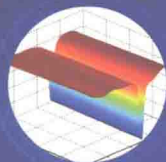
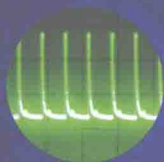


---

# 超短脉冲及混沌光纤激光器

---

杨玲珍 著



科学出版社

# 超短脉冲及混沌光纤激光器

杨玲珍 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书重点介绍光纤激光器的工作原理,尤其是超短脉冲和混沌激光产生的原理、技术。全书共6章,既有前人的理论综述,又有作者的研究积累。第1章主要介绍光纤激光器的特点,从了解光纤开始,简述光纤激光器的发展和分类。第2章主要介绍组成光纤激光器的无源器件。通过对无源器件参数和性能的了解,为构建光纤激光器做基础。第3章主要介绍光纤激光器工作的基本原理。通过激光原理简单的介绍,引入构建光纤激光器的基本结构。根据激光锁模理论,分析在光纤激光器中实现锁模的基本方法和超短脉冲压缩技术等。第4章主要介绍掺铒光纤激光器。介绍掺铒光纤的特点,掺铒光纤激光器在超短亮脉冲、暗脉冲的理论和实验研究。第5章主要介绍掺镱光纤激光器。介绍掺镱光纤的特点及掺镱光纤激光器在超短脉冲产生及压缩方面的理论和实验研究。第6章主要介绍混沌光纤激光器。介绍光学混沌及掺铒光纤激光器产生混沌的研究进展,就混沌光纤激光器的环形和“8”字形腔结构在混沌激光输出方面的理论和实验研究。

本书可供涉及激光技术的通信、传感、机械加工、雕刻和军工部门的工程技术人员,以及高等学校的有关师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

超短脉冲及混沌光纤激光器/杨玲珍著. —北京:科学出版社,2013.11

ISBN 978-7-03-038914-5

I. ①超… II. ①杨… III. ①光纤器件-激光器 IV. ①TN248

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第248624号

责任编辑:钱俊周涵/责任校对:张怡君

责任印制:赵德静/封面设计:谜底书装

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年11月第一版 开本:720×1000 1/16

2013年11月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:283 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

1960年,美国休斯顿实验室的 Maiman 利用掺铬红宝石晶体为发射激光材料做成固体激光器。光纤的出现使固体激光器又有了一种新的形式。1961年,美国光学公司的 E. Snitzer 在光纤激光领域进行了开拓性的工作,报道了在玻璃基质中掺激活钷离子所制成的光纤激光器,20世纪60年代人们在光纤制备技术以及光纤激光器的泵浦与谐振腔结构方面不断探索,但由于当时相关理论和实验条件限制进展相对缓慢。直到20世纪80年代随着光纤制作工艺技术和材料的不断进展,低损耗的掺杂光纤特别是掺铒单模光纤,使光纤激光器具有强大的实用性,从而为光纤激光器带来了新的发展前景。

随着光纤通信系统的广泛应用和发展,超快光电子学、非线性光学、光纤传感等领域应用研究已得到重视和推广。随着光纤技术的不断发展,光纤也出现了新的诸如双包层光纤、光子晶体光纤等。光纤激光技术由通信波段逐渐扩展到军事、机械加工、医疗、光信息处理等领域。1999年,英国南安普顿大学拉制的第一根光子晶体光纤,为光纤激光发展又翻开了新的篇章。以 IPG 公司为代表的高功率掺镱光纤激光器,推动了整个激光加工、军事等领域的发展。本书旨在将光纤激光器脉冲及混沌输出特性在理论和实验方面做一些介绍。作者希望读者尤其是初读者提供一个快速了解和系统掌握光纤激光器的发展、研究方法、特性和应用的途径。

本书在编写过程中,主要参考作者及其课题组近十年的研究成果,希望给出有关光纤激光器的基本理论和一些基本公式。对于有关理论和实验的细节部分,公式有详细的推导,旨在掌握研究方法,为从事有关方面的研究提供参考。

