

高等学校教材

毫米波技术与器件

张国兴 杨鸿生

东南大学出版社



毫米波技术与器件

张国兴 杨鸿生

东南大学出版社

内 容 简 介

本教材较全面地介绍了毫米波与准光技术、毫米波源的基本理论和基本分析方法。教材共分七章，前三章介绍毫米波介质波导、鳍线及其元器件，并简要地说明了沟槽型波导，H波导和肋波导的传输特性和设计考虑。第四章的准光技术描述了高斯波束和其在波束波导内的传输特性，并较详细地分析了准光腔、双束相干器和分束器等准光元件。后三章描述了有发展前景的毫米波源，着重探讨了回旋管的色散方程，起振电流和频率偏移，光泵激射器的基本原理和毫米波雪崩器件及耿氏器件，这将使读者对其工作原理有深刻的理解。

本教材可供电子物理与器件专业研究生使用，学时数建议为60，技术与器件的比例是2:1。作适当取舍后，也可供本科生选修课使用。

毫 米 波 技 术 与 器 件

张国兴 杨鸿生

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 涟水印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张19.75 字数480千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数：1—1,500册

ISBN 7-81023-381-5

TN·36

定价：5.00元

责任编辑 雷家煜

责任校对 陈 跃

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、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践，师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断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

本教材系按机电委的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子物理与器件教材编审委员会,电子物理与器件编审小组征稿,推荐出版。责任编委是中国电子科技大学张兆镗教授。

本教材由东南大学编写,张兆镗担任主审。

该课程的参考学时数为60学时,其主要内容包括两个方面。首先介绍介质波导、鳍线、沟槽线、肋波导等毫米波传输线的传输特性及其元器件的工作原理和设计方法,其中突出解决电磁问题的分析方法,并阐述实际元器件的当前发展水平。同时,分章讨论了毫米波与亚毫米波的准光技术,不仅定性而且定量地论述了高斯波束的传输特性及准光腔、分束器等准光元件。另一方面的论述是毫米波源,主要介绍回旋管、光泵激光器 and 毫米波固态源。书中以较多的篇幅讨论了回旋管的基本原理和工作特性;对光泵激光器的基本概念和工作特性亦作了较详细的描述;最后扼要地论述了毫米波雪崩器件及耿氏器件。

本教材由东南大学电子工程系张国兴编写绪论和前四章,东南大学电子工程系杨鸿生编写后三章,张国兴统编全稿。作者对陆钟祚教授的鼓励与指导,张兆镗教授的不少宝贵意见,以及杨祥林教授、徐淦卿教授和张明德副教授的热情帮助,均表诚挚的感谢。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。根据教学需要教材中引用了参考书和文献上的材料及图表,特在此向有关作者致谢。

编 者

1989年9月

目 录

绪论	(1)
第一章 介质波导及元器件	(7)
§ 1.1 引 言	(7)
§ 1.2 介质平板波导	(9)
§ 1.3 矩形介质波导和镜象线	(15)
§ 1.4 镜象线的损耗和实测特性	(22)
§ 1.5 绝缘镜象线	(27)
§ 1.6 定向耦合器与频道选择器	(32)
§ 1.7 介质波导转接器、检波器和混频器	(38)
§ 1.8 介质波导的弯曲和漏波天线	(47)
习题一	(55)
参考文献	(57)
第二章 鳍线与E平面电路	(59)
§ 2.1 引 言	(59)
§ 2.2 鳍线的本征方程和特性阻抗	(61)
§ 2.3 谱域导纳阻抗法及其推广应用	(77)
§ 2.4 鳍线定向耦合器和滤波器	(92)
§ 2.5 鳍线的控制电路、检波器和调制器	(100)
§ 2.6 鳍线振荡器、隔离器和环流器	(107)
习题二	(115)
参考文献	(117)
第三章 沟槽线、H波导和肋波导	(118)
§ 3.1 引 言	(118)
§ 3.2 沟槽型波导	(118)
§ 3.3 H波导	(129)
§ 3.4 介质肋波导	(140)
习题三	(147)
参考文献	(148)
第四章 准光技术基础	(149)
§ 4.1 引 言	(149)
§ 4.2 高斯波束的传输模式	(151)
§ 4.3 高斯波束的转换与传输	(159)

