

# 毫米波技术

顾瑞龙  
(上海交通大学)

毫米波是波长为1—10mm(相应的频率为300—30GHz)之间的电磁波。无线电波谱中的长波、中波、短波、超短波、分米波、厘米波の利用已非常普遍,在技术上也已成熟;光波中的红外线、可见光、紫外线、X射线和 $\gamma$ 射线也已有了许多成熟的应用。但在电磁波谱中的毫米波至今尚没有充分利用,而亚毫米波尚处于开发阶段。虽然早在1895年,莱贝杜(Lebedew)曾利用火花隙发生器产生了毫米波,但这远不是一个可以实际应用的器件。直到第二次世界大战期间才由美国首先制造成了可以利用的毫米波电真空器件——毫米波速调管。五十年代中期和后期,许多国家对毫米波的军事应用曾抱有希望,但由于当时的生产工艺和材料等还不过关,毫米波发生器功率很小,成本很高而寿命却非常短,再加上毫米波接收机的灵敏度非常低,传输元件的加工又非常困难,因而实际应用很少。六十年代初期,激光的问世给无线电电子学增添了活力,人们的注意力被激光所吸引,因而生产、科研工作都围绕着激光技术展开,毫米波技术的发展受到了影响。

近十几年来,由于材料、精密加工等生产工艺以及毫米波的产生、传输、接收等有关技术有较大的进步,加上目前的光电设备的某些局限性,因而突出了利用毫米波技术的一些优点。发展、利用毫米波技术又重新引起国内外学者的重视和兴趣。下面从毫米波的特点、毫米波的产生、毫米波的传输以及毫米波的接收等四个方面作介绍。

物理

## 一、毫米波的特点

毫米波与分米波、厘米波一样,同属于电磁波谱中的微波波段,它们都是定向传输的电磁波。但与目前已经用于卫星、雷达、通信以及导弹核武器系统中的厘米波段和分米波段设备相比,毫米波设备有以下四个明显的优点:(1)测量目标的精度高、分辨目标的能力强;(2)传输的信息容量大;(3)天线相对尺寸小,相应的方向性好;(4)毫米波穿透等离子体的能力强。另一方面与分米波或厘米波相比,在大气中传播时,毫米波会受到氧气和水蒸汽的强烈吸收,电磁波能量衰减较大,毫米波在大气中的衰减特性见图1。由图1可见,在波长 $\lambda$ 为13.5mm、5mm、2.5mm和1.7mm时衰减非常大,上述衰减曲线的波谷部分是毫米波传播衰减较小的区域,也就是通常所说的毫米波段的大气窗口。

除了固有的氧气、水蒸汽的吸收衰减外,大

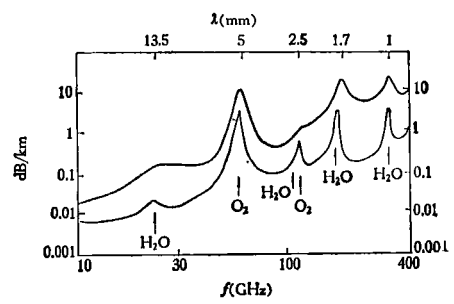


图1 毫米波的大气衰减  
(上面曲线为4km高度,下面为海平面高度)

气层中的降雨、下雪、雾、冰雹等气象因素也会引起毫米波的衰减,研究表明,在频率低于 100 GHz 的毫米波段降雨所引起的衰减比下雪、雾、冰雹等一般要大得多,因而,通常研究毫米波传播受雨、雪、雾、冰雹等沉积物影响时主要研究降雨所引起的衰减。毫米波在大气中传播衰减较大的特点,特别是在以上提到的四个衰减峰值的波段,对于军用保密通信是非常有利的。而对于应有较大作用距离的雷达、远程通信而言,无疑是个非常大的缺陷。选用处于大气窗口的毫米波段时其衰减仍然比厘米波段和分米波段的衰减大得多,因而要求增大发射机的功率和提高接收机的灵敏度,才能达到增大作用距离的目的。

