

High-Power Microwave Sources and Technologies

# 高功率微波源与技术

(美) Robert J. Barker      Edl Schamiloglu 编

刘国治 周传明 译审

清华大学出版社



High-Power Microwave Sources and Technologies

# 高功率微波源与技术

(美) Robert J. Barker Edl Schamiloglu 编

刘国治 周传明 译审

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书概述了美国近年来在高功率微波源和相关技术研究领域的主要进展,重点讨论了由美国国防部 MURI 计划资助所获得的高功率微波源及其相关技术的最新研究成果。

全书共分 12 章。第 1 章为概述;第 2 章综述了美国国防部感兴趣的 HPM 技术研究现状;第 3~6 章介绍 HPM 源和脉冲缩短效应的研究进展;第 7~11 章论述了 HPM 源的物理机制及其实用化的一些关键技术进展;第 12 章描述了对本领域研究未来发展的展望。

本书的读者对象为对高功率微波源技术感兴趣的研究人员和工程技术人员。

High-Power Microwave Sources and Technologies

Robert J. Barker, Edl Schamiloglu

EISBN 0-7803-6006-0

Copyright © 2001 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Translation Copyright © 2004 by Tsinghua University Press.

All Rights Reserved

本书中文简体字版由 the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。

未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何内容。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2002-6605

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

高功率微波源与技术/(美)贝克(Barker, R. J.)等编;《高功率微波源与技术》翻译组译. —北京:清华大学出版社,2005.6

书名原文:High-Power Microwave Sources and Technologies

ISBN 7-302-10653-3

I. 高… II. ①贝… ②高… III. 大功率—微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 020113 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客 户 服 务:010-62776969

责任编辑:邹开颜 赵从棉

版式设计:刘祯森

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:29.75 字数:613千字

版 次:2005年6月第1版 2005年10月第2次印刷

书 号:ISBN 7-302-10653-3/TN·252

印 数:3001~4000

定 价:98.00元

本书简述了美国 1999 年前后在高功率微波源和相关技术研究领域的研究状况。本书重点关注的是美国国防部感兴趣的 HPM 研究课题。实际上,这里所给出的大多数内容都是由国防部 MURI 计划发起研究或者是与之有紧密联系的旨在研究新型高功率微波源的研究项目成果。通过不同机构的紧密合作,该项目开展国际性合作研究,交叉学科的科学家在学术会议上交流他们的研究成果。这个 MURI 项目由官方成立于 1995 年,资助经费为每年 300 万美元,在 2000 年春季结束。它建立在由 AFOSR 等离子体办公室资助下近 10 年微波技术研究的基础上,我们中的一个(RJB)为项目管理人。这个计划与由海军实验室(NRL) Robert Parker 负责的正在进行的三用真空电子学计划项目的研究以及 AFOSR 和空军实验室-罗马分部的前热电离研究计划项目(ATRI)是协同互相促进发展的。

在 MURI 项目的计划下,美国 9 个大学的 HPM 科学家在由 Texas Tech 大学(Lubbock)的 Magne Kristiansen, Maryland 大学的 Victor Granatstein 以及 California 大学(Davis)的 Neville Luhmann 三位科学家组成的委员会领导下开展工作。其他大学的参加者包括 New Mexico 大学的合作编者, Cornell 大学的 John Nation, California 大学 Berkeley 分校的 Ned Birdsall, Stanford 大学的 George Caryotakis, Michigan 大学的 Ronald Gilgenbach 和 California 大学 Los Angeles 分校的 Tony Lin。为了促进研究成果向工业应用的转化,与 Microwave Science 公司的 James Benford, Northrop-Grumman 公司的 Howard Jory 和

CPI 公司的 Howard Jory 签订了正式的合作子合同。而且,首先在 Jack Agee 的协调下,随后通过与 John Gaudet 的联络加强了与空军 Phillips 实验室正在开展的 HPM 研发项目的合作。

本书的第 1 章确定全书的主题,对需要的术语进行了定义,并给出了后面章节的结构。在第 1 章与第 2 章中给出了国防部感兴趣的 HPM 源的研究现状;第 3 章到第 6 章给出了 HPM 源研究的进展以及对脉冲缩短效应研究取得的认识;第 7 章到第 11 章给出了对 HPM 源物理机制上的深入认识和 HPM 源实用化所需的一些关键技术的进展状况;最后,在第 12 章中给出了获得 HPM 的一些预备性技术以及在这个新兴研究领域的未来挑战。

