

高功率微波系统和效应

Clayborne D. Taylor, Ph. D.

D. V. Giri, Ph. D.

杨德秀等 译
周传明 杨德秀 校

5/44

06792

中国工程物理研究院科技信息中心

1995年2月28日

译 序

“高功率微波系统和效应”一书是美国密西西比州立大学工程学院的 C. D Taylor 博士等人编写的。本书从工程角度出发全面探讨了有关微波武器及其效应的问题。全书深入浅出,可供从事微波武器研究的工程技术人员参考。尽管本书未研究 HPM 在雷达和通讯方面的应用,但本书中的大部分内容对从事雷达系统和通讯系统工作的技术人员仍是有益的。

微波武器,十年前还是埋在土壤中的一粒种子。当时美国物理学会的一些专家认为,微波武器对加固目标的攻击是无能为力的。而今这粒种子已破土而出。本书根据大量实验,认为目前技术状态下,系统对微波武器的加固与研制微波武器相比不仅昂贵而且技术更复杂。高功率微波源由于锁相和功率合成技术的成熟似乎已无技术上的障碍。微波武器天线选中抽真空和充六氟化硫气体的偏馈卡塞格伦天线和不同孔径的喇叭天线,重点研究孔径匹配技术。馈电系统也是重点,因为传输 HPM 的主要困难是如何有效地将微波功率由源送到天线的问题。天线到目标的 HPM 传播、目标接收截面随频率的变化以及效应是另一个重要研究课题。至于微波武器效应、防护和加固的研究,因为未知数太多,尚处于初始研究阶段。

在周传明研究员的建议下,我们翻译了这本书。全书共分七章,其中第一、二和四章由杨德秀译,第三章由魏英译,第五章由刘庆想译,第六章由蔡敏译。全部译稿由周传明和杨德秀校。最后由周传明研究员译审。编排和打字由冯青和谢超完成。译书在内部出版过程中得到中物院科技信息中心许多同志的大力协助,在此表示感谢。深深感谢力光伦副所长和贺云汉研究员的帮助和指导。

限于译者水平,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

译 者

1995 年 2 月

前 言

近年来,由于各种应用,其中包含各种粒子加速器、无线电功率传输、各种受控聚变反应、磁约束聚变的等离子加热和高功率雷达等的应用,以致在研制高功率微波源方面有了极大的进展。能产生吉瓦(gigawatt)范围的功率输出的源已出现,因而,在军事防御上,对用高功率微波器件来干扰或摧毁攻击性电子系统很感兴趣。因此,若干军事与国家实验室正在研究高功率(HPM)微波武器的技术可行性。智能的或意外的潜在目标的 HPM 的易损性和 HPM 电子对抗的有效性也在研究中。

本书介绍高功率微波从发生到意外接收的课题,目的是将关于 HPM 源、系统和效应的现代知识和未来可能的发展提供给读者。关于 HPM 源的目前输出电平、提高最大辐射场和能流密度需要的系统考虑以及对目标可能产生的效应等的信息本书都能提供。所介绍的最后一个课题是对必须工作在 HPM 环境中的各系统提供免受 HPM 损坏的防护。

选择表示基本课题的范围是很难的。读者会发现某些课题的领域包含很先进的研究,而其它领域仅涉及入门知识。这个判断基于研究条件下对本课题详细处理的通用性。本文提供了关于 HPM 辐射、系统相互作用分析和 HPM 的加固设计防护等的进一步讨论。在后两个领域内,作者们对电磁脉冲做过的类似工作进行了大量描述。

术语‘微波频率’国际上没有确切定义。一般,在 300MHz 与 300GHz 之间的频率称作微波区。相应地,微波波长从 1 毫米变到 1 米。微波传输系统包含微波源、波导、发射天线、传播路径、接收天线、另一波导和接收机。

高功率微波也是一个稍带模糊意义的术语。HPM 信号,本文看成是电场强度接近空气的击穿场强的信号,该击穿场强典型范围是 2 到 3MV/m。为考虑安全裕度,实际的系统设计得使在空气中的场强保证不超过 1MV/m,相应的平均功率密度为 1.33GW/m²。应承认空气的击穿场强是一个统计量而不是精确的定义。此外,信号靠近天线可能是高功率,沿传播路径向下到某个距离就不是高功率。可以指出,脉冲功率电平超过 100MW 也称为高功率微波。

HPM 系统有许多用途。最通用的或许是高分辨率的雷达。在这个用途中,一个主要的目的是研制一个系统,它产生尽可能大的功率密度和尽可能高的效率。给以极大关注的另一个用途是无线电功率传输。这里,其目的是研制一个高效且维持低功率密度的大的总辐射功率。然而,本书的重点是对 HPM 信号的接收只限于意外接收(inadvertent),而对雷达信号分析或其它类似的雷达工作所关心的技术都不予注意。尽管有这个限制,但本书的大部分资料对雷达系统分析员和关心无线电功率传输的工程师都是感兴趣的。

