

高等学校教材

毫米波传输线

杨 铨 让 著



电子工业出版社

毫米波传输线

杨铨让 著

周文表

电子工业出版社

内 容 简 介

本教材的主要内容是介绍毫米波平面集成和介质集成传输线的混合模分析方法及其基本特性,包括毫米波传输线的物理基础和基本教学方法、各种平面集成传输线的全波分析方法和各种介质集成传输线的近似分析方法及精确分析方法。

本书为高等学校工科电磁场与微波技术专业教材,亦可作为参考书,供有关专业的研究生和工程技术人员使用。

毫 米 波 传 输 线

杨铨让 著

责任编辑:杨富强

※

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

山东电子工业印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

※

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.5 字数: 346千字

1986年5月第1版 1986年6月第1次印刷

印数: 2700册 定价: 2.50元

统一书号: 15290·318

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二到一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由电磁场及微波技术教材编审委员会微波技术编审小组评选审定，并推荐出版的。

本教材的主要内容是介绍毫米波平面集成和介质集成传输线的混合模分析方法及其基本特性。全书共分五章。第一章介绍毫米波传输线的物理基础和基本数学方法。第二、三两章介绍平面集成传输线(微带线、槽线、共面线和鳍线)的全波分析方法。第四、五两章介绍介质集成传输线(矩形介质波导、介质镜象波导、倒置条带介质波导等)的近似分析方法和精确分析方法。上述内容可分为两个层次，其一供本科生选修，参考学时数为25~30学时；其二供研究生选修(在章、节前加“*”号标志)，约需10~15学时。本教材各章后均附有思考与练习题、参考资料，供读者选用和查阅。

本教材由北京工业学院邓次平副教授担任主审，并为本书提出许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢，由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九八五年六月

于南京工学院

绪 论

§ 1 毫米波、毫米波技术

毫米波是微波与光波之间很重要的频谱资源。近年来,毫米波的各种元、器件已经取得很大发展,并在通讯、雷达、无线电测量、遥感、制导、无线电天文学和波谱学等方面得到广泛应用。

毫米波的频率范围一般是指从30~300GHz(或波长为1cm~1mm)。1976年 IEEE 规定40~300GHz为毫米波频率范围,而把27~40GHz称为 K_u 波段。也有人提出近毫米波这个术语,它是指大约从100~1000GHz。亚毫米波频率大约从150~3000GHz(3THz)。图1.1列出这些命名法所表示的频率范围。

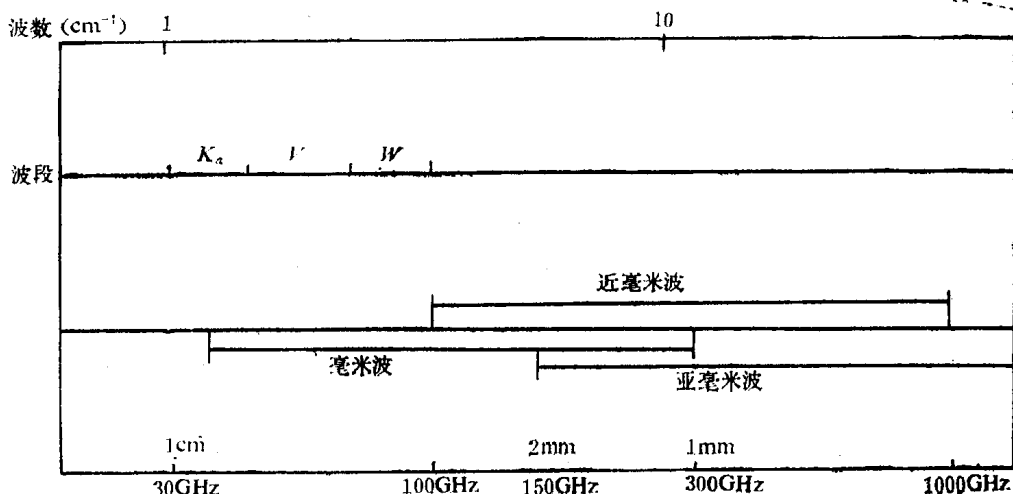


图1.1 毫米波和其他波段的频率范围

图1.2是毫米波在海平面和4km高空大气衰减的特性曲线。图中曲线峰值是大气中的氧气和水蒸气的强烈吸收衰减,低凹部份是吸收最小区域称为窗口。窗口的最小吸收值随频率增加而单调增加。毫米波的衰减特性还受雨、云、雾的影响产生附加衰减。雾的衰减在能见度不是很差的情况下还是很小的。雨水和云的衰减在低衰减量的窗口是不可忽略的。

