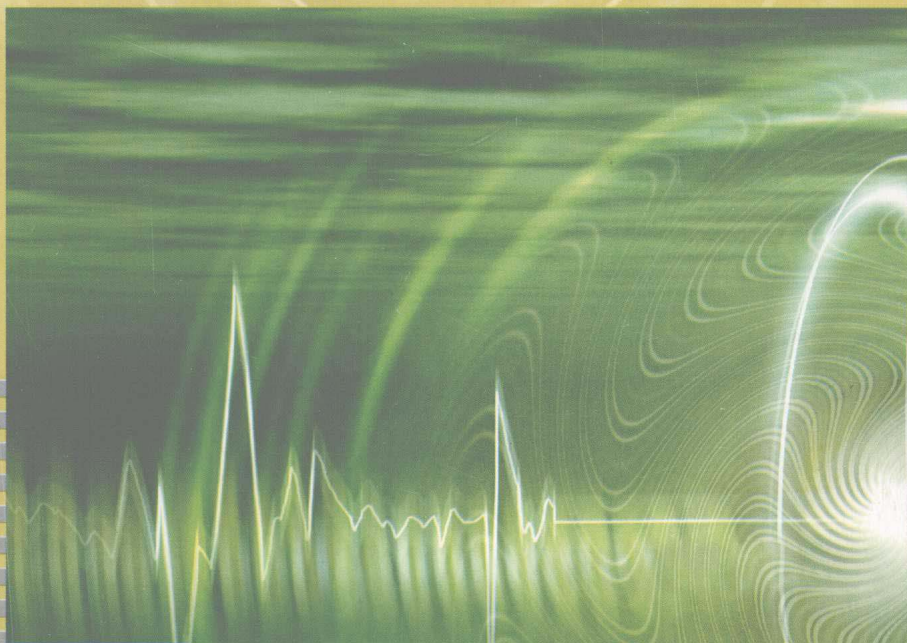


# 高功率微波源

GAOGONGLU WEIBOYUAN

■ 周传明 刘国治 刘永贵 李家胤 丁武 等编著



原子能出版社

# 高功率微波源

周传明 刘国治 刘永贵 李家胤 丁 武 等编著

原子能出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高功率微波源 / 周传明, 刘国治, 刘永贵等编著. —北京:

原子能出版社, 2007. 8

ISBN 987-7-5022-3988-6

I. 高… II. ①周…②刘…③刘… III. 大功率-微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 132301 号

## 内 容 简 介

高功率微波是近 30 年才发展起来的新兴科技领域, 是脉冲功率技术、等离子体物理学和微波真空管电子学相结合的一门崭新学科, 在国民安全和国民经济方面有着广泛的应用前景。高功率微波源是高功率微波系统的核心。本书论述了高功率微波源的理论与实践。重点介绍了我国高功率微波源的研究成果。全书共分 8 章: 第 1 章, 绪论; 第 2 章, 相对论返波管振荡器; 第 3 章, 渡越时间振荡器; 第 4 章, 虚阴极振荡器; 第 5 章, 相对论磁控管; 第 6 章, 相对论速调管; 第 7 章, 磁绝缘线振荡器; 第 8 章, 高功率微波源的数值模拟。本书是我国第一本较全面论述高功率微波源的专著, 旨在推动我国高功率微波源技术的发展。读者对象为对高功率微波源技术感兴趣的研究人员、工程技术人员和高功率微波装置的使用人员。

### 高功率微波源

---

出版发行	原子能出版社 (北京市海淀区阜成路 43 号 100037)
责任编辑	卫广刚 李代斌 杨德秀
印 刷	四川绵阳科学城曙光印刷厂
经 销	全国新华书店
开 本	787 mm×1092 mm 1/16
印 张	25
字 数	440 千字
版 次	2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第一次印刷
书 号	ISBN 987-7-5022-3988-6
印 数	1—1000 定 价 68.00 元

