管限幅器、开关、调制器、移相器等)相继出现,促进了通信设备和军事电子设备性能和功能的提高。

20 世纪 70 年代后期至 80 年代初期是微波电路的第二个大发展阶段,其代表性的进展表现在两方面;一是以砷化镓场效应管(GaAs MESFET)为主要器件,以砷化镓材料为衬底的微波单片集成电路(MMIC);二是以介质波导作为微波传输线的毫米波集成电路。前者进一步提高了集成度,使之达到一般 IC 的水平,后者则主要解决了在毫米波段降低传输线及相应元件损耗的问题。因为在 MMIC 中

由金属导体构成的传输线本身截面尺寸很小,当频率升高至毫米波段时,由于趋肤效应更使导体损耗增加,而介质波导的损耗很低,由其构成的无源元件如谐振腔体、滤波器等都可达到较高的性能指标,已制成若干介质波导型的毫米波集成电路实验样品和实际产品。但介质波导型集成电路存在几个严重的缺点:①不便于和有源器件连接,更不便于直流偏压馈电;②由于介质波导工作于非 TEM 模式,其不连续性结构(如开路终端、弯曲、跳变等)往往产生明显的辐射,增加了系统损耗;③为避免介质波导之间较强的耦合,传输线之间必须保持较大距离,使系统的集成度减小;④加工相当困难。

由于上述原因,以金属微带线作为传输线和连接线的 MMIC 以及混合 MIC 始终是微波电路的主流。多年来以高迁移率的 III A~V A 族化合物作为衬底材料(GaAs 及 InP 等),采用新的工艺技术甚至新的工作机理,不仅使 GaAs MESFET 的性能进一步提高,并且出现了 HEMT 等新型微波固体器件。微波集成电路技术也呈现进一步发展的趋势,极低的噪声(噪声温度低达几十开)、宽带和超宽带化(相对带宽达十几乃至几十个倍频程)、极高的工作频率(达到毫米波段高端甚至亚毫米波段)、较高的输出功率(单个固体器件可达几十瓦,合成则更大)成为这一时期高性能微波电路的标志。

进入 20 世纪 90 年代后微波电路又迈上一个发展台阶。由于无线通信技术的发展以及其通信频率向微波波段的扩展,微波电路得到又一好的发展机遇。更多的功能和更高的性能指标,进一步的小型化以及由于产品的大批量而对简化工艺和降低成本的更高要求,推动了新型微波集成电路技术的发展,主要体现在两个方面:其一是集成电路芯片由砷化镓等 III A~V A 族化合物材料向硅材料扩展,且后者逐渐有成为主流之势;其二是集成方式由平面向三维发展,以便在有限的体积内容纳数量更多的电路。

首先要说明的是,由于砷化镓等 III A~V A 族化合物材料具有较高的载流子迁移率,由其制成的器件必然具有较高的工作频率,且由于载流子的性质使噪声很低,因此前一时期的微波固体器件以砷化镓为主流,但由于工艺复杂、成本较高、集成度相对较低而使其应用范围受到一定的限制。相对而言,由于当前亚微米和深亚微米技术的进展,IC 的特征尺寸已小至 $0.13\sim 0.08\mu\text{m}$,由硅衬底制成的 CMOS 器件及其电路已可达到 X 乃至 Ku 波段(对于特殊情况例如 Si 加 Ge 构成的异质结双极晶体管,其工作频率更可高达毫米波段)。而硅微波电路可搬用成熟的硅 IC 工艺及硅 CMOS 工艺,其成本、集成度等均远优于 GaAs 电路,并且硅微波电路和一般硅数字及模拟集成电路在芯片中可以兼容,有望构成一体化的系统芯片,因此预计除特殊情况(如工作频率特别高和噪声特别低)外,硅微波电路可望成为今后微波集成电路的主流。