本书在第1章里主要介绍光纤激光器的特点,从了解光纤开始,简述光纤激光器的发展和分类。第2章主要介绍组成光纤激光器的无源器件。通过对无源器件参数和性能的了解,为构建光纤激光器做基础。第3章主要介绍光纤激光器工作的基本原理。通过对激光原理的简单介绍,引入构建光纤激光器的基本结构,根据激光锁模理论,分析在光纤激光器中实现锁模的基本方法和超短脉冲压缩技术等。第4章主要介绍掺铒光纤激光器。介绍掺铒光纤的特点,掺铒光纤激光器在超短亮脉冲、暗脉冲的理论和实验研究。第5章主要介绍掺镱光纤激光器。介绍掺镱光纤的特点及掺镱光纤激光器在超短脉冲产生及压缩方面的理论和实验研究。第6章主要介绍混沌光纤激光器。介绍光学混沌及掺铒光纤激光器产生混沌的研究进展,就混沌光纤激光器的环形和“8”字形腔结构在混沌激光输出方面的理论和实验研究。

在本书编写的过程中，作者课题组的研究生不遗余力地不断修改和校正，付出了大量的时间和精力。在此特别感谢张娟、徐乃军、张向元、刘艳阳、王菲菲、陈曦、杨欢、刘慧亚。也谨以此书祝福已经毕业的学生乔占朵、朱建峰、闫西岳、张丽、杨蓉、张元芳、岳宝花，祝他们在工作岗位上顺心如意，努力拼搏。

也特别感谢博士期间辛辛苦苦指导我的陈国夫研究员和在工作上给予支持的王云才教授。

鉴于作者的学识水平有限，书中难免有不妥乃至失误之处，敬请读者不吝指正。

作 者

2013年6月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 光纤激光器特点 .....	1
1.3 包层泵浦技术 .....	2
1.3.1 双包层光纤结构 .....	3
1.3.2 双包层光纤特性 .....	3
1.3.3 包层泵浦技术耦合方式 .....	4
1.3.4 包层泵浦技术发展现状 .....	6
1.4 光子晶体光纤 .....	7
1.4.1 光子晶体光纤工作原理、结构和工艺 .....	7
1.4.2 光子晶体光纤特性 .....	8
1.4.3 光子晶体光纤发展现状 .....	10
1.5 光纤激光器技术发展概述 .....	11
1.6 光纤激光器分类 .....	13
参考文献 .....	14
<b>第 2 章 光纤无源器件</b> .....	18
2.1 光纤的连接与耦合 .....	18
2.1.1 光纤固定接头 .....	18
2.1.2 光纤活动连接器 .....	19
2.1.3 光纤连接器性能参数 .....	20
2.2 光纤耦合器 .....	21
2.2.1 熔融拉锥型全光纤耦合器 .....	21
2.2.2 常见光纤耦合器 .....	22
2.2.3 光纤耦合器性能参数 .....	23
2.3 偏振控制器 .....	24
2.3.1 常见偏振控制器 .....	24
2.3.2 常见偏振控制器性能参数 .....	25
2.4 光衰减器 .....	26
2.4.1 常见光衰减器 .....	26

2.4.2	光衰减器性能参数	26
2.5	光隔离器与光环行器	27
2.5.1	光隔离器	27
2.5.2	光环行器	28
2.5.3	光隔离器和光环行器性能指标	28
2.6	光纤光栅和光滤波器	29
2.6.1	光纤光栅	29
2.6.2	光滤波器	30
2.7	光波分复用和解复用器	31
2.7.1	光波分复用和解复用器的结构原理	31
2.7.2	光波分复用和解复用器的性能参数	33
	参考文献	33
<b>第 3 章</b>	<b>光纤激光器基本原理</b>	<b>35</b>
3.1	激光理论基础	35
3.1.1	黑体辐射的普朗克公式	35
3.1.2	光的吸收和发射	36
3.2	激光产生的条件	39
3.2.1	线形腔	39
3.2.2	环形腔	41
3.3	激光器锁模原理	42
3.3.1	主动锁模	45
3.3.2	被动锁模	47
3.4	超短脉冲压缩技术	55
3.4.1	自相位调制	56
3.4.2	群速度色散	57
3.4.3	色散补偿	58
3.4.4	锁模光纤激光器腔形比较	59
3.5	锁模光纤激光器新发展	60
3.5.1	高重复频率飞秒光纤激光器	60
3.5.2	多波长锁模光纤激光器	60
3.5.3	展宽脉冲锁模光纤激光器	61
	参考文献	61
<b>第 4 章</b>	<b>掺铒光纤激光器</b>	<b>64</b>
4.1	掺铒光纤激光器工作原理	64
4.1.1	掺铒光纤	64