第一章介绍 HPM 源的简要评述。介绍各种应选的 HPM 源的输出特性。与此讨论同时,还研究增加输出功率的脉冲功率源及其电路。讨论了脉冲和连续 HPM 源。这方面的详细论述可在两本最新出版的关于 HPM 源的专著中找到。

传输 HPM 的一个主要困难是将微波功率由源有效地送到天线的问题。波导和天线的功率传输能力受到介电击穿的限制。效率受到不适当波导模式输出功率的影响。辐射功率密度取决于天线的方向性。所有这些课题第二章作详细研究。

第三章提供 HPM 系统的实例设计。研究各种天线,并介绍具体应用于 HPM 防御武器系统的技术要求。还计算了由这些实例系统导出的辐射功率密度和能量密度。

考虑目标的照射,必须研究微波从天线到目标的传播。这个题目在第四章中论述。我们讨论了大气传输和衰减、衍射和反射。HPM 的空气击穿不仅在天线附近,而且沿传播路径,均受到特别关注。本章将详细讨论这个课题。给出了因现代技术极大进步显然是实用的功率和能量密度的电平。

第五章着手研究系统的互作用。提出了分析系统互作用的全部问题的通用方法。讨论了最佳响应问题和具体响应的一般特性。本章以一个例题结束。

第六章介绍了在 HPM 照射下预期的效应。讨论了不同 HPM 对电系统、电子设备和生物目标的影响。这些课题是极复杂的,大部份还是未知数。所介绍的大部份材料都是基础知识,这些知识对关心微波效应的所有工程师应该是重要的。

第七章,研究了抗微波照射的防护技术。讨论了连同各种终端防护器件的系统级保护电路。给出了连同各种加固技术所提供的具体保护级通用调研资料。

最后讨论的问题是:“HPM 作为一种防御武器是否可构成一种生存威胁呢?”这超出了技术问题。它包含经济、道义以及实际的考虑。对系统的破坏与杀伤的能力给予极大注意。其它问题则不属本书范围。

致 谢

作者们深切感谢 Kirtland 空军基地菲力普实验室的 Carl Baum 博士。他建议写这本书,给予了鼓励和帮助,看到完成这本书。第二章和五章是由他的报告引伸的。

我们也感谢 UCLA 电子工程部的 Y. Rakmat-Samii 教授,在我们关注反射器天线的工作(第三章)中,由于他的同意和作者(DVG)之一联合完成了第三章。几位领头的研究员,包含 Carl E. Baum 博士、Kelvin Lee 博士、Jim Benford 博士和 Jeffrey Casper 博士审阅了手稿的各章,并共同提出了若干建议。非常感谢他们以及出版商的帮助。也感激 Dale Jordan,他制备了许多图表和图;感激 Ann Dawson 和 Barbara White 他们反复打印了草稿;感谢 Amanda Elliott,他几次校对了这本书;感谢 Joseph Holmes,他准备了最后的手稿。

目 录

译序

图录

前言

第一章 高功率微波源

1.1 引言	1
1.2 速调管	1
1.3 磁控管	3
1.4 回旋管	4
1.5 虚阴极振荡器	5
1.6 荡注管/自由电子激光	6
1.7 类速调管强相对论性电子束器件	7
1.8 脉冲电源	9
1.9 锁相高功率微波(HPM)源	11
1.10 总结	12
参考文献	13

第二章 高功率微波的波导/天线的设计依据

2.1 引言	15
2.2 在封闭的全导电波导中的模式	15
2.3 波导模式中的功率	17
2.4 波导的功率传输能力	18
2.5 矩形波导	19
2.6 圆波导	22
2.7 腔体谐振器	24
2.8 模激励	25
2.9 波导内放置全导电片	26
2.10 喇叭输出孔径的研究	28
2.11 喇叭天线阵	29
2.12 透镜和波纹	31
2.13 波束成形和聚焦	32
2.13.1 均匀孔径场	33
2.13.2 锥化孔径场	33
2.13.3 喇叭天线和反射器天线	33
2.14 例题	34
2.14.1 问题的确定	34
2.14.2 最大辐射功率密度	35
2.14.3 峰值电场	35

2.15 总结	36
参考文献	36
第三章 高功率微波辐射系统的典型例子	
3.1 引言	38
3.2 矩形波导	39
3.3 定向耦合器	41
3.4 单喇叭天线馈源	42
3.5 偏馈抛物面反射器	44
3.6 偏馈双卡塞格伦反射器	45
3.7 典型例子	46
3.8 天线阵的馈源	51
3.8.1 单喇叭天线馈源的天线	55
3.9 照射系统的举例	57
3.9.1 在约 1GHz 上 O 指数脉冲高振幅正弦波电磁辐射	57
3.9.2 在 2.8GHz 上 O 指数脉冲高振幅正弦波电磁辐射	63
3.10 喇叭天线馈源和双反射器天线	65
3.11 总结要点	67
3.11.1 场强	67
3.11.2 能流密度	67
3.12 结束语	68
参考文献	68
第四章 高功率微波的传播	
4.1 引言	70
4.2 基本传播理论	70
4.3 反射和折射	71
4.4 衍射	74
4.5 地面反射	75
4.6 大气衰减	77
4.7 空气击穿极限	78
4.8 例题	78
4.8.1 问题的确定	78
4.8.2 最大传输的功率和能量	78
4.8.3 大气和雨量的吸收	79
4.8.4 地面反射	79
4.9 总结	80
参考文献	81
第五章 高功率微波与系统的相互作用	
5.1 引言	83
5.2 波源的研究	83

