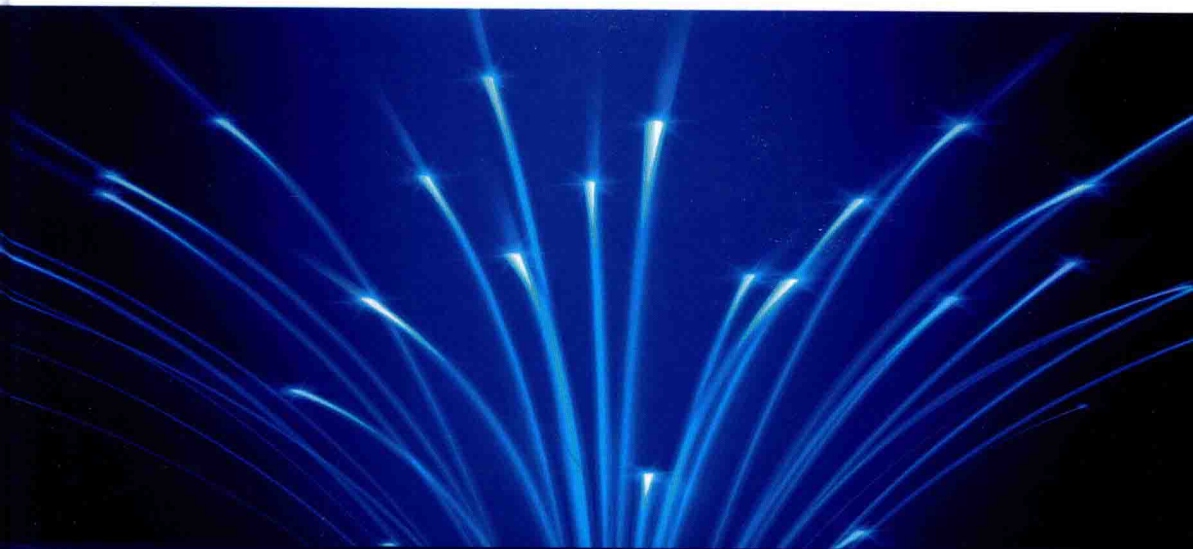


光学与光子学丛书

多波长光纤激光技术

王天枢 著



科学出版社

光学与光子学丛书

多波长光纤激光技术

王天枢 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了多波长光纤激光技术及其应用研究的成就。全书共六章,主要涵盖了近年来多波长光纤激光技术大部分研究方向的新实验、新现象及新应用,包括采用梳状滤波器和光纤干涉仪的线性增益多波长光纤激光器、非线性效应多波长光纤激光器,以及其在光通信和光生微波技术中的应用。本书重点突出前沿性,很多内容是作者及其课题组最新的研究成果,是对多波长光纤激光技术的深入探索。

本书适合从事光纤通信、光纤传感、激光技术、微波光子学等教学和科研的教师、科技人员、工程技术人员、研究生及高年级本科生阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

多波长光纤激光技术/王天枢著. —北京:科学出版社, 2017. 9

(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-054428-5

I. ①多… II. ①王… III. ①光纤器件-激光器 IV. ①TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 222014 号

责任编辑:周 涵 / 责任校对:彭 涛
责任印制:张 伟 / 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>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 9 月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:348 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序)

陈家璧	高志山	贺安之	姜会林	李淳飞
廖宁放	刘 旭	刘智深	陆 卫	吕乃光
吕志伟	梅 霆	倪国强	饶瑞中	宋菲君
苏显渝	孙雨南	魏志义	相里斌	徐 雷
宣 丽	杨怀江	杨坤涛	郁道银	袁小聪
张存林	张书练	张卫平	张雨东	赵建林
赵 卫	朱晓农			

序

王天枢 2012 年进入长春理工大学工作。五年来，一直作为科研团队的核心成员，和我一起进行科学研究和学术交流。尽管我们从事的研究方向有差别，但我比较了解他学术研究的进展，并且熟悉光纤激光技术相关的内容。王天枢是一位具有国际视野的青年学者，他专注于光纤激光技术研究已经有十多年，一直埋头苦干紧追前沿新技术，踏踏实实形成自主知识产权，在这一领域有很多开创性的研究成果，能形成专著出版，我非常高兴。因为出版科技专著是归档保存和传播普及科学技术的重要手段，起着标志科技水平、传承科研成果的重要作用。

