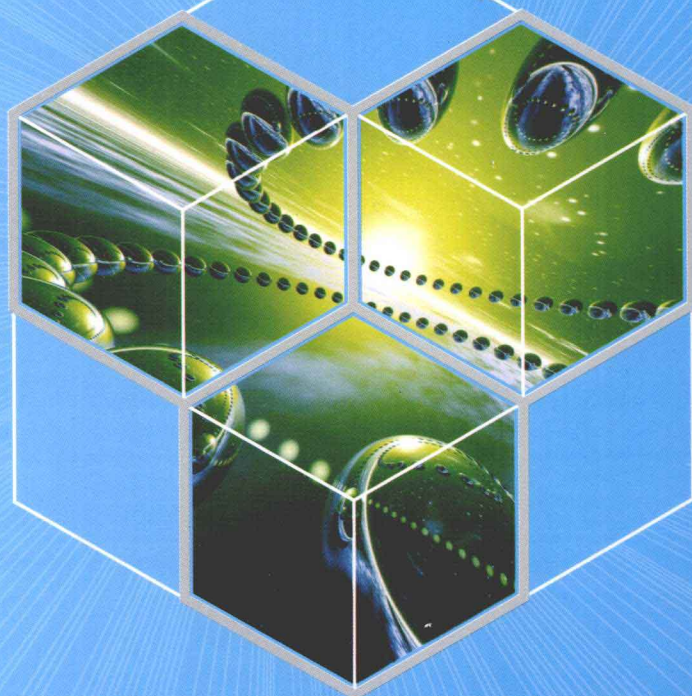




AOMIBO JICHENGDIANLU JIQI YINGYONG



毫米波集成电路 及其应用

孙晓玮等◎著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

毫米波集成电路及其应用

孙晓玮 杨明辉 吴 亮 张 健 著
王 伟 顾建忠 侯 阳

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是毫米波集成电路设计及其应用领域较全面、系统的学术专著。内容针对毫米波集成电路的国内外最新研究现状与发展趋势,涵盖了毫米波集成电路的设计方法、测试技术及先进的毫米波集成电路工艺技术,不但具有一定的理论深度,又不乏技术的新颖性。书中基本涵盖了毫米波信息系统收发子系统中的核心集成电路芯片,特别地,毫米波矢量调制器芯片是发展毫米波自适应抵消系统的应用成果。

本书既可以作为通信、电子类学科本科高年级学生或研究生的教材,也可以作为通信和微电子等领域从事微波/毫米波集成电路设计的工程师的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

毫米波集成电路及其应用/孙晓玮等著. —北京:电子工业出版社, 2012.4
ISBN 978-7-121-16675-4

I. ①毫… II. ①孙… III. ①微波电路: 集成电路 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 056847 号

策划编辑: 王春宁
责任编辑: 曲 昕
印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:
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: 787×1 092 1/16 印张: 19 字数: 480 千字
印 次: 2012 年 4 月第 1 次印刷
定 价: 69.00 元



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

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

服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着人们对电子信息系统的高宽带、高速率、小型化需求,无线通信频谱将扩展到毫米波段、亚毫米波段和太赫兹波段,而系统中重要的毫米波集成电路就成了必不可少的核心芯片。日益先进的微纳电子技术使集成电路工艺技术进入了纳米时代,对于毫米波频段以上的集成电路层出不穷,45 nm 的硅集成电路工艺,其器件的截止频率已经突破了 250 GHz; III-V 族化合物半导体集成电路,由于其具有高的电子迁移率及 50 nm InP HEMT 的集成电路工艺,器件截止频率也突破了 580 GHz。为了满足高速吉比特、大带宽的通信系统、智能交通系统、汽车防撞系统以及反恐安检系统的应用,毫米波集成电路的需求越来越大。随着工艺成本和设计、测试成本的降低,毫米波集成电路及其系统应用已经成为军民两用领域不可缺少的先进技术之一。