毫米波的大气衰减特性决定了各频率的用途。卫星与卫星通讯或地面与地面的通讯为防止信号外溢,选择高空大气吸收衰减达到隔离程度的频率,这时大气是不“透明”的。地面与卫星通讯最感兴趣的频率是在35、94、140和220GHz接近衰减最小的窗口。

毫米波的优点是:(1)有效射频带宽很宽,就是说在每一个毫米波的传输窗口有较大的频带可以利用。35、9.4、140和220GHz的四个主要窗口可利用的带宽分别是16、23、26和70GHz的量级。(2)波束宽度窄。对于给定的天线尺寸,与微波相比能获得

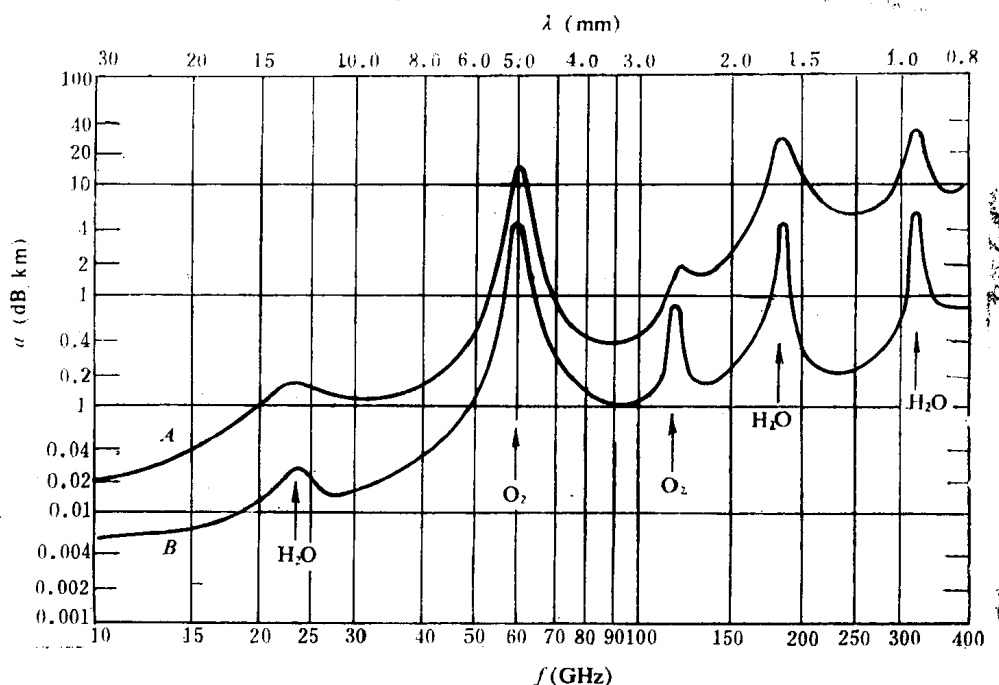


图1.2 毫米波的大气衰减特性

A: 海平面, 温度 $t=20^{\circ}\text{C}$, 大气压 $P=101325\text{Pa}$, 水蒸气密度 $\rho=7.5\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$

B: 4km高空, 温度 $t=0^{\circ}\text{C}$, 水蒸气密度 $\rho=1\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$

较小的辐射波束宽度, 从而提高了方向分辨率。(3)大气衰减。在毫米波传播的窗口与雨、雾、烟尘中传播的激光或红外线相比大气的衰减, 具有全天候特性。(4)设备的尺寸小。由于射频元件尺寸的减小, 以致能够制造出小尺寸的系统设备等。

毫米波技术包括的范围很广, 这里仅从振荡器, 混频器和无源元件几个方面的当前水平和发展方向简略介绍如下。

振荡源: 毫米波波谱的应用首先要归结为毫米波固态器件的发展。目前固态源的输出功率和工作频率都有相当大的提高。在体制上也获得重大改进。例如频率稳定的锁相源, 注入锁定雪崩放大器和倍频体效应振荡器等。

雪崩振荡器的频率可从 $3\sim 230\text{GHz}$, 效率在 40GHz 时是 5% , 在约 100GHz 时小于 1% 。单个器件在 94GHz 脉冲输出功率可达 13W , 四个器件功率合成是 40W 。雪崩管也已用做放大器。由于它的雪崩机理, 固有噪声比体效应管大, 但可用相位或注入锁定来改善。

体效应振荡器的频率范围从微波到 100GHz 。虽然体效应管在输出功率方面比雪崩管低, 但频谱纯洁。砷化镓器件的效率在 40GHz 是 3% , 100GHz 小于 1% 。连续波输出功率从 40GHz , 200mW 到 100GHz , 20mW 。用磷化铟材料的体效应管在 100GHz 以上输出功率和效率都很高。

