

# 毫米波技术及其应用

黎滨洪 周希朗 编著



上海交通大学出版社

# 毫米波技术及其应用

黎滨洪 周希朗 编 著

上海交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书从毫米波的产生、传输、辐射、接收直至应用等诸方面,为读者提供一个广泛而系统的理论和技术基础。主要内容包括毫米波的产生、毫米波传输线Ⅰ——金属波导、毫米波传输线Ⅱ——集成介质传输线、毫米波无源元件和电路、毫米波固态电路、毫米波天线、毫米波的应用等八章。

本书的主要对象是研究生和科技人员。如在内容上作适当选择,亦可作大学高年级的教材。

## 毫米波技术及其应用

出版:上海交通大学出版社  
(淮海中路1984弄19号)

发行:新华书店上海发行所

排版:浙江上虞科技外文印刷厂

印刷:常熟印刷二厂

开本:787×1092(毫米)1/16

印张:16

字数:393000

版次:1990年9月 第一版

印次:1990年10月 第一次

印数:1—10.0

科目:230—287

ISBN7-313-00718-3/TN·62

定 价: 3.20 元

# 前 言

毫米波是一段宽广的电磁波频谱，其信息容量比从中波至微波的总和还要大许多倍。激光光源的诞生和光纤技术的发展虽然为通信事业开辟了另一段电磁波频谱，但是许多民用和军用的毫米波系统现在和将来都是不可替代的。为摆脱信道拥挤的困难，开发应用毫米波和光波都是有效的途径，两者不可偏废。

经过近三四十年的努力，毫米波技术及应用已有了良好的开端。但是要充分挖掘毫米波频段的潜力，从波源、传输波导、无源部件、有源部件、天线直至整机设计，尚有许多理论和技术问题需要大力研究和发展，以使毫米波系统性能更好，成本更低。本书正是为此而向读者提供一个广泛的基础。

本教材可供研究生和高年级大学生选用，学时数为54。

书中第一、二、三、八章由黎滨洪编写，第四、五、六、七章由周希朗编写。在准备文稿和图稿过程中，胡秀宝、刘国英同志曾给予许多帮助，在此表示感谢。

编者水平有限，书中的缺点和错误，殷切希望读者批评指正。

编 者

1959年8月于上海交大

# 目 录

|                                      |         |
|--------------------------------------|---------|
| <b>第一章 导论</b> .....                  | ( 1 )   |
| 1.1 毫米波及其传播特性 .....                  | ( 1 )   |
| 1.2 毫米波的优缺点 .....                    | ( 2 )   |
| 1.3 毫米波的应用前景 .....                   | ( 4 )   |
| <b>第二章 毫米波的产生</b> .....              | ( 6 )   |
| 2.1 速调管振荡器 .....                     | ( 7 )   |
| 2.2 磁控管振荡器 .....                     | ( 11 )  |
| 2.3 行波管振荡器 .....                     | ( 15 )  |
| 2.4 返波管振荡器 .....                     | ( 17 )  |
| 2.5 莱达管(Ledatron)振荡器 .....           | ( 19 )  |
| 2.6 回旋管振荡器 .....                     | ( 23 )  |
| 2.7 碰撞雪崩渡越时间(IMPATT)器件 .....         | ( 27 )  |
| 2.8 体效应(Gunn)器件 .....                | ( 30 )  |
| 2.9 毫米波负阻振荡器的结构 .....                | ( 34 )  |
| 2.10 功率合成技术 .....                    | ( 39 )  |
| <b>第三章 毫米波传输线 I ——金属波导</b> .....     | ( 43 )  |
| 3.1 矩形波导 .....                       | ( 43 )  |
| 3.2 圆形波导 .....                       | ( 52 )  |
| 3.3 过尺寸波导 .....                      | ( 60 )  |
| 3.4 波束波导 .....                       | ( 74 )  |
| <b>第四章 毫米波传输线 II ——集成介质传输线</b> ..... | ( 77 )  |
| 4.1 准TEM波传输线 .....                   | ( 77 )  |
| 4.2 非TEM波传输线 .....                   | ( 95 )  |
| 4.3 开放式介质波导 .....                    | ( 100 ) |
| 4.4 半开放式介质波导 .....                   | ( 116 ) |
| 4.5 各种集成介质传输线的比较 .....               | ( 129 ) |
| <b>第五章 毫米波无源元件和电路</b> .....          | ( 130 ) |
| 5.1 定向耦合器 .....                      | ( 130 ) |
| 5.2 模式变换器(转换接头) .....                | ( 143 ) |
| 5.3 谐振器 .....                        | ( 145 ) |
| 5.4 滤波器 .....                        | ( 150 ) |
| 5.5 非互易器件 .....                      | ( 158 ) |
| <b>第六章 毫米波固态电路</b> .....             | ( 163 ) |
| 6.1 检波器 .....                        | ( 163 ) |

|            |                |              |
|------------|----------------|--------------|
| 6.2        | 混频器            | (170)        |
| 6.3        | 放大器            | (178)        |
| 6.4        | 倍频器            | (188)        |
| 6.5        | 固态控制电路         | (191)        |
| <b>第七章</b> | <b>毫米波天线</b>   | <b>(196)</b> |
| 7.1        | 反射面天线          | (196)        |
| 7.2        | 介质透镜天线         | (203)        |
| 7.3        | 喇叭天线           | (208)        |
| 7.4        | 波导开槽阵列天线       | (210)        |
| 7.5        | 介质棒天线          | (215)        |
| 7.6        | 泄漏波天线          | (217)        |
| 7.7        | 微带天线           | (225)        |
| <b>第八章</b> | <b>毫米波的应用</b>  | <b>(232)</b> |
| 8.1        | 毫米波雷达          | (232)        |
| 8.2        | 毫米波通信          | (238)        |
| 8.3        | 毫米波辐射计、遥感和射电天文 | (240)        |
| 8.4        | 毫米波的其他应用       | (245)        |
|            | <b>参考文献</b>    | <b>(248)</b> |

