



现代光学工程精品译丛

 Springer

光纤激光器和光纤 放大器基础

Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers

【美】 Valerii(Vartan)Ter-Mikirtychev 著
李殿军 陈飞 郭劲 译



 国防工业出版社
National Defense Industry Press



现代光学工程精品译丛

装备科技译著出版基金

光纤激光器和光纤 放大器基础

Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers

[美] Valerii (Vartan) Ter-Mikirtychev 著

李殿军 陈飞 郭劲 译

国防工业出版社

·北京·

内容简介

本书为 Valerii (Vartan) Ter-Mikirtychev 所著 Springer 光学科学系列 2014 年版 Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers 的中译本, 主要介绍了增益光纤制造、增益光纤性质、半导体激光器、光纤激光器、光纤放大器、光纤激光器应用以及光纤激光单元技术等与光纤激光器密切相关的各种技术内容。

本书适合于相关领域本科生、研究生、教师、科技工作者以及具有一定基础的科技爱好者阅读。

著作权合同登记 图字: 军-2015-251 号

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤激光器和光纤放大器基础/ (美) 瓦雷利·特克迪查夫著;

李殿军, 陈飞, 郭劲译. —北京: 国防工业出版社, 2016.9

(现代光学工程精品译丛)

书名原文: Fundamentals of fiber lasers and fiber amplifiers

ISBN 978-7-118-10923-8

I. ①光… II. ①瓦… ②李… ③陈… ④郭… III. ①光纤器件—
激光器 ②光纤维放大器 IV. ①TN248 ②TN722.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 208191 号

Translation from English languages edition: Fundamentals of Fiber

Lasers and Fiber Amplifiers By Valerii(Vartan) Ter-Mikirtychev

Copyright©Springer International Publishing Switzerland 2014

Springer is part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

※

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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13 1/4 字数 260 千字

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 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

献给我的父母 Vartan 和 Vera
我的妻子 Katerina
我的孩子 William 和 Daria

序

光纤激光器不仅在科学研究、工业，而且在国防工业中均有极为广泛的发展前景和潜力。根据 Laser Focus World 的市场分析，国际市场上光纤激光器占整个激光市场的份额呈快速发展势头，短时间内将达到 20%，其中，在激光材料处理的应用达到 24%，而在激光的空间和军事中的应用达到 59% 左右。

原著作者 Valerii (Vartan) Ter-Mikirtychev 一直从事光学工程和激光技术方面的研究，尤其对于光纤激光器、光纤放大器和光纤激光单元技术具有自己独到的理解和体会，是一名激光技术领域的知名专家。原著作为 2014 年最新版本，在经过领域内 30 余位专家学者的讨论与修改后，已成为一本较为权威的专业著述，内容涵盖了光纤激光器及其单元技术等方面的成果，为众多研究人员的智慧结晶，也是光纤激光技术应用科学进一步发展必备的技术基础。全书内容学术思想先进，具体、实用，从专业视角上提供了所涉及问题的技术分析与解决方案，并附有相关更深入一步解释的参考书籍和论文资料，对领域内本科生、研究生、教师以及科研和企业技术人员具有重要的参考价值，有助于我国在光纤激光器和光纤放大器研究与应用方面的良好发展。

李殿军研究员组织了对英文原著的翻译工作，相信该译本的出版将对我国相关专业领域的从业人员进一步学习与运用激光技术的相关知识和了解光纤激光技术的发展动态起到积极的促进作用。

王家骥

2016 年 5 月

译者序

1960年,世界上第一台激光器——红宝石激光器诞生,随后的1961年就论证了关于在光纤中获得激光振荡和放大的可能性,经过持续不断的努力,与最重要的 CO_2 气体激光器首次运转同步,也于1964年实现了世界上的首次光纤激光振荡,因此,光纤激光器同样是最早发展起来的重要激光器种类之一。然而,由于光纤激光器运转主要由半导体激光器进行泵浦,其发展历程严重依赖于半导体激光器的发展,并因早期半导体激光器尚不成熟的缘故,光纤激光器研究与发展在20余年的时间段内一度陷于停滞不前的境地,直到20世纪八九十年代,伴随着半导体激光器、增益光纤制造技术以及耦合泵浦技术的逐渐成熟,光纤激光器才又展现出自身的发展潜力。目前,由于具有光束质量好、结构简单、易于集成、维修方便、体积小、效率高、寿命长、工作稳定可靠、输出方式灵活、高功率输出能力、环境适应性强、电磁兼容性好、输出控制方便以及制造成本低等优势,光纤激光器、光纤放大器以及各种光纤单元技术成为近年来最为热门的激光技术研究内容。