光纤激光器是近年来发展起来的新型激光器，在获得大功率、可调谐、多波长激光方面，具有无法比拟的优势，是第三代激光技术的代表。光纤激光技术应用范围非常广，包括光通信、光传感、工业制造、国防安全、医疗器械、生命科学、环境科学、大型基础设施和作为其他激光器的泵浦源等许多领域。近年来，光纤激光技术快速发展，越来越多的专家学者关注并投入到相关的研究中，尤其在光传感和光通信等领域，各种成果不断涌现，但关于光纤激光技术方面的专著并不多见。

王天枢十年磨一剑，专攻光纤激光器技术，积累了丰富的实验经验和研究成果。在这一基础上，对低功率多波长光纤激光技术全面总结之后，形成了《多波长光纤激光技术》一书。这本书以专业的视野、系统的分析，向读者展示这一类光纤激光器的设计原理、灵活结构和性能特征，从连续波光纤激光器的基本理论到创新研究，从基本的环形腔和线形腔结构到可调谐、多波长光纤激光器，再到光纤激光器的应用等，既全面翔实，又脉络清晰。这本书涉及的研究出自于吉林大学、浙江大学、杭州电子科技大学和长春理工大学等多家单位、多个实验室，来源于作者在不同时期的研究成果，主要依托长春理工大学作者所在课题组近年的几十篇论文和二十余项发明专利，内容还包括部分国外科学家的相关研究，与作者的研究内容相辅相成、互通互补，共同构成一个整体。这本书对这些研究成果进行了分类和归纳，提出了滤波器、光纤干涉仪、非线性效应等多种结构的光纤激光器类型，并介绍了光纤激光器在高速光通信和光生微波、毫米波领域的应用等。

据我所知，国内尚未有对多波长光纤激光技术进行全面和深入探讨的专著，这本书对从事光纤激光器研究的科研人员、工程师、研究生和高年级本科生无疑

是一本非常有益的参考读物。如果作为教材，可以为这个方向的研究生提供教学大纲，指导刚入门的研究生全面了解该领域的基础和前沿知识，尽快提升专业研究能力。

与国内外相关研究比较，王天枢课题组在多波长光纤激光技术中的研究成果具有鲜明特点，从基础研究到应用研究，形成了一个较为完整严密的技术理论体系。我认为，他们对学术前沿的推进做出了非常有价值的探索，他们的一些发明和发现将成为发展光纤激光技术的基础性成果，为后来者奠基。他们对于多波长光纤激光器的理论分析和实验现象解释将加深人们对光纤激光器一般概念的理解，促进光纤激光技术的应用。相信本书的出版不仅可以集中地阐释技术发展趋势，而且必将有力加快这一领域的研究步伐，接续前人火把，持续点亮光纤激光器技术“创新之光”。



长春理工大学教授，中国工程院院士
2017年8月

前 言

光纤激光器作为第三代激光技术的代表，具有效率高、光束质量好和结构简单紧凑的优点，在可调谐、多波长输出、稳定性等方面的优势是传统激光器无法比拟的。其应用范围逐渐从光通信、光传感等扩展到工业加工、材料处理、生物医学、国防军工等越来越广泛的领域。

多波长光纤激光技术是光纤激光器领域的主要研究方向之一，近年来，随着光纤工艺、半导体激光器技术及各种光纤器件技术的进步，多波长光纤激光技术发展迅速。本书对光纤激光器原理、各类多波长光纤激光技术及其应用研究进行了系统的整理，涵盖了作者近年来在多波长光纤激光器方面的主要研究成果。

本书第1章主要介绍多波长光纤激光器的概念、基本分类以及国内外研究现状。第2章介绍多波长光纤激光技术的基本原理，包括光纤激光辐射原理、能级结构、光纤滤波器和干涉仪、光纤非线性效应等。多波长光纤激光器主要研究的是输出波长及模式特性，输出功率一般较低，在可调谐和多波长输出性能方面特点突出，应用领域主要有光通信、光传感等。近十年来，在与多波长光纤激光技术相关的梳状滤波器、光纤干涉仪、光纤受激布里渊散射效应等技术及其应用方面取得了大量研究成果。第3~6章是本书主体部分，展示大量目前已出版的专著和教科书中未见的研究成果，介绍多种光纤激光器的新结构、新应用及其实验结果。主要包含线性增益和非线性效应两类多波长光纤激光器，线性增益多波长光纤激光器主要采用掺杂稀土离子光纤作为增益介质，半导体激光器泵浦产生线性增益，利用光纤 Bragg 光栅和 Sagnac 干涉仪等光纤结构实现梳状滤波。非线性多波长光纤激光器利用了受激布里渊散射及四波混频（four wave mixing, FWM）等光纤非线性效应获得非线性多波长输出。

