

2000 年上海大学博士学位论文

12

微波、毫米波三维空间集成 电路的数值模拟研究

作者：陈 挺

专业：无线电物理

导师：李 英



上海大学出版社

2000 年上海大学博士学位论文

微波、毫米波三维空间集成 电路的数值模拟研究

作 者：陈 挺

专 业：无线电物理

导 师：李 英



上海大学出版社

• 上 海 •

Shanghai University Doctoral Dissertation (2000)

The Study on Numerical Simulation of Microwave and Millimeter-Wave 3-Dimensional Integrated Circuits

Candidate: Chen Ting

Major: Radio Physics

Supervisor: Prof. Li Ying

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：	李征帆	教授，上海交通大学	200030
委员：	郑志航	教授，上海交通大学	200030
	毛军发	教授，上海交通大学	200030
	黎滨洪	教授，上海交通大学	200030
	王子华	教授，上海大学	200072
	周世平	教授，上海大学	200072
导师：	李 英	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

李征帆	教授, 上海交通大学电子工程系	200030
陈抗生	教授, 浙江大学信息与电子工程系	310027
毛军发	教授, 上海交通大学电子工程系	200030

评议人名单:

王宗欣	教授, 上海复旦大学电子工程系	200433
孙诗英	教授, 上海交通大学电子工程系	200030
邱锡钧	教授, 上海大学理学院	200072
谢宽仲	教授, 上海大学理学院	200072

答辩委员会对论文的评语

微波、毫米波三维空间集成电路是适应当前信息通信技术发展而出现的一种新技术。陈挺同学的博士学位论文针对这种三维电路的典型结构——多层介质多导体结构进行电磁场分析和参数提取，对这种新型电路的理论和应用有重要价值。

本论文在应用复镜像格林函数和小波理论解决电容参数和等效网络参量的提取，包括有限厚度导体的电磁参数的提取，以及用一维小波解决微带不连续性分析等方面均取得了创新性的成果。

从论文中可以看出论文作者具有深厚的理论基础和独立从事科研工作的能力，论文论述清晰、系统，数据正确。在答辩中能正确回答问题，答辩委员会经过投票一致通过答辩，建议授予陈挺理学博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决，5 票全票通过陈挺同学的论文答辩；建议授予理学博士学位。

答辩委员会主席：**李征帆**

2000 年 9 月 28 日

摘 要

发展三维空间微波、毫米波集成电路已成为解决目前微波、毫米波产品多功能、小型化的主要的研究领域之一。然而,微波结构从二维(平面型)向三维过渡,除了工艺上要求更高之外,其数值模拟和优化设计也复杂困难很多。寻找高效、计算量小、便于计算机仿真的数值模拟方法已成微波工程师们的重要课题。本论文的目的正是要获得这样的有效数值模拟方法。为此从两个方面进行:一是用具有更简单形式的函数来替代电磁积分方程中复杂形式的 Green 函数,使得计算量减少;二是选择更加合适的基函数去表示金属板表面的电流或电荷密度,以达到同样目的。以下为本论文的研究工作和所取得的成果:

1. 本论文采用复镜像理论对 Green 函数进行模拟。第一次结合具体的微波结构对复镜像理论中的常用的两种复指数函数模拟方法(Prony 方法和 GPoF 方法)进行研究,并首次给出了两种方法所得结果的收敛情况、相对误差变化规律等等。认识到在谱域变量较小的区域,GPoF 方法比 Prony 方法相对误差稍小一些。

2. 有一种谱域格林函数随谱域变量(原点附近)迅速变化的特殊结构,使用复镜像方法误差稍大,本论文提出了两步复镜像方法,从而误差显著减少。

3. 使用静态复镜像方法去分析微波平面电路结构和考虑导体厚度多层结构,对厚导体板本文提出用若干个零厚度导体板

去替代, 并且每一个零厚度板都具有相同的电位。与其他文献的方法进行比较, 本文方法具有精度足够、计算量少、计算程序简单等特点。

4. 第一次使用动态复镜像方法研究空气桥等等具有垂直金属板的微波三维结构, 深入研究此方法在三维结构中的应用特点, 与传统的矩量法比较, 所得结论跟第 3 点一致。使用小波及其尺度函数作为基函数去替代传统的表示电流密度或电荷的基函数 (脉冲函数、Rooftop 函数、三角形函数等等), 针对微波电路特征, 研究了各种小波函数的性质, 比较它们之间应用的优缺点。

5. 首次使用二维小波函数模拟具有垂直金属的三维微波结构, 详细研究这种方法的特点, 比较小波小波分析方法与使用传统基函数的矩量法的计算效率。结论是, 小波函数确实能产生稀疏程度较大的矩阵, 但并不是小波分析方法就一定比传统的矩量法计算量少, 这取决于所选取的小波函数。