---

版权所有 侵权必究 <http://www.aep.com.cn>

## 《高功率微波源》编辑委员会

顾 问 刘盛纲

主 任 周传明

副主任 刘国治 孟凡宝 张建德

委 员 (以姓氏笔画为序)

丁 武 刘永贵 刘志伟 刘国治

李 林 李代斌 李传胪 李家胤

杨德秀 张建德 范植开 周传明

孟凡宝 黄 华 董志伟 谢卫平

# 前 言

高功率微波是 20 世纪 70 年代出现的一个新兴的研究领域。它是一种多学科综合发展的产物，从事这项研究的人员多是在真空微波管技术、脉冲功率技术和等离子体物理方面具有相当基础和富有经验的研究员和工程师。由于多种学科的有机结合，使高功率微波研究不断获得重大进展，已将峰值输出功率推高到 15 GW 的水平。

高功率微波在高能加速器、等离子体加热、无线电能传输等科学技术领域和国家安全方面都有着十分诱人的应用前景。作者的心愿是，通过本书的出版，希望有更多的人了解和参与这项富有生气的研究，并期望着产生更多更好的研究成果，以造福人类。

本书的组织结构如下。第 1 章，绪论，由周传明撰写；第 2 章，相对论返波管，由刘国治、陈昌华撰写；第 3 章，渡越时间振荡器，由范植开撰写；第 4 章，虚阴极振荡管，由刘永贵撰写；第 5 章，相对论磁控管，由李家胤撰写；第 6 章，相对论速调管，由黄华撰写；第 7 章，磁绝缘线振荡器，由董志伟撰写；第 8 章，高功率微波源的数值模拟，由丁武撰写。杨德秀、李代斌、李林在本书编辑过程中提供了很大帮助

在此对各位撰稿人和编辑人员表示感谢。

周传明

2007 年 7 月

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 高功率微波的概念	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 高功率微波的定义	2
1.1.3 高功率微波器件的运行特点	2
1.1.4 高功率微波源的分类	4
1.2 高功率微波源的研究进展	5
1.2.1 国外高功率微波源研究进展	5
1.2.2 国内高功率微波源技术的研究与发展	8
1.3 脉冲功率装置	8
1.3.1 电容储能脉冲功率驱动源	9
1.3.2 电感储能脉冲功率驱动源	12
1.3.3 爆炸磁通压缩发生器	13
1.3.4 脉冲变压器	16
1.4 电子束的产生与运输	17
1.4.1 引言	17
1.4.2 电子束源	18
1.4.3 平面二极管	19
1.4.4 空心电子束二极管	21
1.4.5 电子束的运输	21
1.5 微波定向能概念	22
1.5.1 引言	22
1.5.2 定义	23
1.5.3 功率合成	26
1.6 微波定向能应用	31
1.6.1 微波卫星太阳能电站	31

1.6.2	高功率微波武器	36
	参考文献	44
<b>第 2 章</b>	<b>相对论返波管振荡器</b>	<b>47</b>
2.1	引言	47
2.1.1	新型慢波结构相对论返波管振荡器	48
2.1.2	相对论返波管振荡器的新作用机制	50
2.1.3	降低外加磁场强度技术	51
2.1.4	重复频率相对论返波管振荡器	52
2.1.5	“脉冲缩短”效应	53
2.1.6	系统整体优化	54
2.1.7	“超辐射”相对论返波管振荡器	55
2.1.8	高功率毫米波相对论返波管振荡器	55
2.2	相对论返波管振荡器的简要工作原理	55
2.2.1	相对论返波管振荡器工作原理的物理描述	55
2.2.2	相对论返波管振荡器的种类	57
2.2.3	慢波结构的色散曲线	57
2.2.4	相对论返波管振荡器的线性理论和绝对不稳定性	58
2.2.5	相对论返波管振荡器的非线性理论	61
2.2.6	相对论反波管振荡器的设计和数值模拟	62
2.3	薄环形强流相对论电子束产生	63
2.3.1	概述	63
2.3.2	阴极及电子束均匀性	64
2.3.3	无箔二极管的电流电压关系	67
2.3.4	环形相对论电子束的空间电荷限制电流	69
2.4	国内相对论返波管振荡器的主要研究结果	69
2.4.1	高功率微波模式判断和频率、功率测量简要介绍	69
2.4.2	普通型的相对论返波管振荡器	71
2.4.3	重复频率相对论返波管振荡器	74
2.4.4	等离子体加载相对论返波管振荡器	76
2.4.5	同轴慢波结构相对论返波管振荡器	77
2.4.6	低磁场相对论返波管振荡器	78
2.4.7	高功率毫米波相对论返波管振荡器	80
2.5	结束语	82