Robert J. Barker  
美国空军科研办公室

Edl Schamiloglu  
New Mexico 大学电气与计算机工程系

第 1 章 引言 .....	1
1.1 目的 .....	1
1.2 高功率微波 .....	2
1.3 本书的结构与范围 .....	4
参考文献 .....	6
第 2 章 高功率微波源：美国国防部展望 .....	7
2.1 引言 .....	7
2.2 国防部在基础研究中的作用 .....	8
2.3 国防部的需要 .....	9
2.4 历史 .....	11
2.4.1 空军 .....	12
2.4.2 陆军 .....	14
2.4.3 海军 .....	18
2.4.4 国防部机构 .....	20
2.5 高功率微波研究的进展 .....	20
2.5.1 窄带高功率源的进展 .....	23
2.5.2 高功率超宽带源的进展 .....	25
2.6 需要发展的关键技术 .....	27
2.6.1 脉冲功率技术 .....	27
2.6.2 新型阴极 .....	28
2.6.3 改良型材料和提高击穿强度 .....	28
2.6.4 天线 .....	29
2.6.5 计算能力 .....	29
2.7 总结 .....	29
2.8 致谢 .....	30
参考文献 .....	30

第 3 章 吉瓦级高功率微波源 .....	37
3.1 引言 .....	37
3.1.1 高功率微波源的定义 .....	38
3.1.2 发展与历史 .....	39
3.1.3 提高功率和延长脉宽问题 .....	39
3.2 主要吉瓦级高功率微波源 .....	43
3.2.1 磁绝缘线振荡器 .....	43
3.2.2 锥形 MILO .....	48
3.2.3 相对论磁控管 .....	54
3.2.4 相对论速调管放大器(RKA)和三轴相对论速调管放大器 .....	57
3.2.5 相对论速调管振荡器 .....	63
3.2.6 后加速相对论速调管(Reltron) .....	65
3.3 未来发展和总结 .....	68
参考文献 .....	68
第 4 章 脉冲缩短 .....	75
4.1 引言 .....	75
4.2 早期的研究成果概述 .....	77
4.2.1 脉冲缩短机理 .....	77
4.2.2 硬管和软管技术 .....	80
4.3 最新研究进展 .....	86
4.3.1 表面处理与真空技术 .....	86
4.3.2 延长 HPM 源输出脉冲的研究进展 .....	89
4.4 结论 .....	108
参考文献 .....	108
第 5 章 相对论 Čerenkov 器件 .....	113
5.1 引言 .....	113
5.2 行波管放大器 .....	114
5.2.1 引言 .....	114
5.2.2 单级行波管 .....	116
5.2.3 两级行波管 .....	116
5.2.4 宏粒子分析 .....	116

5.2.5	锥形结构放大器设计 .....	118
5.2.6	渡越时间隔离 .....	119
5.3	高功率行波管放大器研究最新进展 .....	120
5.3.1	引言 .....	120
5.3.2	准周期结构 .....	120
5.3.3	高效率输出结构 .....	120
5.3.4	轴向提取 .....	121
5.3.5	高效率放大器工作机制 .....	122
5.3.6	群聚压缩 .....	125
5.3.7	Ka 波段的研究 .....	125
5.3.8	混合模 .....	126
5.3.9	对称模和不对称模的相互作用 .....	129
5.3.10	讨论 .....	130
5.4	返波振荡器 .....	131
5.4.1	引言 .....	131
5.4.2	重复频率脉冲运行 .....	132
5.4.3	提高效率 .....	132
5.4.4	毫米波返波振荡器 .....	133
5.4.5	超高功率运行 .....	133
5.4.6	长脉冲运行 .....	134
5.5	高功率返波振荡器的最近研究 .....	134
5.5.1	慢波结构特性研究 .....	135
5.5.2	返波振荡器理论 .....	137
5.5.3	实验 .....	140
5.6	致谢 .....	144
	参考文献 .....	144
<b>第 6 章 回旋管振荡器和放大器</b> .....		<b>151</b>
6.1	引言 .....	151
6.1.1	本章内容简述 .....	151
6.1.2	回旋管概念 .....	152
6.2	高功率回旋管的技术水平 .....	156
6.2.1	等离子体加热和电流驱动的回旋摩谐速调管 振荡器(gyromonotron) .....	156