电磁波谱中与毫米波高频端相毗邻的波段是远红外和红外区,目前,部分激光设备的频谱就处在这个波段。在分辨能力、信息容量、方向性和穿透等离子体能力方面,毫米波设备肯定不如红外设备;但是在雨、雪、雾、冰雹等气象因素下毫米波传播的衰减要比红外小得多。红外设备一般在这些气象条件下都不能正常工作;毫米波设备虽然作用距离因这些气象因素而受到影响,但通常仍能正常工作,因而毫米波设备具有红外设备所不具备的全天候能力。况且红外接收方面还存在一些尚待解决的问题,无疑,毫米波技术特别在军事应用方面具有极为重要的应用前景。这也正是目前研究和发发展毫米波技术的一个重要原因。

## 二、毫米波的产生

从理论上说,产生毫米波的原理有:利用切伦科夫效应产生毫米波;利用相对论效应产生毫米波;利用量子电子学的方法产生毫米波;利用等离子体振荡产生毫米波。目前具有实际意义的还是从微波电真空器件、微波半导体器件工艺结构的改进来产生毫米波。近几年来利用相对论效应来产生毫米波的方法已取得可喜的成绩,已经造出了不少可供实际使用的毫米波器件。

### 1. 毫米波电真空功率器件

毫米波电真空功率器件的制造需要很高的精密机械加工技术,国外目前采用先进的冷挤压加工技术、精密研磨技术等,使得谐振腔的加工公差达到理想的精度。因而一批适合在毫米波段工作的电真空器件大量出现。目前,国外最高工作频率的电真空器件是法国和苏联的返波管,工作频率可达 1000 GHz。在亚毫米波段返波管的输出功率仅次于激光源,它有宽的调谐范围。最大脉冲输出功率器件是美国的反向同轴磁控管,在 35 GHz 时输出功率达 210kW。最大连续波输出功率器件是美国生产的行波管,在 55 GHz 时输出达 7.0 kW。

微波电真空器件谐振腔腔体尺寸是与工作频率对应的波长相一致的,波长愈短,腔体尺寸愈小。然而小的腔体承受大的功率是有困难的,为了要在毫米波段获得更大的功率,势必探索新的技术途径去摆脱腔体尺寸与波长的依赖关系。一段时期以来,已经取得了一些进展。

(1) 苏联学者提出的开放式谐振腔,用准光学设计原理产生毫米波,谐振器的尺寸是波长的几十倍,已经在 150 GHz 获得几百 mW 的输出功率。

(2) 加拿大等国学者提出用可调分布互作用振荡器扩大了腔体尺寸,已经在 30 GHz 获得 1000W 连续输出功率的器件。

### 2. 毫米波半导体功率器件

产生毫米波的半导体器件目前有两种:碰撞雪崩渡越时间二极管(Impatt)及体效应二极管。这两种器件均具有连续调谐能力、尺寸小、结构紧凑等特点。体效应二极管的输出功率没有 Impatt 二极管大,但是噪声小,频率稳定度高。目前,100GHz 以下具有 30 mW 以上输出功率的管子已成批生产。通常,为提高输出功率,可采取以下措施:(1)改进管子结构,由单漂移结构改为双漂移结构;(2)管芯并联,做成复合管;(3)管芯采用热沉工艺,增大散热速度;(4)进行多管功率合成。

为了提高毫米波发生器的频率稳定度,目前普遍采用稳频腔以及注入锁定的锁相回路。

### 3. 相对论效应器件

相对论效应器件是七十年代发展起来的一种非常有前途的器件。它具有传统量子器件和微波器件的主要优点。但另一方面它突破了它们各自的局限性，可以做成大功率、高效率的毫米波、亚毫米波器件。