另外需说明的是,一般而言微波电路的规模远小于通常的 IC,但目前仍会感到微波集成电路系统伸展版图范围过大,影响整体系统的小型化。其中固然有微波电路本身的原因,例如诸多无源元件以分布参数的形式实现,其尺度必须在波长的范围,因此即使一个规模不大的微波电路也具有相当的尺度,此外随着实际应用的发展,微波电路本身的规模和复杂程度也在不断增加,尤其是微波电路又常作为一个子系统和其他部分(如低频电路、数字信号处理、语音处理等)组成一个组件(如多芯片组件 MCM),甚至组合在一块芯片上,其电路规模就更为可观。为了使系统的结构更为紧凑,现在已向三维微波集成电路^[1,2]及微波 MCM^[3]发展。所谓三维微波集成电路有几方面的含义:其一是某些微波元件(如电桥、定向耦合器、滤波器等)由原先 MIC 中限定为平面结构扩展为部分为上下分层结构,以线的宽壁间耦合代替侧壁间耦合,以加强电路所要求的线间耦合;其二是将一个微波元件分拆为几个部分,分布于不同的分层,再以通孔或垂直的金属壁将各层的电路在特定位置连接起来,构成一个整体元件,图 1.1 所示为一个分布于多层的功率分配器,其间由层间通孔相连;其三则是将整个系统划分为几个子系统,分布于多布线层的各层,子系统应为一个乃至多个完整的电路元件,各层间的特定位置同样应进行连接。

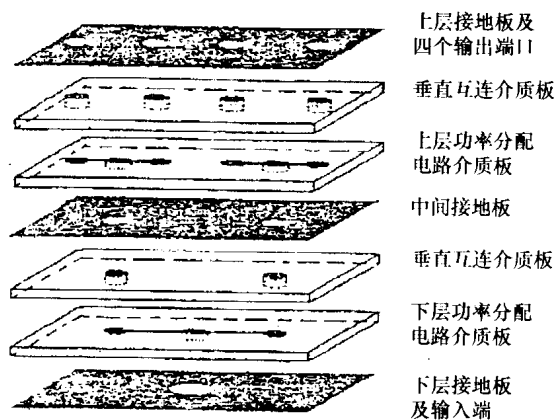


图 1.1 多层的微波功率分配器结构

微波 MCM 为 MCM 的一个分支,通过多层布线将多个 MMIC 芯片以及其他芯片连接起来,成为一个完整的组件,其结构将在后面和高速 MCM 一并叙述。

可以看出,不论是何种三维微波集成电路或微波 MCM,都可使系统的体积减小,结构紧凑,使小型化程度进一步提高。

现在再来介绍高速电路的进展,首先介绍高速电路的含义,所谓高速电路指集成电路的工作速度提高,时钟频率达到几百 MHz 乃至 1GHz 以上,数据率达几

Gb/s 以上的情况。

从集成电路技术发展的早期起,一般集成电路和微波集成电路的分界是较为明显的,尽管一般 IC 分为模拟和数字二部分,但和 MIC 截然不同,主要差别在于工作速度和频率两者之间相差悬殊。在 MIC 中,除有源器件外,其余布线均具有分布参数的传输线效应,线的尺寸乃至走向等无不对系统电性能产生明显影响,线段的组合则构成无源元件,而一般 IC 中的布线则仅仅作连接网而已,其本身电特性基本上不予考虑。当工作速度稍高后,连接线的寄生参量应考虑,通常采用 Elmore RC 模型对此种寄生效应进行估算。一般集成电路和微波集成电路另一重要差别为电路规模或集成度相差悬殊,这是由于应用要求的不同而产生的,当然也和分别应用 Si 技术和 GaAs 技术能达到的电路规模相关。

当工作速度和频率进一步提高后,一般集成电路和微波集成电路就存在更多的联系和共同点,例如对高速光通信收发芯片,其数据率高达几 Gb/s 乃至几十 Gbit/s,其中的电路即为频谱高端达到微波频率的超宽带电子线路,无论对器件的要求还是电路设计都已和微波电路无多大区别,其中对无源元件和传输线的电磁场分析更是完全相同。

