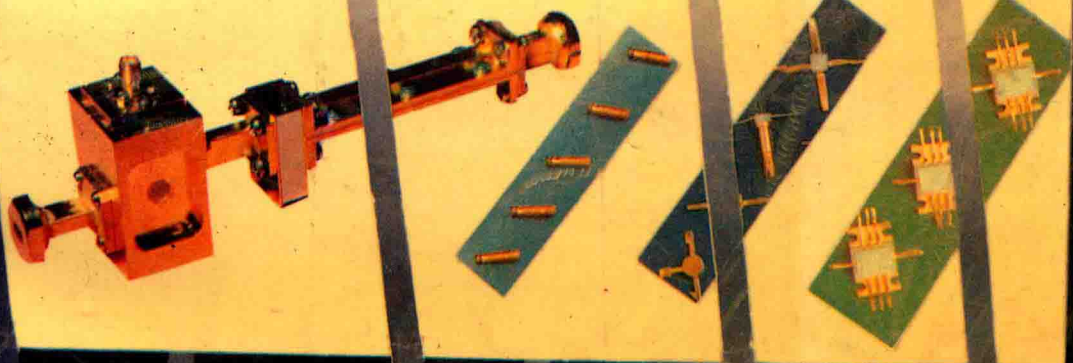


毫米波

實用技術與系統

李成蹊 著



八一出版社

毫米波实用技术与系统

李成蹊 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

八一出版社

京新登字 117 号

毫米波实用技术与系统

李成溪 编著

八一出版社出版发行

(北京平安里三号)

(邮政编码 100035)

解放军电子工程学院印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 52 印张 1228.5 千字

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月 (合肥) 第 1 次印刷

ISBN 7-5081-0317-3/E·176

定价 50 元

前 言

毫米波和亚毫米波技术，是近十年来急速发展的一门新技术，它对国防和国民经济的发展，都将起着重要作用。

众所周知，毫米波频谱资源发现较早，由于技术发展历史的原因，使这一技术曾徘徊了一段时间。近年来，随着科学技术的发展，和器件制造技术的突破，使这一新的技术得到较快发展，并在雷达、通信、导弹制导、电子对抗、射电天文、医学等技术领域中得到实际应用。

为使在这个领域的工作人员，对此技术有较为全面的了解，并在实际工作中有所帮助，我们结合自己科研和教学实践及参考近期国内外资料，编写了本书。

魏崇毓讲师、盛立刚副教授分别编写第四、六章，第九章的部分内容由二十九所徐静松等同志编写，全书由二十九所龚金檀高级工程师主审。由于作者水平有限，书中谬误在所难免，请专家及同行们指正。

盛立刚同志承担了本书编辑、校对等出版工作。

在本书出版过程中，曾得到总参四部、电子工程学院有关同志的热情支持和帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢！

李成蹊

一九九二年十月十六日

于合肥

序 言

毫米波是指波长为 1~10 毫米的无线电频谱部分。毫米波技术是当前国内外正在蓬勃发展的高技术领域之一，它与微波和光波两个波段相比具有许多独特的优点，例如天线及电路尺寸小，体积小，特别适用于机载、弹载、星载及其它空间武器中的电子设备；抗地物杂波和抗海浪杂波的能力强，利于探测和跟踪低空飞机，巡航导弹和掠海飞行的反舰导弹；角分辨率和距离分辨率高，成像能力强，可用于探测隐身飞行器等难以发现的突防目标；多普勒分辨率高，能探测和跟踪高速运动体目标；具有穿透等离子体的能力，故在等离子体环境中仍能保持高速飞行器（如洲际弹道导弹）再入大气层时的精确制导、测量和通信能力，亦可用于研究核聚变电站和粒子束武器等；穿透烟、雾的能力优于光波，具有有限全天候工作的能力；利用毫米波辐射特性的无源探测辐射计，能从背景中把隐身飞行器或地面的坦克、装甲车辆等金属目标精确区分出来；绝对带宽宽，通信容量大，可实现保密通信等。因此，毫米波作为一种新的电磁频谱资源，在军事领域中有着广泛的应用前景。从八十年代起，美、苏及西欧国家已相继把毫米波技术纳入其下一代武器装备研制计划的轨道，并已制定了一系列庞大的毫米波技术军事应用计划，其中包括毫米波在精确制导武器（包括各种导弹、灵巧炸弹、末制导子弹）、电子对抗、雷达、通信等领域的应用研究。从国外报导的情况看，美国已提出几十个毫米波精确制导武器的研究计划，一些毫米波制导的灵巧武器已开始装备使用，如美国的“霍克”地空导弹和“麻雀”空空导弹，苏联 SA-10 地空导弹，英国的“长剑”地空导弹等。目前国外正在兴起一个以反集群坦克为背景的毫米波精确制导武器、灵巧弹药的研究热潮。各种毫米波雷达得到迅速发展，即将从实验室大量转入实用阶段，并成为现代军用雷达的重要组成部分。毫米波技术在电子对抗及通信中的应用正在加速进行。军用毫米波技术的发展，大大推进了民用项目的发展，当前毫米波在通信、遥感、气象、射电天文、波谱学、汽车和直升机防撞雷达、港口导航和空中交通管制以及生物、医学等方面也在蓬勃发展，各种国际微波/毫米波会议上，毫米波在军事中的应用已成为会议的主要议题。当前国外 140 千兆以下的毫米波元器件已基本上齐备并已达到了生产水平。