速调管和磁控管也有很大改进, 磁控管的最高频率达 100GHz (峰值输出功率约 1kW), 寿命小于 $100\sim 200$ 小时。用分布作用电真空器件做成的分布作用振荡器(Extended interaction oscillator)一般从 30 到 280GHz , 寿命估计比磁控管大一个数量级。输出脉冲功率在 35GHz 约为 5kW , 在 95GHz 为 1kW , 280GHz 是 40W 。连

续波功率在 K_u 波段可给出几百瓦, 100GHz 约几十瓦, 140GHz 大于 10W。

返波管的频率从中等微波、毫米波至亚毫米波段, 甚至频率覆盖扩展到 1100GHz 以上。返波管有几十或几百毫瓦功率。有宽调谐范围的优点, 通常用作信号源。

回旋管可以覆盖整个毫米波波段。能产生兆瓦的脉冲或几十到几百千瓦连续功率, 有很高的效率($>30\%$)。一般回旋管需要非常高的电压(60~100kV)和大的磁场, 电源供给问题十分严重。另一个问题是输出常常产生高阶波导模。

混频器: 在混频器方面主要是对微波结构和混频管材料的研究。据统计, 混频器的噪声温度每十年下降一个数量级。图1.3是频率从30到 140GHz 混频器噪声特性曲线。混频器的革新方向有谐波混频, 它使用的本振频率是正常值的1/2或1/4。因此, 可以用一般固态源制成比原来频率高 2~4 倍的全固态接收机。用谐波发生器作为本振源也是一种新方向。混频器的另一种发展是采用比较低的本振功率(如 0.1mW 数量级)。

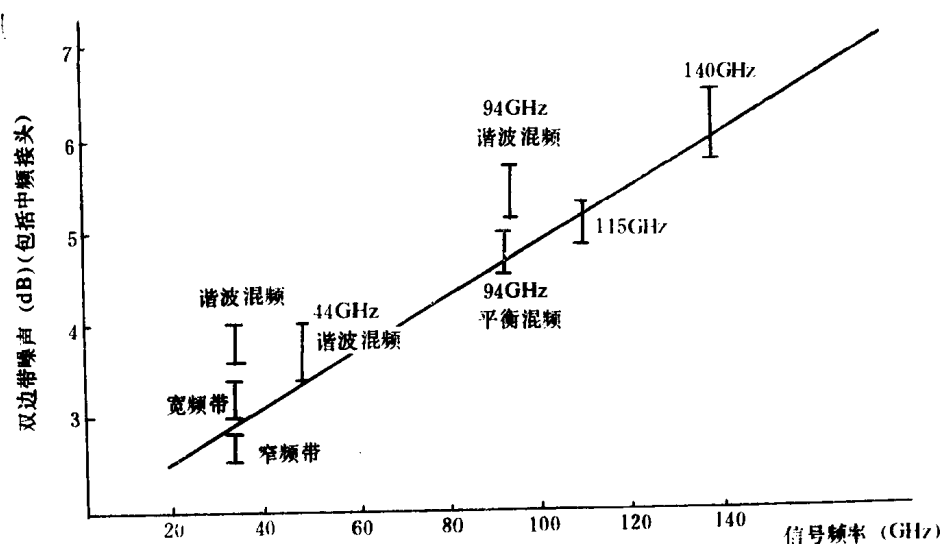


图1.3 毫米波混频器特性

毫米波元件: 一般标准矩形金属波导元件如定向耦合器, “T”形接头, 调谐器和混合环已能做到 220GHz。校正衰减器、相移器和波长计大约能到 110GHz(直读式)和 220GHz(用校正曲线)。所有这些元件的插入衰减在高频时都比较高。铁氧体器件如隔离器、开关、环流器等可以做到 140GHz, 隔离度15~20dB。

由于频率提高元件性能变坏和矩形波导元件加工困难等原因, 而出现了一些新型波导结构(如介质镜象波导, 隔离介质波导, H波导和鳍线等)和准光结构的元件。

鉴于毫米波的特点和毫米波技术的发展, 毫米波已经被广泛应用在制导、雷达、遥感和通讯等方面。

制导 导弹和炮弹的制导是毫米波应用的重要方面。虽然精密的引导武器可以用激光制导, 但激光只能适用于无云层的白天, 而黑夜则无法工作。红外线不能透过云层,

红外制导适用于无云层遮挡的白天和黑夜。毫米波制导具有全天候和全天时的能力。高精度的毫米波导向装置或制导武器在白天、黑夜或烟、雾、云层、灰尘或下雨都有很好的性能。毫米波制导设备可以得到窄波束和尺寸小的天线,从而获得较高的方向分辨率以致改善命中率。制导装置的工作频率采用 30GHz 到 140GHz,通常选用 35GHz 或 94GHz 的频率。45~60GHz 的频率范围大气衰减高,制导是不采用的。全固态毫米波末制导系统具有尺寸小,低电压和成本低的优点。在几公里的近作用距离低发射功率已能满足要求。

