

# HPM

## 高功率微波

[美] James Benford

John Swegle 著

刘云汉 张国良 等译

真伯儒 张永昌 校

中国工程物理研究院科技信息中心

## 译 者 的 话

高功率微波(HPM)是本世纪七十年代诞生的一门新兴边缘学科,脉冲功率技术的实用化为它的发展奠定了科学基础,日益发达的工业、军事及科学研究对微波功率、能量和频率更高的需求为它的发展提供了动力,致使作为这门学科技术支撑的微波装置的功率水平在短短二十年间提高了三个数量级以上。目前世界上已有十余种不同机制的HPM源投入运行,新的装置和新的应用还在不断涌现。

《High-Power Microwave》一书在内容上既反映了HPM源方面当今世界的最新科技水平,又从不同角度论述了HPM目前和未来广泛应用的前景,不失为一本HPM入门的教科书。

我国的HPM研究还不到五年时间,理论和实验工作正处于起步阶段。更多了解国际上HPM研究成果和发展动态是国内同行的共同愿望。为此我们将该书译出并推荐给大家,希望它能对我国HPM研究工作起到借鉴作用。

参加本书翻译的人员有:力光伦(第1章),景涛(第2章),贺云汉(第3章),冒逸(第4章),金平莲(第5、6章),刘庆想(第7、8章),王文斗(第9章),张永昌(第10章),张国良(第11章),莫伯锦(前言和第12章)。参加本书校对的人员有:张永昌(第5、6、7、11和12章),莫伯锦(第1、2、3、4、8、9和10章)。张建钢等在本书编辑出版过程中做了大量工作。

中国工程物理研究院应用电子学研究所力光伦副所长、贺云汉研究员和信息中心莫伯锦对全书译稿作了审校,中国工程物理研究院科技委主任李幼平研究员对本书翻译出版给予了很大的关心和支持,并提出不少宝贵意见,在此表示谢意。

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。

## 前 言

本书对高功率微波(或 HPM)领域作了多角度的综合性介绍。由于篇幅所限,我们对 HPM 的讨论实际上相当扼要。我们希望本书能有助于读者对该领域进行全面的探索,而避免某些长卷书那样陷入细枝末节。本书是一种内容广泛的介绍性学术著作,对涉及的一般性基础理论不作详细论述。为便于读者作进一步的探索,我们在每章中都给出了广泛的参考文献目录。我们预计本书的读者是:HPM 领域的研究人员,他们希望对本领域能更全面地了解;微波器件用户或潜在的用户,他们对于利用高功率很有兴趣;刚从事该领域工作的研究人员;以及相关领域(如雷达、通讯和高能物理)的决策人员,这些人必须知道 HPM 的发展将对他们产生什么样的影响。

本书的前身是我们在美国和西欧授课的几种短篇教材。经过授课期间对教材的修改和扩充,使我们对 HPM 领域的视野大大开阔。虽然我们通过对具体 HPM 源的调查研究而深入这个领域,但我们还是发现了一些带有全局性的问题,本书对这些问题作了讨论:

- 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 应用中将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许多不同的源?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?

通过对这些问题的讨论已使我们有所收益,我们认为最终也将使读者有所收益。这就是说,虽然我们的主要研究兴趣仍是不同类型的源,但我们的视野大大扩展了。本书作者之一 James Benford 基本上是一位实验工作者,而本书的另一位作者 John Swegle 则是一位理论工作

者。

在本书第1章——引言——中,我们概述了导致 HPM 发展的历史趋势、将 HPM 能力与普通微波的能力作了比较并对全世界 HPM 研究活动作了评述。第2章讨论 HPM 的应用,我们把该领域划分为时有重叠的不同部分,其中有些属于应用驱动的部分,有些则是技术驱动的部分。微波基础一章对以后几章将要讨论的主要概念作了评述。基础技术一章描述了与微波产生源有关的设备和设施,其中包括向微波源提供电能和电子束的组元、微波功率的提取并向空间辐射的组元以及测量微波性能的组元。第5章至第10章详细地讨论一些主要的微波源。第11章讨论了对未来比较重要的新技术。最后在第12章中总结了与各种源有关的 HPM 问题,同时对 HPM 的发展作了展望,提出了我们对 HPM 界发展的几点意见。

