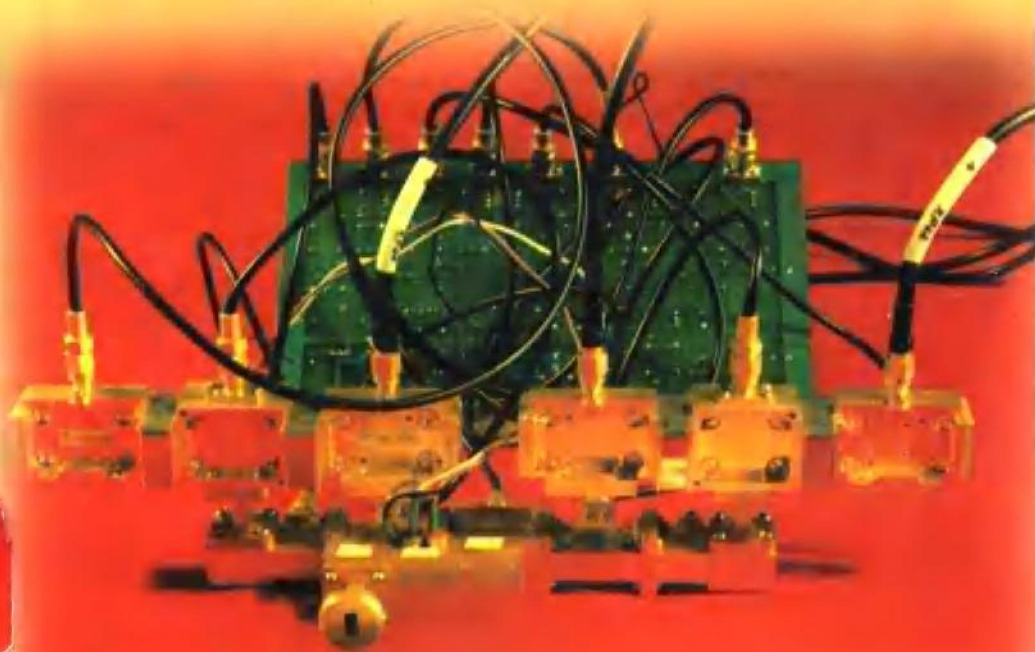


毫米波工程基础

Foundations for Millimeter Wave Engineering

薛良金 编著



國防工業出版社

TN015

X518 753237

毫米波工程基础

Foundations for Millimeter Wave Engineering

薛良金 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

毫米波工程基础/薛良金编著. —北京:国防工业出版社,1998.9

ISBN 7-118-01863-5

I. 毫… II. 薛… III. 极高频-微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 00314 号

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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{5}{8}$ 352 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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

前 言

毫米波技术是当今微波技术界最为敏感的课题之一。20多年前开始的“毫米波热”，曾经在国内学术界和电子工程界掀起过一股来势很猛的浪潮。7年前，作者曾受命组织编写了《我国毫米波发展战略研究》报告。在此报告中，根据近100位有关专家和工程技术人员座谈讨论的意见，我们整理、编写了国外背景材料，分析研究和发展战略建议等三份材料，以供相关决策机构在工作部署时参考。之后，作者曾先后在中国电子技术和电子产业发展战略研讨会、微波学会第一届毫米波年会上以“毫米波，亟待开发的频谱资源”作过专题报告。1995年底，应有关领导机关要求，作者又以《毫米波防卫电子系统设计中的一些问题》为题，结合作者所在课题组10余年的工作实践，对当前国内毫米波工程系统研制中面临的一些问题提出了一些看法，并在微波学会第二届毫米波年会、军事微波年会上以特邀报告方式与同行作了交流。

毫米波技术的研究工作主要围绕军用系统的研制展开。鉴于其类光特性和准全天候工作能力，它能使防卫系统在采用小孔径天线时，获得较高的目标分辨力，毫米波雷达和弹载系统不易受到有源电子干扰，而且具有比微波系统高得多的精度，因而越来越受到军方的重视。近年来，要求性能卓越的防卫电子系统带来的军用原型系统数量的增加，以及由于微波通信网出现的频谱拥挤带给人们早期的毫米波梦，正一步一步变为现实。

40年代至今，微波已成为电子武器系统中最为活跃和最具成果的应用技术之一。随着军用电子技术和信息技术的发展，战场环境中的电磁信号日趋密集，信号特征也日渐复杂，从而对现代武器系统中应用的电子设备提出了许多新的要求，例如小型化、轻量

