

HPM

高功率微波

[美] James Benford

John Swegle

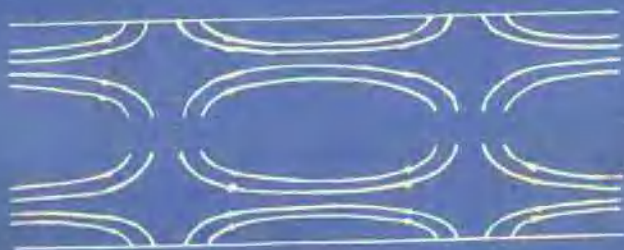
著

吴诗信 莫伯锦

译

刘盛纲 主审

校



电子科技大学出版社

高功率微波

〔美〕 James Benford

John Swegle

著

吴诗信 莫伯锦

译

刘盛纲 主 审

校

电子科技大学出版社

[川]新登字 016 号

内 容 提 要

本书对高功率微波(HPM)领域做了多角度的综合性介绍。如:HPM与普通微波领域在历史上和技术上有什么关系?HPM可能有什么应用,在HPM应用中会遇到哪些关键性问题?高功率源如何工作?实际上是否存在如术语所表明的那么多不同的源?他们的能力如何?其性能有什么限制?各种源共有的基本问题是什么?HPM正在向何处去?它应当向何处去?等等。本书是一部内容广泛的介绍性学术著作,可供高功率微波研究人员、微波器件用户、通讯研究以及高能物理工作者和有关专业院校师生学习和参考。

高功率微波

吴诗信等 译

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

中物院印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 字数 300 千字

1996年4月第1版 1996年4月第1次印刷

印数 500册

中国标准书号 ISBN7-81043-258-3

定价:23.00元

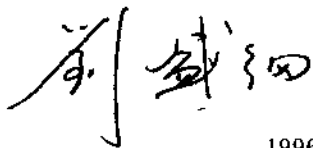
译者序

高功率微波技术是本世纪七十年代兴起的一门边缘学科,它是传统的微波管技术与脉冲功率技术相结合的产物。军事和科学研究对更高功率、更高能量、更高频率微波源的需求推动了这门学科的发展,使微波器件的功率在短短二十年内提高了三个数量级。目前,新的高功率微波器件还在不断涌现,旧的高功率微波器件正不断成熟与完善,广泛应用的可能性正明显增加,因而人们对这一新兴技术的兴趣正与日俱增。

《High power Microwave》一书的作者 James Benford 教授和 John Swegle 教授与美国著名的实验物理学家和理论物理学家,他们对高功率微波源进行了广泛的研究,对高功率微波技术的有关问题及应用前景也进行了积极的探索,在这一领域造诣颇深。他们在书中详细地讨论了各种源的机理、能力与限制,讨论了各种源共有的基本问题,讨论了高功率微波可能的应用及应用中可能碰到的关键问题。书中收集的参考资料也相当广泛,概括了当时高功率微波技术发展的最新水平。本书确实不失为一本难得的人门教材和有价值的参考书。

我们谨以此书的中译本奉献给国内同行和关心高功率微波技术的读者,相信它对于开拓我们的视野,加深对全局问题的理解会有所帮助。

由于时间仓促,译本中不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。



1996年4月

目 录

第一章 引 言	1
1.1 历史基础	1
1.2 HPM 运行特点	2
1.3 HPM 源的工程发展	5
1.4 世界研究工作评介	9
第二章 高功率微波的应用	15
2.1 引 言	15
2.2 定向能	15
2.3 雷 达	28
2.4 电子高能 RF 加速	31
2.5 等离子体加热	38
2.6 激光泵浦	45
2.7 功率束射	47
第三章 微波基础	57
3.1 引 言	57
3.2 波 导	59
3.3 谐振腔	70
3.4 微波相互作用	74
3.5 放大器和振荡器, 弱流运行态和强流运行态	88
3.6 相位和频率控制	90
3.7 小 结	92
第四章 基础技术	97

4.1	引 言	97
4.2	脉冲功率	98
4.3	电子束和电子层	107
4.4	天 线	120
4.5	诊断方法	131
4.6	HPM 设施	141
第五章	正交场器件	155
5.1	引 言	155
5.2	历 史	156
5.3	工作原理	157
5.4	实验装置的特点	162
5.5	研究中的问题	169
5.6	基本限制	178
5.7	MILO	182
5.8	小 结	187
第六章	O型契伦柯夫器件	192
6.1	引 言	192
6.2	历 史	193
6.3	工作原理	195
6.4	实验装置的特点	205
6.5	研究中存在的问题	208
6.6	基本限制	220
6.7	介电契伦柯夫脉塞和等离子体契伦柯夫脉塞	221
6.8	小 结	226
第七章	自由电子激光	240