光纤 Bragg 光栅是常用的光纤器件，在早期多波长光纤激光器研究方面起了很大作用，随着紫外激光直接写入法的发展，光纤 Bragg 光栅工艺日趋完善，目前已经广泛实用化，本书对这种结构的多波长光纤激光器模式特性进行了深入分析，介绍了利用光纤激光器研究长距离高速光传输和光生微波信号产生的一些成果。介质薄膜滤波器在全光波分复用系统中主要用于光分插复用器，优点是可以通程序控制波长扫描，也可用于编程控制的多波长可调谐光纤激光器。多模光纤滤波器是近年来发展起来的梳状滤波新技术，在光纤传感方面将会有应用空间，书中也介绍了作者在这方面的研究情况。

光纤 F-P 干涉仪、Sagnac 干涉仪、M-Z 干涉仪等在光纤传感研究中很常见，作为梳状滤波器，光纤干涉仪在近年来的多波长光纤激光器研究中也比较普遍。F-P 干涉仪目前已有较成熟的产品，采用程序控制波长扫描。Sagnac 干涉仪可以实现对滤波周期和带宽的调谐，第 4 章介绍单 Sagnac 和双 Sagnac 干涉仪结构的多波长光纤激光器，能够对输出波长间隔、线宽进行独立调谐。采用 M-Z 干涉仪和 Michelson 干涉仪的多波长光纤激光器研究也在第 4 章中进行介绍。

光纤非线性效应是影响大功率光纤激光器效率和阈值的主要因素，也影响着高速率光纤通信系统性能，在这些领域主要研究对光纤非线性效应的抑制方法。但是，在多波长光纤激光器中，四波混频、受激布里渊散射等光纤非线性效应能够有效地获得稳定的多波长输出。尤其是受激布里渊散射效应，利用窄线宽布里渊泵浦，可以在光纤中获得输出稳定、等间距的窄线宽多波长激光。第 6 章专门介绍近年来各种结构的布里渊多波长光纤激光器研究成果，这种利用同一种子源获得的间隔可调、线宽窄、稳定性好的激光进行拍频获得窄线宽高频微波信号是光纤激光器在微波光子技术领域的应用之一，书中介绍了 10~60GHz 频率的光生微波的研究。

作者长期从事光纤激光器及其应用技术的研究，本书引用的研究成果是最近十年报道的，大部分来自作者课题组，也吸收了国内外一些典型的研究成果。近十年来，与作者共同从事该研究的老师主要有魏一振、周雪芳、张鹏。长春理工大学姜会林院士对课题组的研究非常关注，亲自指导并给予了很大的支持。本书内容主要来自 863 计划、国家自然科学基金、浙江省自然科学基金、吉林省自然科学基金等项目的研究成果。

王天枢编制了写作大纲，收集了专著的素材，将课题组的研究成果和相关研究的优秀成果作为本书原型。博士研究生马万卓、贾青松，硕士研究生刘鹏、张岩参加了书稿的编辑和插图绘制工作，并翻译了书中部分外文文献，王天枢对全书进行了修改，周雪芳、魏一振、张鹏提出了建设性意见。

姜会林院士向科学出版社推荐出版本书。

感谢所有参与本书出版的专家学者和出版工作者，感谢读者对这个领域研究的关注。

王天枢
2017 年 1 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多波长光纤激光器概况	1
1.1.1 多波长光纤激光器	1
1.1.2 多波长光纤激光器的应用领域	3
1.1.3 多波长光纤激光器分类	7
1.2 多波长光纤激光器国内外研究现状	8
1.2.1 国外研究现状	8
1.2.2 国内研究现状	9
参考文献	10
第 2 章 基本理论	13
2.1 光纤激光基本原理	13
2.1.1 激光辐射原理	13
2.1.2 增益光纤的能级结构	16
2.1.3 多波长光纤激光器谐振腔	21
2.2 梳状滤波器	23
2.2.1 光纤 Bragg 光栅	23
2.2.2 介质膜滤波器	25
2.2.3 多模光纤滤波器	27
2.3 光纤干涉仪	28
2.3.1 光纤 F-P 干涉仪	29
2.3.2 光纤 Sagnac 干涉仪	29
2.3.3 光纤 M-Z 干涉仪	31
2.4 光纤非线性效应	35
2.4.1 自相位调制	36
2.4.2 交叉相位调制	37
2.4.3 四波混频	37
2.4.4 受激拉曼散射	39