雷达 雷达比制导的应用还要广泛,例如短距离高分辨率的空中防御雷达系统,探测打靶目标的机载雷达,空中摄影和控制射击坦克的雷达。有些雷达还同时采用双重极化和双重频率(35GHz 和 94GHz)。最近有一种雷达是美国军用炮击坦克的控制系统称做 STARTLE,该雷达系统能在各种天气条件下探测移动的坦克或装甲车以及它们的轨迹。STARTLE 雷达系统的频率 94GHz,平均功率 0.1~0.5W,作用距离 3000m。

毫米波雷达还可以应用在测量飞机,导弹或坦克的标量模型,沿海防护,防止汽车碰撞以及导弹引信等方面。

遥感和射电天文 由于毫米波低噪声、宽频带、高灵敏度的接收机有了很大的进展,人们利用高灵敏度的无源遥感设备(又称辐射计)在探测地面温度、海洋浪高和近地表温度方面进行了大量研究工作。多数毫米波辐射计工作在 35GHz 频率。频率在 60、90、137 和 225GHz 的辐射计也研制成功。美国 Nimbus-6 人造卫星装载了五个遥感设备,中心频率在 22~60GHz 之间,能够测量地理位置,大气温度变化。毫米波无源遥感在 35~100GHz 之间的温度灵敏度是 0.1~0.4K。频率 90GHz,在低温条件下可改善到 0.01K。

毫米波遥感还应用在生物温度记录和天文学方面。射电天文学包括对太阳、月亮和行星的亮度以及星际间光谱的研究。射电天文的频率已经使用到 140GHz 以上。

近年来,我国研制了多种制式的遥感设备,其频率一直达到 94GHz,并已在射电天文、地物波谱特性和海洋资源探测等方面取得广泛的应用。

通讯 通讯包括地面通讯和卫星通讯两方面。

1 **地面通讯** 毫米波地面通讯一般指利用视距传播的点与点通讯。毫米波通讯具有传输容量大,效率高,成本低和安装方便等优点。通讯频率大多选择在大气低衰减的窗口(30~40GHz)。但也有为了保密原因,选择在大气高衰减区域。采用介质波导的全固态集成电路和电池供电的通讯设备具有轻便、小型化的优点。有一种 70GHz 通讯机在晴朗天气通讯距离为 7km,每小时降雨量为 4mm 时通讯距离为 3km,电池连续供电九小时。

2 **卫星通讯** 近年来,毫米波卫星通讯的应用越来越多。最初的卫星通讯选用频率在 30~33GHz 之间。美国国家宇宙局(NASA)的应用技术卫星(ATS-5 和 ATS-6)与地面站的通讯就是采用这一频率。在卫星与卫星之间通讯的特点是选用接近 60GHz 大气高衰减的频率,从而切断与地面的联系。卫星天线的波束宽度 1.2° ,用固态器件雪崩管放大器输出 1/2W 功率,允许在 40000km 的距离以 100kbit/s 工作。

近年来,由于频谱集聚、防卫和经济效益等原因,各种体制的卫星通讯在研究中,不久的将来卫星通讯的功能将进一步提高。

§ 2 毫米波传输线的种类及特点

在四十年代微波技术发展时期，主要有两种结构形式的传输线，同轴线和矩形金属波导。现代发展毫米波的情况已大不相同，适合毫米波的传输线名目繁多，层出不穷。其中有些是微波传输线可以应用在毫米波的，如矩形金属波导、微带线等。有些是新兴的专为传输毫米波设计的鳍线、介质镜象波导等。还有一些是可以应用在毫米波波段的准光波导。这一节，梗概介绍常用毫米波传输线的主要特性。但本书各章只讨论毫米波集成传输线的理论分析方法及传输特性等。

(1) 标准矩形金属波导〔图2.1(a)〕。矩形金属波导是人们非常熟悉的传输线，它有一系列的产品规格，通常使用时不需要提出详细要求。这种传输线值得进一步研究的是如何减少损耗和降低价格。矩形金属波导加工复杂，不适宜大规模生产。

(2) 大尺寸的矩形金属波导〔图2.1(b)〕。增加波导高度的大尺寸波导可以减小衰减，但高次模也相应出现。这种结构常和集成电路或准光电路结合起来设计。

(3) 微带线〔图2.1(c)〕。在毫米波的低频端，微带线是毫米波平面集成电路广泛使用的结构形式。随着使用频率的提高，损耗显著增加，激励并产生沿介质基片传输的表面波。微带在弯曲和不连续处极易产生辐射。微带线的尺寸随频率提高而减小，受加工容许公差限制，标准微带不适合使用在毫米波高端。