本书为Springer光学科学系列丛书中的一本。丛书的主编和编辑委员会都由世界上极具声望的知名人士组成,保证入选丛书出版的书籍具有较高的学术水平。本书是光纤激光器研究领域内一本专著,作者Valerii (Vartan) Ter - Mikirtychev参阅了近年来本研究领域的最新研究成果,对光纤激光器和光纤激光放大器进行了全面深入的讲解,列举了很多实用例子,分析和解释了各种现象,从实用化的角度介绍了从原理到单元技术以及应用的诸多问题。本书选材非常精准,所述内容虽多但仍不感觉杂乱,这是因为所选内容均与实际研究联系紧密,吸引着读者一步一步地阅读下去,确有引人入胜之处。研究过程中所遇到的基本问题大都可以从中直接或者间接找到分析依据,抑或根据该书对所分析问题给出的相关参考文献,获得更进一步的解释,发掘出更深层次的本质性质,从而给出问题的正确答案,这也是本书的最大魅力所在。

原著作为2014年最新版本,在经过领域内30余位专家学者的讨论与修改后,已成为一本较为权威的专业著述,内容特别涵盖了国内专著中较少涉及的固体中稀土离子的光学性质和光谱、Judd - Ofelt和McCumber基础理论、光纤玻璃材料的固有性质以及钕、镱、铒、铥等4种典型光纤的分析与特性比较等研究内

容，其实用价值在国内外同类书籍中首屈一指。

本书的翻译工作由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室的科研人员共同完成，其中李殿军负责第1、2、4、5、11和12章；陈飞负责第3和第8章；何洋负责第9和第10章；潘其坤负责第6和第7章。最后由李殿军负责总书稿的完善与统筹工作；由郭劲负责总书稿的校对工作。

本书在未标注的情况下修改了原文中出现的少许明显的打印错误，但同时对于某些笔误（如某些公式缺少编号等）现象未加修改。此外，对于某些名词未按照英文原意翻译而是遵从了现有汉语的习惯说法，例如，diode laser 或者 laser diode 全部翻译成现在流行的半导体激光器，而不是二极管激光器或者激光二极管等。

中国科学院院士、光学工程专家王家骥研究员和光学专家刘京郊教授对于本书的翻译工作给予了大力支持，再此一并表示感谢；同时也再次感谢王家骥院士于百忙之中抽时间为本书做序。

李殿军
2015年12月

致 谢

我非常感谢在俄罗斯、日本和美国以及现在的同事们对于激光物理很多论题所做的一般性以及对于光纤光学和光纤激光器很多论题所做的特别有帮助性的讨论。也感激 P. Silfsten 博士、T. Kurobori 教授、K. Ueda 教授、V. Kozlov 博士、L. Glebov 教授、E. Sviridenkov 教授、M. Dubinskii 博士、V. Fromzel 博士、J. Zhang 博士、N. Klaus 博士、S. Fuerstenau 博士、I. McKinnie 博士、P. Ishkanian 先生和 J. W. Ryu 教授就所感兴趣内容进行的有益讨论。还要感谢 IPG 公司的 M. O'Connor 先生、Liekki / nLight 公司的 W. Wilson 先生以及 CorActive 公司的 D. Beiko 先生有关商品化光纤的很多有益讨论。