本书是作者近 30 年在该领域从事科研和教学工作的系统总结,书中除特殊注明外,均是作者和所指导博士生的研究成果,有部分毫米波集成电路已经在系统上得到应用;所建立的毫米波集成电路测试系统为国内外高校和研究单位提供了标准化的测试服务。为本书内容作出贡献的有:吴亮博士、杨明辉博士、王伟博士、顾建忠博士、张健博士、侯阳博士、王闯博士、闻儒鸣博士、韩克武博士、孙浩博士、崔恒荣博士、崔斌博士、时翔博士、孙芸、钱蓉等。近年来通过国际合作和交流,作者所在团队在毫米波集成电路设计、工艺、测试等方面有了很大进步,并在国际先进的工艺线上进行了流片验证;结合标准工艺,建立了完全自主的器件、工艺、系统一体化的设计方法,巩固了专业理论知识,积累了丰富的实践经验,为今后的工作打下了很好的基础。

为了让读者更好地掌握毫米波集成电路的基本设计方法,书中的毫米波集成电路基本涵盖了毫米波信息系统收发子系统核心集成电路芯片,特别地,毫米波矢量调制器芯片是作者多年来从微波混合集成电路研究和自适应抵消系统的研究中发展的毫米波自适应抵消系统的应用成果。书中给出的典型系统应用部分已经进行了产业化推广。

本书共 11 章,内容涵盖当前毫米波集成电路的各个主流研究领域,即从毫米波集成电路材料、工艺、器件到毫米波无源集成电路与毫米波有源集成电路;从毫米波集成电路原理、设计到毫米波集成电路系统应用与测试方法和技术。

第 1 章 首先介绍毫米波技术的特点与热点,其次介绍毫米波集成电路分类、现状与发展趋势;从 6 个不同的角度(材料、工艺、计算机辅助设计软件、单片集成电路、组件及集成封装技术)对当前毫米波集成电路进行展开,最后介绍现代毫米波电子系统(通信、雷达、成像)。

第 2 章 重点介绍当前主流的毫米波单片集成电路的材料(GaAs、InP 与 GaN)、有源元器件工艺与模型(pHEMT)以及无源元器件工艺与模型(电阻、电容、电感、通孔与传输线),为后续章节的展开做铺垫。

第 3~5 章 主要介绍毫米波单片无源集成电路的原理、拓扑结构以及具体设计举例,包括毫米波单片场效应管混频器、毫米波单片矢量调制器、毫米波单片开关电路。

第 6~7 章 主要介绍毫米波单片集成电路的原理、拓扑结构以及具体设计,包括毫米波单片低噪声放大器、毫米波单片功率放大器。

第 8~10 章 主要介绍毫米波集成电路系统应用与系统设计,包括 60 GHz 无线通信系统、

毫米波交通信息采集雷达系统、毫米波成像系统。

第 11 章 主要介绍毫米波集成电路在片自动测试技术。

作者长期工作在微波毫米波集成电路及其系统集成领域的科研第一线，积累了丰富的实践经验，培养了数十名博士和硕士研究生。在科研和教学工作中得到了西安电子科技大学吴万春教授、梁昌洪教授、王家礼教授、董树义教授的指导和帮助；特别是作者的导师：西安交通大学著名的微电子学家罗晋生教授、中电 55 所的林金庭总工、中科院上海微系统与信息技术研究所夏冠群教授，是他们带领作者进入了微波毫米波集成电路的研究领域。在完成本书稿的时候，向给予帮助和支持的各位前辈、教授以及并肩工作的同事、研究生们一并表示衷心的感谢！