5.3	天线传递函数	85
5.4	传播传递函数	85
5.5	与系统外部的相互作用	86
5.6	内部的相互作用	86
5.7	总响应	88
5.8	功率密度和能量密度	88
5.9	例题	89
5.9.1	问题的提出	89
5.9.2	辐射的能量密度	89
5.9.3	屏蔽效率	90
5.10	总结	90
	参考文献	90
	第六章 高功率微波效应	
6.1	引言	92
6.2	热效应	92
6.3	生物效应	93
6.3.1	普通热焔现象	93
6.3.2	微波感生的听觉效应	94
6.3.3	辐射的安全标准	94
6.4	电效应	96
6.4.1	接收横截面	96
6.4.2	场对金属线的耦合	97
6.4.3	相干效应	99
6.5	电子效应	104
6.5.1	整流	104
6.5.2	互调	104
6.5.3	上锁(latchup)	104
6.5.4	热破坏过程	105
6.5.5	击穿现象(穿透)	107
6.5.6	数字电路的干扰	107
6.6	激化量化	108
6.7	效应评定	109
6.8	总结	109
	参考文献	110
	第七章 高功率微波的加固	
7.1	引言	114
7.2	屏蔽	114
7.3	滤波	117
7.3.1	旁路电容器	117

7.3.2 铁氧体环	117
7.3.3 无源低通滤波器	118
7.4 孔径屏蔽技术	119
7.5 电涌保护装置	120
7.6 空腔效应	120
7.7 总结	121
参考文献	121

图 录

- 图 1-1 高功率微波源的基本组成。
- 图 1-2 用作振荡器的普通双腔速调管正反馈放大器。
- 图 1-3 多腔磁控管振荡器的图例。
- 图 1-4 回旋管振荡器的图例。引至文献[6]。
- 图 1-5 虚阴极振荡器的图例。引至文献[2]。
- 图 1-6 荡注管/自由电子激光器的图例。
- 图 1-7 建议 3GHz 类速调管 IREB 微波源采用的结构。引至文献[14]。
- 图 1-8 用于波导中的 $\lambda/4$ 变换器。
- 图 1-9 补偿电子束源中有限电子速度的波导分割和弯曲。
- 图 1-10 多腔同轴型相对论性速调管放大器的结构图(引自文献[27])。
- 图 1-11 脉冲功率源驱动虚阴极振荡器的 HPM 装置。(引自文献[28])。
- 图 1-12 两级电容型脉冲功率源的集总元件等效电路。
- 图 1-13 锁相磁控管源的图例。
- 图 1-14 产生峰值功率器件的比较。
-
- 图 2-1 全封闭电波导的横截面。
- 图 2-2 矩形波导的横截面和最低阶 H 模式。
- 图 2-3 (a)横向传播时工作于 H_{10} 模的矩形波导的分割;(b)纵向传播时工作于 H_{10} 模的矩形波导分割。
- 图 2-4 喇叭天线孔径上的介质片和金属栅。
- 图 2-5 喇叭天线孔径上的真空和气体的界面。
- 图 2-6 带孔径栅的喇叭天线阵。
- 图 2-7 喇叭天线的皱纹导电片构成透镜天线的慢波结构(侧视图)。
- 图 2-8 喇叭天线的皱纹导电片构成透镜天线的慢波结构。
- 图 2-9 在 TE_{10} 模均匀场分布下,矩形孔径的归一化 E 面辐射方向图,图中 a 是 H 面内的孔径尺寸。
- 图 2-10 几种喇叭天线的结构
- (a) 扇形 H 面喇叭天线
 - (b) 角锥喇叭天线
 - (c) 扇形 E 面喇叭天线

(d) 圆锥喇叭天线

图 2-11 带有偏置次反射器和馈电喇叭的卡塞格伦反射器天线

图 3-1 单波导馈电系统的元部件

图 3-2 (a)用偏置馈电喇叭馈电的单反射器系统

(b)双反射器系统

图 3-3 用偏置馈电喇叭馈电的单反射器系统

图 3-4 双反射器系统

图 3-5 磁壁双定向耦合器(60-80dB)

图 3-6 所用馈电喇叭的部分详细结构

图 3-7 在 P 点峰值电场约为 1MV/m 的偏置抛物面反射器:

(a) 孔径上为低场时

(b) 孔径上为高场时

注意,在(b)中反射器的孔径不一定是圆的,因为,从实际出发它的形状可能是矩形、椭圆或方形。

图 3-8 (a)双反射器系统(在主反射器上为低场),例如,次反射器上峰值电场约为 1MV/m 的偏置卡塞格伦天线,次反射器可在气袋内移动。

(b)双反射器系统(在主反射器上为高场),例如,主、次反射器上峰值电场均为 1MV/m 左右的偏置卡塞格伦天线,次反射器可在气袋内移动。注意,反射器的孔径不一定是圆的,因为从实际出发可能是矩形、方形或椭圆。