# 第一章 导 论

## 1.1 毫米波及其传播特性

毫米波这一术语的最便于记忆和最通用的含义是指波长在 10 mm~1 mm 之间的电磁波,相应的频率范围是 30~300 GHz。在电磁波波谱图1.1.1中,它是介于微波与红外的那一段。1976 年美国 IEEE 规定毫米波的频率范围是 40~300 GHz。还有一些作者把频率在 100~1000GHz 之间的电磁波称为近毫米波,而将频率在 150~3000 GHz 的称为亚毫米波。

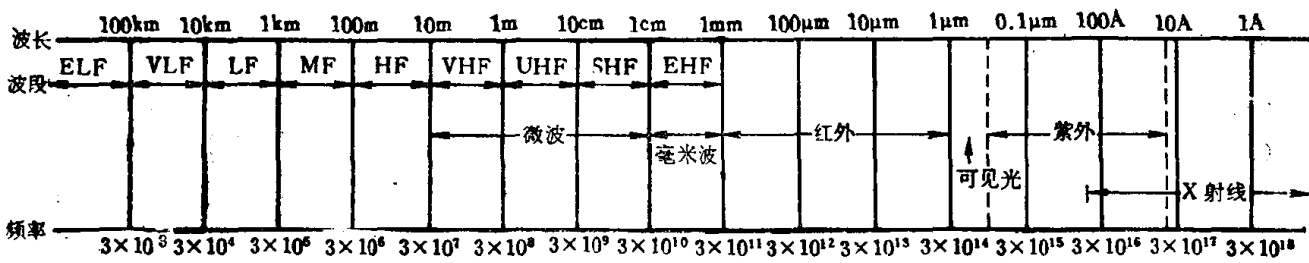


图1.1.1 电磁波波谱

毫米波还可细分为若干个分频段,它们在文献中常用字母代表,如表 1.1.1 所示。了解这些知识对于查阅有关文献是有帮助的。

表 1.1.1 毫米波的频段符号

| 雷达频段符号 |            | 英国频段符号 |            | 美国军用符号(旧) |            | 美国军用符号(新) |            |
|--------|------------|--------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| 符号     | 频率范围 (GHz) | 符号     | 频率范围 (GHz) | 符号        | 频率范围 (GHz) | 符号        | 频率范围 (GHz) |
| K      | 18~26.5    | K      | 18~27      | K         | 10.9~33    | K         | 20~40      |
| Ka     | 26.5~40    | Q      | 27~40      | Ka        | 33~36      | L         | 40~60      |
| 毫米波段   | >40        | O      | 40~70      | Q         | 36~43      | M         | 60~100     |
|        |            | V      | 50~75      | V         | 46~56      | N         | 100~200    |
|        |            | 毫米波段   | >75        | W         | 56~100     | O         | 200~300    |
|        |            |        |            | 毫米波段      | >100       |           |            |

图 1.1.2 是毫米波在大气中传播的衰减特性,曲线 A 代表在海平面沿水平传播时的值,曲线 B 代表在 4 km 高度沿水平传播时的值。图中曲线的高峰代表大气中氧气和水蒸气强烈吸收而引起的衰减;而低谷代表吸收衰减极小的频段,称为大气窗口。这些窗口的衰减随频率

率升高成单调增大排列。但所有的窗口和高峰都有相当宽的平坦部分，即具有很宽的工作频带。毫米波的衰减特性还受到成形水(雨、雪、云、雾等)的影响。若不是特浓的雾，其衰减通常可以忽略。但雨、雪、云的衰减是不可忽略的，尤其是在低衰减值的窗口内。