在上述情况下,集成电路芯片布线网中的互连线也逐渐呈现“传输线”效应,尤其对集成电路中的高速部分以及较长的互连线(如时钟线)更为明显,必须对此种效应进行精确估算才能确保系统的可靠设计。此时首先必须用电磁场方法对其建模并进行参数提取,这一点和微波集成电路也较为类似,其中存在的差异是:微波电路工作于载频附近相对较窄的频率范围,而高速电路则对应于脉冲频谱从直流至频谱高端的宽阔频率范围,从某种角度也可视为微波超宽带情况。但无论怎样,对上述两种情况都应考虑其场和波的效应,因此在本书中处理电磁场问题时可作为同一问题考虑。

集成电路系统按其规模和复杂程度可分为芯片、多芯片组件(MCM)、印刷板电路(PCB)、背板(back plane)等不同层次。其中 MCM 是近几年来发展的一种新型电路组件,其构成如图 1.2 所示,由多块裸芯片通过多层布线连接而成,具有体积较 PCB 紧凑、互连和封装寄生影响较小,因而性能较优的特点,一个多芯片组件的外形如图 1.3 所示。不仅一般的集成电路系统可由 MCM 实现,微波电路同样可实现为 MCM,现已有若干微波 MCM 产品,例如接收和发射的 MMIC 芯片组成微波收发 MCM,也可将微波芯片和信号处理、存储器、数模转换等芯片组合成一个无线通信机 MCM。

由于亚微米和深亚微米技术的发展,已可将具有较为复杂功能的系统集成在一块芯片上,称为系统芯片,在某种程度上进一步代替了 MCM、PCB 等电路组件。系统芯片具有更高的集成度,在一块系统芯片上可集成一千多万个逻辑门,几千万