我感谢在莫斯科物理工程学院 (MEPhI)、俄罗斯科学院 (RAS) 列别捷夫物理研究所 (LPI)、俄罗斯科学院 (RAS) 普罗霍罗夫普通物理研究所 (GPI) 等单位中我的老师和前同事: Yu. A. Bykovskii 教授 (已故)、E. D. Protcenko 教授、A. F. Goryunov 教授、A. S. Schwarz 教授、E. A. Sviridenkov 教授、A. N. Oraevsky 教授 (已故)、Yu. M. Popov 教授、A. P. Shotov 教授 (已故)、V. G. Sheretov 教授 (图瓦鲁州立大学) 和 A. G. Avanesov 教授 (已故, 克拉斯诺达尔大学), 还有 V. P. Danilov 教授、V. A. Smirnov 教授和 I. A. Shcherbakov 教授 (院士、俄罗斯科学院普罗霍罗夫普通物理研究所所长) 等人。

而且, 我要向莫斯科物理工程学院特殊物理系 (我在该系受到了特别的教育并因此而使我的人生得到了重要的改变) 的建立者、曾作为我的毕业考核委员会主任的列别捷夫物理研究所前任主任 N. G. Bason 教授 (已故院士、诺贝尔物理学奖获得者; 与 A. M. Prokhorov 教授和 C. H. Townes 共享了 1964 年诺贝尔物理学奖) 表达我个人的特别感激之情。

特别感激光纤激光器工程师 Stuart McLean 先生, 他对整个书稿做了大量的校对工作, 他的很多建议极大地改善了材料的陈述与表达。另外, 还要感谢 William Terson 先生对书稿所做的部分校对。特别感谢 Spinger 物理学编辑 Christopher Caughlin 和 Ho Ying Fan 先生在包括书稿准备和出版在内的整个计划方面, 给予的持续不懈的帮助与协调。

最后但不失重要的感谢送给作为光纤工程师的我的妻子 Katerina, 她在技术和格式上都有建设性的建议, 并给我坚定的支持和鼓励。没有 Katerina 的支持, 本书是不可能面世的。

第1章 导 论

参考文献	4
------------	---

第2章 固体中稀土离子的光学性质和光谱

2.1 固体中电子声子耦合	7
2.2 固体中光跃迁的声子边带	8
2.3 光心跃迁: 自发发射和受激发射	10
2.4 固体的稀土心	12
2.5 均匀和非均匀谱线加宽	12
2.5.1 均匀加宽	12
2.5.2 非均匀加宽	14
2.6 光跃迁的光谱参数: 主要理论	15
2.6.1 Judd-Ofelt 理论	15
2.6.2 McCumber 理论	17
2.6.3 Füchtbauer-Ladenburg 理论和爱因斯坦系数	18
2.7 激光激活光心敏化	20
参考文献	21

第3章 激光玻璃的物理和光学性质

3.1 玻璃的力学和热性质	25
3.2 光纤的光学性质 (衰减)	26
3.2.1 玻璃材料的固有性质	27
3.2.2 波导特性	27
3.2.3 光学连接损耗	28
3.3 用于光纤激光器和放大器的各种玻璃类型	28
3.3.1 硅酸盐玻璃	29
3.3.2 磷酸盐玻璃	29
3.3.3 亚碲酸盐玻璃	30

3.3.4 氟化物玻璃和 ZBLAN	30
参考文献	31

第4章 光纤制造和增益光纤的高质量玻璃

4.1 材料	32
4.2 光纤预制棒的制造	32
4.3 由预制棒制造光纤	33
4.4 制造激光激活光纤	34
4.5 稀土掺杂光纤生产的 MCVD 技术	35
4.6 DND 技术	36
参考文献	37

第5章 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 掺杂光纤的光谱性质

5.1 光谱符号	38
5.2 三价稀土离子能级	39
5.3 钕	40
5.3.1 Nd^{3+} 光纤激光器挑战	43
5.4 镱	44
5.4.1 Yb^{3+} 光纤激光器挑战	45
5.5 铒	47
5.5.1 Er^{3+} 光纤激光器挑战	51
5.6 铥	51
5.6.1 Tm^{3+} 光纤激光器挑战	55
参考文献	56

第6章 光纤中光的传播和模式

6.1 光纤的 V 数	59
6.2 光纤色散	61
6.3 保偏光纤	63
6.4 激光光束质量 (M^2 参数)	64
6.4.1 采用 M^2 法测量光束质量的实用建议	66
参考文献	68

