



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

高平均功率高光束质量 全固态激光器

周寿桓 阎吉祥 冯国英 编著

DPSL with High-average-power Fine-beam-quality



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/

高平均功率高光束质量 全固态激光器

周寿桓 阎吉祥 冯国英 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统介绍获得高平均功率高光束质量全固态激光的基础知识和先进技术。全书共分为10章,包括激光产生机理及其物理特性、激光工作模式及其输出特性、光学谐振腔、高斯光束、光束合成、波前校正技术、块状固体激光器、光纤激光器、光纤耦合输出半导体激光器等。

本书适合激光技术领域的科技工作者、教师和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高平均功率高光束质量全固态激光器/周寿桓, 阎吉祥, 冯国英编著. —北京:国防工业出版社, 2016. 11
(现代激光技术及应用)

ISBN 978 - 7 - 118 - 11150 - 7

I. ①高… II. ①周… ②阎… ③冯… III. ①大功率
激光器—固体激光器—研究 IV. ①TN248. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 305574 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 28½ 字数 541 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 128.00 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 周炳强

2015年3月

固体激光器是最早发明的一种激光器。与其他类型的激光器相比,具有体积小,重量轻,功率密度高,坚固耐用等优点。因而在很多应用场合、特别在军事应用领域起着越来越重要的作用。经过多年的研究,其输出平均功率(能量)已大幅提高,但在同样高的输出平均功率下,光束质量却难以达到气体、化学激光的水平,使其在一些重要领域(例如,远距离能量型)的应用受到限制。

近年来,这一情况已大为改观,尤其是采用激光二极管代替灯泵浦后,使固体激光器发生了质的变化,在提高输出平均功率的同时,已经可保持光束质量基本不变。高平均功率、高光束质量全固态激光已成为下一代远距离能量型应用的一种优选。本书的目的就是尽可能全面、系统地介绍获得高平均功率、高光束质量全固态激光的基础知识和先进技术。

全书共分10章,第1章为概述,简要介绍本书的基本写作思路,对影响高平均功率固体激光光束质量最主要的因素的认识过程、解决思路、取得成绩、尚存不足,以期引起读者的思考;第2~5章是激光基础;后面5章主要讨论同时获得高平均功率、高光束质量的一些先进技术。其中第6章描述获得高平均功率激光的一项重要技术——激光合束;第7章介绍实现高光束质量的自适应光学技术;第8、9章介绍近些年发展起来的几种新型固体激光器,包括薄片、板条、光纤及热容激光器;因为丛书中已有《高平均功率光纤激光相干合成》专著,为完整起见,本书只简单补充讨论一些基础知识。

最后,第10章介绍光纤耦合输出的半导体激光器。半导体激光器是否可算作固体激光器存在不同看法。一方面,从物态来说,半导体属于固体,很多出自名家的“固体物理学”书籍中都以一定篇幅介绍半导体;另一方面,半导体激光器的工作机理的确与固体激光器的颇为不同。但是,只依据工作机理分类也会存在问题,比如,气体激光器的工作机理就与固体激光器的大致相同。所以,本书是采用按激光器的工作介质分类。

考虑实际应用中还迫切希望提高高平均功率、高光束质量全固态激光器的整体效率。从这点来看,直接采用半导体激光器应该是解决的方案之一。特别是,近年高能光纤激光器的泵浦源大多是光纤耦合输出的半导体激光器,或通过

光纤激光器将波长“转换”后作为泵浦源;另一方面,千瓦级的光纤耦合输出的半导体激光器的亮度,已可与灯泵浦的固体激光器相媲美,可以直接用于先进制造。这种直接从半导体激光器取出能量,使总的能量转换效率得到大幅提高,对达到高效率来说无疑非常重要。又因为在丛书中已有《高功率半导体激光器》专著,因此本书仅对 LD 作为固体激光器的泵浦源以及通过光纤耦合输出的相关内容进行讨论。

这里,还特别要强调说明:在第 5 章中大量引用了 20 世纪六七十年代读到的一本油印小册子中的内容,它使作者能更清晰理解高斯光束的形成和传输,受益匪浅,希望在本书中介绍给读者。但那时写文章的不能留下姓名,在心得笔记上也未留下他(她)们的工作单位。在此,谨以诚挚的心情表示深切的谢意!