大量信息表明，在以各种战术战略精确制导武器为主体的新武器技术革命中，军事电子学的研究重点正在向毫米波频段转移，它可能成为提高下一代高技术武器系统作战能力的重要手段之一，预计在 2000 年前后，各种毫米波制导的灵巧武器和智能武器将投入实际应用，战场上将出现毫米波的新威胁。为此我国对发展毫米波技术应用极为重视，许多重要的研制计划已列入“八五”和“九五”国家规划中。国内已有几十个科研、院校和工厂开展毫米波技术的应用研究，已经形成了一支具有科研、研制和生产能力的毫米波骨干力量，并已取得了许多可喜成果。

但是，由于毫米波是一种正在被开发的新的电磁频谱资源，是当代蓬勃发展的高技术领域之一，人们对毫米波的物理特性及其在军事和民用项目中的应用价值只是处在初步认识阶段。到目前为止，国内还没有出版一本全面论述毫米波技术的专著。因此，为了进一步推动我国在毫米波这一高技术领域的开发研究工作，迫切需要有一部专门全面地、系统地论述毫

毫米波技术及其应用的专著。解放军电子工程学院李成蹊副教授主编的《毫米波实用技术与系统》一书是国内第一部全面地、系统地论述毫米波基本特性及其应用的专著。书中详细地介绍了毫米波的大气传播特性；毫米波功率源的基本原理、等效电路和典型的结构形式，导出了有关的工程设计方法；毫米波固态及电真空器件的物理特性和工作原理；毫米波固态器件的物理特性和电路设计；各种毫米波传输线类型及其应用；毫米波天线的形式和特点以及毫米波系统在电子战中的可能应用等重要内容。全书着眼于反映近期国内外毫米波技术开发的最新成果，着重于毫米波技术的发展现状，展望了毫米波技术的发展趋势，清晰地勾画出毫米波技术在未来军事中的应用潜力，强调指出在未来的高技术战争中毫米波技术的实用价值与重要战略意义。

由于毫米波所涉及的技术面宽，在军事和民用事业中的应用范围广，毫米波不仅可推动武器现代化的进程，而且将推动我国射电天文、资源堪探、民用通信和雷达、超导技术、核聚变能源以及生物学和医学等跨学科科学技术的发展。本书所涉及的毫米波理论和技术既可用于军事系统的设计，又可用于民用毫米波系统的设计。因此，本书的出版不仅对国内科研人员、技术人员、院校师生以及部队指挥员掌握毫米波的重要特点及在军事和民用中的应用潜力、毫米波系统的工程设计等有较强的参考价值，而且对于我国各级领导了解现代军事高技术的发展方向、毫米波技术在未来高技术武器装备中所占的地位和作用，从而为我国制定毫米波技术的开发应用发展战略提供坚实的科学依据等都大有裨益，为我国国防科学现代化建设和国民经济的发展都会作出应有的贡献。

本书作者长期从事国防科技教学和科研，具有实践经验和理论知识。全书取材新颖、内容丰富、资料可靠，理论严谨、物理概念清晰。它是作者从当今国内外发表的有关毫米波技术发展的最新动向与文献资料，结合作者多年的教学与科研实践并结合我军现代化建设的需要而编写成的。全书基本上反映了毫米波这个新频段的特点和主要内容，不失为一本有学术和军事价值的参考文献。

