

2001 年上海大学博士学位论文

8

三维空间微波毫米波集成 电路的仿真研究

作者：王 强

专业：无线电物理

导师：李 英



上海大学出版社

2001 年上海大学博士学位论文

三维空间微波毫米波 集成电路的仿真研究

作 者 王 强
专 业 无线电物理
导 师 李 英

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2001)

**The Simulation of Three-Dimensional
Microwave & Millimeter-Wave
Integrated Circuits**

Candidate: Wang Qiang
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 | 200032 |
| 委员：王宗欣 | 教授，复旦大学 | 200433 |
| 黎滨洪 | 教授，上海交通大学 | 200032 |
| 毛军发 | 教授，上海交通大学 | 200032 |
| 王子华 | 教授，上海大学 | 200072 |
| 导师：李 英 | 教授，上海大学 | 200072 |

评阅人名单:

陈抗生	教授, 浙江大学	310027
王 奇	教授, 上海大学	200072
周世平	教授, 上海大学	200072

评议人名单:

李志能	教授, 浙江大学	310027
赵克玉	教授, 兰州大学	730000
许福永	教授, 兰州大学	730000
王子华	教授, 上海大学	200072

答辩委员会对论文的评语

由于电路不断向小型化发展,微波、毫米波集成电路的准确设计成为一个越来越突出的问题。该论文从电路设计和仿真优化两个方面对三维空间微波、毫米波集成电路进行研究

作者从微带线准静态模的角度分析阐明了用经典的准静态零厚度(近似)直线法分析有厚度分层多导体结构电容参数的合理性及适用范围。研究了嵌入式椭圆截面微带特性,得出该结构有利于光滑截面电荷分布,从而具有低损耗的结论。研究了准静态仿真,对三维电路设计解决阻抗匹配和耦合干扰问题有较高参考价值。研究了有限接地面宽度薄膜微带特性,得到了其宽频带特性。对三维微波、毫米波集成电路中螺旋电感、叠层电容构成的电路进行仿真,有利于子电路的总体设计和实现。研究了应用于三维电路的 FDTD-PML 算法并编程实现取得较好结果。

论文选题先进,符合当前国际上微波集成电路的发展方向,理论分析正确,内容充实,章节划分合理,计算仿真结果可靠。答辩过程中,王强同学叙述概念清晰、完整、流畅,回答问题正确,表明王强同学具有宽厚扎实的专业理论基础和宽广的知识面,具有较强的创新能力。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过王强同学的博士学位论文答辩,建议授予理学博士学位。

答辩委员会主席: **李征帆**

2001年3月13日

摘 要

随着信息技术的发展,基于平面电路工艺的微波、毫米波集成电路已发展到它的极限,进一步减小电路体积、提高芯片性能价格比,可以采用三维空间集成技术。三维空间微波、毫米波集成电路可预见的商业应用领域遍及各种无线应用场合,包括移动通信、卫星通信、有线电视、无线局域网和车载雷达等。有关三维空间微波、毫米波集成电路的设计技术、分析方法、仿真程序、优化技术以及工艺技术等的研究是近来微波电路的研究热点。本文从电路设计和仿真优化两个方面对三维空间微波、毫米波集成电路进行了研究。

本文基于准静态直线法,提出一种计算三维空间微波、毫米波集成电路典型结构——有限金属厚度分层多导体结构准静态参数的简便方法,从微带线准静态模的角度阐明了该法的合理性,通过大量计算比较,证明这种方法非常适合于薄金属带的情况。

本文从三维空间微波、毫米波集成电路实际应用中抽象出一种新型微带线——椭圆截面微带线,其特性用有限差分法进行了研究。计算结果表明,参数 b (椭圆短轴)是椭圆截面微带线的重要参数。一方面参数 b 相当于普通微带线的导带厚度 t ;另一方面它又影响导带上的电荷分布。在进行微波、毫米波集成电路设计时应注意这一点。

本文从特性阻抗的角度研究了三维空间微波、毫米波集成

电路设计中的阻抗匹配和耦合干扰问题。本文所用的方法适用于用准静态法进行分析设计的系统。

对三维空间微波、毫米波集成电路的仿真优化依赖于所使用的仿真程序, 虽然目前商用仿真软件多用频域算法或频域——时域混合算法实现, 但考虑到仿真的全面性及目前使用的非线性时域模型, 未来的微波、毫米波集成电路仿真程序很可能是基于时域算法的, 所以作者编制了三维空间微波、毫米波集成电路的时域仿真程序, 采用完全匹配层吸收边界条件的时域有限差分法。作者用该程序对有限接地面薄膜微带线进行了时域仿真, 结果显示在保证传输模不受干扰的情况下, 在较宽频带范围内有限接地面对微带特性有微弱影响。最后用该程序对三维空间微波、毫米波集成电路中集总电感、集总电容构成的多层电路进行了仿真, 既给出了时域仿真优化的方法, 又研究了集总电感、集总电容在三维空间中的特性。

关键词 三维, 微波、毫米波集成电路, 直线法, 时域有限差分法, 完全匹配层, 仿真

Abstract

With the development of information technology, microwave and millimeter wave integrated circuits based on planar circuit technics have reached their limit. One choice to reduce the volume and improve the ratio of performance and price is three-dimensional microwave and millimeter wave integrated circuit technonogy. The application of three-dimensional microwave and millimeter wave integrated circuits spreads nearly all over the wireless applications, including mobile communications, satellite communications, wireless cable television, wireless local area network (LAN), vehicular radar and so on. Resently the studies about three-dimensional microwave and millimeter wave integrated circuits are hotspots of the microwave circuit studies. Attention is paid on the circuit designing and the circuit simulation of three-dimensional microwave and millimeter wave integrated circuits in this paper.

