



国家自然科学基金
资助项目研究成果

COMPUTER-AIDED DESIGN OF

MICROWAVE
INTEGRATED CIRCUITS

吴咏诗 编著

微波集成电路的 计算机辅助设计

论文集

天津大学出版社

微波集成电路的 计算机辅助设计

吴咏诗 编著



天津大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

微波集成电路的计算机辅助设计: 论文集/吴咏诗编著. - 天津: 天津大学出版社, 2000.3

ISBN 7-5618-1260-4

I. 微… II. 吴… III. 微波集成电路-计算机辅助设计-文集 IV. TN454.02-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 55957 号

出 版 天津大学出版社
出版人 杨风和
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷 河北省邮电印刷厂
发 行 新华书店天津发行所
开 本 850mm×1168mm 1/32
印 张 16 彩插 4
字 数 438 千
版 次 2000 年 3 月第 1 版
印 次 2000 年 3 月第 1 次
印 数 1-800
定 价 50.00 元

序 言

自从本世纪的 60 年代以来,微波集成电路(MIC)有了迅速的发展。发展的初期是由分立的微波固态有源器件与集成的无源元件构成的混合微波集成电路(HMIC)。70 年代后期则迅速发展成在同一块基片上同时集成有源器件与无源元件所构成的单片微波集成电路(MMIC)。这些微波集成电路是一种平面电路,和过去采用微波电子管和波导管、谐振腔、波导元件等构成的立体电路相比,具有尺寸小、重量轻、造价低、性能与可靠性高等一系列优点,现已广泛应用于微波中继通信、移动通信、卫星通信与卫星直播电视、雷达、导航、火箭制导与电子仪器等领域。在小功率微波电路的领域中,它几乎已完全取代了微波立体电路,在大功率微波电路的领域中,它也正迅速地扩展阵地。因此,可以认为,微波集成电路目前已成为微波电路发展的主流。

微波集成电路,尤其是其中的单片微波集成电路在制作时加工精细,工艺复杂,制成后难以修改、调整。因此,要求能精确设计以提高集成电路投片的成功率,所以在电路设计中广泛地采用了计算机辅助设计(CAD)技术。同时,由于各类电子信息系统的复杂度日益提高,对微波集成电路的技术要求也日益严格。例如,对微波小信号放大器往往要求在宽频带内获得低噪声、高增益、低输入与输出驻波比;对微波下混频器则要求低噪声、高变频增益、较强的本振和镜像分量的抑制;对于由几个单元电路集成在同一基片上的多功能微波集成电路,除了要对各个单元电路分别设计以外,还要做全局性的分析与设计。这样复杂和严格的技术要求也决定了它必须要用 CAD。

本书是有关微波集成电路理论及其 CAD 方法的一本论文集,它收集了天津大学电子信息工程学院微波电路计算机辅助设计研究室的教师和研究生们自 80 年代初期以来在这个领域内的研究

论文。这些论文的大部分已先后在国内外的有关学术刊物和会议的论文集中发表过,也有一小部分是首次公开发表的。这些论文主要部分是国家自然科学基金资助项目:“宽带匹配电路理论与应用的研究”(NO.83808)、“有损与混合参数宽带匹配电路的研究”(NO.6862031)、“人工智能在微波电路 CAD 中的应用”(NO.68971033)和“单片微波集成电路设计理论与性能布图的研究”(NO.69332011)的研究成果。按照论文涉及的内容,本书分成以下九个部分:

- (1)微波集成电路技术与设计方法的综述;
- (2)宽带匹配网络理论、设计及其应用;
- (3)混合集总分布参数网络的理论与应用;
- (4)微波集成小信号宽带放大器的设计;
- (5)微波集成电路计算机辅助设计的通用化与智能化;
- (6)微波集成非线性电路的设计;
- (7)微波集成多导体电路与有源滤波电路;
- (8)单片微波集成电路的电磁仿真;
- (9)微波集成电路的版图设计。

可以看出,这些内容已系统地反映了微波集成电路理论及其 CAD 方法的各个主要方面,是相当全面的。

本书是一本研究论文集,它是科学研究成果的汇集,因而它反映出天津大学微波电路计算机辅助设计研究室这一学术集体的学术特色。这主要表现在以下的一些方面:

(1)发展了 Carlin 提出的宽带匹配网络的“实频技术”设计法,提出了“简化实频技术”、“幅相实频技术”与“实频直接设计法”等新方法并用于微波小信号宽带放大器的设计。