龚金植

一九九一年一月十一日

于成都

目 录

序 言	(1)
§ 1.1 毫米波、亚毫米波所在频域和使用理论、方法及其在社会发展中的作用	(1)
1.1.1 所在频域及理论、方法	(1)
1.1.2 毫米波、亚毫米波中的量子效应	(1)
1.1.3 毫米波、亚毫米波技术的应用前景	(2)
§ 1.2 毫米波、亚毫米波在军事上的应用	(6)
1.2.1 军事电子学的开发研究重点已转移到毫米波、亚毫米波波段	(6)
1.2.2 毫米波、亚毫米波在军事侦察和监视中的应用	(6)
1.2.3 毫米波、亚毫米波在武器制导和火控中的应用	(10)
1.2.4 毫米波、亚毫米波在军事通信中的应用	(13)
1.2.5 毫米波、亚毫米波在电子战中的应用	(15)
1.2.6 毫米波、亚毫米波在其他方面的应用	(17)
§ 1.3 毫米波、亚毫米波在民用系统中的发展	(18)
1.3.1 毫米波、亚毫米波用于辐射测量学与遥感	(19)
1.3.2 毫米波技术用于射电天文学	(19)
1.3.3 毫米波技术用于民用通信系统和计算机联网数据传输	(19)
1.3.4 毫米波技术用于电视图象传输	(20)
1.3.5 毫米波技术用于防碰撞雷达	(20)
1.3.6 毫米波技术在医学上的应用	(22)
§ 1.4 毫米波、亚毫米波技术的发展趋势与相应对策	(24)
1.4.1 毫米波真空管器件的发展	(25)
1.4.2 毫米波固态器件的发展	(28)
1.4.3 毫米波超声器件的发展	(38)
§ 1.5 毫米波系统与测试仪器发展的现状及趋势	(42)
1.5.1 毫米波系统的发展	(42)
1.5.2 毫注波测试仪器的发展	(44)
第二章 毫米波、亚毫米波大气传播特性	(57)
§ 2.1 毫米波、亚毫米波大气传播概述	(57)
§ 2.2 大气中气体分子对毫米波的吸收	(60)
2.2.1 气体分子吸收毫米波现象	(60)
2.2.2 气体分子吸收毫米波机理	(61)
§ 2.3 降雨对毫米波传播特性的影响	(65)
2.3.1 降雨去极化效应	(65)
2.3.2 雨致差分衰减	(66)

2.3.3 最新降雨统计模式	(69)
2.3.4 雨滴尺寸分布模式	(73)
§ 2.4 雪对毫米波衰减	(76)
§ 2.5 海雾对毫米波散射	(79)
§ 2.6 地球表面毫米波传播闪烁效应	(81)
第三章 毫米波、亚毫米波固态信号源	(85)
§ 3.1 毫米波 Gunn 振荡器	(85)
3.1.0 Gunn 二极管特性	(89)
3.1.1 毫米波、高稳频振荡器	(93)
3.1.2 潮气对腔稳振荡器的影响	(110)
3.1.3 毫米波变容管 Gunn 振荡器	(113)
3.1.4 固态源机械调谐频率	(131)
3.1.5 Gunn 振荡器谐波提取	(140)
§ 3.2 毫米波 IMPATT 振荡器	(154)
3.2.0 硅双漂移崩越二极管	(155)
3.2.1 IMPATT 器件物理基础	(157)
3.2.2 连续波 IMPATT 振荡器	(162)
3.2.3 脉冲 IMPATT 振荡器	(164)
3.2.4 实际设计与工作参数	(169)
3.2.5 毫米波雪崩振荡器噪声分析	(172)
3.2.6 IMPATT 振荡器与 Gunn 振荡器性能对比	(176)
§ 3.3 国外毫米波固态源功率合成技术	(176)
3.3.1 毫米波功率全成概述	(177)
3.3.2 谐振腔功率合成技术	(178)
3.3.3 非谐振式楞率合成器	(183)
3.3.4 空间功率合成器	(186)
3.3.5 介质波导功率合成器	(188)
3.3.6 帽状谐振电路功率合成器	(189)
3.3.7 平面波导电路功率合成器	(190)
3.3.8 准光学技术功率合成器	(191)
3.3.9 真级式功率合成器	(193)
3.3.10 毫米波功率合成技术发展趋势	(194)
§ 3.4 国内毫米波固态源功率合成技术	(196)
3.4.1 Ka 波段单腔双管功率合成器	(196)
3.4.2 波导微带混合集成功率合成器	(199)
3.4.3 Ka 波段复合式准光功率合成器	(199)
3.4.4 空间功率合成源耦合效应分析	(202)
3.4.5 谐波功率合成器的模式稳定性分析	(205)
第四章 毫米波、亚毫米波真空管信号源	(218)