第7章 光纤激光物理基础

7.1 粒子数反转:三能级和四能级系统	69
---------------------------	----

7.1.1	四能级激光运转系统	70
7.1.2	三能级激光运转系统	70
7.2	光纤放大器	71
7.2.1	光纤放大器(一般考虑)	71
7.3	光纤激光器的阈值和效率	78
7.4	激光谐振腔的增益和损耗	80
7.5	光纤激光器谐振腔	80
7.5.1	线性激光谐振腔	81
7.5.2	环形激光谐振腔	83
	参考文献	84

第8章 光纤激光器的主要运行体制

8.1	时间体制	86
8.1.1	光纤激光器的连续和自由运转	87
8.1.2	光纤激光器的调 Q 运转	88
8.1.3	光纤激光器的模式锁定	94
8.2	光谱体制	102
8.2.1	波长可调谐激光器	102
8.2.2	单纵模激光器	107
	参考文献	112

第9章 光纤激光器/光纤放大器设计的主要光学元件

9.1	半导体激光器	114
9.1.1	工作原理	114
9.1.2	光纤激光技术中所用半导体激光器的主要类型	121
9.1.3	高功率半导体激光器	124
9.1.4	光纤耦合半导体激光器	127
9.2	保偏与非保偏光纤耦合光学元件	129
9.2.1	偏振相关光隔离器	131
9.2.2	偏振无关光隔离器	132
9.2.3	高功率光纤耦合隔离器	133
9.2.4	偏振相关环形器	134
9.2.5	偏振无关环形器	134
9.2.6	作为自相位调制补偿器的啁啾FBG	136
9.2.7	关于光纤端面制备的描述	137

参考文献	138
------	-----

第10章 高功率光纤激光器

10.1 高功率光纤激光器增益光纤泵浦技术	141
10.2 双包层光纤和包层泵浦技术	142
10.2.1 包层泵浦方式	143
10.2.2 包层泵浦和三包层光纤	145
10.2.3 自由空间	145
10.2.4 熔接泵浦合束器	147
10.3 高功率、衍射极限运转的大模场光纤	148
10.4 光纤中非线性过程及其在光纤激光器和光纤放大器 技术发展中所起的作用	150
10.4.1 受激散射过程的功率阈值	151
10.4.2 受激拉曼散射	152
10.4.3 连续波受激拉曼散射	153
10.4.4 脉冲受激拉曼散射	154
10.4.5 受激布里渊散射	154
10.4.6 连续波受激布里渊散射	155
10.4.7 脉冲受激布里渊散射	156
10.4.8 光克尔效应	157
10.4.9 自相位调制	157
10.4.10 交叉相位调制	158
10.4.11 四波混频	159
10.5 光纤中自聚焦和自陷效应	160
10.6 高功率光纤激光振荡器与低功率主振荡 器——光纤功率放大器结构比较	162
10.6.1 高功率光纤激光振荡器	163
10.6.2 高功率主振荡器——光纤功率放大器	165
10.7 高功率光纤激光器合束	170
10.7.1 光谱合束	171
10.7.2 体全息光栅	172
10.7.3 相干光合束	174
参考文献	179

第11章 光纤激光器工业应用

11.1 材料加工中激光与材料的相互作用	183
----------------------	-----

11.2	工业应用中重要的激光参数	184
11.2.1	波长	185
11.2.2	脉冲能量	185
11.2.3	脉冲宽度和脉冲重复频率	185
11.2.4	功率	186
11.2.5	功率密度	186
11.2.6	激光光束质量	186
11.2.7	光斑直径	187
11.3	光纤光学的功率导引系统	187
11.4	光纤导引系统的主要结构	195
11.5	光纤激光器主要的工业应用	196
11.5.1	焊接	196
11.5.2	切割	196
11.5.3	钻孔	197
11.5.4	钎焊	197
11.5.5	标记	197
11.5.6	热处理	197
11.5.7	金属沉积	197
11.5.8	油漆去色和表面祛除	198
11.5.9	微机械加工	198
11.5.10	激光束半导体加工	198
11.5.11	工业激光应用中光纤激光器的主要竞争者	199
11.5.12	工业应用光纤激光器的挑战性概述	200
11.5.13	光纤激光器在材料加工中的未来应用	200
	参考文献	200