2.4.5 受激布里渊散射	40
参考文献	42
第3章 基于滤波器的多波长光纤激光器	45
3.1 基于光纤 Bragg 光栅的多波长光纤激光器	45
3.1.1 基于光纤 Bragg 光栅的线形腔多波长激光器	45
3.1.2 基于光纤 Bragg 光栅的环形腔多波长光纤激光器	50
3.1.3 基于双波长光纤 Bragg 光栅激光器的高频微波信号产生 技术	59
3.1.4 基于光纤 Bragg 光栅的单纵模光纤激光器高速调制	74
3.2 基于介质膜滤波器的多波长光纤激光器	89
3.3 基于多模光纤滤波器的多波长光纤激光器	93
3.3.1 基于多模滤波器的可调谐多波长掺铒光纤激光器	93
3.3.2 基于复合滤波的可调谐多波长掺铒光纤激光器	97
3.3.3 基于多模滤波器的可调谐掺铒光纤激光器	103
参考文献	105
第4章 基于干涉仪的多波长光纤激光器	107
4.1 基于光纤 F-P 干涉仪的多波长光纤激光器	107
4.1.1 基于光纤 F-P 干涉仪的掺铒光纤激光器	107
4.1.2 基于光纤 F-P 干涉仪的掺铒光纤激光器	109
4.2 基于 Sagnac 干涉仪的多波长光纤激光器	118
4.2.1 采用单个 Sagnac 干涉仪的多波长光纤激光器	118
4.2.2 级联 Sagnac 干涉仪的多波长光纤激光器	131
4.2.3 基于 F-P 激光二极管的 Sagnac 干涉仪多波长掺铒光纤 激光器	139
4.3 基于 M-Z 干涉仪滤波的多波长光纤激光器	141
4.3.1 反射式光纤 M-Z 干涉仪滤波的多波长掺铒光纤激光器	141
4.3.2 改进的 M-Z 干涉仪多波长掺铒光纤激光器	144
4.3.3 基于双芯光纤 M-Z 干涉仪的掺铒光纤激光器	147
4.3.4 基于 M-Z 干涉仪和 Sagnac 干涉仪级联的可调谐掺铒 光纤激光器	149
4.4 基于 Michelson 干涉仪的双波长掺铒光纤激光器	151
参考文献	153
第5章 非线性多波长光纤激光器	154
5.1 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器	154

5.1.1	非线性偏振旋转多波长光纤激光器	154
5.1.2	非线性偏振旋转多波长锁模光纤激光器	161
5.2	多波长布里渊-拉曼光纤激光器	167
5.2.1	全开腔多波长布里渊-拉曼光纤激光器	168
5.2.2	采用光纤反射镜的多波长布里渊-拉曼光纤激光器	171
5.3	基于四波混频的多波长光纤激光器	178
5.3.1	基于四波混频效应的掺铒多波长光纤激光器	178
5.3.2	基于四波混频效应的掺铊多波长光纤激光器	181
5.4	基于参量放大的多波长光纤激光器	184
5.4.1	线形腔单泵浦多波长参量光纤激光器	184
5.4.2	双泵浦多波长光纤参量振荡器	186
	参考文献	192
第 6 章	布里渊多波长光纤激光器及其应用	194
6.1	布里渊多波长光纤激光器原理	194
6.1.1	布里渊散射阈值	194
6.1.2	布里渊光纤激光器的分类	195
6.2	布里渊多波长光纤激光器	196
6.2.1	线形腔布里渊多波长光纤激光器	196
6.2.2	环形腔布里渊多波长掺铒光纤激光器	208
6.3	可调谐布里渊多波长光纤激光器	227
6.3.1	波长间隔可调谐双波长布里渊光纤激光器	227
6.3.2	间隔输出布里渊多波长光纤激光器	231
6.4	布里渊多波长光纤激光器的应用	237
6.4.1	基于布里渊多波长光纤激光器的微波信号产生	238
6.4.2	基于布里渊光纤激光器的可调高频微波信号产生	249
6.4.3	基于布里渊双波长光纤激光的 60GHz 拍频微波信号 产生	257
	参考文献	260