§ 4.1	毫米波速调管	(219)
§ 4.2	毫米波行波管 (TWT)	(227)
§ 4.3	毫米波返波振荡器 (BWO)	(236)
§ 4.4	毫米波磁控管	(239)
§ 4.5	勒达管	(244)
§ 4.6	毫米波回旋管	(247)
§ 4.7	毫米波锁相与频率合成	(259)
第五章	毫米波波导传输线	(265)
§ 5.1	毫米波矩形波导	(269)
5.1.1	毫米波矩形波导衰减特性	(271)
5.1.2	毫米波矩形波导功率容量	(276)
5.1.3	矩形波导不连续性结构	(279)
§ 5.2	毫米波圆形波导	(282)
5.2.1	毫米波圆波导衰减特性	(285)
5.2.2	毫米波圆波导功率容量	(286)
§ 5.3	毫米波过尺寸波导	(288)
5.3.1	过尺寸的矩形波导	(288)
5.3.2	加大尺寸的圆波导	(292)
§ 5.4	毫米波槽波导	(293)
5.4.1	矩形槽波导	(293)
5.4.2	正 V 形槽波导	(298)
§ 5.5	毫米波弯曲波导连接器	(301)
5.5.1	用边界无法分析毫米波弯曲波导连接器	(301)
5.5.2	毫米波弯曲波导连接器分析结果	(303)
§ 5.6	毫米波波导侧窗耦合器	(304)
5.6.1	侧窗耦合器理论分析	(304)
5.6.2	理论计算结果	(308)
第六章	毫米波集成介质传输线	(311)
§ 6.1	毫米波集成介质传输线的种类和特性	(311)
6.1.1	毫米波集成介质传输线的种类	(311)
6.1.2	毫米波集成介质传输线的特性	(313)
§ 6.2	毫米波鳍线	(313)
6.2.1	单鳍线特性的分析与计算	(314)
6.2.2	鳍线传播特性分析计算的其他方法	(319)
6.2.3	在矩形波导 E 面上鳍线不连续性的分析	(327)
§ 6.3	毫米波介质波导	(330)
6.3.1	有效介电常数法	(331)
6.3.2	矩形介质镜象波导	(355)
6.3.3	毫米波介质集成传输线的严格解法	(338)

第七章 毫米波无源器件及电路	(344)
§ 7.1 毫米波过渡器	(344)
7.1.1 毫米波波导——微带过渡器	(344)
7.1.2 毫米波波导——鳍线过渡器	(345)
7.1.3 毫米波波导——悬置微带线过渡器	(346)
§ 7.2 毫米波环行器	(347)
7.2.1 波导环行器	(347)
7.2.2 鳍线环行器	(349)
7.2.3 无辐射介质波导环行器	(356)
7.2.4 铁氧体环行器	(357)
§ 7.3 毫米波定向耦合器	(359)
7.3.1 小孔耦合定向耦合器	(359)
7.3.2 耦合线定向耦合器	(364)
7.3.3 鳍线定向耦合器	(369)
7.3.4 介质波导定向耦合器	(370)
§ 7.4 毫米波滤波器	(375)
7.4.1 滤波器设计基本思路	(375)
7.4.2 低通滤波器综合设计	(376)
7.4.3 滤波器电路	(378)
7.4.4 毫米波滤波器设计的数值方法	(383)
7.4.5 毫米波宽频带滤波器	(386)
7.4.5-1 设计考虑	(386)
7.4.5-2 实验结果	(387)
§ 7.5 毫米波非互易器件	(388)
7.5.1 毫米波非互易器件工作原理	(388)
7.5.2 毫米波隔离器	(390)
第八章 毫米波固态器件	(395)
§ 8.1 毫米波检波器	(395)
8.1.1 有特基势垒二极管	(395)
8.1.2 检波器特性	(397)
8.1.3 检波器灵敏度	(398)
8.1.4 检波器噪声特性	(400)
8.1.5 宽带检波器的设计	(401)
8.1.6 腔式宽带检波器	(404)
8.1.7 非调谐宽带检波器	(405)
§ 8.2 毫米波混频器	(407)
8.2.1 混频器工作原理	(407)
8.2.2 混频器数值分析	(410)
8.2.3 混频器的变频损耗	(419)

8.2.4	混频器的噪声系数	(422)
8.2.5	基波与谐波混频器的性能比较	(426)
8.2.6	混频器的其它电气性能指标	(427)
8.2.7	毫米波正交场混频器	(428)
8.2.8	毫米波鳍线混频器	(439)
8.2.9	毫米波四管堆平衡混频器	(444)
8.2.10	毫米波谐波混频器	(454)
8.2.11	毫米波分谐波混频器	(457)
§ 8.3	毫米波微弱信号放大器	(479)
8.3.1	毫米波放大器特性	(480)
8.3.2	负阻 Gunn 放大器	(500)
8.3.3	GaAsFET 放大器	(504)
8.3.4	低温致冷低噪声放大器	(508)
8.3.5	单片 HEMT 低噪声放大器	(511)
§ 8.4	毫米波倍频器	(515)
8.4.1	毫米波倍频机理	(516)
8.4.2	毫米波倍频电路	(518)
8.4.3	毫米波上变频器的非线性分析	(519)
8.4.4	梁式引线二极管宽带倍频器	(527)
8.4.5	平衡双栅 GaAsFET 倍频器	(529)
§ 8.5	毫米波开关	(531)
8.5.1	梁式引线 PIN 二极管	(531)
8.5.2	高速开关电路设计	(534)
8.5.3	8mm 波段脊波导 PIN 开关设计	(539)
8.5.4	开关驱动电路	(544)
8.5.5	窄脉冲形成电路	(546)
8.5.6	多用途毫米波信号源	(548)
8.5.7	毫米波铁氧体锁式开头	(556)
8.5.8	毫米波鳍线 PIN 管 SPDT 开关	(557)
§ 8.6	毫米波相移器	(560)
8.6.1	PIN 二极管鳍线相移器	(560)
8.6.2	铁氧体相移器	(565)
§ 8.7	毫米波衰减器	(571)
§ 8.8	毫米波铁氧体电驱动器体	(577)
§ 8.9	毫米波超导体体	(578)
8.9.1	毫米波超导技术概述	9578)
8.9.2	毫米波超导器件的发展	(580)
第九章 毫米波天线		(599)
§ 9.1	毫米波天线理论及设计考虑	(599)