第12章 结论

附录A 符号

附录B 英语缩略语

附录C 一些重要的光学常数

光纤激光器诞生于 1961 年，几乎与获得第一台红宝石激光振荡作用^[1]的时间同步。那时 Snitzer 首次发表了关于在玻璃中激光振荡^[2]及关于光纤激光器运转的可能性^[3]的论文。1964 年，Koester 和 Snitzer 从实验上证明了增益光纤中的放大作用并观察到光纤激光的振荡过程^[4]。其他研究团队进一步研究了光纤激光器这项重要工作。然而，在六七十年代，其他各种激光激活介质的的发展取得了巨大的成就，如激光晶体和液体染料激光器，加之缺乏实用性的半导体激光器（1962 年报道了半导体激光器的首次运转），使得光纤激光器的研究停滞了数十年。直到 20 世纪八九十年代，由于大功率与可靠的半导体激光器和半导体激光泵浦技术的出现，光纤激光器才又展现出自身第二次生命力。这个过程伴随着光纤激光技术在光通信中的应用，光通信中使用了光纤放大器而不是光纤激光器的概念。早期长途通信时代的基本概念和发现在光纤激光器和光纤放大器系统的发展过程中扮演并将继续扮演重要的角色。作为普通光学特别是激光物理的一个特定领域，光纤激光器和光纤放大器包括下列里程碑式的成就：

- (1) 光纤激光器的首次运转；
- (2) 光纤放大器的首次运转；
- (3) 半导体激光器的首次运转；
- (4) 化学气相沉积（及其改进型）光纤制造技术，使得光纤实现了极低的损耗；
- (5) 某些受主离子（如 Er^{3+} ）对于施主离子（如 Yb^{3+} ）的敏化；
- (6) 双包层光纤（DC）和包层泵浦技术；
- (7) 高效、室温运转和低成本半导体激光器的发展；
- (8) 高效、低成本单频半导体激光器的发展；
- (9) 光纤耦合技术的重要进展，如光纤耦合半导体激光器；
- (10) 高掺杂增益光纤的发展；
- (11) 低成本光纤耦合和全光纤元件的商品化；
- (12) 光子晶体光纤的发明与发展；
- (13) 高效拉曼光纤激光器的成就与发展；

(14) 保偏光纤结构的发展;

(15) 光纤空间基模滤波和缠绕技术。

从这些里程碑式的成就可以看出,作为一个技术领域的光纤激光器的成功实际上是固体激光器(特别是半导体泵浦激光器)和光纤技术共同进步的结果。因此,光纤激光器的技术解决方案皆来自于这两个领域。目前,光纤激光器和大多数高功率固体激光器以及某些气体激光器发生了竞争并有可能取而代之。大多数发展着的光纤激光器系统以掺杂下列稀土离子的激光玻璃为基础: Yb^{3+} 、 Er^{3+} 、 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 、 Tm^{3+} 和 Nd^{3+} 。然而从历史的角度看,需要注意的是,光纤激光器所用的第一个离子是 Nd^{3+} ,因此,对于光纤激光器激活离子研究所做的大量工作是关于 Nd^{3+} 离子的,包括在独特光谱和瞬态光纤激光特征方面的新的运转机理。不过,研究者和工程师很快就将注意力转移到了 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 。与 Nd^{3+} 比较, Yb^{3+} 提供了较高的转换效率,1 μm 光谱范围内宽得多的调谐能力以及较高的能量存储时间。随后,借助于性能优异,技术更先进和更可靠的 $9 \times \text{nm}$ 砷镓铟(InGaAs)半导体激光器作为 Yb^{3+} 光纤激光器的泵浦源, Yb^{3+} 的优势也得以扩展。

由于半导体激光泵浦技术和光通信的进一步发展,其他离子例如 Er^{3+} 和后来的 Tm^{3+} 得到了研究者和工程师的深切关注。于是,最终导致了基于这些稀土离子的光纤激光器的功率达到数百瓦, $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 系统效率大于30%,而 Er^{3+} 掺杂光纤和 Tm^{3+} 掺杂光纤的效率大于50%。

