

High Power Microwaves
Second Edition

高功率微波

(第2版)

[美] James Benford John A. Swegle
Edl Schamiloglu 著
江伟华 张驰 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高 功 率 微 波

(第 2 版)

James Benford

[美] John A. Swegle 著

Edl Schamiloglu

江伟华 张 驰 译

國 防 工 業 出 版 社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2008-067号

图书在版编目(CIP)数据

高功率微波 / (美) 本福德 (Benford, J.), (美) 斯威格 (Swegle, J. A.), (美) 谢米洛格鲁 (Schamiloglu, E.) 著; 江伟华, 张驰译. —2 版. —北京: 国防工业出版社, 2009. 4

ISBN 978-7-118-06227-4

I. 高... II. ①本... ②斯... ③谢... ④江... ⑤张... III. 大功率-微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 025855 号

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

All Rights Reserved

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×960 1/16 印张 27½ 字数 552 千字

2009 年 4 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

译者序

高功率微波在国防、能源、航天和高能物理等领域具有广阔的应用前景。因此,很多国家,特别是发达国家对高功率微波的相关研究开发都非常重视。近年来,我国在这个领域的发展正在迅速缩短与领先国家之间的差距。

本书的前两位作者(J. Benford 和 J. Swegle)于 1992 年出版了《高功率微波》(第 1 版)。多年来,这本书为包括译者在内的很多工作于这个领域的研究人员和学生提供了很大的帮助。为了反映十几年来高功率微波领域发生的进展和变化,他们和 Dr. E. Schamiloglu 一起,在对第 1 版进行大篇幅的修改和补充的基础上,于 2007 年出版了《高功率微波》(第 2 版)。它不仅在内容上反映了最新的技术信息,而且在形式上更接近于一本教科书,几乎各章都附有习题。另外,还有一个重要的区别,与第 1 版较详细地论述各种微波器件的技术细节相对照,第 2 版的着眼点相对侧重于高功率微波领域的一般性问题和系统设计方法。

本书较完整地讲解了高功率微波领域的主要概念和方法。内容由浅入深,非常适合做研究生教材或自学参考书,也可供高功率微波领域的科研人员 and 工程技术人员学习或参考。书末的“高功率微波公式集”对实验室工作应该具有很高的实用价值。本书在某种意义上对传统微波领域的工作人员也有一定的参考意义。另外,它还可以让相关应用领域,如国防、核聚变和加速器等领域的技术人员了解高功率微波的最新动态。

译者与原著作者之间曾经有过多年的交流与合作,因此,本书的翻译工作从一开始便得到了原著作者的热情支持与配合。在他们的帮助下,原文中的个别不妥或不清晰的地方在译文中得到了修改或补充。另外,原文中的一些印刷错误也在译文中得到了及时更正。三位作者还为中文版的出版作了原著者序。在此特向原著作者 J. Benford、J. Swegle 和 E. Schamiloglu 表示衷心感谢。

由于译者水平有限,译本中不妥和错误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

江伟华,张驰
2008 年 11 月

原作者序

我们非常荣幸地获悉《高功率微波》(第2版)将由我们的朋友兼同事,清华大学的江伟华教授翻译并由国防工业出版社出版。这次中文译本的出版应该具有两方面的意义。首先,它为更多的中国读者提供了阅读我们的书的机会。其次,继1994年的第1版的中文译本(电子科技大学翻译出版)之后,在江教授的努力下,有关高功率微波的中文词汇得到了进一步的完善。

在翻译过程中,江教授就原书的部分修改、补充和勘误之处提出了很多宝贵的意见。因此,在某种意义上,这本中文译本应该较原书更加准确和清晰。我们借此机会向所有对原书提出了宝贵意见的同事表示感谢,特别是江教授,他的语言和专业知識为中文译本增添了价值。今后的增补和勘误将不断在 Microwave Science 的网站 <http://home.earthlink.net/~jbenford/index.html> 上更新。

2008年7月,我们应邀出席了在西安召开的第17届国际高功率粒子束会议。在会议之前,我们中的二人(JB和JS)在西安举办了为期四天的高功率微波讲座,第三人(ES)作了有关高功率微波的特邀报告。这些活动得到了中国工程物理研究院流体物理研究所和应用电子学研究所,以及西北核技术研究所的支持,在邓建军教授和石金水教授的大力协助下,经江教授具体安排才得以实现。在此我们对所有给与们多方协助的同事表示感谢。同时感谢电子科技大学的同事,特别是蒙林教授,以及复旦大学的刘克富教授和他的学生刘冬冬,对他们在我们旅行途中所给予的帮助表示谢意。