(1) 回旋管 (Gyrottron)，它是通过在磁场中作强烈回旋运动的弱相对论电子流与高频场相互作用，利用电子回旋频率对其质量的相对论性依赖关系，使减速场中的电子回旋频率加大；加速场中的电子回旋频率减小，从而产生电子角向相位群聚，获得有效的相干受激辐射的器件。据报道：目前苏联已在毫米波段达到 200 kW 以上连续波功率、兆瓦级脉冲功率、50—70% 电子效率的水平。可望以后会有更大的功率、更高的频率突破。

(2) 用相对论强电子流产生大功率毫米波、亚毫米波，美国海军研究所报道利用相对论强电子流产生大功率毫米波、亚毫米波。在 750 GHz 时达到兆瓦级功率水平。

### 三、毫米波的传输与元件

目前使用的毫米波传输线的种类、型式非常多。矩形波导、圆波导等都是较老式的，技术上也较成熟的传输线。在制造加工时，由于其尺寸非常小精度要求高，因而成本非常昂贵。除了要求传输大功率容量而保证其传输质量及可靠性的部分以外，中、小功率都避免使用金属波导，而广泛使用表面波传输线。值得注意的是近十几年来重新发展起来的介质传输线。利用高电阻率的半导体材料氧化铝、硅、砷化镓等有可能实现有源集成。束波导的研究也是目前毫米波传输的一个分支，其它如微带线、H 波导、槽波导、螺旋波导等在毫米波段都有一定的应用。毫米波传输系统中通常必须考虑的几个问题是：衰减、阻抗、机械加工、结构、功率容量以及电压击穿等。

#### 1. 空心金属波导

按照目前的加工工艺水平，矩形波导、圆波

导在传输主模式时其最小加工尺寸所对应的频率为 325 GHz，但衰减大得惊人。例如：矩形波导传输主模式  $H_{10}$  波时，在 1 mm 波长时其衰减大于 50 dB/m。而且衰减随频率的提高而增长。 $H_{10}$  模式的圆波导固然具有随工作频率的增大衰减反而降低的特点，但由于  $H_{10}$  模式不是圆波导的主模，因而也存在着抑制其它模式的问题。在毫米波段更多的使用过模波导（多模传输），据报道：在波长为 0.8mm 和 0.65 mm 时，使用矩形过模波导的尺寸分别为  $7.2 \times 3.4 \text{ mm}^2$  和  $10 \times 22 \text{ mm}^2$ ，其衰减值分别为 1.4dB/m 和 1.6dB/m。这个值比单模波导的衰减小很多，但由于过模波导的尺寸变大，出现其它高阶模式。为抑制高阶模，可插入金属栅网或介质吸收片，然而存在插入物后衰减势必加大。因而利用过模传输时还应从耦合及激励的角度进行许多精心的设计。波导中衰减与频率的关系见图 2。

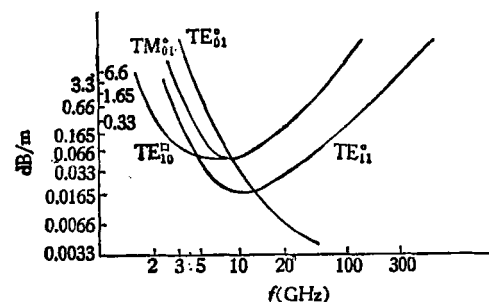


图 2 波导中的衰减

#### 2. 螺旋波导

螺旋波导示于图 3。有耗介质层吸收非传输的电磁能量，内层铜螺旋可以有效的抑制具有纵向电流的模式。此种波导在 50—120 GHz 范围内试验测得其衰减为 1.24—1.55dB/km。为