4.1.2	泵浦特性及阈值特性	65
4.1.3	泵浦源的选择	66
4.2	非线性偏振旋转锁模实验研究	66
4.2.1	实验装置及测量系统	66
4.2.2	锁模脉冲的产生	68
4.2.3	双峰值波长锁模脉冲的获得	70
4.2.4	高单脉冲能量锁模脉冲的获得	70
4.3	偏振控制可调谐掺铒光纤激光器	73
4.3.1	锁模光纤激光器连续工作状态下的可调谐实验	73
4.3.2	偏振控制可调谐光纤激光器理论研究	75
4.3.3	偏振控制可调谐光纤激光器实验研究	77
4.4	被动锁模光纤激光器多脉冲演化及其机理探讨	79
4.4.1	多孤子脉冲之间的演化	80
4.4.2	多脉冲形成的物理机制	84
4.5	暗孤子	87
4.5.1	暗孤子的历史背景	87
4.5.2	孤子的介绍	87
4.5.3	时间暗孤子的发展现状	89
4.6	掺铒环形激光器产生暗孤子的理论研究	90
4.6.1	暗孤子的理论模型	90
4.6.2	暗孤子族的理论研究	96
4.7	掺铒环形光纤激光器中暗孤子族产生的实验研究	101
4.7.1	掺铒环形激光器的实验装置	101
4.7.2	掺铒环形激光器产生暗孤子族的实验	102
	参考文献	105
<b>第 5 章</b>	<b>掺铒光纤激光器</b>	<b>109</b>
5.1	掺铒光纤及其特点	109
5.2	掺铒光纤振荡器和放大器发展	111
5.2.1	掺铒光纤振荡器	111
5.2.2	掺铒光纤放大器	113
5.3	掺铒光纤激光器	114
5.3.1	泵浦波长选择	114
5.3.2	腔体结构选择	114
5.3.3	色散补偿元件选择	115
5.4	掺铒光纤激光器理论研究	116



5.4.1	掺镜光纤环形腔激光器附加脉冲锁模理论分析	116
5.4.2	双包层掺镜光纤形成超短脉冲数值模拟	120
5.5	腔外压缩超短脉冲掺镜光纤激光器实验研究	124
5.5.1	超短脉冲掺镜光纤振荡器实验研究	124
5.5.2	超短脉冲掺镜光纤放大器实验研究	130
5.6	飞秒掺镜光纤激光器实验研究	134
5.6.1	飞秒掺镜光纤激光器的稳定锁模输出	135
5.6.2	超短脉冲掺镜光纤激光器的波长调谐输出	137
5.7	超短脉冲掺镜光纤激光器稳定性分析	140
5.8	腔内压缩超短脉冲掺镜光纤激光器实验研究	141
5.8.1	实验原理和装置	142
5.8.2	锁模脉冲的输出	143
5.8.3	锁模脉冲底座产生的原因及消除的办法	145
5.8.4	压缩器不平行度对色散的影响	149
5.8.5	全光纤超短脉冲掺镜光纤激光器	152
5.9	掺镜双包层光纤绿色荧光分析	154
5.9.1	普通单模光纤与掺镜双包层光纤耦合实验装置及结果	155
5.9.2	掺镜双包层光纤中的绿光荧光理论分析	156
	参考文献	157
<b>第 6 章</b>	<b>混沌光纤激光器</b>	<b>162</b>
6.1	光学混沌的研究进展	162
6.2	掺铒光纤激光器混沌的研究进展	163
6.2.1	重掺杂掺铒光纤激光器	164
6.2.2	单模环形腔模型	164
6.2.3	非线性偏振旋转锁模进入脉冲混沌	165
6.2.4	带反馈的非线性光纤环形镜产生混沌	166
6.2.5	掺铒光纤环形激光器利用非线性克尔效应产生混沌模型	166
6.3	掺铒光纤环形激光器产生混沌理论模型	167
6.4	掺铒光纤环形激光器混沌带宽特性数值研究	174
6.4.1	掺铒光纤环形激光器利用非线性克尔效应产生混沌的过程	174
6.4.2	非线性系数对动态特性的影响	176
6.4.3	非线性相移对混沌带宽的影响	177
6.4.4	混沌带宽机理分析	182
6.5	掺铒光纤环形激光器产生混沌的实验验证	184
6.5.1	实验装置	184

