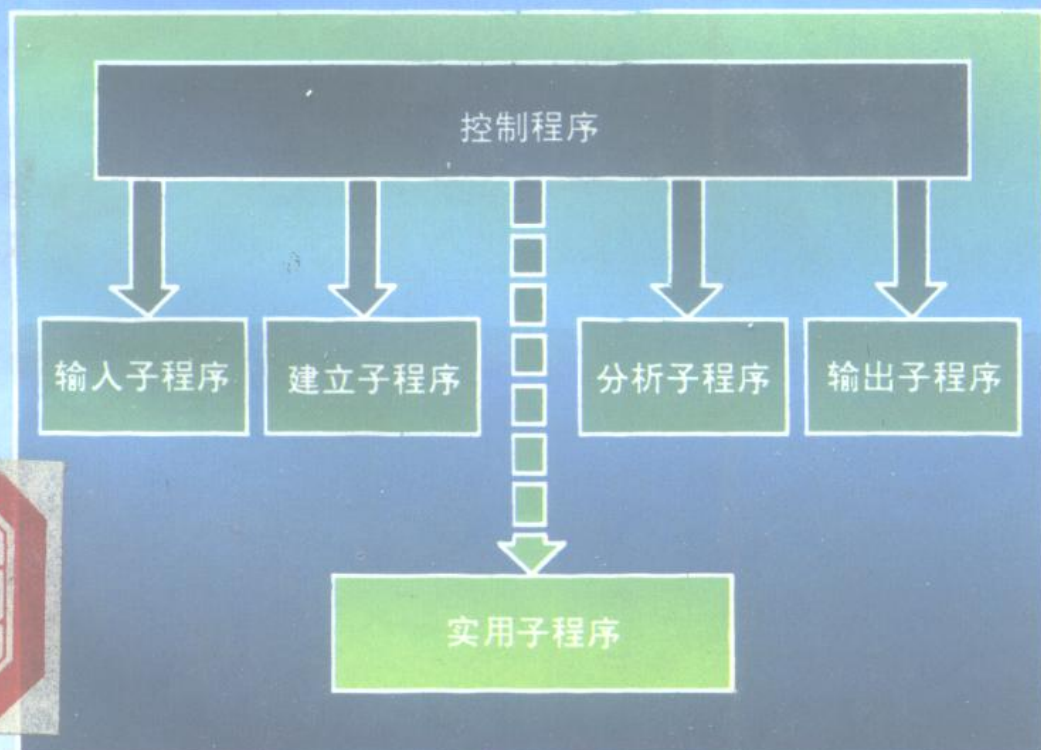


微波集成电路仿真

——mwSPICE 原理及应用

龙忠琪 叶幼慧 陈春鸿 编著



国防工业出版社

73.7556
158

微波集成电路仿真

——mwSPICE 原理及应用

龙忠琪 叶幼慧 陈春鸿 编著



国防工业出版社

9510006

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

微波集成电路仿真——mwSPICE 原理及应用/龙忠琪等编著.

北京:国防工业出版社,1994

ISBN 7-118-01236-X

I. 微…

II. 龙…

III. ①微波集成电路-仿真-电路原理 ②微波集成电路-仿真-应用

IV. TN015

2024/02

微波集成电路仿真

——mwSPICE 原理及应用

龙忠琪 叶幼慧 陈春鸿 编著

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市王史山胶印厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 12 $\frac{3}{4}$ 331 千字

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月北京第 1 次印刷 印数 1—2000 册

ISBN 7-118-01236-X/TN·191

定价:14.90 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

0101110

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘瑄德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘书长：刘瑄德

序 言

随着信息社会的发展,人类在科学实践、生产和生活实践中需要加工、处理、传输的信息量越来越大,对信息处理速度的要求越来越高,所以,人们需要不断地探索新的信息容量更大的电磁频段。微波电子学在微波固态器件、微波集成电路(MIC)和毫米波亚毫米波集成电路(M³IC)方面取得的可喜进展反映了这种不懈努力的成果。微波集成电路不但速度高、性能优良,而且简单可靠、成本低廉,代表着微波电子学发展的主要方向。微波集成电路仿真则是微波集成电路研究、设计和分析中不可缺少的有力手段,它是近几年发展起来的一门综合性的新兴学科,涉及到计算机科学、微波电路、微波器件、集成电路技术、电路仿真技术等多种学科。

