

高功率光纤激光器 及其应用

High-power Fiber Laser and Its Applications



楼祺洪 编著

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学

校友文库

高功率光纤激光器及其应用

High-power Fiber Laser and Its Applications

楼祺洪 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

光纤激光器是以掺杂光纤作激光介质的一种新型固体激光器,具有散热特性和光束质量高等优点。本书从介绍双包层光纤入手,介绍了光纤激光器的泵浦源、连续波光纤激光器,脉冲光纤激光器以及倍频光纤激光器的基本概念、关键技术以及发展概况,并详细阐述了各种光纤激光器的原理、工作性能及有关工艺技术。

本书可供从事激光研究和应用的科技工作者和从事激光应用的工程技术人员阅读,亦可供物理、光学工程等专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高功率光纤激光器及其应用/楼祺洪编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2010.3

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书:中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02643-0

I. 高… II. 楼… III. 光纤器件—激光器 IV. TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 206412 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经 销 全国新华书店

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 12.25

字 数 207 千

版 次 2010 年 3 月第 1 版

印 次 2010 年 3 月第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 39.00 元

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。

鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

前 言

自 1960 年 7 月美国科学家 Theodore H. Maiman(梅曼)成功地演示了世界上第一台激光器——红宝石固态激光器以来,各种各样的激光器和激光技术如雨后春笋般地发展起来。由于激光(受激辐射光)具有完全不同于普通光(自发辐射光)的性质:单色性、方向性和相干性,它很快被广泛地应用于各个领域,并深刻地影响了当代科学、技术、经济和社会的发展及变革。

高功率激光器在工业和军事国防等领域均有大量的需求,且这些领域都对高功率激光器的效率、光束质量、体积、重量等提出了较高要求。随着大功率半导体激光技术的发展,半导体激光泵浦固体激光器(DPSSL)的泵浦工作方式逐步趋向成熟和明确。虽然 DPSSL 相对于 CO_2 和灯泵 Nd:YAG 具有很大的优越性和竞争力,但由于在激光产生时总有一部分能量以无辐射跃迁的方式转换为热,DPSSL 这部分热能量如何从块状激光介质中散发、排除成为获得高光束质量、高功率输出的关键。将激光介质做成细长的光纤形状,有效增大了表面积,有利于散热问题的解决,这就是光纤激光器。

所谓光纤激光器,就是采用光纤作为激光介质的激光器。按照激励机制可分为:① 稀土掺杂光纤激光器,通过在光纤基质材料中掺杂不同的稀土离子(Yb, Er, Nd, Tm 等),获得所需波段的激光输出;② 利用光纤的非线性效应制作的光纤激光器,如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等;③ 单晶光纤激光器,其中有红宝石单晶光纤激光器、Nd:YAG 单晶光纤激光器;④ 染料光纤激光器,通过在塑料纤芯或包层中充入染料,实现激光输出,目前还未得到有效

应用。在这四类光纤激光器中,以掺稀土元素离子的光纤激光器和放大器最为重要,且发展最快,并已在光纤通信、光纤传感、激光材料处理等领域获得了广泛的应用,因此,人们通常说的光纤激光器,多是指这类激光器。

光在光纤中的全反射传输现象早在很早已被发现,早期的光纤由于损耗较大(约 1 000 dB/km),除了医疗器件中成像元件外,很难在长距离下使用,20 世纪 70 年代,光纤的损耗下降到 20 dB/km,目前制作的通讯光纤的损耗在 1.55 μm 波长已下降到 0.1 dB/km。这一进展带动了光纤通信革命性的变化。瑞典皇家科学院于 2009 年 10 月 6 日宣布,将 2009 年诺贝尔物理学奖授予高锟以及威拉德博伊尔和乔治史密斯。高锟在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得了突破性的进展,这项成果最终促使光通信系统问世,并为当今互联网网的发展铺平了道路。

其实,1964 年世界上的第一代玻璃激光器就是光纤激光器。但由于高功率室温半导体激光器和特种光纤拉制技术的限制,直到 20 世纪 80 年代中后期,光纤激光器才真正发展起来。1987 年英国南安普顿大学(Univ. Southampton)及美国贝尔实验室(Bell Labs)实验证明了掺铒光纤放大器(EDFA)的可行性。它采用 980 nm 的半导体激光光泵掺铒单模光纤对光信号实现放大,现在这种 EDFA 已经成为光纤通信系统中不可缺少的重要器件。