---

6.5.2	混沌产生的实验结果及分析	185
6.5.3	多波长混沌产生的实验结果及分析	187
6.6	“8”字形掺铒光纤激光器混沌产生的理论研究	191
6.6.1	“8”字形掺铒光纤激光器产生混沌的理论模型	191
6.6.2	“8”字形掺铒光纤激光器混沌产生的数值模拟	193
6.6.3	外光注入的“8”字形腔的混沌输出的数值模拟	196
6.7	“8”字形掺铒光纤激光器产生混沌的实验研究	199
6.7.1	“8”字形掺铒光纤激光器混沌产生的实验装置	199
6.7.2	“8”字形掺铒光纤激光器混沌产生的实验结果及分析	200
6.7.3	附加光纤环的“8”字形掺铒光纤激光器混沌产生的实验研究	205
6.7.4	外光注入的“8”字形腔产生混沌的实验研究	208
6.8	被动锁模光纤激光器峰值周期性变化输出及其机理探讨	211
6.8.1	非线性偏振旋转锁模光纤激光器的理论模型	211
6.8.2	改变泵浦功率实现脉冲序列周期性变化	214
6.8.3	改变控制器实现脉冲序列周期性变化	217
6.8.4	脉冲幅值周期性变化的物理机制的探讨	218
	参考文献	221

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

激光是基于受激发射放大原理而产生的相干光辐射,它具有极高的亮度,极好的单色性、相干性以及方向性等优点。激光的出现对各个技术领域产生了巨大的影响,它的出现使古老的光学又焕发出强大的生命力。激光发展到现在已成为现代最活跃的前沿科学之一,并出现了许多和激光有关的新的交叉学科,如激光光谱学、激光生物学、激光医学、光信息学、非线性光学等。以激光本身可实现的高功率巨脉冲以及超短脉冲作为研究手段,极大地推动了物理学的发展,如受控核聚变、等离子体物理及超高速现象的研究等。

世界第一台激光器是美国休斯顿实验室的 Maiman 利用掺铬红宝石晶体为发射激光材料做成的固体激光器。随着第一台激光器的问世,一门崭新的技术迅速发展起来,各种各样的激光器相继问世,光纤的出现使固体激光器又有了一种新的形式。最早的光纤激光器研究可以追溯到 20 世纪 60 年代,报道了在玻璃基质中掺激活钕离子所制成的光纤激光器,20 世纪 70 年代以来,人们在光纤制备技术以及光纤激光器的泵浦与谐振腔结构探索方面取得一定的进展,但是由于当时相关理论和实验条件限制进展相对缓慢。20 世纪 80 年代,由于光纤工艺技术的进展,出现了低损耗的掺稀土元素光纤特别是掺铒单模光纤,半导体激光器泵浦的掺铒放大器和极低损耗石英光纤技术的突破,使光纤激光器具有强大的实用性,显示出十分诱人的应用前景。

随着光纤通信系统的广泛应用和发展,以光纤作基质的光纤激光器,在降低阈值、振荡波长范围、波长可调谐性能等方面已取得明显进步,光纤激光技术已成为众多研究热点的关键技术之一。在超快光电子学、非线性光学、光传感等各种领域的应用研究已日益受到重视。

## 1.2 光纤激光器特点

光纤激光器的实质是一个波长转换器,泵浦光通过增益介质时被吸收,形成粒子数反转,最后在掺杂光纤中产生受激辐射而输出激光,由泵浦激光波长转换为掺稀土离子的激射波长。光纤激光器是一种新颖的有源光纤器件,它具有以下主要

特点:

(1) 激光介质就是波导介质,能方便地延长增益介质从而使泵浦光被充分吸收,泵浦光和信号光之间可充分耦合,提高光纤激光器的能量转换效率,从而降低泵浦阈值功率。

(2) 由于光纤具有很高的表面积体积比,其散热效果好,能在不用强制冷却的情况下连续工作。

(3) 由于光纤具有良好的柔绕性,激光器可以设计得相当小巧灵活,且腔镜可直接镀在光纤端面或采用耦合器方式构成谐振腔,因此光纤激光器具有结构紧凑、体积小、便携、精密等特点。

(4) 掺杂稀土光纤的输出光谱特性受掺杂离子邻近结构变化影响很大,因此可以通过改变基质的组分来调节输出波长,而其中某些波长对于光通信是非常重要的,例如光谱段上  $1.33\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  两个通信窗口,其中  $1.55\mu\text{m}$  波长的光在石英光纤中的传输损耗最低,而  $1.33\mu\text{m}$  波长的光则对应着石英光纤的零色散点。目前,利用掺杂稀土石英光纤<sup>[1]</sup>和氟化物光纤<sup>[2~4]</sup>,并结合包层泵浦技术实现了  $2\sim 3\mu\text{m}$  波段高功率激光输出,而这个波段输出在更低损耗的中红外通信中有着潜在的应用价值。