6. 本论文还研究怎样使用样条小波去模拟微波或毫米波结构, 并具体分析了不连续微带结构的实例, 比较传统的矩量法, 小波方法在精度足够的条件下, 计算量更少。

关键词 三维微波、毫米波集成电路, 复镜像方法, Galerkin 方法, 小波分析理论, 多分辨分析, 尺度函数和小波, 混合势积分方程

Abstract

A numerical modeling method using in microwave three-dimensional structures is more difficult than one in two-dimensional structures. Microwave engineers' main task-object for overcoming the difficulty is how to obtain a high calculating efficient method. For the object, two methods modeling three-dimensional structures, complex image method and wavelet analysis method, are presented in the dissertation. These achievements are:

1. Two methods modeling spectral domain Green's function in complex exponent functions, Prony's method and GPoF method, are also studied. The conclusions show that both techniques have worked properly for tested cases, and when spectral domain variable becomes very small, GPoF' method work slightly better than Prony's method does.

2. A special structure with one very thin dielectric buffer layer is also analyzed by the two methods. Due to the fast variation of the spectral Green's function around the origin, both methods fail for small values of the spectral variable (the spectral function has a large relative error). The problem is solved by applying Prony's method (or GPoF's method) in two step scheme.

3. The complex method is introduced for the analysis of the 3-D microwave structures as 3-D micro-strip thick patch structures, multi-conductor coplanar wave-guide transmission lines. Complex image theory is used to present Green's function, every thick conductor of the structures is modeled by some zero-thickness plates. Chebyshev polynomials are used as basis function to solve the integral equation by Galerkin's method. A comparison is also presented between the method

and other methods to judge their efficiency. The conclusions show that using the method in the structures is accurate enough and rapid convergence in short CPU time, the features of the method makes technique useful as CAD tool for these structures.

4. The complex method is first introduced for the analysis of microwave 3-D metallization structures (air-bridge). A comparison is also presented between the method and some conventoinal methods to judge their efficiency. The conclusions show that using the method in the structures is also accurate enough and rapid convergence in short CPU time.

5. It is first that this paper uses the wavelet expansion method to analysis three-dimension (3-D) planar problem. The structure is combinations of planar sheets of current oriented along normal and transverse direction in a stratified medium. The surface integral equation is analyzed using the mixed potential integral equation (MPIE), and solved through a Galerkin's method with unknown current expanded in term of two-dimension orthogonal wavelets (Daubechies' wavelet). Finally, two examples have been studied to demonstrate the validity and effective of the method. The technique leads to a sparse matrix, but the computation time is not always short.

6. Another 2-D discontinuous micro-strip structure is also presented by using the wavelet expansion method. The surface integral equation developed from a dyadic Green's function is solved by Galerkin's method with unknown current expanded in term of one-dimension semi-orthogonal spline wavelets.

Key words microwave and millimeter-wave 3-Dimension integral circuit, complex image method, Galerkin's method, wavelet theory, multiresolution analysis, scaling function and wavelet function, mixed potential integrate equation

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 国际上最新发展状况及研究意义	1
1.2 三维微波集成电路的特点	3
1.3 国内外理论研究现状	4
1.4 本论文的研究特点	9
第二章 复镜像格林函数理论	12
2.1 静态复镜像格林函数	12
2.2 Prony 方法	17
2.3 动态复镜像格林函数	19
2.4 复镜像格林函数指数模拟进一步研究	23
第三章 复镜像理论在微波空间集成电路上的应用	32
3.1 利用复镜像理论计算微波电路的电容系数	32
3.2 考虑导体厚度的微带结构的复镜像方法研究	42
3.3 微波集成电路中三维金属结构的复镜像分析	50
第四章 小波分析理论	65
4.1 连续和离散小波变换	65
4.2 多分辨分析(Multiresolution Analysis)	70
4.3 小波族	76

第五章 微波、毫米波电路的小波分析	85
5.1 多层媒质中的三维平面辐射结构二维小波分析	86
5.2 样条小波对微带不连续性的数值模拟	98
第六章 结束语	111
附 录	113
参考文献	115
致 谢	124