孙晓玮

2011 年 11 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 毫米波频谱资源的划分	(3)
1.3 毫米波的特点	(4)
1.3.1 基本特性	(4)
1.3.2 军事应用特性	(5)
1.4 毫米波技术的“热点”	(9)
1.4.1 大气窗口	(9)
1.4.2 非大气窗口	(10)
1.5 毫米波集成电路及其分类	(10)
1.5.1 毫米波混合集成电路	(10)
1.5.2 毫米波单片集成电路	(11)
1.6 毫米波集成电路的发展现状及趋势	(13)
1.6.1 工作频率	(13)
1.6.2 输出功率	(16)
1.6.3 集成度	(17)
1.6.4 工艺与材料	(20)
1.6.5 测试与测量	(22)
1.6.6 EDA 软件	(24)
1.6.7 现代电子系统	(24)
1.7 毫米波集成电路材料	(25)
1.7.1 氮化镓材料	(25)
1.7.2 硅/锗材料	(26)
1.8 毫米波集成电路工艺线	(27)
1.9 国际发展现状	(28)
1.9.1 晶圆代工服务市场垄断突出	(29)
1.9.2 成本效益与拓展市场	(30)
1.9.3 Fabless 日益成为主流	(30)
1.10 毫米波集成电路的应用	(35)
1.10.1 无线通信领域	(35)
1.10.2 毫米波 MIMO 技术	(36)
1.10.3 成像与探测领域	(39)

第 2 章 毫米波集成电路工艺技术	(42)
2.1 引言	(42)
2.2 毫米波半导体器件简介	(42)
2.2.1 衬底材料	(42)
2.2.2 有源器件种类	(43)
2.3 高电子迁移率晶体管	(43)
2.3.1 HEMT 沟道电子面密度	(44)
2.3.2 HEMT 电流-电压特性	(45)
2.3.3 HEMT 频率特性	(46)
2.3.4 HEMT 噪声特性	(48)
2.3.5 HEMT 技术发展	(48)
2.4 无源器件	(50)
2.4.1 电阻	(50)
2.4.2 电容	(51)
2.4.3 电感	(52)
2.4.4 通孔和接地	(54)
2.4.5 传输线	(54)
2.5 毫米波单片集成电路工艺技术	(56)
2.5.1 外延有源层	(56)
2.5.2 制备欧姆接触	(56)
2.5.3 硼离子注入隔离	(56)
2.5.4 制备 T 型金属栅接触	(57)
2.5.5 制备欧姆接触引线孔、金属薄膜电阻	(57)
2.5.6 制备电容的下电极	(57)
2.5.7 电容介质层生长	(58)
2.5.8 空气桥	(58)
2.5.9 制备第二层厚金属	(58)
2.5.10 制备背面通孔和划片道	(58)
2.6 小结	(59)
参考文献	(59)
第 3 章 毫米波单片电阻型场效应管混频器电路	(60)
3.1 引言	(60)
3.2 电阻型场效应管混频原理	(61)
3.2.1 电阻型场效应管混频器原理	(61)
3.2.2 电阻型场效应管混频器特性	(62)
3.3 电阻型场效应管混频器的类型	(66)
3.3.1 单端电阻型场效应管混频器	(67)
3.3.2 单平衡电阻型场效应管混频器	(68)
3.3.3 双平衡电阻型场效应管混频器	(69)

3.4 单平衡电阻型场效应管混频器设计	(69)
3.4.1 混频器指标和拓扑	(69)
3.4.2 Lange 耦合器设计	(70)
3.4.3 电路性能设计	(72)
3.5 小结	(75)
参考文献	(75)
第4章 毫米波单片矢量调制器	(77)
4.1 引言	(77)
4.2 矢量调制器原理	(78)
4.3 矢量调制器类型	(80)
4.3.1 反射式矢量调制器	(80)
4.3.2 平衡式矢量调制器	(82)
4.4 单片矢量调制器的设计	(83)
4.4.1 零偏置 HEMT 管模型	(83)
4.4.2 反射式矢量调制器的优化设计	(85)
4.4.3 Ka 波段平衡式矢量调制器的优化设计	(87)
4.4.4 单片矢量调制器的低温漂设计	(88)
4.5 单片矢量调制器的测试	(89)
4.5.1 小信号测试方案	(90)
4.5.2 大信号测试方案	(90)
4.5.3 测试结果	(91)
4.6 小结	(93)
参考文献	(94)
第5章 毫米波单片开关电路	(97)
5.1 开关基本指标	(97)
5.2 开关典型分类	(99)
5.2.1 CMOS 技术	(100)
5.2.2 RF MEMS 技术	(101)
5.2.3 PIN 二极管技术	(104)
5.2.4 HEMT 技术	(106)
5.2.5 混合技术	(107)
5.3 单片开关电路举例	(111)
5.3.1 HEMT 开关尺寸选择	(112)
5.3.2 短沟道效应	(112)
5.3.3 可承受功率能力	(113)
5.3.4 超宽带	(114)
5.4 单片开关电路优化设计	(116)
5.4.1 工艺选择	(117)
5.4.2 电路拓扑选择	(117)