在成书期间物理国际公司给予了支持,我们对该公司重视这类事业表示赞赏。

特别感谢 Noreen Curry 和 Tammy Edwards,他们在本书手稿和图表的编辑方面作了大量细致的工作。

最后,David Price 对全书手稿作了审阅,这是对我们的极大帮助。

James Benford John Swegle

1991年6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	8
第二章 高功率微波的应用	13
2.1 引言	13
2.2 定向能	13
2.3 雷 达	25
2.4 电子高能 RF 加速	27
2.5 等离子体加热	34
2.6 激光泵浦	40
2.7 功率束射	41
第三章 微波基础	50
3.1 引 言	50
3.2 波 导	52
3.3 谐振腔	61
3.4 微波相互作用	65
3.5 放大器和振荡器,弱流运行区和强流运行区	77
3.6 相位和频率控制	79
3.7 小 结	80
第四章 基础技术	85
4.1 引 言	85

4.2	脉冲功率	86
4.3	电子束和电子层	94
4.4	天线	106
4.5	诊断学	115
4.6	HPM 设施	124
<b>第五章</b>	<b>正交场器件</b>	<b>137</b>
5.1	引言	137
5.2	历史	137
5.3	工作原理	139
5.4	实验装置的特点	143
5.5	研究中存在的问题	150
5.6	基本限制	158
5.7	MILO	162
5.8	小结	165
<b>第六章</b>	<b>O 型契伦柯夫器件</b>	<b>170</b>
6.1	引言	170
6.2	历史	171
6.3	工作原理	172
6.4	实验装置的特点	181
6.5	研究中存在的问题	184
6.6	基本限制	195
6.7	介电契伦柯夫脉塞和等离子体契伦柯夫脉塞	195
6.8	小结	199
<b>第七章</b>	<b>自由电子激光</b>	<b>212</b>
7.1	引言	212
7.2	历史	213
7.3	工作原理	214

7.4	实验装置的特点 .....	225
7.5	研究中存在的问题 .....	232
7.6	基本限制 .....	241
7.7	两级 FEL 和散射管 .....	242
7.8	小 结 .....	244
<b>第八章</b>	<b>电子回旋脉塞</b> .....	<b>255</b>
8.1	引 言 .....	255
8.2	历 史 .....	256
8.3	工作原理 .....	258
8.4	实验装置的特点 .....	270
8.5	研究中存在的问题 .....	275
8.6	基本限制 .....	288
8.7	大轨道回旋管、迈尼康(magnicon)和潘尼管 .....	291
8.8	小 结 .....	294
<b>第九章</b>	<b>虚阴极振荡器</b> .....	<b>307</b>
9.1	引 言 .....	307
9.2	历 史 .....	307
9.3	工作原理 .....	308
9.4	实验装置的特点 .....	313
9.5	研究中存在的问题和基本限制 .....	318
9.6	先进 viricator .....	322
9.7	小 结 .....	331
<b>第十章</b>	<b>相对论速调管</b> .....	<b>335</b>
10.1	引 言 .....	335
10.2	历 史 .....	336
10.3	工作原理 .....	337
10.4	实验装置的特点 .....	341

10.5	基本限制	351
10.6	速调管的变型	353
10.7	小 结	357
<b>第十一章</b>	<b>新兴技术</b>	<b>361</b>
11.1	引 言	361
11.2	微波脉冲压缩	361
11.3	电磁导弹	368
11.4	用束—等离子体相互作用产生微波	371
11.5	光导开关	373
<b>第十二章</b>	<b>总结和展望</b>	<b>381</b>
12.1	目前水平	381
12.2	HPM 的未来方向	392



# 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产生装置区分开来。

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。在二十世纪初期,随着屏栅管(gridded 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,此时微波管技术已转入大量生产,研究工作宣告结束。

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。

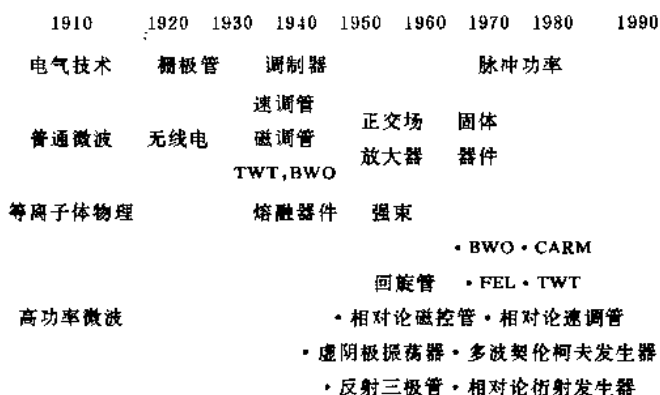


图 1.1 高功率微波出现的背景

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

\* 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。

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,在这些器件中,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,使这种相对论工作产生了越来越高的功率。