化,高机动性和可靠性,强抗干扰能力,精确跟踪和测量,有获得目标全面信息和成像能力,穿透等离子体以及全天候工作能力,保密性好,隐蔽性和战时生存能力强等等。由于频率较低,微波设备从体积、重量到电气性能都难于满足现代武器系统的上述要求。这就促使人们去探索、开发新的频谱资源。于是,毫米波就成为人们十分关注的频谱被提到研究日程上来。有鉴于此,世界各主要发达国家都把毫米波频段的开辟作为其军事电子发展的重要内容之一。事实证明,对这段电磁频谱的开发和占领,已成为军事大国在军备竞争中的热点。有人提出“毫米波年代已经到来”,“毫米波系统已对当今电子武器提出挑战”等论断。

本书以作者近 15 年来在电子科技大学为研究生开设的《毫米波技术》课讲稿为基础编写而成。鉴于毫米波系统可靠性和低成本制造技术的要求,毫米波元部件和子系统一直沿着波导电路→混合集成电路→单片集成电路在向前发展。为此,本书不去讨论涉及毫米波技术课题的方方面面,而集中介绍与毫米波混合集成电路相关的内容。这也是作者及课题组成员近 10 余年科研工作的主要方向。书中第二章介绍毫米波固态源及其相关内容。众所周知,信号源是一个频段开发和发展的基础。尽管毫米波电子器件也是毫米波技术得以发展的重要支撑条件,而且对它们的研制报告也很多,但出于以集成电路设计为目的,我们不去讨论这部分内容。对此有兴趣的读者,可以从众多文献资料和专著中去获取所需。第三章介绍作为集成传输媒介之一的微带传输线。微带是一种平面传输结构,而且已在厘米波频段得到广泛应用。但频率升高必然导致其中的高次模不容忽视。因此,将厘米波频段已有的近似设计图表资料用于毫米波电路设计显然是不合适的。本章从工程设计角度考虑,介绍一些在毫米波电路设计中有用的资料。第四章讨论另一种毫米波集成传输媒介,即鳍线(Finlines)的传输特性。这是一种为适应毫米波技术发展,由 P.J. Meier 在 1972 年提出的新型结构。至今,有关这种结构本身及其相关电路的论文已成千上万,各种毫米波鳍线电路和子系统也已成功应用于毫米

波工程。作者及学生们在此领域的工作亦已受到国内外同行的关注。如同第三章一样,为使读者查阅原始文献的方便,我们以脚注方式提供了一些与正文对应的参考资料。第五、第六章讨论毫米波电路和子系统,仍然以混合集成技术为主。这两章内容除取自大量文献资料外,主要是本书作者群体近 10 年科研工作的反映。这些电路已经过实验验证,通过电子工业部组织的技术鉴定,有的已经获奖并已向相关单位提供了众多的工程实物,为我国毫米波技术的发展尽了我们的微薄之力。

毫米波系统除军事应用外,在诸如射电天文、民用通信、遥感技术、车船防撞、频谱学以及生物效应的应用近年也有不少文献报道。由于本书以基础电路设计为目的,其技术既可为军,亦可为民,因此,本书不涉及具体应用系统问题。

综合国外信息表明,在以各种战术、战略制导武器为主体的新武器技术革命中,军事电子学的重点将转移到毫米波频段。毫米波技术可能成为提高下一代武器系统作战能力的重要手段。估计 21 世纪前期,各种毫米波制导和控制的精确武器将投入使用。战场上将出现一批毫米波雷达和毫米波制导的新武器系统装备,电子对抗技术也将面临着毫米波的挑战。因此,为了对付这种即将面临的新局面,我们必须密切注视国外毫米波技术发展的新方向,瞄准世界的先进技术,迅速有组织有计划地开展相关的技术研究,以适应未来战争环境的要求。这就是本书作者编写此书的目的。

本书编写过程中得到课题组全体同志大力支持。6.6 节大部分由薛泉教授编写并将前言和目录翻译成英文。徐军副教授和徐锐敏副教授仔细阅读、检查了全部书稿,并提出了不少修改意见。书中还引用了谢晋雄、薛泉、陈晓明、黄亚非等博士以及徐锐敏、雷毅、杨红、徐军、李超和徐静等硕士毕业论文中的材料和课题组科研成果中的一部分内容。博士生李超和硕士生霍保庄、蔡雪芳为作者绘制了大部分插图,全部文字由张波同志输入。作者在此对他们表示由衷的感谢。

