



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

激光武器

阎吉祥 编著

Laser Weapons



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

激光武器

阎吉祥 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书较全面系统地讨论了激光在武器火控系统中及作为直接杀伤武器的应用。全书共13章,其中前3章分别介绍激光基础知识,激光大气传输及激光在军事领域的应用;第4~6章讨论激光在武器火控系统中的应用;第7章描述低能激光武器;第8~12章重点介绍高能激光武器及相关知识,包括适合武器应用、特别是高能武器应用的先进固体激光器,获得高能量、高功率固体激光的主要技术,保持高光束质量的热管理技术和自适应光学校正技术等;最后,第13章介绍激光武器产生的影响和相关国际法。

本书既可作为高等院校有关专业的教学参考书,也可供本领域科技工作者及部队各级指战员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光武器/阎吉祥编著. —北京:国防工业出版社,2016.11

(现代激光技术及应用)

ISBN 978-7-118-11064-7

I. ①激… II. ①阎… III. ①激光武器
IV. ①TJ95

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第298917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100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20 $\frac{1}{2}$ 字数 380 千字

2016年11月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委 员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委 员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划并组织编写了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会。为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会。这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分人是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家。编辑委员会成员以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整,组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为“十二五”国家重点出

版规划项目和国家出版基金项目。丛书本身具有鲜明特色:①丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;②丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;③丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;④丛书作者均来自国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最高水平,特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,从书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周炳琨

2015年3月

只要战争或战争之威胁尚存在,每当一种新技术出现,人们总会情不自禁地想到将其用于武器系统。激光,这个刚一诞生便荣膺“死光”之美誉的“怪物”自然更不例外,仅仅过了四五个春秋,激光在军事领域的首例应用——空前准确与快捷的激光测距系统就问世了。

1990年,纪念世界上第一台激光器诞生30周年的庆典活动刚刚降下帷幕,举世瞩目的海湾战争即为激光武器大展奇才提供了绝好的舞台。携带“地狱之火”激光制导导弹的八架直升机一夜之间便将伊拉克西部的两个雷达站夷为平地,从而打开一条无雷达监视的通道,使多国部队的飞机得以自由自在地飞往巴格达地区进行轰炸。这对战争的进展无疑发挥了至关重要的作用。

从那时起又26年过去了,如今的激光器已过“知天命”之年,而它在武器系统中的应用也越来越广泛:既包括武器火控系统,也包括直接杀伤系统;既包括低能激光武器,也包括高能激光武器。这些应用为陆、海、空、天部队提供了强有力高效能的手段。有些机构或个人甚至认为,21世纪的战争将是激光武器的战争。不管这种说法是否过分,可以肯定的是,激光武器必将在未来战争中发挥至关重要的作用。鉴于这种情况,我国固体激光领域权威专家、中国工程院院士周寿桓先生提议编写一本既深入介绍基本原理,又能反映该领域现代发展水平的著作,并将其纳入“十二五”国家重点出版规划项目及国家出版基金项目“现代激光技术及应用丛书”。此提议得到国防工业出版社的积极响应和支持。

本书的目的是向我国广大读者较全面地介绍各种现代激光武器系统及其发展趋势。其中:前3章是基础;第4~6章介绍激光在武器火控系统中的应用;第7章描述低能激光武器;第8~12章重点讨论高能激光武器及相关知识。随着固体激光技术的迅速发展及其用于武器系统的独特优点的逐步展现,激光武器备选激光器的重点正在由以往的气体激光器和化学激光器向固体激光器转移。因此,第8~12章主要针对如何获取高能量高光束质量固体激光器而展开,分别讨论适合武器应用、特别是高能武器应用的先进固体激光器,获得高能量、高功率固体激光的主要技术,保持高光束质量的热管理技术和自适应光学校正技术。最后,第13章介绍激光武器产生的影响和国际法。本书既可作为高等院校有关专业的教学参考书,也可供本领域科技工作者及部队各级指战员阅读参考。

