

光纤激光器及其应用

郭玉彬 霍佳雨 主编



科学出版社

www.sciencep.com

124-1
102
11

光纤激光器及其应用

郭五彬 霍佳雨 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

光纤激光器是近年来发展起来的一种新型激光器件,也是目前国内外光电信息领域研究的热点技术之一。因在光学模式、使用寿命等方面的优点,光纤激光器已成为新一代固体激光器的代表,在国内外得到了广泛研究和迅速发展,有着广阔的发展前景。

本书内容新颖、有独特的角度和观点,注重理论与实际的有机结合,本书共分8章,从光纤激光的基本物理基础出发,详细阐述了光纤激光器的基本理论与技术基础,重点讨论了光纤激光器的原理、结构、特性,全面地介绍了各种新型光纤激光器在高性能光纤通信、传感等诸多高新技术领域的应用。此外,本书还介绍了该领域的最新发展,包括作者多年的研究成果,以及光纤激光器技术的发展和應用。

本书可供从事光学工程、光通信、光电信息及光纤传感等领域理论和应用研究的科学工作者、工程技术人员和高等院校师生参考,也可作为高等院校相关专业研究生教材或高年级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤激光器及其应用/郭玉彬,霍佳雨主编.—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-019556-2

I. 光… II. ①郭…②霍… III. 光纤器件—激光器 IV. TN248

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第178067号

责任编辑:姚庆爽 于宏丽 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年1月第一次印刷 印张:21

印数:1—3 000 字数:411 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(明辉))

前 言

近十几年来,随着光纤制造工艺与半导体激光器生产技术的日趋成熟和完善,以光纤作基质的光纤激光器在降低阈值、提高稳定性和波长可调谐性能等方面得到了长足的发展,已成为新型激光技术领域研究的热点之一。

光纤激光器以其体积小、重量轻、高功率、低噪声、高频调制下无啁啾效应、光束质量好、波长可调谐范围大、利用光纤光栅等低成本工艺较容易准确地确定 ITU-T 建议的 WDM 标准波长、与普通光纤兼容性好、耦合效率高、抗电磁干扰、光纤结构具有较高的表面积-体积比、稳定性、实用性等优良特性,可作为未来高速度、大容量光纤通信系统的关键器件,同时在高性能光传感、高精度光谱分析、机械加工工业、激光医疗、汽车制造和军事等多个领域中也发挥越来越重要的作用。

对光纤激光器的原理和技术进行深入的研究和探讨有着深远的意义。目前,英国的南安普顿大学通信研究室,德国汉堡技术大学,美国的 Polaroid Corporation、Bell 实验室,日本的 NTT 以及俄罗斯的 IRE Polus 公司均在光纤激光器研究中取得了许多重要成果。我国多所高校、科研机构自 20 世纪 90 年代初先后开展了光纤激光器的研究,在光纤激光器及其应用领域的研究中都取得了一定的进展。

光纤激光器作为一种新型的激光器技术,有关它的内容和报道分散于各类文献,但国内还较少有专门论述光纤激光器的书籍。为了推动光纤激光器的研究与应用,反映光纤激光器技术的最新进展,本书将围绕光纤激光器的基本原理、制作技术及其应用等方面展开讨论,对光纤激光器的应用和未来的发展进行较为详尽的分析和展望,旨在为光纤激光器的研发及应用提供一定的技术参考。

本书的编撰工作得到了信息产业部科研(民品)项目计划、吉林省科技发展计划和长春市振兴东北老工业基地科技攻关计划——光电子信息专项等的大力支持。靳江涛、闫红伟参加了部分章节的编写工作,蒋蒙菊、张宝在资料整理、插图绘制等方面做了许多工作,王天枢对本书的构思立意提出了宝贵意见。在此一并表示深深的谢意。