(5) 光纤圆柱形结构还具有两个优点:第一,由于光纤激光器本质上是一种光纤结构,因此它可以以较高的耦合效率与目前光纤传输系统相连接;第二,由于光纤结构小巧,便于操作,在医学上的某些应用中是非常理想的。

光纤激光器独特的波导结构,使其腔体的形式可以大为简化,可通过波分复用器实现半导体端面泵浦,进而实现全固化。但在高功率下,光纤波导的结构优点也成为其致命的缺点,输出功率受到一定的限制。随着双包层光纤、光子晶体光纤以及新泵浦方式的出现,光纤激光器实现大功率化、在  $1\mu\text{m}$  及可见光范围实现全光纤结构的超短脉冲光纤激光器成为可能,它们的出现带来了光纤技术一次新的革命。

### 1.3 包层泵浦技术

单包层光纤激光器在光纤通信、传感、医学、测量等各个领域得到了越来越广泛的应用,并得到了长足的发展,但传统的泵浦技术很难将高功率的多模泵浦光耦合到单模纤芯中,因此很难做出高功率的光纤激光器和放大器。包层泵浦技术的出现,为提高光纤激光器的输出功率提供了有效的途径,打破了人们认为光纤激光器是低功率器件的印象。目前在光纤激光器和光纤放大器中采用以双包层光纤为基础的包层泵浦技术都已获得成功<sup>[5~7]</sup>。

### 1.3.1 双包层光纤结构

现在的包层泵浦技术是以双包层光纤为基础。双包层掺杂光纤结构如图 1.1 所示。双包层光纤与传统意义的光纤的区别在于，通过光纤结构的设计和选择合适的材料，在掺稀土离子的单模纤芯外面构成多模泵浦光通道，与常规的光纤相比多了一个内包层。双包层光纤由四个层次组成：①光纤芯；②内包层；③外包层；④保护层。纤芯由掺稀土元素的石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 或氟化物玻璃 (ZBLAN) 构成，是激光振荡的通道。内包层由横向尺寸和数值孔径比纤芯大得多、折射率比纤芯小的纯  $\text{SiO}_2$  或 ZBLAN 构成，几何形状可以是圆形，也可以是矩形、方形或星形等，它是泵浦光的通道。外包层由折射率比内包层小的软塑材料构成。最外层则由硬塑材料包围，构成光纤的保护层。双包层光纤内包层的作用是：①包绕纤芯，将激光辐射限制在光纤芯内；②多模导管作为泵浦光的传输通道，把多模泵浦光转换为单模激光输出。泵浦光的能量不能直接耦合到光纤芯内，而是将泵浦光耦合到内包层，光在内包层内来回反射，多次穿过单模纤芯并被其吸收。这种结构的光纤不要求泵浦光是单模激光，而且可对光纤全长度泵浦，因此可选用高功率多模激光二极管阵列做泵浦源。高功率泵浦光间接地耦合到纤芯内，大大地提高耦合效率，从而提高激光输出功率。采用大尺寸、大数值孔径的双包层光纤，便于半导体激光器输出的泵浦光与光纤之间的耦合，且比普通单模光纤 (SMF) 有更高的耦合效率。由于纤芯截面积与内包层截面积之比很小，进入内包层耦合的泵浦光线穿越纤芯的效率低。为了提高纤芯吸收泵浦光的效率，必须优化内包层的截面形状，使泵浦光尽可能多地穿越纤芯，以激励纤芯中的稀土离子，提高泵浦效率。因为光纤的侧面积与体积之比非常大，所以它的工作物质的热负荷相当小，这是任何其他激光器所无法比拟的。

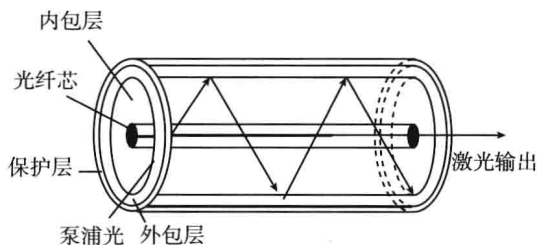


图 1.1 双包层掺杂光纤的结构

### 1.3.2 双包层光纤特性

包层泵浦光纤激光器使用的双包层光纤的内包层形状多种多样。圆形内包层结构的优点：一是不需要对预制棒作光学机械加工，从而使工艺更加简单；二是当泵浦源为带尾纤的半导体激光器时，圆形石英包层之间的尺寸匹配易于耦合连接。