(2)将 Youla 用于无耗网络的宽带匹配网络理论系统地发展为有耗宽带匹配网络理论,可以计及网络中元件的非频率依变或频率依变损耗,在此基础上得到了适用于单片微波集成电路放大器精确设计的系列新方法。

(3)对混合集总分布参数网络提出了“模块综合法”,并用于微波集成电路放大器、功率分配器等的设计。

(4)在散射矩阵的基础上提出了有源网络的分割—重建设计方法,并用于高码率光通信接收机前端超宽频带放大器的设计。

(5)将人工智能用于微波电路的CAD,以知识库为支撑得到了微波集成电路放大器和高频超宽带反馈放大器的智能化设计方法。

(6)采用 Voterra 级数法与非线性电流源法分别设计了微波功率放大器与微波振荡器,得到了工程实用的简便设计方法。

(7)提出了一种新型的便于以单面单片微波集成电路实现的MESFET平衡混频器电路,给出了基于非线性/线性分析法的理论分析和设计方法。

(8)对于多功能单片微波集成电路得出了一种全局性设计方法,对于其中的强非线性电路得到了一种全频域的机助分析与设计方法。

(9)基于矩量法对于单片微波集成电路得到一种快速电磁仿真法,可以显著提高运算速度。

(10)对于单面单片微波集成电路提出了对偶—矩量法和等效虚带法等电磁仿真的方法,在此基础上得到了单面单片微波集成电路全局电磁仿真的方法。

这些内容也在一定程度上反映了微波集成电路的理论研究与设计方法的当前新进展。

本书是为在微波技术领域工作的科研人员与工程技术人员提供的科技参考书,也可作为高等学校有关专业的教师、研究生与高年级学生的教学参考书。如果本书能为从事微波集成电路设计与研制工作的人员提供一些参考和借鉴,能对我国微波集成电路技术的发展起到一些促进作用的话,我们将感到荣幸和欣慰。

本书的完成与出版,首先要感谢国家自然科学基金委员会信

息科学部给予我们的大力支持,如果没有他们的支持,我们是不可能完成这些研究、取得这些成果的。其次,本书得以出版,也要感谢天津市科学技术协会自然科学学术专著基金所给予的资助与支持。同时也要感谢天津大学出版社给予的支持与帮助。

吴咏诗

1999年6月

COMPUTER-AIDED DESIGN OF MICROWAVE INTEGRATED CIRCUITS

(Transaction of Papers)

CONTENTS

I. Survey of Microwave Integrated Circuits Technique and Design Procedures

Technique Progress of Monolithic Microwave Integrated Circuits

Computer-Aided Design of Microwave Solid-State Broadband Amplifiers

Research and Progress of CAD Procedures for Microwave Solid State Broadband Amplifiers

II. Theory, Design and Applications of Broadband Matching Networks

A New Procedure for the Design of Broadband Matching Networks—
The Simplified Real Frequency Technique

Computer-Aided Synthesis of the Broadband Matching Networks —
The Amplitude-Phase Real-Frequency Technique

Limited Direct Designing Method of Broadband Matching Networks

The Broadband Matching Theory for Lossy Networks

Computer-Aided Synthesis of the Lossy Broadband Matching Networks

Realizability and Synthesis Methods of Semiuniform Frequency-Dependent Lossy Broadband Matching Networks

Computer-Aided Synthesis of Broadband Matching Networks with Semiuniform Frequency-Dependent Losses

Real Frequency Direct Optimization of Lossy Broadband Matching Networks

The Determination of Equiripple Gain Function of Broadband Match-

ing Networks

III. Theory and Applications of Mixed Lumped-Distributed Networks

The "Building Block" Synthesis of Mixed Lumped-Distributed Networks and Its Application

Computer-Aided Design of Mixed Lumped-Distributed Microwave Power Dividers

New Improvement of CAD for Mixed Lumped-Distributed Broadband Matching Networks

Computer-Aided Design of Mixed Lumped-Distributed Low-Pass Filter

IV Design of Microwave Integrated Circuit Small Signal Broadband Amplifiers

Accurate Computer-Aided Design of MMIC Broadband FET Amplifiers

Multiple Criteria Optimization Design of the Low-Noise Broadband MMIC FET Amplifiers

Computer-Aided Design of Microwave Small Signal Multistage FET Amplifiers

The Simplified Real Frequency Technique Design of Microwave Integrated Commensurate Lines FET Amplifiers