9.1.1	明确毫米波天线几项涵义	(599)
9.1.2	毫米波天尺寸与束宽和增益的关系	(600)
9.1.3	毫米波天线损耗	(601)
9.1.4	毫米波天线容差	(602)
9.1.5	毫米波天线方向图特性	(603)
§ 9.2	毫米波喇叭天线	(606)
9.2.1	圆极化喇叭天线	(606)
9.2.2	H 面恒波束喇叭天线	(607)
9.2.3	圆锥多模喇叭天线	(608)
9.2.4	波纹喇叭天线	(612)
9.2.5	介质透镜喇叭天线	(614)
§ 9.3	毫米波反射器天线	(616)
9.3.1	毫米波波段 90°偏置的抛物面天线	(616)
9.3.2	毫米波前端馈电抛物面天线与卡塞格伦天线	(618)
9.3.3	毫米波介质导双反射面天线	(619)
§ 9.4	毫米波平面螺旋天线	(623)
§ 9.5	毫米波集成天线	(625)
§ 9.6	毫米波不同极化全向天线	(641)
9.6.1	毫米波斜极化全向天线	(641)
9.6.2	毫米波圆极化全向天线	(642)
第十章	毫米波雷达	(646)
§ 10.1	毫米波雷达概述	(646)
§ 10.2	监视与目标截获毫米波雷达	(674)
§ 10.3	大炮控制及跟踪毫米波雷达	(680)
§ 10.4	导弹制导毫米波雷达	(689)
§ 10.5	新体制毫米波雷达	(712)
第十一章	毫米波通信	(722)
§ 11.1	毫米波通信概述	(722)
11.1.1	地面通信情况	(722)
11.1.2	卫星通信情况	(724)
11.1.3	毫米波通信频段	(724)
§ 11.2	毫米波地面通信	(725)
§ 11.3	毫米波卫星通信	(729)
11.3.1	毫米波卫星通信概述	(729)
11.3.2	毫米波卫星通信理论	(730)
11.3.3	早期的毫米波卫星通信	(734)
11.3.4	正在毫米波工作的通信卫星	(737)
11.3.5	毫米波卫星通信发展前景	(740)
第十二章	毫米波多学科应用	(745)

§ 12.1 毫米波辐射计	(745)
12.1.1 辐射计基本原理	(745)
12.1.2 被动式毫米波辐射计	(748)
12.1.3 主动式毫米波辐射计	(755)
§ 12.2 毫米波遥感	(756)
12.2.1 毫米波遥感概述	(756)
12.2.2 毫米波遥感对目标检测	(758)
§ 12.3 毫米波射电天文	(760)
12.3.1 毫米波射电天文基本原理	(760)
12.3.2 毫米波射电天文设备构成	(761)
§ 12.4 毫米波在生物学和医学中应用	(764)
12.4.1 毫米波生理效应基本理论	(764)
12.4.2 毫米波医疗设备	(766)
第十三章 毫米波电子对抗	(771)
§ 13.1 毫米波电子对抗概论	(771)
§ 13.2 毫米波电子侦察系统	(776)
§ 13.3 毫米波电子干扰系统	(782)
第十四章 毫米波、亚毫米波测量与仪器	(785)
§ 14.1 毫米波测量仪器现状和发展概述	(785)
14.1.1 毫米波测量仪器现状	(785)
14.1.2 毫米波测量仪器频率扩展的展望	(786)
§ 14.2 毫米波频率测量	(792)
§ 14.3 毫米波相位噪声测量	(794)
14.3.1 毫米波频率综合器的相位噪声模型	(794)
14.3.2 毫米波相位噪声测试系统	(798)
§ 14.4 毫米波频谱测量	(801)
14.4.1 3mm 波段频谱测试系统	(801)
14.4.2 多通道毫米波光栅谱仪	(803)
§ 14.5 毫米波标量参数测量	(804)
§ 14.6 毫米波暗室测试系统	(806)