参考文献	82
<b>第 3 章 渡越时间振荡器</b>	<b>85</b>
3.1 渡越时间振荡器的起源与发展	85
3.2 渡越时间振荡器的工作原理	87
3.2.1 对于不同入射相位 $\varphi_0$ 电子的实际渡越时间 $\tau_1(\varphi_0)$	89
3.2.2 入射相位为 $\varphi_0$ 的电子离开间隙的速度 $v(\tau_1, \varphi_0)$	90
3.2.3 电子离开间隙的动能	91
3.2.4 单个电子对任意初相 $\varphi_0$ 的平均动能 $\bar{E}_k$	91
3.2.5 单个电子平均动能的增量 $\Delta\bar{E}_k$	91
3.2.6 电子束所得到的功率 $P$	91
3.2.7 间隙的电子负载电导 $G_{b1}$	91
3.2.8 电子束与场相互作用的功率转换效率	93
3.3 多腔渡越时间效应线性理论	94
3.3.1 假定、物理量及方法	94
3.3.2 2 腔谐振腔渡越时间效应的线性理论	97
3.3.3 3 腔谐振腔渡越时间效应的线性理论	103
3.3.4 $N$ 腔谐振腔渡越时间效应的线性理论	107
3.4 $N$ 腔谐振腔色散关系及场分布的解析研究	113
3.4.1 3 腔谐振腔色散关系及场分布的解析研究	115
3.4.2 $N$ 腔谐振腔色散关系及场分布的解析研究	128
3.5 多腔渡越时间振荡器研究实例	131
3.5.1 C 波段 3 腔渡越时间效应振荡器的理论与研制	133
3.5.2 C 波段 3 腔渡越时间振荡器的实验研究	142
3.6 评述与展望	144
参考文献	146
<b>第 4 章 虚阴极振荡器</b>	<b>149</b>
4.1 引言	149
4.2 虚阴极振荡器的工作原理、工作条件和工作频率	150
4.2.1 虚阴极振荡器的工作原理	150
4.2.2 虚阴极振荡器的工作条件	150
4.2.3 虚阴极振荡器的工作频率	152



4.3	虚阴极振荡器的基本类型.....	153
4.3.1	反射三极管虚阴极振荡器.....	153
4.3.2	普通虚阴极振荡器.....	154
4.3.3	抑制反射电子的虚阴极振荡器.....	155
4.3.4	同轴虚阴极振荡器.....	155
4.3.5	反馈式虚阴极振荡器.....	156
4.3.6	谐振腔型虚阴极振荡器.....	157
4.4	国内主要虚阴极振荡器高功率微波源研究介绍.....	157
4.4.1	普通虚阴极振荡器.....	157
4.4.2	抑制反射电子的虚阴极振荡器.....	158
4.4.3	同轴虚阴极振荡器.....	160
4.4.4	反馈式准单模虚阴极振荡器.....	167
4.4.5	可调节微波反馈的虚阴极振荡器.....	175
4.4.6	微波调制型虚阴极振荡器的理论研究.....	178
4.4.7	侧向提取双间隙调制虚阴极振荡器.....	184
4.4.8	准光腔虚阴极振荡器.....	203
4.5	评述与展望.....	207
	参考文献.....	208
<b>第5章 相对论磁控管.....</b>		<b>211</b>
5.1	引言.....	211
5.2	相对论磁控管的基本原理.....	215
5.2.1	稳态电子运动.....	215
5.2.2	相对论磁控管的谐振系统.....	216
5.2.3	起振过程.....	217
5.2.4	相对论磁控管中几个重要的物理问题.....	219
5.3	基础问题研究.....	222
5.3.1	谐振系统分析.....	222
5.3.2	相对论磁控管性能的粒子模拟.....	228
5.3.3	相对论磁控管的效率研究.....	235
5.4	A6磁控管及其永磁包装.....	245
5.4.1	A6磁控管实验研究.....	245
5.4.2	永磁包装的物理设计.....	247
5.4.3	永磁体设计计算与测试.....	248

