



“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 光纤激光相干合成

刘泽金 周朴 许晓军 王小林 马阎星 著

Coherent Beam Combining of
High Average Power Fiber Lasers



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 光纤激光相干合成

刘泽金 周朴 许晓军 王小林 马阎星 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书对高平均功率光纤激光相干合成进行了系统阐述和分析。全书共分为10章,首先介绍光纤激光的发展历史、现状以及光纤激光相干合成方法,然后从单纤和合成两个方面进行重点剖析,包括高功率光纤激光非线性效应产生机理与抑制方法、高功率光纤激光热致模式不稳定、相干合成光束质量评价与系统分析、单元光束控制技术、阵列光束控制技术、相干合成阵列光束的大气传输与补偿,最后介绍光纤激光相干合成技术的应用。

本书写作历时近5年,在写作过程中不断补充相关领域的最新进展,兼备基础性和前沿性,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

高平均功率光纤激光相干合成/刘泽金等著. —北京:
国防工业出版社,2016.11 (现代激光技术及应用)

ISBN 978-7-118-11186-6

I. ①高… II. ①刘… III. ①光纤器件—激光器—
相干光—研究 IV. ①TN248

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第298956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 17 字数 332 千字

2016年11月第1版第1次印刷 印数 1—2500 册 定价 78.00 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大进展,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,丛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

进入 21 世纪以来,高功率光纤激光技术得到了迅速发展,其在高能激光系统中的巨大应用潜力被各国军方和科研人员一致看好。受限于泵浦源亮度、热效应、非线性效应等因素的影响,单束光纤激光的输出功率受限,对多束激光进行光束合成是实现更高功率输出的必由之路,这一点已经成为业内人士的共识。光纤激光器固有的紧凑结构也非常适合于构建激光阵列。光束合成主要可以分为非相干合成和相干合成两大类。截至目前:美国海军、德国 MBDA 公司和莱茵金属公司等单位已经分别通过几何并束这一非相干合成的方式构建了高能光纤激光试验系统;美国洛克希德·马丁公司和德国夫琅禾费研究所分别通过光谱合成这一非相干合成的方式实现了 3 万瓦和万瓦级高功率输出;中国国防科学技术大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、美国空军研究实验室、美国麻省理工学院和美国诺格公司已实现光纤激光相干合成数千瓦级高功率输出。

据不完全统计,目前国际上已有 10 多个国家的 40 多个研究单位开展了相关研究,在光纤激光相干合成领域发表的科技论文已经超过了 1000 篇。美国定向能协会 2010 年出版的 *Introduction to High Power Fiber Lasers* (2013 年 5 月再版)、美国 McGraw-Hill 出版社 2011 年出版的 *High Power Laser Handbook* 中均设置了专门的章节对相干合成加以介绍。2013 年, Wiley 出版集团出版了 *Coherent Laser Beam Combining* 一书,由目前国际上从事相关研究的具有代表性的 15 家研究单位撰写独立章节,介绍各自单位的研究方法和最新成果。在国内,越来越多的青年科技人员和研究生加入到相干合成这一前沿研究领域。然而,他们往往需要广泛调研和阅读数百篇学术论文,才能完成由“新手”到“入门”的角色转换,缺乏一本系统介绍相干合成的基本原理、实现方式、研究现状和发展动态的书籍。

应国防工业出版社“现代激光技术及应用丛书”编辑委员会主任周寿桓院士的邀请,我们于2012年启动了本书的写作计划。由于光纤激光相干合成属当前激光技术领域的一个热点课题,从启动写作计划到目前这4年多的时间内,大量的创新思想和令人振奋的研究成果不断涌现,使本书的写作多次反复,几易其稿,唯恐有所疏漏。