第一章 毫米波亚毫米波概论

60年代激光技术的发展,曾分散了人们对毫米波技术的注意,但从70年代开始,由于空间技术、军事电子技术和其他科学技术发展的需要,人们又迫切要求开发介于微波到光波之间的电磁频谱^{[1.1][1.2][1.3]}。

§ 1.1 毫米波、亚毫米波的理论方法及其在国防和经济建设中的作用

1.1.1 频谱划分及理论分析方法

通常人们把(30~300)GHz的频域称为近毫米波(near millimeter waves),而把300到3000GHz的频域称为亚毫米波(Submillimeter wave)。实际上已与光学中的“极远红外”(extreme far infrared)相重,如图1.1-1所示。毫米波各分波段通用字母代号和频率范围示于表1.1-1。

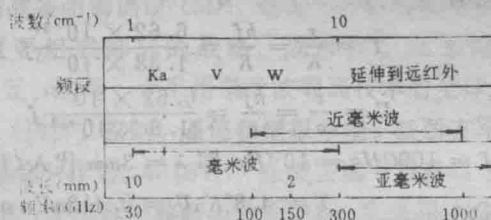


图 1.1-1 毫米波、近毫米波、亚毫米波的频率范围

表 1.1-1 毫米波各小波段通用字母代号和频率划分

波段代号	K	Ka	Q	U	V	E	W	F	D	G	M	J
频率 (GHz)	18-26.5	26.5-40	33-50	40-60	50-75	60-90	75-110	90-140	110-170	140-220	170-260	220-325

以麦克斯韦方程为基本公式的经典电磁波理论是分析微波频率以下的电磁波问题的全面基础。在光学领域中也遵循某些电磁波理论,但受量子力学强烈支配。毫米波理论受量子力学的影响就开始明显起来,亚毫米波理论中的某些方面就相当显著。因此,要研究毫米波、亚毫米波技术,必须求助于电磁场理论和量子力学,这是基本理论。

在长毫米波范围内,器件通常利用按微波比例缩小尺寸的方法来设计,在短毫米波范围内,器件通常利用按准光学比例放大尺寸的方法来设计,这是基本设计方法。

1.1.2 毫米波亚毫米波中的量子效应^[1.3]

考虑毫米波与亚毫米波的理论实验时,它与微波的一个重要差别是量子效应。

①电磁波的相位和振幅不能独立地完全精确地确定

在量子力学中、由著名的海森伯格方程导出能量 ϵ 与时间 t 之间的标准差别测不准关系为:

$$\Delta \epsilon \Delta t \geq \hbar/2 \quad (1.1-1)$$

又有 $\Delta\varepsilon = \Delta n h f$, 这里 Δn 为光子的不确定标准差, f 为工作频率, h 为普朗克常数, $\hbar = h/2\pi$, 将它们代入上式, 则得:

$$\Delta n \cdot \hbar f \Delta t \geq \hbar/2 \quad (1.1-2)$$

考虑到 $\Delta\varphi = 2\pi f \Delta t$ 为相角不确定标准差, 代入上式, 则有

$$\Delta n \cdot \Delta\varphi \geq 1/2 \quad (1.1-3)$$

此式表明, 在毫米波、亚毫米波的频域范围, 电磁波的相位和振幅是不能独立完全精确地确定的。因为 Δn 是与能量有关的不确定的标准差, 故难指定 $\Delta\varphi$ 测量精度。且对于频率越高的电磁波来说, Δn 所对应的 $\Delta\varepsilon$ 越高, 即它的振幅不确定值越大。

②最小可测振幅随工作频率线性增长

倘若测量要求一定的相对振幅精确度, 则限制了可测电磁波的最小强度(振幅)。而这个最小可测振幅随工作频率线性增长。

由量子力学知,

$$\text{能量} \quad \varepsilon = h f = K T = e U (\text{焦耳})$$

则有

$$T = \frac{\varepsilon}{K} = \frac{h f}{K} = \frac{6.62 \times 10^{-34}}{1.38 \times 10^{-23}} f \quad (1.1-4)$$

$$U = \frac{\varepsilon}{e} = \frac{h f}{e} = \frac{6.62 \times 10^{-34}}{1.6 \times 10^{-19}} f \quad (1.1-5)$$