5.4.4	永磁包装相对论磁控管实验.....	251
5.4.5	提高永磁包装相对论磁控管功率的新方案.....	251
5.5	可调谐相对论磁控管.....	253
5.5.1	物理设计.....	253
5.5.2	调谐系统设计计算.....	254
5.5.3	整管性能的优化.....	259
5.5.4	实验研究.....	260
5.6	预脉冲对相对论磁控管性能的影响.....	263
5.6.1	预脉冲对相对论磁控管工作电压的影响.....	263
5.6.2	预脉冲带来的模式竞争.....	263
5.6.3	预脉冲对相对论磁控管谐振频率的影响.....	265
5.7	评述与展望.....	266
	参考文献.....	266
<b>第6章</b>	<b>相对论速调管.....</b>	<b>269</b>
6.1	引言.....	269
6.2	工作原理及主要技术问题.....	271
6.2.1	工作原理.....	271
6.2.2	强流相对论速调管研究的主要技术问题.....	273
6.3	束波互作用的理论分析.....	274
6.3.1	引言.....	274
6.3.2	线性理论.....	277
6.3.3	非线性理论.....	281
6.4	主要参数设计.....	286
6.5	粒子模拟.....	286
6.5.1	电子束经过输入腔间隙后的调制.....	286
6.5.2	电子束经过中间腔间隙后的调制.....	287
6.5.3	微波的提取.....	288
6.6	实验设计.....	288
6.6.1	设计考虑因素.....	289
6.6.2	输入腔.....	289
6.6.3	输出腔.....	293
6.7	实验结果与分析.....	295
6.7.1	强流短脉冲相对论速调管.....	295

6.7.2	强流长脉冲相对论速调管.....	298
6.7.3	高功率短脉冲相对论速调管.....	302
6.7.4	S 波段相对论速调管.....	304
6.8	变型的相对论速调管.....	306
6.9	评述与展望.....	308
	参考文献.....	309
<b>第 7 章</b>	<b>磁绝缘线振荡器.....</b>	<b>313</b>
7.1	引言.....	313
7.2	磁绝缘线振荡器主要特点和工作原理.....	315
7.3	磁绝缘线振荡器的色散关系.....	316
7.3.1	空间电荷平衡态.....	316
7.3.2	轴向空间谐波的波动方程.....	317
7.3.3	受扰场边界条件与色散方程的导出.....	319
7.3.4	同轴盘荷波导结构的色散关系.....	320
7.4	磁绝缘线振荡器调制电流辐射的解析表述.....	323
7.4.1	辐射场方程.....	323
7.4.2	线性区增益.....	324
7.4.3	饱和功率的标度.....	325
7.5	磁绝缘线振荡器的理论设计与数值模拟.....	327
7.5.1	磁绝缘线振荡器主慢波结构的确定.....	327
7.5.2	磁绝缘线振荡器工作电压的选取.....	330
7.5.3	L 波段磁绝缘线振荡器的冷腔设计.....	331
7.5.4	C 波段负载绝缘型磁绝缘线振荡器的粒子模拟结果.....	335
7.6	磁绝缘线振荡器实验研究.....	336
7.6.1	紧凑型 L 波段磁绝缘线振荡器.....	337
7.6.2	C 波段磁绝缘线振荡器实验.....	341
7.6.3	磁绝缘线振荡器中脉冲缩短现象的克服.....	345
7.6.4	锥形磁绝缘线振荡器.....	347
7.7	评述与展望.....	350
	参考文献.....	351