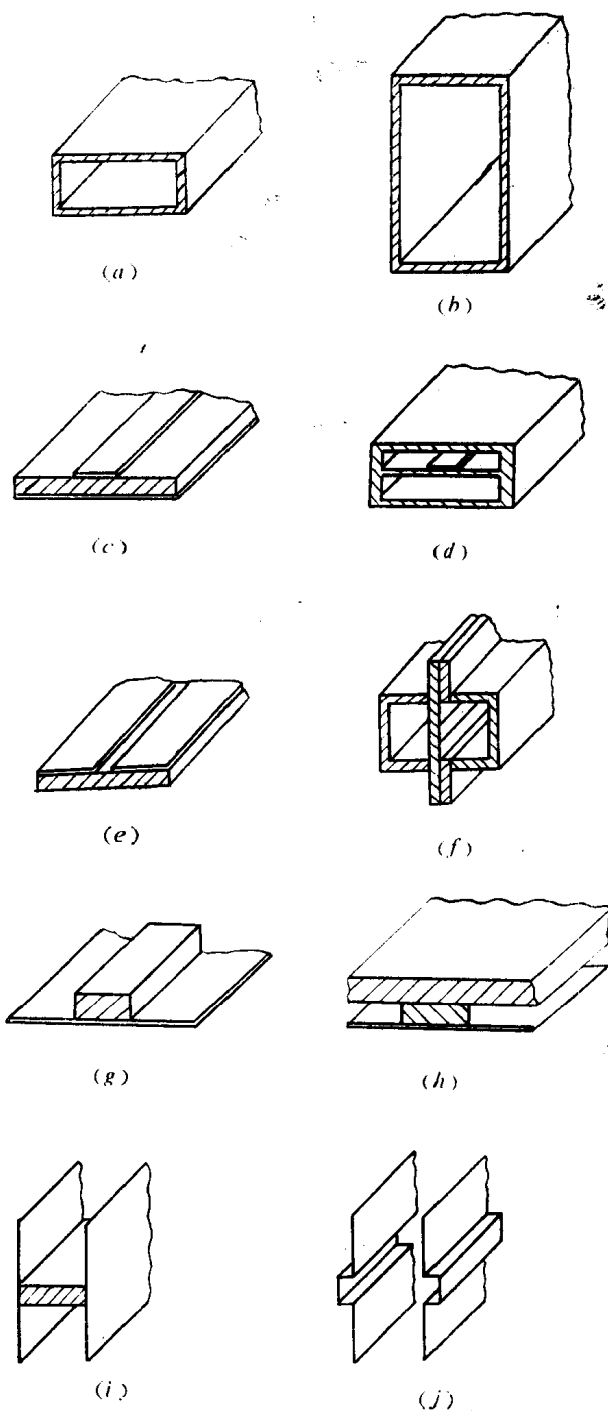


图2.1 一些毫米波传输线

(4) 悬浮微带线〔图2.1(d)〕。悬浮微带是微带线的一种改进形式。为了克服上述标准微带线在毫米波使用的缺点，常采用低介电常数的薄介质基片。减薄介质基片会引起导体损耗的增加，有一些低介电常数基片又很容易破碎。悬浮线是为了克服这些不利因素而设计的一种结构。

(5) 槽线〔图2.1(e)〕。从结构上看，槽线与微带是互补电路。槽线的损耗与微带差不多，品质因数也比较低。但这种结构的集成电路并联连接无源元件及器件十分方便，也适宜制作非互易元件。还有一种槽形的结构是共面波导，共面波导实际上就是奇模耦合槽线。

(6) 鳍线〔图2.1(f)〕。鳍线是用矩形波导屏蔽的槽线，或是放置介质片的脊波导。该结构中的电磁能是在介质外部行进的。因此，屏蔽金属波导是必不可少的。鳍线的平面电路部份设计加工都很方便，屏蔽壳的机械加工遇到了与金属波导同样的困难。因此，需要设计一种工艺方法使平面电路与屏蔽外壳一次完成。

(7) 介质镜象波导〔图2.1(g)〕。介质镜象波导由矩形介质波导演变而来。将介质杆置于导电平面上便构成介质镜象波导。镜象波导介质材料的介电常数低，损耗也小。但介电常数低会使场伸展得很远。要使场集中，介质损耗又要增加，再加上导体损耗就使总损耗提高了，为了克服这一矛盾，出现了许多介质波导的改进结构形式。

