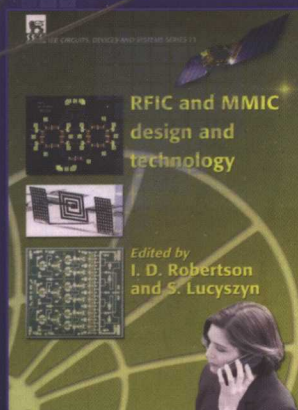


国外电子与通信教材系列

# 单片射频微波 集成电路技术与设计

RFIC and MMIC Design and Technology



[英] Ian Robertson 编著  
Stepan Lucyszyn

文光俊 谢甫珍 李家胤 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

# 单片射频微波 集成电路技术与设计

RFIC and MMIC Design and Technology

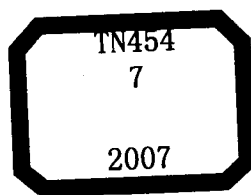


著者: [美] 詹姆斯·L·基尔  
译者: 李海林、李海霞、李海松、李海强

电子工业出版社

http://www.pri.com.cn

010-68995302



国外电子与通信教材系列

# 单片射频微波集成电路 技术与设计

RFIC and MMIC  
Design and Technology

[英] Ian Robertson 编著  
Stepan Lucyszyn

文光俊 谢甫珍 李家胤 译

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍单片射频微波集成电路技术与设计方法。在详细地介绍了单片射频微波集成电路的制造工艺、可用的无源和有源器件结构与模型、设计与仿真方法、测试技术、应用与发展趋势的基础上,全面阐述了各种单元基础电路与集成系统的设计方法及新技术。全书共12章。前4章介绍了单片射频微波集成电路使用的硅和化学元素周期表中的第III族至第IV族化合物半导体工艺技术与特点、集总式和分布式无源器件、双极型和场效应晶体管、电路和电磁场设计工具与仿真技术,第5章至第11章分别介绍了单片放大器、振荡器、混频器、开关和衰减器、集成天线和收发机的设计方法及最新成果,第12章介绍了单片射频微波集成电路的测试技术。

本书是现代射频微波集成电路芯片技术与设计的教材或参考书。既可作为研究生或高年级本科生的教材,也可作为工程应用的参考书,同时又是一本比较全面、系统的单片射频微波集成电路技术领域的著名专著。

RFIC and MMIC Design and Technology by Ian Robertson and Stepan Lucyszyn.

Original English Language Edition published by The IEE, Copyright ©2001, All Rights Reserved.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY, Copyright ©2006

本书中文简体版专有出版权由The IEE授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2005-5654

### 图书在版编目(CIP)数据

单片射频微波集成电路技术与设计 / (英) 罗伯逊 (Robertson, I.) 等编著; 文光俊, 谢甫珍, 李家胤译.  
北京: 电子工业出版社, 2007.2

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: RFIC and MMIC Design and Technology

ISBN 978-7-121-03830-3

I. 单... II. ①罗... ②文... ③谢... ④李... III. 单片电路: 射频电路: 微波电路: 集成电路-教材  
IV. TN4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第012800号