缺点是圆对称特性会使内包层中大量的泵浦光成为螺旋光，在传输的过程中不经过掺杂纤芯，从而大大降低了纤芯对泵浦光的利用效率。为了克服这个缺陷，已开发出内包层截面如图 1.2 所示的双包层光纤。另外随着大功率双包层光纤激光器的发展，连续激光输出已达几百甚至万瓦量级，此时单个半导体激光器作为泵浦显然功率太小。在各种改进的泵浦方案中，有的采用双包层光纤直接与半导体激光器的发光面或阵列耦合，有的与集成束状的尾纤耦合，因此也需要研制具有特殊形状内包层的双包层光纤。为了提高对泵浦光的利用效率。并考虑到与具体的泵浦形式相匹配，人们开发出了多种内包层截面形状的双包层，用在各种包层泵浦光纤激光器的研制工作中，取得了很好的结果。图 1.2 给出了几种双包层光纤截面形状图<sup>[6~10]</sup>。

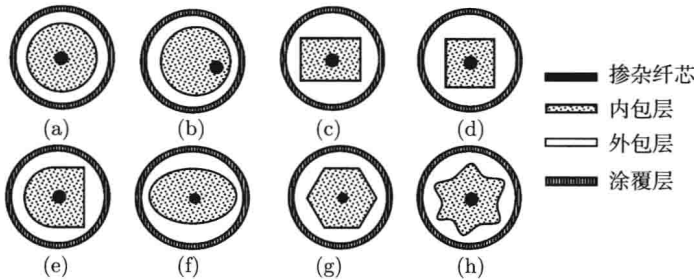


图 1.2 不同内包层形状的光纤横截面

(a) 圆形 (圆心); (b) 圆形 (偏芯); (c) 矩形; (d) 正方形; (e) D 形; (f) 椭圆形; (g) 六边形; (h) 梅花形

目前有内包层形状不同的双包层光纤，如矩形、方形和多边形等，泵浦光在这些不同形状的内包层传输时，纤芯中的稀土元素对泵浦光吸收率有很大不同。矩形双包层光纤具有较大的吸收效率，理论上可达 100%<sup>[11]</sup>。对于圆形双包层光纤，光纤曲率对吸收的影响非常大，而对矩形双包层光纤，光纤曲率对吸收的影响非常小。此外，包层尺寸对泵浦光耦合效率也有影响。

### 1.3.3 包层泵浦技术耦合方式

泵浦光耦合到包层的方式很多，目前采用三种耦合方式：①端面泵浦；②V 形槽侧面泵浦；③光纤束光纤耦合。

端面泵浦是工艺最简单 (图 1.3)，也是最常用的一种泵浦技术<sup>[12~14]</sup>，可分为单端面和双端面泵浦两种，其最大的缺点是光纤端面用于耦合泵浦光的光学系统且必须采用体积较大的二相色镜，增加了成本和体积，较难实现紧凑的结构。由于泵浦光只能通过双包层光纤的两个端面进入双包层光纤中，且光纤端面的面积有限，所以难以实现更高功率的光纤激光器。

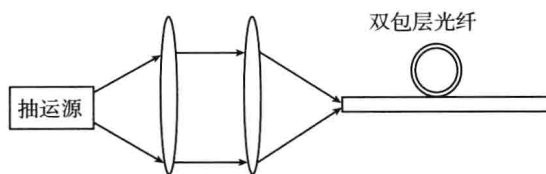


图 1.3 端面泵浦示意图

V 形槽侧面泵浦是耦合效率最高的一种泵浦技术<sup>[15~17]</sup>，如图 1.4 所示，这种方法是利用机械的方法在光纤侧面形成  $90^\circ$  的 V 形槽，切槽只经过外包层和内包层而不触及纤芯。这种方法具有泵浦效率高、结构紧凑、灵活等特点，且可使双包层光纤两端空闲出来，用来构成环形腔、放大器，也可直接构成放大器而不需要二色镜，简化了激光器和放大器的结构。但由于 V 形槽要求很高的工艺，所以通常不易实现。法国 Keopsys 公司采用这种耦合技术已实现连续和脉冲的掺镱光纤激光器和放大器产品<sup>[18]</sup>。