§ 4.4 准光谐振腔与模式匹配	(170)
§ 4.5 双束相干双信号通道器	(176)
§ 4.6 波束分离器	(183)
习题四	(190)
参考文献	(191)
第五章 回旋管	(192)
§ 5.1 引 言	(192)
§ 5.2 回旋管的开放式谐振腔	(194)
§ 5.3 回旋管中的电子运动与群聚	(198)
§ 5.4 伏拉索夫方程及其线性化	(203)
§ 5.5 回旋管的色散方程	(207)
§ 5.6 回旋管的起振电流与频率偏移	(218)
§ 5.7 回旋单腔管的设计考虑	(229)
习题五	(240)
参考文献	(240)
第六章 光泵亚毫米波激射器原理	(242)
§ 6.1 引 言	(242)
§ 6.2 分子量子能级、分子的旋转和振动光谱	(242)
§ 6.3 光学谐振腔	(249)
§ 6.4 辐射与物质的相互作用	(266)
§ 6.5 激光振荡	(272)
§ 6.6 光泵亚毫米波激射器	(279)
习题六	(285)
参考文献	(285)
第七章 固态器件	(287)
§ 7.1 引 言	(287)
§ 7.2 IMPATT器件	(287)
§ 7.3 用作连续波振荡器的IMPATT二极管设计考虑	(294)
§ 7.4 耿氏效应器件——GaAs二极管	(298)
§ 7.5 大信号偶极畴分析	(302)
§ 7.6 电流(速度)——场特性	(303)
§ 7.7 耿氏器件设计考虑和热分析	(305)
习题七	(308)
参考文献	(309)

绪 论

随着科学技术的迅速发展，高功率电子管技术已使得频率为300GHz，连续波功率超过1千瓦的毫米波源成为可能；现有的返波振荡器件几乎能复盖毫米波和短毫米波的整个频谱范围；噪声低，体积小重量轻的毫米波固态器件可为整机提供有效的本振信号源；它们为毫米波的发展创造了重要条件。毫米波本身固有的优点使其在整机应用上占有特殊的位置，其主要应用领域，如弹头制导等，又不断地向毫米波技术提出新的要求，并给予毫米波技术极大的推动，促进毫米波源，元器件和天线有更大的发展，并日趋完善。

毫米波在电磁频谱上的位置可见图1。毫米波的频率范围一般取在30~300GHz。1979年，IEEE规定40~300GHz为名义上的频率范围，27~40GHz划归为K_a频段。通常，术语“短毫米波”或“近毫米波”是指100~1000GHz，而“亚毫米波”对应的是150~3000GHz。