责任编辑: 李秦华

印 刷: 北京冶金大业印刷有限公司

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 27.25 字数: 698千字

印 次: 2007年2月第1次印刷

定 价: 56.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长	

# 译者序

单片射频微波集成电路技术为现代无线通信、定位、传感、识别等系统提供了关键的核心元器件及集成组件。射频微波集成电路设计对现代各种无线技术的发展和成功起到了关键的作用，因此，得到了学术界和工业界的特别关注。半导体材料制造技术，微纳米级加工及处理技术，基于物理结构的有源和无源半导体器件设计与性能仿真技术的飞跃和发展，促进了各种高性能高可靠性半导体器件，超大规模集成电路（VLSI/ULSI）、射频微波集成电路（RFIC/MMIC）、微机电系统（RF MEMS）、片上系统（SOC）的诞生和实用化，推动了半导体器件、集成电路工作频率从高频到微波、毫米波至红外线波段的演进，奠定了无线通信、定位、传感、识别等系统从单功能、分离元件式向高可靠性、集成化、多功能综合系统方向发展的客观物质条件和技术基础。另一方面，改变了人们生活和工作方式的无线应用市场的快速增长，促进了基于新型半导体工艺及器件的单片射频、微波、毫米波集成电路与系统不断扩张，由此导致了具有深刻理解并掌握单片射频微波集成电路设计原理及技术的工程师的巨大需求。而目前国内院校采用的微波教材多是从电磁场理论出发，讨论导波系统的基本原理，甚少涉及到面向应用的射频和微波电路，几乎没有涉及到单片射频微波集成电路与系统。鉴于以上原因，我们决定翻译该书，并希望该书能早日与读者见面。

本书是Ian D. Robertson教授等富有实践经验的学者为高年级本科生和研究生编写的教材，其着重介绍基本原理和方法，集成所有的关键单片射频微波电路与系统技术，自1995年出版第一版以来，受到了学术界和工业界的青睐和推崇，成为一本全球著名的、在该学科领域影响很大的教科书。

本书的翻译得到了原著作者——英国Surrey大学教授Ian Robertson博士的支持与鼓励，在此表示诚挚的感谢。

文光俊教授负责了本书第1章至第6章，以及第12章的翻译及全书的审校工作；谢甫珍副教授翻译了第7章、第8章和第9章；李家胤教授翻译了第10章和第11章。杨红、冉萌、吴凯敏、刘斐珂等研究生参加了译文的校对工作，在此表示感谢。借此机会，对所有为本书的出版提供帮助的人们表示诚挚的谢意！

由于译者水平有限，加之时间仓促，译文中难免有不妥之处，希望广大读者给予批评指正。

译者

2006年12月

于电子科技大学，成都



# 序 言

RFIC 和 MMIC 技术为各种各样的微波和毫米波通信、雷达、传感系统提供了核心的元器件。这种技术已处于其发展过程中的第三“时期”。在第一时期，唯一地使用了 GaAs MESFET，先驱性地探索了许多关键电路技术，同时，设计者通过应用寄生参数低的元器件和许多有源器件的能力去适应芯片尺寸的约束。在第二时期，GaAs 和 InP 异质结构器件 HEMT 和 HBT 性能得到迅速改善，从而使电路能够运行在 100 GHz 以上，几乎每一次专题讲座和会议上都有新的标志性器件性能的报道。第一本书“MMIC Design”是在工作频率高于 30 GHz 的有源电路普遍化之前，MMIC 技术发展的第二个时期的开始阶段完成的。

本书为“MMIC Design”一书的修改版，出版于 MMIC 技术欣欣向荣发展的第三时期初期：一方面，HEMT 技术已经成熟，工作频率达到 100 GHz 的 GaAs MMIC 已经成为标准产品；另一方面，硅及锗硅两种技术的进步，大众消费应用要求更低的元器件成本的无情驱动，已经戏剧地将 MMIC 技术重点转向硅技术。因此，尽管本书第一版致力于讲述 GaAs 技术，但仍然用了一个独立章节介绍硅基毫米波电路技术，目前，这本书还可以买到，可以发现硅技术贯穿全书。

本书的目标在于介绍技术，并将所有的关键电路技术集成为一个单行本。本书适合于四年级大学生和硕士研究生教材，也是从事该技术领域工作的工程师和研究者的参考书。本书第 1 章介绍 RFIC 和 MMIC 技术，给出了它们的应用，描述了技术和电路实现的方法。第 2 章详细地讲述了不同的有源器件，比较了它们的性能。第 3 章讲述了所使用的各种集总式和分布式无源元器件。第 4 章讲述了各种 CAD 技术的标志性特点，着重于如何最有效地应用商用化 CAD 工具。第 5 章讲述了放大器设计方法，从基础开始，逐渐过渡到一些非常先进的概念。第 6 章讲述振荡器设计。第 7 章给出了单片混频器设计中应用到的各种不同方法。第 8 章讲述了用于开关和可变衰减器电路技术与设计方法。第 9 章讲述了数字和模拟移相器的设计。集成天线设计已发展成为一个独立的研究主题，本书第 10 章系统全面地讲述了已报道的关于集成天线的许多技术。第 11 章集中前面章节介绍的各种电路技术，讨论了如何实现完整的单片收发机。最后，在第 12 章中介绍了进行准确地片 S 参数测量。

