

2003 年上海大学博士学位论文 ①9

新型的微波电路及EBG 结构的理论分析

作 者：周 霞
专 业：无线电物理
导 师：李 英



上海大学出版社

· 上海 ·

2003 年上海大学博士学位论文

新型的微波电路及 EBG 结构的 理论分析

作 者: 周 霞
专 业: 无线电物理
导 师: 李 英

上海大学出版社

• 上海 •

Shanghai University Doctoral Dissertation (2003)

The Theoretical Study of Novel Microwave Circuits and EBG

Candidate: Zhou Xia

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：王宗欣 | 教授，复旦大学电子工程系 | 200433 |
| 钦耀坤 | 教授，电子部二十三所 | |
| 朱守正 | 教授，华东师范大学电子系 | 200062 |
| 王子华 | 研究员，上海大学通信工程系 | 200072 |
| 导师：李 英 | 教授，上海大学 | 200072 |

评阅人名单:

- 李征帆** 教授, 上海交通大学电子信息工程学院 200030
王宗欣 教授, 复旦大学工程系 200433
金荣洪 教授, 上海交通大学电子信息工程学院 200030

评议人名单:

- 毛军发** 教授, 上海交通大学电子信息工程学院 200030
黎滨洪 教授, 上海交通大学电子信息工程学院 200030
徐长龙 教授, 上海大学通信工程系 200072
张金仓 教授, 上海大学理学院 200444

答辩委员会对论文的评语

周霞同学的博士论文“新型的微波电路及 EBG 结构的理论分析”选题针对目前微波技术的前沿，并有广阔的应用前景，也是当今微波研究领域的热点。

本论文首先对平面微波电路的各种不连续性进行了数值计算和 ANSOFT 仿真，然后文中较全面并深入地设计和分析了几种新型的适合于微波电路集成的平面 EBG 结构，这些结构在天线和微波电路中有着广泛的应用，并可能获得优异性能。

从本篇论文可见作者对国内外动态及发展现状有深入的了解，掌握了扎实的基础知识和专业知识，在平面 EBG 结构的研究方面有一定创见，理论推导正确，设计结果合理，论文文字表述清楚，结构合理，条理清晰。并在国内外核心期刊上发表论文 8 篇（第一作者 5 篇，第二作者 3 篇），有两篇为 SCI 检索，总之本论文表明作者已具备一定的独立从事科研工作的能力。

在论文答辩时，周霞同学语言表述清楚，并能正确回答答辩委员提出的问题。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会投票表决一致通过该论文的答辩，并建议授予周霞同学工学博士学位。

答辩委员会主席：**李征帆**

2003年3月28日

摘 要

为了进一步提高集成度,提高组装密度,实现更小的体积和更多的功能,采用三维微组装技术(3D MCM)成为必然.由于多层布线的设计是关系到整个系统性能的重要基础和最关键的技术之一,它将影响到整个电路的体积、重量、性能和可靠性等.减小布线宽度、提高布线密度及其可靠性,成为我们奋斗的主要目标.由于在各种系统的 RF 前端中均包含多种波导、带线、微带线元、部件等,因此,进一步制作微波低损耗的传输线,对于改进电路性能、提高集成度有着重要的作用. CPW 因其独特的性能再次成为研究的重点. CPW 是在 MUMMIC 中常用的一种传输线,在多层电路中便于互联,且适合与倒装芯片(Flip-Chip)焊接.三维微波 MCM 即采用微波传输线(如微带线、带状线和 CPW)、控制线和电源线的混合信号可以将它们组合在同一个三维微波传输结构中;采用带状线和中间接地的屏蔽层,可以改善收、发通道间的隔离度.因此,使得微波电路间的线连接以及叠层孔互连的研究成为必然.

随着集成密度的增大,时钟频率也高达 2 GHz 以上,互连寄生效应对电路的影响已非常显著,必须为电路的设计、综合、优化和验证快速提供寄生参数信息,以缩短设计周期,减少费用.并且当前,工作频率的提高,远比特征尺寸下降的速度高,这使得精确、快速的全波分析对高性能的电路设计具有关键的意义.