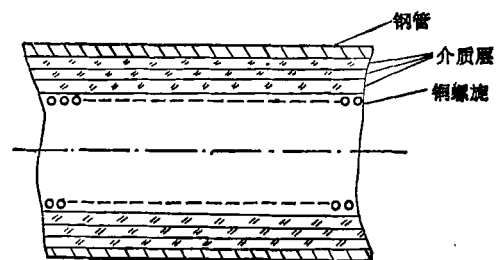


图 3 螺旋波导

了有效地传输电磁能量，它的分支半径应大于 1.6 km。这种波导在美国、日本、英国等已经广泛地用于通信方面。

### 3. 介质波导

介质波导是目前在毫米波领域（频率高于 20 GHz）最有吸引力的传输线。它在传输较低阶模式时不存在截止频率。在较低频率时，介质波导中的大部分能量在介质波导外层传输，而当频率较高时，能量集中在介质波导的内层传输。介质波导中传输的电磁波模式可以是 TE、TM 波，还有混合模 HE<sub>11</sub> 波。而 HE<sub>11</sub> 波最为引人注目。原因是它具有较低的衰减以及容易被激励的优点。实验指出：当介质波导的直径  $D$  与所选用的电磁波空间波长  $\lambda$  满足以下关系时 ( $D/\lambda > 0.626$ ) 可以存在 TE<sub>01</sub> 和 TM<sub>01</sub> 波。而当  $D/\lambda < 0.626$  时，HE<sub>11</sub> 仍能存在。介质波导的直径  $D$  与  $\lambda$  的比值在以上范围时，它的衰减低于 0.03 dB/m。这是一个较之其它大部分传输线优越的数据。介质波导的主要问题是设计支撑物以及转弯分支，因为它们都是造成辐射，增加衰减的主要难题。为了消除由于支撑物的附加辐射而采用介质镜象线。介质镜象线就是把介质圆波导沿其对称轴纵向剖开，然后置于导电金属板上，利用镜象原理与完整的介质圆波导一样。这种镜象线的衰减非常大，但由于其固定和连接方便、结构紧凑，通常在 300—3000GHz 频率范围用于集成电路中。

### 4. H 波导

H 波导是中间由介质板隔开的二条金属导电板组合成的，它由介质镜象线演变而来，实际上它是一种充满介质的无窄边的矩形波导。当介质的介电常数足够大时，大部分能量在介质中传输。H 波导中传输的模式为混合模，它具有比矩形波导小的衰减以及随着频率的增加衰减缓慢减小的特点。在传输方向有横向缝隙时对传输无影响，容易做成毫米波段的其它元件。与 H 波导相对应的是槽波导，槽波导的衰减也是较低的，且具有随频率的增加而衰减变小的特点。目前在毫米波段可做到 0.01 dB/m。H 波导与槽波导都是毫米波段集成电路的主要传

输线。

### 5. 束波导

束波导由一些平面镜和透镜组成。束波导的概念是把电磁能量由一处校正或聚焦到另一处。束波导的衰减主要考虑镜面的散射、反射、衍射衰减。如果电磁能量是在大气中校正或聚焦，那还应该考虑大气的附加衰减。这种传输机构在毫米波段已经建立起来，其衰减的数量级约为 1dB/km 左右。束波导的主要问题是透镜、平面镜的材料问题。分析束波导传输原理主要用准光学技术。

在毫米波段，究竟选用哪种传输线，完全由要求与可能来决定。

毫米波元件如天线、滤波器、衰减器、环形器、移相等近十几年来也相继出现，而且性能愈来愈好。毫米波天线，为了把制造公差变为解决直径和位置的问题，因而多数采用平面阵列形式。也有采用体积小、圆偏振、具有一定增益、带宽和阻抗的螺旋天线。目前铁氧体移相器也已做到 40GHz 以上。隔离器、衰减器等也有 40 GHz 以上的产品。但能耐受大功率的元件至今还较少。

## 四、毫米波接收

检测毫米波的装置称为检测器和辐射计。检测器利用的是相干接收系统，而辐射计用的是非相干系统。相干检测器系统通常用于通信系统、雷达系统、导航系统等等。这种系统中信号是由载波调制的，而检测器即是检测这些信号的强弱，检测器的响应速度通常都是很高的（不低于  $10^{-6}$ s）。非相干的辐射计接收系统是由积分器件接收信号，通常积分器件的时间常数大于  $10^{-3}$ s。