若以 $f = 100 \text{ GHz} = 10^{11} \text{ Hz}$, 即 $\lambda = 3 \text{ mm}$ 代入(1.1-4)、(1.1-5) 则得

$$T = 4.8^\circ \text{K}; U = 0.413 \text{ mV}$$

由上式和计算数值看出来, 在毫米波、亚毫米波技术中, 固体在接近绝对零度的情况下, 量子效应变得很重要。例如毫米波接收机的量子噪声的等效温度可达好几度 K , 亚毫米波接收机的噪声温度则升到好几十度 K 。或者看出, 毫米波固体器件约有 1 mV 左右的能隙, 亚毫米波固体器件约有 10 mV 左右的能隙, 量子噪声变得重要起来。因此, 在毫米波、亚毫米波技术的理论分析中, 应注意其量子效应。

1.1.3 毫米波亚毫米波技术的应用前景^[1.4]

一、军用目的为先导

毫米波的发展有着悠久的历史。自 1864 年麦克斯韦提出电磁的概念, 并由赫兹于 1880 年用电火花验证电磁波存在以来, 人们认识到毫米波是整个电磁频谱的一部分。但是, 由于缺乏稳定的源器件等原因, 毫米波领域的研究进展十分缓慢。1940 年, 由于高精度雷达对毫米波的需求而促进了它的发展; 继而在 50 年代和 60 年代, 低损耗波导远距离超容量通信的发展, 以及对毫米波大气传播特性的深入研究, 使其得到进一步发展。可是, 在 60 年代初期, 由于激光和红外技术的崛起以及认识上的局限, 放弃了毫米波远距离通信的研究, 毫米波技术的进展一度处于低潮。

70 年代初期, 因微波频谱的拥挤, 以及红外和光学系统的某些局限性, 特别是在雾、尘与夜视等条件下的局限性, 毫米波重新引起世界各国的广泛关注。至 80 年代初期, 毫米波的一系列技术问题已经或近于解决, 诸如高功率相干辐射源、相应的固态源、传输媒质以及元器件已被研制, 并成为商品; 毫米波大气环境的传播特性已得到深入研究和认识; 毫米波传感器如接收机、辐射计和干涉仪等的固有分辨率, 可与红外、光波段相比较; 与其他技术的

结合,诸如注入锁定、相位锁定、多个器件的功率合成、低温超导检测、传感器系统性能极限的评定等都可实现。

毫米波技术的进展和研究活动的复苏,迅速被军事大国纳入到军备竞争的轨道。在精确制导武器中的应用,是毫米波取得成功的重要领域。美国国防高级研究计划局(DARPA)拟定了庞大的计划,研制毫米波精确制导武器,在80年代初期,其投资即已超过一亿美元。休斯公司为主承包商,计划生产500多发弹头进行实验,重点研究毫米波导引头如何从地杂波背景中识别运动或静止的坦克,1987年开始装备部队,1988年已批量生产。美国陆军研制的遥感和摧毁装甲(SADARM)系统,主炮弹上装备8mm辐射计。美国1983年还在霍克地空导弹和麻雀空对空导弹上,加装了94GHz单脉冲寻的器。俄国在毫米波搜索雷达、火控雷达方面领先于美国,宇宙226和384上均装备有35GHz辐射计作军事侦察用;新型毫米波制导的地空导弹系统SA10具有反巡航导弹的能力,抗干扰性能强,引起了美国的担忧。此外,英、法和西德等国家亦在毫米波精确武器制导研究方面进行了大量工作。80年代,世界各国已研制20多项毫米波制导武器,并已装备部队,投资已超过10亿美元。在毫米波通信方面,国外亦进行了大量投资和研究。例如,作为美国战备防御倡议(SDI,这是一个以防御面貌出现的进攻性计划,即所谓星球大战计划)重要组成部分的战略、战术和中继通信系统(MILSTAR),迄今毫米波的投资已逾10亿美元。这是一个采用毫米波等高技术的全球通信、指挥和控制系统,是美国国防部最优先的C³I(指挥、控制、通信和情报系统,被西方军事界喻为继核武器和导弹运载系统之后的第三次革命)计划。MILSTAR是美国迄今最具雄心的卫星计划,旨在增强电子战和C³I的能力,并提供一个可承受核打击的通信网。它采用44GHz的上行线路和20GHz的下行线路,拥有7-8个卫星,用于地面机载工具、航空器、水面舰船、潜水艇等4000个用户终端间的防干扰中继通信。毫米波技术的军事应用,将构成新的电子威胁。因此,毫米波电子对抗系统亦有了新发展,毫米波雷达侦察和预警系统、机载固态相控阵干扰机等已用于装备部队或正在研制改进之中。为加速毫米波军用系统的实用化、小型化和降低成本,1986年,美国国防部制订了一项毫米波单片集成电路(MIMIC)的7年发展研究计划,投资预算接近10亿美元。目前已进入第一阶段研究开发,并签订了近6亿美元的合同。1985年,苏联亦制订了对抗SDI的计划,力求在核战中首先破坏敌方与核有关的指挥、控制和通信系统。大量事实和信息表明,目前美苏英法西德等国极为重视毫米波频谱的开发利用,毫米波技术竞争已成为国际军备竞赛及冷战的重要方面。