13年前,我们曾经应邀在北京应用物理与计算数学研究所讲学。当时中国刚开始大力发展高功率微波研究。而2008年的访问让我们惊喜地看到中国13年来在这个领域里取得的进步,特别是中国工程物理研究院、西北核技术研究所、电子科技大学(他们在刘盛刚院士的带领下进行了有关回旋器件的研究)和国防科技大学。值得一提的是,我们很高兴与国防科技大学的舒挺教授重逢。13年前在北京听我们讲课时他还是研究生。

今年他带着自己的研究生来到西安,让我们有机会结识了中国新一代的高功率微波学者。我们发现,13年以后的今天,中国学者向我们传递的信息已经与我们向他们传递的信息同样重要。我们期望在今后共同推进这个学科向前发展的过程中,能够进一步交流和协作。

James Benford

John Swegle

Edl Schamiloglu

2008年10月

原书序

本书第2版在以下方面与1992年的第1版有所不同。

(1)它是一本教科书,可以用于教材或自学使用。基本上每章都配有习题,而且教师可以从作者那里得到习题解答。

(2)增加了第2章(高功率微波系统),它讲述了复杂系统的设计方法,包括一个称作“超系统”的具体实例。

(3)增加了第6章(超宽带系统),它讲述了一类新型高功率辐射源,包括很多第1版出版以后出现的新技术和新应用。

(4)在书末增加了便于使用的高功率微波公式集。

(5)每一章都重新编写,不仅仅是更新。

(6)尽管增添了许多新内容,本书的篇幅与第1版大致相同。请随时参照 Microwave Sciences 网站,以获得最新习题、更新和勘误信息:<http://home.earthlink.net/~jbenford/index.html>。

出版本书的目的是向读者提供有关高功率微波的综合论述。通过尽量压缩本书的篇幅,我们希望读者能够利用它对整个高功率微波领域有一个比较全面的了解,而不是像看其他专著那样只阅读其中自己感兴趣的章节。本书的内容丰富,而且论述由浅入深。但是它又不是初级入门读物。对技术细节感兴趣的读者,可参照各章的参考文献或相关读物。

本书的读者对象包括:高功率微波领域的研究技术人员,对高功率现象感兴趣的常规微波工程技术人员,相关领域的大学生和研究生,以及相关领域的管理或指挥人员。

本书的起点是我们在美国和欧洲讲学时使用的材料。在不断扩充和更新其内容的过程中,我们对高功率微波领域的认识也在发生改变。我们的着眼点逐渐从具体的微波器件转向高功率微波领域的一般性问题,这些问题成为本书论述的焦点。

(1)高功率微波与传统微波领域之间的关联在哪里?

(2)高功率微波的主要应用是什么?这些应用对微波源提出的具体要求是什么?

(3)高功率微波源的基本工作原理是什么?高功率微波器件的名称很复杂,是不是真有那么多种微波源?各种微波源的特长和局限因素在哪里?

(4)各种微波源所共有的主要问题是什么?

我们认为有关这些问题的讨论对本书(以及读者)是非常有益的,因为我们(作者)的研究经历具有很强的互补性。我们分别参与过不同种类微波源的研制工作。作者之一(James Benford)主要从事实验研究,另一位作者(John Swegle)主要从事理论研究,第三位作者(Edl Schamiloglu)同时从事两方面的工作。

我们建议每一位读者都阅读第1章,它概述了高功率微波的发展历史,并将高功率微波与传统微波进行了比较。本书的一个主要观点是高功率微波的发展方向可以分为两类,即应用型和技术型。新增加的第2章对两种类型都有所论述。第3章讨论高功率微波的应用。其他各章包含不同技术内容。第4章是微波基础,它包含以后各章用到的很多基础概念。第5章描述的是与微波源密切相关的仪器和设备,它们的功能包括为微波源提供电功率和电子束、向外部辐射输出微波和测量微波参数等。第6章的内容是超宽带技术。第7章~第10章论述几种主要的微波源。

本书的准备工作得到了以下同事的热心协助,在此特表感谢:

Gregory Benford	Steven Gold
Dominic Benford	Bill Prather
David Price	Edward Goldman
Keith Kato	David Giri
Carl Baum	William Radasky
Jerry Levine	Douglas Clunie
Kevin Parkin	Charles Reuben
Bob Forward	Richard Dickinson
George Caryotakis	Bob Gardner
Mike Haworth	Daryl Sprehn
Yuval Carmel	Sid Putnam
Mike Cuneo	Ron Gilgenbach
Larry Altgilbers	

Hilary Benford 为本书的图文编辑工作付出了不懈的努力,在此表示特别感谢。

James Benford
John Swegle
Edl Schamiloglu
2006年7月

目 录

第 1 章 引论	1	参考文献	34
1.1 高功率微波的起源	1	第 3 章 高功率微波的应用	35
1.2 高功率微波的基本方式	3	3.1 引言	35
1.3 高功率微波的发展趋势	8	3.2 高功率微波武器	35
1.4 相关读物	10	3.2.1 高功率微波武器的 一般特性	37
参考文献	10	3.2.2 电磁炸弹	43
第 2 章 高功率微波的系统设计	12	3.2.3 第一代微波武器	44
2.1 用系统观点看高功率微波	12	3.2.4 高功率微波武器的 作用	47
2.2 系统概观	14	3.2.5 电磁恐怖主义	49
2.3 将子系统结合为系统	15	3.2.6 能量耦合	49
2.3.1 前级电源	16	3.2.7 电磁防护	52
2.3.2 脉冲功率	18	3.2.8 微波对电子器件的 破坏作用	52
2.3.3 微波源	19	3.2.9 小结	55
2.3.4 模式转换器和天线	20	3.3 高功率雷达	55
2.4 系统的关键问题	21	3.4 功率传送	56
2.5 高性能系统的设计方法	22	3.5 太空推进器	62
2.5.1 NAGIRA:超系统 的模型机	23	3.5.1 向地球轨道发射	62
2.5.2 超系统的构成	25	3.5.2 从地球轨道向星际轨 道和宇宙空间发射	68
2.5.3 天线与模式转换器	26	3.5.3 大型太空飞行器	72
2.5.4 返波振荡器 (BWO)	27	3.6 等离子体加热	73
2.5.5 脉冲功率子系统	28	3.7 高能粒子加速器	77
2.6 小结	33	习题	82
习题	33		

参考文献	84	4.9 放大器与振荡器、强电流 与弱电流工作模式	132
第4章 微波基础知识	88	4.10 相位与频率控制	134
4.1 引言	88	4.11 小结	135
4.2 电磁学基本概念	88	习题	135
4.3 波导管	90	参考文献	137
4.3.1 方形波导模	92	第5章 主要相关技术	139
4.3.2 圆形波导模	97	5.1 引言	139
4.3.3 波导管与谐振腔的 功率容量	99	5.2 脉冲功率	140
4.4 周期性慢波结构	105	5.2.1 磁场储能	144
4.4.1 轴向变化的慢波 结构	106	5.2.2 磁通量压缩	145
4.4.2 角向变化的慢波 结构	109	5.3 电子束和电子层	149
4.5 谐振腔	114	5.3.1 阴极材料	149
4.6 强流相对论电子束	117	5.3.2 电子束二极管	152
4.6.1 二极管中的空间 电荷限制电流	118	5.4 微波脉冲压缩	154
4.6.2 强流二极管中的 束流箍缩	120	5.5 天线与传输	158
4.6.3 漂移管中的空间 电荷限制电流	120	5.5.1 模式转换器	158
4.6.4 有限轴向磁场中的 电子回旋轨道	122	5.5.2 天线的基础知识	159
4.7 磁绝缘电子层	123	5.5.3 窄带天线	162
4.8 产生微波的相互作用原理	124	5.5.4 宽带天线	166
4.8.1 基本相互作用 过程	124	5.6 诊断	167
4.8.2 O型器件中的 相互作用	126	5.6.1 功率	168
4.8.3 M型器件中的 相互作用	130	5.6.2 频率	168
4.8.4 空间电荷器件	130	5.6.3 差频测量	170
		5.6.4 相位	171
		5.6.5 能量	171
		5.7 高功率微波设施	173
		5.7.1 室内设施	173
		5.7.2 室外设施	175
		5.7.3 微波安全事项	177
		5.7.4 X射线安全事项	179
		习题	180
		参考文献	180