作者衷心感谢周寿桓院士,周院士在本书的立项和内容取舍方面均给予宝

贵指导,并提供了很多关于激光武器最新国际进展的资料;感谢国防工业出版社领导和责任编辑为本书的立项和出版所做的多方面的工作;感谢所引参考文献的原作者;感谢参与书稿文字录入的作者的研究生们,恕不在此一一列出。

囿于水平,谬误欠妥之处在所难免。苟蒙读者不吝赐教,不胜感谢。

作者

2016年5月于北京

绪论

第1章 激光概论

1.1 原子发光机理	4
1.1.1 α 粒子散射和原子的核式结构	4
1.1.2 氢原子光谱和波尔原子模型	5
1.1.3 量子力学和原子发光	8
1.1.4 光谱线的展宽	16
1.2 激光产生机理	19
1.2.1 激光器的腔模概念	19
1.2.2 激光产生的必要条件	20
1.2.3 激光产生的充分条件	24
1.3 激光的物理特性	27
1.3.1 单色性与时间相干性	27
1.3.2 方向性和空间相干性	28
1.3.3 高阶相关	28
1.3.4 高亮度	28
1.4 激光器的工作特性简介	29
1.4.1 超短脉冲特性	29
1.4.2 频率稳定特性	30
参考文献	30

第2章 激光的大气传输

2.1 激光的能量衰减	32
2.1.1 大气吸收	32
2.1.2 大气分子散射	34
2.1.3 大气微粒引起的消光	35
2.2 激光束偏转和湍流大气的光学特性	39

2.2.1 大气折射	39
2.2.2 湍流大气的光学特性	39
2.3 强激光在大气中的传播	41
参考文献	45

第3章 激光军事应用概述

3.1 引言	46
3.2 激光在武器辅助系统中的应用	46
3.2.1 激光测距与跟踪	46
3.2.2 激光目标指示器	49
3.2.3 激光雷达	52
3.2.4 武器模拟系统	55
3.2.5 激光在军事领域的其他应用	56
3.3 激光用作直接杀伤武器	59
3.3.1 “星球大战计划”	59
3.3.2 高能激光武器概况	61
3.3.3 低能激光武器概况	64
参考文献	70

第4章 激光测距机

4.1 激光测距原理	71
4.2 光探测器	74
4.2.1 探测器的性能参数	74
4.2.2 热探测器	77
4.2.3 量子探测器	77
4.3 测距机的主要性能	80
4.4 人眼安全激光测距机	83
4.4.1 小型人眼安全激光红外观测装置	83
4.4.2 拉曼频移人眼安全激光测距机及其在空防系统中的应用	86
参考文献	92

第5章 激光雷达

5.1 引言	93
5.2 激光雷达的分类和工作原理	94

5.2.1	激光雷达的分类	94
5.2.2	激光雷达工作原理	94
5.3	发射系统	96
5.3.1	理想光束的参数	96
5.3.2	非理想光束的质量评价	98
5.3.3	激光准直与扫描	100
5.3.4	发射激光的调制及其在雷达测距中的应用	101
5.4	雷达接收	104
5.4.1	探测技术	105
5.4.2	接收孔直径	107
5.4.3	接收解调技术	108
5.5	雷达目标	110
5.5.1	目标的激光横截面	110
5.5.2	两类目标的激光横截面	110
5.6	激光雷达性能	112
5.6.1	信号功率接收	112
5.6.2	信噪比	114
5.6.3	探测概率	115
5.7	激光雷达应用	116
5.7.1	激光雷达测量	116
5.7.2	激光雷达测量参数	118
5.7.3	激光雷达在宇宙飞船自着陆中的应用	121
5.8	固体激光合成孔径雷达	124
5.8.1	合成孔径雷达简介	124
5.8.2	固体激光合成孔径雷达	125
	参考文献	128

第6章 激光制导

6.1	概述	129
6.2	激光半主动寻的制导	131
6.2.1	比例导引制导	131
6.2.2	激光半主动寻的导弹	132
6.2.3	激光目标照射器	135
6.3	激光驾束式制导	137
6.3.1	概述	137