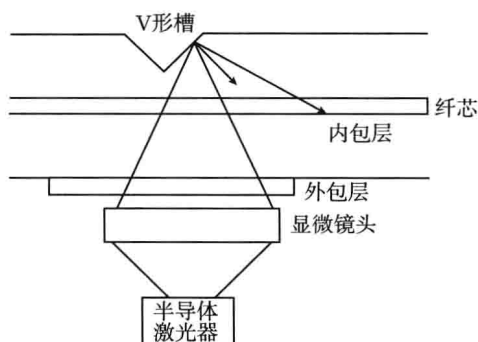


图 1.4 V 形槽光纤耦合

光纤束光纤耦合应用于高功率双包层光纤激光器，如图 1.5 所示，这种方式是将若干多模光纤捆绑在一起熔融拉锥后与双包层光纤拼接起来。这种方式具有耦合效率高、结构灵活等特点，但要求光纤束的尺寸和形状必须与双包层光纤严格匹配。IPG 公司生产的光纤激光器采用的就是这种特殊的耦合方式，该公司采用特殊工艺制成的树叉形包层光纤已生产出上千瓦级的光纤激光器产品<sup>[19]</sup>。

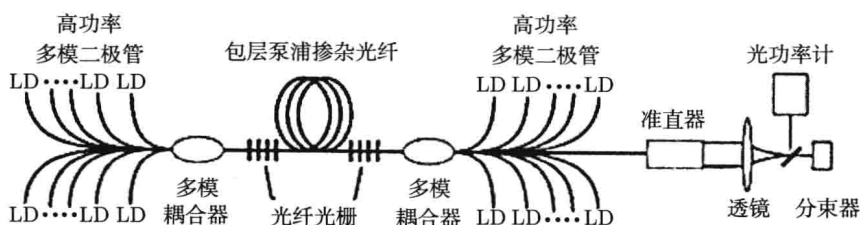


图 1.5 IPG 光纤激光器结构

### 1.3.4 包层泵浦技术发展现状

包层泵浦技术最早是由美国 Polaroid 公司在 20 世纪 80 年代末提出来的。在包层泵浦技术发展的初期,人们的注意力主要集中在掺  $\text{Nd}^{3+}$  双包层光纤激光器研究,1993 年, H. Po 等报道了他们研制的高功率掺  $\text{Nd}^{3+}$  双包层光纤激光器,在  $1.064\mu\text{m}$  波长获得了近 5W 的单模连续激光输出,斜率效率达到 51%<sup>[20]</sup>。1995 年 H. Zeller 等报道了输出波长在  $1.064\mu\text{m}$ 、功率为 9.2W 的包层泵浦掺  $\text{Nd}^{3+}$  光纤激光器<sup>[21]</sup>。Z. J. Chen 等报道了包层泵浦掺  $\text{Nd}^{3+}$  调 Q 光纤激光器,获得了峰值功率 3.7kW、谱宽 2nm 的脉冲激光输出<sup>[22]</sup>。

掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤具有简单的能级结构、宽的吸收谱和大的发射截面,使得人们的注意力逐渐转向掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器研究。目前已成为输出功率最大的光纤激光器。1994 年,由 H. M. Pask 等首先在掺  $\text{Yb}^{3+}$  石英光纤中实现了包层泵浦,实验得到的波长为  $1.04\mu\text{m}$ 、最大激光输出为 0.5W,斜率效率达到了 80%<sup>[23]</sup>。在 1997 年国际激光电光会议 (CLEO) 上,美国 Polaroid 公司的 M. Muendel 等报道了一种掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器。他们用四根光纤耦合的  $916\text{nm}$  波长的激光二极管阵列,以 54.4W 的功率泵浦掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤,在  $1.1\mu\text{m}$  波长处获得了 35.5W 连续输出<sup>[24]</sup>。1999 年, V. Dominic 等报道了超高功率掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器研究结果,他们用四个 45W 半导体激光二极管阵列组成总功率为 180W 的泵浦源,在波长  $1.12\mu\text{m}$  处获得了 110W 激光输出<sup>[25]</sup>。

目前功率最大的光纤激光器已转化成产品的是美国 IPG 公司提供的掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器。IPG 于 2000 年推出首台产品化的百瓦级光纤激光器,并于 2002 年 5 月向市场推出了 2000W 工业用高功率多模激光器,并宣称其具有生产万瓦级高功率激光器的能力。到目前为止,万瓦级激光器正逐步走向产品化。