5.4.3 管芯选择	(118)
5.4.4 设计结果	(118)
5.4.5 测试环境	(119)
5.4.6 测试结果	(120)
5.5 小结	(122)
参考文献	(122)
第 6 章 毫米波宽带单片低噪声放大器	(124)
6.1 引言	(124)
6.2 宽带负载匹配技术	(124)
6.2.1 有损匹配	(127)
6.2.2 反馈式匹配	(129)
6.2.3 共栅配置	(130)
6.2.4 电抗匹配	(132)
6.3 Ka 波段宽带低噪声放大器	(146)
6.3.1 拓扑结构	(146)
6.3.2 电路性能设计	(147)
6.3.3 电路性能测试	(148)
6.4 60 GHz 宽带低噪声放大器	(149)
6.4.1 拓扑结构	(149)
6.4.2 电路性能设计	(150)
6.4.3 电路性能测试	(151)
6.5 小结	(152)
参考文献	(152)
第 7 章 毫米波单片功率放大器	(155)
7.1 引言	(155)
7.1.1 功率放大器主要特性	(155)
7.1.2 功率放大器增益和稳定性	(158)
7.2 功率晶体管	(160)
7.3 线性功率放大器	(162)
7.4 高功率放大器	(164)
7.5 功率放大器设计实例	(165)
7.5.1 Ka 波段高功率放大器拓扑结构	(165)
7.5.2 末级放大器设计	(166)
7.5.3 电路性能设计	(168)
7.5.4 电路性能测试	(170)
7.6 小结	(172)
参考文献	(173)
第 8 章 毫米波短距离通信收发组件	(174)
8.1 引言	(174)

8.2	60 GHz 技术	(176)
8.2.1	免许可证频段	(176)
8.2.2	安全性高	(177)
8.2.3	低阶调制体制	(177)
8.3	60 GHz 技术标准	(178)
8.3.1	IEEE 802.15.3c 标准	(179)
8.3.2	IEEE 802.11ad 标准	(179)
8.3.3	ECMA-387 标准	(179)
8.3.4	WiGig 联盟	(180)
8.3.5	WirelessHD 联盟	(181)
8.4	60 GHz 技术挑战	(183)
8.4.1	视距传输	(183)
8.4.2	成本效益	(183)
8.5	60 GHz 系统 SoC 解决方案	(190)
8.5.1	Agilent 解决方案	(190)
8.5.2	UMS 解决方案	(191)
8.5.3	Hittite 解决方案	(191)
8.5.4	Gotmic 解决方案	(192)
8.5.5	TNO 解决方案	(193)
8.6	60 GHz 技术微系统前端解决方案	(194)
8.6.1	SiversIMA 解决方案	(194)
8.6.2	Endwave 解决方案	(196)
8.6.3	Rohde & Schwarz 解决方案	(196)
8.6.4	HXI 解决方案	(197)
8.6.5	IMEC 解决方案	(198)
8.7	国内研究现状	(200)
	参考文献	(202)
第 9 章	毫米波成像系统	(204)
9.1	引言	(204)
9.2	物体的毫米波辐射原理	(204)
9.2.1	黑体辐射	(205)
9.2.2	利用辐射计检测物体的原理	(206)
9.3	全功率直接检波交流辐射计设计	(207)
9.3.1	毫米波辐射计分类	(207)
9.3.2	全功率型直接检波交流辐射计及其温度灵敏度分析	(208)
9.3.3	宽带低噪声高增益毫米波模块设计	(210)
9.3.4	宽带检波电路设计	(215)
9.3.5	视频放大器设计	(217)
9.4	被动毫米波成像系统	(218)
9.4.1	焦平面天线技术	(218)