本书旨在系统地介绍微波集成电路仿真的原理、方法和应用以及最新进展。全书共分九章。第1章概括介绍微波集成电路仿真的基本概念,微波集成电路仿真程序 mwSPICE 的仿真功能和仿真原理,以使读者用最少的篇幅迅速地对整个程序有一个简明梗概的了解。第2章论述电路仿真中常用的数学方法及 SPICE 系列程序中的主要算法,介绍如何根据实际的电路结构建立电路系统方程,然后又如何求解线性电路方程,如何处理非线性问题和瞬态分析问题,如何处理速度、精度、稳定性和有效性问题,以期对从事电路仿真研究的读者有所启迪和借鉴。第3~6章详细介绍了 mwSPICE 中的元件、器件、子电路及源信号的实用模型及其表征方法,其中包括无源元件如电阻器、电容器、电感和互感器、微传输线和微耦合线等;有源器件包括 JD、SBD、PIN 等二极管, NPN、PNP 双极型三极管、PJF、NJF、NMOS、PMOS、GaAsMESFET 等场效应晶体管,同时收入了双栅 GaAsMESFET、HEMT 和 HBT

等新型微波器件,这对正确理解、定义、使用和扩展各种元器件的模型及模型参数有着重要的参考意义。第7章介绍 mwSPICE 的各种分析功能。第8章介绍电路文件的结构及书写方法。第9章是应用举例,其中多数是作者实践过的,部分是他人实践过的。这些实例以及各章节中的大量举例是为了让读者体会 mwSPICE 强的分析能力和各种句型格式、规则及用法。

本书初稿于1991年10月写于国外,回国后叶幼慧同志校阅了全稿并改写了部分章节,其中第2章由陈春鸿同志补充并重写。参加本书部分编写者还有龙胜春、厉鲁卫。在全书编写过程中,得到了浙江工业大学校、系领导的积极支持和潘铁宝教授、汪日康副教授的热情帮助,在此一并表示谢意。

龙忠琪

于杭州 浙江工业大学

内 容 简 介

本书以 mwSPICE 为重点,结合近年来它的最新进展,系统地论述了微波集成电路仿真的原理、方法和应用。全书共分九章:第1章概论;第2章数学方法;第3~6章介绍元件、器件、子电路和源信号的实用模型;第7~8章介绍 mwSPICE 的分析功能和电路文件;第9章应用实例。mwSPICE 是一种电子线路通用分析程序,论述中理论与实用并重,因此本书不仅是从事集成电路、微波集成电路及其仿真技术研究、设计的专业人员的有用参考书,也适合于高等院校有关专业的师生及 mwSPICE 用户阅读。

目 录

第1章 概论	(1)
§ 1.1 微波集成电路	(1)
§ 1.2 微波集成电路仿真	(2)
§ 1.3 mwSPICE 的电路仿真功能	(3)
§ 1.4 mwSPICE 的电路仿真原理	(6)
§ 1.5 mwSPICE 的程序结构和仿真过程	(7)
第2章 数学方法	(10)
§ 2.1 引言	(10)
§ 2.2 电路方程的建立	(13)
§ 2.2.1 基本节点分析法(NA)	(14)
§ 2.2.2 改进节点分析法(MNA)	(15)
§ 2.2.3 混合分析法(HAM)	(18)
§ 2.2.4 稀疏列表法(STF)	(20)
§ 2.3 线性代数方程的求解	(22)
§ 2.3.1 高斯消元法和 LU 分解法	(22)
§ 2.3.2 稀疏矩阵技术	(27)
§ 2.4 非线性电路直流分析	(31)
§ 2.4.1 牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson)法	(32)
§ 2.4.2 收敛问题	(34)
§ 2.4.3 改进的 N-R 算法	(36)
§ 2.5 数值积分算法	(37)
§ 2.5.1 显式积分法和隐式积分法	(38)
§ 2.5.2 时间步长和稳定性问题	(42)
§ 2.5.3 变步长法和变阶法	(43)
§ 2.6 敏感度分析	(45)