由于作者才学疏浅,本书中不可避免地会出现一些缺点甚至谬误。在此,甚望得到同行们的不吝指正。

Preface

Millimeter wave technology is one of hot points of electromagnetic field engineering. About twenty years ago, a rush for millimeter wave research and development aroused among electronic engineering and academic field of China. Seven years ago, the author of this book was asked by the Chinese government to organize a group with about 100 experts to do a detail survey on millimeter wave technology, resulting in a reference report for the government – *Survey and Suggest on the Developing Strategy for Millimeter Wave*. This report included three parts, the international background, the analysis of technology and development suggest. Afterward, the author was invited to give presentation on several relative symposiums. The presentation was titled as *Millimeter Wave, A Frequency Reservation Waiting for Development*. At the end of 1995, the author of this book was invited again by the Chinese government to do a survey on millimeter wave technology, resulting another report, *Topics on Millimeter Wave Defense System Design*. The report summed up the research achievements by the author and the research group he has been leading during the past 10 years. The report was presented to the Chinese Second Millimeter Wave Technology Symposium as invited paper.

Research work on millimeter wave mainly focuses on military systems. Because of its quasi – light characteristic and quasi – all – weather operation capability, millimeter wave systems can achieve high resolution of objects, and free from active interfere, while the

dimension of antenna can be much smaller than those of microwaves. The dream of massive using of millimeter wave system is now becoming reality because of need of military usage and band crowd in microwave.

Since 1940s, the microwave has been a important role in military electronic systems. A lot of achievements have been attained since then. With the development of military electronic systems and information systems, the electromagnetic signals jam occurs usually and the signal characteristics are complicated than ever. While, modern military electronic systems intend to be small in size, smart in movement, accurate in trace and measurement, reliable in adverse circumstances. And ability of allweather operation, security of system are also important for modern battle field. With relatively long wavelength, systems of microwave can't satisfy above demands. This makes scientists and engineers extend existing radar band to millimeter wave. Apparently, in developed countries, great efforts have been paid to develop military millimeter wave systems. Strategists believe that *the era of millimeter wave has come* and millimeter wave system has been a powerful competitor to modern electronic weapons.

Before becoming a book, it has been originally teaching material for graduate students in University of Electronic Science and Technology of China for 15 years. Not all aspects of millimeter wave technology included in this book. The millimeter wave components and systems have developed from waveguide ones to hybrid integrated and monolithic ones. Considering the tendency of integration of circuit, this book mainly focuses on the integrated circuits. The achievements of the author and his group in the past 10 years are included.

This book is divided into six chapter. Chapter 1 is a general in-

roduction of characteristics of millimeter wave and its system. Chapter 2 is about solid state sources. Sources are key components to develop new band. Although millimeter wave electron devices are also important for millimeter wave development, considering the integrated circuits emphasis of this book, they are not included in. Chapter 3 is about a kind of widely used microwave and millimeter wave integrated transmission media – microstrip. Because of high order modes and dispersion of microstrip, the design approaches for centimeter wave is not suitable for millimeter wave. Analysis method and design equations are provided in this chapter. Chapter 4 introduces another important integrated transmission line especially suitable for millimeter wave usage. That's fin – line. This kind of integrated circuit media was primarily suggested by P. J. Meier in 1972. A host of papers have contributed a lot to his transmission media, and there have been a lot of millimeter wave systems working very well. Papers and achievements by the author and his students also attract enough attentions in this field. References are provided as footnotes for convenient referring. Chapter 5 and 6 is about millimeter wave circuits, components and subsystems. The materials come from not only mass references but also achievements by the author and his group during the past 10 years. All these achievements were approved through experiments and evaluated by the Chinese Ministry of Electronic Industry. And we have millimeter wave products both to internal and international consumers.

Besides military usage, millimeter wave is also useful for radio astronomy, domestic communication, remote sense, collision alarm system for vehicle, ship and airplane, spectrum analysis and millimeter wave biology. But this book does not introduce these practical systems while use most length of it to introduce basic circuits and components.

All information comes from both domestics and abroad shows that in the revolution of weapon by guided missile, millimeter wave systems will play an important role in the future battle field. Before the end of 21 century, there must be many millimeter wave systems serving in troops all over the world. This fact must be faced seriously for us to fit the coming military competition. This is main object of this book.

Sincere appreciation should be expressed to the author's research group. Most part of § 6.6 is compiled by professor XUE Quan. He also translated the introduction and preface of this book into English. Associate Professor XU Jun and Associate Professor XU Ruiming went over the manuscript carefully and gave many suggests. The book cited parts of doctor and master theses of couple of doctors, including Dr. XIE jinxiong, Dr. XUE Quan, Dr. CHEN Xiaoming, Dr. HUANG Yafei, Master XU Ruiming, Master LEI Yi, Master YANG Hong, Master XU Jun, Master LI Chao and Master XU Jing, LI Chao, HUO Baozhuang and CAI Xuefang drawn all the figures and chats in this book. Miss ZHANG Bo typed all the text. The author are grateful the all above mentioned and all not mentioned who help me a lot during writing this book.