9.4.2	被动毫米波成像系统集成	(219)
9.4.3	被动毫米波成像实验	(219)
9.5	辅助源照射下的毫米波成像技术	(220)
9.5.1	主动毫米波成像的斑点噪声和闪烁效应形成机理	(221)
9.5.2	主动毫米波成像的有源照射解决方案	(222)
9.5.3	室内主动毫米波成像系统集成	(226)
9.5.4	室内主动毫米波成像实验	(227)
9.6	小结	(229)
	参考文献	(229)
第 10 章	毫米波 FMCW 小型雷达系统及应用	(230)
10.1	引言	(230)
10.2	基于 FMCW 体制的交通信息检测雷达工作原理	(230)
10.3	K 波段交通信息检测雷达	(232)
10.3.1	交通信息检测雷达安装方式及检测指标	(233)
10.3.2	车流量	(234)
10.3.3	平均车速	(234)
10.3.4	车型分辨	(234)
10.3.5	车道占有率	(235)
10.4	基于 FMCW 的交通信息检测雷达前端结构及指标设计	(235)
10.4.1	工作频率的选择	(235)
10.4.2	雷达系统结构选择	(237)
10.4.3	雷达前端主要指标计算	(238)
10.4.4	目标截面积 RCS 的估算	(239)
10.4.5	最小可检测信号	(240)
10.4.6	中频信号处理单元带宽以及 VCO 调频带宽的确定	(241)
10.4.7	检测因子 M	(241)
10.4.8	发射功率与收发天线增益的计算	(242)
10.4.9	天线指标的估算	(243)
10.5	Ka 波段交通信息检测雷达微带天线设计	(244)
10.5.1	微带天线工作原理	(244)
10.5.2	微带天线分析方法	(245)
10.5.3	馈电方式	(245)
10.5.4	20 单元微带天线设计	(246)
10.6	T/R 组件设计	(247)
10.7	压控振荡器 VCO	(247)
10.8	低噪声放大器 (LNA)	(247)
10.9	混频器	(248)
10.10	K 波段交通信息检测雷达应用实例	(249)
10.11	Ka 波段小型 FMCW 探测器	(250)

10.11.1 Ka 波段小型 FMCW 探测器系统结构及指标	(250)
10.11.2 Ka 波段小型 4 阵元微带双天线设计	(251)
10.11.3 Ka 波段微带天线单元设计	(251)
10.11.4 毫米波 4 阵元微带双天线设计	(253)
10.11.5 Ka 波段小型 FMCW 探测器集成设计	(254)
10.12 小结	(256)
参考文献	(256)
第 11 章 毫米波段在片自动测试系统	(260)
11.1 引言	(260)
11.2 毫米波段散射参数自动测试系统	(260)
11.2.1 一体化矢量网络分析仪测试系统	(260)
11.2.2 矢量网络分析仪扩频测试系统	(262)
11.3 在片自动测试系统的硬件环境	(264)
11.3.1 硬件环境组成与功能	(264)
11.3.2 硬件环境设计的关键技术	(269)
11.4 在片自动测试系统的可重复性	(277)
11.5 在片自动测试系统的校准	(278)
11.5.1 在片自动测试系统的误差源研究	(279)
11.5.2 校准过程的数学模型	(280)
11.5.3 在片校准技术	(280)
11.6 测试结果与测试结论	(286)
11.7 小结	(287)
参考文献	(288)