A Method of Direct Design of Broadband Multistage Microwave Amplifiers by Real Frequency Datum

A Segment-Rebuilding Method for Active Networks and Its Applications

Computer-Aided Design of Ultrabroad-Band Amplifiers

Low-Noise Ultrabroad-Band PIN-FET Combined Circuits

Computer-Aided Design of Monolithic Integrated Circuit Ultrabroad-Band Amplifiers

V. The Generalization and Intellectualization of Computer-Aided Design for Microwave Integrated Circuits

The Extension of SPICE Program for Using in the Analysis of MIC's and MMIC's

Optimization Technique with PSPICE and Their Applications to the CAD of Microwave Circuits

The Omni-Automatic Design of MIC MESFET Amplifiers

Performance Analysis and Automatic Design of Microwave Solid-State Feedback Amplifiers

Intelligent Design of High Frequency Electronic Circuits

VI. Design of Microwave Integrated Non-Linear Circuits

The Non-Linear Mathematic Model of Microwave Power MESFET's

The Microwave Power Amplifiers Design by the Use of Volterra Series Method

The Steady-State Response Analysis of Microwave Oscillator with Non-Linear Current Sources Method by the Aid of PSPICE Software

Computer-Aided Analysis and Design of Uniplanar MMIC MESFET Mixers

The Design of A Novel Type MMIC Dual-Gate MESFET Balance Mixers

The Design of A Novel Type Uniplanar MMIC MESFET Balance Mixers

The Omni-Frequency-Domain Harmonic Balance Analysis of Microwave Strong Non-Linear Circuits

The Global Design of Multi-Function Monolithic Microwave Integrated Circuits

VII. Microwave Integrated Multi-Conductors Circuits and Active Filters

The Corrected De-Coupling Model Analysis of MMIC Multi-Conduc-

tors Coupling Microstrips

The Design of MMIC Transversal Type Active Band-Pass Filters

VIII. Electromagnetic Simulation of Monolithic Microwave Integrated Circuits

A Fast Electromagnetic Simulation Technique for MMIC's

A New Method for Electromagnetic Simulation of Uniplanar MMIC's

The Electromagnetic Simulation of Uniplanar MMIC's by Duality-Moment Method

The Global Electromagnetic Simulation of MMIC Amplifiers

IX. Lay-Out of Microwave Integrated Circuits

Microwave Integrated Circuits Lay-Out Software — AutoMask

Automatic Lay-Out System of Microwave Integrated Circuits



吴咏诗教授工作照

目 录

I 微波集成电路技术与设计方法的综述	(1)
单片微波集成电路的技术进展	(1)
微波固态宽带放大器的计算机辅助设计	(17)
微波固态宽带放大器计算机辅助设计方法的研究与进展	(33)
II 宽带匹配网络理论、设计及其应用	(46)
宽带匹配网络设计的一种新方法——简化实频技术 ...	(46)
宽带匹配网络的计算机辅助综合——幅相实频技术 ...	(60)
宽带匹配网络的有限直接设计法	(70)
有耗网络的宽带匹配理论	(80)
有耗宽带匹配网络的计算机辅助综合	(98)
频率依变损耗宽带匹配网络的可实现性及综合	(110)
半均匀频率依变损耗宽带匹配网络的计算机辅助综合	(120)
有耗宽带匹配网络的实频直接优化方法	(135)
宽带匹配网络等波纹增益函数的确定	(143)
III 混合集总分布参数网络的理论与应用	(155)
混合集总分布参数网络的模块综合法及其应用	(155)
混合集总分布参数微波功率分配器的计算机辅助设计	(165)
混合集总分布参数网络计算机辅助设计的新改进	(175)

混合集总分布参数低通滤波器的计算机辅助设计	(189)
IV 微波集成小信号宽带放大器的设计	(197)
微波单片集成电路宽带 FET 放大器的计算机辅助设计	(197)
低噪声宽频带 MMIC FET 放大器的多判据最优化设计	(212)
微波小信号多级 FET 放大器的计算机辅助设计	(225)
微波集成公度线 FET 放大器的简化实频技术设计法	(238)
微波多级 FET 宽带放大器的实频直接设计法	(250)
有源网络的分割—重建方法及其应用	(262)
超宽频带放大器的计算机辅助设计	(273)
低噪声超宽频带 PIN-FET 组合电路	(279)
超宽带放大器单片集成电路计算机辅助设计	(287)
V 微波集成电路计算机辅助设计的通用化与智能化	(295)
扩展 SPICE 程序使其应用于微波集成电路和单片微波集成电路的分析	(295)
PSPICE 优化技术及其在微波电路计算机辅助设计中的应用	(309)
微波集成 MESFET 放大器的全自动设计	(317)
微波固态反馈放大器的性能分析与自动设计	(327)
高频电子线路的智能化设计	(339)
VI 微波集成非线性电路的设计	(351)
微波功率 MESFET 的非线性数学模型	(351)
用 Volterra 级数法设计微波功率放大器	(364)
用非线性电流源法借助 PSPICE 软件分析微波振荡器的稳态响应	(372)
单面单片微波集成电路 MESFET 混频器计算机辅助分析与设计	(379)