希望本书能够对从事光纤激光器技术领域的科研人员、工程技术人员和高等院校的师生有所帮助。由于编著者的水平有限,书中难免还存在一些不足,殷切希望广大读者批评指正。

作 者

2007 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤激光器的起源和发展背景	1
1.2 光纤激光器的发展现状	5
1.2.1 国际动态	5
1.2.2 国内动态	7
1.3 光纤激光器的主要特点	9
1.3.1 概述	9
1.3.2 光纤激光器的分类	10
1.3.3 光纤激光器特点	12
1.4 目前存在的问题和发展前景.....	13
1.4.1 光纤激光器的主要技术问题	13
1.4.2 光纤激光器的发展前景及分析	15
参考文献	17
第 2 章 光纤激光器的理论	21
2.1 激光理论基础.....	21
2.1.1 光的自发辐射、受激吸收和受激辐射	21
2.1.2 激光产生的条件	26
2.1.3 三能级和四能级结构	29
2.1.4 速率方程.....	31
2.2 光纤激光器原理.....	35
2.2.1 激光器谐振腔原理	35
2.2.2 泵浦特性及阈值特性	42
2.2.3 泵浦模和掺杂分布对光纤激光器的影响	44
2.3 光纤激光器的模式理论.....	49
2.3.1 光纤激光器单纵模工作条件	49
2.3.2 激光模式选择技术	50
2.3.3 模式测量方法	56
2.4 光纤激光器性能影响因素.....	62
2.4.1 空间烧孔效应	62

2.4.2	跳模	65
2.4.3	激发态吸收(ESA)	66
	参考文献	68
第3章	光纤激光器的结构原理	69
3.1	泵浦源	69
3.1.1	泵浦源的选择	69
3.1.2	泵浦方式	71
3.1.3	驱动电路	74
3.2	谐振腔结构	85
3.2.1	线形腔	85
3.2.2	环形腔	88
3.2.3	其他腔型结构	91
3.3	增益介质	100
3.3.1	增益介质的类型以及掺杂浓度	100
3.3.2	增益介质的长度	101
3.4	仿真设计软件 OptiAmplifier 简介	105
3.4.1	OptiAmplifier 简介	105
3.4.2	应用举例	107
	参考文献	120
第4章	稀土掺杂光纤激光器	122
4.1	掺杂光纤特性	122
4.1.1	掺铒(Er ³⁺)光纤	122
4.1.2	铒/镱(Er ³⁺ /Yb ³⁺)共掺光纤	124
4.1.3	其他掺稀土元素光纤	127
4.2	铒/镱(Er ³⁺ /Yb ³⁺)共掺光纤激光器	131
4.2.1	理论模型	131
4.2.2	Er ³⁺ /Yb ³⁺ 共掺光纤激光器的实验研究	135
4.3	掺杂光纤超荧光光源	140
4.3.1	超荧光光纤光源的基本原理和结构	140
4.3.2	超荧光光纤光源的理论模型	142
4.3.3	掺铒光纤超荧光光源和放大器	143
4.3.4	铒/镱共掺光纤超荧光光源	153
4.4	基于光纤 Bragg 光栅的光纤激光器	160
4.4.1	光纤光栅	160
4.4.2	DBR 型光纤激光器	165

4.4.3 DFB型光纤激光器	179
4.5 可调谐光纤激光器	182
4.5.1 可调谐滤波器的种类	182
4.5.2 基于可调谐滤波器光纤激光器	191
4.5.3 L波段可调谐环形腔掺铒光纤激光器	206
4.6 多波长光纤激光器	221
参考文献	224
第5章 大功率双包层光纤激光器	226
5.1 双包层光纤激光器概述	226
5.1.1 双包层光纤的结构与特点	226
5.1.2 双包层光纤激光器的研究概况	228
5.1.3 双包层光纤激光器的原理与特点	231
5.2 双包层光纤激光器的分类	233
5.2.1 线形腔单端泵浦双包层光纤激光器	233
5.2.2 线形腔双端泵浦双包层光纤激光器	234
5.2.3 全光纤掺铒环形腔双包层光纤激光器	235
5.2.4 包层泵浦调Q光纤激光器	236
5.3 双包层光纤激光器的泵浦耦合技术	237
5.3.1 端面泵浦	237
5.3.2 侧面泵浦	239
5.3.3 各种侧面泵浦耦合技术讨论	243
5.3.4 其他泵浦方式	244
5.4 双包层光纤激光器的应用与展望	245
参考文献	247
第6章 脉冲光纤激光器	250
6.1 调Q和锁模的基本原理	250
6.1.1 调Q的基本原理	250
6.1.2 锁模原理	251
6.2 调Q光纤激光器	252
6.2.1 基于非光纤型调Q装置的光纤激光器(电光、声光)	252
6.2.2 全光纤型调Q光纤激光器	254
6.3 锁模光纤激光器	258
6.3.1 主动锁模光纤激光器	258
6.3.2 被动锁模光纤激光器	262
6.3.3 混合锁模光纤激光器	265