第 1 章 绪 论

1960 年 7 月, 美国工程师梅曼成功研制出世界第一台红宝石激光器^[1], 它的发明在现代科学发展史上具有划时代的意义, 成为与原子能、计算机、半导体齐名的 20 世纪四项重大发明之一。与传统光源相比, 激光光源具有单色性好、相干性强、亮度高和方向性好等优点, 在工农业生产、通信、医疗、科研、国防等诸多领域具有极为广泛的应用。

光纤激光器作为激光领域的新兴技术, 其发展和应用得到了社会各方面的广泛重视, 近年来也成为科学研究的热点。但是, 实际上光纤激光器的历史和激光器本身的历史几乎一样长。早在 20 世纪 60 年代, 美国光学公司的 Snitzer 和 Koester 等就提出了光纤激光器的构想, 并在实验中观察到了光纤激光器中的激光现象。由于 20 世纪 60~70 年代在降低光纤损耗方面未有重大进展, 所以光纤激光器发展比较迟缓。自 20 世纪 80 年代英国南安普顿大学的 Poole S B 等利用改进的化学气相淀积法 (MCVD) 研制出低损耗的掺铒光纤 (EDF) 起, 由掺稀土元素作为增益介质的光纤放大器迅速发展并为光纤通信带来了革命性的进展, 由于光放大器都可以通过引入反馈机制构成激光器, 所以在光纤放大器的基础上加入一个反馈装置, 就构成了光纤激光器。

光纤激光器是第三代激光技术的代表, 具有效率高、光束质量好和结构简单紧凑的优点。由于光纤元件是熔接在一起的, 所以光纤激光器对热抖动和机械振动表现得更稳定, 并且通过集成化设计, 由一系列闭合的光纤元件构成, 不需要匹配, 也没有被污染的危险。目前光纤激光器已经广泛应用于工业、医疗、军事及科学研究等领域。

1.1 多波长光纤激光器概况

随着人类社会进入信息化时代, 传统的通信技术已经很难满足这种急速增长的通信容量需求, 密集波分复用 (dense wavelength division multiplexing, DWDM) 技术可在同一根光纤上传输多路不同波长的信号, 从而大幅度地提高传输容量。多波长光纤激光器具有性能稳定、多波长输出、成本低、光纤兼容、可调谐范围宽的优点, 因此多波长光纤激光器成为人们研究的热点。

1.1.1 多波长光纤激光器

光纤激光器与普通激光器的原理一样, 是由泵浦源、增益介质和谐振腔构成

的，其产生激光的过程就是泵浦光与增益介质发生相互作用产生受激辐射的物理过程。光纤激光器的泵浦源一般为激光二极管（laser diode, LD）或 LD 阵列，增益介质为掺杂各种不同稀土离子（如 Nd^{3+} 、 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Tm^{3+} 等）的光纤，谐振腔则有很多种选择。最常见的谐振腔是法布里-波罗（Fabry-Perot, F-P）腔，它是将增益介质置于两片高反射率的腔镜之间构成的，如图 1.1 所示。

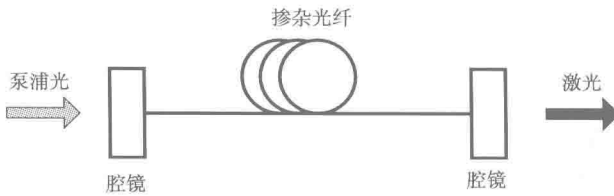


图 1.1 光纤激光器基本结构

目前，在光纤激光器结构中，在定向光纤耦合器的泵浦波长输入端导入泵浦光，如图 1.2 所示，这种耦合器称为波分复用（WDM）泵浦耦合器，通过腔镜选择获得多波长激光。

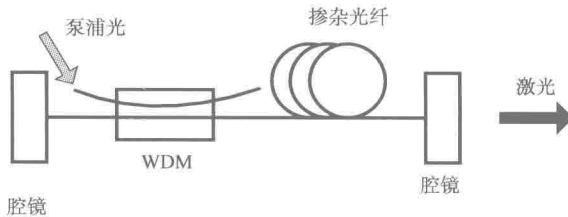


图 1.2 采用 WDM 泵浦耦合器的光纤激光器结构图

在光纤上刻写一对光纤 Bragg 光栅作为腔镜也是常见的光纤激光器结构，如图 1.3 所示，光纤 Bragg 光栅（FBG）对增益光相当于高反射镜和半反半透镜，对泵浦光则是透明的，这种简单的全光纤结构能获得单纵模、窄线宽的多波长激光输出。