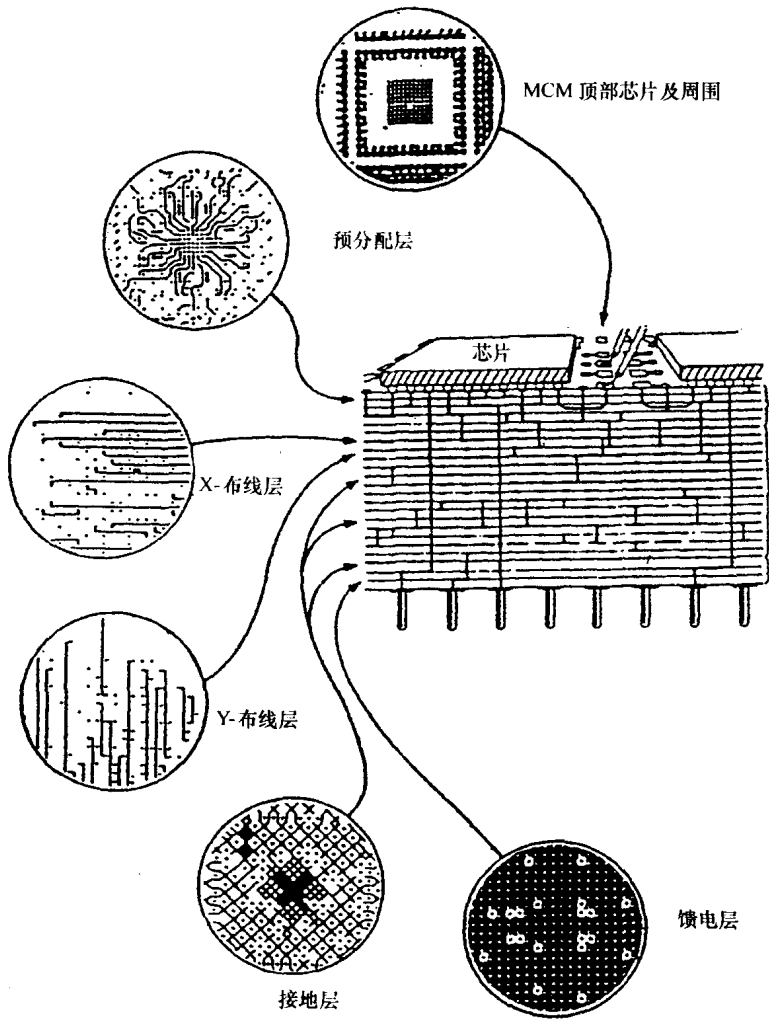


图 1.2 多芯片组件(MCM)的组成

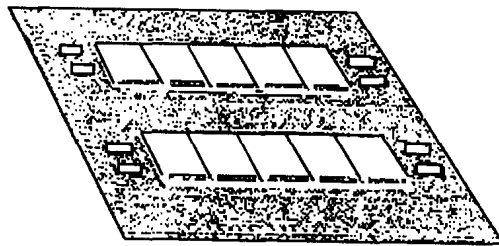


图 1.3 多芯片组件的外形

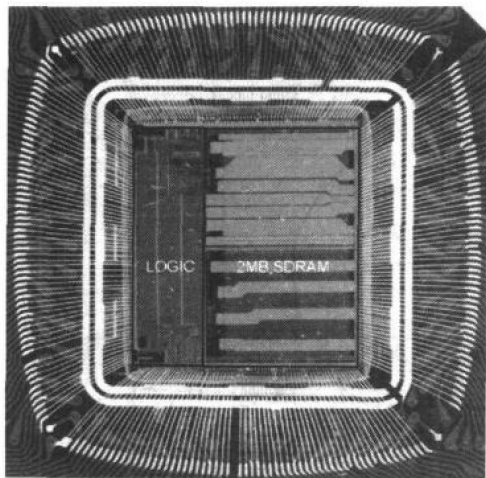


图 1.4 一块系统芯片(SOC)版图照片

个晶体管,在同一芯片上同时包含数字部分和模拟部分,甚至微波电路。一个系统芯片如图 1.4 所示。

在系统芯片中,由于电路的规模极大,故为了完成各单元电路之间的连接,同样必须用多层布线,目前最多已达到 7 层。芯片的 I/O 端口引出则应用焊接引线(bonded wire)、带状自动焊接引线(TAB)和倒装焊(flip chip)等形式,其中前两者的封装寄生参数较大。为保护芯片并将其和外电路相连接,芯片必须有各种不同形式的封装,目前常用的有 DIP(两侧成直线状排列引出管脚)、QFP(四边平面引出管脚)、BGA(球栅阵列引