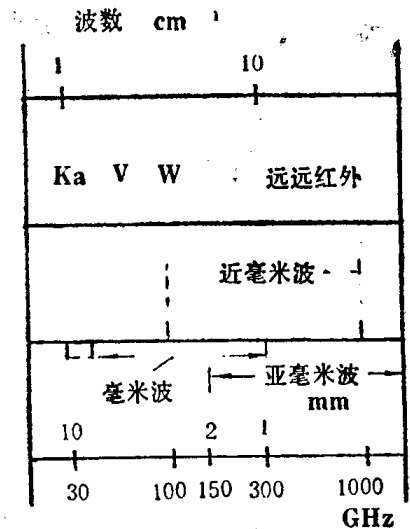


图1 毫米波在电磁频谱上的位置

一、毫米波的大气传输特性

毫米波应用的首要考虑因素是它在大气中的传输效应。图2示出了水平面和水平面上

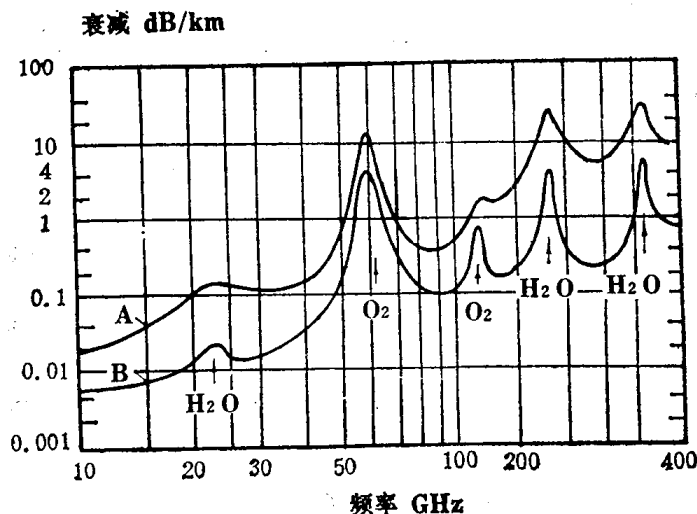


图2 毫米波的大气吸收特性

A: 水平面 B: 水平面上4公里

4公里处大气衰减实测特性。大气中氧气、水蒸汽的成份在毫米波的某些频率上形成吸收峰值,峰值间的低谷称为大气窗口,如35, 94, 140和200GHz为窗口,60GHz为峰值吸收频率。人们可以利用60GHz进行卫星与卫星,舰队中船只的保密通信。恶劣的天气对毫米波的大气传输有一定的影响。例如,能见度为100米或小于100米的雾对大气衰减有较大的影响。云的影响程度决定于云中的含水量。在短距离传输时,可忽略云的衰减量。冰的介电常数较低,冰雹的出现仅在传输特性上略有变化,不同气候下的衰减特性说明于表0.1中。大气所在位置的湿度与温度变化构成大气湍流,它形成毫米波传输的振幅调制和到达相位的偏离。晴朗天气的振幅调制可达几分贝,但它是慢变化的,可用自动增益控制补偿,而到达相

表0.1 不同气象下毫米波的衰减特性

大 气 情 况	单 向 损 耗 （分贝/公里）	
	35 GHz	94 GHz
晴 朗 天 气	0.12	0.4
雨 天 降 雨 量 0.25毫米/小时 1.0 4.0 16.0	0.07	0.17
	0.24	0.95
	1.0	3.0
	4.0	7.4
云: 下 雨 云 晴 天 云	5.14	35.04
	0.50	3.78
雾: 薄 雾 (0.01克/米 ³)	0.006	0.035
厚 雾 (0.1克/米 ³)	0.06	0.35
浓 雾 (1克/米 ³)	0.6	3.5
雪	0.007	0.0028

位的偏离是个较难克服的实际问题,大气中烟和尘土的影响正在进行实测。总之,100GHz以内的电磁波大气传输已得到较好的实验研究,从而有较精确和可靠的数据提供整机设计者参考。100GHz以上的研究工作尚在不断进行之中。

二、毫米波功率源和元器件的目前水平

为了扩大毫米波的应用,人们的注意力集中在发展更好的毫米波功率源、元器件与天线上。毫米波源的工作频率上限、功率输出不断地提高。显示接收水平的噪声温度可低于500K(未冷却),100K(冷却)。新型毫米波传输线,如介质波导、鳍线、H波导的出现,使毫米波元部件不再仅局限于传统的金属波导,并有利于形成集成电路和整机小型化,充分发挥毫米波的固有优点。

到20世纪80年代初,功率源的发展情况反映在表0.2中。近年来,自由电子激光器和毫米波固态器件受到较大的重视。自由电子激光器是以自由电子为工作物质,利用电磁波或周期性

表0.2 目前毫米波源的发展水平

器 件 类 型	工 作 频 率 范 围 (GHz)	功 率 输 出		效 率	特 点
		脉 冲	连 续 波		
雪 崩 器 件	3~230	13 W (94GHz) 40 W (4 管94GHz) 3 W (140GHz)	500m W (40GHz) 10m W (230GHz) > 1 W (四管)	5%	较高功率, 可靠性好, 用于发射机
耿 氏 器 件	~100		200m W (40GHz) 20m W (100GHz) 45m W (75GHz)	3% <1% 35%	用于中 小 功率, 噪声低, 模式好
分 布 作 振 荡 器	30~280	5k W (35GHz) 4W (280GHz)	百瓦 (26~40GHz) 十瓦 (100GHz) >10W (140GHz)		寿命长, 功率高, 频带不宽
磁 控 管	~140	125k W (35GHz) 10k W (70GHz) 1~6k W (95GHz) 1k W (140GHz)		10%	寿命短, 功率高
返 波 管	~1300		10~100m W (<300GHz) 10m W (325~390GHz)		宽带调谐
回 旋 管	~300	兆瓦级	几十~几百千瓦	30%	大电源, 大磁场, 模式复杂
行 波 管	30~100	1 k W (94GHz)	250 W (44GHz) 5 W (160GHz)		高功率, 高增益, 宽带