由于脉冲源(impulse source)——很短的脉冲宽度、宽频带辐射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 $\sim 100\text{MW}$ ,发射的微波只有几个周期。与频率的量级相同。这样的脉冲通常都是利用快电路天线的直接激励来产生,而不是利用电子束方法。

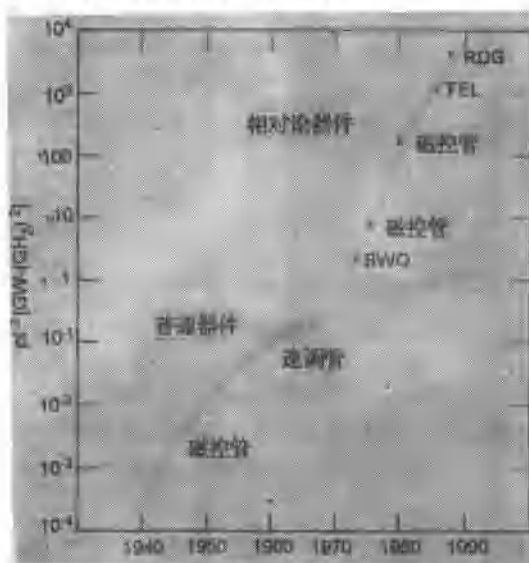
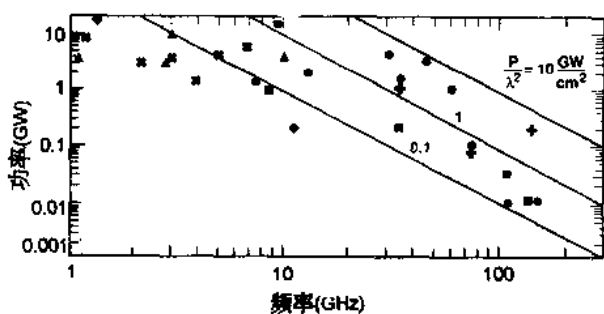


图 1.2 从品质因子  $Q^2$  看微波器件的发展

近几年在以越来越高的频率产生高功率的水平方面取得了巨大发展。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, $Pf^2$ 。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)。



- 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  $pf^2$  改用  $p/\lambda^2$  来表示。在高频时源的功率大致随  $\lambda^2$  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作为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。这是与作为微波脉冲能量对电子束脉冲能量的比值的能量效率(energy efficiency)相对照。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。

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( $\sim 100\text{MW}$ ,  $10\text{kW}$ )。相对论磁控管是平均功率最高的 HPM 器件( $1\text{GHz}$ ,  $6\text{kW}$ )。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

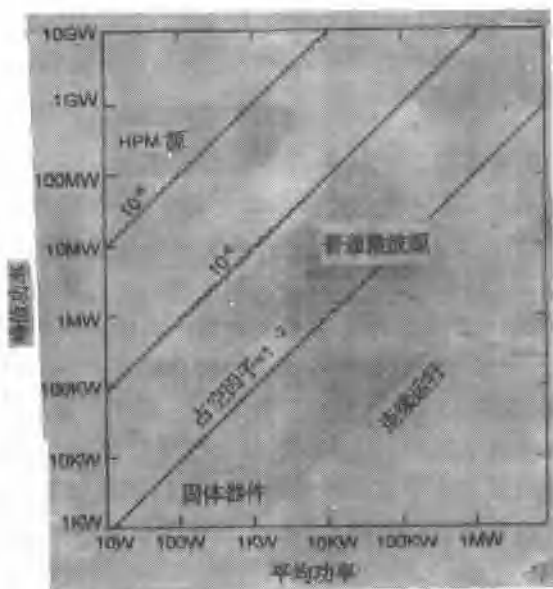


图 1.4 1991 年的微波峰值功率与平均功率的关系。高功率微波区由图 15 确定

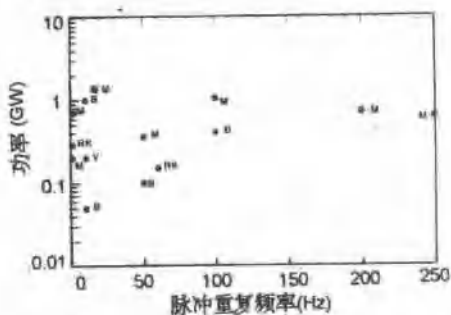


图 1.5 重复运行 PHM 源的发展, M 表示磁控管 V 表示虚阴极振荡器, B 是返波振荡器, RK 表示相对论速调管

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 1.6 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~MW 功率(对~ $\mu\text{s}$  宽度),给出 1 焦耳/脉冲的能量。SLAC 的速调管已发展到 67MW, 3.5 $\mu\text{s}$ , 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,功率水平下降到 $\leq 100\text{MW}$  的范围,脉冲能量 $< 1\text{J}$ 。