<b>第 8 章 高功率微波源的数值模拟</b> .....	353
8.1 引言.....	353
8.2 PIC 方法概述.....	353
8.2.1 场方程.....	354
8.2.2 场边界条件.....	355
8.2.3 质点方程.....	358
8.2.4 质点边界条件.....	359
8.2.5 场与质点耦合.....	360
8.3 数值模拟程序的发展.....	360
8.3.1 计算程序的改进.....	361
8.3.2 计算程序功能的扩充.....	369
8.4 新型高功率微波源探索举例.....	371
8.4.1 轴向加速管.....	371
8.4.2 无引导磁场的柱-锥慢波结构振荡器.....	374
8.5 理论设计的实验方案举例.....	377
8.5.1 无箔二极管的理论设计.....	377
8.5.2 谐振腔的设计.....	380
8.5.3 相对论速调管放大器的整体数值模拟结果.....	380
8.6 评述与展望.....	385
参考文献.....	385

# 第1章 绪论

## 1.1 高功率微波的概念

### 1.1.1 引言

微波电子管是第二次世界大战期间在高度保密情况下进行研究的产物。当时在军事需求的强烈牵引下,深入研究了霍尔(Hull)发明的磁控管,并成功地应用在雷达上,有力地推动了反法西斯战争的胜利进程。这段时期出现了几个里程碑式的重要发明。1935年海尔兄弟<sup>[1]</sup>(Heil and Heil)发明了海尔振荡管。维利安兄弟<sup>[2]</sup>(Varian and Varian)发表了描述速调管的论文。大战末期的一项重大成果是康夫纳<sup>[3]</sup>(Kompfner)发明的行波管。这些微波管至今仍然得到广泛应用。

到了20世纪60年代,随着半导体材料以及元器件技术的不断发展,出现了半导体微波器件,先是变容管、隧道二极管和肖特基二极管的应用,接着是具有高频大功率特点的雪崩二极管和砷化镓体效应二极管的实用化。由于超视距雷达对国家安全的重要性日益突出,随着多目标快速探测技术的快速发展,超大功率全固态的相控阵雷达受到了广泛重视。美国用于国家导弹防御系统的X-BGR雷达使用了8100个固态发射单元,平均功率达170 kW。

上面简单的历史陈述表明,微波管发展到今天,已不再是电子管独领风骚的情景,固体微波器件正在引领着小型化、智能化的潮流。传统的微波电子管反而受到压抑,需要寻求新的应用领域或运用全新的相互作用机制的新器件。高功率微波器件既有新的应用领域,又能为电子管器件提供创新的方法,正是我们要寻求的新器件。它借助于强流相对论电子束技术的巨大功率和能量向着截然不同的方向发展。

由强流相对论电子束产生的高功率微波器件与普通微波电子管的区别在于它具有巨大功率和能量的强流相对论电子束,所需的电压达到1 MV或更高,电流超过10 kA。也就是说,驱动微波管的功率可能超过10 GW。而普通电子管运行的电压为20 kV,电流为100 A,驱动功率不过20 MW。因此,高功率微波的显著特点就是输出功率高。从20世纪70年代初出现第1台真正高功率微波器件以来<sup>[4]</sup>,高功率微波领域在军事需求的

推动下取得了巨大进步。图 1-1 与图 1-2 表现了这种进步。从图中看出相对论器件的  $Pf^2$  值从 20 世纪 70 年代到 90 年代每 10 年提高 2 个量级。峰值功率大于 1 GW，平均功率大于 1 kW<sup>[5]</sup>，已逐渐商业化。