6.4	可调谐脉冲光纤激光器	265
6.4.1	光纤光栅实现波长调谐	266
6.4.2	利用啁啾光纤光栅色散特性实现波长调谐	267
6.5	脉冲双包层光纤激光器	267
6.5.1	包层泵浦调Q光纤激光器	268
6.5.2	种子脉冲主振荡放大(MOPA)光纤激光器	270
6.5.3	技术的关键和发展前景	273
	参考文献	275
第7章	新型光纤激光器	279
7.1	光子晶体光纤激光器	279
7.1.1	光子晶体光纤的结构特性	279
7.1.2	基于非线性效应的PCF激光器(小模面积)	284
7.1.3	掺稀土元素大模面积PCF激光器	286
7.1.4	问题分析及关键技术	288
7.1.5	光子晶体激光器的制作	288
7.2	非线性效应光纤激光器	289
7.2.1	光纤受激拉曼散射激光器	289
7.2.2	光纤受激布里渊散射激光器	294
7.3	其他类型光纤激光器	300
7.3.1	频率上转换光纤激光器	300
7.3.2	窄线宽光纤激光器	304
7.3.3	多波长光纤激光器	307
	参考文献	309
第8章	光纤激光器的应用与展望	313
8.1	光纤激光器在通信中的应用	313
8.1.1	稀土掺杂类光纤激光器	313
8.1.2	受激拉曼散射光纤激光器	314
8.1.3	光孤子通信用锁模光纤激光器	315
8.2	光纤激光器应用于传感	315
8.3	光纤激光器在军事领域的应用	319
8.4	光纤激光器在工业领域的应用	320
8.4.1	激光打标	320
8.4.2	激光焊接	321
8.4.3	激光切割	321
8.4.4	微机械加工	322

8.4.5 激光医疗	322
8.4.6 激光核聚变	323
8.5 光纤激光器的发展与展望	323
8.5.1 几种高性能光纤激光器	324
8.5.2 光纤激光器的发展展望	325
参考文献	325

第1章 绪论

随着光纤制造工艺与半导体激光器生产技术的日趋成熟,以光纤为基质的光纤激光器,在降低阈值、振荡波长范围、波长可调谐性能等方面取得明显进步,已成为目前激光领域的新兴技术,也是众多热门研究课题之一。

光纤激光器采用掺稀土元素光纤作为增益介质,泵浦光在纤芯内形成高功率密度,造成掺杂离子能级的“粒子数反转”,当适当加入正反馈回路(构成谐振腔)时,便产生激光输出。它的应用范围非常广泛,包括光纤通信、激光空间远距通信、工业造船、汽车制造、激光雕刻、激光打标、激光切割、印刷制辊、金属非金属钻孔/切割/焊接(铜焊、淬水、包层以及深度焊接)、军事国防安全、医疗器械仪器设备、大型基础设施建设等。

1.1 光纤激光器的起源和发展背景

光纤激光器被称作激光领域的新兴技术,近年来成为科学研究领域的热点,其发展和应用得到了社会各方面的广泛重视。但是光纤激光器并不是什么新型光器件,因为它的发展历史和激光器本身的历史几乎一样长。

20世纪50年代,激光器的诞生是人类历史上的重大科学技术成果之一。1958年, Schawlow 和 Townes 发表了有关激光方面的创新论文。1960年,红宝石激光器和氦氖激光器相继成功运转。同时,对光纤激光器的研制工作也开始进行。1961年,美国光学公司的 Snitzer 和 Koester 等在光纤激光器领域进行了开创性的工作,他们在一根芯径为 $300\mu\text{m}$ 的掺 Nd^{3+} 玻璃波导中进行实验,观察到了激光现象,并分别于1963年和1964年发表了多组分玻璃光纤中的光放大结果,提出了光纤激光器和光纤放大器的构思。

1966年,高锟和 Hockham 首先讨论了利用光纤作为通信介质的可能性,提出了光纤通信的新观点。20世纪70年代初, Bell 实验室(AT&T)的一个小组也开展了这方面的研究工作。但是由于当时光纤的损耗、半导体激光器的室温工作等问题尚未解决,光纤通信尚处于探索阶段,光纤激光器的研究在这期间并没有实质性的进展。

1975~1985年,这十年中有关这个领域的文章较少,不过这些年中许多发展光纤激光器所必需的工艺技术已趋于成熟。低损耗的硅单模光纤和半导体激光器都已商品化并得到了广泛的应用,尤其是高功率输出的半导体激光器作为泵浦源在光纤激光器中极为重要,光纤激光器发展的最初阶段就考虑了用半导体光源进行泵浦的可能性;完善了基于硅光纤的定向耦合器的制作,熔硅型定向耦合器对全

