



《中国工程物理研究院科技丛书》第057号

高功率微波发生器原理

Principles of High-Power Microwave Generators

丁武 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

《中国工程物理研究院科技丛书》第 057 号

高功率微波发生器原理

Principles of High-Power Microwave Generators

丁武 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

高功率微波发生器原理 / 丁武著. —北京: 国防工业出版社, 2008.5

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978-7-118-05551-1

I. 高... II. 丁... III. 大功率-微波频率-发生器
IV. TN626

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 002506 号

※

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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12 字数 300 千字

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 32.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 宋家树

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学试验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在试验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》
第五届编审委员会

顾 问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副 主 任 彭先觉 孙 颖 李志民

委 员 (以姓氏笔画为序)

华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬 陈银亮

何建国 李 凡 李泽仁 苏 伟 苏 毅

汪小琳 吴志杰 张方晓 张富堂 张 健

罗顺火 孟凡宝 郑志坚 周德惠 竺家亨

顾 援 唐永建 黄 辉 彭述明

科技丛书编辑部负责人 李代斌

本册编辑 李天惠

前 言

自从 1992 年以来,国外先后出版了“High - Power Microwaves”(1992)、“Application of High - Power Microwaves”(1994)和“High - Power Microwave Sources and Technologies”(2001)等书,这几本书或者因为包括了驱动器、微波源和天线的理论、试验和工程技术等广泛内容,或者重点强调应用,对由电子束产生的三种基本类型的相干电磁辐射原理没有作全面、深入和系统的总结和描述。国内关于高功率微波的专著还未见。20 世纪 80 年代发展起来的精确的数值模拟(完全的电磁方法)是研究和设计高功率微波管的重要的和必不可少的手段,但为了分析微波管中发生的现象,理解它们的物理实质,还必须求助于解析理论。本书是一本高功率微波的理论专著,它利用一种新的我们自己发展起来的波一束相互作用理论对所有三种基本类型的高功率微波产生的原理给予了统一的和深入的描述。本书概括了国内外高功率微波研究的最新成果、发展方向和应用;内容是在国内外书籍和杂志上公开发表的;是在五届博士生讲义的基础上修改而成的。本书可供高功率微波领域中的博士生和高级研究人员参考。当然,由于受作者水平的限制,书中可能有不少错误和不当之处,请读者批评指正。

本书内容共分 8 章:第 1 章概括介绍了国外高功率微波研究的最新成果、发展方向和应用;第 2 章是高功率微波理论研究的基础;第 3 章描述了一种新的波一束相互作用理论,是本书的核心,它将被应用于三类相干辐射源的解析研究,贯穿于全书;第 4 章描述了属于相干契伦柯夫(Cherenkov)辐射类型的磁绝缘线振荡器理论,给出了辐射在线性区增益的数学表示和在线性区效率的标度关系,在附录中给出了电子束的非线性群聚因子的数学表示;第 5 章描述了属于相干渡越(Transition)辐射类型的速调管和渡越时间振荡器理论,给出了速调管中电子束的谐波电流的数学表示,辐射的增益带宽与束的数目和腔的数目之间的关系和短间隙与长间隙的辐射差别,以及渡越时间振荡器中辐射在线性区增益的数学表示;第 6 章描述了属于相干韧致(Bremsstrahlung)辐射类型的回旋行波放大器、自由电子激光和虚阴极振荡器的理论,给出了回旋行波放大器中力群聚和惯性群聚的数学表示,轴向和角向两种惯性群聚相互竞争或相互增强的条件,自由电子激光中群聚、预群聚、高次谐波产生、模的竞争与饱和和谱线宽度的数学描述方法,虚阴极振荡器中在线性区增益的数学表示和在线性区效率的标度关系;第 7 章描述了短电子脉冲产生相干辐射的理论,给出了非定态线性区的增益公式和图像,以及非线性区饱和功率的标度关系,发现了一种新的超宽带多频电磁脉冲源;第 8 章描述了高功率微波源中的混沌现象,给出了出现场混沌