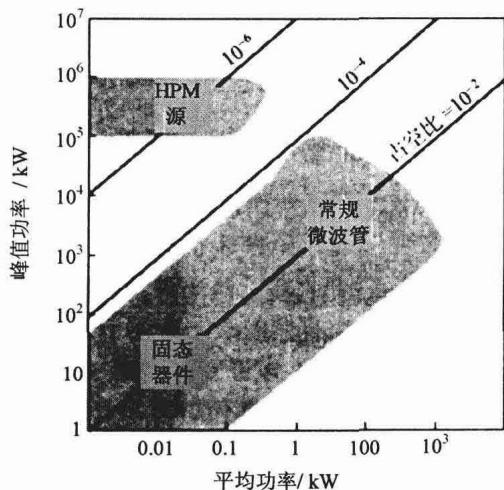


图 1-1 微波产生的峰值功率与平均功率的关系

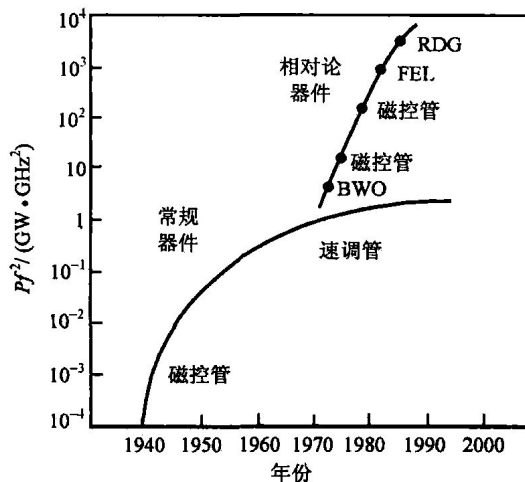


图 1-2  $Pf^2$  因子的发展

本书主要研究强流相对论电子束驱动的高功率微波器件。共分 8 章：第 1 章，绪论，综述高功率微波的概念、系统、应用与发展；第 2 章，相对论返波管振荡器；第 3 章，渡越时间振荡器；第 4 章，虚阴极振荡器；第 5 章，相对论磁控管；第 6 章，相对论速调管；第 7 章，磁绝缘线振荡器；第 8 章，高功率微波源的数值模拟方法。

### 1.1.2 高功率微波的定义

高功率微波是一个界限比较模糊的学术用语，各种定义有一些细节上的差异。美国空军科学顾问委员会(SAB)对高功率微波的定义是，功率 0.01~100 GW，频率 0.1~100 GHz 的电磁波；James Benford 和 John Swegle<sup>[4]</sup>则将功率大于 0.1 GW，频率 1~300 GHz 的电磁波定义为高功率微波；C.D.Taylor 则把功率大于 0.1 GW，频率 0.3~300 GHz 的电磁波叫做高功率微波。

考虑高功率微波管与普通真空管的区别，参考上述意见，我们这样定义高功率微波 (high power microwave, HPM)：高功率微波是指输出功率 0.1~100 GW，频率 1~300 GHz 的电磁波，通常产生这种电磁波的源是一种运行在相对论电子束条件下的装置。

### 1.1.3 高功率微波器件的运行特点

由于电子的质量很小，在能量较低时，其运动速度就可以接近光速。此时，电子运

动遵从相对论电动力学规律。在相对论电动力学中,电子的质量与它的运动速度相关。假设用  $m_0$  表示电子静止质量,用  $v$  表示电子运动的速度,则有

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = m_0\gamma \quad (1.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (1.2)$$

式中:  $c = 2.997 \times 10^{10}$  cm/s, 是真空中光速;  $\beta = v/c$  是电子运动速度与光速之比,称为无量纲速度(以光速为单位);而  $\gamma$  则称为相对论因子。 $\beta$  和  $\gamma$  的大小直观地表述了电子运动的相对论程度。为了更清楚地说明这一点,我们写出  $\beta$  和总能量  $w$  之间的关系

$$\beta = \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma} = \frac{\sqrt{(w/w_0)^2 + 2(w/w_0)}}{1 + (w/w_0)} \quad (1.3)$$