本书得到“十二五国家重点出版规划项目”和“国家出版基金项目”支持。作者衷心感谢国防工业出版社编辑所做的大量细致的工作。感谢廖新胜,王俊,柯顺琦,沈宏华对第 7 章中内容的讨论和建议。感谢姜东升,赵鸿,张放,周翊,眭晓林,朱晨,刘磊,陈三斌,苑利刚,张利民,陈建国,计玉娟,朱启华,王建军,石秀梅,韩敬华,汪莎,杨火木,李伟,周晟阳,张弘,周昊等对有关内容的贡献。

由于时间仓促,加之编著者仍担负的繁重工作,写作时间极其紧张,并且水平有限,书中肯定有错误欠妥之处,恳请读者惠予指正。

作者

2016 年 4 月于北京

第 1 章 概述

1.1 引言	001
1.2 减少进入工作介质的无用热的方法	003
1.3 对工作介质进行有效散热的方法	008
1.4 减小、补偿不良热影响	009
1.5 全固态激光器的特点	011
1.6 全固态激光器的工作介质	012
参考文献	015

第 2 章 激光产生机理及其物理特性

2.1 原子发光机理	017
2.1.1 α 粒子散射和原子的核式结构	017
2.1.2 氢原子光谱和玻尔原子模型	018
2.1.3 量子力学和原子发光	021
2.1.4 光谱线的展宽	029
2.2 自发辐射和普通光源	033
2.3 光波的叠加与干涉	034
2.3.1 光波的独立传播性	034
2.3.2 光波叠加原理	034
2.3.3 光波的相干条件	035
2.4 相干性的进一步讨论	036
2.4.1 场的复表示	036
2.4.2 空间和时间相干度	037
2.4.3 空间和时间相关性的测量	039
2.5 激光产生机理	041
2.5.1 激光器的腔模概念	042
2.5.2 激光产生的必要条件	042
2.5.3 激光产生的充分条件	047

2.6 激光的物理特性	049
2.6.1 单色性与时间相干性	049
2.6.2 方向性和空间相干性	050
2.6.3 高阶相关	051
2.6.4 高亮度	051
参考文献	051

第3章 激光工作模式及其输出特性

3.1 激光器速率方程的建立	053
3.1.1 速率方程的建立	053
3.1.2 固体三能级系统速率方程组	054
3.1.3 固体四能级系统速率方程组	055
3.2 速率方程的稳态解及增益饱和	056
3.2.1 速率方程的稳态解	056
3.2.2 反转粒子数及增益的饱和	057
3.3 连续与脉冲工作	062
3.3.1 速率方程的解	062
3.3.2 激光器的工作状态	063
3.4 激光放大的阈值条件	065
3.4.1 粒子数反转分布条件	065
3.4.2 阈值增益系数和阈值反转粒子数密度	067
3.4.3 连续/长脉冲阈值光泵功率	068
3.4.4 短脉冲工作阈值光泵能量	068
3.5 激光器的振荡模式	069
3.5.1 起振纵模数目的估算	069
3.5.2 激光器稳定工作状态的建立	070
3.5.3 均匀加宽激光器的模竞争	071
3.5.4 非均匀加宽激光器的多模振荡	072
3.5.5 频率牵引	073
3.6 激光器的输出特性	074
3.6.1 连续激光器的输出功率	074
3.6.2 脉冲激光器的输出能量	077
3.7 激光器的单模线宽极限和弛豫振荡	078
3.7.1 激光器的单模线宽极限	078

3.7.2 弛豫振荡	079
3.8 激光器的泵浦技术	081
3.8.1 直接泵浦	081
3.8.2 间接泵浦	082
参考文献	085

第4章 光学谐振腔

4.1 光学谐振腔的分类	086
4.2 光学谐振腔的特性参数	088
4.2.1 光学谐振腔的菲涅尔数	088
4.2.2 光学谐振腔的 g 参数和 G 参数	090
4.2.3 光学谐振腔的损耗	090
4.2.4 谐振腔内光子的平均寿命	092
4.2.5 无源腔的 Q 值	092
4.2.6 无源腔的本征振荡模式带宽	092
4.3 光学谐振腔的稳定性	093
4.3.1 传输矩阵	093
4.3.2 谐振腔稳定条件	095
4.3.3 g 参数稳区图	098
4.3.4 谐振腔的本征值和本征态	102
4.3.5 一维失调灵敏度	105
4.3.6 二维失调灵敏度	106
4.4 稳定球面腔的等价	110
4.4.1 对称共焦腔	110
4.4.2 任何一个共焦腔均与无穷多个稳定球面腔等价	110
4.4.3 任意一个稳定球面腔只有一个等价的共焦腔	111
4.5 光学谐振腔的偏振特性	112
4.6 热透镜效应对光学谐振腔的影响	115
4.6.1 热透镜的计算	116
4.6.2 热透镜焦距的测量	118
4.7 新型光学谐振腔	121
4.7.1 棱镜腔	121
4.7.2 非轴对称像散腔	123
4.7.3 含变反射率镜腔	123