和电子混沌的阈值和它们之间的关系。第6章中回旋行波放大器部分是博士生杨温渊的博士论文的一部分;第8章是博士生郝建红的博士论文,这两部分是由他们撰写的,其它章节都由本人撰写并定稿。全书由杨温渊博士和徐福锴博士等制成电子版。感谢这三位博士对这本书的贡献;感谢钱宝良先生和李家胤先生对本书提出了宝贵的修改意见;感谢中国工程物理研究院科技丛书编审委员会对编写本书的支持;感谢总装备部国防科技图书出版基金资助本书出版;感谢国防工业出版社对本书的编辑、出版所做的出色工作。

著者

2007年11月20日

《中国工程物理研究院科技丛书》

已出版书目

- 001 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编
科学出版社 1989年11月
- 002 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著
科学出版社 1990年02月
- 003 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 等编著
国防工业出版社 1991年09月
- 004 线性代数方程组的迭代解法
胡家贛 编著
科学出版社 1991年12月
- 005 映象与混沌
陈式刚 编著
国防工业出版社 1992年06月
- 006 再入遥测技术(上册)
谢铭勋 编著
国防工业出版社 1992年06月
- 007 再入遥测技术(下册)
谢铭勋 编著
国防工业出版社 1992年12月
- 008 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 编著
国防工业出版社 1992年10月
- 009 粘性消去法和差分格式粘性
郭柏灵 著
科学出版社 1993年03月
- 010 无损检测技术及其应用
张俊哲 等著
科学出版社 1993年05月
- 011 半导体材料辐射效应
曹建中 著
科学出版社 1993年05月
- 012 炸药热分析
楚士晋 编著
科学出版社 1994年12月
- 013 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 主编
科学出版社 1994年12月
- 014 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长 编著
科学出版社 1994年12月
- 015 二维非定常流和激波
王继海 编著
科学出版社 1994年12月

- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南 著 科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演 主编 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士 著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金 编著 国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成像技术与图像处理
吴世法 著 国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿 著 国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理
赖祖武 等著 国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云 编著 国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 试验核物理测量中的粒子分辨
段绍节 编著 国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 试验物态方程导引(第二版)
经福谦 著 科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统
郭柏灵 著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德 编著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线
金显盛 编著 国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用
陈式刚 等著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 空气炮理论与试验技术
王金贵 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与激波
李维新 著 国防工业出版社 2000 年 12 月

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文 编著 国防工业出版社 2001年03月
- 036 含能材料热谱集
董海山 等编著 国防工业出版社 2001年03月
- 037 材料中的氦及氘渗透
王佩璇 宋家树 著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体 X射线谱学
孙景文 编著 国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004年11月
- 040 系统可靠性工程
金碧辉 主编 国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术
田东风 等编著 国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统
苏毅 万敏 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统
郭柏灵 高平 陈瀚林 著 国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应
陈盘训 著 国防工业出版社 2005年06月
- 045 高功率脉冲技术
刘锡三 编著 国防工业出版社 2005年08月
- 046 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2005年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论
方泉玉 颜君 著 国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术
经福谦 陈俊祥 主编 国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器
邓建军 主编 国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数
田东风 孙伟力 编著 国防工业出版社 2006年11月
- 052 试验冲击波物理导引
谭华 著 国防工业出版社 2007年3月
- 053 核军备控制核查技术概论
刘成安 伍钧 编著 国防工业出版社 2007年3月

- 054 强流粒子束及其应用**
刘锡三 著
国防工业出版社 2007年7月
- 055 氙和氪的工程技术**
蒋国强 等编著
国防工业出版社 2007年11月
- 056 中子学宏观试验**
段绍节 编著
国防工业出版社 2008年5月
- 057 高功率微波发生器原理**
丁武 著
国防工业出版社 2008年5月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 发展史	1
1.3 HPM 定义	2
1.4 HPM 产生原理	2
1.5 HPM 的应用	2
1.5.1 定向能武器(DEW)	2
1.5.2 电子高能 RF 加速器	3
1.5.3 雷达	3
1.5.4 等离子体加热	3
1.5.5 功率束	3
1.5.6 微波材料加工	4
1.6 窄带 HPM 目前水平	4
1.7 窄带 HPM 发展方向和关键技术	4
参考文献	5
第 2 章 微波基础	6
2.1 引言	6
2.2 金属波导管与谐振腔	6
2.2.1 柱坐标系中矢量亥姆霍兹方程的解——纵向分量法	6
2.2.2 金属波导的一般特性	9
2.2.3 谐振腔的一般特性	12
2.3 波-粒子相互作用	14
2.3.1 波与粒子相互作用产生相干辐射的条件	14
2.3.2 波的线性增长与饱和	14
参考文献	14
第 3 章 波-束相互作用理论	15
3.1 引言	15
3.2 同步	15
3.2.1 同步条件	15
3.2.2 允许同步失谐的范围	16
3.3 电子相位调制与电子束群聚	16