式中:  $w_0$  是电子的静止能量,  $w_0 = m_0c^2$ 。图 1-3 是式(1.3)表述的  $\beta$  与  $w/w_0$  的关系曲线。当  $w = w_0$  时,  $\beta = 0.866$ 。对于电子来说,它的静止能量为 0.51 MeV, 因此只要供给电子的电压为 0.51 MV 时,则电子速度将达到光速的 0.866 倍,即以  $v = 2.595 \times 10^{10}$  cm/s 的速度运动。这样的电子已经具有强的相对论效应。

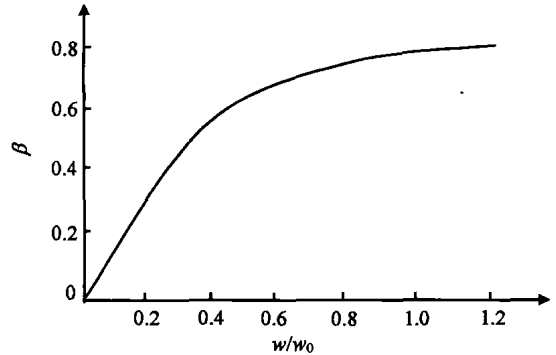


图 1-3  $\beta$  与  $w/w_0$  的关系曲线

因此, HPM 运行的第一个特点就是在相对论电子束下运行。在文献资料中,很多地方又把 HPM 器件称为相对论器件。描述这类器件的专门理论,叫相对论电子学<sup>[7]</sup>。

HPM 运行的第二个特点是,几乎所有的高功率微波器件都在强流电子束下工作。这种情况的一个显著特点是空间电荷的影响明显增强。表征电子束这一特性的物理量叫导流系数,它的定义为

$$P = I/U^{3/2} \quad (1.4)$$

式中:  $I$  为电子束电流强度,单位为 A;  $U$  为电子束加速电压,单位为 V。而导流系数  $P$  是电子束强度的量度,  $P$  越大,空间电荷的作用越强。电子枪的导流系数表示阳极从阴极支取电流的能力。在空间电荷限制发射下,它只取决于电极系统的几何结构。 $P$  的单位叫朴(P)。通常导流系数的数值很小,故常用更小的单位微朴( $\mu P$ )。  $1 \mu P = 10^{-6} P$ 。一般认为,导流系数  $P$  在  $0.1 \mu P$  以上的,属于强流电子束;在  $0.001 \mu P$  以下者,属于弱流电

子束。通常的射频加速器产生电子束，比如  $V=10\text{ MV}$ ， $I=10\text{ A}$ ，则  $P=3\times 10^{-9}\text{ P}<0.01\text{ }\mu\text{P}$ 。另外，如显像管、摄像管、示波管、电子显微镜和夜视器件中的电子束，也属于这类弱流电子束。而对于 HPM，其运行的电子束参数的典型值为  $V=1\text{ MV}$ ， $I=10\text{ kA}$ ， $P=1\text{ }\mu\text{P}$ ，属于极强的强流电子束。

在研究强流电子束下工作的 HPM 时，电子的运动规律必须包含电子与电子的相互作用，即空间电荷效应。同时，束-波相互作用产生的空间电荷波，将在微波产生过程中起到相当重要的作用。

HPM 的上述两个运行特点，一般都在 HPM 器件中同时出现。有两种器件更具代表性，可以各自反映不同的运行特点。一种是工作在极高压下的自由电子激光，它具有极好的相对论特性，其波长  $\lambda$  与相对论因子  $\gamma$  的平方成反比。

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{1}{2} a_w^2 \right) \quad (1.5)$$