### 1. 毫米波检测器（包括毫米波辐射计）

毫米波检测器是在传统的微波检测器和红外检测器的基础上发展起来的。相应的有：二极管检测器、光子检测器和热检测器三种。二极管检测器用 Ge、Si、GaAs 等点接触二极管；肖特基势垒二极管；MOM 二极管以及约瑟夫

森结等构成。光子检测器有砷化镓光电导效应检测器和 InSb 检测器等。热检测器有高莱管 (Golag) 气动检测器、测辐射热器和热释电效应检测器等。

## 2. 毫米波混频器

目前都用肖特基势垒二极管作混频器的非线性器件。混频器的变频损耗来源有三个方面：一是混频管非线性势垒电阻引起的本征变频损耗；二是寄生元件引起的寄生变频损耗；三是混频器的欧姆损耗和失配损耗。有关计算表明：低于 1000GHz 时，肖特基势垒二极管低于 6dB 的变频损耗是可以实现的，加上 3 dB 的装置损耗，总的变频损耗约为 9 dB。其相应的等效噪声温度约为 2000K。这与非相干的光波接收机中的所谓量子噪声，其等效噪声温度最好约为  $5 \times 10^4$ K，相比提高了将近 25 倍。混频器的变频损耗还可用增加本振功率来降低。同样还可选用双平衡的结构来降低变频损耗。目前，GaAs 肖特基势垒二极管的零偏压截止频率已达到 1000GHz 以上。在 140GHz, 175 GHz 和 230 GHz 时双边带噪声系数分别为：3.8dB, 8.1

dB 和 12.6dB。近十几年来，产品多数做成集成电路形式。工作于更高频段的液氮冷却的 InSb 混频器和超导约瑟夫森结混频器也在迅速发展，目前已实现 640GHz 的混频。

## 3. 参量放大器

参量放大器是一种高灵敏度毫米波放大器，特别在冷却情况下具有很低的噪声系数。一段时期来，国内、外已研制成了不少性能优良的参量放大器。由于参量放大器要取得良好的放大效果，一定要采用冷却的方法，因而设备笨重，价钱昂贵。近年来，由于工艺与材料科学的进展，毫米波段场效应放大器也在飞速地发展。

## 参 考 文 献

- [1] F. A. Benson, Millimeter and Submillimeter Waves, Iliffe Books, London, 1969 年。
- [2] S. L. Johnston, Millimeter Wave Radar, Artech House, 1980 年。
- [3] W. V. McLevige et al., *IEEE Trans.*, MTT-23 (1975), 788—794.
- [4] S. Shindo et al., *IEEE Trans.*, MTT-26 (1978), 747—751.

---

## 中国物理学会举办“物理学在医学中应用”讲习班

为贯彻科学技术为国民经济建设服务的方针，中国物理学会普及工作委员会于 1984 年 2 月 9 日至 16 日在北京举办了“物理学在医学中应用”讲习班。来自全国各省、市、自治区的 70 名医科院校教师及医务工作者参加了学习。这次讲习班的主要内容有：

1. 生物磁学及其在医学中应用；
2. 同位素在医学中应用；
3. 快中子治癌；
4. 正电子发射型断层像机；
5. 低温在医学中应用；
6. 核磁共振成像在医学中应用；

7. 激光在生物学和医学中应用；
8. 激光在眼科肿瘤中的应用；
9. 可听声与耳科疾病；
10. 超声检查和诊断；
11. 超声显示和成像。

讲习班期间，学员们还参观了核磁共振、激光、加速器及电子显微镜等实验设备。参加学习的同志反映，物理学为国民经济建设服务的路子很广，内容丰富，希今后多举办类似讲习班，为科技人员的培训作出贡献。

(程义慧)