光纤激光器的设计起着举足轻重的作用。这些都为光纤激光器的研制和发展铺平了道路。

1986年以后迅速进入大规模光纤通信建设的发展阶段。英国南安普顿大学的电子工程系和物理系也卷入了对这个领域的研究,他们在其中扮演了非常重要的角色。Poole 等用化学气相沉积法(MCVD)制成了低损耗的掺铒光纤,从而为光纤激光器带来了新的前景。他们演示了用这种单模光纤所构成的光纤激光器的运行,再度唤起了人们对这个研究领域的兴趣。此后,该校的这两个研究小组又进行了光纤激光器的调Q、锁模以及单纵模输出。英国通信研究实验室(BTRL)于1987年报道了其研究结果,并向人们展示了用各种定向耦合器制作的精巧的光纤激光器装置。他们在增益和激发态吸收等研究领域做了大量的基础工作,并用氟化锆光纤作为增益介质,利用激光二极管作为泵浦源制作光纤激光器,在获得各种波长的激光输出谱线方面进行了开拓性的研究。这之后世界上许多研究机构活跃于该领域,如德国汉堡的技术大学、NTT、Hoya,日本的三菱,美国的Polaroid Corporation、斯坦福大学、Bell实验室和GTE,以及俄罗斯的IRE Polus公司等。

自此以后,光纤激光器迅速发展,激光性能不断提高。初期工作主要侧重于采用掺铒和掺铒的光纤作为增益介质,但也利用其他稀土掺杂离子和光纤的自身非线性提供增益。常用的基质材料有石英晶体、硅酸盐玻璃、氟化物玻璃、磷酸盐玻璃等。常用的掺杂元素有铒、铥、镱等离子。掺杂浓度有几百ppm($1\text{ppm}=10^{-6}$),也有数千ppm。掺杂方式有只掺杂一种元素的,也有掺杂多种元素的。腔体结构有环形腔、线形腔,也有复合腔。另外,光纤光栅、光纤定向耦合器、半导体激光器技术日益成熟,使得光纤激光器的结构日益紧凑,并体现出小型化、精密化的特征。

20世纪80年代末期,美国麻省Polaroid Corporation和英国南安普顿大学的研究人员发展了包层泵浦光纤激光器,使得光纤激光器的功率和效率大大改善,这为光纤激光器的进一步发展奠定了基础。此后,俄罗斯、英国、美国、法国和日本等发达国家的一些大学和公司的研究机构,先后对双包层光纤激光器进行了大量的研究。早期的研究大都集中在掺 Nd^{3+} 的双包层光纤激光器,近年来包层泵浦技术在掺 Yb^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Tm^{3+} 等稀土元素的光纤激光器中也得到了广泛应用。由于掺 Yb^{3+} 光纤激光器具有极高的量子效率,尤其适合发展为高功率的实用化器件,引起人们的极大兴趣,在双包层光纤激光器家族中异军突起。1994年,Hanna进行了第一个掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器实验,在1040nm波段获得最大输出功率为0.5W,斜率效率达到80%,证明了掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器能够实现高效率的激光输出。1997年,美国Polaroid Corporation报道了其研制的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器,以总功率为54.4W的四个LD阵列模块泵浦,获得了功率为35.5W、波长为1100nm的连续激光。在1998年的CLEO会议上,美国Lucent公司也报道了一种内包层截面为星形的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器,得到20W的激光输出。1999

年,SDL(spectra diode laser)公司研制出世界上第一台连续功率达到百瓦级的包层泵浦光纤激光器。2000年,IPG Photonics公司利用其发明的多光纤侧向耦合技术,率先实现了百瓦级光纤激光器的全光纤化,为其商业应用奠定了坚实的基础。Spectra Physics等公司也开展了类似的研究工作。近年来,国外对双包层光纤激光器的研究日益成熟,Spectra Physics公司、IPG Photonics公司等多家国际光电子公司已经推出了不同档次和不同类型的商品化掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器,其单模输出功率已经达到百瓦以上。目前掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器已经实现了千瓦量级的连续激光输出。IPG Laser公司最近出品了输出功率可达到20kW的光纤激光器。