(8) 倒置条带介质波导〔图2.1(h)〕。在介质镜象波导上放置介质片能够改善镜象波导场分布的不合理性。这种结构称为倒置条带介质波导。介质波导的弱点是弯曲和不连续性都会引起辐射损耗，固态器件的装配也不甚方便。

(9) “H”波导〔图2.1(i)〕。H波导是H形横截面的开式波导。表面波在H波导的两金属壁之间来回反射形成能流，沿波导传输，传输的电磁能量是集中在介质片的

表2.1 各种波导结构的特性比较

	横截面尺寸	Q 值	额定功率	装配固态器件	大量生产可能性	场泄漏
标准金属波导	中等	中等	中等	中等困难	差	零
加大尺寸的金属波导	大	高	高	/	差	零
微带线	小	低	低	容易	中好	中等
悬浮微带(屏蔽)	中等	低	低	容易	差	零
槽线	小	低	低	容易	中好	较大
共面波导	小	低	低	容易	中好	较大
鳍线(屏蔽)	中等	低	低	容易	差	零
介质镜象波导	中等	中等	中等	困难	中好到差	较大
倒置条带介质波导	中等	中等	中等	困难	中好到差	中等到较大
H波导	大	高	高	/	中好	小
槽波导	大	高	高	/	中好	小

附近，场从介质片向上、下两边衰减。H波导是低衰减的，高次模也能被介质片抑制。

(10)槽形波导〔图2.1(j)〕。槽形波导与H波导属于同一种类型，并有相似特性。由于H波导不用介质片，损耗更小。

上述各种毫米波传输线的特性归纳在表2.1中。

表中所列各项指标评定仅仅是初步的，许多波导的特性仍处在发展阶段。制造工艺不断改进，也会影响对波导特性的评价。因为许多指标与频率有关，表2.1中各项指标都是在40GHz评定的。品质因数Q值的大致划分标准是50~500为低，500~4000是中等，4000以上为高。额定功率与安装固态器件方便与否都是相对矩形金属波导而言的。各种波导结构的频率使用范围示于图2.2。