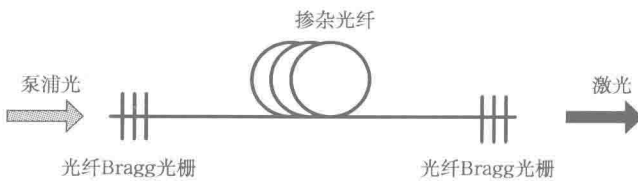


图 1.3 采用光纤 Bragg 光栅的光纤激光器结构图

环形腔光纤激光器也是通过 WDM 泵浦耦合器导入泵浦光的，如图 1.4 所示，在光纤环路中插入滤波器选择多波长，光纤隔离器是为了使激光器单向运转，如果使用的是普通的掺杂光纤而不是保偏光纤，还需要插入一个偏振控制器。

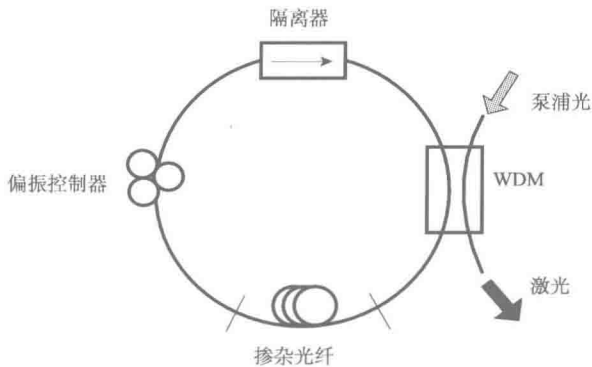


图 1.4 环形腔光纤激光器

近些年，伴随着光纤通信对器件的旺盛需求及相关光器件工艺制作水平的提高，出现了很多更高性能、更低成本的新型光器件，使光纤激光器的应用也从工业和光纤通信领域延伸到光纤传感、材料加工、生物医药以及国防等领域。多波长光纤激光器因其多波长输出、结构紧凑、低成本、好的光束质量、低插入损耗等特点，在 WDM 光网络^[2]、光纤传感^[3]及光子微波技术^[4]等领域的应用潜力巨大，最近十多年备受瞩目并得以蓬勃发展。目前，多波长光纤激光器的研究方向主要表现为如何获得稳定、波长间隔可调、输出波长数目足够多且各波长功率均衡的多波长激光输出。为达到以上要求，国内外研究者通过采用不同的激光增益介质、不同的梳状滤波器及不同的谐振腔结构进行了大量的研究工作，近年来已有许多成果被报道出来。

1.1.2 多波长光纤激光器的应用领域

1. 波分复用无源光网络

近年来，随着各种带宽密集型业务（如多媒体业务和互动视频业务）的普及，互联网终端对通信带宽的需求日益增长。波分复用无源光网络（WDM-PON）技术可以为每一个用户提供专属的波长带宽，并能灵活地管理分配用户带宽，成为下一代光接入网极具潜力的备选方案之一。波分复用技术通过将多个波长复用到一根光纤中传输，扩大了系统容量，在主干网中获得了广泛的应用。但是在光接入网的应用上，由于终端客户相比主干网的客户群要少得多，所以客户分摊下来的成本依然很高，这也是限制波分复用技术应用于光接入网的主要因素。WDM-PON 高昂的成本主要包括大量的激光光源和波分复用/解复用（mux/demux）器件，因而多波长光纤激光器的应用将有效地降低光源系统成本，使 WDM-PON 技术更具实用性。基于多波长激光器的 WDM-PON 系统基本结构如图 1.5 所示。光线路终端（optical line terminal, OLT）中采用具有 n 个信道的多波

长激光器作为光源，下行信号经过一个波分复用/解复用器分路传输到相应的光网络单元（optical network unit, ONU），当下行帧到达光网络单元后再通过 1×2 耦合器分成两路，一路送到接收器完成下行传输，另一路送到调制器将上行数据加到光载波上。上行信号经过同一个波分复用/解复用器复用到传输光纤，并在光线路终端用 WDM 接收器接收。这要求多波长激光器具有足够高的输出功率和稳定的输出波长。