第二章主要采用空域积分法(SDIE—Space Domain Integral Equation)研究 CPW 的不连续性,并用伽略金矩量法求解.文

中应用一种快速、有效的增强算法进行计算,大大减少计算时间.计算结果与实验结果以及仿真结果基本一致.数值分析中得到的显式方程和等效模型在平面电路的设计如滤波器中有重要的应用价值.第三章则采用一种改进的时域有限差分法(FDTD)分析了两种重要的高频互连结构:通孔和连接线.这种算法收敛快,精度高,并能大大减少计算时间和内存,计算结果和仿真结果(ANSOFT)基本吻合一致.

微波电路或系统的革新体现在元、器件物理结构和电磁关系两方面.这种革新来源于对电磁场的灵活运用,其实现有赖于新材料、新工艺,特别是微加工技术.因此,为了进一步提高系统的性能,一种具有周期性结构的新型的材料——电磁带隙结构(EBG)成为研究的重点.文中主要介绍了比较适合于电路集成两种类型的EBG结构:金属—基质结构和准集总准集总LC参数阵列结构.同时本文利用FDTD法分析了该种新型的电磁带隙结构(EBG),采用单轴的各向异性的完全匹配层(UPML)作为吸收边界条件可明显减少截断处的反射误差,大大提高了计算精度.计算得到的散射参数和ANSOFT仿真结果以及实验结果基本吻合一致,进一步说明了该方法的有效性和准确性.从得到的散射参数中可以发现这种EBG单元表现出显著的慢波特性和阻带特性,进行级联可构成带阻滤波器或谐振器.并且该EBG结构除了具有减少尺寸和能抑制不需要的频率的优点外,还具有易于加工的优点.

关键词:共面波导(CPW), 矩量法(MOM), 多芯片组件(MCM), FDTD
UPML, 电磁带隙结构

Abstract

In this dissertation, theoretical studies on novel microwave circuits are presented. We press much on the analysis of two important problems: planar circuits discontinuities and planar EBG(Electromagnetic Bandgap) suitable for MMIC or HMIC. So at first in chapter two a space-domain integral equation(SDIE) which is solved using the method of moments is used to study the CPW discontinuities. And we attempts for the first time to use a fast, efficient computational method and leads to reasonable computation times. Good agreement has been found. The driving closed-form expressions and available models are useful in the design of circuits such as filters. Then the finite-difference time-domain (FDTD) with nonuniform grid is applied to analyze two important high-frequency interconnect geometries, the via and the bond wire. The optimum value of a weighted $\epsilon_{r, \text{eff}}$ is calculated to minimize reflections at the boundary walls. A quasi-static TEM source launched will converge much faster. The FDTD results agree well with the simulation results by ANSOFT. Some conclusions are very promising for microwave circuits CAD.

And then a novel artificial material—(EBG) will be introduced. Although various configurations have been proposed in the literature, we pay more attention to the planar etched EBG configurations because of their easy fabrication with photolithographic MIC.

MMIC、MEMS processes. Two planar types will be analyzed. A full wave FDTD method is used. Employing a Uniaxial Perfectly Matched Layer(UPML) condition in the algorithm provides a robust approach and leads to significant small reflection error over a broad band. Special perforation patterns etched on the ground or on the line itself exhibit a remarkable broad stop-band and reduce the dimensions of the microstrip lines, in series they can yield extraordinary performances for devices at microwave millimeter-wave frequencies. The numerical results, simulated results(ANSOFT) and experimental results agree well.