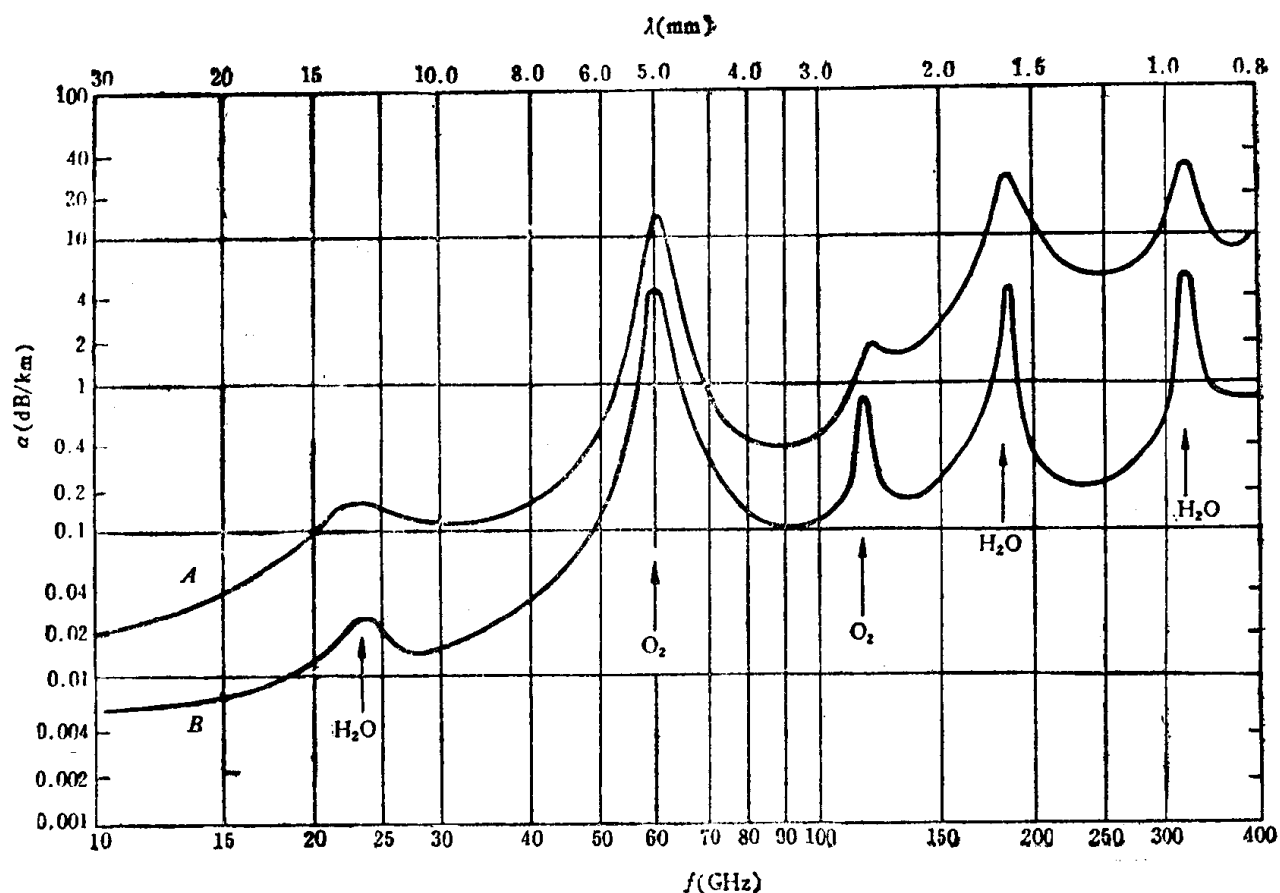


图1.1.2 毫米波的大气衰减特性

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  $\rho = 1 \times 10^{-3}\text{kg/m}^3$

在传播路径方面, 毫米波的直射性比微波强而比红外差, 绕射性则比红外强而比微波差。

## 1.2 毫米波的优缺点

毫米波波段在物理上的三个重要特性, 即波长较短、工作频带宽、与大气成分有选择性的相互作用, 使其在工程应用中呈现出一系列的优点和缺点。

### 1.2.1 毫米波的优点

A. 源于波长较短的优点:

a. 使部件尺寸缩小, 系统结构紧凑。这对飞机、导弹和卫星上的设备特别重要。

b. 在同样尺寸的天线之下可产生更窄的波束宽度。从而提高目标跟踪和鉴别的分辨率和精度; 降低地面多径效应和杂乱回波水平, 提高跟踪低仰角目标的能力; 消除来自波束以外方向的干扰; 提高天线的增益, 降低对发射机峰值和平均功率的要求; 增强探测和定位小目

标(电线、电线杆和小火箭等)的能力。作为缩窄波束宽度的例子,可以举出 12 cm 直径的孔径天线,在 10 GHz 时的波束宽度为  $18^\circ$ ,而在 94 GHz 时的波束宽度为  $1.8^\circ$ 。

**B. 源于工作频带宽的优点:**

a. 可以提高信息传输速率。在雷达系统中可使用窄脉冲或宽带调频信号来研究目标的精细特性;在通信系统中可提高数据率。

b. 可利用宽带广谱能力来抑制多径效应和杂乱回波。

c. 有大量频率可供使用,能有效地消除相互干扰。

d. 提高精密跟踪雷达和目标识别雷达的距离分辨力,增加辐射计的灵敏度。

e. 在低的目标径向速度下也可获得较大的多卜勒频移,从而提高对低速运动或振动物体的探测和识别能力。

**C. 源于与大气环境有选择性相互作用的优点:**

a. 在大气传播窗口里,毫米波的衰减低于红外和光波。

b. 在烟雾灰尘和战场污染环境,毫米波的衰减也比红外和光波低。

c. 在大气传播窗口旁边的吸收峰,为选频安全工作,防止来自远处的干扰提供了条件。

### 1.2.2 毫米波的缺点

**A. 源自波长较短的缺点:**

a. 部件尺寸小,制造精度要求严,成本随之提高。但这一缺点随着微带和电铸波导的进展而可望部分克服。

b. 太窄的波束宽度对目标的搜索和探测是不利的。因此毫米波雷达不适于用作大范围搜索。

c. 尺寸较小的天线在接收时截获较少的能量,因此降低了灵敏度。

d. 过大的多卜勒频移有可能跑到接收机频带之外,引起运动目标的丢失。

**B. 源于与大气环境相互作用的缺点:**

a. 由于大气衰减,毫米波的通信距离一般只及 10~20 km。对平均每立方米含水 7.5 g 的大气,频率为 10、35、94 和 140 GHz 时的衰减分别约为 0.06、0.14、0.8 和 1 dB/km。

b. 在恶劣天气下,例如有雾、云、雪、雨时,作用距离明显缩减。

c. 雨的后向散射严重,容易把目标淹没。采用动目标显示(MTI)、窄波束、窄脉宽和最佳工作频率,可以部分地克服这一缺点。

d. 对树叶植皮,尤其是密集绿叶丛的渗透度浅,这对遥感不利。

对于毫米波的这些优点和缺点,我们应该辩证地看待它们。关于某一段电磁波波谱的优劣,需要指明是与哪一波段相比较并结合具体应用来评价。常会遇到它在某一应用中的缺点在另一应用中却变成了优点的情况。表1.2.1列出在雷达应用中,与微波和光波相比时毫米波波段的优缺点。对于其他应用,也可列出相类似的比较表。