第1章 绪 论

随着电子系统的工作频率的不断提高,毫米波波段的电子信息设备的应用越来越多,对毫米波集成电路的需求也日益明显。相对于国际上毫米波集成电路产业,中国的毫米波集成电路产业处于起步阶段,还不够成熟和完善,距离商品化还有一定距离。现阶段我国在毫米波中、高频段($>40\text{ GHz}$)的集成电路商业应用比较少,大多数局限在国防领域中的战略与战术通信、引信系统、精确制导、雷达、空间探测和防御系统,其中包括用于天体物理学和地球遥感监测的毫米波和亚毫米波接收机。所以“需求牵引,技术推动”的原则在具体实现过程中遇到的挑战很大,而且大部分核心的毫米波集成电路以及组件等均要依靠从国外相关国家进口产品,同时由于禁运的原因,从第三方进口毫米波集成电路要付出很高的经济成本。但是,总体而言中国的毫米波产业正处于“朝阳产业”,具有非常大的上升空间,可谓是机遇与挑战并存。

本章主要内容将围绕毫米波集成电路,辅之以先进的毫米波集成封装技术。所以本书将以毫米波单片集成电路为主,毫米波混合集成电路为辅,自顶向下逐步拓展。

1.1 引 言

图 1.1 给出了无线电发展的变迁。在 1864 年,麦克斯韦尔(图 1.2)通过严密的推导,建立了一套完整的电磁理论,第一次提出了电磁波的概念。24 年后的一天,在德国一个黑暗的实验室里,年轻的物理学家赫兹(见图 1.3)搭建了一个电路,该电路在实验室的一角蹦出了一颗火星,这点火星引起房间另外一个电路蹦出火星,他因而第一次发现了电磁波。不久,乌克兰的波波夫也用实验再次证明了电磁波的存在。电磁波比声波拥有更多优异的特性,它可以在真空中传播,且具有和光一样的传播速度。正是那颗微弱的火星,预见了 20 世纪一场重要技术革命的开始。



图1.1 无线电发展变迁示意图

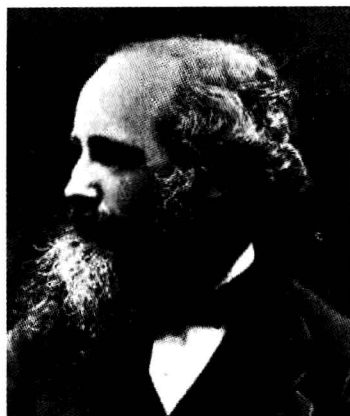


图1.2 詹姆斯·克拉克·麦克斯韦尔
(James Clerk Maxwell)



图1.3 海因裡希·鲁道夫·赫兹
(Heinrich Rudolf Hertz)

1895年前,杰出的印度物理学家 J.C.Bose 在伦敦皇家研究院贡献出描述 60 GHz 辐射准光学原理研究成果(见图 1.4)。两年后(1897 年 5 月),意大利科学家马可尼(见图 1.5)在英国索尔斯堡平原展示了其无线电实验(328 kHz)。

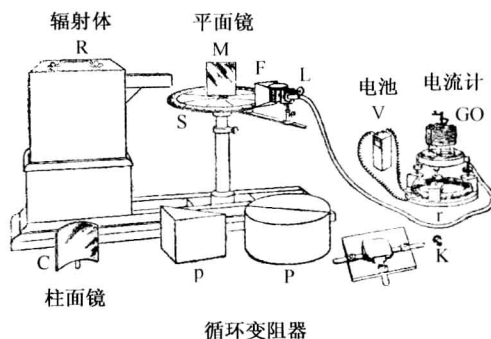
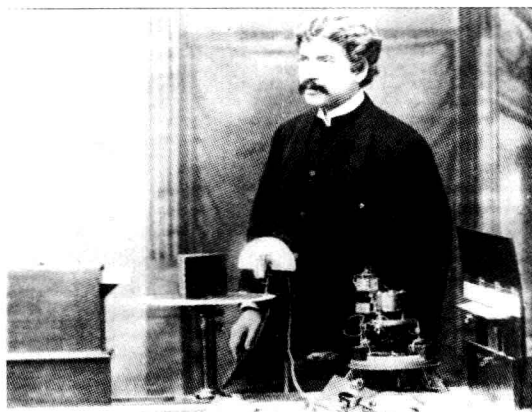