图 3-9 (a)基于 WR-340 的角锥喇叭天线。

(b)六元角锥喇叭天线的几何图。

图 3-10 对图 3-9a 所示的六元喇叭天线计算的远区场方向图。

图 3-11 图 3-9 的喇叭天线阵在 $y_r=0$ 的平面内的近区场强(dB)。当天线阵的总辐射功率为 x GW 时,将一个归一化常数 $(135.08 + 10\log_{10} x)$ dB 加到由本图读出的电平上就可求得真实场强。

图 3-12 图 3-9 所示的六元喇叭天线阵在 $x_r=0$ 的平面上的近区场强(dB)。(见图 3-11)。

图 3-13 设计例子中所用的天线几何图。

图 3-14 单馈电喇叭天线的近区场。

图 3-15 采用不同主、次反射器组合时单馈电喇叭天线的远区场。

图 3-16 0 指数脉冲高振幅正弦波电磁辐射的馈电喇叭天线。

图 3-17 (a)装在卡车上的偏置馈电的圆反射器;抛物面直径为 5 米,孔径面积约为 19.6 米²。

(b)装在卡车上的面积约为 21.9m² 的偏置馈源椭圆形反射器。

图 3-18 偏置馈电的圆形反射器(实例 1)。

图 3-19 图 3-18 中的角锥喇叭天线的辐射方向图。

图 3-20 圆孔径天线在 1.1GHz 时的辐射方向图。

图 3-21 偏置馈电的圆反射器(实例 1)。

图 3-22 图 3-9 中角锥喇叭天线的辐射方向图。

- 图 3-23 圆孔径天线在 1.1GHz 上的辐射方向图。
- 图 4-1 喇叭天线辐射的波束,其视轴与 y 轴重合。
- 图 4-2 投射到均匀介质平面上的平面波。
- 图 4-3 微波束在对流层内的连续弯曲(标准折射)。
- 图 4-4 波束在传播路径上大气折射的说明。
- 图 4-5 反射界面上方的电场强度(引自文献[23])。
- 图 4-6 物体部分遮蔽传播路径时反射和衍射的说明。
- 图 4-7 对目标照射的地面反射。
- 图 4-8 在 0°C 和一个大气压下,微波在大气中的传播的衰减;—氧吸收;—水蒸汽吸收。(引自文献[24])。
- 图 4-9 微波束达到空气击穿时的最大功率密度随高度的变化曲线。
- 图 5-1 传递函数由波源到系统的分解。
- 图 5-2 作为频率函数的正则系统响应。
- 图 6-1 关于人体在微波频率电磁场照射下的安全电平。
- 图 6-2 由平行于导电平面的金属线构成的任意终端传输线。表明了入射平面波和地面反射的平面波。
- 图 6-3 随机量 $V_n = |V_n|e^{j\theta_n}$ 时的相位复矢量和 $\sum V_n$ 。
- 图 6-4 一个带八个孔径模拟电子组件的详图,(引自文献[4])。
- 图 6-5 加载目标离天线 15 英尺时其真实 σ_t 和相干和 $(|\sum V_n|^2)$ 的比较(引自文献[4])。
- 图 6-6 加载目标离天线 15 英尺时,其真实 σ_t 和相干和 $(|\sum V_n|^2)$ 的比较(引自文献[4])。
- 图 6-7 加载目标离天线 15 英尺时,其真实 σ_t 和相干和 $(|\sum V_n|^2)$ 的比较(引自文献[4])。
- 图 6-8 加载目标 $\sum()$ 超过 σ_t 的频率比与图 6-4 到图 6-6 的数据相符,(引自文献[4])。
- 图 6-9 理想 pn 结二极管加正负偏压受照射的伏安(电压对电流)的特性。
- 图 6-10 $1\mu s$ 矩形脉冲激化时,典型的晶体管、硅控整流器、二极管和集成电路的损坏阈值功率范围。
- 图 7-1 电磁隔离屏蔽体的使用(引自文献[1])
- 图 7-2 非全屏蔽的说明(引自文献[1])
- 图 7-3 完成一种实际的电磁屏蔽(引自文献[1])
- 图 7-4 为提高有效性和可靠性的多层屏蔽。
- 图 7-5 多隔离屏蔽的接地布线。
- 图 7-6 三种不同材料铁芯的插入阻抗值。
- 图 7-7 用于封装设计的低通滤波器电路图。
- 图 7-8 分布与集总元件滤波器插入损耗随频率的变化曲线。
- 图 7-9 将阻带延伸到微波频率区的带吸收材料的低通滤波器的设计。
- 图 7-10 同轴结构低通滤波器设计的比较。