最后,对于毫米波的用户来说,除了上述这些技术性能方面的优缺点之外,尚有其他因素需要考虑,例如信号源、部件、器件齐全与否以及市场价格等。只有经过全面权衡之后才能作出是否采用毫米波的抉择。毫米波在这些方面的情况正在迅速改善,固态源和回旋管等大功率源的长足进展,介质集成波导和器件的大量制造使之既性能可靠,又市价便宜,原来那些突出缺点今天已经缓和。无论如何,由于毫米波自身性能的诸多优点和技术条件的不断完善,

表 1.2.1 在雷达应用中,微波、毫米波和光波之间的比较

| 雷达功能     | 微波 | 毫米波 | 光波 |
|----------|----|-----|----|
| 跟踪精度     | 差  | 良   | 优  |
| 识别能力     | 差  | 良   | 优  |
| 大范围搜索    | 优  | 良   | 差  |
| 恶劣天气下的性能 | 优  | 良   | 差  |
| 在烟尘中的性能  | 优  | 优   | 差  |

不难断定,有些应用领域是非毫米波莫属的。

### 1.3 毫米波的应用前景

由上一节的论述可以看到,毫米波是一个宽广而优良的电磁波波段,随着近年来毫米波的信号源、元器件和测量仪器的不断发展和完善,其应用场合也越来越开拓扩大。第八章将要具体地讨论毫米波的应用实例,在此仅以列表(表 1.3.1)形式让读者大体上了解一些已付诸实用和已建议采用毫米波的条目。

表 1.3.1 毫米波的应用条目

| 雷 达             |                   |
|-----------------|-------------------|
| 低仰角跟踪雷达         | 环境遥感雷达            |
| 军用保密雷达          | 监视雷达              |
| 抗干扰雷达           | 目标探测雷达            |
| 遥感云雷达           | 导弹制导雷达            |
| 高分辨率雷达          | 导航雷达              |
| 成像雷达            | 障碍物探测雷达           |
| 地貌成图雷达          | 杂波抑制雷达            |
| 地图核对雷达          | 引爆雷达              |
| 空中目标识别雷达        | 港口监视雷达            |
| 探月天文雷达          | 机场表面探测雷达          |
| 探测目标特性雷达        | 着陆辅助雷达            |
| 气象雷达            | 空中交通管制信标          |
| 大气湍流遥感雷达        | 喷气发动机废气和火炮冲击波探测雷达 |
| 目标识别雷达          |                   |
| 测距雷达            | 双波束雷达             |
| 地面车辆探测与识别雷达     | 无源寻的雷达            |
| 低或然率截获监视雷达(LPI) | 便携式雷达             |
| 雷达截面测量雷达        | 有源导弹寻的雷达(终端制导)    |
| 通 信             |                   |
| 军事保密通信          | 卫星与卫星之间的通信        |
| 点对点极宽带通信        | 卫星间的中继通信          |
| 在熄火期间与宇宙飞船的通信   | 地对空通信             |
|                 | 后向散射通信            |
| 抗干扰通信           | 低或然率截获(LPI)通信     |
|                 | 铁路通信              |

| 无线电测量     |          |
|-----------|----------|
| 环境遥感      | 地面目标检测   |
| 射电天文学     | 导弹探测     |
| 无线电六分仪    | 导弹制导     |
| 船舶检测      | 空气湍流遥感   |
| 空基辐射计     |          |
| 仪 器       |          |
| 等离子体诊断    | 自动制动     |
| 火箭废气尾羽测量  | 波谱仪      |
| 振动遥感器     | 风暴中心预测仪  |
| 雷达截面的模拟测量 | 光学教学示范实验 |

实际上,毫米波波段并不是什么新波段,早在麦克斯韦提出电磁波谱的概念时,人们就认识到它是其中的一个待开拓的波段了。主要是缺乏适当的功率源、元器件和检测仪器,所以发展缓慢。对毫米波的兴趣曾几经起伏,40年代由于研究高精度雷达的需要而热了一阵,50年代为探索远距离通信又热过一阵,近来的复甦是由于人们认识到红外和光波系统有不可逾越的困难,特别在尘雾天气或夜间工作时;另一方面微波波段又过于拥挤,所以一些特别重要的应用非得祈求于毫米波不可。因此,毫米波过去虽有过几上几下的经历,但是我们相信目前这种浓厚的兴趣将保持和发展下去。

目前需要发展和完善的是毫米波源、元器件,包括检波器、混频器、移相器、波导、功率合成器等。有些真空管已显露出好的性能,但功率电平尚待提高。要大力研制宽带元器件以适应电子战和低或然率截获(LPI)系统的要求。在电路方面,标准波导元器件的带宽尚需改进,要重视毫米波集成电路的研制,提高性能,降低成本。在高频端,要考虑使用新型传输线,如介质波导和悬置微带线等。要研制高性能的毫米波宽带接收机,而目前缺乏高频段的控制部件,特别是环行器、隔离器、开关、移相器和调制器。其中主要的问题是降低成本和解决部件和电路的生产工艺。总之,毫米波设备若想取代目前流行的设备,它必须是质量优等、价格低廉的。

毫米波已经为电子学、电路、天线和系统工程师们展现了广阔的用武之地,90年代无疑将是毫米波工程技术受到重视和迅速发展的时期。这一次我们看到的将不仅是毫米波高低潮历程中的另一个高潮,而且是一个持续发展经久不衰的时期。

## 第二章 毫米波的产生

一段电磁波谱的应用首先要有功率源。目前毫米波波段中同时并存着真空管和固态功率源。固态源的功率电平低于真空管,后者已快达到可以演示烧熔试验的水平了。虽然多数实验性和商品性的功率源均工作于大气窗口频段内,但是凭现有的技术可以研制出毫米波段内任何频率的功率源。