高功率光纤激光器使纤芯内的光功率密度达到每平方厘米百兆瓦量级,光纤中因此出现多种非线性效应。这些非线性效应拓宽了光纤激光器的输出波长范围,因此,高功率激光器的出现是激光发展历史上具有旗帜性和革命性的里程碑,它以无比卓越的性能和超值的价格,在激光加工、激光医疗、激光雷达、激光测距等多方面得到了日益广泛的应用。它的诞生及应用对传统的气体激光器和固体激光器提出严峻的挑战,将掀起中国激光产业的一场前所未有的改革浪潮。

从1989年开始,对锁模光纤激光器的研究也掀起了新的热潮,这类激光器能产生超短脉冲,并在光纤通信、超快现象、光纤传感、惯性约束核聚变等方面有重要的应用价值。起初,研究重点集中在锁模的掺钕光纤激光器上,这类激光器能在 $1.55\mu\text{m}$ 波段产生超短脉冲,并在光纤通信、超快现象、光纤传感器等方面有应用价值,引起众多研究人员的注意,如英国的南安普敦大学、日本的NTT、香港大学、南洋理工大学等多所高校和科研机构先后开展了这方面的研究工作。表1-1-1为锁模光纤激光器的发展历史。英国的Matsas等利用非线性偏转实现了被动锁模。他们的实验结果是在 $1.55\mu\text{m}$ 波段得到了脉宽为1.55ps、带宽为1.68nm、功率为47pJ的光孤子。另外,美国Bell实验室的Zirngibl等利用InGAs/GaAs-on-GaAs作为可饱和吸收体,将其插入光路中,亦实现了被动锁模。他们在 $1.55\mu\text{m}$ 波段处,产生了脉宽为1.2ps、重复频率为50MHz的脉冲。日本的Nakazawa等完成了再生锁模,得到重复频率为10GHz的稳定脉冲。英国的Gueeu等用非线性交叉相位调制锁模的方法实现主动锁模,获得了重复频率为1GHz,脉宽为10ps的脉冲。

表1-1-1 主动锁模和被动锁模光纤激光器发展历史

(a) 主动锁模

年份	研究人员	锁模方式特点	重复频率	脉宽	
1989	Kafka	主动锁模	100MHz	4ps	
1990	Fermann	主动锁模 Nd 光纤激光器利用孤子整形		亚 ps	
1992	Harvey	Er 光纤,主动锁模	1GHz	10ps	

续表

年份	研究人员	锁模方式特点	重复频率	脉宽	
1995	NTT	全保偏环形腔主动锁模光纤激光器	6.3GHz		
1996	Yoshida	有理数谐波主动锁模	80~200GHz		
1999	Yamamoto	色散渐减掺 Er 光纤, 绝热孤子压缩		<200fs	
1999	Chan	半导体调制, 有理数谐波锁模技术	20GHz		
2000	Chan		10GHz		非常稳定

(b) 被动锁模

年份	类型	研究人员	锁模方式特点	重复频率	脉宽
1991	饱和 吸收体	Zirngibl	晶体作为饱和吸收体	71MHz	脉宽 ps 量级 320fs 171fs
1993		Abranban	多量子阱放大器		
		De Souza	半导体饱和吸收体		
	Er 保偏光纤				
1988	非线性 光纤	Doran, Wood	孤子开关		
1990		Fermann	非线性放大环形镜		
1991	环形镜 (放大镜) 加成锁模	Duling, Richardson	非线性放大环形镜 200mW 980nm 泵浦	50MHz	314fs
1994		Chen	“8”字形非线性放大环形镜	210MHz	98fs
1996		Wang	非线性放大环形镜的双包层掺 Nd		100ps
1992		非线性 偏振旋转 加成锁模	Hofer	腔内插入棱镜对	
1993	Richardson		F-P 腔、自启动		
1994	Tamura		环形腔孤子激光器		100fs
1995	Ippen		腔内对脉冲 交替展宽与压缩	40MHz 90mW 2.25nJ	90fs
	Fermann		插入啁啾光纤光栅	170mW 10nJ	4ps
1996	其他形式 加成锁模	Cheo	光纤光栅耦合的全光纤激光器	213MHz	60ps
1999		Huang	自匹配加成被动锁模		930fs
2000		Kim	分立的色散元件	1.4MHz 7.4mW	327fs
2002		Seong	分立色散元件、色散不平衡	1.37MHz	几 ps

密集波分复用和光时分复用技术的飞速发展加速刺激着多波长光纤激光器、超连续光纤激光器等技术的进步。同时,多波长光纤激光器和超连续光纤激光器的出现,则为低成本地实现 Tbit/s 的 DWDM 或 OTDM 传输提供了理想的解决方