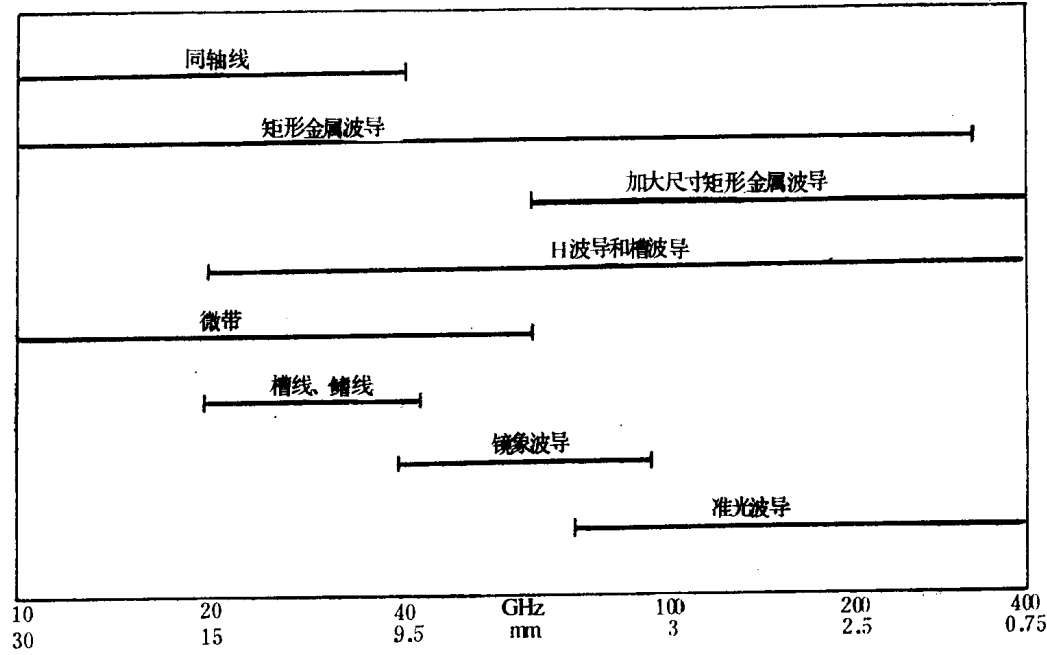


图2.2 一些毫米波波导的频率使用范围

一些波导结构的阻抗范围列在表2.2中。毫米波波导常用介质材料的特性列在表2.3。

表2.2 一些波导阻抗的范围

波导名称	微带线	悬浮微带	共面波导	槽线	鳍线	介质镜像波导
阻抗(Ω)	20~125	40~150	40~150	60~200	10~400	≈ 26

表2.3 各种介质材料特性

材 料	表面粗糙度 (μm)	$10^{-4}\text{tg}\delta$ (10GHz)	ϵ_r (近似值)	热传导率 $K(\text{W}/\text{cm}^2/\text{C})$	介质强度 (kV/cm)
氧化铍99.5%	2~8	1~2	10	0.3	4×10^3
96%	20	6	9	0.28	4×10^3
85%	50	15	8	0.21	4×10^3
蓝宝石	1	1	9.4, 11.6	0.4	4×10^3
玻璃	1	20	5	0.01	—
聚四氟乙烯	1	1	2.3	0.001	≈ 300
石英(熔融)	1	1	3.8	0.01	10×10^3
氧化铝	2~50	1	6.6	2.5	—
金红石	10~100	4	100	0.02	—
铁氧体, 石榴石	10	2	13~16	0.03	4×10^3
砷化镓(高电阻率)	1	6	13	0.3	350
锗(高电阻率)	1	10~100	12	0.9	300
干燥空气	—	≈ 0	1	0.00024	30
$\epsilon-10$ (3MCo. NINEAPOLIS) RT/DUROID (ROGERSCO.)		10	10.2 在z方向	0.24	—
6010		10	10.3	0.26	—
5870		12	2.33	0.26	—
5880		9	2.2	0.26	—

思考与练习题

1. 什么叫毫米波, 毫米波的频率范围是怎样划分的?
2. 毫米波的特点有哪些?
3. 毫米波传输线在毫米波技术中的作用和地位怎样?
4. 毫米波技术与国民经济、科学技术和国防等方面的关系怎样?
5. 当前国内、外毫米波技术的发展情况怎样?

参 考 资 料

1. Chen, C. C., Rand Corp. R-1694-PR(ADA011-642), Santa Monica, California, 1975.
2. Sander, J. IEEE Trans, Antennas Propag. 23, pp. 213~220, 1975.
3. Dyer, F. B, and N. C, Currie, Symp, Millimeter and Submillimeter Wave Propag. Circuits AGARD Conf. Proc, No. 245, pp 211~219, 1978.
4. Richard, V. W., and J. E. Kammerer, Rep. BRL-1838, U. S. Army Ballist. Res. Lab., Aberdeen, Maryland, (AD B008173L).
5. Persinger, R. R., W. L. Stutzman, R. E. Castle, and C. W. Bostian, IEEE. Trans. Antennas Propag, 28, pp. 149, 1980.
6. Gallagber, J. J., M. D. Blue, B. Bean, and S. Perkowitz, Infrared phys, 17, pp.43~55, 1977.

7. Button, K. J, ed. , Infrared and Millimeter Wave, Academic Press, New York.
8. Bernues, F.J. , R. S. Ying and M. Kaswen, Microwave Syst. News 9 (May) pp 79~86, 1979.
9. Simonuntti, M. D. , D. C. English, and F. J. Bernuse, IEEE. MTT-S Int, Microwave Symp. Dig pp. 73, 1980.
10. Kantorowicz, G. , P. Palluel, J. Pontivianne, Microwave J. 22(Feb), pp.5~759, 1979.
11. Chu, K. R. , M. E. Read and A. K. Ganguly, IEEE Trans. Microwave Theory Tech 27, pp. 318~325, 1980.
12. Kerr, A. R. IEEE, Trans. Microwave Theory Tech, 27, pp. 938~943, 1979.
13. Kerr, A. R, IEEE Trans, Microwave Theory Tech. 27, pp 944~950, 1979.
14. Kawasaki, R. and K. Yamamoto, IEEE. Trans, Microwave Theory Tech. 27, pp 530~533, 1979.
15. Cardiasmenos, A. G. , Microwave Syst. News 9 (May) pp 46~56, 1979.
16. Cardiasmenos, A. G. , Microwave Syst, News 10 (Aug.) pp. 37~51, 1980.
17. Calvjello, J. A. . Microwave J. 22 (Aug.) pp 53~56, 1979.
18. Takada, T. , and M. Ohmovi, IEEE. Trans Microwave Theory Tech 27. pp 519~523, 1979.
19. Kramer, N. B. , Microwave J. 21(Aug.), pp. 57~61, 1978.
20. Fank, F. B. , J. D. Crawley and J. J. Bernz, Microwave J. 22(June) pp. 86~⁷, 1979.
21. Valkenburg, E. P. and D. D. Khandelwal, Microwave J. 22 (Aug.)59, 60, 63, 64, 1979.
22. Deo, N, C, and R. Mittra, Microwave 18(Oct.) pp. 38~42, 1979.
23. Rainwater, J. H. , Microwave 17 (Sept.) pp. 59~62, 1978.
24. Frederick, J. T. , IEEE Trans, MTT-S, pp 203~207, 1979.