毫米波真空管可分为慢波器件和快波器件两大类。前者包括横场放大器(CFA)、速调管(Klystron)、磁控管、行波管(TWT)和返波管振荡器(BWO),它们大多由早期的微波(厘米波)波段相应器件缩小而成,后者包括回旋管(Gyrottron)、莱达管和潘努管等,它们出现得较晚。在毫米波高频段,慢波器件由于尺寸很小而限制了输出功率,加工制造也遇到了困难。快波器件仍在演变发展之中,这些器件的快波是在平滑波导或者大的过模谐振腔中与周期性或参量泵的电子束发生相互作用的。由于有很高的效率,因此快波器件可以获得比慢波器件高得多的功率电平,目前最显前景的是回旋管。图 2.0.1 表示目前毫米波真空管功率源所达到的最大输出功率。

在许多毫米波应用场合,输出功率较低的固态源就可以满足要求。固态源在低电压下工作,且不需要电子枪或者聚焦磁场,容易做到尺寸小重量轻,这些优点对空间和军事应用尤为重要。采用功率合成技术虽可提高固态源的输出功率,但总功率仍明显低于真空管功率源。近年来,IMPATT 和 Gunn 二极管作成的毫米波振荡器显示出很好的前景,尤其是 IMPATT 器件在整个毫米波波段均能提供甚

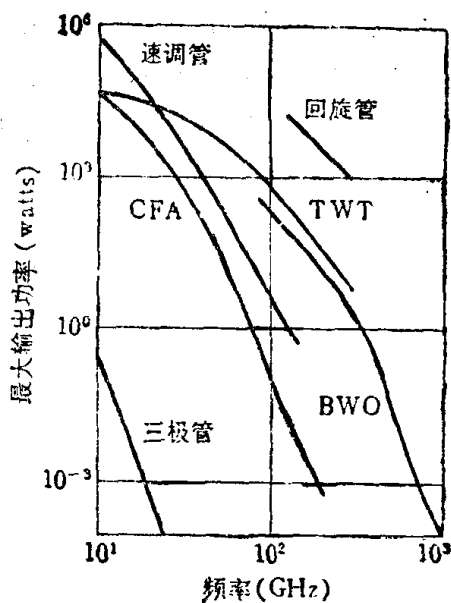


图 2.0.1 真空管功率源最大输出功率与频率的关系

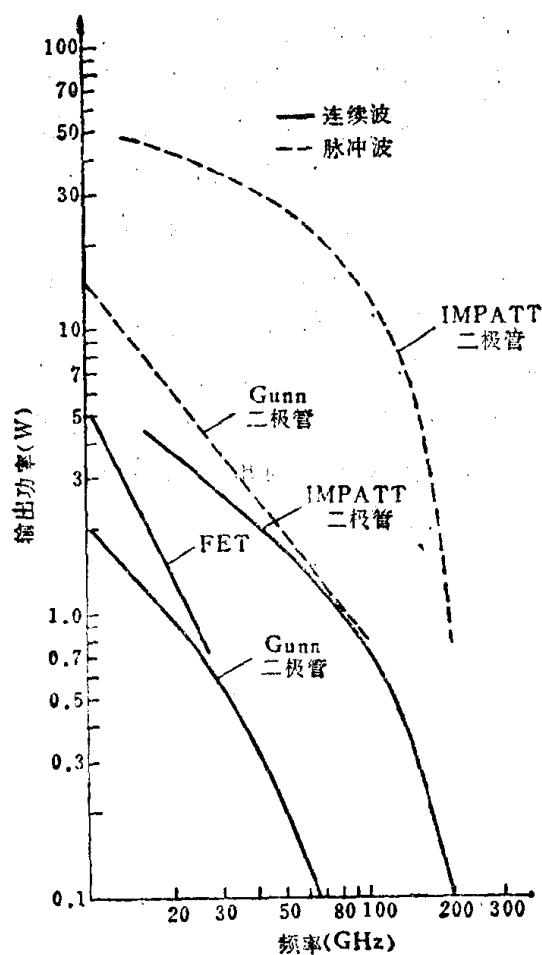


图 2.0.2 毫米波固态源的现状

佳的连续波和脉冲波功效。场效应晶体管 (FET) 振荡器也有较好的进展, 但由于载流子速度 (从而也是载流子渡越时间) 的限制而只能用于低频段 (低于 80 GHz)。最早用来产生毫米波相干辐射的半导体器件隧道二极管已不再使用。但隧道注入渡越时间器件 (TUNNETT) 和势垒注入渡越时间器件 (BARITT) 却越来越受到重视。图 2.0.2 表示各种固态毫米波源的目前水平。尽管具有低噪声特性的磷化铟 (InP) 器件正在逐渐普遍起来, 但这些器件所用的半导体材料仍是砷化镓 (GaAs) 和硅。

在本章, 我们将先讨论真空管功率源, 然后讨论固态源。

## 2.1 速调管振荡器

速调管是最早用来产生毫米波功率的管型之一, 其中以双腔速调管和反射式速调管最为通用。近年来人们的主要兴趣集中在其中的延长相互作用振荡器 (EIO) 和减速场振荡器 (RFO)。商品性的速调管型号已可覆盖整个毫米波波段, 尽管高频段的管子输出功率很低。

### 2.1.1 双腔速调管振荡器

图 2.1.1 说明了双腔速调管振荡器的工作原理。从电子枪 (阴极) 射出的电子受到阳极电压的加速, 通过第一个腔后进入自由空间 (漂移空间), 再通过输出腔到达收集极。图中连接输出腔与输入腔的耦合线使输出功率反馈回输入腔, 补充损耗掉的功率以维持振荡。振荡功率从另一根传输线输出。若管子用作放大而非振荡, 则应去除耦合线, 需放大的输入信号耦合到第一腔中, 而输出信号由第二腔 (输出腔) 提取。