第一章 高功率微波源

1.1 引言

微波的产生可用许多方法来实现,因此,已研制出许多种微波源。而在高功率电平上($>100\text{MW}$ 脉冲功率),有几类微波源,诸如:速调管、磁控管、回旋管、虚阴极振荡器、荡注管和束一等离子器件。所有的微波源显然具有某些基本特征。例如,在几乎所有类型的微波源中,束中的电子(带电粒子)的动能被转换成微波能(波)。所以,波与粒子的相互作用是产生 HPM 的基本物理机理。本文中假定 HPM 源属于一类范畴(基于这个波与粒子的相互作用),分类如下:

- 1 参数器件 例如,喇曼或康普顿自由电子激光/荡注管(ubitron)
- 2 等离子器件 例如,虚阴极振荡器、强相对论性电子束器件、轨旋管(orbitron)
- 3 快波器件 例如,回旋共振脉泽(CRMs)、回旋管
- 4 慢波器件 例如,磁控管、返波管

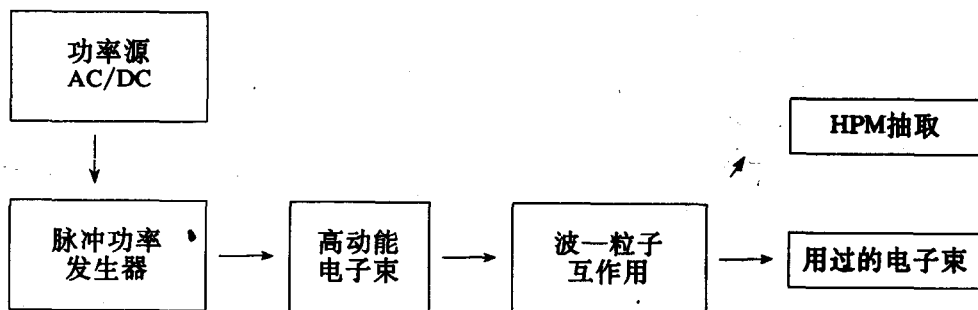


图 1-1 高功率微波源的基本组成方块图

快与慢波器件区别如下。在快波器件中,电子束的相速大于光速,而慢波器件中,通过一个慢波射频结构增加了波与粒子相互作用的时间。在下一节的例子将进一步澄清这个区别。还指出,在所有 HPM 源中,都具有下述组成部分:(1)电源,(2)脉冲发生器,(3)电子束发生器,(4)产生 HPM 的波-粒子相互作用区,(5)输出高功率微波的抽取单元。如图 1-1 所示。

近几年来,在产生高功率微波方面取得了相当大的进展。无疑,这些技术的各种用途是多种多样的,包含通讯、高分辨率雷达和新一代直线加速器。然而,本章中以武器应用的特殊考虑来研究高功率微波源这个课题。介绍各种微波源的工作原理并识别这些源的相应优点。

1.2 速调管

速调管是在三十年代后期由 P. H. Varian 和 S. F. Varian 发明的一种高频振荡器和放大器。速调管结构示于图 1-2。本图,绘出了一个双腔放大器。此外,可以施加一个平行于电子束的直流磁场,以减少电子束从源向收集极传输时而产生的发散。

现在速调管的输出能力正在稳步提高。通常,速调管提供强脉冲与连续波(CW)功率具有

中等带宽(2—15%)。相应的高增益(直到70dB)和效率(直到70%)是可能达到的。一般,效率随增益的提高而下降。效率指的是连续波源的输入直流功率(瞬时源的脉冲功率)转换成微波功率的百分率。

正如图1-2所示,速调管的主要部件是电子束源和收集极、输入和输出谐振腔以及束的加速电极电位。电子束一般是由阴阳极电压加速热电子而形成的。当电子束穿过连到输入谐振腔的栅极时,电子的速度就受到加在栅极上电场的调制。因此,不同的电子速度沿束路径上产生了不同的电子数密度(或束密度)。这些电子束用含丰富谐波的周期信号激励第二栅极。输出谐振腔是一个高Q谐振器,十分类似于并联RLC电路。所以,产生谐振腔频率的正弦输出。

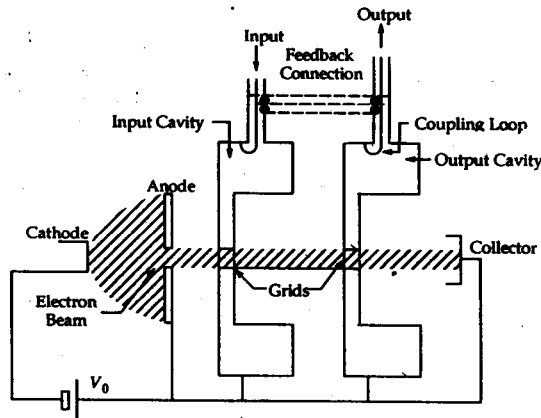


图1-2 用作振荡器的普通双腔速调管正反馈放大器

出现在第一谐振腔上的电场可以来自两个源。就速调管放大器而言,这电场可由激励输入谐振腔的输入信号产生。而对速调管振荡器,栅极电场由第二谐振腔的反馈信号引起,如图1-2所示。