4.7.4	含梯度相位镜腔	127
4.7.5	含相位一致耦合器腔	129
4.7.6	含相位共轭镜腔	131
4.7.7	多通模谐振腔	132
4.7.8	光束旋转非稳环行腔	132
4.7.9	自成像非稳腔	134
4.7.10	自滤波非稳腔(SFUR)	136
4.7.11	非稳腔	136
4.7.12	放大器用谐振腔	137
4.8	谐振腔设计软件介绍	144
	参考文献	150

第5章 高斯光束

5.1	均匀平面波	153
5.2	均匀球面波	153
5.3	自由空间中的高斯光束	154
5.4	共焦腔中的高斯光束	159
5.5	高斯光束的基本性质	163
5.6	利用 q 参数讨论高斯光束的传输	166
	参考文献	171

第6章 光束合成

6.1	概述	172
6.1.1	非相干合束	172
6.1.2	相干合束	173
6.2	偏振合成	176
6.3	波长合束	177
6.3.1	简介	177
6.3.2	WBC合成阵列元数估计	179
6.4	二极管激光合束	179
6.4.1	二极管激光非相干合束	180
6.4.2	二极管激光相干合束	181
6.5	板条激光器光束相干合成	181
6.6	WBC与CBC的比较	188

参考文献	193
------	-----

第7章 波前校正技术

7.1 引言	196
7.2 夏克-哈特曼波前传感技术	197
7.2.1 夏克-哈特曼波前传感器	197
7.2.2 用于激光波前检测	199
7.2.3 误差分析	200
7.3 点衍射干涉仪	201
7.3.1 点衍射干涉仪工作原理	202
7.3.2 激光波前的PDI检测	203
7.3.3 偏振移相点衍射干涉仪简介	203
7.4 分立制动器	204
7.4.1 压电陶瓷制动器	204
7.4.2 电致伸缩陶瓷制动器	204
7.4.3 磁致伸缩合金制动器	205
7.5 变形反射镜及其在固体激光器中的应用	205
7.5.1 引言	205
7.5.2 MMDM及其在固体激光器中的应用	206
7.5.3 Bimorph反射镜及其在固体激光器中的应用	208
7.6 校正式相位共轭自适应光学系统	210
7.6.1 相位共轭原理	210
7.6.2 校正式相位共轭自适应光学系统原理	210
7.6.3 校正式相位共轭自适应光学系统例子	212
7.6.4 短波长自适应技术	213
7.7 基于无波前传感自适应光学系统的光束净化	216
7.7.1 无波前传感自适应光学系统的基本原理	216
7.7.2 板条激光器光束净化	218
7.7.3 单高阶模光束净化	220
7.7.4 腔内自适应光学	221
7.8 非线性光学基础	224
7.8.1 非线性波方程	224
7.8.2 方程的慢变化包络近似(SVEA)形式	225
7.8.3 材料的非线性及其与光波的耦合	226

7.9	光学相位共轭	227
7.9.1	相位共轭波的定义	227
7.9.2	PCM 与 CPM 的比较	227
7.10	透明介质弹性光子散射的 NOPC	230
7.10.1	三波混频产生相位共轭	230
7.10.2	四波混频产生相位共轭:简并情形	232
7.10.3	近简并四波混频	238
7.10.4	谐振 DFWM 相位共轭	241
7.10.5	光子回波相位共轭	249
7.11	受激散射 NOPC	256
7.11.1	受激拉曼散射	256
7.11.2	受激布里渊散射	257
7.12	光折变材料和自泵浦相位共轭	259
7.12.1	光折变效应	260
7.12.2	自泵浦相位共轭	265
7.12.3	光折变材料的新进展	270
7.13	单程 NOPC	277
7.13.1	单程 NOPC (OWNOPC) 的基本原理	278
7.13.2	基本单程 NOPC 的局限性	281
7.13.3	推广的单程 NOPC 系统	282
	参考文献	283

第 8 章 块状固体激光器

8.1	引言	287
8.2	LD 泵浦固体激光器	288
8.2.1	与闪光灯泵浦的比较	288
8.2.2	阈值功率和高于阈值的工作	290
8.2.3	LD 泵浦固体激光器的结构	293
8.3	薄片激光器	295
8.3.1	薄片介质及泵浦	295
8.3.2	薄片激光器工作原理	296
8.3.3	可能的激光材料	297
8.3.4	数值模拟	299
8.3.5	“液体”激光器	301

8.4	板条激光器	302
8.5	固体的热容	305
	8.5.1 固体热容的经典理论	305
	8.5.2 固体热容的量子理论	306
8.6	薄片激光器的热容工作	309
	8.6.1 储热与升温	309
	8.6.2 温度分布与热应力	313
	8.6.3 光束畸变	315
8.7	热容激光器	316
	参考文献	323