案。就其现有的技术途径来看,采用 EDFA 放大的自发发射、飞秒脉冲、超发光二极管等技术均已见报道。

随着激光二极管泵浦技术及光纤材料和工艺研究的进展,适合多种不同应用目的的光纤激光器异彩纷呈地涌现于世。其应用领域也已从光纤通信网络方面迅速地向其他更为广阔的激光应用领域扩展。在过去的几年中,光纤激光器得到了飞速的发展,世界上许多实验室都进行了这方面的研究工作。这些研究工作涉及光纤激光器发展的各个方面。以后将会利用可见光和红外波长区的稀土元素跃迁,发现更多的谱线以满足各种不同的需要。为优化其性能,光纤中光学过程的理论和基础研究也将进一步发展。

1.2 光纤激光器的发展现状

目前,国际上商用化的光纤激光器波长从 0.8 μm (包括半导体激光器光纤耦合输出)扩展到 2000nm 以上,输出连续光功率从数百毫瓦量级上升到数千瓦的量级。千瓦量级的连续输出 1.06 μm 波长的高功率光纤激光器已经在德国商业化生产。光纤激光器的发展主要集中在以下几个方面:

(1) 研制全光纤激光器,实现与光纤通信系统高效率的连接。

(2) 光纤 Bragg 光栅的性能进一步提高,以便更加有效地应用于光纤激光器中。

(3) 光纤激光器的性能进一步提高,如脉宽、谱宽更窄,重复频率、输出功率更高,调谐范围更宽等。

(4) 光纤激光器的实用化。国内外在这些方面的研究状况如下所述。

1.2.1 国际动态

国外在光纤激光器方面的研究已经非常成熟。在频率转换方面,Xie 和 Gosmel 用 860nm 的钛宝石激光器泵浦几十厘米长的光纤,通过更换不同的输出镜获得了红、橙、绿、蓝四种颜色的激光,功率分别为 300mW、44mW、20mW 和 3mW,斜率效率分别为 52%、11.5%、12.4%和 3%。包层泵浦上转换光纤激光器的研究工作是国际上最新的研究热点,它在常规光纤激光器研究工作的基础上,利用频率上转换技术大大扩展了激光器的频率范围,可获得近红外、可见光乃至更短波长的激光输出。

连续调谐多波长锁模激光器一直是激光技术很活跃的研究领域,现已报道了利用色散补偿光纤增加腔内色散,在主动锁模光纤环形激光器中实现了三个波长的激光输出,并通过调节调制频率,实现了单波长、双波长的连续调谐。现已成功研制出线宽窄至 2kHz 的窄线宽激光器,调谐范围达 75nm 的宽调谐光纤激光器以及

重复频率达到 21GHz 的高重复频率光纤激光器。

在调 Q 方面的研究,脉宽窄至 3fs 的超短脉冲光纤激光器结合运用了时域和频域技术的光纤孤子激光器获得运转。Lees 和 Newson 已获得了峰值功率为 540W、脉宽为 4ns、重复频率为 200Hz 的脉冲光源。采用包层泵浦的掺铒离子光纤激光器得到的输出已达 1nJ,脉宽达 200fs;而采用啁啾脉冲放大技术,利用掺镱离子光纤放大钛宝石飞秒激光器得到的脉冲达 14 μ J;对纳秒量级脉宽光脉冲,采用多级特殊设计大芯径掺铒离子光纤放大技术,可得到 250 μ J 的单脉冲能量。

在多波长方面,Takara 利用双折射光纤、Takahashi 用阵列式波导耦合器、Chow 等用光纤取样 Bragg 光栅、Okhamura 和 Iwatsuki 用复合腔结构、Komukai 用光纤 F-P 标准具、Hubner 等用分布反馈光纤光栅分别制成了多波长光纤激光器。日本 Yamashita 等提出了波长间距可调节的多波长光纤激光器,可调间距的滤波器由一对偏振器和一段保偏光纤组成,实验通过改变对于保偏光纤的压力点来控制波长间距,在压力点距离分别为 4.0m 和 8.0m 时,得到了 1.46nm 间距、9 个波长和 0.73nm 间距、14 个波长的输出。