§ 2.6.1 交流敏感度和直流敏感度	(45)
§ 2.6.2 敏感度计算	(45)
第3章 无源电路元件及其表征	(54)
§ 3.1 微波传输线	(54)
§ 3.1.1 理想传输线	(54)
§ 3.1.2 微传输线	(67)
§ 3.1.3 微带线的不连续性	(74)
§ 3.2 微耦合线	(84)
§ 3.2.1 微带耦合线	(85)
§ 3.2.2 郎格(Lange)耦合器	(90)
§ 3.2.3 微带耦合线的 mwSPICE 表征	(92)
§ 3.3 电感器	(96)
§ 3.3.1 微波集成电感器	(96)
§ 3.3.2 电感器的 mwSPICE 表征	(98)
§ 3.4 电容器	(102)
§ 3.4.1 微波集成电容器	(102)
§ 3.4.2 电容器的 mwSPICE 表征	(104)
§ 3.5 电阻器	(105)
§ 3.5.1 微波集成电阻器	(105)
§ 3.5.2 电阻器的噪声模型	(109)
§ 3.5.3 电阻器的 mwSPICE 表征	(109)
§ 3.6 气桥	(112)
第4章 半导体器件模型及其表征	(113)
§ 4.1 结型二极管(JD)	(113)
§ 4.1.1 结型二极管的静态特性	(113)
§ 4.1.2 结型二极管的动态特性	(114)
§ 4.1.3 结型二极管的温度特性	(116)
§ 4.1.4 结型二极管的小信号模型	(117)
§ 4.1.5 结型二极管的噪声模型	(118)
§ 4.1.6 结型二极管的 mwSPICE 表征	(119)
§ 4.2 肖特基势垒二极管(SBD)	(121)
§ 4.2.1 SBD 二极管特性	(121)

§ 4.2.2	SBD 二极管模型及其 mwSPICE 表征	(123)
§ 4.3	PIN 二极管(PIN)	(124)
§ 4.3.1	PIN 二极管特性	(124)
§ 4.3.2	PIN 二极管模型	(125)
§ 4.3.3	PIN 二极管的 mwSPICE 表征	(127)
§ 4.4	稳压二极管	(129)
§ 4.5	双极型晶体管(BJT) NPN PNP	(129)
§ 4.5.1	EM1 模型	(130)
§ 4.5.2	EM2 模型	(134)
§ 4.5.3	EM3 模型	(140)
§ 4.5.4	GP 模型	(150)
§ 4.5.5	SPICE 模型	(153)
§ 4.5.6	双极型晶体管的 mwSPICE 表征	(161)
§ 4.6	结型场效应管(NJF,PJF)	(166)
§ 4.6.1	静态特性	(167)
§ 4.6.2	动态特性	(170)
§ 4.6.3	温度特性	(171)
§ 4.6.4	小信号模型	(172)
§ 4.6.5	噪声模型	(174)
§ 4.6.6	结型场效应管的 mwSPICE 表征	(175)
§ 4.7	MOS 场效应管(NMOS,PMOS)	(177)
§ 4.7.1	静态特性	(177)
§ 4.7.2	动态特性	(182)
§ 4.7.3	温度特性	(185)
§ 4.7.4	小信号模型	(185)
§ 4.7.5	噪声模型	(187)
§ 4.7.6	MOS 场效应管的 mwSPICE 表征	(188)
§ 4.8	砷化镓场效应管(GaAs MESFET)	(195)
§ 4.8.1	结构和工作原理	(195)
§ 4.8.2	静态特性	(200)
§ 4.8.3	动态特性	(206)
§ 4.8.4	温度特性	(208)