7.1	引言	240
7.2	历史	241
7.3	工作原理	243
7.4	实验装置的特点	254
7.5	研究中存在的问题	262
7.6	基本限制	271
7.7	两级 FEL 和散射管	274
7.8	小结	275
第八章 电子回旋脉塞		287
8.1	引言	287
8.2	历史	288
8.3	工作原理	290
8.4	实验装置的特点	304
8.5	研究中存在的问题	309
8.6	基本限制	324
8.7	大轨道回旋管、磁旋管(magnicon)和潘尼管	327
8.8	小结	330
第九章 虚阴极振荡器		345
9.1	引言	345
9.2	历史	345
9.3	工作原理	346
9.4	实验装置的特点	351
9.5	研究中存在的问题和基本限制	358
9.6	先进 vircator	362
9.7	小结	372

第十章	相对论速调管	377
10.1	引 言.....	377
10.2	历 史.....	378
10.3	工作原理.....	379
10.4	实验装置的特点.....	384
10.5	基本限制.....	394
10.6	速调管的变型.....	397
10.7	小 结.....	401
第十一章	新兴技术	406
11.1	引 言.....	406
11.2	微波脉冲压缩.....	406
11.3	电磁导弹.....	414
11.4	用束—等离子体相互作用产生微波.....	418
11.5	光导开关.....	420
第十二章	总结和展望	429
12.1	目前水平.....	429
12.2	HPM 的未来方向	442

第一章 引 言

1.1 历史基础

近几年来,高功率微波已形成一门新技术,它既有一些新的应用,又能对现实的某些应用提供创新的方法。由于多种源的配合已使微波功率水平在量值上产生了飞跃,这些源或是把普通微波器件物理推向新的发展方向,或是运用一些全新的相互作用机制。与普通微波电子学随固体器件峰值功率容限受到固有限制而日益小型化的趋势相反,高功率微波产生却借助于现代强相对论电子束技术的巨大功率和能量的储备能力向着截然不同的方向发展。

在本书中,我们将引用术语“高功率微波”(或 HPM)来表示峰值功率超过 100MW、频率在 1 到 300GHz 之间,跨越厘米波和毫米波范围的那些器件。这个定义虽是人为的,但它可将功率不超过 100MW 的普通微波器件与现已达到 15Gw 之高的功率水平的一大批微波器件区分开来。

作为一门学科,HPM 是几个历史发展趋势集中的结果,如图 1.1 所示。微波是由人工产生(十九世纪八十年代由赫兹定义)的电磁波谱的第一部分。在二十世纪初,随着屏栅管(grided tube)的出现,无线电开始进入低频应用领域。到二十世纪三十年代,一些研究人员认识到利用与电路相联的谐振腔将可获得更高的频率。第一个腔型器件,即速调管(klystron)诞生于 1937 年。继之而来的是第二次世界大战期间的科技爆炸,包括磁控管(magnetron)的迅速发展,行波管(traveling wave tube, TWT)和返波振荡器(backward wave oscillator, BWO)的发明。所有这些源都是利用屏栅功率管的调制器(modulator)驱动的,在六十年代,研制成正交场放大器(crossedfield amplifier),七十年代则涌现出大量固体微波源,

此时微波管技术转向大量生产,研究工作缩减了。

二十世纪五十年代,Project sherwood 标志着用于能量产生的可控热核聚变研究的开始。与这项工作相配合的理论和实验研究导致对粒子与波相互作用的详尽认识。

	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990
电气技术		栅极管		调制器				脉冲功率	
普通微波		无线电		速调管 磁调管 TWT, BWO		正交场 放大器	固体 器件		
等离子体物理				熔融器件		强束			
高功率微波							• BWO • CARM 回旋管 • FEL • TWT • 相对论磁控管 • 相对论速调管 • 虚阴极振荡器 • 多波契伦柯夫发生器 • 反射三极管 • 相对论衍射发生器		

图 1.1 高功率微波出现的背景

在六十年代,随着脉冲功率(pulsed power)的引入使电技术得到扩展,导致电流超过 10kA、电压 1MV 甚至更高的带电粒子束的产生。这些强流束已用于核武器效应模拟、惯性约束聚变及其它高能密度物理的研究中。有效利用强相对论电子束的一个新的困惑是,如何将在等离子体物理研究中获得的波-粒子相互作用知识充分地运用于微波产生。由于这个血统缘故,HPM 界的“文化”更加接近于等离子体物理和脉冲功率界的文化,而不是普通微波管制造业的文化。