6.2.2	强流相对论电子束驱动的回旋管 .....	157
6.2.3	用于毫米波雷达的回旋放大器 .....	158
6.2.4	用于毫米波电子对抗的回旋返波振荡器 .....	163
6.2.5	工业应用的单腔回旋速调管振荡器 .....	163
6.2.6	用于驱动加速器的回旋速调管放大器 .....	165
6.3	强流相对论电子束驱动的回旋管的最新进展 .....	166
6.3.1	强流相对论电子束、回旋器件和空间电荷的考虑 .....	166
6.3.2	矩形回旋管和同轴回旋管 .....	167
6.3.3	回旋返波振荡器作为宽带可调谐高功率微波管的评估 .....	170
6.4	先进雷达的倍频回旋放大器 .....	172
6.4.1	理论 .....	173
6.4.2	实验 .....	177
6.5	绕轴旋转束回旋管的高次谐波工作 .....	180
6.5.1	高次谐波回旋管振荡器 .....	182
6.5.2	谐波回旋管放大器 .....	183
6.6	总结 .....	184
6.7	致谢 .....	185
	参考文献 .....	185
<b>第7章 高功率微波器件中的动态等离子体加载 .....</b>		<b>195</b>
7.1	引言 .....	195
7.2	早期结果的评述 .....	196
7.2.1	历史回顾 .....	196
7.2.2	理论 .....	198
7.2.3	实验 .....	201
7.3	填充等离子体高功率微波源的最新进展 .....	207
7.3.1	实验结果 .....	208
7.3.2	理论和模拟结果 .....	215
7.3.3	等离子体产生技术 .....	225
7.3.4	新型诊断技术 .....	227
7.3.5	径向不均匀加载等离子体慢波结构的电磁性能 .....	232
7.3.6	最重要的实验和理论结果 .....	235
7.4	小结和存在的问题 .....	237
7.5	致谢 .....	237

参考文献 .....	238
<b>第 8 章 束流传输与射频控制</b> .....	<b>245</b>
8.1 引言 .....	245
8.2 束流传输 .....	247
8.2.1 概述 .....	247
8.2.2 磁引导系统 .....	247
8.2.3 线性束 HPM 器件的 PPM 聚焦 .....	249
8.2.4 等离子体填充系统中的束流传输 .....	254
8.2.5 MILO 中的自磁绝缘 .....	259
8.2.6 电子回旋器件中束流传输特点 .....	259
8.3 电子束收集器 .....	259
8.3.1 常规单级电子束收集极 .....	260
8.3.2 降压收集极 .....	261
8.3.3 降压收集极的计算机模拟 .....	261
8.3.4 结论 .....	264
8.4 射频输出控制 .....	264
8.4.1 概述 .....	264
8.4.2 微波输出极化的控制 .....	264
8.4.3 模式转换器 .....	265
8.5 智能微波管概念的演变 .....	266
8.5.1 概述 .....	266
8.5.2 Litton 公司的早期工作 .....	266
8.5.3 SLAC 的自动控制研究 .....	267
8.5.4 吉瓦级智能管 .....	268
8.6 结论 .....	272
8.7 致谢 .....	273
参考文献 .....	273
<b>第 9 章 阴极与电子枪</b> .....	<b>277</b>
9.1 引言 .....	277
9.2 技术综述 .....	278
9.3 阴极技术 .....	282
9.3.1 爆炸发射阴极 .....	282

9.3.2	热阴极进展 .....	289
9.3.3	铁电体阴极 .....	295
9.4	新型电子枪 .....	298
9.4.1	等离子体电子枪 .....	298
9.4.2	高功率磁会切(cusp)电子枪 .....	301
9.4.3	铁电体电子枪 .....	305
9.5	总结及将来的研究方向 .....	306
	参考文献 .....	308
<b>第 10 章</b>	<b>窗口与射频击穿 .....</b>	<b>313</b>
10.1	引言 .....	313
10.2	早期工作回顾 .....	314
10.3	基本考虑 .....	316
10.3.1	物理机制 .....	316
10.3.2	单极性表面击穿 .....	321
10.4	次级电子倍增理论 .....	322
10.4.1	金属平面间的电子倍增 .....	323
10.4.2	介质表面的次级电子倍增过程 .....	326
10.4.3	进一步讨论 .....	329
10.5	射频结构的击穿 .....	334
10.5.1	X 波段谐振环中的 $TM_{010}$ 谐振腔 .....	334
10.5.2	$TM_{020}$ 腔 .....	337
10.5.3	讨论 .....	343
10.6	介质窗击穿 .....	344
10.6.1	实验进展 .....	344
10.6.2	实验结果 .....	346
10.6.3	深入讨论 .....	349
10.7	抑制击穿的方法 .....	352
10.8	总结 .....	354
10.9	致谢 .....	355
	参考文献 .....	356
<b>第 11 章</b>	<b>计算技术 .....</b>	<b>363</b>
11.1	引言 .....	363