§ 4.8.5	小信号模型	(208)
§ 4.8.6	噪声模型	(210)
§ 4.8.7	镓砷场效应管的 mwSPICE 表征	(211)
§ 4.9	双栅镓砷场效应管	(220)
§ 4.10	HEMT 管	(222)
§ 4.10.1	结构和工作原理	(222)
§ 4.10.2	特性和等效电路	(225)
§ 4.10.3	噪声模型	(227)
§ 4.10.4	HEMT 管 DCFL 非门电路	(227)
§ 4.11	HBT 管	(229)
§ 4.11.1	结构和工作原理	(229)
§ 4.11.2	HBT 管的等效电路	(229)
§ 4.11.3	HBT 管逻辑电路	(232)
§ 4.12	mwSPICE 的半导体器件模型库	(233)
第 5 章	子电路和自定义网络	(235)
§ 5.1	子电路	(235)
§ 5.1.1	集成 PIN 二极管(PIN)	(235)
§ 5.1.2	单独封装 PIN 二极管(PIN2)	(236)
§ 5.1.3	线性 R 、 L 、 C 子电路	(237)
§ 5.2	自定义网络	(240)
第 6 章	源信号及其表征	(244)
§ 6.1	独立源信号	(244)
§ 6.1.1	独立电压源	(244)
§ 6.1.2	独立电流源	(246)
§ 6.1.3	mwSPICE 中的独立源信号	(247)
§ 6.1.4	功率源和功率表	(258)
§ 6.2	受控源	(260)
§ 6.2.1	压控电压源(VCVS) E	(261)
§ 6.2.2	流控电流源(CCCS) F	(262)
§ 6.2.3	压控电流源(VCCS) G	(263)
§ 6.2.4	流控电压源(CCVS) H	(265)
§ 6.2.5	小结	(266)

第 7 章 电路分析	(268)
§ 7.1 直流分析	(269)
§ 7.1.1 直流工作点分析(OP)	(269)
§ 7.1.2 直流小信号传输函数值分析(TF)	(270)
§ 7.1.3 直流传输曲线(DC)	(270)
§ 7.1.4 直流敏感度分析(SENS)	(272)
§ 7.2 交流分析	(274)
§ 7.2.1 交流小信号分析(AC)	(274)
§ 7.2.2 交流敏感度分析(SENSAC)	(275)
§ 7.2.3 失真度分析(DISTO)	(275)
§ 7.2.4 噪声分析(NOISE)	(277)
§ 7.2.5 <i>S</i> 参数和 <i>Y</i> 参数(<i>SP</i> & <i>YP</i>)	(277)
§ 7.3 瞬态分析	(280)
§ 7.3.1 瞬态分析(TRAN)	(280)
§ 7.3.2 快速傅里叶分析(FOUR)	(282)
§ 7.3.3 功率分析	(282)
§ 7.4 温度分析(TEMP)	(286)
§ 7.5 其它辅助功能	(287)
§ 7.5.1 初始条件设定(IC)	(287)
§ 7.5.2 节点电压设定(NODESET)	(287)
§ 7.5.3 引用其它文件(INCLUDE)	(288)
§ 7.5.4 辅助功能选择(OPTIONS)	(289)
§ 7.5.5 函数变换(FUNCTION)	(292)
第 8 章 电路文件	(295)
§ 8.1 电路文件的结构	(295)
§ 8.1.1 DIM 块	(296)
§ 8.1.2 VAR 块	(298)
§ 8.1.3 EQN 块	(300)
§ 8.1.4 CKT 块	(301)
§ 8.1.5 MODEL 块	(308)
§ 8.1.6 SOURCE 块	(310)
§ 8.1.7 CONTROL 块	(312)

§ 8.1.8 SPICEOUT 块	(314)
§ 8.1.9 FUNCT 块	(317)
§ 8.1.10 OUT 块	(317)
§ 8.1.11 FREQ 块	(319)
§ 8.1.12 GRID 块	(320)
§ 8.2 电路文件书写注意事项	(324)
§ 8.3 最简电路文件	(327)
第 9 章 应用	(330)
§ 9.1 晶体管单级放大器	(330)
§ 9.1.1 直流分析(OP 和 SENS)	(330)
§ 9.1.2 交流分析和瞬态分析	(338)
§ 9.2 可控多谐振荡器	(342)
§ 9.3 Colpits 振荡器	(345)
§ 9.4 TTL 与非门电路	(348)
§ 9.5 集成运算放大器 $\mu A741$	(350)
§ 9.6 微带耦合线	(355)
§ 9.7 2~6GHz 有耗匹配微波集成放大器	(358)
§ 9.8 2~20GHz 分布放大器	(362)
附录	(369)
附录 A 双端口网络的参数表征	(369)
§ A.1 双端口网络的 Z 、 Y 、 h 和 $ABCD$ 参数	(369)
§ A.2 双端口网络的 S 参数	(372)
§ A.3 双端口网络的 T 参数	(376)
§ A.4 双端口网络参数之间的转换	(377)
附录 B mwSPICE 的指令菜单	(382)
参考文献	(390)