在高功率方面,研究人员通过改进泵浦方案提高光纤激光器的输出功率水平。2002 年,Platonov 和 Limpert 等分别报道了掺 Nd³⁺ 双包层光纤和 Yb³⁺/Nd³⁺ 共掺双包层光纤连续输出达 135W 和 150W 的结果。2002 年 8 月,IPG 公司报道了掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光连续输出已达到 2kW。2002 年 11 月,他们又将输出功率提高到 10kW。2001~2003 年,Cheo、Nilsson 和 Alam 等先后利用 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺的双包层光纤获得了接近 2W 和 16.8W 的激光输出。

2003 年,英国南安普敦大学宣布用单根掺 Yb³⁺ 双包层光纤获得功率为 270W、波长为 1080nm 的单模激光输出,用 Er³⁺/Yb³⁺ 双包层光纤获得输出波长为 1565nm、功率为 103W 的激光。日本电子通信大学激光研究所的 Ueda 等借助于双包层光纤激光器包层泵浦的思想,提出并实现了一种光纤集中抽运的所谓“任意形状”的光纤激光器,并已获得 1kW 以上的连续激光输出。美国正在加紧高能光纤激光的研究,希望在 2007 年通过相干组束的方法实现 100kW 的激光输出。

近几年来,脉冲双包层光纤激光器成为国际上研究的热点。2000 年,英国 Southampton 光电研究中心的 Alvarez-Chavez,采用在包层泵浦双包层光纤激光器中加入声光调制器来获得平均功率为 5W 的调 Q 脉冲输出。2001 年,德国 Jena 的 Hofer 以单频环形盘片激光器作为种子光源,通过掺 Yb³⁺ 双包层光纤进行放大,得到 20W 的平均功率输出,光束质量接近衍射极限。随后,Limpert 同样采用种子光振荡放大,用两个 LD 在掺 Yb³⁺ 大芯径双包层光纤双端泵浦,以皮秒 Nd/YVO 激光器为种子光源,得到 51.2W 的放大输出,重复频率为 80MHz。Hindeur 等报道了能产生高能量飞秒脉冲的侧向泵浦的掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器,锁模是自启动的,激光器能产生 1.05 μ m 波长的 670fs 内腔压缩脉冲,每个脉冲

的能量是 24nJ。系统采用环形腔结构。一个与偏振相关的光隔离器,既消除了背向散射,又可作为偏振器。内腔压缩脉冲由色散延迟线形成。2002 年,Limpert 采用纳秒调 Q Nd:YAG 作为种子源,25m 长的大模面积光纤,种子光和泵浦光分别从光纤两端进入,放大光用双色片分出,得到 100W 平均功率(重复频率为 50kHz)的衍射极限光束质量的放大输出。2003 年 9 月,Liem 采用单频 1064nm 波长的微片激光器作为种子光源,得到 108W 的单频放大输出。

2000 年,英国的 Wadsworth 等用钛宝石激光器泵浦 81mm 长的掺 Yb³⁺光子晶体光纤(PCF),观察到波长为 1040nm 的激光输出,标志着第一台光子晶体光纤激光器问世。虽然得到的激光器各方面性能不是很理想,但是它为 PCF 激光器的迅速发展迈出了重要的第一步。2001 年,Wadsworth 等报道了第一台大模面积掺 Yb³⁺PCF 激光器。Furusawa 等用波长为 966nm 的半导体激光器泵浦长约 1m 的掺 Yb³⁺PCF 激光器,实现了第一台掺 Yb³⁺锁模 PCF 激光器,平均输出功率为 17mW,脉冲宽度为 15ps。2003 年 1 月,Wadsworth 等报道了利用大模面积空气包层 PCF 研制的高功率 PCF 激光器,最大输出功率为 3.9W,实现了单横模运转。2003 年 4 月,德国和丹麦的科研人员一起报道了输出波长为 1070nm、输出功率达 80W、斜率效率为 78%的高功率双包层 PCF 激光器。

1.2.2 国内动态

国内从 20 世纪 80 年代末、90 年代初开始光纤激光器领域的研究工作,清华大学、中国科技大学、南开大学、上海科技大学、吉林大学以及邮电部和电子部所属的一些研究单位在光纤激光器和相关器件的研究中都取得了一定的进展。