第 6 章 超宽带系统	183		
6.1 超宽带的定义	183		
6.2 超宽带开关技术	186		
6.2.1 火花隙开关	186		
6.2.2 固态开关	189		
6.3 超宽带天线技术	192		
6.4 超宽带系统	194		
6.4.1 中频系统	194		
6.4.2 宽频系统	197		
6.4.3 超频系统	197		
6.5 小结	200		
习题	200		
参考文献	200		
第 7 章 相对论磁控管与磁绝缘线 振荡器	202		
7.1 引言	202		
7.2 历史	203		
7.3 设计原理	204		
7.3.1 磁控管和 CFA 器件 的“冷”频率特性	207		
7.3.2 工作电压与外加 磁场	211		
7.3.3 磁控管的特性	213		
7.3.4 磁控管设计原理 的小结	215		
7.4 工作特性	217		
7.4.1 固定频率磁控管	218		
7.4.2 频率可调磁控管	220		
7.4.3 可重复工作的高平均 输出功率磁控管	221		
7.4.4 采用磁控管的高 功率微波系统			
			MTD-1 和 Orion
			225
		7.5 主要研究课题	226
		7.5.1 脉冲缩短现象	227
		7.5.2 峰值功率:多器件 的锁相和透明阴 极磁控管	229
		7.5.3 转换效率:轴向损失 电流的抑制和微波 的提取方法	231
		7.6 物理极限	233
		7.6.1 功率极限	233
		7.6.2 效率极限	236
		7.6.3 频率极限	238
		7.7 磁绝缘线振荡器	238
		7.8 正交场放大器	242
		7.9 小结	242
		习题	243
		参考文献	245
		第 8 章 返波振荡器,多波 Cerenkov 发生器,O 型 Cerenkov 器件	249
		8.1 引言	249
		8.2 历史	250
		8.3 设计原理	252
		8.3.1 慢波结构:尺寸与 频率	254
		8.3.2 引入电子束:不同 器件中的共振相互 作用	256
		8.3.3 启动电流与增益	261
		8.3.4 峰值输出功率:数值 模拟的意义	264
		8.4 工作特性	268

8.4.1	MWCG、MWDG 和 RDG	269	9.3.7	后加速相对论速 调管的特性	306
8.4.2	返波振荡器 (BWO)	272	9.4	工作特性	307
8.4.3	行波管(TWT)	275	9.4.1	高阻抗弱相对论速 调管	307
8.5	主要研究课题	278	9.4.2	高阻抗相对论 速调管	311
8.5.1	脉冲缩短现象	278	9.4.3	低阻抗速调管	315
8.5.2	使用弱磁场的 BWO	280	9.4.4	后加速相对论 速调管	322
8.5.3	以提高效率为目的 的 SWS 轴向变化 ..	281	9.5	主要技术课题	324
8.5.4	其他 O 型器件:DCM、 PCM 和等离子体加载 BWO	281	9.5.1	高功率多束速调管 和层状束速调管	324
8.6	基本极限	282	9.5.2	低阻抗环状束 速调管	325
8.7	小结	283	9.6	物理极限	329
	习题	284	9.6.1	笔形束速调管	329
	参考文献	287	9.6.2	环状束速调管	330
第 9 章	速调管与后加速相对论速 调管	293	9.6.3	后加速相对论 速调管	332
9.1	引言	293	9.7	小结	332
9.2	历史	295		习题	332
9.3	设计原理	296		参考文献	335
9.3.1	电压、电流和磁场 ..	296	第 10 章	虚阴极振荡器、回旋管、 电子回旋脉塞和自由电 子激光	339
9.3.2	漂移管半径	297	10.1	引言	339
9.3.3	速调管谐振腔	298	10.2	虚阴极振荡器	340
9.3.4	电子速度的调制、 电子束的群聚和谐 振腔的间距	300	10.2.1	虚阴极振荡器的 历史	340
9.3.5	低阻抗相对论速调 管中的电子束调制 ..	302	10.2.2	虚阴极振荡器的 设计原理	341
9.3.6	速调管的电路 模型	304	10.2.3	虚阴极振荡器的	

