



《中国工程物理研究院科技丛书》第 045 号

高功率脉冲技术

刘锡三 编著

国防工业出版社

73:767
861

《中国工程物理研究院科技丛书》第 045 号

高功率脉冲技术

HIGH PULSED POWER TECHNOLOGY

刘锡三 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高功率脉冲技术 / 刘锡三编著. —北京:国防工业出版社, 2005. 8

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-03855-5

I. 高... II. 刘... III. 大功率—脉冲技术
IV. TN78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 044529 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 850×1168 1/32 印张 17 $\frac{5}{8}$ 455 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:52.00 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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

《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、科学实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,还是在实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》 第五届编审委员会名单

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 (以姓氏笔划为序)

华欣生 江 松 刘柯钊 孙承纬

陈银亮 何建国 李 凡 李泽仁

苏 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 李天惠

本册编辑 李天惠

《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
胡家鞞编著 | 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 实验物态方程导引(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 空气炮理论与实验技术
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 材料中的氦及氚渗透
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 伍 钧编著 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

前 言

20世纪60年代初期,英国原子武器研究中心的J.C.马丁首先建议运用脉冲功率技术产生强流相对论性电子束,他领导的小组成功地将传输线技术应用于脉冲功率研究,从而开创了脉冲功率研究的新局面,建造了世界上第一台脉冲功率加速器SMOG(3MV,50kA,30ns)。在过去40多年里,脉冲功率技术用做核武器效应模拟源和闪光X射线照相研究两大支柱应用领域得到了迅速的发展。20世纪80年代,由于粒子束惯性约束聚变方案的提出,强流离子束技术取得了重大技术进展,脉冲功率达到了100TW的先进水平。90年代中期,由于Z-pinch研究在美国圣地亚实验室取得了重大技术突破,目前,高功率脉冲技术正在向着500TW~1000TW超高功率水平发展。

高功率脉冲技术是国防科研和高新技术研究的重要技术基础。美国国防部(DOD)和能源部(DOE)一直把它列为国防预研和基础研究的重点支持项目。今天,高功率脉冲技术和强流粒子束的应用已经深入到许多重要的科学研究领域。例如,闪光X射线照相、核爆效应模拟源、高功率微波、惯性约束聚变、Z-箍缩、强脉冲中子源、电磁轨道炮、粒子束武器等方面,脉冲功率技术一旦与这些领域相结合,就会取得开创性的成果,成为得力的研究工具。这是当前国际上比较活跃的一门前沿科学技术,它有着广阔的发展前景。

高功率脉冲技术也是一项军民结合的两用技术。冷战结束以后,一方面,武器发展研究转向了以实验室研究为主,这对脉冲功

率技术的发展提出许多新的要求,促进了它向更深层次发展;另一方面,也打开了向民用转向的道路,这对脉冲功率技术的发展提出许多新的挑战,促进了它向更广宽度发展。这些新的机遇与需求,必将给脉冲功率技术在 21 世纪的发展带来新的生机。

我国的高功率脉冲技术和强流束物理研究是在老一辈科学家,尤其是王淦昌教授的关心和倡导下发展起来的。早在 20 世纪 60 年代初,他就指导并开展了脉冲闪光 X 射线机技术研究,70 年代他推动和指导了我国大型强流脉冲电子束加速器闪光 - I 装置的建造,80 年代推动和指导了我国准分子激光器和惯性约束聚变研究,90 年代他十分关心和重视我国新型感应电子直线加速器闪光机的建造。我国高功率脉冲技术的发展一直得到了张爱萍、朱光亚、王淦昌、陈能宽、程开甲、于敏等领导 and 老前辈科学家的关心、支持和勉励,才得以迅速成长,步入了世界先进行列。

王老生前特别重视高功率脉冲技术队伍的建立和年轻人才的培养,他也十分关心有关高功率脉冲专业技术资料和书籍的编写和出版工作,他多次撰写序言和推荐出版社,他的谆谆教诲牢记在我们心中。