为了提高光纤激光的功率和泵浦转换效率,1988 年提出光泵由包层进入的设想。初期的设计是圆形的内包层,但由于圆形内包层完美的对称性,泵浦吸收效率不高,直到 20 世纪 90 年代初矩形内包层的出现,使激光转换效率提高到 50%,输出功率达到 5 W。1999 年 V. Dominic 等用 4 个 45 W 的半导体激光器从两端泵浦,获得了 110 W 的单模连续激光输出。进入本世纪以来,随着高功率半导体激光器(包括其整形技术)和双包层光纤制作工艺的发展,单根双包层光纤激光器或放大器的输出功率逐步提高。目前采用大模场直接的双包层掺铒光纤,以振荡器方式工作,单纤连续输出功率已突破 2 kW;采用多光纤级联放大的方式,已经实现了 10 kW 的单模连续激光输出。

经过近几年的快速发展,高功率光纤激光器已经有相当辉煌的

历程,并且仍是当前激光技术领域中最活跃的研究领域,并呈现以下四个发展趋势:①单根光纤激光的输出功率从千瓦级向数千瓦甚至万瓦发展,输出光谱、偏振、模式特性不断改善;②从高功率连续光纤激光向高功率脉冲光纤激光器发展,超短脉冲光纤激光可实现更高的激光亮度,在某些领域极具应用价值;③从常规的光纤激光组束技术向相干组束或光谱组束技术发展。将多个高功率光纤激光器的输出按常规方式组束,虽然可以提升总的输出功率,但光束质量变差,亮度提高有限。相干组束或光谱技术则可以在提升总功率的同时,保持光纤激光器良好的光束质量,这将是高功率光纤激光器发展的一个很有前途的方向;④光纤激光的应用从低功率打标、雕刻(百瓦级)向高功率重金属切割、焊接发展(数千瓦)。面对高功率光纤激光器如此迅速的发展,面对其不断扩大的应用领域,我们有理由相信“高功率光纤激光器及其应用”是一个极具发展潜力的课题。

我国在高功率光纤激光器领域近年来也进展迅速,在关键技术上取得了重大突破,目前采用国产的高性能双包层光纤,单根光纤已经实现了1758W的连续激光输出;采用种子源放大的方式,已经实现了百瓦平均功率的脉冲光纤激光器。虽然在关键技术和关键元器件上取得了突破,但在高功率光纤激光器及其应用系统的产业化方面,我们国内还有待努力。希望本专著能对我们国内高功率光纤激光器的研究及其推广应用起到一定的推动作用。

本书系统地介绍了这一领域的最新进展,叙述了光纤激光器的基本原理、工作性能以及有关工艺技术,它对我们了解和掌握光纤激光器是很有帮助的。书中大量采用了上海光机所近年来的研究成果,在此向周军博士、孔令峰博士、朱洪涛博士、薛冬博士、何兵博士、漆云凤博士、杜松涛博士、赵宏明博士、张芳沛博士、李立波博士、吴国华博士、表志军博士、王炜博士、刘伏博士、刘驰博士等表示感谢,感谢中国科学技术大学出版社及时地组织出版这样的专著,愿本书受到科研工作者、研究生以及大专院校有关专业师生的欢迎。

作者

2009年9月

目次

总序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 双包层光纤	(1)
1.1 光在光纤中的传输	(1)
1.1.1 光纤中光的反射	(2)
1.1.2 光纤的数值孔径	(2)
1.1.3 光在光纤中的传播	(3)
1.2 双包层光纤的结构和特性	(4)
1.2.1 内包层形状对吸收系数的影响	(6)
1.2.2 光线在新型内包层形状双包层光纤中传播的分析	(8)
1.2.3 双包层光纤的制备	(11)
1.3 光子晶体光纤的结构和特性	(13)
第 2 章 光纤激光器的发展史和分类	(18)
2.1 光纤激光器的发展历史	(18)
2.1.1 单根光纤输出功率从百瓦级向千瓦级发展	(20)
2.1.2 从连续光纤激光向高功率脉冲光纤激光发展	(22)
2.1.3 从常规的光纤激光组束技术向相干组束技术发展	(23)
2.2 光纤激光器的分类	(25)
2.2.1 以工作波长分类	(25)
2.2.2 以工作模式分类	(27)
2.2.3 特殊光纤激光器	(28)