Key words: CPW(Coplanar Waveguide), MOM(Method of Moment), FDTD, MCM(Multichip Module), UPML, EBG

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 研究方法	5
1.3 本文的研究内容	9
第二章 平面电路的不连续性分析	11
2.1 引 言	11
2.2 CPW 不连续性分析	11
2.3 互连结构的不连续性分析	24
2.4 小 结	37
第三章 电磁带隙结构 (EBG)	38
3.1 引 言	39
3.2 国内外研究概况、水平和发展趋势	44
3.3 理论和计算方法	46
3.4 EBG 结构的 ANSOFT 分析法	73
3.5 小 结	80
第四章 平面 EBG 微带	81
4.1 引 言	81
4.2 直接在地面上开孔的 EBG 微带线	82
4.3 非均匀开孔的微带 EBG 结构	96
4.4 甚宽带微带 EBG 结构	115
4.5 具有分形特征的 EBG 微带线	119
4.6 小 结	123

第五章 准集总 LC 参数阵列结构	125
5.1 引言	125
5.2 FDTD 法	125
5.3 有着禁带的高阻抗电磁表面	137
5.4 UC-EBG 结构的微带线	159
5.5 微带 EBG 结构	180
5.6 结论	203
第六章 总结与展望	204
6.1 全文总结	204
6.2 未来工作展望	204
参考文献	206
致谢	222

第一章 绪 论

1.1 引言

作为电子学中的一分支——微波技术问世已有半个多世纪,发展迅速、应用广泛.微波电路基本上遵循着低频电路的历程,经历了从分立电路、两维微波集成电路、三维微波集成电路等阶段.在低频电路方面,继 IC 和 LSIC,其线宽达微米量级.同时研制出 MuIC,在电路厚度不显著增大的前提下,面积显著缩小,已有数十层 MuIC 成品.而 VHSIC 是速率达 Gb/s 量级的 IC^[1].

分别于 20 世纪 60 年代和 70 年代出现的混合微波集成电路(HMIC)和单片微波集成电路(MMIC)均是单层电路.自 20 世纪 80 年代以来已被广泛应用,从单功能电路发展到多功能组件(如 T/R 模块等),是微波工业经历的一次大革命^[2].

而共面波导(coplanar waveguide-CPW)则在微波集成电路中有着重要的应用,尤其是随着近年来毫米波与亚毫米波技术的发展,CPW 受到了越来越多的重视,其主要原因是相对于常规微带线来说,CPW 用于砷化镓单片微波集成电路(GaAs MMIC)时有着明显的优点:对于各种两端器件,无论是有源还是无源的,都很容易实现串联或并联而不须在基片上钻孔,寄生参量小;容易提高集成度;色散特性也好于微带线.此外,CPW

还可以实现 CPW 混合电路,它不仅可以应用到微波集成电路中,还可以应用到毫米波和光学集成电路中^[3].

随着通信、特别是移动通信,相阵控雷达以及星载电子设备等小型化、高集成度、低价格、高性能化、多功能化和高可靠度化发展成为目前的主要趋势,从而对系统集成要求也越来越迫切.实现系统集成技术主要有两个:一是半导体单片集成技术,二是采用 MCM 技术.实现单片系统集成的关键在于细线、单片系统集成的设计和多层布线、微机械加工以及各种工艺的兼容技术^[4].

由于多层布线的设计是关系到整个系统性能的重要基础和最关键的技术之一.它将影响到整个电路的体积、重量、性能和可靠性等.降低层间隔离介质的介电常数、降低布线方电阻、减小布线宽度、提高布线密度及其可靠性,成为我们奋斗的主要目标.在各种系统的 RF 前端中均包含多种波导、带线、微带线元、部件等,因此,进一步制作微波低损耗的传输线,对于改进电路性能、提高集成度有着重要的作用.CPW 因其独特的性能再次成为研究的重点.CPW 是在 MUMMIC 中常用的一种传输线,在多层电路中便于互联,且适合与倒装芯片 (Flip-Chip) 焊接.实际制作的是有限地 CPW,称为 FGC^[5].