二、推动民用毫米波技术的发展

军事毫米波技术的发展,大力促进了民用和商业通信、射电检测、雷达和物理测量的发展。如欧洲宇航局(ESA)的OLYMPUS卫星通信工程,其投资达数亿美元;世界各国迄今已建造数十台毫米波射电天文望远镜,总投资达10亿美元;在气象前沿方面,美国NASA(宇航局)云雨-6号卫星携带有5部俯视超外差辐射计,中心频率为22和60GHz,用于测量各种地理位置与气象和气候条件的温度分布图。对于大气水蒸汽探测卫星,现正在研究183GHz多频辐射计。目前,美国和英国的气象部门正在联合研制ASMU-B气象卫星,接收机频率为89,157和183GHz;毫米波辐射成象以其惊人的成功而获得了巨大进展,一些工作在33,90,183和220GHz(主要的大气窗口频率)的系统已用于全天候地形绘制,以及用于获得北冰洋边缘的冰的图象、确定海冰冰缘、冰穴和冰缝位置、确定冰层厚度和状态;开发新的清洁能源是人类面临的重大课题,受控热核聚变装置和同步卫星太阳能电站是人类解决21世纪能源问题

的两个最有希望的方案。毫米波技术在受控热核反应中有极其重要的应用，它不仅是聚变装置内高温等离子体的重要诊断手段，而且是实现其点火的最有竞争性的途径之一。高功率回旋管的出现，给高温等离子体的电子回旋加热（ECRH）带来了蓬勃生机，美苏以及欧洲诸国竞相投入力量，积极研制 100-300GHz 大功率回旋管，以加热氘的等离子体达到点火温度（1 亿度）；在生物效应和电磁生物谱的研究中，毫米波热象仪兼有微波热象仪的高灵敏度和一定的穿透深度以及红外热象仪的高分辨率的优点，是研究肿瘤病理的理想方法和仪器；毫米波技术在空中、港口和公路交通管制方面亦得到广泛研究和应用。实例之一是美国公路交通安全管理局（NHTSA）研制的毫米波防撞雷达，工作频率 36GHz，安装在轿车前端内部，当发现前方 30-45 米的目标时可紧急自动刹车，在大雾弥漫公路上特别有效。

毫米波技术的发展，是由它自身的特点所决定的，它兼备有微波和红外波段的优点。近 10 多年来，毫米波技术的发展十分迅速，投资扩大、应用拓展，许多微波专家学者纷纷转向毫米波段的研究开发。80 年代以来，许多著名大学和研究所，300-400 家公司（包括 IBM 等计算机公司）都被卷入到这股热潮之中。现在，美国各大学承接微波研究课题时，要求必须附带毫米波研究题目。附表 1.1-2 列出了毫米波若干重要应用领域的发展和投资情况。

1988 年，美国商务部对左右 21 世纪世界经济的高技术预测中，毫米波被列为重要的分支学科之一。附图 1.1-2 示出了当代和未来世界六大高技术群体的整体结构。毫米波是信息技术群体的一个分支。如上所述，毫米波与其他五大高科技群体的关系紧密。毫米波技术的研究和开发利用，为信息科学、材料科学、生物工程、资源探测、能源开发和环境保护等提供了重要手段，必将有力地促进这些学科的发展。

表 1.1-2 毫米波若干重要应用领域的发展和投资

应 用 领 域	最高应用频率 (GHz)	投资 (亿美元)
卫 星 通 信	44, 60	12
地 面 通 信	60 (110)	1-2
雷 达 与 制 导	94	20
射 电 天 文	450	10
MIMIC	140	6-8
遥 感	183	1-2
其 他	300	2-3

三、我国毫米波技术的发展情况

我国在 1950 年代就开展了毫米波雷达与远距离通信的研究。60 年代末，由于等离子体诊断技术的要求，研制了 8 和 6mm 设备及其相应的测量仪器。从 70 年代末期直到现在，毫米波技术获得了稳步发展。8mm 波段（~40GHz）技术基本趋于成熟，目前正在向 3mm（~110GHz）和更高的频率扩展。60 至 70 年代，先后研制了 8mm 成套测量设备，H₀₁圆波导元件、等离子体诊断仪、炮火侦察雷达和港口雷达等。80 年代，研制了一大批新型毫米波器件。诸如回旋管、EIO，EIA，4mm 绕射辐射振荡器等电真空器件；Gunn 管、PIN 管、IMPATT 管、肖特基势垒二极管、噪声管、超导约瑟夫逊结等固态器件。6，4，3 和 2mm 波导测量设备与仪