第1章为本书的第一部分,从大功率光纤激光的发展现状出发,通过分析计算单束激光的输出功率极限,得出光束合成是获得更高功率输出的必由之路这一基本结论,并对常见的光束合成方法进行归纳总结和分类介绍,分析出相干合成技术的技术特点和优势。第2章和第3章为本书的第二部分,介绍激光相干合成的发展历史和实现方法。第4章和第5章为本书的第三部分,介绍限制参与相干合成的单束激光功率提升的物理因素及解决方案。第6章~第8章为本书的第四部分,分别从系统分析、单束激光控制和阵列激光控制方法三个方面详细介绍基于主动相位控制的光纤激光相干合成技术。第9章和第10章为本书的第五部分,分别介绍合成光束的大气传输与闭环控制、光纤激光光束合成技术的应用。希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用,启发和引导读者在这一领域深入研究,不断涌现新的高水平研究成果,使我国在这一领域的研究始终走在国际前列。

国防科学技术大学光电科学与工程学院长期开展光纤激光相干合成研究工作,本书参考了该学院课题组肖瑞、陈子伦、周朴、曹润秋、王小林、冷进勇、李霄、马阎星、肖虎、韩凯、粟荣涛、王文亮、陶汝茂、张汉伟、马鹏飞、王雄等学位论文中的部分内容。该学院的王小林、马阎星、粟荣涛、陶汝茂还全程参加了本书的撰写工作。本书引用了国内外同行的部分研究成果,正文中均对出处进行了标注,在此对原作者一并致谢!衷心感谢国防工业出版社对本书出版的支持与帮助。由于笔者才疏学浅,如有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2016年5月

第1章 绪论

1.1 大功率光纤激光的发展历程	001
1.1.1 宽谱掺镱光纤激光器	002
1.1.2 窄线宽掺镱光纤激光器	005
1.1.3 其他类型大功率光纤激光器	008
1.2 光纤激光器的输出功率极限	009
1.2.1 理论模型	010
1.2.2 数值计算	011
1.3 光纤激光光束合成的方法	016
1.3.1 几何并束	017
1.3.2 功率合成	018
1.3.3 偏振合成	019
1.3.4 时序合成	019
1.3.5 光谱合成	020
1.3.6 相干合成	021
参考文献	023

第2章 激光相干合成的历史和现状

2.1 气体激光相干合成	032
2.2 化学激光相干合成	034
2.3 半导体激光相干合成	036
2.4 固体激光相干合成	037
参考文献	041

第3章 光纤激光相干合成方法

3.1 外腔法相干合成	047
3.1.1 自傅里叶变换腔	048

3.1.2	傅里叶变换自成像腔	050
3.1.3	单模光纤滤波环形腔	051
3.2	自组织相干合成	053
3.2.1	倏逝波耦合	053
3.2.2	干涉仪结构	057
3.2.3	自组织互注入式	058
3.3	Sagnac 腔法	059
3.4	相位共轭法	060
3.5	外差法	061
3.6	抖动法	063
3.7	优化算法	068
3.8	条纹提取法	073
3.9	不同相位控制方法的比较	074
	参考文献	076

第 4 章 高功率光纤激光非线性效应产生机理与抑制方法

4.1	光纤中非线性产生的基本原理	084
4.2	受激布里渊散射	085
4.2.1	受激布里渊散射的产生机理	085
4.2.2	传能光纤中的受激布里渊散射理论模型	087
4.2.3	增益光纤中的受激布里渊散射理论模型	088
4.2.4	光纤放大器中受激布里渊散射的抑制方法	090
4.3	受激拉曼散射	099
4.3.1	受激拉曼散射的产生机理	099
4.3.2	受激拉曼散射的抑制方法	101
4.3.3	前向拉曼兼容光纤激光器	102
4.4	自相位调制	105
4.4.1	自相位调制的产生机理	105
4.4.2	自相位调制的补偿	107
	参考文献	110