6.3.2 驾束式制导弹道	137
6.4 几种主要的激光制导导弹和其他制导武器简介	139
6.4.1 激光半主动寻的式导弹	139
6.4.2 激光驾束式制导导弹	139
6.4.3 激光制导炸弹和激光制导炮弹	140
参考文献	141

第7章 低能激光武器

7.1 概述	142
7.2 攻击人的激光武器	143
7.2.1 激光对眼睛的伤害和致盲武器	143
7.2.2 激光对皮肤的伤害	148
7.3 反传感器激光武器	150
7.3.1 激光武器对传感器的攻击	150
7.3.2 传感器中的能量密度分布	152
7.3.3 反传感器激光武器	155
参考文献	156

第8章 高能武器级先进固体激光器

8.1 引言	157
8.2 陶瓷激光器概述	158
8.3 Nd:YAG 激光陶瓷的性能	159
8.3.1 光学性能	159
8.3.2 力学性能	161
8.4 典型陶瓷激光器	162
8.4.1 $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器	162
8.4.2 $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器	164
8.5 光纤激光器的工作原理	165
8.5.1 光纤激光器概况	165
8.5.2 能级结构与跃迁机制	165
8.5.3 光纤工作物质	169
8.5.4 光纤激光器的基本结构	170
8.6 双包层光纤激光器	170
8.6.1 单包层光纤的限制	170

8.6.2 双包层光纤激光器	171
8.7 高峰值功率光纤激光现状	175
8.7.1 高峰值功率光纤激光	175
8.7.2 窄线宽高峰值功率激光器	176
参考文献	176

第9章 获取高功率固体激光的关键技术

9.1 激光放大	178
9.1.1 脉冲工作	178
9.1.2 稳态工作	180
9.2 激光主振功放系统简介	181
9.3 激光合束概述	182
9.4 非相干合成	183
9.4.1 并列式光束合成	183
9.4.2 其他形式非相干光束合成	185
9.5 光纤激光的相干合成	186
9.5.1 孔径填充方法	186
9.5.2 共线干涉叠加法	187
9.5.3 光束合成的限制条件	188
9.6 光束光谱(波长)合成	188
9.6.1 概述	188
9.6.2 合成阵列元数估计	190
9.6.3 WBC 与 CBC 的比较	190
9.7 美国国家点火装置及激光系统简介	192
9.7.1 美国国家点火装置简介	192
9.7.2 NIF 的激光系统简介	194
参考文献	195

第10章 固体激光器热管理技术

10.1 LD 泵浦固体激光器	197
10.1.1 概述	197
10.1.2 LD 泵浦固体激光器的结构	198
10.2 激光器的冷却技术	200
10.2.1 概述	200

10.2.2	液体冷却	200
10.2.3	固体冷却	200
10.2.4	喷雾冷却	201
10.3	固体的热容	203
10.3.1	固体热容的经典理论	203
10.3.2	固体热容的量子理论	203
10.4	储热与温升	207
10.4.1	储热功率与输出光功率	207
10.4.2	温度的升高	208
10.4.3	能量输出	209
10.5	温度分布与热应力	210
10.5.1	表面与中心的温度差	210
10.5.2	应力比较	211
10.6	热容激光器工作模式和发展	213
10.6.1	工作模式	213
10.6.2	热容激光器发展	213
	参考文献	215

第 11 章 激光发射系统中的自适应光学技术

11.1	校正式相位共轭自适应光学系统	217
11.1.1	相位共轭原理	217
11.1.2	校正式相位共轭自适应光学系统原理	218
11.2	校正式相位共轭自适应光学系统实例	219
11.2.1	休斯飞机公司发射强激光的 AO 系统(ABCS 系统)	219
11.2.2	短波长自适应技术	221
11.3	固态激光器的自适应像差校正	223
11.3.1	引言	223
11.3.2	用于固体激光器的 MMDM 基自适应光学系统	224
11.3.3	用于固体激光器的 Bimorph 基自适应光学系统	225
11.4	光学相位共轭波和相位共轭镜	227
11.4.1	相位共轭波的定义	228
11.4.2	PCM 与 CPM 的比较	228
11.5	SBS 相位共轭	231
	参考文献	234