间隙  $g_1$  必须设计得足够窄小, 以使渡越时间  $d/v_0$  ( $v_0$  是电子速度,  $d$  是间隙距离) 远小于信号的时间周期  $1/f$ , 也就是腔体谐振时的周期。电子离开间隙  $g_1$  后的速度为

$$v = v_0 + \frac{e}{m} E_0 \frac{d}{v_0} \beta \sin \omega t_0 \quad (2.1.1)$$

其中间隙间的电场为  $E = -E_0 \sin \omega t$ ,  $t_0$  为电子位于间隙中心的时刻,  $v_0 = \sqrt{2eV/m}$ ,  $e$  和  $m$  分别是电子的电量和质量,  $V$  是阳极对阴极的电压,  $\beta = \sin(\pi fd/v_0)/(\pi fd/v_0)$  为耦合系数。由于间隙处的电场为交变, 因此不同时刻  $t_0$  经过间隙中心的电子速度是不同的, 于是电子束也按腔体谐振频率  $\omega$  受到速度调制。电子进入自由空间 (漂移空间) 后, 快者将赶上慢者, 产生群聚现象。第二个间隙  $g_2$  正好处于有利于群聚电子在输出腔中感应起所要求电场的位置。设漂移空间长度为  $L$ , 则电子的漂移时间为

$$t_e - t_0 = \frac{L}{v_0 \left( 1 + \frac{2V_g}{V} \beta \sin \omega t_0 \right)} \quad (2.1.2)$$

式中  $V_g$  为跨于间隙  $g_1$  的峰值射频电压 ( $E \cdot d$ )。由于  $V_g/V \ll 1$ , 于是 (2.1.2) 可作二项式展开并以此来获得输出电流公式

$$I_e = I_0 \frac{dt_0}{dt_0} = \frac{I_0}{1 - \left( \frac{\omega L}{v_0} \right) \left( 2 \frac{V_g}{V} \right) \beta \cos \omega t_0} \quad (2.1.3)$$

式中  $I_0$  为漂移空间始端的输入电流。图 2.1.2 给出了在各种群聚参数  $X = (\omega L/v_0)(2V_c/V)\beta$  情况下的输出电流波形。从图中可以看到,当群聚参数  $X$  等于或大于 1 时,输出电流中含有丰富的输入频率的谐波成分。因此速调管又可作为谐波发生器或放大器来使用。若把第二腔做得很小并使之谐振于第一腔谐振频率的倍频上,则可构成一个倍频器。

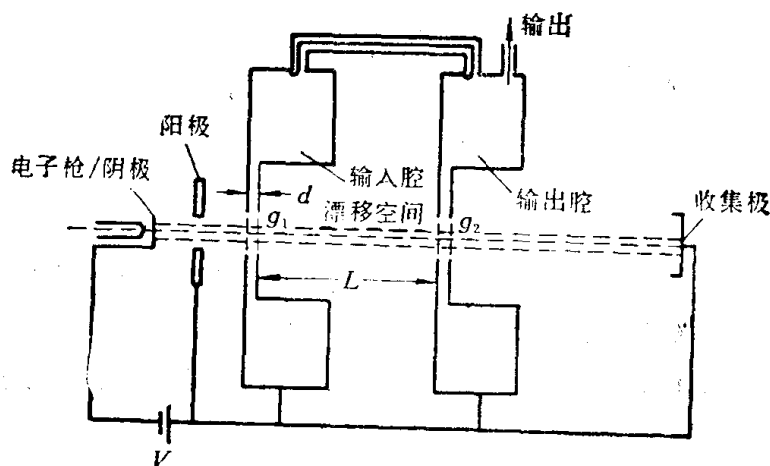


图 2.1.1 双腔速调管的工作原理图

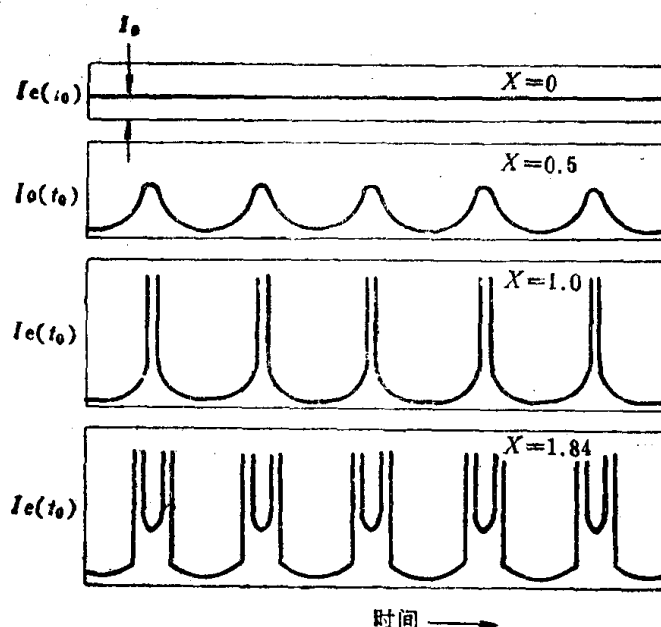


图 2.1.2 电子束输出电流的波形

### 2.1.2 反射式速调管振荡器

用一个反射极置换双腔速调管中的输出腔就可构成反射式速调管,如图 2.1.3 所示。这个反射极把已经速度调制并部分群聚的电子束推回到第一腔的间隙。只要相位适当就可构成正反馈,使第一腔维持振荡。输出功率通过小环,同轴线或者隙缝从第一腔耦合出来。不难证明,为了获得最佳功率转换效率,电子在间隙与反射极之间的平均渡越时间  $\tau_r$  应为  $(N + \frac{3}{4})$  倍的射频周期。其中  $N$  为正整数或零。因此,设谐振频率为  $f$ ,则最佳反馈的渡越时间

$$\tau_r = \frac{2 m v_0 d_2}{e(V + V_r)} = \frac{N + 3/4}{f} \quad (2.1.4)$$

式中  $V_r$  为反射极电压。可以看到,  $V$  和  $V_r$  的不同组合均可产生腔的谐振频率的振荡。由于腔的  $Q$  值很高, 电子调谐的范围很有限, 较大范围地改变振荡频率得求助于机械调谐 (即改变腔体体积)。