11.2	PIC 方法综述 .....	364
11.2.1	场方程 .....	366
11.2.2	场边界条件 .....	367
11.2.3	粒子方程 .....	370
11.2.4	粒子边界条件 .....	371
11.2.5	场和粒子的耦合 .....	372
11.3	用 PIC 模拟方法模拟 HPM 源: 例子 .....	372
11.4	PIC 的最新进展 .....	377
11.4.1	等离子体模型 .....	378
11.4.2	次级电子发射 .....	384
11.4.3	电磁 PIC 代码中的电荷守恒 .....	386
11.4.4	模式展开 PIC .....	392
11.4.5	Poynting 分立算子 .....	393
11.4.6	面向对象技术 .....	395
11.4.7	并行 PIC 代码 .....	397
11.4.8	结论 .....	404
11.5	参量模拟评述 .....	404
11.6	参量模拟的最新发展 .....	408
11.6.1	MAGY .....	408
11.6.2	间隙-电路模型 .....	410
11.7	总结和未来发展问题 .....	414
11.7.1	体匹配坐标 .....	415
11.7.2	概率表面物理 .....	415
11.7.3	混合软件 .....	415
11.7.4	并行的检测 .....	416
11.7.5	数据可视化 .....	416
	参考文献 .....	416
<b>第 12 章</b>	<b>其他途径及未来的挑战 .....</b>	<b>423</b>
12.1	引言 .....	423
12.2	面临的挑战 .....	424
12.2.1	HPM 器件的清洁度和高真空 .....	424
12.2.2	新型阴极与电子枪 .....	425
12.2.3	改进 HPM 器件表面和防止窗口击穿 .....	428

12.2.4	脉冲功率技术 .....	431
12.2.5	建模和计算技术 .....	432
12.2.6	高级诊断 .....	434
12.2.7	电子束剩余能量的再利用 .....	434
12.2.8	智能自适应 HPM 装置 .....	435
12.2.9	不恰当相位电子的解调 .....	436
12.2.10	电晕的抑制 .....	438
12.2.11	模式转换器 .....	439
12.2.12	永磁体聚焦的应用 .....	440
12.3	其他 HPM 源概念 .....	440
12.3.1	中等功率装置组阵列 .....	441
12.3.2	吉瓦级多束速调管 .....	441
12.3.3	带状电子束 HPM 源 .....	446
12.3.4	未来的相对论 Čerenkov 装置 .....	446
12.3.5	新型虚阴极振荡器 .....	447
12.3.6	等离子体电子微波系统 .....	450
12.3.7	Klystrinos: W 波段模块化速调管 .....	451
	参考文献 .....	453

# 引 言

## 1.1 目的

高功率微波(high power microwave, HPM)源可能在将来有潜在的军事应用。本书的目的是为对 HPM 源感兴趣的人员提供一些参考。显然,由于安全保密方面的原因,使得在公开文献中对一些军事问题的讨论受到了限制,因此,本书不讨论所有军用高功率微波系统的概念,也不介绍 HPM 的特定军事应用。但是,我们对 HPM 的军事应用兴趣以及每章提供的大量参考文献使得本书不仅重要,而且具有特色。

我们的读者对象是有技术的专业人员,他们对国防领域中出现的新技术较感兴趣。想查询 HPM 基础参考书的读者请参考 Benford、Swegle 和 Schamiloglu 合著的“High Power Microwaves”一书,该书即将出第二版<sup>[1]</sup>。事实上,书中的详细描述对新涉足 HPM 的读者具有较高的参考意义。另外,由 Granatstein 和 Alexeff 编著的“High Power Microwaves”一书<sup>[2]</sup>以及 Phillips 编著的“High Energy Density Microwaves”会议文集<sup>[3]</sup>对于那些仅对美国能源部项目(例如,粒子加速器和聚变等离子体加热)感兴趣的读者来说是非常有价值的。