因为输出频率是由输出谐振腔的谐振频率确定的。所以频率倍增是可能的。输入谐振腔提供的束调制不是纯正弦信号,而是含有丰富的谐波。所以,可以在谐波频率上来设计输出谐振腔的大小。已制作出频率升高20倍的速调管倍增器。当引入频率倍增时,预计效率会降低。

只用两个谐振腔,典型的增益约10dB。用实现多腔结构能取得更高的增益。而且,多腔速调管能通过各谐振腔的交错调谐而具有更宽的带宽。文献[1]的Gandhi对速调管的设计方法做了极好的描述。

所谓反射速调管由反射极代替收集极构成,并只用一个单腔。这个构造是用速度调制的电子形成正反馈。

由速调管器件产生高功率需要大电流和高电压,HPM源在电子由场致发射产生的意义上(与由阴极发射的热电子发射相比)还是相对论性的。例如,图1-2中的双腔结构用于高功率时必须修改。如果束的路径足够长,则为防止束扩散可能需要轴向磁场。在1.7节中,详细讨论了高功率速调管器件。在1.8节中讨论产生高功率脉冲的功率源。更详细情况,请参见Benford和Swegle的最新专著[25]。

1.3 磁控管

磁控管在速调管之前就完善了。且是功率振荡器更广泛使用的器件。它比速调管更有效，效率达到 80%⁽¹⁾，尽管典型的稳频运行效率约为 30%。七十年代末，100—MW 脉冲磁控管和速调管已成为商用。然而，在 L 波段峰值功率为 1.8GW 的相对论性磁控管源现在才商用。近 10 年源技术取得了极大的改进和进步。

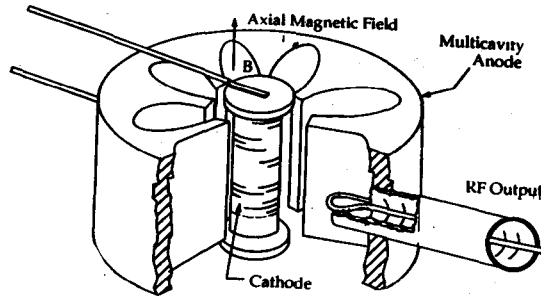


图 1-3 多腔磁控管振荡器的图例

在图 1-3 中给出了磁控管的图例。磁控管的主要部件是：

- 1 一个同轴阴极
- 2 一个多腔阳极
- 3 一个轴向直流磁场
- 4 一个环形电子云

电子由阴极发射进入磁场垂直电场的区域。因此，在速度为 V 的非相对论性电子上的总力是

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = -eE_0 - e\vec{v} \times \vec{B}_0 + \vec{f}_{sc} \quad (1.1)$$

式中 $e=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 是电子电荷的量， E_0 是由外施电压 V_0 产生的阴极和阳极之间的电场， B_0 是外施轴向直流磁场， F_{sc} 是在阳极和阴极之间存在的空间电荷产生的力。阴极发射的电子的合运动是环行的。其环行速度随离阴极的距离而增加。所形成的空间电荷组态称为布里渊 (Brillouin) 云。

对于典型磁控管，其磁场强度足以将布里渊云约束在靠阴极的区域内。当满足(1.2)时，这点才能实现：

$$\frac{eB_0^2}{8m} \left[\frac{r_a^2 - r_c^2}{r_0} \right] \approx 0.15V_0 \quad (1.2)$$

式中 r_0 是布里渊云的外半径， r_c 是阴极的半径， m 是电子质量。在布里渊云的外表面内电子速度的相应环行分量是 v_B

$$v_B = \frac{eB_0}{2m} \frac{r_a^2 - r_c^2}{r_0} \quad (1.3)$$

为了求得方程(1.2)和(1.3)，假定由阴极释放的电子被加速进入环形轨道，该轨道上磁力提供必须的向心力。

多腔阳极能模拟成用布里渊云激励绕阳极传播波的分布电路。多腔依次和布里渊云相互作用,从而导致能量转换。Gandhi[1]给出了详细设计方法。因为电子束对电路的耦合几乎是在恒定动能条件下发生的。所以磁控管提供的效率实际上是其它微波源不能匹敌的。

当磁控管结构改成放大器时,例如,特高频放大管(amplifitron),可得到极高的效率(达到85%)。10-dB增益,10%的典型带宽是可能的。

对于高功率工作,需要极高的电压(约1MV)和直流强磁场(数十千高斯)。因为产生的电荷速度接近光速,所以称这些器件为相对论性磁控管。实际上,磁控管的漂移速度典型的约为三分之一光速。已报道的效率约为30%,但是更普遍的效率约为10%^[2]。

产生最佳功率的磁控管是一个标准的A₆型磁控管,它具有六腔阳极结构,工作于 π 模式,仅由被无源腔[3]隔开的三个谐振腔抽取能量。A₆结构有两种工作模式, π 和 2π 模式。对于 π 模式,径向电场在每个腔体开口之间的极性相反。对 2π 模式,在每个开口上场的极性相同。当电子漂移速度等于沿阳极传播的慢波相速时,出现动能到电能的最大耦合。已取得的输出功率达到10GW[4,5]。

1.4 回旋管

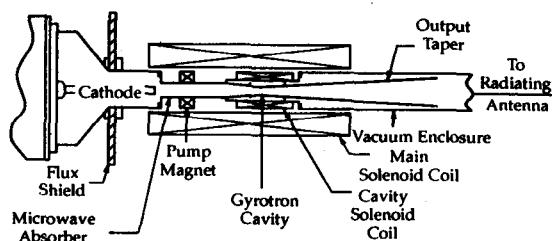


Figure 1-4 An illustration of the gyrotron oscillator. Reproduced from [6] with permission (© 1986 IEEE).