3.3.1	电子的相位调制	16
3.3.2	电子束的谐波电流	18
3.4	电子辐射和微波管的分类	19
3.4.1	契伦柯夫辐射——返波管(BWO)	19
3.4.2	渡越辐射——速调管(Klystron)	19
3.4.3	韧致辐射——回旋共振脉塞(CRMS), 自由电子激光(FEL),虚阴极振荡器(Vicator)	20
3.5	HPM 源功率极限	20
3.5.1	引言	20
3.5.2	高功率微波管产生辐射的基本限制	20
3.5.3	结论	23
	参考文献	23
第4章	相干契伦柯夫辐射源理论	24
4.1	引言	24
4.2	周期系统中的空间谐波——弗洛奎定理	24
4.3	周期性分布反馈结构的基本原理	26
4.4	慢波结构中波-束相互作用的演进方程组	29
4.5	在 MILO 中空间电荷的群聚和辐射	32
4.5.1	磁绝缘线振荡器中空间电荷的群聚	32
附录	饱和时复数调制因子	37
4.5.2	磁绝缘线振荡器中空间电荷的辐射	40
	参考文献	45
第5章	相干渡越辐射源理论	47
5.1	引言	47
5.2	速调管	47
5.2.1	速调自由电子脉塞	47
5.2.2	多束速调管(MBK)	55
5.3	渡越时间振荡器(TTO)	69
5.3.1	基本假设和方程	69
5.3.2	在有相对论电子束的共振腔中 TM 波的场的形式	70
5.3.3	色散关系	71
5.3.4	均匀束的辐射	73
5.3.5	环形束的辐射	75
	参考文献	77
第6章	相干韧致辐射源理论	78
6.1	引言	78
6.2	回旋行波放大器中波束相互作用的理论研究	78

6.2.1	辐射场演化和电子运动的非线性方程组	79
6.2.2	电子束的群聚和辐射场的增益	85
6.2.3	增加回旋波放大器带宽的几种方法	87
6.3	自由电子激光中的群聚、预群聚、高次谐波的产生、谐波的时间剖型与线宽和模的竞争与饱和	88
6.3.1	电子束的群聚	88
6.3.2	电子束的预群聚	92
6.3.3	高次谐波产生	98
6.3.4	由基模群聚产生的相干谐波的时间剖型与线宽	99
6.3.5	长脉冲自由电子激光中模的竞争与饱和	107
	附录	120
6.4	虚阴极振荡器	122
6.4.1	小信号增益	122
6.4.2	饱和功率的标度	126
6.4.3	结论	129
6.5	振荡器和放大器的统一描述	129
6.5.1	场的形式	129
6.5.2	波束相互作用方程	130
6.5.3	电流密度表达式	130
6.5.4	边界条件	131
	参考文献	131
第7章	短电子脉冲产生的相干辐射	133
7.1	引言	133
7.2	非定态自由电子激光的增益特性	133
7.2.1	非定态自由电子激光的低增益公式	133
7.2.2	非定态自由电子激光增益特性的数值模拟	139
7.3	行波管中短电子脉冲产生的辐射脉冲放大的特性	143
7.3.1	纵向高斯分布短电子脉冲在行波管中产生相干辐射的特性	144
7.3.2	行波管中短电子脉冲产生的辐射脉冲增益和饱和的特性	146
7.3.3	结论	150
	参考文献	151
第8章	高功率微波源中的混沌现象	153
8.1	引言	153
8.2	HPM 源中的场混沌现象	154
8.2.1	辐射场演化方程和电子运动方程	154
8.2.2	TWT 中出现场混沌的阈值与特征	158
8.2.3	MILO 中出现场混沌的阈值与特征	161

8.3 HPM 源中的电子轨道混沌现象	164
8.3.1 电子的混沌运动轨道	164
8.3.2 失谐量对电子混沌轨道的影响	166
8.3.3 电子混沌和场混沌的关系	166
8.4 结论	169
参考文献	170