	基本特征·····	346			
10.2.4	改进型虚阴极 振荡器·····	348		10.4.2	自由电子激光 的设计原理·····
10.2.5	虚阴极振荡器的 物理极限和发展 前景·····	356		10.4.3	自由电子激光 的基本特性·····
10.3	回旋管与电子回旋脉塞·····	356		10.4.4	自由电子激光 的发展前景·····
10.3.1	回旋管和电子回 旋脉塞的历史·····	357		10.5	小结·····
10.3.2	回旋管的设计 原理·····	358			习题·····
10.3.3	回旋管的工作 特性·····	364			参考文献·····
10.3.4	回旋自共振脉塞 与回旋速调管·····	368	附录		高功率微波公式集·····
10.3.5	电子回旋脉塞的 发展前景·····	372		A.1	电磁学·····
10.4	自由电子激光·····	373		A.2	波导管和谐振腔·····
10.4.1	自由电子激光的 历史·····	373		A.3	脉冲功率和电子束·····
				A.4	微波源·····
				A.5	传播和天线·····
				A.6	应用·····
					索引与中英文对照·····

第 1 章 引 论

新版《高功率微波》与 1992 年的第一版^[1]相比在很大程度上做了修改。旧版本是反映当时研究状况和发展方向的一部技术性专著。在某些领域里,高功率微波已经从一个有前景的新兴技术进入实际应用的阶段。目前,不仅美国、俄罗斯和西欧各国(包括英国、法国、德国和瑞典等)正在进行高功率微波领域的研究、制作和应用,而且中国(包括台湾地区)及一些发展中国家和地区(如印度、韩国等)也在开展这方面的工作。

我们在本书里采用了一个新的系统概念。在高功率微波领域里,近年来,一个重要的转变就是越来越强调系统的整体优化。人们已普遍认识到,只有将高功率微波系统看做一个整体装置,它的输出功率和脉冲能量才能得到进一步的改善,而且高功率微波的用户方面也正是这样期待的。人们不能再将系统细分成各个组成部分,然后分别对其进行独立优化。根据系统概念,首先要从应用方面的各种条件限制开始考虑,然后决定子系统的构成和它们之间的关系,同时适当考虑辅助设备的要求。

为了理解这个新的概念,建议读者在阅读有关具体技术内容之前,先从以下两章开始读起。第 2 章(高功率微波的系统设计)从方法论的角度描述了如何通过部件的选择构建一个高功率微波系统的过程。第 3 章(高功率微波的应用)给出了这些系统应该满足的必要条件。

两个版本之间的另一个主要的区别是,新版可以作为学习高功率微波的教科书或自学参考书。因此,很多章的末尾都给出了习题(如果读者希望得到这些习题的答案或其他习题,请访问以下地址 <http://home.earthlink.net/~jbenford/index.html>)。

另外,本书还在以下方面有所更新:

- (1)增添了一个非常有用的高功率微波公式集;
- (2)增添了一章专门论述超宽带系统。

1.1 高功率微波的起源

高功率微波是近年出现的一项新技术,它不仅开创了新的应用领域,而且也为已有的应用研究提供了新的方法和途径。将传统微波器件高功率化,或利用全新的相互作用机制,高功率微波研究使微波功率得到了飞跃式的上升。高功率微波研究在功率和能量上

极大地受惠于近年来强流相对论电子束技术的发展,所以它的发展方向与传统微波电子学完全相反。后者逐步趋于小型化,而且由于采用固体器件,因而从本质上限制了峰值功率。

高功率微波的定义是:

- (1) 峰值功率超过 100 MW;
- (2) 辐射波长在厘米至毫米范围,即频率在 1GHz ~ 300 GHz。

这个定义并不是很严格的,而且没有对高功率微波与传统微波之间的界线进行明确划分,因为后者(如速调管)的峰值功率也能超过 100 MW。但相比之下,高功率微波的最大输出已经达到 15 GW。

如图 1.1 所示,高功率微波是几个相关领域发展的产物。1880 年,Hertz 第一次产生了人造微波。20 世纪初期,随着栅极电子管的出现,低频领域的无线电通信进入了实用阶段。30 年代,研究人员发现,通过使用连接在一起的谐振腔可以得到较高的频率,并因此于 1937 年发明了第一个谐振腔器件——速调管。在此后的第二次世界大战期间,微波技术得到了迅猛的发展,其中包括磁控管的改进,以及行波管(TWT)和返波振荡器(BWO)的发明。当时,这些器件主要由使用栅极功率电子管的调制器驱动。60 年代出