新型单片微波集成双栅 FET 平衡混频器的设计·····	(389)
新型单面 MMIC 双栅 MESFET 平衡混频器的设计 ·····	(399)
微波强非线性电路的全频域谐波平衡分析·····	(413)
多功能单片微波集成电路的全局性设计·····	(421)
Ⅶ 微波集成多导体电路与有源滤波电路·····	(430)
MMIC 多导体耦合微带线的去耦模型修正分析法 ·····	(430)
MMIC 横向型有源带通滤波器的设计 ·····	(439)
Ⅷ 单片微波集成电路的电磁仿真·····	(447)
单片微波集成电路的快速电磁仿真技术·····	(447)
单面单片微波集成电路电磁仿真新方法·····	(460)
单面单片微波集成电路对偶—矩量法电磁仿真·····	(467)
单片微波集成电路放大器的全局电磁仿真·····	(477)
Ⅸ 微波集成电路的版图设计·····	(487)
微波集成电路制版软件——AutoMask ·····	(487)
微波集成电路版图自动设计系统·····	(492)

I 微波集成电路技术与设计方法的综述

单片微波集成电路的技术进展

吴咏诗

摘要:根据从 1996 年国际微波会议和微波与毫米波单片集成电路会议上了解的情况,本文综述了单片微波集成电路当前的技术进展和值得注意的动向。

Technique Progress of Monolithic Microwave Integrated Circuits

Wu Yongshi

Abstract: Presented here is a survey about the technical progress and remarkable developing tendency of monolithic microwave integrated circuits based on the information known from IEEE 1996 International Microwave Symposium and Microwave & Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium.

单片微波集成电路(MMIC)将有源器件与无源元件集成于同一芯片上,从而获得:尺寸小、重量轻、性能高、可靠性强等一系列优点。从 70 年代末开始出现以来,已迅速获得广泛应用。现就从 1996 年 IEEE 国际微波会议(IMS)和微波与毫米波单片集成电路

会议(MMWMCS)上了解到的情况,介绍它近年的一些如下技术进展。

1 商用市场的激励

从 MMIC 开始出现的十余年中,它主要应用于军用系统,如相控阵雷达、火箭与导弹的制导和电子对抗等系统中。MMIC 的采用,显著减少了设备的体积和重量,降低了造价,提高了性能,取得了很好的效果,例如在海湾战争中,美军在灵巧武器中就已广泛地采用了 MMIC 与 MIMIC。

90 年代以来,MMIC 在商用产品中已开拓了广大的市场。这主要是商用无线通信市场,它包括:语音、数据、图文与图像的各种通信。例如:蜂窝式个人通信、低轨道卫星移动通信、无线局域网、环球定位卫星系统、卫星直播电视和多点多址分布系统等。另一个重要的市场则是智能交通系统,它包括:车上移动通信、环球卫星定位、道路交通状况的监测、汽车防撞毫米波雷达等。

美国 M/A-COM 公司对 2000 年前商用 MMIC 的市场预测情况如图 1 所示。商用市场的发展可使 MMIC 大批量生产,从而可降低造价而获得更大的市场。这种乐观的前景已激励 MMIC 的研制工作重心向商用产品倾斜。

2 新器件与新技术的采用

采用新型器件以提高电路性能是 MMIC 发展的一个趋向。

采用 InP 基的 HEMT 技术制成的低噪声放大器(LNA)已可达 100 GHz。1995 年发表的 92 GHz ~ 96 GHz,3 级 LNA,增益达 20 dB,噪声低于 4.4 dB。异质结晶体管(HBT)已用于 MMIC LNA。1996 年加拿大 Nortel 实验室已研制了 Ka 波段 GaInP/GaAs HBT 4 级 LNA,增益为 15 dB,噪声低于 5 dB,可用于局域多点分布系统的