图 1-4 回旋管振荡器的图例

参见图1-4,回旋管是工作在毫米波长上的新型微波器件。对这些器件,电子束通常是一个薄的空心圆柱形状,并且射入环形圆柱谐振腔内的强轴向磁场。因此,电子运动是螺旋的,即回旋的。称为电子回旋脉泽不稳定性所产生的电磁辐射机理起源于电子的方位群聚,这群聚是由于电子的相对论性回旋频率对能量的依赖关系所致。为使这个器件成为一个有效的辐射源,这些电子主要动能部分应以环形运动形式存在。

这些器件已成为很有希望的高功率微波源。某些报道过的回旋管振荡器(回旋一直射式调速管)在脉冲工作状态下的输出功率在7.5GHz时为800MW,15GHz时为350MW,37.5GHz时为8MW[3]。这些高功率器件的效率在30%—40%范围内。

回旋管的用途包含等离子加热和毫米波雷达系统。回旋管器件的明显缺点是它的尺寸和重量。另一个缺点是带宽很窄(1—3%)。但是,这能用束、场相互作用空间的锥形波导段加以改善(见图1-4)。此时,35GHz时的带宽接近35%。其它结构,例如,脊形矩形波导和类磁控管波导已成功地使用。

1.5 虚阴极振荡器

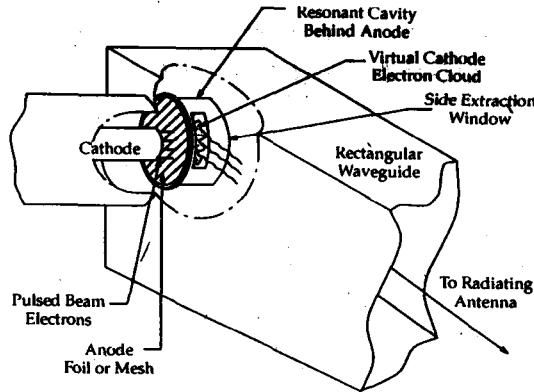
虚阴极振荡器是一种能工作在几百兆赫到数千兆赫频段内的高功率源。这类器件只工作于脉冲方式,但它可调谐且频带较宽(5—10%)⁽⁷⁾。此外,它们是简单的,不需要笨重的磁铁。然而,这些器件最大缺陷是它们的效率低,一般约为1%,尽管已报道用适当磁场,效率接近30%⁽⁸⁾。

虚阴极振荡器的射频信号由两种辐射机理提供。强电子束投射到薄的阳极箔上,在该箔的下游边上形成空间电荷密度,该电荷密度足以把后到达的电子反射回阳极箔。这个强的空间电荷密度形成一个“虚阴极”(参见图1—5),虚阴极振荡器由此而得名。

辐射机理之一源于阳极箔附近反射电子的振荡。大致以 $c/(2d)$ 的频率产生射频信号,式中 d 是阳极至阴极的间距,另一种辐射机理是虚阴极的振荡,其频率接近空间电荷密度的等离子频率。即是,

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \epsilon_0}} \quad (1.4)$$

式中 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 是自由空间的介电常数, m 是电子的质量, e 是电子的电荷, n_e 是在空间电荷结构中的电子数密度。它就是主要决定射频功率产生的虚阴极振荡的频率。



· 图 1—5 虚阴极振荡器的图例

为了确定虚阴极振荡器的性能特性,就要得到阳极箔和虚阴极之间的电荷密度。这可通过对加在该区的电位解拉普拉斯方程来实现。于是,我们得到[9,10]

$$V = V_1 \left(\frac{x}{x_1} \right)^{4/3} \quad (1.5)$$

式中 V_1 是位于 x_1 上的阳极电压,且 x 坐标放在阳极和位于 $x=0$ 的阴极之间的点上。这时,为简化分析,阴极看成是接地的,并施加了空间电荷的限制条件;即,

$$E = -\frac{dV}{dx} = 0 \quad \text{在 } x = 0 \quad (1.6)$$

Zahn[10]对电流密度求解得到

$$J = \frac{4e_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_1^{3/2}}{x_1^2} \quad (1.7)$$

即一个稳定的电流。对相关的体电荷密度求解得到，

$$\rho = -\frac{4e_0 V_1}{9x_1^{1/3}} x^{-2/3} \quad (1.8)$$

组合方程(1.4)和(1.8)得到等离子频率

$$f_p = \frac{1}{3\pi} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{V_1^{1/2}}{x_1^{2/3} x^{1/3}} \quad (1.9)$$