Based on Method of Lines, a new simple method of abstracting static parameters of planar type multilayer transmission line structures with finite metallic thickness is presented. The rationality of this method is explained through quasi-static modes of microstrip lines. Calculation results indicate that this method is suitable for the structures with thin metallic thickness.

A new type of transmission line, microstrip line with elliptic cross-section is studied by the Finite Element Method. The effect of metal cross-section shape and metal penetrating depth is studied.

The problems of impedance and coupling disturbance in three-dimensional microwave and millimeter wave integrated circuits are studied from the point of view of characteristic impedance. A quasi-static analysis method and a calculation example are presented.

A time-domain simulation program is edited for three dimensional microwave and millimeter wave integrated circuits. This program is applied to simulate the thin film microstrip lines with finite ground width. The results of numerical modeling indicate that the thin film microstrip lines with finite ground width have good broad band characteristics and the characteristic impedance, attenuation constant and effective dielectric constant have small change with the finite ground width changing. At last a circuit constructed by lumped inductor and lumped capacitor is simulated. The effect of three-dimensional layout is studied.

Key words three-dimensional, microwave and millimeter wave integrated circuits, method of lines, finite difference time-domain method, finite difference time-domain method

目 录

第一章	序 言	1
1.1	微波、毫米波集成电路研究简单回顾	1
1.2	有关微波、毫米波集成电路的理论与算法	3
1.3	三维空间微波、毫米波集成电路研究的意义	5
1.4	本文的工作	6
第二章	薄导体厚度分层多导体结构准静态分析	8
2.1	直线法理论	9
2.2	导体厚度的考虑	13
2.3	计算结果	17
2.4	小 结	20
第三章	嵌入式椭圆截面微带线的有限差分法研究	21
3.1	有限差分法应用	23
3.2	结果讨论	24
3.3	小 结	27
第四章	三维单片微波集成电路设计中的阻抗匹配与 耦合干扰问题研究	28
4.1	准静态分析	32
4.2	研究实例	36
4.3	小 结	40
第五章	应用于三维微波、毫米波集成电路中的 FDTD-PML 算法	41

5.1	应用于三维电路计算的 FDTD-PML 算法	45
5.2	程序吸收精度讨论法	53
5.3	小 结	58
第六章	有限接地面薄膜微带线特性	59
6.1	有限接地面薄膜微带线结构	63
6.2	有限接地面薄膜微带线的 FDTD-PML 仿真	64
6.3	小 结	67
第七章	三维微波、毫米波集成电路中集总电感、 集总电容的仿真	68
7.1	集总电感、集总电容的计算	71
7.2	仿真的电路结构	75
7.3	仿真参数的确定	79
7.4	仿真结果和讨论	81
7.5	小 结	84
第八章	展 望	85
8.1	三维空间有源电路的仿真	85
8.2	设计模式和系统仿真	87
参考文献		88
致 谢		105

第一章 序 言

1.1 微波、毫米波集成电路研究简单回顾

公认的电磁波谱划分见图 1.1, 一般习惯于将 100kHz 到 300GHz 频段称为“射频”. “射频”的高端(即 SHF 和 EHF 波段)因为波长很小, 又习惯地称为“微波、毫米波”波段. 具体再细的说法就不太统一了, 有的专家学者认为从 1GHz 到 300GHz 都可称为“微波”, “毫米波”是包括在“微波”中的, 但 IEEE 工业标准频段将 40~300GHz 划分为“毫米波”. 本文遵照习惯, 将 SHF 和 EHF 波段统称为“微波、毫米波”.

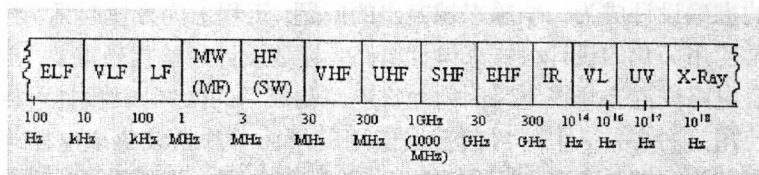


图 1.1 电磁波谱

微波、毫米波集成电路的发展极其迅速. 在电路设计与电路制作工艺方面都发生了很大变化. 近年来微波、毫米波集成电路的研究多围绕以下几方面进行:

- 1) 单片集成电路的发展;
- 2) 从平面电路到多层电路再到更复杂的立体电路结构;

- 3) 时域算法的研究;
- 4) 非线性元器件时域模型的研究;
- 5) 非线性电路的优化技术;
- 6) 基于器件统计物理模型的研究;
- 7) 非电磁参数, 如温度、压力等的仿真;
- 8) 封装技术及仿真;
- 9) 电磁兼容;
- 10) 实验方法的研究;
- 11) 由制作工艺决定的算法与设计方法;
- 12) 超级计算机的使用, 并行算法;
- 13) 依靠电磁仿真软件的自动设计;
- 14) 自动布图优化;
- 15) 元器件数据库的发展.