另一种是集中反映强流电子束运行特点的器件，它的名字叫虚阴极振荡器。它是可以在非相对论条件下的几种 HPM 器件之一。这种器件产生微波振荡的条件是需要一个超过空间电荷限制电流的电流。即

$$I > I_{\text{scl}} = \frac{8.5}{1 + \ln r_0 / r_b} (\gamma^{2/3} - 1)^{3/2} \quad (1.6)$$

式中： $r_b$  是电子束半径； $r_0$  是传输管的半径； $I_{\text{scl}}$  是空间电荷限制电流，单位为 kA。严格地说，虚阴极振荡频率是与电流密度  $J$  有关的。假如频率  $f_0$  的单位是 GHz，电流密度  $J$  的单位是  $\text{kA} / \text{cm}^2$ ，则有

$$f_0 = 4.08 \sqrt{J / \beta \gamma} \quad (\text{相对论情况}) \quad (1.7)$$

$$f_0 = 4.08 \sqrt{J / \beta} \quad (\text{非相对论情况}) \quad (1.8)$$

#### 1.1.4 高功率微波源的分类

在大多数高功率微波源中微波的产生过程可以理解为空腔或波导简正模与电子束振荡固有模的相互作用。当这两模发生谐振时，微波就有效地产生了。按照这种观点，我们可以把高功率微波源分成为快波器件和慢波器件。

- 微波的产生取决于电子束振荡的固有模与相速大于光速的波导模的相互作用的微波器件称为快波器件，如回旋管和自由电子激光等。

- 微波的产生取决于电子束振荡的固有模与相速小于光速的波导模的相互作用的微波器件称为慢波器件，如行波管、返波管、速调管和契伦科夫器件等。

我们也可以从电子管与产生微波的运动特性来对微波器件分类。



● O型器件——这种器件中，电子沿外加磁场轴向漂移，如行波管、返波管、速调管和契伦科夫器件等。

● M型器件——这种器件中，电子漂移方向垂直于电磁场，如磁控管和磁绝缘线振荡器等。

● 空间电荷型器件——这种器件中，电子运动是基于超过空间电荷电流限制条件下的虚阴极振荡，如各种类型的虚阴极振荡器。

归纳上面的叙述，将高功率微波源分类列表于表 1-1。

表 1-1 高功率微波源分类

类 型 \ 器 件	慢波器件	快波器件
O型器件	相对论返波管 相对论行波管 相对论速调管 相对论渡越管 各式契伦科夫器件	自由电子激光 相对论回旋管 相对论回旋行波管 相对论回旋返波管 相对论回旋速调管
M型器件	相对论磁控管 磁绝缘线振荡器	
空间电荷型器件	各式虚阴极振荡器	

## 1.2 高功率微波源的研究进展

### 1.2.1 国外高功率微波源研究进展

高功率微波是一个新的研究领域，各发达国家都竞相研究，但重视程度最高，投资最大，进展最快的还是美国。1995年，美国空军国防科研管理局办公室启动了多学科大学研究创新计划，即 MURI 计划。该计划每年投资 300 万美元，为期 5 年，到 2000 年结束，总投资 1 500 万美元，是历史上最大的单项 HPM 基础研究计划。参加这个计划的有 9 所大学、3 个公司和 3 个国防部实验室。其中 9 所大学是研究的主力，他们是：得克萨斯技术大学、马里兰大学、加利弗尼亚大学(戴维斯市)、新墨西哥大学、康乃尔大学、加利弗尼亚大学(伯克利市)、斯坦福大学、密歇根大学和加利弗尼亚大学(洛杉矶市)。

MURI 计划的重要背景是它的军事应用价值。美国国防部对非致命武器非常感兴趣，国防部认为，如果真的能用这样的高功率微波武器装备部队，就可以远距离抑制侵略部队的通讯、监视、瞄准系统，同时双方都无人员伤亡。这个能力对低强度战斗和军事作战(而不是战争)特别重要，而且还具有空间对抗潜力。同时，这种技术的商业应用前景