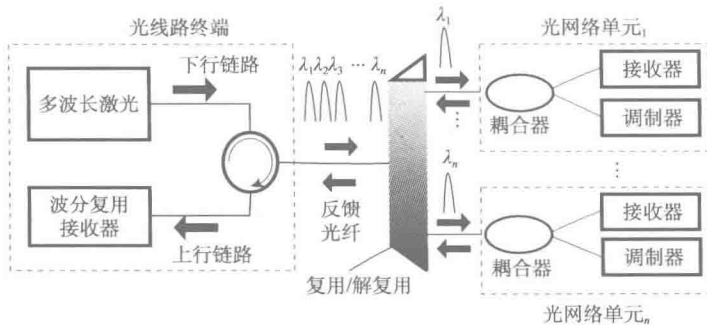


图 1.5 基于多波长激光器的 WDM-PON 结构

2. 多参量及分布式光纤传感

光纤传感系统具有高信噪比、高灵敏度和超远传感距离等优势，近几年逐渐成为传感领域的一个重要发展方向。基于多波长光纤激光器的光纤传感系统有效地将 WDM 技术与分布式传感系统相结合，实现了多参量同时测量，大大提高了系统的传感维度和空间测量精度，同时降低了成本，十分适合环境复杂的多参量传感测量和分布式高密度传感应用。图 1.6 所示为结构比较简单的基于 4 个波长光纤激光器的温度传感系统。传感探头分别为四个中心波长不同的光纤 Bragg 光栅，同时这些光纤 Bragg 光栅还作为多波长光纤激光器的波长选择器件。当作用在光纤 Bragg 光栅上的温度（或者应力）发生改变时，光栅的中心波长也随之改变，从而造成相应激光波长的偏移。通过在输出端对波长进行解调分析，可以测得各个传感探头处的被测量变化情况。这里要求多波长激光器的滤波器件对外界参量具有较高的灵敏度和较大的可调谐范围。

3. 毫米波光子发生器

毫米波泛指波长范围为 $1 \sim 10\text{mm}$ （频率范围 $30 \sim 300\text{GHz}$ ）的电磁波，是一种高频微波，毫米波技术最先在军事领域得到广泛的应用。在传统的微波振荡器系统中，多以固态功率源和真空管为基本单元，并利用多级倍频获得毫米波信号。然而这些单元工作在 GHz 以上频段时，其性能会急剧下降，所产生的高频微波具有较大的相位噪声和较低的频谱纯度，即电子瓶颈。同时，以电子学方法为基础的数字信号处理技术，还会受到数/模和模/数转换速率的限制。相比之

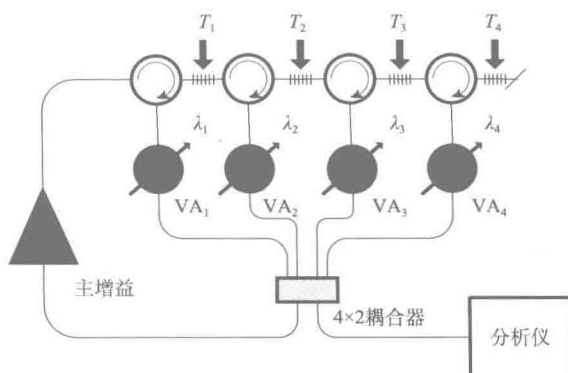


图 1.6 基于 4 个波长光纤激光器的温度传感系统结构

VA: 可调衰减器

下，光子学的方法不受电子瓶颈的限制，可以实现毫米波信号产生和高速信号处理，而且光子学方法还具有抗电磁干扰、结构紧凑、重量轻等优点，光纤激光毫米波发生器与光纤传输系统具有良好的天然兼容性，无需额外的电光和光电转换设备。如图 1.7 所示，双波长单纵模光纤激光器产生的两个具有一定频差的激光本身具有较高的相干性，因而可以经过混频在光电探测器（PD）上拍频产生与其频率差相同的毫米波信号。为了将信号加载到光载频上，首先通过一个波分复用器（WDM）将两个波长分开，并对其中一路进行外调制加载信息，重新合波后光信号通过单模光纤进行远距离传输并保持线偏振（LP）态。光信号传输到基站后，通过光电探测器拍频得到载有信息的毫米波信号，并通过天线辐射出去。这里要求双波长激光器具有良好的稳定性和波长间隔可调谐性。