第 5 章 高功率光纤激光热致模式不稳定

5.1	热致模式不稳定的概念及物理机理	114
5.1.1	热致模式不稳定的概念	114

5.1.2	热致模式不稳定的物理机理	115
5.2	热致模式不稳定的理论模型	117
5.2.1	热致模式不稳定理论模型简介	117
5.2.2	热致模式不稳定理论模型推导	119
5.3	热致模式不稳定的研究方法及特点	125
5.3.1	热致模式不稳定试验研究方法	125
5.3.2	热致模式不稳定的典型特点	128
5.4	热致模式不稳定的抑制技术	134
5.4.1	抑制高阶模	134
5.4.2	减小量子亏损	137
5.4.3	增强增益饱和	137
5.4.4	其他方法	138
	参考文献	140

第6章 相干合成光束质量评价与系统分析

6.1	基本理论模型	144
6.1.1	相干合成的基本结构	144
6.1.2	相干合成的数学模型	145
6.1.3	相干合成的影响因素	147
6.2	光束评价标准	148
6.2.1	M^2 因子	149
6.2.2	Strehl比	150
6.2.3	BQ	151
6.2.4	BPF	151
6.3	影响因素分析	153
6.3.1	阵列光束数目	153
6.3.2	占空比	154
6.3.3	偏振态	155
6.3.4	相位误差	155
6.3.5	倾斜波前	156
	参考文献	157

第7章 单元光束控制技术

7.1	光程控制技术	160
-----	--------	-----

7.1.1	匹配被动光纤长度法	160
7.1.2	空间光路调节法	161
7.1.3	光纤延迟线法	162
7.1.4	光纤拉伸/相位延迟法	163
7.1.5	各种光程控制方法的比较	164
7.2	倾斜控制技术	164
7.2.1	倾斜控制器件及其原理	165
7.2.2	倾斜控制实现方案简介	168
7.3	偏振控制技术	171
7.3.1	偏振控制的基本原理	172
7.3.2	偏振控制实现方案简介	172
	参考文献	174

第8章 阵列光束控制技术

8.1	孔径填充技术	176
8.1.1	光纤激光准直器	177
8.1.2	分孔径相干合成	177
8.1.3	共孔径相干合成	182
8.2	锁相控制技术	185
8.2.1	光纤放大器的相位噪声特性	186
8.2.2	锁相控制方法	189
8.2.3	脉冲激光锁相控制方法	200
8.2.4	大阵元激光相干合成中的相位控制	203
	参考文献	205

第9章 相干合成阵列光束的大气传输与补偿

9.1	大气光学效应简介	209
9.1.1	大气湍流	209
9.1.2	热晕	211
9.2	大气湍流对阵列光束相干合成的影响	211
9.2.1	阵列光束相干合成的大气传输模型	211
9.2.2	大气湍流对合成光束传输的影响	216
9.3	大气湍流的补偿——目标在回路相干合成技术	217
9.3.1	目标在回路相干合成技术理论分析	217

9.3.2 目标在回路相干合成技术试验研究·····	222
9.4 热晕对阵列光束相干合成的影响·····	226
参考文献·····	229

第 10 章 应用扩展

10.1 新型激光光源的相干合成·····	232
10.1.1 变频激光的相干合成·····	232
10.1.2 拉曼激光的相干合成·····	233
10.1.3 其他类型激光的相干合成·····	233
10.2 超短脉冲激光的相干合成·····	234
10.3 特殊光束产生及其他应用·····	235
10.3.1 涡旋光束·····	235
10.3.2 径向/角向偏振空心光束·····	236
10.3.3 光纤激光雷达·····	237
10.4 光纤激光相控阵·····	238
参考文献·····	239