Ian Robertson and  
Stepan Lucyszyn

# 前 言

在本书第一版出版后不久,从许多方面考虑都可称之为GaAs MMIC工业之父的Jim Turner先生不幸去世了。Jim Turner先生一生致力于器件技术,Caswell和全世界的人们都很怀念他。如果说Jim先生是GaAs MMIC技术之“父”,那么Caswell则是该技术的“摇篮”,自1968年起,我有幸一直工作在那里,见证了技术的发展过程,并愿意为技术的进步贡献出个人的力量。自Jim先生为本书的第一版题写序言之后,GaAs MMIC工业不断成熟,并以比Jim先生预期速度快许多地迅速扩张。

GaAs FET MMIC初期演示验证发生于20世纪60年代早期,由之而来的技术发展到现在,已经渗透到人们生活的许多角落。多数人将拥有、看到或使用过主要依赖于GaAs基器件实现其功能的系统——无论他们是否知道这一点。移动电话、卫星电视接收机、通信链路、高速光学光纤链路、雷达,等等,实在是不胜枚举。从40年前的第一小块有光泽的黑色小片开始,到现在用于生产的6英寸<sup>①</sup>晶圆片,的确是一条漫长的发展之路。

硅基工业界嘲笑“未来的技术是GaAs,已经是,仍将一直是”,这句话现在显然是不再正确了。目前,全球的GaAs元器件销售规模在20亿美元左右,并且以每年40%的速度快速增长。20世纪末期,在GaAs器件历史上出现了首次供不应求的情况,刺激了许多供应商提高生产能力和产量。技术的发展是一条漫漫长路,在20世纪80年代后期,几家机构停止了MMIC产品业务,他们在该技术产业增长过程中过早地进行了大量投资,没能等待到今天。

硅和锗硅技术的发展已经提高了这些技术的性能,它们现在能够满足一些曾经只能应用GaAs技术应用的要求。这些对GaAs工业的生存不构成任何威胁,因为在毫米波频段的新应用之门正在向GaAs工业敞开,早已预期的毫米波频段开发与应用最终定会出现。20~40 GHz频段的LMDS系统和76 GHz频段的自动巡航控制系统仅是推动GaAs技术向前发展的两个具体应用需求。赝同晶HEMT是20世纪80年代开始研究的一种奇异器件,现在已经实现正常量产,并迅速取代MESFET成为关键器件。HBT,磷化铟HEMT,异性(metamorphic)HEMT等器件技术的进一步发展,将实现未来的系统设计者要求的所有电路功能。没有任何迹象表明从GaAs MMIC发展起来的通用技术在可预见的将来会过时,我们可以坚信,目前正在实验室研究的其他技术将会成熟,将满足最终出现的任何要求。

本书自1995年第一次出版发行后,一直是一本必不可缺的读物。这一版进行了彻底的修改和升级,带领读者了解新技术、电路设计及器件应用。我们期待这本颇有价值的图书将会有更多的修订版本,我们确信技术的未来会比我们想象的更加美好、精巧和引人入胜。祝大家阅读愉快!