本书(以及前言中描述的整个 HPM-MURI 计划)与过去 HPM 研究的主要区别在于,本书巧妙综合了商用真空电子学界的知识和经验,我们坚信军用 HPM 界会充分利用经过实践检验的微波管设计领域的经验和知识。在 HPM 技术快速发展的初始阶段,人们对微波管制造商们所采用的耗时耗财的方法争论不休。目前的重点是将成熟的 HPM 器件概念转化成实用、可靠的系统,所以,合乎逻辑的思想是将注意力转移到已被证明是成功的微波设计和制造实践方

面。本书的全部参考文献包含已被很好证明了的工程技术<sup>[4~6]</sup>,它应该成为积极参与 HPM 研究人员技术库的一部分。

## 1.2 高功率微波

高功率微波不是一个严格的定义,它是许多学术界研究产生相干电磁辐射(频率从 1GHz 到 100GHz 以上)时都采用的一个术语。高功率微波的一种定义是高平均功率微波,指长脉冲、高重频或连续波(continuous wave, CW)源。另一种定义是高峰值功率微波,指短脉冲、低重频或单次的源。前苏联的研究者用相对论高频电子学来描述这种概念。

Stanford 直线加速器中心(SLAC)的 S 波段速调管等器件是当今高平均功率微波源的典型,该器件能在 3GHz 频率上产生 150MW 的功率。自从 Hansen、Heils 兄弟以及 Varian 兄弟的开创性工作以来,这种速调管器件已研究了 60 多年(文献[7]评述了速调管的发展历史)。速调管和类似器件属于常规微波管或真空电子学领域,原属于电气工程学科。这个学科应用非常严格的、经过时间检验的技术来设计微波源。它们具有几乎按专门知识分类的设计规范和几乎可以称为一门学问的培训技术。严格遵守工程设计指南,并与材料和计算技术的发展相结合,导致这些器件的输出指标逐步发展到目前的水平。他们能够针对顾客的不同要求,研制出可靠运行的微波源。这类微波源的典型政府客户包括用于加速器和给等离子体加热的美国能源部,以及用于通信的美国航空航天局(NASA)。大部分早期的 HPM 文献侧重于高平均功率的研究。

New Mexico 州 Kirtland 空军基地空军研究室(Phillips 研究基地)研制的磁绝缘线振荡器(MILO)是当今高峰值功率、短脉冲微波源的典型代表<sup>[8]</sup>,已经证明 MILO 能在 1.2GHz 上产生脉宽小于 200ns、2GW 的功率。这种器件首先于 1987 年提出,但它起源于 Cornell 大学的 Nation 在 1970 年的开创性工作<sup>[9]</sup>,以及前苏联 Lebedev 研究所的 Kovalev 及其合作者于 1973 年的工作<sup>[10]</sup>。研制 MILO 以及强束流驱动的相对论器件的学科为初始的等离子体物理学。一些发展使得等离子体物理学家对相干电磁辐射源产生了兴趣。一是带电粒子与电磁波相互作用方面的精细实验和理论研究,这是 20 世纪 50 年代开展的磁约束聚变研究计划的一部分。二是脉冲功率的发展,这是 20 世纪 60 年代后期的一个主要研究领域,在研制 X 射线照相源的过程中发展了这种技术。脉冲功率技术具有产生强流相对论电子束的能力,这种高导流系数<sup>①</sup>束能够产生高瞬时功率的相干电磁辐射。三是复杂 PIC(particle-in-cell)计算机模拟工具的研制,随着计算机功能的不断

<sup>①</sup> 导流系数定义为  $I/V^{3/2}$ ,这里  $I$  表示电子束电流, $V$  是束电压。

断强大,能够对强束流驱动源进行分析的复杂程度也在不断提高。四是定向能武器研制的兴趣在不断增加,促进了这些不同学科的融合,从而发展了高瞬时功率微波源的研究计划。

尽管真空电子学和等离子体物理学有许多相同的技术,但本书主要描述后者。它代表了由美国大学、国防部实验室和工业界在相关项目中发挥的聪明才智所获得的当今高瞬时功率微波源发展的最高水平。根据 Benford 和 Swegle 的约定<sup>[11]</sup>,我们用高功率微波(HPM)一词来表示产生 1GHz~100GHz 频率、瞬时功率大于 100MW 的相干电磁辐射源。图 1.1 比较了常规和高功率微波源的峰值和平均功率特性。