为了进一步提高集成度,提高组装密度,实现更小的体积和更多的功能,采用三维微波组装技术成为必然.三维微波 MCM 即采用微波传输线(如微带线、带状线和 CPW)、控制线和电源线的混合信号将它们组合在同一个三维微波传输结构中;采用带状线和中间接地的屏蔽层,可以改善收、发通道间的隔离度.因此,使得微波电路间的线连接以及叠层孔互连的研究成为必然.线连接与互连技术的应用最初是在低频和数字电路中已有数十

年的历史,但在射频和微波领域从 20 世纪 90 年代初期才开始并广泛应用在有源相控雷达和通讯领域,而国内在这方面的研究才刚刚开始起步.由于具有三维的特征,通常很难用一个阻容特性的等效电路模型来表示.随着集成密度的增大,时钟频率也高达 2GHz 以上,互连寄生效应对电路性能的影响已非常显著,必须为电路的设计、综合、优化和验证快速提供寄生参数信息,以缩短设计周期,减少费用.并且当前,工作频率的提高,远比特征尺寸下降的速度高,这使得精确、快速的全波分析对高性能的电路设计具有关键的意义.

然而在由 CPW 构成的平面电路的研究过程中,我们再次碰到了许多问题.在这种电路中,对于不需要的频率信号我们可以通过加短路调谐分支来实现滤波,但此方法是窄带的,并且占用比较大的电路空间,而近来引起人们广泛关注的光子晶体——一种新型的电磁带隙结构 (EBG)^[6-8]是解决这类问题一个很好的方法.同样,在前面平面电路的研究过程中,我们发现随着频率的升高电路中将会产生不需要的或有害的高次谐波.并且,在实际的电路设计中,为了使电路易于散热,增大电路的功率容量,人们往往采用在 CPW 介质的背面增加了金属接地板,这样既有利于电路散热又提高了 GaAs MMIC 的机械强度.而由 CBCPW 构成的平面电路中则会产生不需要的表面波和平行板波导模^[9].这些波的出现必然引起能量的泄漏,同时这种沿着横向的泄漏波必然和相邻的电路产生串扰,降低电路的性能,为了克服上述种种缺点,光子晶体——一种新型的电磁带隙结构 (EBG) 再次显示出了种种优势.

EBG 结构最初的研究是在光学领域,简称为 EBG 及光子带隙结构或光子晶体^[10],其在光学方面的应用比如制造高

质量的光镜或者显微孔隙这在设计效率很高的半导体光电发射器和滤波器上是很有用的,但是极小的尺寸使得加工难度非常高。于是后来的研究向较低的频率发展尤其在现在的微波、毫米波中,光子晶体在微波波段的实现相对于红外和激光光子晶体结构要容易一些,例如在微带线的接地面上腐蚀掉周期性的孔阵,就可以获得明显的带阻特性。这种无需多余的电路元件,完全依靠本身结构来实现的带阻特性在电路的集成性、重量及成本上都具有不可替代的优势。理论和实验研究表明,在微波波段对光子晶体的研究已经显示出军事价值和社会应用价值。因此本篇文章中将重点介绍用于微波、毫米波中的 EBG 结构。这种 EBG 结构已用来改善天线的性能^[1],增加功率放大器的效率和输出功率,宽带吸收器以及频率选择表面等^[12]。传统的慢波系统没能进一步作为无源滤波器的使用主要因其大量的周期重复需要较大的衰减度,同时相应的会引起插入损耗的增大,再者,减少滤波器的尺寸必然会降低滤波器的性能。本文介绍的几种周期性的 EBG 结构克服了上述的种种缺点,尤其是平面结构的 EBG 单元,周期性结构完全集成在传输线本身上,尺寸可大大降低,可利用传统的加工工艺进行加工,简单方便,这对 HMIC 和 MMIC 电路的发展有着极大的帮助。因此在介绍几种 EBG 结构的同时,本文将重点介绍平面结构的 EBG 单元。

所以要实现性能更优的微波电路,将体现在元器件或电路的物理结构与电磁关系两方面的革新。这种革新来源于对电磁场理论的灵活运用,其实现有赖于新材料、新工艺,特别是微加工技术的成就,而付诸应用将取决于该结构可批量生产且价格低廉、性能优良或满足要求。