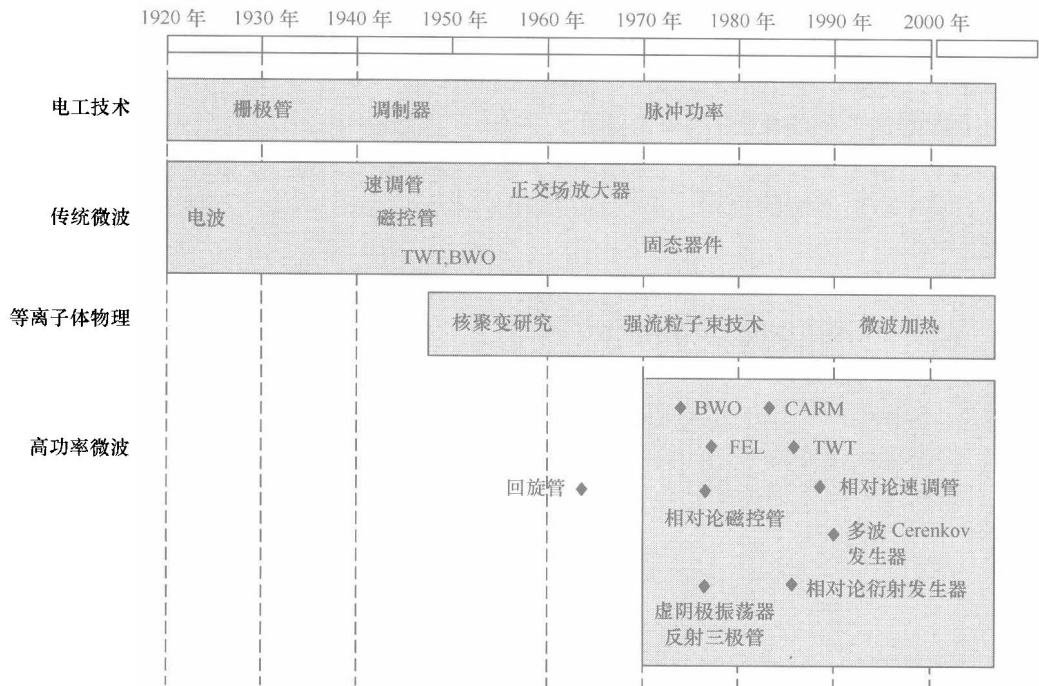


图 1.1 历史背景与高功率微波的出现

现了正交场放大器。随后,70年代出现了大量的固体器件微波源,它们的体积非常小,但输出功率有限。到这时为止,微波管技术已经走向批量生产,研究开发的规模便逐渐萎缩。

20世纪50年代,在致力于可控热核聚变的研究过程中,人们对粒子和电磁波之间的相互作用有了更详细和深入的了解,并逐渐发展到利用回旋管产生频率超过100 GHz的高平均功率微波。到60年代,脉冲功率已经作为电工技术的一部分,能够为人们提供电压高于1 MV、电流超过10 kA的带电粒子束。这些强流粒子束被用于核武器效应模拟、惯性约束聚变和其他的高能密度物理研究。强流相对论电子束的出现完成了高功率微波所需要的最后一项准备工作,同时它也使等离子体物理学研究领域中的波粒相互作用理论运用于有关微波的产生过程。由于这样的历史背景,高功率微波与等离子体物理和脉冲功率技术之间的关系,比它与传统微波的关系还要密切。其后果之一是高功率微波在解决它所面临的脉冲缩短问题时,向传统微波技术借鉴材料、表面和真空技术的过程十分缓慢。

1.2 高功率微波的基本方式

早期的高功率微波源是从传统微波源发展而来的,如磁控管、返波振荡器和行波管等。在这些器件中,输出功率的提高是通过增加工作电流和增强束场耦合实现的。

使用高电压产生的相对论电子束(电子的动能等于或大于它的静止能量约510 keV)对于高功率微波的发展产生了深远的影响。当然,更重要的是引进了新的器件,如虚阴极振荡器和相对论速调管等,它们在原理上依赖于高电压和强束流。另一方面是进一步开发了以相对论效应为基础的器件,其中最著名的是回旋管。而且还有可以通过能量(而不是速度)控制输出频率的器件,如自由电子激光(FEL)和回旋自谐振脉塞(CARM)。