与此同时,科学家和工程师们调研了大幅度减小光纤光学损失的办法。在这个方面,最重要的突破是发明了改进型的化学气相沉积光纤制造技术(MCVD或CVD),这个成就使得光纤的损耗降至极低(1.5 μm 波段非掺杂光纤约小于0.2dB/km;稀土掺杂光纤如增益光纤0.01~0.1dB/m)。大多数光纤制备过程使用改进型的化学气相沉积技术作为核心步骤,包括增益光纤的制备。

发展高效率光纤激光器下一步的基本措施是使用 Yb^{3+} 离子敏化玻璃中的 Er^{3+} 激光激活离子。注意先前提到的早期激光研究,考虑的是 Nd^{3+} 自身敏化(而这里是 Yb^{3+} 离子)。无论如何,其重要性在于使用了 $9 \times \text{nm}$ InGaAs半导体激光器作为替代直接地激励 Yb^{3+} 。对于 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共同掺杂系统,敏化利用了玻璃中 Yb^{3+} 离子在约915nm和约976nm波长的宽带吸收,该过程可以通过优良的InGaAs半导体激光来完成,还能实现激光玻璃中 Yb^{3+} 的高浓度掺杂。在 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共同掺杂材料中,在吸收带中被激发的 Yb^{3+} 离子可将能量高效率地转移到 Er^{3+} 离子的上激光能级;因此,创造了 Er^{3+} 在1.5 μm 光谱范围产生激光作用的高效粒子数反转条件。 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 系统在双包层光纤中也起了重要作用,在这种场合下实现有效的吸收需要较长的增益光纤。高浓度 Yb^{3+} (在 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 激光玻璃中要比 Er^{3+} 高出10倍以上)在包层泵浦结构中能够实现915nm或976nm

光谱范围内的有效高功率泵浦吸收，这就使得双包层增益光纤的长度得到合理的缩短。

正如能够想象的那样，大部分科技进步（与其他类型激光器相同）集中并将集中在具有衍射极限光束质量的单横模光纤激光器和光纤放大器方面。在光纤激光器早期发展期间，唯一支持基模的增益光纤由一个数微米直径的激光激活离子掺杂的芯和一个约 $100\mu\text{m}$ 直径的未掺杂外包层组成。泵浦和信号辐射都进入到同一个空间内，即都从增益光纤相同或者相反方向进入到芯径中并且两者严重地相互重叠。虽然这是一个好的方案，有很多优点，但对于有效地进入到光纤芯而言，这种芯径泵浦结构只能允许有限的半导体激光泵浦亮度（每立体角光功率密度 $[\text{W}/\text{cm}^2 \times \text{球面度}]$ ）。这种情况限制光纤激光器功率约为 1W ，相当于泵浦半导体激光器单模发射器的功率。

为增加耦合进入增益光纤的泵浦功率，在 20 世纪 80 年代中期，几个研究团队几乎同时提出了泵浦辐射进入到面积较大的掺杂芯径外包层的建议，这样，就能有效地扩展发射到光纤激光器中泵浦功率的能力。为这种包层泵浦传播技术已经对于某些特殊的光纤进行了研究。由于较低折射率的聚合物外层，这种光纤允许进入芯径的信号辐射和被约束在包层内的泵浦辐射同时传播。因这种双波导性质，这种光纤称为双包层光纤，即有一个泵浦辐射的额外包层。由于减小了包层泵浦面积和芯吸收面积之间的重叠，在芯径泵浦波长吸收效率相同的条件下与芯泵浦光纤比较，双包层光纤需要更长的长度才能实现有效的吸收。不过，对于高功率和低平均功率应用，因涉及非线性过程造成的实际设计和研制问题，芯径泵浦光纤技术（只需要非常短的增益光纤）是非常实用的，而且经常是最佳的途径。