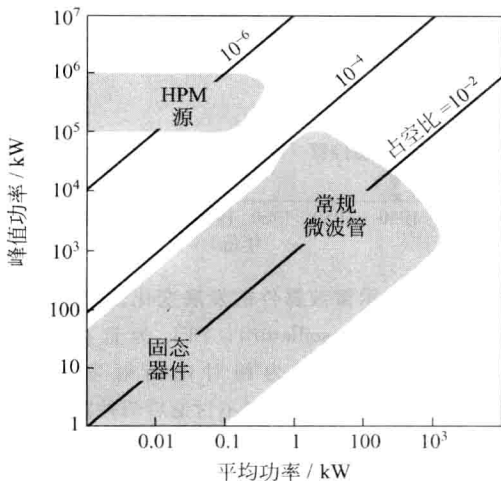


图 1.1 微波产生的峰值功率随平均功率的变化。

正如前言中讨论的那样,本书无意详细描述所有的 HPM 源,主要讨论由国防多学科大学研究计划(MURI)科学研究管理部空军办公室资助的研究项目的进展。它的 5 年研究期和 1500 万美元的资助使得该计划成为历史上最大的单个 HPM 基础研究计划,该计划在研究的广度和深度上具有划时代的意义。为了更全面地了解 HPM 源,读者可以参考本书中引用的早期书籍文献。

本书微妙地反映出了军方 HPM 研发活动的一个有趣的变化,即军方(和工业界)对中等功率(100kW 量级)高频微波源的兴趣在不断增加。随着产生辐射频率的增加,这种器件的内部尺寸也逐渐变小。因此,对给定的工作电压,这种器件中的电场强度很容易达到吉瓦(GW)级低频 HPM 源中的相应值。所以,对这两类器件之间的物理和工程方面的考虑是相同的。正是由于这种原因,本书也打算讨论高频亚兆瓦(MW)级器件的概念。

研究更高频率区域器件的人员通常采用所谓的品质因子  $Pf^2$ , 这里  $P$  表示输出功率



(GW),  $f$  表示频率(GHz)。图 1.2 表示出了各种器件在过去几十年中为获得较高的品质因子而取得的技术进步。这种变化对即将研制的几种 94GHz 的军用系统的成功与否是非常关键的。

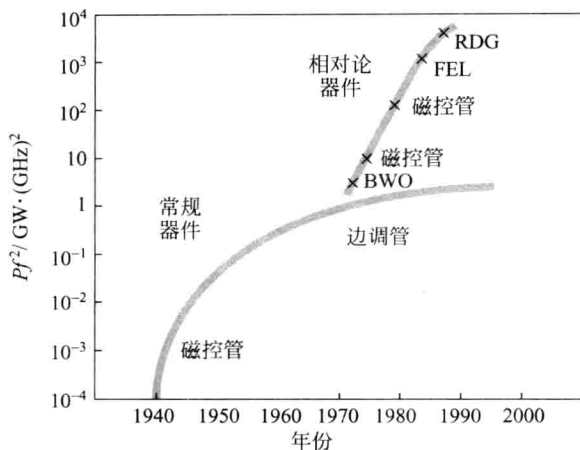


图 1.2 用  $Pf^2$  因子表示微波器件的发展变化。BWO 为返波振荡器 (backward wave oscillator); FEL 为自由电子激光 (free electron laser); RDG 为相对论衍射发生器 (relativistic diffraction generator)。本书不讨论后两种器件。

### 1.3 本书的结构与范围

如图 1.3 所示,为了更好地描述本书的结构,我们首先以器件的形式来概述一般 HPM 系统。本书集中讨论框图中组成微波源部分的三个系统单元。

每章都按背景、技术挑战、未来工作的次序来进行阐述。每章的开始都从历史角度来展望所涉及的研究领域,重点是详细描述当今最高水平的研究。然后讨论还未解决的主要技术挑战。最后,如果相关章节的作者发现有可能的话就讨论未来发展的途径。

第 2 章从美国国防部角度来描述对 HPM 感兴趣的动机。该章的范围比本书研究的内容要广泛得多,因此,HPM 研究可根据国防部对各种用途微波源的兴趣来介绍。

第 3 章至第 6 章评述前言中讨论的研究计划资助下研究和发展的 HPM 器件概念。第 3 章提供了该项目中能产生最高瞬时功率的各种源的研究状况。第 4 章讨论脉冲缩短现象。编者决定用源的章节内容来组织,比如,第 3 章给出了正面的信息(产生的高功率