静态磁场作为泵源, 高速自由电子与强磁场作用产生横向振动, 并在泵源的作用下引起散射, 受激辐射出波长为数毫米到几微米的电磁波, 这方面工作正在努力进行之中。两类毫米波固态器件颇有发展前景, 它们是高电子迁移率晶体管 (HEMT管) 和可渗基晶体管 (PBT管)。前者作为毫米波低噪声放大器件, 其噪声系数在 62GHz 为 2.5dB, 截止频率是 170GHz, 输出功率密度 0.41W/mm, 最大效率 14%。目前又发展了假晶式 HEMT 管, 截止工作频率可达 230GHz, 效率为 28%, PBT 管可发展成为毫米波功率器件。经测试表明, 它在 41.5GHz 有 11dB 的稳定增益。最近的工作集中于研制 40GHz 频段内的多级宽频带放大器。

在元器件方面, 标准矩形金属波导元件已复盖到 220GHz, 如定向耦合器、T 型接头,

阻抗调配器、混合环等。直接读数的精密衰减器，波长计等工作到110GHz，用校准曲线的可到220GHz。在频率高端，元件的插入损耗较高。铁氧体隔离器、开关、环流器和相移器仅工作到140GHz，隔离度为15~20dB。铁氧体材料和尺寸在毫米波频率高端有许多限制，有待进一步的研究。

金属波导及其元件在毫米波段有大的损耗，不适合与半导体器件形成混合集成电路，促使研究者对微带线、鳍线、镜象波导，H波导，沟槽型波导，以及准光传输和准光元件开展十分广泛、深入的研究。微带线在毫米波可工作到140GHz，但其基片薄，对其公差有严格的要求而且窄的微带与微波，毫米波晶体管焊接困难，促使研究者把注意力集中于鳍线。目前，几乎所有的电路元件都可用鳍线制造，一块集成电路版上包含整个发送接收高频前端。印刷制板的尺寸限制和金属导电板的欧姆损耗使鳍线的工作频率受到限制。学者们仿效集成光学，形成介质波导毫米波集成电路，其电路横向尺寸可比金属体传输线大。介质波导引入介质损耗与开结构辐射损耗。半导体器件置入介质波导，将会发生十分复杂的电磁波相互作用过程。在介质波导集成电路中还存在不连续效应，介质波导弯曲、不规则等引起辐射损耗，因而它的成功将取决于正确理解这些现象和有效地抑制其辐射损耗。

三、毫米波的整机应用

弹头制导，雷达，辐射计，遥感，射电天文，通信，电子对抗与生物效应是毫米波应用的几个主要方面。下述例子概括了当前毫米波技术的实际应用水平和毫米波的重要性。

毫米波末制导与搜索是毫米波应用的重要领域，它和国防密切相关，其研究工作是保密的。图3示出了末制导搜索器的工作原理。搜索工作一般分以下几个阶段：1. 弹头的运载工具把弹头送到适当的范围与所控制的高度。2. 在一定高度处打开搜索器，并以图3所示方式，扫描地搜索地面目标，如图中的坦克。3. 经过一段时间的搜索，发现打击目标。4. 跟踪目标和瞄准，最后使弹头击中目标。搜索器可以利用激光束、微波和电视系统，但它们在恶劣的气候与战场烟、灰尘环境下，工作并不理想；晚上搜索亦存在困难。毫米波搜索器可克服上述困难，尺寸小重量轻，并在35，94，140，220GHz的传输窗口分别

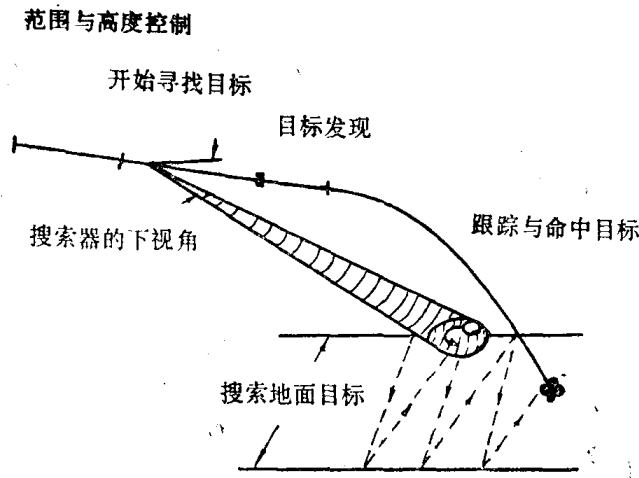


图3 末制导搜索器的简单工作原理

有16, 23, 26, 70GHz的窗口频宽, 宽带的应用使几个搜索器同时工作而互不干扰。敌方未知准确频率下难于进行电子对抗。此外毫米波的小尺寸天线, 较小的辐射束宽, 从而有高的分辨率, 天线付瓣返回的损耗与噪声也得到下降。窄的辐射束宽使敌方阻塞性干扰遇到困难。图 4 上示出了各种频率下电磁波的吸收特性, 毫米波比光, 红外有较好的大气穿透能