南开大学利用闪耀光栅构成可调谐 Littrow 外腔,对掺镱双包层光纤激光器的波长调谐输出进行了实验研究,最大调谐范围达 70nm;双波长可调谐锁模光纤激光器获得重复频率为 2GHz、波长间隔为 0.92nm 的稳定双波长光脉冲,可调范围为 3nm;利用声光调 Q 开关调 Q,在波长为 1064nm 处得到光谱线宽为 0.08nm 的稳定的激光脉冲序列,脉冲重复频率从 1kHz 到 10kHz 可调;2002 年,在掺 Yb³⁺双包层光纤激光器中得到了脉宽为 4.8ns 的自调 Q 脉冲输出,在混合调 Q 双包层光纤激光器中得到峰值功率大于 8kW,脉宽小于 2ns 的脉冲输出;2003 年,利用脉冲泵浦获得 100kW 峰值功率的调 Q 脉冲,以及 60nm 可调谐的调 Q 脉冲;2004 年,又报道了连续泵浦获得 206kW 峰值功率的调 Q 脉冲;DBR 掺镱光纤激光器在波长为 1.06 μ m 处成功得到单横模稳定输出,功率达 1.18W;D 型掺镱双包层光纤激光器,采用光栅作为输出耦合得到脉冲最大功率为 245mW,可调谐范围在 1079~1121nm;对锁模掺镱光纤激光器研究,用反射率为 15dB 的掺镱光纤光栅作为反射器的掺镱光纤激光器,产生了稳定的纳秒级脉冲序列,脉冲宽度小于 5ns。激光器的阈值功率为 18mW,在锁模工作区域内最大输出平均功率为 3mW,脉冲

重复频率为 25MHz, 能量转换效率为 5%。

深圳大学在 1GHz 量级的调制频率下, 由主动锁模掺铒光纤激光器获得重复频率为 5.1GHz、幅度相当稳定的 4 阶有理数谐波锁模脉冲序列。

华中理工大学对线形腔掺铒光纤激光器的输出特性进行了理论研究, 通过求解速率方程, 从理论上详细地分析线形腔掺铒光纤激光器的输出特性, 得到了稳态条件下激光器的阈值泵浦功率、输出功率和斜率效率的解析表达式。

华南师范大学对光纤光栅耦合附加腔被动锁模光纤激光器进行理论分析, 得到了附加腔被动锁模激光器的振荡条件。

中国科技大学对 LD 泵浦的掺镱双包层光纤激光器进行了研究, 在多个波长获得激光输出, 其中在波长为 1073nm 时获得了 3.84mW 的激光输出, 激光斜率效率为 55%。

北京交通大学光波技术研究所光纤激光器连续调谐方面, 实现了可连续调谐双波长激光脉冲, 调谐范围达 5nm; 冷却掺铒光纤, 实现了 8 个波长(0.7km 色散补偿光纤)、17 个波长(2km 色散补偿光纤)的光脉冲输出。

中国科学院西安光学精密机械研究所对掺镱双包层光纤激光器进行了数值分析。

吉林大学利用光纤 Bragg 光栅构成各种谐振装置, 获得了高性能、低成本、适合光纤通信的光纤激光器, 同时, 还研究了可调谐环形腔光纤激光器。

中国科学院上海光学精密机械研究所所用波长为 980nm 的 LD 泵浦掺镱双包层光纤, 使光纤激光的输出功率达到 56mW; 用钛宝石激光泵浦的掺镱光纤激光器, 最大输出功率达 50mW。最近成功研制出的振荡放大方式脉冲光纤激光器, 其脉冲频率在 20~100kHz 可调, 在波长为 1046nm 时的脉冲输出达 133W。2003 年 11 月 20 日, 上海光机所报道, 上海科学家在激光领域取得新成果, 成功开发出输出功率高达 107W 的光纤激光器。此激光器的全称为高功率掺镱双包层光纤激光器, 与目前已有的激光器相比, 它的维护费用和功率消耗都要低得多, 寿命是普通激光器的几十倍。上海科学家研制的光纤激光器使光纤激光输出功率又上升了一个新台阶, 最大输出功率达 107W, 已经遥遥领先于全国同行。

2004 年 12 月 3 日, 烽火通信报道, 继推出激光输出功率达 100W 以上的完全可商用的双包层掺镱光纤产品后, 经过艰苦的攻关再创佳绩, 将该类新型光纤的输出功率成功提高至 440W, 达到国际领先水平。这是烽火通信在特种光纤领域迈出的重要一步, 同时也是我国在高功率激光器用光纤领域的重大突破。

掺镱双包层光纤激光器是国际上新近发展的一种新型高功率激光器件, 由于其具有光束质量好、效率高、易于散热和易于实现高功率等特点, 近年来发展迅速, 并已成为高精度激光加工、激光雷达系统、光通信及目标指示等领域中相干光源的重要候选者。双包层掺镱激光器的主要激光增益介质是双包层掺镱光纤, 因此, 双