



《中国工程物理研究院科技丛书》第 042 号

高能激光系统

苏毅 万敏 编著

国防工业出版社

高能激光系统

High Energy Laser System

苏毅 万敏 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高能激光系统/苏毅,万敏编著. —北京:国防工业出版社,2004.6

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-03488-6

I. 高... II. ①苏... ②万... III. 高能-激光器
IV. TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 040750 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 9¼ 228 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:31.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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	蔡锺		
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际科研任务。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 毅 汪小琳 吴志杰 张 健

张方晓 张富堂 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 唐 勇 吴衍斌 李天惠

本册编辑 吴衍斌

《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 | 胡家贇编著 | 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 | 粘性消动法和差分格式粘性 | 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射线与超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 材料中的氮及氦渗透
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06月
- 040 复杂系统可靠性工程
金碧辉主编 国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的测量和分析技术
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

序

高能激光系统的研究是国际上备受关注的前沿领域之一,它涉及一系列的科学、技术和工程问题。从高能激光的产生、系统内的传输、变换、发送,直到与传输路径介质和应用目标的相互作用,环节很多,还有研究过程中必须的诊断手段,并且要集成为一个可用的系统,所有这些,涉及多学科的复杂问题。由于是高能量、高功率的激光,在系统的许多环节,不仅存在着线性效应,还会涉及多种类型的非线性效应,这就为光束质量和总体性能的保持提出了许多挑战性的难题。全过程的光束质量控制是一个核心的问题,要依靠多种物理和技术手段来解决。因而,高能激光系统的发展,带动着一系列前沿性的科学研究。

本书系统地介绍了高能激光系统的基本概念,国际研究概况,系统各环节涉及的科学、技术问题,是一本全面介绍和论述高能激光系统的专著。全书兼顾了基础性和实用性,结构严谨、概念明晰、深入浅出,不仅是一本极好的研究生教材,也是一本对有关科研人员十分有益的参考书。相信本书的出版会有助于本领域科技工作者的切磋与交流。

杜祥琬

2003年10月

前 言

高能激光器不仅仅指激光器的输出能量高,还要有相当高的功率。通常认为高能激光器输出的激光平均功率应大于 10kW,持续时间达数秒,激光能量在数万焦以上。高能激光系统利用高能激光器和光束定向器把激光辐射以足够大的功率密度和能量密度在足够小的立体角内定向地投射到远距离目标上。高能激光在民用上和军事上都具有广泛的应用前景,例如可用于激光向空间轨道卫星供能,以延长卫星寿命;在空间收集太阳能转换为激光向地面进行能量定向传输;清除空间垃圾的激光能量输运以及作为高能激光武器等。本书编辑出版的目的是使读者对高能激光系统有一个较全面的了解,对从事相关研究的科技工作者特别是年轻的科技人员有所裨益,便于从事不同专业的人员进行技术交流,以促进高能激光技术的研究与发展。

本书是在作者对研究生的授课教材基础上,广泛参考国内外学术论文、著作编著的。全面地介绍了高能激光系统的物理和技术,包括基本概念和最新的技术进展。本书可以作为读者掌握系统总体的方便的入门参考书,能方便地查阅一些基本概念,甚至可以当做一本高能激光技术手册使用。

本书共分为 8 章。第 1 章介绍了高能激光系统的基本概念、构成和国外研究发展概况。第 2 章和第 3 章介绍光束传输的基本理论、激光束质量和亮度等基本概念,作为阅读以后各章的预备知识。第 4 章介绍了几种典型的高能激光器,包括二氧化碳激光器、氟化氢和氟化氙化学激光器、氧碘化学激光器、二极管泵浦固体激光器和自由电子激光器的物理概念、基本原理和关键技术。第 5 章到第 7 章主要介绍有关光束控制、激光大气传输和自适应光学

技术,包括目标捕获、跟踪、瞄准和激光发射系统的基本概念、工作过程和提高系统能力的技术途径。第8章介绍了一些高能激光诊断技术和装置,包括激光能量、功率和激光强度的时空分布的测量方法。在编写中我们力求物理概念的正确,兼顾原理、技术和装置的介绍,能够做到深入浅出。