目 录

绪 论

§ 1 毫米波、毫米波技术·····	(i)
§ 2 毫米波传输线的种类及特性·····	(v)

第一章 理论基础

§ 1.1 引言·····	(1)
§ 1.2 传输线·····	(1)
§ 1.3 电磁波·····	(3)
§ 1.4 导行电磁波的一般特性·····	(6)
§ 1.5 矩形金属波导·····	(11)
§ 1.6 介质片状波导·····	(14)
§ 1.7 LSM模和LSE模·····	(20)
§ 1.8 部分填充介质的矩形金属波导·····	(22)
§ 1.9 H波导·····	(26)

第二章 微带线

§ 2.1 引言·····	(31)
§ 2.2 傅里叶变换·····	(32)
§ 2.3 开式微带线·····	(35)
§ 2.4 屏蔽微带线·····	(44)
* § 2.5 希尔伯特变换·····	(49)
* § 2.6 奇异积分方程法应用 实例一——屏蔽微带线·····	(54)
* § 2.7 奇异积分方程法应用实例二——屏蔽耦合微带线·····	(63)

第三章 槽线、共面线和鳍线

§ 3.1 引言·····	(81)
§ 3.2 谱域中的等效传输线法·····	(82)
§ 3.3 槽线·····	(88)
§ 3.4 共面线·····	(96)
* § 3.5 用横向谐振法分析槽线·····	(99)
§ 3.6 鳍线·····	(113)
* § 3.7 鳍线的等值矩形波导·····	(131)

第四章 介质波导(I)

§ 4.1 引言·····	(143)
§ 4.2 矩形介质波导·····	(145)
§ 4.3 矩形介质镜象波导·····	(150)
§ 4.4 介质镜象波导的损耗·····	(164)
§ 4.5 矩形隔离介质波导·····	(171)
§ 4.6 倒置条带介质波导·····	(179)
* § 4.7 屏蔽矩形介质波导·····	(185)

• 第五章 介质波导(Ⅱ)

§ 5.1	引言	(197)
§ 5.2	表面波的坐标转换	(197)
§ 5.3	在介质波导阶梯不连续处的散射问题	(204)
§ 5.4	介质波导的等效网络分析法	(212)
§ 5.5	介质波导的泄漏和谐振效应	(216)
§ 5.6	应用实例	(218)
§ 5.7	亚毫米波介质波导	(223)

第一章 理论基础

§ 1.1 引言

作为了解本书各章内容的开始本章介绍传输线和导行电磁波的理论基础。

传输线和导行电磁波的理论已经在许多专门的教材和著作中论述^[1~6],读者对其已有一定程度的了解,这里仅对传输线和导行电磁波的基本概念和分析方法作一概括性的介绍。本章首先回顾传输线理论和各类电磁波的特性,以及描述这些特性的传播常数、波阻抗等参量。接着介绍金属波导,部份填充介质的金属波导和介质片状波导。它们是金属柱面波导和介质表面波导的实例,也是分析各种平面、介质集成电路的基本模型。在分析方法上采用模式匹配法对它们进行了分析,模式匹配法是本书各章的基本分析方法,虽然分析许多复杂边界的毫米波传输线还有更为简便和实用的方法(这些方法将在各章中分别介绍),但“模式匹配”仍是最基本的、十分重要的概念。此外,还应用横向谐振法推导了特征方程。“模式匹配”和“横向谐振”的概念和方法在第五章还要进一步推广和深入讨论。本章最后讨论“H”波导,H波导是兼有金属柱面导波和介质表面导波特点的一种导行系统,也是一种实用的毫米波传输线。

§ 1.2 传输线

传输线是指线上电压和电流是时间 t 和空间 z 的函数的电磁信号或功率传送线。对于电压、电流随时间作正弦变化的情况,则复数电压和复数电流只是空间位置的函数。沿线的分布参数(R 、 L 、 C 和 G)均为常数的传输线称为均匀传输线。传输线上单位长度的电压变化等于其上串联阻抗的电压降,传输线上单位长度的电流变化等于单位长度并联导纳的分流。因此得到

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dz} &= -ZI \\ \frac{dI}{dz} &= -YV\end{aligned}\quad (1.2.1)$$

式中

$Z = R + j\omega L$ 线上单位长度的串联阻抗

$Y = G + j\omega C$ 线上单位长度的并联导纳

式(1.2.1)是描述传输线上的电压、电流以及它们之间相互关系的微分方程,称为均匀传输线方程。将式(1.2.1)对 z 再微分一次得到

$$\frac{d^2V}{dz^2} - ZYV = 0$$