前面的里程碑成就中，我们强调了光纤缠绕模式滤波技术（2000 年提出），似乎是现存模式滤波技术中最简单和成本最低的。使用芯和包层间折射率差较小的大模场光纤中基横模弯曲损耗与高阶模弯曲损耗之间的高鉴别因子，研究人员通过缠绕光纤为特定曲率半径的方式从多模增益光纤中获得了衍射极限的高功率激光输出。还需注意到其他几个光纤激光器的单模滤波技术。然而，缠绕技术是目前最有效和最稳定的，允许实用的商用高功率光纤激光器系统具有衍射极限的光束质量。

当前，在双包层光纤有了迅猛进步之后，高功率半导体激光器和模式滤波技术（建立在前面提及的光纤缠绕方式）促使红外光纤激光器获得了近衍射极限光束质量的连续波功率水平大于 10kW （多模运转大于 50kW ）。这些指标还在迅速地不断增加。在不久的将来，光纤激光器不仅有可能更深入地渗透到传统的激光市场，而且将会取代市场上的其他几种类型的激光器。

本书的目的是给出有关光纤激光器和光纤放大器领域的一个相对独立和专一

视角的介绍。本书由 12 章组成,包括导论和结论。前面几章向读者介绍了激光物理、固体和玻璃中稀土离子的光谱学以及光纤光学和光纤技术基础。随后是关于光纤中光传播一般原理的回顾和光纤激光器主要运转机制的描述。本书的第二部分讨论了光纤激光器的物理学和技术,包括元件和系统的目前工艺水平。第 10 章专注于高功率光纤激光器研究和发展中必须提及的基本物理过程、技术挑战以及可利用的重要解决方案。

第 11 章描述了光纤激光器的工业应用。而有关激光器运转基本原理以及与光纤中高功率光辐射过程相关的大多数章节,都可在第 1 章所附的文献中找到出处。鉴于本书介绍的性质,作者没有描述诸如光子晶体光纤激光器、拉曼激光器、拉曼放大器、上转换激光器、超连续谱振荡或者非线性频率转换等系统(因涉及光功率传导系统,第 11 章简短地介绍了光子晶体光纤)。贯穿全书内容(除了某些子系统,如可调谐激光器运转、某些光纤激光腔或光纤激光器设计的例子),作者尽量保持在性质描述上的普适性并简化其描述过程,这就限制了某些光纤激光器结构或者设计等各种例子选取的数量。因此,读者可以从本书所提供的技术材料中选择具有通用性的基本原理、理论、实用的元器件和方法来研究具有自己特点的光纤激光器和光纤放大器系统。同时,杂志文章和会议资料也可以作为仔细研究特殊光纤激光器时的宝贵资源。

作者希望本书将对学生、工程师、教师和研究者的日常工作有所帮助。本书也并未刻意打算覆盖光纤激光器科学与技术的所有方面。即使舍弃一点光纤激光器的应用,也要包括这些感兴趣的、重要的和具有快速发展势头的激光物理的基本原理。

参 考 文 献

1. T. H. Maiman, Stimulated optical radiation in ruby. *Nature* 187, 493-494 (1960)
2. E. Snitzer, Optical maser action of Nd^{3+} in a barium crown glass. *Phys. Rev.* 7 (12), 444-446 (1961)
3. E. Snitzer, Proposed fiber cavities for optical masers. *J. Appl. Phys.* 32 (1), 36-39 (1961)
4. Ch. J. Koester, E. Snitzer, Amplification in a fiber laser. *Appl. Optics.* 3 (10), 1182-1186 (1964)

推荐的有关激光器的专著

5. A. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, California, 1986), pp. 1283
6. O. Svelto, *Principles of Lasers*, 4th edn. (Plenum Press, 2004), pp. 605
7. W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer, 2006), pp. 706
8. B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (John Wiley and Sons, 1991), pp. 966
9. R. Diehl, R. D. Diehl, *High-power Diode Lasers: Fundamentals, Technology, Applications* (Springer, 2000), p. 416
10. Yu. M. Popov, *Semiconductor lasers*. *Appl. Opt.* 6 (11), 1818-1824 (1967)
11. V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, D. N. Nikogosyan, *Handbook of Nonlinear Optical Crystals*