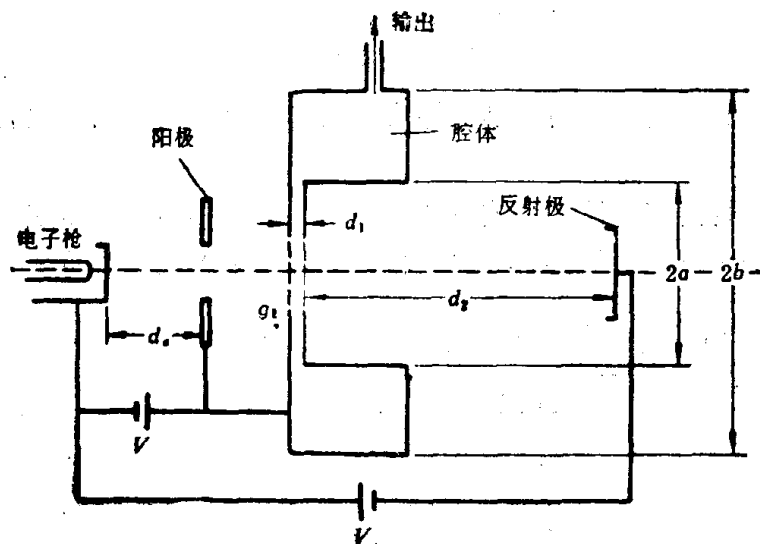


图 2.1.3 反射式速调管原理图

反射式速调管遇到的难处也在于高频段。对于毫米波高频段, 腔的尺寸和电子束的截面积均要缩小, 功率密度的增加引起功率耗散的增加。同时阴极也难于发射高密度的电子束, 聚焦也有困难。由于尺寸变小, 间隙栅网阻挡的电流相应也多了, 小栅网还不利于散热。较新的构想是利用无栅网间隙, 同时提高电压。目前, 反射式速调管可以一直工作到 220 GHz, 但再高的频率就困难了。

### 2.1.3 减速场振荡器(RFO)

图 2.1.4 是 Carter 和 Cornet 于 1958 年报导的减速场振荡器剖面图。它与反射式速

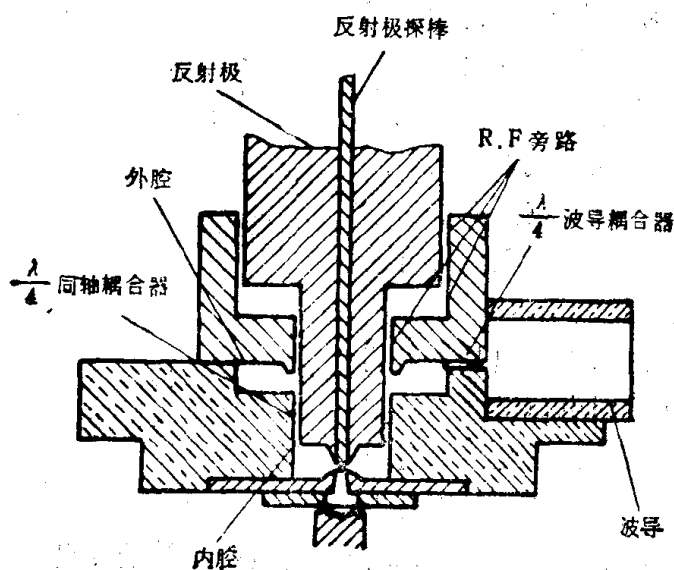


图 2.1.4 毫米波减速场振荡器剖面图

调管不同之处是其反射极构成谐振腔壁的一部分。因电子束并不需要在反向运动后重新穿过小窗孔进入腔隙,从而克服了反射式速调管电子束空间电荷互相排斥而引起的电流下降。使得小窗孔无栅网的管子能在低电压情况下工作。然而在结构方面,减速场振荡器要比反射式速调管复杂一些,因为它没有截然分开的群聚区、漂移区和相互作用区,漂移时间也较短,用渡越角表示为  $2\pi\left(N + \frac{1}{4}\right)$  弧度,其中  $N$  为正整数。

在图 2.1.4 中,底部的内腔决定振荡器的频率,移动反射极即可调整振荡频率。外腔与内腔通过  $\lambda/4$  同轴耦合器相连。输出功率从外腔通过一低阻抗  $\lambda/4$  波导耦合器耦合到输出波导中去。

表 2.1.1 列出了目前实验性毫米波减速场振荡器的技术水平。但这些管子尚未能工作于毫米波高频段,主要障碍是高频谐振腔损耗大,易电压击穿以及与腔负载之间的去耦困难。

表 2.1.1 实验性毫米波减速场振荡器的目前技术水平

| 调谐范围<br>(mm) | 谐振腔电压<br>(V) | 谐振腔电流<br>(mA) | 输出功率(mW) |    |
|--------------|--------------|---------------|----------|----|
|              |              |               | 最大       | 最小 |
| 7.7~14       | 800          | 55            | 300      | 30 |
| 5.8~3.8      | 300          | 13            | 3        | 0  |
|              | 400          | 18            | 10       | 0  |
|              | 500          | 30            | 25       | 0  |
|              | 800          | 65            | 175      | 20 |
| 5.0~3.4      | 800          | 65            | 150      | 30 |
| 4.3~5.2      | 800          | 65            | 5        | 2  |