出管脚)等几种,如图 1.5 所示。显然在高速高频的情况下,封装的寄生参量亦将对芯片性能产生影响。

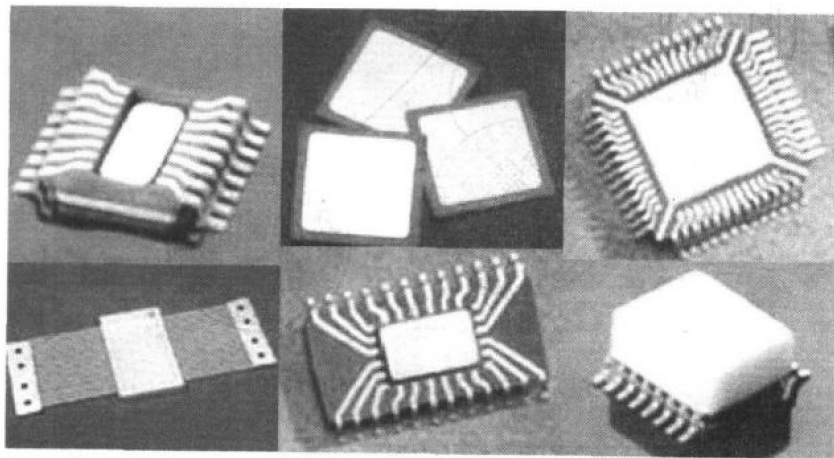


图 1.5 几种 IC 芯片的封装

1.2 微波与高速电路中的电磁场问题

以上概述了微波与高速电路发展的过程和现状,从上述叙述可知,当前电路的速度(频率)和规模正在以很快的速度发展,到达一定程度后,系统中的波特性必然

会变得十分明显。对尺寸较大的电路组件(MCM、PCB),由于传输线的尺寸较大,其波特性当然首先受到人们的注意;对于芯片,由于其工作速度和尺寸(电路规模)的迅速增加,其波特性同样将变得日渐明显。据估计,对 $0.25\mu\text{m}$ 技术制成的芯片,其互连线尚可勉强应用 Elmore RC 模型进行分析,而对 $0.18\mu\text{m}$ 以及 $0.13\mu\text{m}$ 技术制成的芯片,由于相应速度的提高,其互连线必须应用 L 、 C 、 R 分布参数模型了。由上述情况可知,系统的电特性分析将和电磁场分析密切相关。

由前节的叙述同样可以看出,无论对微波集成电路的高频率还是对数字集成电路的高速度,其波特性产生的机理是相同的,尽管前者体现于频域而后者体现在时域,因此在电磁场分析时可以找到其共性。

对系统进行电磁场分析的基本方式可分为两大类:

1. 系统的参数提取和电路分析相结合

此即为众所周知的电路分析方法,将电路系统中的无源部分以各种形式的电路(集中参数电路、分布参数电路、平面电路、立体电路等)表示,首先以电磁场的方法提取电路元件参数,包括集中参数 L 、 C 、 R 、 G ,分布电感、电容、电阻和电导,传输线特性阻抗、传播常数、衰减常数等。在等效电路及所提取参数的基础上进行电路分析,对微波电路进行频域分析,对高速电路则进行时域分析,详细内容可参阅文献[48]。

应用此种分析方法有以下优点:

1)电磁场分析只是整体分析的一部分,电磁场方法仅用以提取参数,往往可应用静场方法进行近似的电磁建模和参数提取,计算规模相对较小,即使进行全波参数提取也较下面要提到的电磁场直接模拟的计算规模小得多。

2)可以应用结构的类似性大大扩展所处理系统的规模。在系统中必然存在数目可观的部件,例如高速电路布线网中,各互连线截面尺寸以及线间距一般都相同,其二维参数一经提取后各处都适用,一个规模很大的布线网只用同一参数提取即可得到复杂布线网等效电路,从而变为电路分析。即使电路各个部件尺寸不同,但由于形状结构相似(如微带线、共面波导、螺旋电感),也可以用同一类型的解析公式或计算软件进行参数提取,因此即使对一个规模相当大的系统,所涉及的电磁场分析也往往较为简单,且具有类似性。

3)在利用电磁场方法提取参数后,转为电路分析问题就可以充分利用多种电路方法对系统进行分析,例如对复杂电路系统可应用模型降阶(model order reduction)分析,为形成性能较优的电路可应用网络综合方法等,详细可见文献[48]。

4)如果对整个电路系统作电磁场模拟,由于半导体器件内部的机理不能完全用电磁理论进行描述而有困难,但对于各种半导体器件,根据器件物理完全可得出

器件外接端口的伏安特性。如果在系统的无源部分通过参数提取转化为电路问题后,则整个系统同样可采取电路分析方法。

尽管如此,用电磁场方法进行参数提取仍有多种复杂性,有静态参数(不随频率改变)和全波参数(频变)提取,其中又分为集中参数和分布参数的提取,更具体化又有电容、电感、电阻、电导等参数的提取,从结构上则又有二维和三维的参数提取。而在电路系统中一般存在介质和导体的复杂分布,因此参数提取将采用多种电磁场方法,特别是电磁场数值方法,本书将以大量篇幅讨论这一问题。

2. 系统的直接电磁场模拟

当系统的工作频率或速度相当高,而系统的结构(包括导体和介质的分布和几何形状)又相当复杂时,系统的电路化比较困难,既难以找到适当的等效电路代表相应的系统,其中的参数提取又不易实现。在上述情况下直接的电磁场模拟是可取的途径,因为归根结蒂,一般宏观电磁系统的机理最终可归结于麦克斯韦电磁场方程。