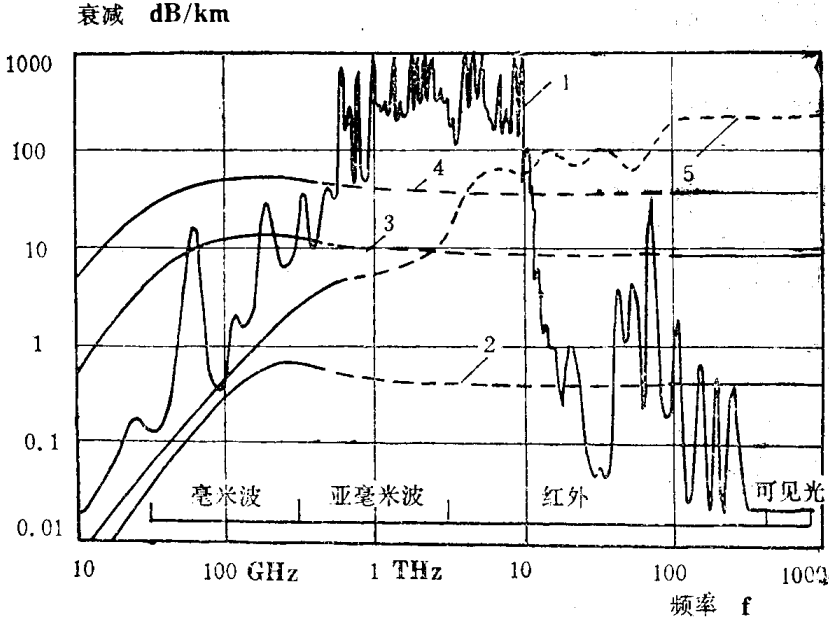


图4 波长由30mm至0.3μm的大气吸收特性

1.晴朗天气 2.蒙蒙雨(0.25mm/hr) 3.大雨(25mm/hr) 4.暴雨150mm/hr) 5.雾(0.1g/m³)

力。表0.3列出了三种不同频率搜索器的特性比较。由此看出, 毫米波搜索器具有综合优势, 是末制导的理想频段。

毫米波雷达有四种。警戒和目标的发现与捕获; 仪器与测量; 搜索器与末端弹头制导以及火力发射与跟踪。

表0.3 三个频谱区内搜索器工作的优劣比较

雷达/辐射计的能力	微 波	毫 米 波	光
	3~30GHz	30~300GHz	0.4~14μm
搜索度	好	好	差
保密性	差	中	好
跟踪精度	差	中	好
恶劣气候特性	好	中	差
烟、尘特性	好	好	差
隐蔽与掩护能力	差	好	好
白天/夜晚特性	好	好	中

坦克上火力发射控制雷达的整机特性是：工作频率94GHz，波束宽度11毫弧度，平均功率为0.1~0.5W，天线张角（方向图宽度）14吋，视野为：宽 $15^{\circ} \times 7.5^{\circ}$ ，窄 $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，帧象周期小于2秒。目标发现范围是3公里（能见度100米），目标跟踪：2公里以上0.5毫弧度。该雷达有窄的波束宽度和高的分辨率，因而可定向或控制防空武器对付低空飞机与直升飞机。

毫米波通信包括陆地通信与卫星通信两大类。至今成功的实用通信系统是35GHz的铁路通信与毫米波通信望远镜。望远镜的一半仍为光学望远镜，另一半装有毫米波发送、接收设备，工作频率为70GHz，使用介质波导毫米波混合集成电路。声音的传送范围在晴天达7公里，小雨中3公里，能源由电池供应，可连续工作9小时。整机成本低，符合民用要求。美国林肯实验卫星（LES8和LES9）之间通信用毫米波固态雪崩管，输出功率0.5W，卫星间距4万公里，工作码率为100千比特。

毫米波在射电天文方面的应用受到物理学界的重视。射电天文的工作开创了星际云分子波谱学学科。通过对来自宇宙空间的微波，毫米波的测量工作，建立了新的理论，形成全新的研究领域。