Fred Myers  
Marconi Caswell

<sup>①</sup> 1英寸 = 2.54 cm ——编者注。

## 原著合作者名单

Ian D. Robertson, 英国 Surrey 大学

Stepan Lucyszyn, 英国伦敦帝国理工学院

Iain Thayne, Khaled Elgaid, 英国 Glasgow 大学 Gary Ternent 分校

Christos E. Chrisostomidis, 希腊陆军学院

Douglas S. McPherson, 加拿大 Quake 技术公司

Mike W. Geen, 英国马可尼 Caswell 公司

K. K. Michael Cheng, 中国香港中文大学

Jai S. Joshi, 爱尔兰欧洲航天局 (ESTEC)

Steve J. Nightingale, 英国 ERA 技术公司

Kian Sen Ang, 新加坡国防科学技术实验室

Vincent F. Fusco, 英国贝尔法斯特市皇后大学

## 致 谢

本书编者首先感谢所有作者对本书所做出的个人贡献,感谢Surrey大学和伦敦帝国理工学院给予的支持,正是这些支持使本书才能够圆满地完成。我们感谢英国工程及自然科学研究委员会(EP SRC)在经济上的支持,他们支撑我们的研究工作超过15年。我们很感谢以下公司给予的经济及精神上的支持:日本Asahi化学公司,韩国EONCOM公司,韩国RF Hitec公司,瑞典爱立信公司,欧洲宇航局(荷兰),欧洲COM-DEV公司,英国BAE系统公司,英国BT公司,英国QinetiQ公司,英国Marconi Caswell公司,英国Matra Marconi Space公司及Thorn-EMI公司。

本书中提供的许多材料来自从事研究的学生及助手多年研究的结果,我们很感谢下列诸位的工作,他们是M. S. Aftanasar, K. S. Ang, A. Ashtiani, A. H. Baree, M. Bokatius, M. Chongcheawchamnan, C. Chrisostomidis, S. Economides, M. Gillick, S. Goasguen, T. Gokdemir, U. Karacaoglu, D. S. McPherson, R. Mellie, S. Miya, S. Nam, C. Y. Ng, C. Oztek-Yerli, G. Passiopoulos, D. Sanchez-Hernandez, F. Saunders, N. Siripon 和 G. W. Dahlmann。

在许多方面,我们从本领域的其他研究者的经验及意见中受益非浅,我们很感谢以下对本书做出了间接贡献的人员: M. Alderstein, F. Ali, A. Barnes, E. Bayar, J. S. Bharj, M. Brookbanks, S. Cornelius, L. Devlin, I. G. Eddison, H. J. Finlay, G. Green, R. H. Jansen, S. Marsh, F. Myers, S. E. Schwarz, B. Y. Song, J. Swift, M. J. Underhill 和 E. M. Yeatman。

基于个人意见, Ian Robertson很感谢C. W. Turner在伦敦国王学院1983年至1984年度微波工程本科生课程中激发了作者对MMIC的兴趣,也要感谢A. H. Aghvami作为博士生导师对作者多年的支持和鼓励。也很感谢M. J. Kelly和B. L. Weiss自作者于1998年到Surrey大学后给予的支持。

Stepan Lucyszyn感谢Stellenbosch大学的H. C. Reader, Cascade Microtech欧洲公司的C. Stewart为本书第12章提供了素材方面的帮助。Stepan Lucyszyn个人很感谢他的妻子Rayna给予的耐心。最后,他真诚地感谢伦敦帝国理工学院光学与半导体器件研究小组所有成员给予的鼓励和支持。

Iain Thayne, Khaled Elgaid和Gary Ternent非常感谢EP SRC和Glasgow大学电子电气工程系在他们准备其相关章节期间给予的支持。

Jai S. Joshi感谢飞利浦微波公司允许应用他们的开关FET模型及数据评价FET开关性能。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 MMIC 技术发展简史 .....	2
1.3 单片微波集成电路的优点和不足 .....	4
1.4 应用 .....	7
1.5 有源器件技术 .....	11
1.6 设计方法 .....	12
1.7 多芯片模块技术 .....	16
1.8 参考文献 .....	18
<b>第 2 章 器件及制造技术</b> .....	24
2.1 引言 .....	24
2.2 基片及技术 .....	24
2.3 无源集总元件 .....	29
2.4 双极型晶体管 .....	34
2.5 场效应晶体管 .....	45
2.6 双极型器件和场效应器件的比较 .....	59
2.7 小结 .....	62
2.8 参考文献 .....	62
<b>第 3 章 无源元器件</b> .....	63
3.1 引言 .....	63
3.2 电感器 .....	63
3.3 电容器 .....	68
3.4 电阻器 .....	70
3.5 通孔和接地 .....	71
3.6 微带元件 .....	73
3.7 共面电路 .....	78
3.8 多层技术 .....	81
3.9 微机械加工的无源元件 .....	83
3.10 参考文献 .....	87
<b>第 4 章 CAD 技术</b> .....	95
4.1 引言 .....	95
4.2 集成的 CAD 设计环境 .....	96