在应用电磁场方程对系统进行模拟时应注意以下问题:

1) 由于系统的复杂性,以解析形式求电磁场方程的解一般是不可能的,目前往往用各种电磁场数值方法进行模拟,通过计算机实现。为了达到必需的精度,各种数值方法必须遵从一定的条件,换言之数值计算的离散化程度必须足够精细。此外模拟环境必须和实际系统充分接近,为此各种电磁场数值方法均应具有和实际系统相当的环境和几何形状尺寸,并采用较为精确的吸收边界条件。

2) 由于系统中的半导体器件在机理上和外界系统一般不兼容,为此应建立器件-外部之间的界面。这种界面一般以电压和电流实现,即器件借助于器件物理或测试手段建立外接端口的伏安特性,而器件外的无源部分遵循电磁理论进行数值模拟后,在和器件的连接处,设法将电磁场量变为电路量电压和电流。当此处截面尺寸不大时,可近似地应用静场关系

$$V = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-1)$$

$$I = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-2)$$

其中式(1-1)的积分由截面上一个导体的任一点 A 至另一导体(一般为接地导体)的任一点 B,而式(1-2)则为环绕一个导体截面的回线积分。

直接电磁场模拟一般可得到较高的精度,但必须耗用相当大的计算机资源,要求性能甚高的计算机设备。鉴于当前计算机设备及算法(如并行算法)的发展,直接电磁场模拟已日渐成为现实,可根据具体情况考虑采用电磁场直接模拟或电路

方法。

应该指出,不论上述的电路方法还是电磁场直接模拟方法,所涉及的电磁场问题均属于“内场”的范畴,即电磁场只分布在所关心的微波与高速电路系统内部,不产生四处弥散。从应用的角度这是很自然的,否则电路系统的能量向外扩散后就无法正常工作。由于 IC 以及由其组成的电路组件均通过金属导线将各部分连接起来,当这种传输线横截面尺寸较小时,其辐射部分的能量和积聚在内部的能量相比可以忽略,因此微波与高速电路的电磁场可作为“内场”考虑。当然这些微小的辐射场可能引起电磁干扰(EMI),为保证系统之间的正常工作,必须考虑电磁兼容(EMC)问题,此时电磁场的分析就超出内场范围,而必须考虑系统中各个部分的辐射效应。

1.3 近几年来本领域的国内外研究概况

20 世纪 60 年代中后期至 70 年代前期,一批有关微波集成电路特别是微带的论文问世,它们既适应了当时 MIC 发展的需求,又推动了 MIC 技术的进一步发展,其中有代表性并起了奠基作用的为惠勒(H. A. Wheeler)有关微带线等效介电常数和特性阻抗计算的著名论文^[4],它解决了 MIC 中最为重要和典型的问题——微带线参数的精确计算。

对于 80 年代以来的新型微波和高速电路,其主要特点是电路从平面向立体(三维)形式发展,而且布线日趋密集。在这种情况下,多层介质多导体传输线成为新型电路结构中最为典型,最为重要的部分。在开始阶段,着重于对其进行二维建模和参数提取。在这一方面我国学者曹伟和美国学者哈林顿(H. Harrington)共同发表的论文^[5]起了重要的开创作用,该文用全电荷格林函数结合矩量法解决了多层介质、任意截面形状多导体线二维静态分布参数的精确提取问题。继此论文之后一系列有关多层介质多导体传输线参数提取的论文相继发表,其核心问题在于在保持一定精度的前提下提高计算效率,同时将无耗线的参数提取扩展到有耗线。

在提高多层介质多导体线的参数提取效率方面,下列工作做出了有价值的贡献:

文献[6]将多层介质的格林函数展开成无穷级数,并用 Pade 方法加速级数收敛,从而以较快的速度算出多层介质格林函数,也加快了以矩量法提取多层介质多导体线分布电容参数的速度。文献[7]则用 Krylov 子空间方法快速提取二维电容参数。

文献[8]以多层介质谱域格林函数结合空域矩量法加速了分布电容参数的提