毫米波的应用大部分集中于军用和高科技领域，不断开拓毫米波在民用上的技术与产品是今后发展毫米波的重要方向。

第一章 介质波导及元器件

§ 1.1 引言

介质镜象波导的研究工作始于20世纪50年代。50年代末曾探索过毫米波介质波导。60年代开始发展的光纤传输技术在理论与实际应用上取得了飞速的进展，它推动了毫米波介质波导的研究工作，自70年代至今已取得了很大的成绩。

在毫米波的高频端，传统的矩形金属波导因公差要求严，损耗大而难于满足实际使用的要求。高频率毫米波与电磁频谱的红外、可见光区邻接，可以利用介质交界面的全反射特性，构成了与光纤相似的介质波导。

光传输线有矩形、平板形、圆截面形和空心截面形的传输结构，如图1.1所示。毫米波介质波导的各种传输结构示于图1.2，它们是平板介质波导与矩形介质波导的组合，并引入隔离性金属板，毫米波在介电常数最大的平板和矩形介质杆内传输。

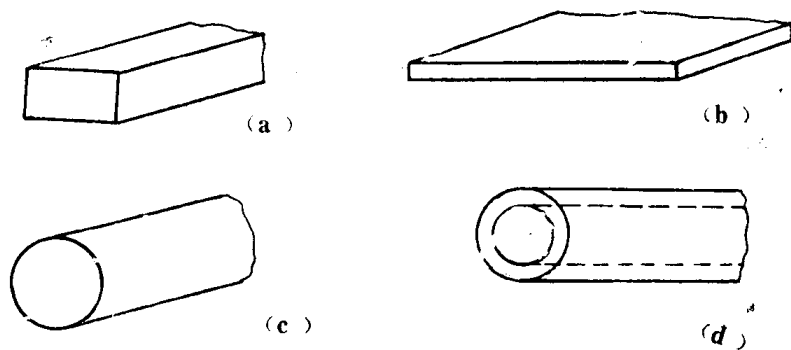


图1.1 光传输线

(a) 矩形介质传输线 (b) 平板介质传输线 (c) 光纤 (d) 空心管传输线

置理想金属平板于矩形介质波导的对称面上，由镜象原理，可仅取半个矩形介质波导，其波的传输特性不变。金属平板似同镜面，故称镜象线。金属面引入将产生欧姆损耗，但有利于介质波导元件的平面集成和模式抑制。此外混合集成中的半导体器件利用金属散热和固定偏压引线。

镜象波导的高频集肤损耗随频率提高出现较大的增加。在镜象波导的介质条与金属平面间设置隔离性的薄衬底，形成图1.2(c)结构的绝缘镜象波导。该结构同时消除了镜象线内连结金属板和介质条的粘剂损耗。

图1.2(d)示出了加条平板介质波导。电磁波在介电常数为 ϵ_2 的平板中传输， ϵ_1 的介质条加载，确保场集中在条的位置，介电常数为 ϵ_2 的衬底将降低传输场的高频集肤损

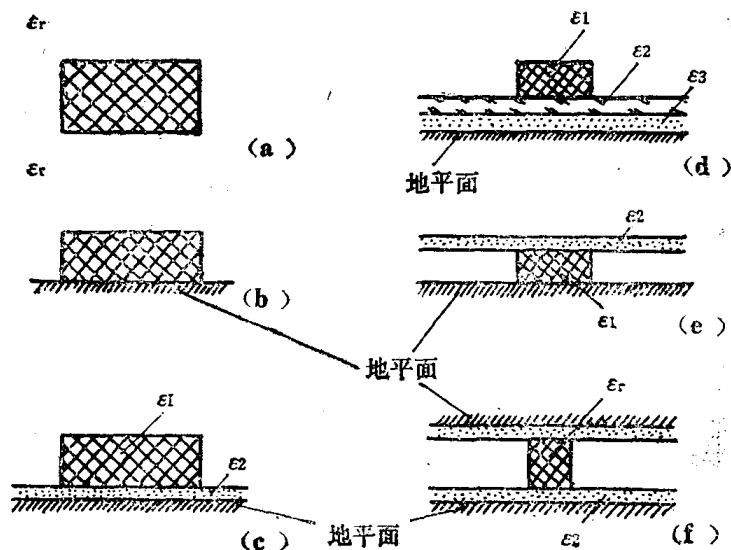


图1.2 介质波导

(a) 矩形介质波导 (b) 镜象线 (c) 绝缘镜象线 (d) 加条平板介质波导
(e) 倒置加条平板介质波导 (f) 无辐射型介质条波导

耗。在上述传输结构里,介电常数应满足 $\epsilon_2 > \epsilon_1$, $\epsilon_2 > \epsilon_3$ 。图1.2(e)是倒置加条平板介质波导,其工作原理与加条平板介质波导一样,仅取其倒置形式而省去衬底。用双金属平面构成非辐射型介质波导,如图1.2(f)所示,它亦有许多优点,并构成各类元件。