1.2 HPM 运行特点

利用高电压产生能量接近于电子静止能量 510KeV 的相对论

电子束对 HPM 具有以下几个重要意义：第一是引入了专门以相对论效应为基础的器件，例如回旋管* (gyrotron)；第二是更强烈的能量相关性，与电压相关性相反，器件的输出频率是可调的，如自由电子激光 (free electron laser, FEL) 和回旋自共振脉塞 (Cyclotron autoresonant maser, CARM)；第三是发展了诸如虚阴极振荡器 (virtual cathode oscillator, vircator) 和相对论速调管 (relativistic klystron) 这样一些伴随高电压运行而又主要依赖于很强束流的器件；最后，很多种微波源，象磁控管、BWO 和 TWT，都是普通微波源的后代，尽管如此，由于利用较高的工作电流及在相互作用区的很强的束——场耦合，这种器件的相对论工作产生了越来越高的功率。

由于冲击源 (impulse source)——一种脉宽很窄辐射频带很宽的高功率脉冲发生器——的引入，目前已使 HPM 的范围有所扩展。它的一种典型器件可产生宽度 $\sim 1\text{ns}$ 、功率 $\sim 100\text{MW}$ 的脉冲，发射的微波只有几个周期，因而带宽与频率的量级相同。这样的脉冲通常都是利用快速电路天线的直接激励来产生，而不是利用电子束方法。

近几年在越来越高的频率下产生高的功率水平而取得了巨大发展。苏联研究人员采用一系列新型器件——根据直径等于若干微波波长的大相互作用区原理研制的多波契伦柯夫 (multiwave cherenkov) 和相对论衍射发生器 (relativistic diffraction generator)——取得了创造世界纪录的成就。在美国，借助于 FEL 抽取高电压束能的能力，在高频条件下产生了高功率水平。对这些工作成就的度量标准是峰值微波功率与信号频率平方的乘积， P_f^2 。这个因子的物理意义是，从固定尺寸天线发射的微波信号在

* 虽然回旋管运行机制的本质是电子在磁场中旋转的回旋频率的相对论变化，但回旋管实际上也能够做到在 500keV 以下明显的相对论电压下工作。

目标上的功率密度正比于 Pf^2 。图 1.2 表示根据这个因子给出的微波源发展的概略历史。普通微波器件(“管子”)从 1940 年到 1970 年的三十年间, pf^2 提高了三个数量级,但此后的进展却很小。普通器件,特别是速调管,仍在继续发展,尽管速度很慢。HPM 器件从 $pf^2 \sim 1$ 起步,在二十年里前进了三个数量级。迄今为止,具有最高性能因子的器件是频率 46GHz、辐射输出功率 3.5GW 的相对论衍射发生器(见第六章)。

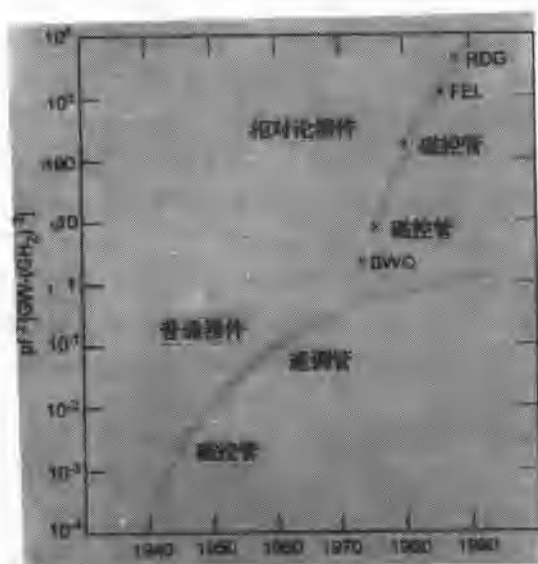
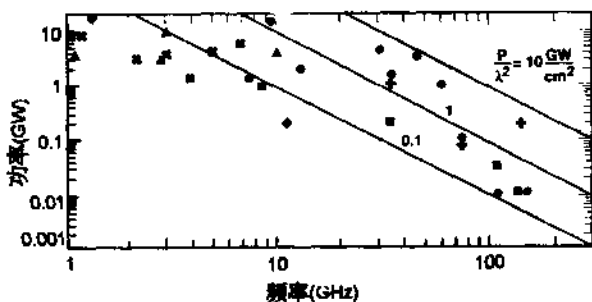