第一章 绪 论

这章主要介绍微波、毫米波三维空间集成电路的特点、国际上的研究动态及本论文的研究意义。其中着重介绍目前国际上理论数值模拟情况。

1.1 国际上最新发展状况及研究意义

1.1.1 微波、毫米波三维空间集成电路与传统集成电路的比较

超大规模微波、毫米波集成目前已达到其集成度或微型化的极限,要进一步提高其组装密度和扩展功能的唯一途径是扩展电路的空间自由度和拓扑结构,发展三维空间集成技术。微波、毫米波三维空间集成电路的发展经历了混合集成和单片集成两个阶段,但都属于平面或一维集成,目前正向三维集成电路方向发展。微波、毫米波空间集成电路在将来的一段时间内代表着微波电路研究的一个主要方向之一,其与平面集成电路相比,有如下几个优点:①具有并行处理能力;②具有高速运行性能,比二维电路的运行速度高 2~3 个数量级;③高集成度,比二维电路的集成度高 2~3 个量级,即在同样功能的条件下,体积可缩小 2~3 个数量级;④多功能多种物理过程运行;⑤可覆盖很宽的电磁频谱。目前随着 Terahertz Technology 的发展,3~30 μm (近红外)的新型导波结构 Membrane Microshield 和

Dielectric Microshield 等三维结构被提了出来. 另外随着微波-光波相互作用的发展, 微波和光波技术相互渗透和融合, 又诞生了 Microwave and Millimeter-wave Photonics 等新的学科分支, 这也涉及到三维空间结构.

1.1.2 国际上最新研究状况及其研究意义

目前将几个微波单元电路及其附属的非微波电路集成在同一芯片上的多功能 MMIC 已用于商用系统. 设计的着眼点不仅在于减少体积与重量, 还注意降低工作电压和功率消耗. 多层微波集成电路(空间集成电路)是 1994 年开始出现的, 由于数字蜂窝电话的工作频率为 1.5 GHz, 在此频率上电路的匹配网络尺寸较大, 因而 MMIC 的尺寸也较大. 为了利用空间以减少平面尺寸, 日本三菱公司提出了多层微波集成电路. 1.5GHz 的功率放大器采用 GaAs 多层 MMIC, 输出功率为 1.1W, 效率为 48%, 工作电压是 3.5 V, 将三层平面电路叠在一起, 做到超小型化, 电路体积仅为 0.2 cm³. 三维 MMIC 是日本 NTT 公司 1996 年提出的新型电路, 设平面电路的集成水平 I 为单位平面(1mm²)上增益($G(\text{dB})$)与带宽($\Delta f/f$)的乘积, 它随着 $I*f^{1/2}(\text{GHz})=2$ 的曲线频率升高而下降. 采用 GaAs 基片上加化合物薄膜形成三维 MMIC 的方法, 可显著提高 I 值. 制成的 X 与 K 波段接收机(三维 MMIC)包括一个低噪声前置放大器, 由一个单端混频器组成的镜像抑制混频器, 一个功分器, 一个 90° 宽边耦合器和一个本振放大器集成的芯片, 面积分别为 4 mm² 与 2.6 mm². 三维 MMIC 可制成主片与从片组合式电路, 在主片上集成有源器件的阵列, 用不同的无源元件和连线构成的从片与其组合, 就可形成不同用途的微波、毫米波电路. 这已经成为微波、毫米波

电路的一个重要发展方向^[1-3]。

由以上所介绍的三维空间电路具有平面电路不可比拟的优点，及国际上如火如荼的研究热潮，使得我国要想在这种技术上不落后或赶超世界水平，必须着手进行立项研究。由此可知研究三维微波、毫米波集成电路意义重大。

1.2 三维微波集成电路的特点

三维微波集成电路(3DMIC，又称多层微波电路，即 Multilayer Microwave Circuits)包括多层微波集成电路(MuMIC)与三维单片微波集成电路(3DMMIC)两种基本类型。多层微波集成电路是由分立的有源器件与多层集成无源元件、连接线构成的集成电路。三维单片微波集成电路则是在同一基片上将集成的有源器件、无源器件、连接线等用薄介质相隔而形成的多层紧密结合的单片集成电路。两者有着相似的结构，统称为三维集成电路。从微波集成电路发展过程来看，三维微波集成电路可看成是继立体电路、微波集成电路(平面集成电路)、单片微波集成电路(平面单片集成电路)之后的第四代微波集成电路的结构形式。它可有效地减小电路尺寸，提高集成度，同时还可以构成平面电路难以实现的结构。硅基片形成的集成电路，大大降低了三维微波集成电路的成本，从而使三维微波集成电路可广泛应用于民用器件，使得它成为微波集成电路的研究的新热点。

目前，在无线通信系统，如移动通信、卫星通信、无绳局域通信网络等将要求高频系统(或设备)和低的制造价来构成相应的多功能服务体系。硅基片微波集成电路(IC'S)常被采用，这是因为有低制造价格，同时也能获得较高集成度，像模拟-数字混合 IC'S。传统的 SiMMIC'S^[4,5]，由一些电路元件构成，像