光纤激光器是指以光纤为增益介质的激光器^[1-5]。通过在光纤基质材料中掺杂不同元素的稀土离子,如镱(Yb)、铒(Er)、铥(Tm)、钬(Ho)、钕(Nd)等,可以获得相应波段的激光输出^[6,7]。与其他类型的激光器相比,光纤激光器具有转换效率高、结构紧凑、热管理方便、光束质量优良等突出优势,在工业、国防等领域有广泛的应用前景,近年来成为了高能激光技术领域的研究热点。随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺和高亮度泵浦源技术的发展,光纤激光器的输出功率以惊人的速度迅速提高,目前,单模光纤激光器的输出功率已经突破万瓦级^[8,9]。但由于非线性效应、热损伤及泵浦源亮度等因素的影响,单根光纤激光输出功率存在极限^[10-14]。以目前输出功率最高的掺镱光纤激光器为例,理论研究结果表明,其宽谱、严格单模输出时的极限功率在万瓦级^[12],单频、严格单模输出时的极限功率在千瓦级^[13]。由此,单根光纤激光器不能满足百千瓦(以上)级高功率输出的应用要求^[15,16],对多束光纤激光进行光束合成是获得更高功率输出的可行途径。

1.1 大功率光纤激光的发展历程

光纤激光器的分类方法有很多:按照掺杂离子的类型划分,可以分为掺镱光纤激光器、掺铒光纤激光器、掺铥光纤激光器、掺钬光纤激光器等;按照运行体制划分,可以分为连续波光纤激光器和脉冲光纤激光器;按照输出光谱的宽度划分,可以分为宽谱光纤激光器和窄线宽光纤激光器等;按照光纤基质材料划分,可以分为石英基光纤激光器、磷酸盐光纤激光器、氟化物光纤激光器等。由于镱离子在石英玻璃基质中具有溶解度高、能级结构简单、吸收和发射带较宽等物理特性,石英基掺镱光纤激光器相对于其他类型光纤激光器更易实现高功率、高效率的激光输出^[17,18]。相关文献表明,自1999年之后,光纤激光器的最高输出功率纪录均由石英基掺镱光纤激光器创造^[6]。相对石英基光纤激光器而言,磷酸盐光纤激光器和氟化物光纤激光器输出功率不高,目前主要用于产生低噪声单

频光纤激光器^[19,20]和特殊波长中红外光纤激光器^[21]。本节重点介绍石英基掺镱光纤激光器的发展现状。由于不同光束合成系统对激光线宽的要求不同(后面将详细介绍),下面分宽谱掺镱光纤激光器和窄线宽掺镱光纤激光器两大类予以介绍。

1.1.1 宽谱掺镱光纤激光器

目前,学术界对宽谱和窄线宽光纤激光器的界定并没有统一的标准,从公开发表的文献看,大致可以将谱线宽度大于30GHz(对应0.1nm @ 1 μ m)的激光器划为宽谱光纤激光器。由于掺镱光纤发射带较宽,采用常规方法获得的激光一般都是宽谱激光。

虽然光纤激光器与半导体激光器(LD)几乎出现在同一时间,但由于将低亮度的半导体激光高效率地耦合到直径几微米的纤芯内较为困难,光纤激光器在很长时间内只能用单模半导体激光泵浦,产生激光的功率较低,限制在毫瓦级。1988年,Snitzer等发明了双包层光纤^[22],使掺杂光纤可以用高功率的多模激光进行泵浦,由此光纤激光器输出功率得到了明显的提升。典型的双包层光纤激光结构包括纤芯、内包层和外包层三部分,如图1-1所示^[6]。外包层通常由低折射率聚合物构成,同时起到了涂覆层的作用。外包层折射率低于内包层,因此泵浦光可以在内包层中传输。由于内包层的直径和数值孔径可远大于纤芯,可以高效率地耦合进更高功率的泵浦光,泵浦光在内包层里经全反射后进入掺稀土离子的纤芯并被吸收,实现激光的产生或放大。