图 1.2 从品质因子 pf^2 看微波器件的发展



- BWOs, MWCGs, RDGs, + FELs, ▲ 磁控管
- 回旋管, CARMs, ★ 虚阴极振荡器, △ 速调管

图 1.3 1990 年脉冲源的峰值功率

图 1.3 表示具有代表性的各种高功率源产生的峰值功率与频率的函数关系,因子 pt^2 改用 p/λ^2 来表示。在高频时源的功率大致随 λ^2 下降,但对于 10GHz 以下的低频段没有出现明显的倾向。

HPM 源的极限仍是未知的。从一个简单的脉冲发生器就可获得高到大约 10TW 的电脉冲,用几百万美元可以从市场上买到 1TW 的发生器。因此按中等能量提取效率 10% 计算,可以得到 100GW 的峰值功率。预计今后十年之内将会达到这个功率水平。但这仍然需要在对具体器件功率极限的研究并克服击穿极限和象伪模生成这类源的特殊问题方面取得重大进展。

1.3 HPM 源的工程发展

到目前为止,HPM 源的发展基本上具有一种“马力竞赛” (“horse-power race”) 的特点。其重点在于提高功率和能量并达到更宽的频段。在很多情况下,为使这些器件成为实用工具的工程研

制,认真地说刚刚开始,要回答的最基本问题是在重复运行中器件的效率和平均功率。值得注意的是,习惯上是根据源的峰值瞬时功率效率(instantaneous power efficiency)表述 HPM 器件的效率,并定义为峰值微波功率对同一瞬间电子束峰值电压和电流乘积的峰值电子束功率的比值。这是与由微波脉冲能量对电子束脉冲能量的比值定义的能量效率(energy efficiency)相对照的。以获得大信号行为的详细知识为目的的一些积极的研究计划在某些条件下已取得使功率效率达到 40%—50% 的成就,但在大多数情况下,功率效率只能达到 10% 左右。在文献中不常引用的能量效率是很低的,因为对很高功率的微波,普遍发现的趋势是当电子束连续通过器件时微波被过早的截断。

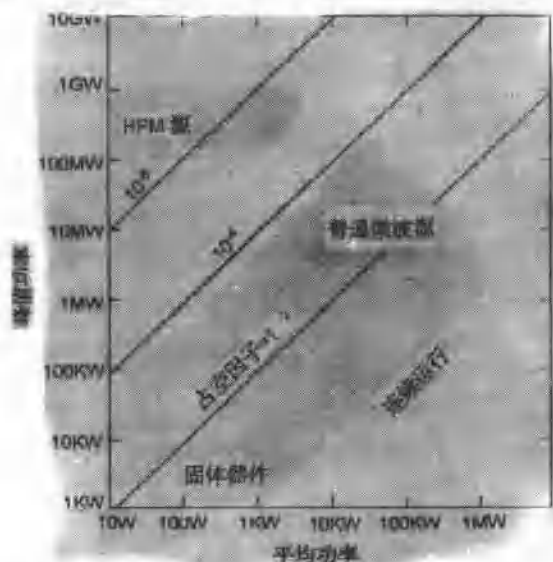


图 1.4 1991 年的微波峰值功率与平均功率的关系。高功率微波区由图 15 确定

在图 1.4 中给出普通微波源和 HPM 源峰值功率和平均功率特征的比较。图中曲线表示器件峰值功率与其平均功率的关系。在这个参数空间中,普通器件占据了很大的范围,而 HPM 器件尚未发展到能产生相当高平均功率的水平。这主要因为普通源已发展为具有专门应用的重要工具,例如雷达和粒子加速器,而 PHM 源至今还没有发展到这个程度。斯坦福直线加速器中心(SLAC)的速调管是普通类器件中功率最高的一种($\sim 100\text{MW}$, 10kW)。相对论磁控管是平均功率最高的 HPM 器件(1GHz , 6kW)。对 HPM 源,占空比(duty factor)——脉冲长度与脉冲重复率的乘积——是 10^{-6} 量级(最大 10^{-5}),但对普通器件来说,它可以从 1 变化到大约 10^{-4} 。如图 1.5 所示,对重复运行的 HPM 源目前还没有做多少工作。我们希望由 HPM 应用前景提供的动力能够推进重复运行的 HPM 源的发展,在未来几年里使其平均功率达到 100kW 的水平。