第9章 光纤激光器

9.1	引言	325
9.2	几种稀土离子的能级和谱	326
	9.2.1 概述	326
	9.2.2 硅光纤中几种稀土离子的激光能级和谱	328
	9.2.3 氟光纤中几种稀土离子的激光能级和谱	331
9.3	模及单模运转条件	335
	9.3.1 块状工作介质	335
	9.3.2 光纤工作物质	337
	9.3.3 模特性与截止频率	337
	9.3.4 光纤激光器的基本结构	343
9.4	双包层光纤激光器	343
	9.4.1 单包层光纤的限制	343
	9.4.2 双包层光纤激光器	344
	9.4.3 光子晶体光纤激光器	348
9.5	受激散射光纤激光器	350
	9.5.1 拉曼散射	350
	9.5.2 拉曼散射光纤激光器	351
	9.5.3 受激布里渊散射光纤激光器	352
	参考文献	354

第10章 光纤耦合输出半导体激光器

10.1	半导体激光器光束特性	357
------	------------------	-----

10.1.1	单模半导体激光器光束特性	357
10.1.2	多模半导体激光器光束特性	360
10.2	半导体激光器的波长调谐和波长稳定技术	361
10.2.1	半导体激光器的波长调谐	361
10.2.2	半导体激光器的波长稳定技术	362
10.3	光纤及其传光特性	363
10.3.1	光纤的分类	363
10.3.2	光纤的传光原理	364
10.3.3	数值孔径	365
10.3.4	锥形光纤与圆柱形光纤性能的比较	366
10.4	体(三维)光栅特性	368
10.4.1	衍射光栅	368
10.4.2	布拉格衍射光栅基础	371
10.4.3	布拉格光栅特性研究	372
10.4.4	体光栅的耦合波理论	373
10.4.5	透射式体光栅的理论分析	376
10.4.6	反射式体光栅的理论分析	379
10.4.7	体光栅调谐对角度和波长选择性	380
10.4.8	体光栅调谐对纵模的选择性	382
10.5	外腔半导体激光输出特性	383
10.5.1	外腔调谐半导体激光器工作原理简述	383
10.5.2	外腔半导体激光器的阈值条件	384
10.5.3	ECLD 的调谐范围分析	388
10.6	半导体激光与光纤耦合特性理论	389
10.6.1	光纤与半导体激光器的耦合条件	390
10.6.2	半锥形光纤耦合的产生	390
10.6.3	半锥形光纤参数的选取	391
10.6.4	用光线追迹法对耦合效率的分析计算	394
10.6.5	半锥宽度、锥角、相对平移、相对倾斜对耦合效率的影响	396
10.6.6	耦合调整容忍度分析	399
10.7	耦合系统实例	401
	参考文献	406

第1章

1.1 引言

1960年美国科学家梅曼发明了第一台激光器——气体放电灯泵浦的红宝石激光器,之后,激光在理论、技术、应用各个方面都蓬勃发展起来。随后相继出现了气体激光器、半导体激光器、液体激光器、化学激光器、自由电子激光器等。相对来说,固体激光器的功率密度高,结构小巧、紧凑、牢固,因而得到广泛(特别在军事上)应用。例如,激光雷达,水下目标探测,激光测距、跟踪、制导、干扰、制盲,激光加工,激光光谱学,非线性光学,强场物理学,激光核聚变研究,医疗等。

纵观人类历史,几乎每一项新技术出现,都会优先用于“武器”,其根本原因是人类的贪婪和良知并存。无论是侵略或反抗都希望用最强大、有效的武器来装备自己。每当一种新技术出现,总会情不自禁地想到如何将其用于武器系统,激光的命运也未能幸免。实验室里在激光辐照下,即便是金刚石也瞬间变为一缕青烟。看到这种传说中的“死光”变为现实,人们振奋,舆论沸扬,不到一年“激光武器”已成为时髦的研究课题。

走出实验室经历磨难后才发现,早期的固体激光尽管其亮度高得惊人,但作为远距离应用的能量型武器仍然不够。其主要原因是在高平均功率工作时,随激光的输出功率增大到某个数值后,其亮度不再增加,甚至反而下降。其中,最重要的一个影响因素是“热效应”。

多年对克服热效应的研究,迎来了“全固态”激光这一革命性进展。全固态激光被公认为下一代的激光武器的优选者而再次焕发青春。

1963年 R. Newman 首先提出用半导体发光二极管泵浦固体激光器。他用 GaAs 发光二极管泵浦 $\text{Nd}:\text{CaWO}_4$ 观察到了荧光。1964年 R. J. Keyes 等首次实现了用 GaAs 激光二极管泵浦 $\text{CaF}_2:\text{U}^{+3}$ 获得激光输出。随后相关的研究逐渐增多,但由于当时激光二极管(Laser Diode, LD)需要在低温工作,且输出功率(能