为了明白各种形式介质波导的传输性质,必须详细地对介质平板、矩形介质波导进行场分析和物理概念说明,从而可以深切理解介质波导中常用参量、色散特性,辐射性质和传输模式。同时,它对进一步理解复杂的波导结构是十分有益的。

介质波导中传输的电磁波在介质界面处形成束缚电荷,而束缚电荷在介质外形成消失场,它依附于介质内传输波共同沿轴传输。在介质波导呈现弯曲时,消失场部分能量转换成辐射场,引起辐射损耗。平板介质波导、加条、倒置加条平板在弯曲时引起的辐射损耗比矩形介质波导、镜象线大,故称前者为弱传输结构。

此外,H形波导和介质肋波导亦属于本章的范围。考虑到H波导、沟槽型波导和介质肋波导可能成为100GHz以上以及亚毫米波的传输结构,我们另立一章予以较详细的讨论。

毫米波介质波导的研究工作与集成光学中光介质传输线的研究紧密有关,但它们有如下的区别。

光集成的矩形介质波导埋在介电常数略低的衬底里,这导致单模工作的横向尺寸可以是其自由空间波长的几倍。光的自由空间波长为几微米,传输单模光纤的直径只有几微米至几十微米才有实际制造的可能。毫米波介质波导放在空气里,介质本身的介电常数较低,其横向尺寸约是自由空间波长的一半。

金属对光频是损耗材料,光集成传输线内避免使用金属。毫米波介质波导可隔离性地引入金属,以保证电路混合集成。

光波导用玻璃、塑料型薄膜、砷化镓半导体或铌酸锂晶体为原材料。制造方法有二种,在玻璃和塑料上涂敷一层折射率不同的玻璃和塑料,涂敷的方式可取蒸散,溅射和外

延。另一种方法是离子注入法。当介质材料受离子束轰击后，材料折射率在一定深度内改变为一定的数值，没有受到轰击部分成为衬底，轰击部分的折射率提高，形成平板介质波导。调节离子束的能量和注入深度，可得到不同折射率、不同厚度的平板介质波导，采用光刻和腐蚀的方法可以使平板介质成为带状和矩形介质波导，并用来制造控制光波传输的元件。

毫米波介质波导可选用的材料有：高纯度氧化铝、氮化硼、氧化铍、硅和砷化镓等。亦可采用聚苯乙烯与聚四氟乙烯。工作频率低时，对介质波导的要求可降底，因而采用简单的铣床

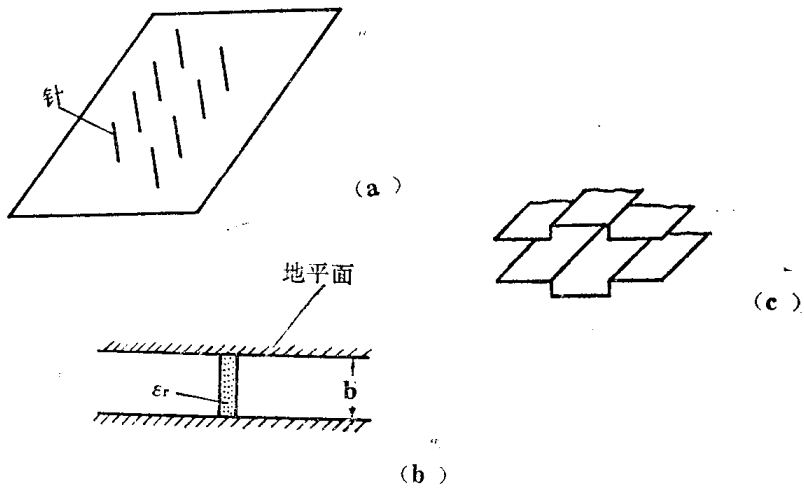


图1.3 (a)栅栏式金属波导
(b)H型波导
(c)沟槽形波导

加工。然而，对精确的尺寸和复杂的结构形状，如3dB介质定向耦合器，常常采用浇注方法。此外，还采用激光切割法使介质原材料达到介质波导所需的尺寸。随着对介质波导的广泛深入的研究，新工艺、新材料将不断涌现。