4.3	CAD 程序包的特点 .....	97
4.4	电路模拟引擎 .....	101
4.5	商业 CAD 软件包 .....	109
4.6	商用建模软件 .....	114
4.7	电磁模拟工具 .....	116
4.8	参考文献 .....	134
<b>第 5 章</b>	<b>放大器 .....</b>	<b>137</b>
5.1	引言 .....	137
5.2	经典的稳定性和增益的分析 .....	138
5.3	匹配技术 .....	144
5.4	直流偏置注入 .....	148
5.5	电抗匹配式放大器设计 .....	153
5.6	有损耗匹配 .....	155
5.7	FET 反馈放大器 .....	156
5.8	分布式放大器 .....	158
5.9	有源匹配 .....	166
5.10	功率放大器 .....	168
5.11	低噪声放大器 .....	175
5.12	小结 .....	177
5.13	参考文献 .....	179
<b>第 6 章</b>	<b>振荡器 .....</b>	<b>186</b>
6.1	引言 .....	186
6.2	设计原理 .....	187
6.3	有源器件 .....	190
6.4	大信号振荡器设计的 CAD 技术 .....	192
6.5	振荡器的相位噪声 .....	194
6.6	MMIC 压控振荡器的设计 .....	195
6.7	MMIC 注锁振荡器的设计 .....	197
6.8	参考文献 .....	204
<b>第 7 章</b>	<b>混频器 .....</b>	<b>208</b>
7.1	引言 .....	208
7.2	混频器分析 .....	209
7.3	背景阅读材料 .....	210
7.4	混频器电路分析 .....	210
7.5	二极管混频器 .....	213
7.6	耦合结构 .....	227
7.7	有源 FET 混频器 .....	233
7.8	电阻性 FET 混频器 .....	238

7.9	其他混频器结构 .....	243
7.10	最后的一些注释与建议 .....	247
7.11	参考文献 .....	251
<b>第 8 章</b>	<b>开关和衰减器 .....</b>	<b>261</b>
8.1	引言 .....	261
8.2	GaAs FET MMIC 开关 .....	261
8.3	数字衰减器 .....	268
8.4	数字衰减器的设计举例 .....	274
8.5	模拟衰减器 .....	279
8.6	小结 .....	281
8.7	参考文献 .....	281
<b>第 9 章</b>	<b>移相器 .....</b>	<b>284</b>
9.1	引言 .....	284
9.2	模拟移相器的实现 .....	285
9.3	数字实现 .....	301
9.4	小结 .....	312
9.5	参考文献 .....	312
<b>第 10 章</b>	<b>集成天线 .....</b>	<b>318</b>
10.1	引言 .....	318
10.2	基本集成天线要求 .....	318
10.3	已报道的集成天线的应用 .....	320
10.4	集成天线反向阵列实例 .....	320
10.5	集成天线选择 .....	323
10.6	集成天线举例 .....	329
10.7	光子带隙天线 .....	333
10.8	微机械加工的天线 .....	334
10.9	微机电系统天线 .....	340
10.10	小结 .....	342
10.11	参考文献 .....	342
<b>第 11 章</b>	<b>收发机 .....</b>	<b>349</b>
11.1	引言 .....	349
11.2	常规的上/下频转换结构 .....	350
11.3	直接转换结构 .....	354
11.4	调制器、解调器和频率转换器 .....	356
11.5	有源滤波器 .....	361
11.6	功率放大器线性化 .....	364
11.7	有源隔离器和环形器 .....	366