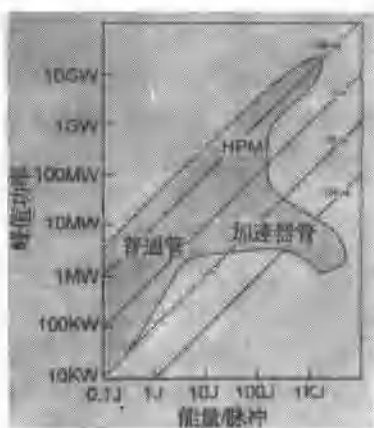


图 1.6 1991 年脉冲微波源的能量。只给出窄带宽源,没有给出脉冲源

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  $10^{-5}$  托的真真空度与普通真空中小于  $10^{-7}$  托的真真空度相比,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。

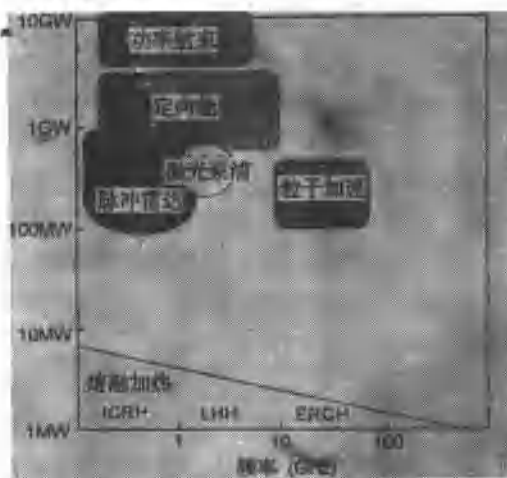


图 1.7 HPM 应用的定义域。区域划分只是示意性的,不同的应用实际上在很宽区域内变化

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——空间能量聚束和定向能武器。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 源是回旋管,其主要目的是研制磁约束等离子体的高频加热源。法国的 Thomson—CSF、德国的 Valvo、瑞士的 Brown—Boveri 等工业部门,德国的 Kernfor—schungszentrum Karlsruhe 等主要研究院,以及瑞士的 Ecole Polytechnique



Federale de Larsonne 等大学, 都有研究的兴趣。法国原子能实验室 (CEA) 和 Thomson—CSF 都对 FEL 研究做了少量的探索工作, 法国还进行了电介质契伦柯夫脉塞的研究。

日本兴趣集中在等离子体加热用的回旋管、加速器用的速调管以及宽频带应用的 FEL。在微波频率范围内, 也许最引人注意的是用于双束加速器 (见第 2 章) 和等离子体加热的 FEL 的研究。日本人还与澳大利亚人合作研究回旋管, 同时也在这一领域开展他们自己的研究工作。

中国也正在研究回旋管技术, 其中也有一些创新的结构。他们还在成都、北京和上海的一些实验室研究 FEL。

与其它国家相比, 苏联和美国的研究计划更为庞大, 包含的 HPM 源种类繁多。肯定与微波源有关的苏联两个最活跃的微波中心是位于高尔基城 (Nizhny Novogod) 的应用物理研究所和位于托姆斯克的强流电子学研究所。应用物理研究所在研制用于托卡马克 T-10 和 T-15 的大型等离子体加热实验所需要的回旋管, 同时也在研究 CARM、FEL、BWO、TWT 和磁控管。在托姆斯克, 他们以惊人的脉冲功率能力与莫斯科无线电工程与电子学研究所及国立莫斯科大学进行合作, 在与 BWO 和 TWT 相关的几个源方面取得了世界纪录的微波功率水平。除了这两个主要的研究中心外, 在下列各地还有一些重要的研究部门:

- 托姆斯克工学院核物理研究所 (相对论磁控管和虚阴极振荡器)。
- 莫斯科普通物理研究所 (回旋管和等离子体契伦柯夫脉塞)。
- 国立莫斯科大学 (表面波振荡器和微波源理论研究)。
- 哈尔科夫物理—技术研究所 (等离子体填充器件)。
- 诺沃斯比尔斯克核物理研究所 (磁控管)。

在另外一些研究所, 例如前面提到的无线电工程与电子学研究所, 也还有些理论研究工作的。

苏联强大的计划体现在对 HPM 研究的深度、感兴趣范围的广泛性以及关键研究工作的稳定性。在 HPM 中, 他们采用了很多不同类型的脉冲功率技术基础, 尤其是显著发展了 HPM 用的束二极管, 其重复冷