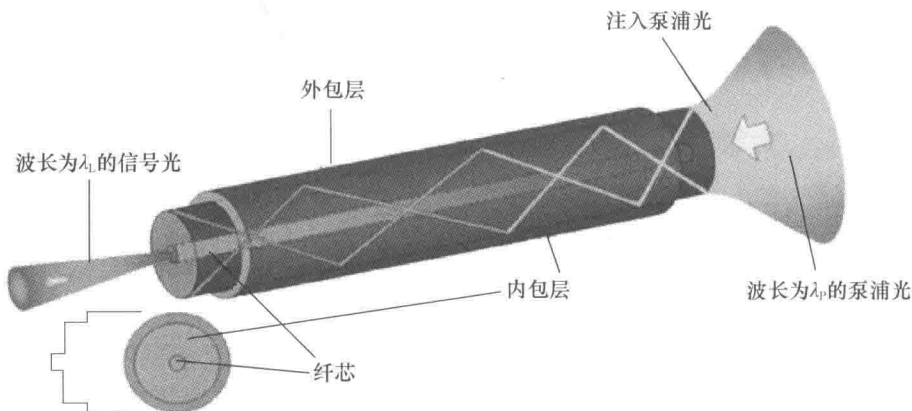


图1-1 双包层光纤激光示意图

包层泵浦技术的出现使光纤激光器输出功率实现了由毫瓦级到瓦量级的提升。1994年,Pask等首次实现了掺镱光纤的包层泵浦,得到了0.5W的1040nm激光输出,斜率效率为80%^[23]。1997年,Muendel利用916nm的LD泵浦双包

层掺铒光纤,获得了 35.5W 的 1100nm 激光输出,激光器效率为 64%^[24]。1999 年, Dominic 等利用双端泵浦方案,实现了 110W 的单模连续激光输出,使光纤激光器的输出功率突破了百瓦,引起了广泛关注^[25]。随着高功率 LD 和双包层光纤制造工艺的进一步发展,掺铒光纤激光器的输出功率获得了迅速提升。1999—2005 年间,引领光纤激光器发展方向的是英国南安普敦大学光子研究中心及其合作的英国 SPI 公司、德国耶拿大学应用物理研究所等欧洲研究单位^[26-28]。2004 年,南安普敦大学的 Jeong 等实现了世界上第一个千瓦级光纤激光输出^[26]。他们利用 975nm LD 双端泵浦纤芯直径 43 μm 的双包层掺铒光纤,产生了 1.01kW 的 1090nm 激光输出,斜率效率为 80%,输出激光的 M^2 因子为 3.4。同年,Jeong 等对激光器参数进行了优化并增加泵浦光功率,使激光器的输出功率提高到了 1.36kW,斜率效率为 83%^[27]。

尽管获得了千瓦级的高功率输出,但上述研究都是基于空间结构(图 1-2)而非全光纤结构实现的。该方法的优点是技术相对简单,易于实现。但是同时存在很多缺点,如光纤端面容易损伤、机械稳定精度要求高、可靠性和环境适应性较差等,不适合对稳定性要求较高的应用场合。此外,受限于泵浦源亮度等因素的限制,采用空间结构的光纤激光器输出功率并没有得到显著提升,10 年来,最大输出功率仅从 1.36kW 提高到 3kW^[29,30]。