图1.4 J.C.Bose (左) 在伦敦皇家研究院进行60 GHz辐射准光学实验时所用的毫米波部件(右)

(©www.tuc.nrao.edu/~demerson/bose/bose.html)

1901 年,马可尼用中波信号第一次进行了横跨大西洋的无线电报实验;1904 年,侯斯美尔发明了电动镜,采用与声呐类似的工作方式,用电磁波回波探测来防止海上船舶相撞;1924 年,阿普立顿和巴尼特利用电离层对电磁波的反射特性来观测地球的大气层;1925 年,雷达研制成功并被投入使用,它被称作人类新的眼睛和耳朵,当然,这不再是大自然的杰作,而是人类智慧的结晶。

从电磁波被发现的四十多年里,科学家试图用它来改善人们的生活,从无线电报到娱乐广播节目,虽然新发明层出不穷,但是基础设施和工艺水平的限制使得那时的人们只能利用广阔无线频谱中很小的一部分。如图 1.6 所示,无线频谱通常可以用频率或者波长来进行划分,人类对无线频谱的探索、开发和利用,是从较低频率向较高频率逐步发展的。波长在千米量级的低频率电磁波通常具有很强的波动性,衍射和绕射线性较为明显,但是由于信号带宽有限,转载信息的能力也受到限制,通常适合于无线电广播、无线电定时等系统应用。波

长在 $1\text{ mm}\sim 1\text{ m}$ 之间的电磁波通常被称为微波,随着频率的升高,电磁波的粒子性逐渐占据主导地位。特别是波长在 $1\text{ mm}\sim 1\text{ cm}$ 之间的毫米波波段散射现象较为明显,但是由于信号带宽非常宽,所以非常适合于高速信息的传输。同时由于毫米波的波长很小,通信设备的尺寸也因此大大减小,因此对微波/毫米波频段的研究是当今科技界的一大热点。



图1.5 伽利尔摩·马可尼 (Guglielmo Marchese Marconi)

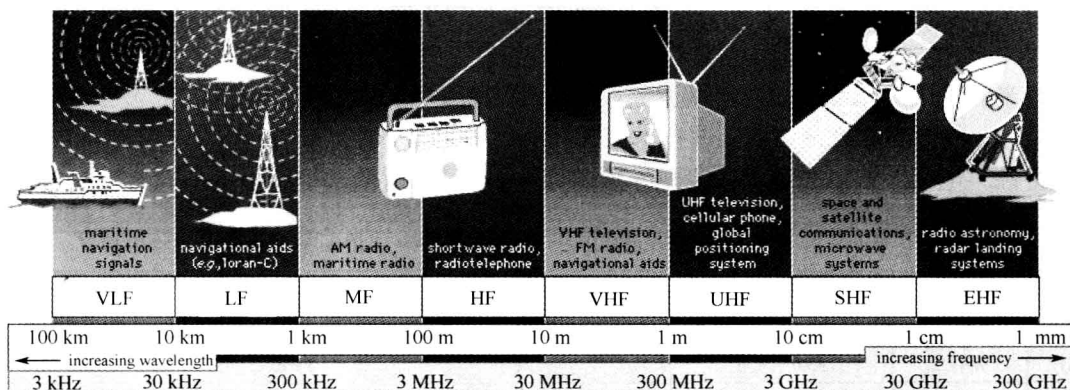


图1.6 部分无线频谱的划分

电磁波引发的无线技术革命给人类带来的影响是巨大的,如今每一天约有 15 万人成为无线技术的新受益者。在这个地球上,数以亿计的收发设备正在通过电磁波拉近彼此的距离,帮助人们拓宽自己的视野。