Mistakes can not be avoided despite of carefulness because of knowledge limitation of the author. Readers are welcome to comment to this book.

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

目 录

第一章 绪论	1
1.1 毫米波及其大气传播特性	1
1.2 毫米波的特点和应用	5
第二章 毫米波固态源	15
2.1 毫米波固态振荡器的一般理论	18
2.2 IMPATT 振荡器	24
2.3 Gunn 器件振荡器	39
2.4 FET 振荡器	48
2.5 振荡器的调谐技术	51
2.6 功率合成技术	58
第三章 微带传输线	66
3.1 微带结构的一般形式	72
3.2 类微带结构的准静态分析	75
3.3 类微带线的特性阻抗和有效介电常数	83
3.4 微带线的损耗、功率容量和品质因数	88
3.5 有关微带电路设计的其他问题	95
3.6 矩形波导到微带间的过渡问题	100
第四章 集成鳍线特性	104
4.1 鳍线	104
4.2 电磁场方程	107
4.3 单面鳍线的谱域分析	111
4.4 基函数的选择	119
4.5 变态单面鳍线	124
4.6 特性阻抗	128
4.7 谱域导抗方法	132
4.8 单面鳍线和双面鳍线的近似设计公式	141

4.9 一些有用的结论	153
第五章 平面对无源电路	169
5.1 匹配网络	169
5.2 耦合电路	195
5.3 鳍线谐振电路	221
5.4 滤波电路	238
5.5 混合电路	266
5.6 不可逆电路	277
第六章 毫米波固态电路	292
6.1 鳍线振荡器	292
6.2 检波器	306
6.3 混频器	320
6.4 放大器	339
6.5 GaAs FET 放大器	351
6.6 倍频器	368
6.7 开关	381
6.8 移相器、衰减器、调制器和限幅器	390
6.9 集成前端	395
本书作者领导的课题组在毫米波集成电路方面公开发表的部分论文目录	415

CONTENTS

Chapter One	INTRODUCTION	1
1.1	Millimeter Waves and Thier Propagation Characteristics	1
1.2	Millimeter Wave Features and Applications	5
Chapter Two	MILLIMETER WAVE SOLID STATE SOURCES	15
2.1	General Theory of Millimeter Wave Solid State Oscillators	18
2.2	IMPATT Oscillaters	24
2.3	Gunn Oscillators	39
2.4	FET Oscillators	48
2.5	Oscillator Tuning Techniques	51
2.6	Power Combining Techniques	58
Chapter Three	MICROSTRIP TRANSMISSION LINES	66
3.1	General Forms of Microstrip Configuration	72
3.2	Quasi – Static Analyses for Microstrip – Like Transmission Lines	75
3.3	Characteristic Impedance and Effective Dielectric Constant	83
3.4	Losses, Power Handling Capability and Quality Factor	88
3.5	Other Problems for Microstrip Line Design Considerations	95
3.6	Waveguide to Microstrip Transition	100
Chapter Four	INTEGRATED FINLINE CHARACTERISTICS	104
4.1	Fin Lines	104
4.2	Electromagnetic Field Equations	107
4.3	Spectral Domain Technique for an Unilateral Fin Line	111
4.4	Choic of Basis functions	119

4.5 Some Variants of Unilateral Fin Line	124
4.6 Formulas for Characteristic Impedance	128
4.7 Spectral Domain Immittance Approach	132
4.8 Closed – Form Design Formulas for Unilateral and Bilateral Fin Lines	141
4.9 Some Useful Conclusions	153
Chapter Five PLANAR PASSIVE CIRCUITS	169
5.1 Matched Networks	169
5.2 Caupling Circuits	195
5.3 Fin Line Resonance Circuits	221
5.4 Filter Circuits	238
5.5 Hgbrid Circuits	266
5.6 Nonreciprocal Circuits	277
Chapter Six MILLIMETER WAVE SOLID STATE CIRCUITS	292
6.1 Fin Line Oscilators	292
6.2 Detectors	306
6.3 Mixers	320
6.4 Amplifiers	339
6.5 GaAs FET Amplifiers	351
6.6 Frequency Multipliers	368
6.7 Switches	381
6.8 Phase Shifters, PIN Attenuators, Modulators and Limiters	390
6.9 Integrated Front – End	395
Published Papers on Millimeter Wave Integrated Circuit by the Author and his group members.	415