11.8	光电集成电路 (OEIC) .....	369
11.9	参考文献 .....	371
<b>第 12 章</b>	<b>测试技术 .....</b>	<b>379</b>
12.1	引言 .....	379
12.2	测试夹具测量 .....	380
12.3	探针台测试 .....	388
12.4	热特性及低温测量 .....	397
12.5	实验性场探测技术 .....	399
12.6	小结 .....	403
12.7	参考文献 .....	403
	<b>中英文术语对照 .....</b>	<b>411</b>



# 第1章 绪 论

I. D. Robertson

## 1.1 引言

单片微波集成电路(MMIC)是一种把有源和无源元器件制作在同一块半导体基片上的微波电路,其工作频率从1 GHz到100 GHz以上,广泛用于各种不同技术及电路中。术语中附加“单片”一词的目的在于使这种微波电路同普通微波集成电路(MIC)区分开。普通微波集成电路是一种混合集成电路,它由有源及无源元件,并通过焊接或者环氧树脂导电胶黏接的方式集成在同一基片上。使用空心金属波导的微波电路也称为集成电路,这类电路是在波导中可靠地放置有源器件,从而需要大量的机械设计和加工。

严格地讲,工作在30 GHz以上的单片电路应当称为单片毫米波集成电路,现已有不同的简称在一些文章中使用(例如MMMIC或M3IC),但这些简称尚未得到公众的一致认可。术语“RFIC”容易引入混淆,在一些人看来,RFIC表示工作在吉赫兹(GHz)频率低端的集成电路,大多数使用硅集成电路技术实现;但另一些人认为,RFIC是一个广义术语,包括微波或毫米波单片集成电路。在本书中,简称MMIC含义十分广泛,应当理解为其包含毫米波电路。随着电路技术向单片系统的发展,RFIC,MMIC等术语都可能变得多余了。单片系统是一种集成电路,其包括数字电路、模拟电路、微机械元件、光学元件以及无线电收发机等功能器件。因此,本书的后续版本可能就会将其称为“单片系统中的射频部件设计”。

图1.1显示了由Caswell公司研制的用于卫星通信的一个三级MMIC低噪声放大器芯片,该芯片面积为 $3.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 。输入和输出端口分别位于芯片的左侧和右侧,测量点采用地-信号-地模式,可实现晶圆上射频电路性能(RFOW)的测量。该电路包含3个晶体管、9个电容器、10个螺旋式电感器、7个电阻器和大量互连微带线。

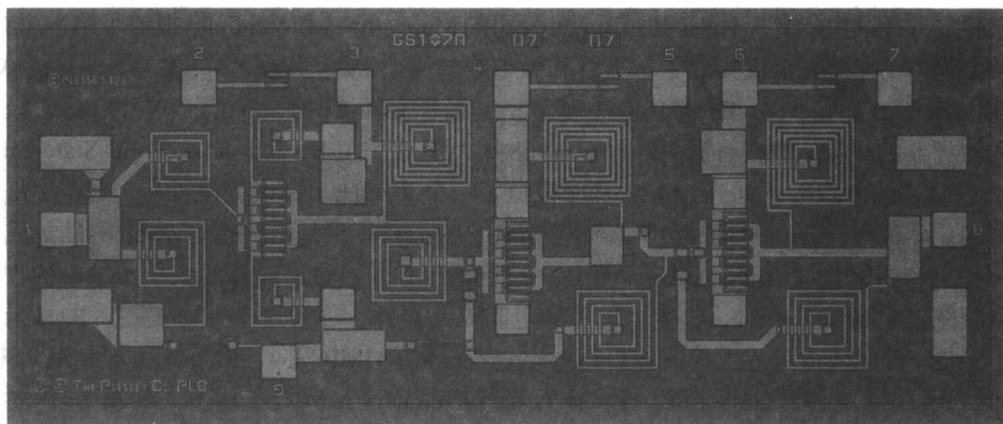


图1.1 Caswell公司研制的用于卫星通信接收机的一个三级MMIC低噪声放大器