1.2 毫米波频谱资源的划分

从电磁波发展过程来看,毫米波并不是一个新概念,事实上,从 Maxwell 建立电磁频谱(见图 1.7)概念以来,它一直被看做电磁频谱中的一部分。由于受半导体材料、工艺、元器件、集成电路设计、封装以及测试与测量等因素的制约,导致它在相当长一段时期内发展缓慢。

根据中华人民共和国工业和信息化部无线电管理局的相关管理规定,毫米波频率段的定义为 $30\sim 300\text{ GHz}$ 的频段(波长范围: $1\text{ mm}\sim 10\text{ mm}$),这个频段是介于电波和光波之间的特殊频段,具备光学的探测精度和电波的全天候工作特性。

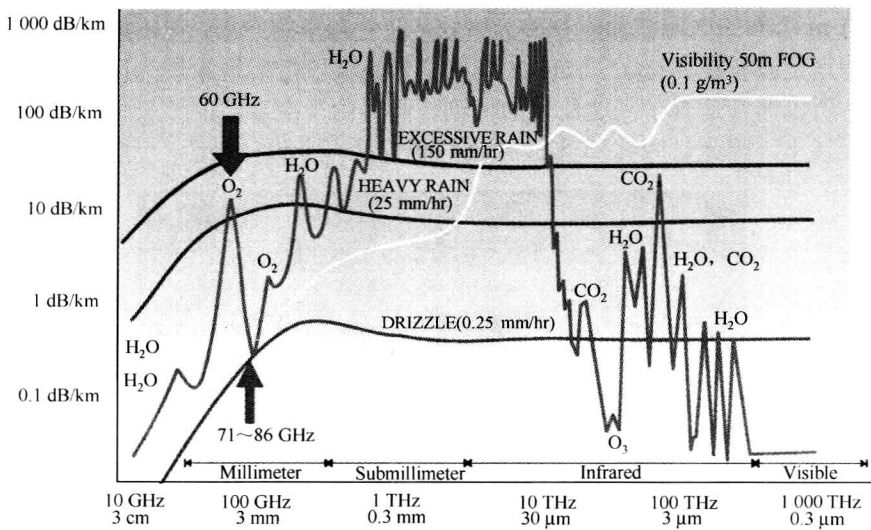


图1.7 电磁波辐射在晴朗天气所受大气衰减与频率的关系

1.3 毫米波的特点

毫米波波段的低频端起始于微波频段的高端，而毫米波波段的高频端与光波频段的低端相邻，这一独特的优势使得毫米波技术在具体应用中犹如一把“双刃剑”，表现出很多独一无二的特性。电子工业协会毫米波段波导频谱划分如表 1.1 所示。

表 1.1 电子工业协会（Electronic Industries Association, EIA）毫米波段波导频谱划分

EIA 波段命名		频率范围/GHz	TE ₁₀ 模截止频率/GHz	内尺寸/mm	法 兰 命 名
Ka	WR-28	26.5~40.0	21.1	7.112×3.556	UG-599/U
Q	WR-22	33.0~50.5	26.3	5.690×2.845	UG-383/U
U	WR-19	40.0~60.0	31.4	4.775×2.337	UG-383/UM
V	WR-15	50.5~75.0	39.9	3.759×1.880	UG-385/U
E	WR-12	60.0~90.0	48.4	3.099×1.549	UG-387/U
W	WR-10	75.0~110	59.0	2.540×1.270	UG-387/UM
F	WR-8	90.0~140	73.8	2.032×1.016	UG-387/UM
D	WR-6	110~170	90.8	1.651×0.826	UG-387/UM
G	WR-5	140~220	116	1.295×0.648	UG-387/UM

1.3.1 基本特性

优势：

- (1) 波长短（频率高）；
- (2) 频谱资源丰富（频带宽）；
- (3) 自由空间传播特性与大气环境密切相关（“双刃剑”）。

挑战：

- (1) 与低频段相比，毫米波段电路、组件与系统对工艺加工精度要求高；