高功率微波源也包括短脉冲,即持续时间非常短、频带很宽的高功率辐射。它通常被称为超宽带(UWB),功率一般在1 GW左右,持续时间约为1 ns,只相当于微波辐射的几个周期。因此,带宽与频率同一量级,大约为1 GHz^[2]。这种脉冲是通过快速电路对天线直接激励产生的,而不像其他微波源那样必须经过电子束。虽然超宽带源的峰值输出功率水平可以与窄带源相比,但由于脉冲很短,输出能量一般比较低。

到20世纪90年代为止,曾经有过高功率微波的辉煌时期。这个阶段的研究以使用庞大的实验装置为特色,其结果不仅在输出功率方面,而且在输出频率方面取得了大幅度的提高。前苏联和俄罗斯的研究者们使用一系列的新器件,不断地创造了新纪录。这些器件包括多波Cerenkov发生器(MWCG)、多波衍射发生器(MWDG)和相对论衍射发生器(RDG),它们都具有远大于微波波长的口径和很大的相互作用空间。在美国,低频段的相对论磁控管和速调管、高频段的自由电子激光分别获得了高功率输出。衡量这些进展

的一个参数是品质因子,它等于峰值微波功率乘以频率的平方,即 Pf^2 。图 1.2 描绘了由这个品质因子表示的微波源的发展过程。从 1940 年到 1970 年,传统微波器件(微波管)将 Pf^2 提高了三个数量级,在那以后却没有明显的进展。虽然发展速度缓慢但有些传统器件(特别是速调管)的品质因子仍在继续提高。高功率微波从 Pf^2 约为 1 起步,并在之后的 20 年里又将 Pf^2 提高了三个数量级。到目前为止,品质因子最高的装置是自由电子激光,它在频率 140 GHz 的最大输出功率为 2 GW。

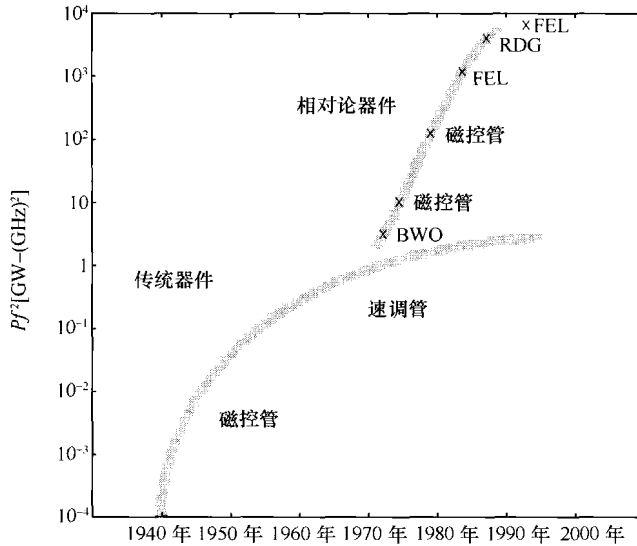


图 1.2 通过品质因子 Pf^2 看各种微波器件的发展历史

图 1.3 给出了具有代表性的高功率微波源产生的峰值功率与频率的关系。当频率较高时,许多微波源的峰值功率与 f^2 成反比。但对低于 10 GHz 的频率范围,这个趋势并不明显。那么,为什么是 Pf^2 的关系呢? 大体可以解释为输出功率与谐振腔的截面成正比,而截面又与波长的平方成正比。另外,波导管(其截面与波长的平方成正比)里的功率受击穿电场的制限。还有一个重要的意义是对于一个固定的天线口径,微波在靶上的功率密度与 Pf^2 成正比(因为天线增益约为 f^2 ,参照第 5 章),所以 Pf^2 是对微波源(特别是用于定向能和功率输送的微波源)进行评价的理想参数。

高功率微波的鼎盛期大约在 20 世纪 90 年代末期,人们开始冷静地认识到,单一器件的极限输出大约在峰值功率 10 GW 和脉冲能量 1 kJ 的水平。这些结果是经过大量的实验努力后取得的,当然,也受益于最近迅速发展的三维计算模拟。脉冲缩短的概念逐渐受到关注,它包括多种由于功率上升而导致脉冲宽度缩短的物理机制,其结果使微波的脉冲能量受到限制。这使人们又重新将目光转向了高功率微波源的制作方法。此后的大量工作都集中在对现有源的改进上,如进一步完善表面清洁度和真空环境,开发能够在低电场