实用性介质波导元器件已相继出现，对实际有指导意义的理论性研究工作已大体完成。实用化的研究工作集中在100GHz频率以内。毫米波固态器件至今尚是集中元件型的，它与介质波导元件混合集成中会产生比较麻烦的界面区配、辐射损耗等问题。所以，开发适合于介质波导集成技术的新器件是发展毫米波整机的关键。

图1.3所示的几种毫米波传输线，将在后面几章讨论。

§ 1.2 介质平板波导

介质平板波导是介质波导中最简单的形式。本节首先以直观的方式，定性和定量地讨论其传输性质，并从平面波的几何光学原理推导出平板介质波导的本征方程。随后由电磁场方程求解平板介质内传输的各场分量，匹配边界条件，得到相同的本征方程。由此，清楚地说明了一些基本概念和基本参量，完成了平板介质波导内传输特性的全貌性描述。

镜象波导可以等效地看成是矩形介质波导，矩形介质波导不可能有精确的解析场解。近

似的场分析表明，矩形介质波导的二个横向传输常数可以用两个不同模式下的平板介质波导的横向传输常数来近似地代替。如果引入有效介电常数方法，可以较精确地决定矩形介质波导的本征方程。许多介质波导是由介质平板和介质矩形条所组成，它们的传输常数几乎都和平板介质波导有关。全面地、形象地理解平板介质波导，对理解所有介质波导有相当重要的意义。

一、几何光学分析法

介质平板波导（dielectric slab waveguide）有对称和非对称型的两种结构形式，如图1.4（a），（b）所示，图1.4（c）示出了平面电磁波在厚度为d的平板介质波导内的传输

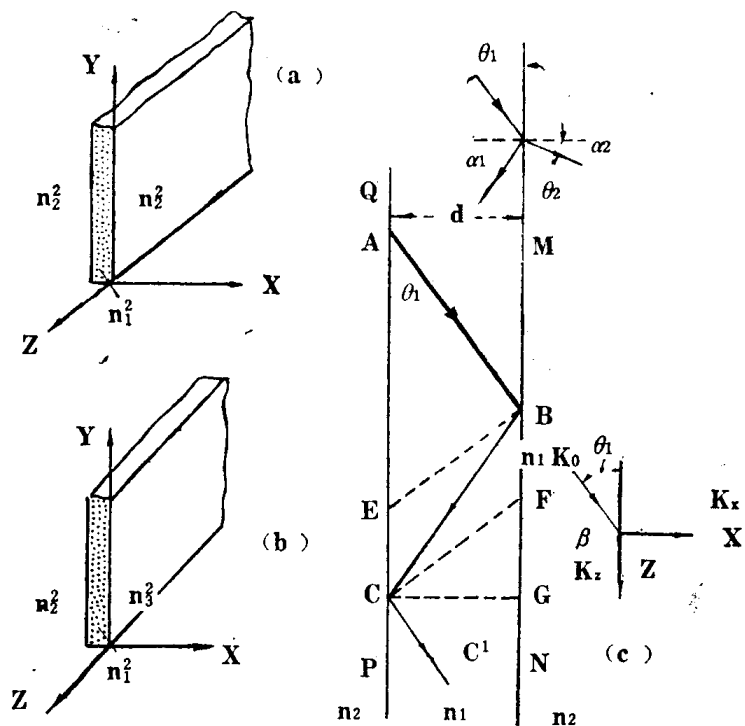


图1.4 (a) 对称型平板介质波导
(b) 非对称型平板介质波导
(c) 平面电磁波在平板介质内的传输

情况。

负z轴、无限远处的平面波波源，经过界面MN和QP的多次界面全反射，形成如图1.4（c）所示的波矢量 $\vec{AB}$ 。为了确保全反射，波矢量的投射角 θ_1 应小于临界角 θ_{1c} 。在图1.4（c）对称型平板内，则

$$\theta_1 \leq \theta_{1c}, \quad \theta_{1c} = \arccos \frac{n_2}{n_1} \tag{1-1}$$

n_1 和 n_2 为所标区域介质的折射率。介质平板在y方向无限伸展，该方向的传输常数 $k_y = 0$ ，其余方向的传输常数分别为

$$\left. \begin{aligned} k_x &= n_1 k_0 \sin \theta_1 \\ k_z &= \beta = n_1 k_0 \cos \theta_1 \end{aligned} \right\} \tag{1-2}$$