多年来,我们都感到手中缺少一本关于高功率脉冲技术方面理论系统、分析透彻的专著,已经出版的马丁文集是一本很重要的第一手专题资料,但是由于众所周知的原因,至今关于脉冲功率电源、二极管物理和应用专题三大部分资料都比较孤立和零乱,许多有实用价值的资料分散于会议论文中。作者在中国工程物理研究院一直从事高功率脉冲技术研究,先后进行过闪光 X 射线照相技术研究,核爆效应模拟源闪光 - I 研制,国家 863 计划中自由电子激光和高功率微波研究,1995 年后进行了 Z - pinch 技术研究并积极开拓脉冲功率在脱硫脱硝民用方面的研究。作者曾担任中国粒子加速器学会高功率束专业组负责人近 30 年,与国内同行接触较多,对于他们的装置建造和应用开发工作比较熟悉。改革开放以

后,1989年6月作者作为中国代表首次获准参加国际脉冲功率会议,1991年9月苏联刚解体,作者也有幸首次访问俄罗斯从事脉冲功率研究的主要单位。多年来收集了许多珍贵难得的脉冲功率方面的技术资料。从1993年开始,作者曾多次给中国工程物理研究院北京研究生部的研究生开专业课,在授课和答疑中比较清楚地了解年轻人对课程内容的要求,这些都为本书的编写创造了良好的条件。本书是根据高功率脉冲技术的多年发展和国内外最新研究成果,结合切身工作经验,针对应用背景和发展需求,经过综合分析、梳理贯通、提炼总结而成的。应当指出,本书是国内同行多年来从事高功率脉冲技术研究成果的结晶,这是集体智慧的共同成果。

在1995年中国高功率粒子束十年文集王老撰写的序言中,王老精辟地总结了高功率脉冲技术发展的4个里程碑,并高瞻远瞩地提出了高功率脉冲技术今后的发展方向,王老的话是对我们后辈人最大的鼓励和鞭策。2002年11月,我国两弹先驱王老的铜像在中国工程物理研究院流体物理研究所神龙-I广场揭幕,让我们永远缅怀他的教导,兢兢业业、求实创新,为发展我国的高功率脉冲技术事业不懈努力奋斗。我们谨以本书敬献给尊敬的王淦昌先生,趁本书出版之际来纪念他诞生98周年。

作者首先要感谢为建造闪光-I和闪光-II强流脉冲电子束加速器和神龙-I感应直线加速器三大工程装置做出贡献的所有人员,由于他们出色的成果奠定了我国高功率脉冲技术的基础。作者衷心感谢在我国对俄罗斯引进项目中做出成绩的同行人,俄罗斯人富有创新的特色工作,大大丰富了脉冲功率技术的内涵。作者还要感谢近年来国内本专业的研究生们,他们许多有独到见解的优秀硕士、博士论文,对脉冲功率方方面面的问题,进行了深入探讨,拓展了脉冲功率的理论和应用,没有上述人们的辛勤劳动成果,本书是难以做到紧密结合实际的。

感谢王乃彦院士和邱爱慈院士为本书写了推荐出版意见,本书编写自始至终得到了中物院科技丛书编委会和院、所主管领导的关心和支持,也得到了国内兄弟单位同行们的许多诚挚的关心和鼓励,在此一并向他们表示衷心的感谢。吕芳同志打印了全部书稿,姚敏同志复印了大量图片,在此向她们表示谢意,真诚感谢杨大为研究员、邱爱慈院士在百忙中审阅了书稿,并提出了许多宝贵的修改意见。

由于作者专业水平所限,加之完稿时间仓促,书中论述不妥、错误和遗漏之处,恳请专家和读者提出批评和指正!

作 者

2005年1月20日

目 录

符号表	1
第 1 章 绪论	5
1.1 历史背景——高功率脉冲技术的发展动力	5
1.2 高功率脉冲技术的特点	9
1.3 高功率脉冲技术的工程发展	13
1.4 高功率脉冲技术的应用和研究概况	20
1.5 专题文献资料	24
参考文献	26
第 2 章 马克斯发生器	29
2.1 脉冲功率系统简介	29
2.2 马克斯发生器的工作原理	32
2.3 马克斯发生器的充电过程分析	47
2.4 马克斯发生器的放电过程分析	54
2.5 中储电容和锐化电容电路分析	68
2.6 高压纳秒脉冲发生器	78
2.7 马克斯发生器的参数测量	83
2.8 马克斯发生器的发展概况	86
2.9 马克斯发生器的故障检查及安全	92
参考文献	94
第 3 章 传输线	95
3.1 引言	95
3.2 传输线的基本理论	97
3.3 传输线的功能	105
3.4 传输线的基本类型和参数	111