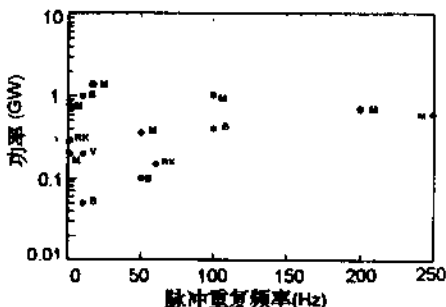


图 1.5 重复运行 HPM 源的发展。M 表示磁控管 V 表示虚阴极振荡器, B 是返波振荡器, RK 表示相对论速调管

图 1.6 对普通源与 HPM 源作了另一个比较。只考虑脉冲型器件(即不涉及连续运行),普通管一般产生 $\sim \text{MW}$ 功率(对 $\sim \mu\text{s}$ 宽

度), 给出 1 焦耳/脉冲的能量, SLAC 的速调管已发展到 67MW, 3.5 μ s, 235J。这已接近于人为定义的 HPM(>100MW) 的边界。HPM 源在二十世纪七十年代达到几十焦耳, 八十年代达到几百焦耳, 到九十年代可超过 1 千焦耳(相对论速调管放大器, RKA)。通过增加 ~100ns 脉冲宽度时的峰值功率, 已使这些目标得到实现。增加脉冲宽度也是获得更高能量的一个显而易见的方法, 但它将面临一些技术上的困难(见第 12 章)。在图 1.6 中标出的器件都是窄带宽的器件。具有很短脉冲宽度的宽带脉冲源, 功率水平降落到 \leq 100MW 的范围, 脉冲能量 < 1J。

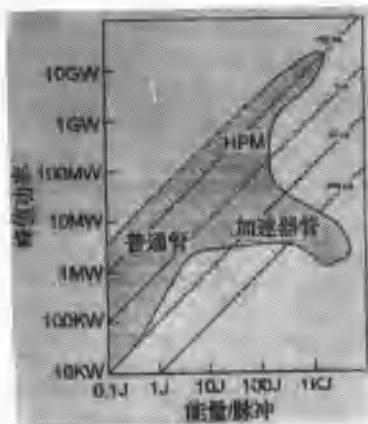


图 1.6 1991 年脉冲微波源的能量。只给出窄带宽源, 没有给出脉动源

HPM 源日渐增多的应用也将提出可靠性和寿命的问题。但就 HPM 源在科研环境中的典型运用来说, 其重要的可靠性和寿命问题很少引起人们的重视。例如, 以大多数 HPM 实验中 10^{-5} 托的真空度与普通真空管中小于 10^{-7} 托的真空度相比, 大家都知道更高

的气压会造成寿命问题。进一步看,将来还会出现带宽、增益、线性、相位和幅值的稳定性,以及噪声等复杂的问题。

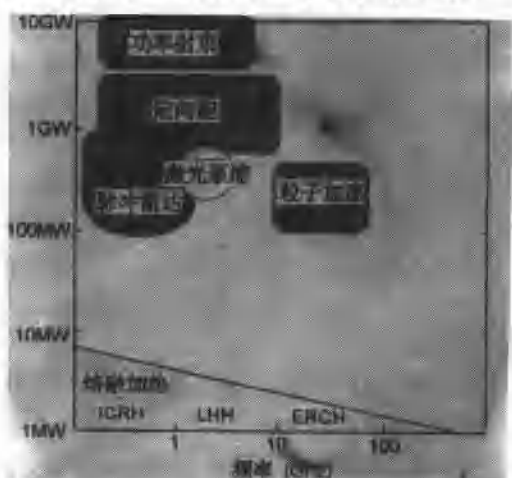


图 1.7 HPM 应用的定义域,区域划分只是示意性的,不同的应用实际上在很宽区域内变化

HPM 应用的参数空间如图 1.7 所示。其中定向能和冲击雷达的功率水平是推测的。功率水平要求最高的是地球——空间功率束射和定向能武器。所有这些应用几乎全部限制在低于 10GHz 的频率范围内。功率大约为 100MW 的直线对撞加速器要求的频率略高一些(10—30GHz)。等离子体的电子回旋共振加热是一种极高频率的应用(大于 10GHz),而且要求大约 1MW 的连续或平均功率。

1.4 世界研究工作评介

美国和苏联已制订了最全面的 HPM 研究计划,不过欧洲、日本以及中国也都进行了有效的工作。欧洲的微波研究最显著的是在德国、法国和瑞士。总的来说,在欧洲最普遍的一种 HPM 源是回