射频辐射主要由电子密度最大，靠近虚阴极的区域产生〔参见(1.8)〕。这个结论和辐射功率测量的结果是一致的〔8〕。射频辐射的平均频率等于平均的等离子频率，即，

$$\langle f, \rangle = \frac{1}{x_1} \int_0^{x_1} f_p dx = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{V_1^{1/2}}{x_1} \quad (1.10)$$

这个结果也与测量值一致〔2〕。

辐射可用不同的方法从虚阴极区引出。最普通的方法是后面图 1-11 表示的轴向提取。图 1-5 表示一个带侧向提取谐振腔的虚阴极振荡器。这个结构有助于减少带宽、增加效率和提供定向辐射。最后这一点与器件对波导模式的激励有关，是下一章研究的课题。

虚阴极振荡器装置能用改变阴极至阳极的间距来调谐。调谐范围已观测到为 40%，在该范围内输出功率的下降不低于最大值 3dB〔8〕。

已报道虚阴极振荡器的极高输出功率，达到 20GW〔2〕。能产生的脉宽从十到数百纳秒。虽然，包含了其它因数，通常用电脉冲激励阳极来控制脉宽。

1.6 荡注管/自由电子激光

荡注管是采用电子束射过一组周期结构磁铁的一种器件，该处电子速度接近光速〔11〕。这些磁铁周期地加速电子束，从而产生同步加速器的辐射(参见图 1-6)。

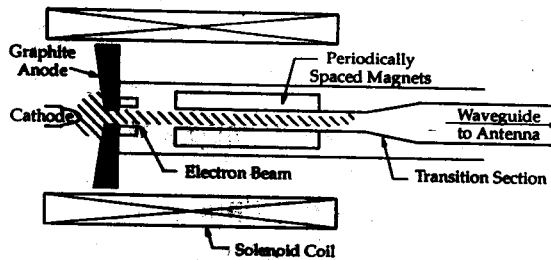


图 1-6 荡注管/自由电子激光器的图例

对这个器件，微波输出频率正比于因子

$$\left[d_m \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \right]^{-1}$$

式中 v 是电子速度， c 是光速， d_m 是磁铁间隙。这个器件也称为自由电子激光。

正像对虚阴极振荡器那样，荡注管器件需要强的单色高能电子束。通常，这要求一台体积

庞大的加速器。已报道的输出功率电平超过 1GW[13]。

1.7 类速调管强相对论性电子束器件

为产生高功率微波信号,讨论了需要相对论性电子束的几种类速调管器件。通常这些器件效率低。所谓强相对论性电子束(IREB)器件包含一个换能器(一个强流二极管),以便在电能向电子动能的转换中获得高效率[12-14]。近来已报道将电脉冲转换成电子动能的效率高达 50%,而射频发生器的效率大于 20%,输出功率电平~600MW[14]。IREB 的结构示于图 1-7。

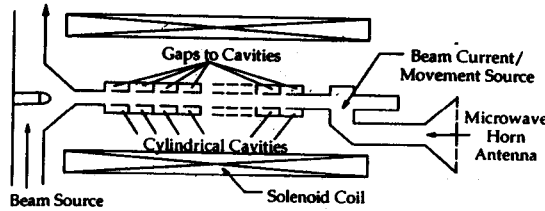


图 1-7 建议 3GHz 类速调管 IREB 微波源采用的结构

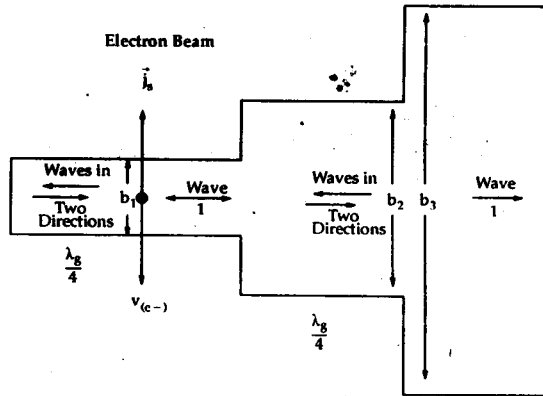


图 1-8 用于波导的 $\lambda/4$ 变换器

在电子束区域内。类速调管 IREB 器件类似于普通的速调管,它通常采用轴向磁场来聚焦束,而电子束被环缝同轴谐振腔所调制。这种结构只传播 TEM 模(波导模式在下一章中详细讨论)。采用换能器从已调制束中引出射频能量。业已提出,这点能够使该束穿过矩形波导来实现,正如图 1-8 所说明的,图中,束通过波导穿过波导两宽边中心上的两个孔[23]。波导的一端可被短路,而另一端连到所示的喇叭天线。为使能量转换过程最佳,对确定的波导研究是必须的。最近, Baum^[23]分析了这样一种结构,并研究了使效率最佳的技术。

为了将束的动能最佳耦合给电磁能,大多数专门研究都要求图 1-7 的结构。第一,束的取向应与被激励的波导模的电场平行(参见 2.8 节)。第二,电子束的相交应由四分之一波导波长长度的短路端来分开;即