#### 2.1.4 延长相互作用振荡器(EIO)

延长相互作用振荡器又称为分布相互作用振荡器,是一种多间隙浮动漂移管式速调管。它是一种很有前途的毫米波功率源,突出的优点是重量轻、效率高和输出功率大。它和速调管一样,既可做成振荡器也可做成放大器。具体结构如图 2.1.5 所示。它之所以重量轻是由于其中的周期性电路数目不像返波管那么多,又由于利用了空间电荷聚焦电子束。在小功率情况下可以不用聚焦磁场。即使在大功率情况下,它也只需要很短一段聚焦磁场。

延长相互作用振荡器的工作原理是利用其中的反向波和电子束中的空间电荷慢波相互作用。由于结构的末端是短路的,因此由反射产生的反向波沿着结构传向输入端。如果它与电子束的空间电荷慢波相位调整得当,而且相互作用的增益超过耦合出去的以及铜损耗的功率,便可产生并维持振荡。

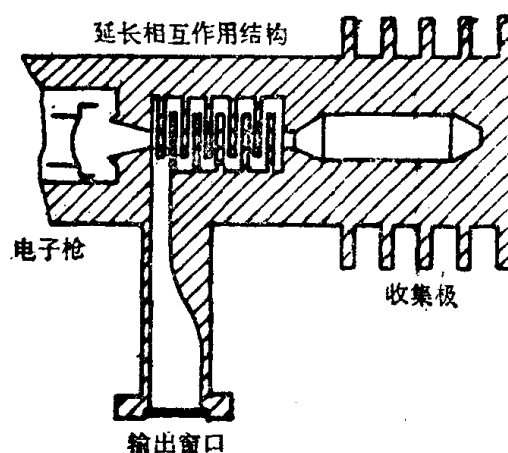


图 2.1.5 延长相互作用振荡器

## 2.2 磁控管振荡器

磁控管是一种横场器件(电场和磁场互相垂直),它先于速调管和行波管研制成功,而至今仍被广泛使用。在微波波段,磁控管可产生兆瓦级脉冲功率和千瓦级连续波功率。但在毫米波波段产生的功率要低得多,脉冲功率也只有几十千瓦。图 2.2.1 为目前苏美毫米波磁控管的功率水平。近年来对毫米波磁控管的研究工作是围绕着可靠性、频率稳定性和可调性等方面进行的。

### 2.2.1 多腔磁控管振荡器

在三种原有的磁控管(回旋频率式、负阻式和多腔行波式)中,只有多腔行波式磁控管能用到毫米波波段,因为它有较优良的性能并较容易产生。可以用图 2.2.2 来说明多腔(行波式)磁控管的工作原理。它由一同轴式阴极、含有多腔的阳极块以及提供轴向磁场的永恒磁铁构成,另外装有输出功率用的耦合装置。其中的永恒磁场是垂直直流电场和电子束的。在速调管振荡器中,电子束与高频场的相互作用只在其通过谐振腔间隙这一短暂时间内进行。在磁控管中,电子束却可在广大的区域内与高频场长期进行相互作用。如图所示,沿垂直于纸面的方向有一个强磁场,中央的电极是阴极,它能发射丰富的电子;外部的电极是阳极,其上有许多互相耦合的谐振腔。若无高频场存在,电子将在直流电场和磁场的作用下作圆周运动,或者到达阳极(磁场较弱时),或者返回到阴极(磁场较强时)。

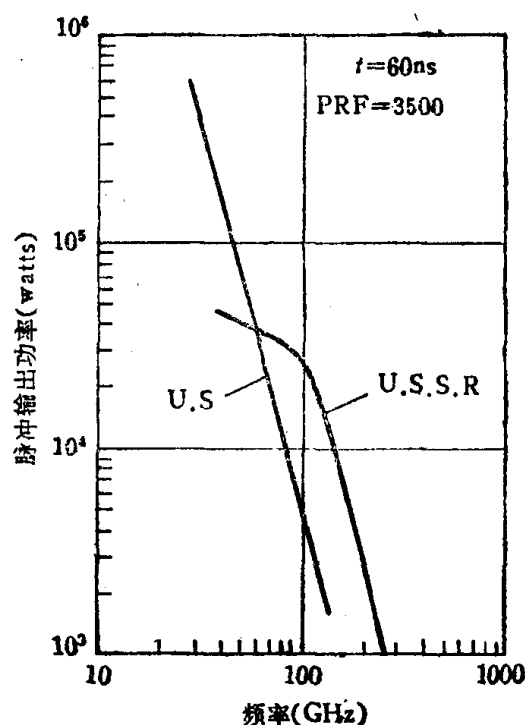


图 2.2.1 目前苏美毫米波磁控管的功率水平

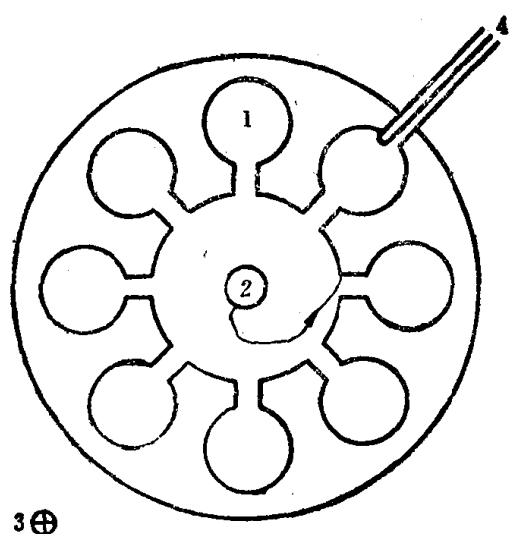


图 2.2.2 多腔磁控管的振荡原理图