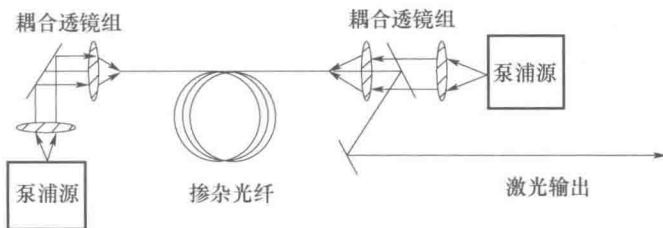


图 1-2 空间结构光纤激光器示意图

真正让高功率光纤激光器走向实用的是美国 IPG Photonics 公司倡导的全光纤结构高功率光纤激光器。以光纤光栅为谐振腔镜,构成光纤化激光谐振腔,通过泵浦光纤合束器或其他方式实现高功率泵浦光到双包层光纤的光纤化耦合,从而实现高功率光纤激光器的全光纤化。全光纤的理念提高了系统的可靠性和环境适应性,让光纤激光器走上了实用化的发展之路。全光纤激光器的系统结构具有典型的模块化特征,如图 1-3 所示。系统主要由泵浦源、泵浦合束器、光纤光栅、掺铒光纤和输出准直器组成。光纤光栅对与掺铒光纤形成激光谐振腔,若干束泵浦激光通过多模光纤注入泵浦合束器,泵浦合束器通过波导结构设计实现模场匹配,将泵浦激光注入掺铒光纤的内包层,实现激光振荡输出,并通过输出准直器将激光导入自由空间。

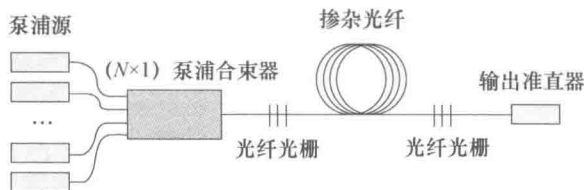


图 1-3 全光纤激光器示意图

受限于构建谐振腔的光纤布拉格光栅的承受功率以及泵浦激光器的功率，要获得更高功率的激光输出，通常采用主振荡器功率加大 (Master Oscillator Power Amplifier, MOPA) 的结构^[31-33]，如图 1-4 所示。MOPA 结构激光器主要由主振荡器和放大器两个模块组成，其间根据主振荡器和回光功率大小决定是否使用隔离器。通过级联放大器将低功率种子激光器的输出放大，一方面降低了对光纤光栅功率承受能力的要求，缓解了种子激光器内的热负荷等问题，提高了系统稳定性，另一方面具有更高的功率提升能力。相关数据表明，3kW 以上的光纤激光器大都为 MOPA 结构。

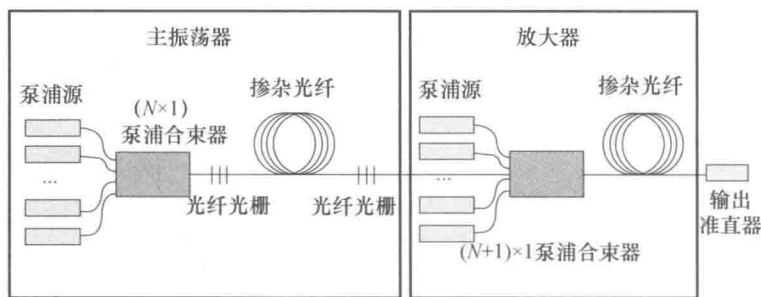


图 1-4 MOPA 结构光纤激光器示意图

近 10 年以来，全光纤结构光纤激光器的输出功率继续迅速提升。目前，美国的 IPG Photonics 公司、德国的 RoFin 公司、芬兰的 CoreLase 公司等均已推出了千瓦级光纤激光器产品^[34-37]。

级联泵浦技术的应用也是促使光纤激光功率迅速提升的重要原因。在 2007 年之前，LD 的泵浦能力是光纤激光输出功率的重要决定因素。而 LD 的泵浦能力在很大程度上取决于半导体工艺，IPG Photonics 公司的 Shkurikin 曾经指出，受限于泵浦源亮度，采用 LD 直接泵浦的光纤激光器输出功率将一直停留在千瓦量级（作者注：此判断是 6 年前做出的，有欠妥之处；近年来，LD 的亮度得到了显著提升，目前公开报道的采用 LD 直接泵浦的光纤激光器输出功率已经突破 3kW^[38]）。另外，增益光纤内的热负荷也会限制其功率提升。光纤内热负荷的一个主要来源是激光过程中的量子亏损，以 976nm LD 泵浦掺镱光纤产生 1080nm 激