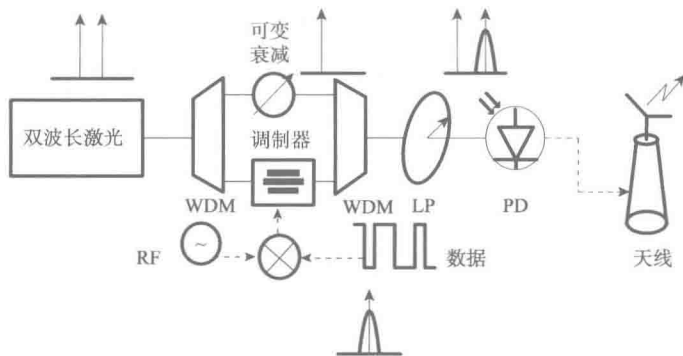


图 1.7 毫米波光载频生成、调制和传输系统的结构

4. 窄线宽大功率激光产生

在大功率窄线宽光纤放大器中，由于纤芯中的光功率密度很高，且相互作用

距离较长, 极易产生各种光纤非线性效应, 尤其是受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS), 受激布里渊散射是光纤中阈值功率最低的一种非线性现象, 能导致大量的激光功率转变成反向传输的斯托克斯光, 从而极大地降低放大器的效率, 同时也可能损害前一系统。抑制高功率放大器中的受激布里渊散射效应是提升窄线宽大功率光纤激光输出所面临的主要挑战。2004 年 WelEls P 等首次提出了采取多波长放大的方式来抑制放大器中的受激布里渊散射效应。该放大方式既保证了较高的输出激光功率, 同时也降低了信号光谱功率密度, 从而提高了受激布里渊散射的阈值, 引起了研究者的重视。图 1.8 为基于多波长光纤激光器的两路窄线宽大功率放大相干合束系统。

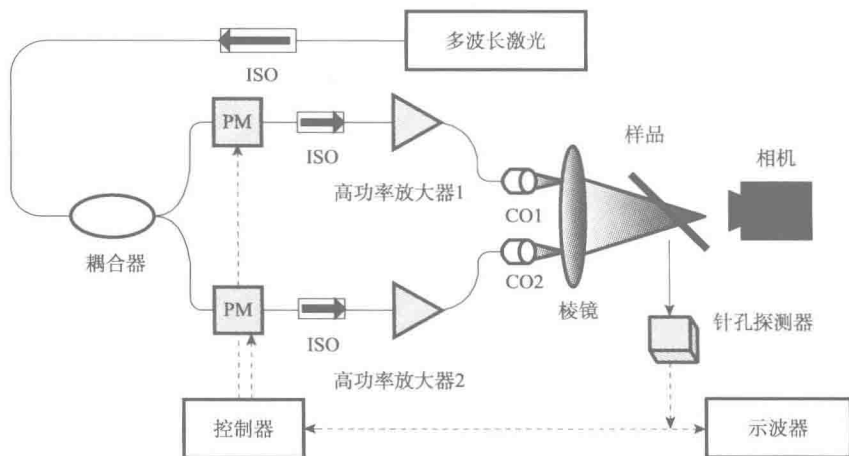


图 1.8 基于多波长光纤激光器的两路窄线宽大功率放大相干合束系统
ISO: 隔离器; PM: 偏振调制器; CO: 光准直器

5. 高精度气体检测

气体传感测量是环境监测和矿产开采等领域的研究热点, 尤其是水蒸气和一些污染气体的测量, 如 CO 、 CO_2 、 HCl 、 NH_3 、 NO 等。这些气体在光谱上存在多个吸收峰, 可以利用其吸收特性检测气体浓度, 如图 1.9 所示。一般说来, 这些重要气体在中红外波段吸收截面是近红外波段吸收截面的 20~200 倍, 因而在气体检测方面多采用中红外波段激光传感器。另外, 掺铒光纤、掺铥光纤和掺钕光纤的受激辐射波段接近中红外, 属于人眼安全波段, 因而基于上述稀土离子的掺杂光纤激光器在气体传感器中具有天然的优势。但在实际情况中, 由于光源功率波动和光电元件漂移等因素, 很难直接确定待测气体浓度。基于双波长激光探测的差分光谱吸收法是一种简单而有效的方法, 如图 1.10 所示。由于环境因素对两个波长激光吸收的干扰是相同的, 通过分析具有不同吸收系数的两个波长的透射功率, 再通过差分运算可以将这些扰动因素相互抵消, 因此具有较高精度。