第 12 章 高能激光武器

12.1	概述	236
12.2	激光功率	238
12.2.1	辐射源的功率	238
12.2.2	光学传输系统的功率损耗	238
12.2.3	路径传输的功率损耗	240
12.3	光束质量	240
12.3.1	辐射源的光束质量	241
12.3.2	湍流大气对光束质量的影响	243
12.3.3	自适应光学系统简介	246
12.4	美国反核导弹激光武器的早期发展	247
12.5	反卫星高能激光武器	250
12.5.1	卫星的军事应用	250
12.5.2	三种反卫星激光体系	251
12.6	激光人造星技术	254
12.6.1	概述	254
12.6.2	钠激光导星的产生机理	256
12.6.3	激光与钠层作用的非线性效应	258
12.6.4	用于人造星的激光系统	259
12.7	美国高能激光武器发展现状	263
12.7.1	陆军车载和地基系统	263
12.7.2	美国海军的舰载激光武器	267
12.7.3	空军机载激光武器	273
12.8	德国激光武器研制状况	275
12.8.1	MBDA 德国公司的高能激光演示项目	275
12.8.2	德国莱茵金属公司的 50kW 激光武器样机	278
12.9	第三代高能“液体”激光器	284
12.9.1	概述	284
12.9.2	系统结构	285
12.9.3	定标放大	287
12.9.4	应用前景	288
	参考文献	289

第 13 章 激光武器产生的影响和国际法

13.1 激光武器产生的影响.....	291
13.1.1 激光武器在军事领域产生的影响.....	291
13.1.2 激光武器对非军事领域产生的影响.....	295
13.2 国际法.....	296
13.2.1 传统武器与国际法的关系.....	297
13.2.2 激光武器和国际法的关系.....	298
参考文献.....	302
索引.....	303

绪论

一提起武器,人们就会想到战争,一想到战争,脑海中便是刺耳的子弹啸叫声,震耳欲聋的坦克隆隆声和炸弹爆炸声,以及夺目的闪光和弥漫的硝烟。这些的确是常规战争的特色。

常规武器的子弹具有弯曲的弹道,并需要一定的飞行时间,因此,为了击中目标,就应瞄准靶的上方,而对运动目标,还必须有一定的提前量,这就要求射手事先知道目标的距离和运动速度。采用带制导系统的导弹可以解决上述火控问题,然而,对大多数导弹只有采用高技术才能实现有效制导,其代价非常大,而且不能总工作在良好的状态。

常规武器消耗大量弹药导致严重的后勤问题,弹药的质量和体积都很大,而且在储存和运输过程中总会存在不慎引爆的危险。人们自然期望能有一种特殊的武器,它具有笔直的弹道,极高的速度,且较少需要后勤支持。如果这种武器发射时人眼不可见,无噪声,不易被探测,则将更加有效。当前,有可能满足这些要求的一种选择就是激光武器。用于武器系统的激光一般工作在红外波段,人眼不可见,大多数情况下基本无噪声。特别是,激光束以 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ 的速度沿直线传播,假定目标距离为 30 km ,激光束由发射到目标只需 10^{-4} s ;假定目标运动速度为 3600 km/h (按普通观点这是相当高的速度),在 10^{-4} s 它只能移动 10 cm 。这就是说,对激光束而言,距离遥远的目标,犹如近在咫尺;高速运动的靶子,无异于完全静止。因此,用激光攻击目标时,无须考虑提前量之类的问题,而是真正能做到,指向哪里,便打到哪里。

激光技术虽然只有50多年的历史,但由于它具有上述无与伦比的优点,所以已有多种方式应用于军事领域。目前,很多国家的陆军使用范围广泛的激光装置作为激光测距机和目标指示器,而在一些军事大国则正从事范围更加广泛和更接近实用化的研究。

激光武器的设计在很大程度上取决于打击对象。如果目标是在战斗机、直升机、导弹或坦克油箱上烧一个洞,则必须使用功率为数兆瓦量级的高能激光;而如果目标是敏感的光电系统或某种其他类型的传感器系统,需用激光对其进