《高能激光系统》是一本该领域的基础性和前沿性相结合的专著,可以作为大学相关专业的教学参考书,可供从事激光技术领域工作的科技工作者、教师和研究生阅读和参考。

感谢杜祥琬院士在本书编写过程中给予的支持、指导和提出宝贵意见,特别是感谢他在百忙中为本书写序。感谢在科研工作中与范滇元院士,姜文汉院士,龚知本、马佳光、桑凤亭和杨成龙教授进行的有益讨论,使作者受益匪浅。全书由杜祥琬院士和张凯研究员进行专审,在此表示感谢。感谢中国工程物理研究院和国防工业出版社对本书出版的支持和帮助。

由于作者的学识水平有限,本书存在错误和不足之处,恳请读者见谅并批评指正,不胜感谢。

苏 毅

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 高能激光系统概述	1
1.2 高能激光器	3
1.3 高能激光系统构成	6
1.4 国外高能激光系统研究概况	7
参考文献	9
第 2 章 光的传输理论	11
2.1 光的电磁理论基础	11
2.1.1 麦克斯韦电磁场方程组	11
2.1.2 球面波和平面波	12
2.2 高斯光束	14
2.2.1 基模高斯光束的传输	14
2.2.2 基模高斯光束的基本特性	16
2.2.3 高阶高斯光束	18
2.3 衍射极限	21
2.3.1 线性系统的光传输	21
2.3.2 衍射理论	22
2.3.3 光束的透镜变换	25
2.3.4 平面波的衍射极限	26
参考文献	37
第 3 章 光束质量与亮度	39
3.1 激光特征参数及其测量方法	39
3.2 光束质量评价因子	42
3.2.1 光束质量因子 β	42

3.2.2 环围功率比	45
3.2.3 斯特列尔比	45
3.2.4 M^2 因子	48
3.2.5 各光束质量评价方法的比较	50
3.2.6 近场光强不均匀性对光束质量的影响	50
3.3 激光束亮度	58
参考文献	59
第4章 高能激光器	61
4.1 概述	61
4.2 CO_2 激光器	63
4.2.1 CO_2 激光器原理	63
4.2.2 气动 CO_2 激光器结构	65
4.3 HF/DF 化学激光器	66
4.3.1 HF/DF 激光器原理	66
4.3.2 连续波 HF/DF 激光器结构	67
4.3.3 HF 泛频激光器	70
4.4 氧碘化学激光器	74
4.4.1 氧碘化学激光器原理	74
4.4.2 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 发生器	76
4.4.3 氧碘混合喷嘴	81
4.4.4 激光腔	82
4.4.5 压力恢复系统	83
4.4.6 氧碘化学激光器的效率	85
4.4.7 新体系碘化学激光器	88
4.5 二极管泵浦固体激光器	91
4.5.1 二极管泵浦固体激光器概述	91
4.5.2 激光介质及其几何构型	92
4.5.3 泵浦耦合方式	97
4.5.4 激光功率的定标放大	100
4.5.5 热管理	101

4.5.6 二极管泵浦固体激光器的效率	105
4.6 自由电子激光器	106
参考文献	109
第5章 激光大气传输	114
5.1 大气层结构	114
5.2 大气衰减	116
5.2.1 大气组成	117
5.2.2 大气吸收	118
5.2.3 大气散射	119
5.2.4 大气透过率	122
5.2.5 能见距	123
5.3 大气折射	126
5.4 大气湍流效应	127
5.4.1 大气湍流特性	128
5.4.2 大气湍流的激光传输效应	135
5.5 大气热晕效应	143
5.5.1 热晕效应简介	143
5.5.2 热晕效应的简化计算模型	145
5.5.3 热晕效应的基本方程与数值计算方法	147
5.5.4 大气热晕效应的抑制和补偿	148
5.6 受激喇曼散射	150
5.7 大气击穿	152
参考文献	153
第6章 光束控制系统	155
6.1 概述	155
6.2 捕获、跟踪、瞄准的基本概念和工作过程	157
6.2.1 基本概念的定义	157
6.2.2 跟踪系统工作过程	159
6.2.3 瞄准偏置	161
6.3 提高捕获、跟踪和瞄准系统性能的途径	164