以上所列相信并没有完全覆盖有关微波、毫米波的热点问题. 总体来看, 由于电路不断向小型化发展, 微波、毫米波集成电路的准确设计成为一个越来越突出的问题. 工程上为方便起见, 经常使用简化的设计公式来设计电路, 导致设计经验相当重要. 混合电路或混合集成电路因为允许电路制成后的微调, 其设计可以使用这种办法. 但对目前普遍使用的平面单片微波集成电路来说就不行了, 更不要说结构更为复杂的立体电路结构了. 这时候, 仿真就成了准确设计的唯一手段.

微波、毫米波集成电路的仿真, 目前还分为电磁场型仿真和电路型仿真, 二者是分开的. 用这两种仿真器进行仿真的过程是, 先用电路型仿真器进行电路设计, 得到所需元器件的参数, 再用电磁场仿真器进行元器件设计. 用电路型仿真器进行设计时, 则从电路的角度出发, 电路布图很大程度上依靠经验. 用电

磁场仿真器进行设计时,各元器件是分开进行的,其相互影响忽略不计.这样造成设计的复杂和不准确性.

要解决设计复杂和不准确的问题,可以从两个方面着手,一是整个设计过程采用电磁场仿真,另一是尽量缩小电路尺寸.目前来说整个设计过程采用电磁场仿真还不太现实,一是因为缺乏足够多和足够精确的非线性器件模型,另一原因是目前通用的计算机无法承受一个系统级电路的计算量.缩小电路尺寸后,元件的“集总”程度增加,设计时可以采用电路型仿真器,但是随着电路尺寸的缩小,杂散辐射、寄生耦合等都会增加,这时必须进行仿真计算,使子系统、子电路、传输线间保持一定的安全距离.

但是,三维空间的微波、毫米波集成电路已渐渐崭露头角,在复杂三维结构中简化的设计公式是否适用?新的结构使电路工作频率逐渐升高,在毫米波段过去通用的设计方法是否还有效?这亦是众多科研工作者研究的重点问题.

1.2 有关微波、毫米波集成电路的理论与算法

微波、毫米波集成电路的无源线性部分和有源非线性部分有不同的设计理论和分析算法.

对于无源线性部分的求解,一般是解电磁场的边值问题,分为解析法和数值法.解析法对于比较规则的电路结构较有效,典型方法有分离变量法、模式匹配法^[1]、保角变换法^[2]等.数值法从计算域来划分,分为频域法和时域法;从算子方程特征划分又分为积分方程类方法和差分类方法;从求解严格程度划分又分为准静态法和全波法.例如三维空间时域有限差分法的计算域是时域,算子方程为差分类,属于全波法.典型的数值方法有时域和频域有限元法^[3-5]、时域和频域有限差分法^[6-9]、传输线矩阵法^[10,11]、

积分方程类方法^[12,13]等。

解析法和数值法各有优缺点。解析法计算效率较高,但适用面窄,对于复杂的电路结构,其计算误差较大;数值法的适用面宽,计算精度较高,但往往计算时间长。为综合二者的优点,出现了半解析半数值方法,如直线法,第二章有详细介绍。

对于有源非线性部分的求解,一般较复杂。由于对于非线性有源器件到目前为止还只有时域模型可用^[14],用纯频域的方法计算有源非线性电路较困难,从而时域法和时域——频域混合法成为选择。时域法计算时相当直接有效,但耗时巨大;时域——频域混合法,如谐波平衡法^[15,16],虽然稍显复杂,但计算效率较高。目前商用的有源非线性电路仿真器普遍采用谐波平衡法,这是考虑到用户计算机的承受能力而作出的选择。目前流行使用的时域法是传输线矩阵法和时域有限差分法,二者都可以计算有源非线性电路,但时域有限差分法由于仿真的全面性而越来越受到重视。

需要强调的是,有源电路并非都是非线性电路,而非线性电路也并非都是有源电路,不过大多数有源电路都是非线性的,大多数非线性电路都是有源的,在这里没有细分。

对于工作于微波低波段频率的电路,可以用准静态法计算电路参数。更高的工作频率是否能用准静态法来解,就要看电路尺寸大小了。如果电路尺寸是微米级,现已知准静态法可以用来准确计算工作于 10~20GHz 左右的电路结构。至于准静态法是否用来计算微波高波段甚至毫米波,则要进一步进行了。

为准确计算电路结构参数,可以采用全波分析法进行分析,全波分析法能计及由于工作频率高而产生的寄生耦合、严重的色散以及增加的传输损耗等。