我国也开展了以双包层光纤为基础的和脉冲光纤激光器研究。清华大学<sup>[26]</sup>、南开大学<sup>[27]</sup>、中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[28,29]</sup>、中国科学院西安光学精密机械研究所<sup>[30]</sup>等单位对各种双包层光纤激光器进行了一系列研究,取得了可喜的进展。清华大学利用双端泵浦 D 形掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤获得了 137.7W 准直激光功率输出。上海光机所在双包层光纤激光器实验研究中取得了较大的进展,在实验上成功获得了连续激光输出功率为 112W 的掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器,激光波长  $1.1\mu\text{m}$  最高光-光转换效率为 72%。西安光机所的瞬态光学与光子技术国家重点实验室早在 1998 年就联合原中华人民共和国信息产业部第 46 所在国家高技术青年科学基金的资助下开展了双包层光纤的试制<sup>[30]</sup>,在顺利研制成功波长为  $1.53\mu\text{m}$  的掺  $\text{Er}^{3+}$  飞秒光纤激光器后<sup>[31]</sup>,目前已顺利研制成功波长  $1.05\mu\text{m}$ 、脉冲宽度 307fs( $1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$ )、重复频率 17.6MHz 的超短脉冲掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器<sup>[32]</sup>,以双包层掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤为增益介质的啁啾脉冲的放大理论和实验研究,经



过脉冲压缩后,可获得单脉冲能量为微焦量级的高功率飞秒脉冲。

在高功率光纤激光领域,国内发展相对较慢,一个主要的原因是国内生产光纤激光器关键元件高功率半导体激光器 and 高质量双包层光纤等关键元件的研制能力较弱。

## 1.4 光子晶体光纤

光子晶体光纤 (PCF) 又称微结构 (micro structure) 光纤或多孔光纤 (holey fiber), 是一种由在二维方向上紧密排列 (通常为周期性六边形) 的、波长量级的、沿光纤长度方向具有延伸的空气孔构成包层的新颖光纤。它产生于 1996 年, 由英国巴斯大学的 J. C. Knight 等学者首先研制成功<sup>[33]</sup>, 它标志着一种新型光纤的诞生, 揭开了光纤发展历史新的一页。光子晶体光纤以其许多不同于传统光纤的奇特传输特性引起了世界各国研究人员的浓厚兴趣。20 世纪 90 年代至今, 光子晶体光纤的基础研究和应用开发一直是国际光电子行业的热门课题<sup>[34]</sup>, 目前已有大量的光子晶体光纤开发成功并转向实际应用<sup>[35~38]</sup>。光子晶体光纤的出现, 使光电子技术进入一个新的发展阶段。光子晶体光纤的诱人特性使之在超大容量光导纤维以及短波长光孤子产生和传输等方面有着巨大的潜在应用价值。

### 1.4.1 光子晶体光纤工作原理、结构和工艺

人们对光子晶体在光纤领域的研究和应用已经有了多年的经验。光子晶体光纤按其导波方式可以分为两种, 一种是依赖光子带隙效应 (photonic bandgap effect, PBG)。光子晶体光纤的这种传输机理与传统光纤完全不同, 传统光纤的纤芯折射率高于包层, 光束通过在芯与包层界面的全内反射传播。而 PBG 光子晶体光纤的包层对一定波长的光形成带隙, 光波只能在气芯形成的缺陷中存在和传播, 把光束束缚在纤芯区域。PBG 光子晶体光纤对空气孔的排列及尺寸要求严格。另一种是改进的全内反射 (modified total internal reflection)。这种导波机制的光子晶体光纤纤芯折射率高于包层, 传输的机理仍然为全内反射。由于包层含有气线, 与传统光纤的“实心” SiO<sub>2</sub> 包层不同, 因而叫做改进的全内反射, 包层折射率大小可依据需要进行设计, 这种导光机制的光子晶体光纤实现起来相对简单, 目前大多数的研究和应用都是针对这种类型的。

光子晶体光纤的制作方法是先做预制棒, 在一定尺寸的石英套管内排入毛细管作为包层, 中心用 SiO<sub>2</sub> 棒或抽去几根毛细管作为纤芯。用这些玻璃管按照预先设计的结构束在一起而形成的预制件放到拉制塔中拉制出来。正在拉丝过程中的预制棒如图 1.6 所示。拉丝后光纤的截面结构与预制件的截面结构形状基本相似。不同的数量和排列方式决定了不同的周期性光子晶体结构包层。用来制作光纤放