第 1 章 概 论

§ 1.1 微波集成电路

近年来,随着微波固态器件技术取得重大进展,普通集成电路技术已进入微波阶段,出现了微波集成电路(MIC)。微波集成电路是用扩散、外延、沉积、蚀刻等制造技术将无源微波元件和有源微波固态器件制作在同一块半导体基片上的微波电路。同普通集成电路一样,微波集成电路可分为单片微波集成电路(MMIC)和混合微波集成电路(HMIC)。MMIC 是将所有的有源器件(如 FET 等)和无源元件(如 R、C、L 和 LIN 等)都生长在或沉积在最大尺寸为几平方毫米的同一块半导体基片上或基片内的微波集成电路。HMIC 则是由多种不同类型的集成电路(如单片电路、普通集成电路或分立元件等)组成的混合式的微波集成电路,又有集中参数电路和分布参数电路之分。混合微波集成电路技术简单,容易制作,所以微波集成电路初期多为 HMIC。但 MMIC 发展十分迅速,现在已有放大、移相、混频、微波开关等多种功能片问世。一种单片集成接收机的频率已达 12GHz 以上,增益大于 25dB,噪声系数小于 4dB,而尺寸只有 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。两级双栅场效应管放大器的频带可达 $2 \sim 26.5\text{GHz}$,增益 18dB,片子尺寸只有 $3.02\text{mm} \times 1.62\text{mm}$ 。当前,MMIC 正朝着毫米波单片集成电路(M³IC)^①的方向发展,具有很好的发展和应用前景。

① M³IC=Millimetre-wave Monolithic Integrated Circuits 的缩写。

§ 1.2 微波集成电路仿真

微波集成电路仿真是近年来发展起来的一门新兴学科,是涉及微波技术、集成电路技术和计算机电路仿真技术等的一门综合性学科。随着电子计算机和集成电路技术的发展,计算机电路仿真的重要性日益突出,应用日益广泛。自从 60 年代第一批普通电路分析程序 NET、ECAP、CONNAP 等推出之后,很快就出现了一批功能更强、应用更广的集成电路仿真程序,其中,1972 年美国加州大学 L. W. Nagel 等人在 CANCER 程序的基础上开发出的 SPICE 程序就是应用广泛且比较成功的一例。后来,几经改进、增强,又先后推出了 SPICE2、SPICE3 等多种版本。可以说,60 年代以前的那种传统的电子线路设计方式(图 1.2-1)已逐渐被以电路仿真为主的现代工作模式(图 1.2-2)所取代。这不仅是因为随着电路复杂程度和工作频率的不断提高,用面包板搭试的方法已难以对电路的电气性能作出精确可信的评估,并且因集成电路尤其是大规模集成电路体积小、密度大、寄生参数和环境因素与分立元件已大不相同,从而对电路进行实地测量与调试是十分困难甚至是不可能的。因此,将电路模型化,用计算机程序仿真电路的电气性能进而优化设计是势在必行的。这不但可以代替实验室内的各种实验测量,而且可以避免许多实际问题,省力、省时、灵活、方便,效率高,费用低。1985 年,美国 ESSOF 公司在 Berkeley SPICE 的基础上推出了 mwSPICE 程序^①,将集成电路的仿真频率提高到微波段。它是一种通用仿真程序,可以仿真各种电子线路,分立的或集成的,模拟的或数字的,单元电路或比较复杂的子系统,频率从直流直到微波近 100GHz。所以微波集成电路仿真程序 mwSPICE 是电路分析、电路设计,特别是微波集成电路分析和设计的重要手段。

① mwSPICE=Simulation Program for microwave Integrated Circuits in Evaluation 的缩写。