第 3 章 稀土离子掺杂的双包层光纤	(30)
3.1 双包层光纤的拉制	(30)
3.1.1 预制棒制造(preform fabrication)	(30)
3.1.2 光纤拉丝(fiber drawing)	(31)
3.1.3 光纤涂覆	(31)
3.2 光纤中的导波模	(32)
3.3 光纤的损耗	(37)
3.3.1 光纤材料的吸收和损耗	(37)
3.3.2 光纤的弯曲损耗	(38)
3.3.3 光纤的连接损耗	(39)
3.4 光纤的偏振特性和保偏光纤	(41)
第 4 章 稀土掺杂光子晶体光纤	(44)
4.1 大模场面积光子晶体光纤	(44)
4.2 非线性光子晶体光纤	(47)
4.3 光子晶体光纤中超连续谱的产生	(50)
4.4 掺 Yb^{3+} 双包层光子晶体光纤激光器	(52)
第 5 章 光纤激光器的泵浦技术	(54)
5.1 半导体激光器	(54)
5.1.1 半导体激光器的发展历史	(54)
5.1.2 半导体激光器的输出特性	(55)
5.1.3 半导体激光器的光束整形	(57)
5.2 双包层光纤的泵浦方法研究	(61)
5.2.1 端面泵浦	(62)
5.2.2 侧面泵浦	(64)
5.3 高功率半导体激光器的寿命特性	(67)
5.3.1 高功率半导体激光器的失效机理	(67)
5.3.2 寿命评价研究	(69)
第 6 章 连续波高功率光纤激光器	(73)
6.1 连续波高功率光纤激光器的基本结构	(73)
6.2 线形腔结构物理模型及速率方程	(75)
6.3 光纤激光器的模式控制技术	(80)

6.3.1 特殊腔结构法	(80)
6.3.2 种子光注入法	(83)
6.3.3 光纤缠绕弯曲法	(83)
6.3.4 光纤拉锥法	(87)
6.4 超大模场双包层光纤的设计	(90)
6.4.1 螺旋芯光纤	(90)
6.4.2 分块包层光纤	(91)
6.4.3 纤芯掺杂设计光纤	(92)
6.4.4 增益导引光纤	(93)
6.5 高功率光纤激光器的热效应	(95)
第7章 脉冲双包层光纤激光器	(100)
7.1 调Q光纤激光器	(101)
7.1.1 被动调Q方式	(101)
7.1.2 主动调Q方式	(103)
7.1.3 各种调Q方式比较	(104)
7.1.4 声光调Q的光纤激光器的窄脉冲输出	(105)
7.2 脉冲光纤放大器	(107)
7.2.1 脉冲放大的关键技术研究	(108)
7.2.2 低功率双包层光纤放大器	(117)
7.2.3 脉冲双包层光纤放大器	(119)
7.3 锁模光纤激光器	(121)
7.4 双包层光纤放大器瞬态增益与频率响应	(122)
7.4.1 二能级瞬态增益理论模型	(123)
7.4.2 YDFA瞬态增益的饱和和恢复	(124)
7.4.3 数值计算与实验结果的对比	(125)
第8章 光纤激光的倍频特性	(130)
8.1 激光倍频的基本概念	(130)
8.2 周期极性铌酸锂(PPLN)	(132)
8.3 影响倍频效率的因素	(133)
8.3.1 倍频特性与激光参量的关系	(133)
8.3.2 倍频特性与谐波发生器的参量关系	(134)

8.4 光纤激光的光谱特性对倍频的影响	(135)
8.4.1 实验装置	(135)
8.4.2 实验结果	(136)
8.4.3 谱线响应宽度分析	(139)
8.4.4 温度响应带宽的分析	(141)
8.5 高功率光纤激光倍频特性	(143)
8.5.1 窄线宽振荡——放大系统	(143)
8.5.2 倍频实验结果	(144)
第9章 光纤激光器组束技术	(147)
9.1 主振荡放大(MOPA)技术	(147)
9.2 多芯光纤自组束	(149)
9.3 全光纤组束	(150)
9.4 光谱组束(SBC)技术	(150)
9.5 外腔相干组束	(152)
9.5.1 光栅外腔组束	(152)
9.5.2 自傅里叶变换(S-F)腔组束	(153)
9.5.3 自成像腔相干组束	(153)
9.6 包层光纤激光器及其相干组束的实验研究	(154)
9.6.1 自成像相位锁定	(155)
9.6.2 二维四束光纤激光相干合成实验研究	(156)
9.6.3 占空比对相干组束影响的实验研究	(158)
9.6.4 光纤激光相干阵列远场光强分布的影响分析	(162)
第10章 高功率光纤激光器的典型应用	(173)
10.1 激光打标	(173)
10.2 激光雕刻	(174)
10.3 激光焊接	(175)
10.4 激光切割	(176)
10.5 光纤激光在光伏产业的应用	(177)
10.6 光纤激光在医疗中的应用	(178)
参考文献	(179)

第 1 章 双包层光纤

1.1 光在光纤中的传输

光在光纤中的全反射传输现象早在很早已被发现,早期的光纤由于损耗较大(约 1 000 dB/km),除了医疗器件中成像元件外,很难在长距离下使用,20 世纪 70 年代,光纤的损耗下降到 20 dB/km,目前制作的通讯光纤的损耗在 1.55 μm 波长已下降到 0.1 dB/km 以下。这一进展带动了光纤通信革命性的变化。

随着低损耗光纤的出现,人们开始希望在光纤材料中直接掺杂稀土离子,并获得激光输出。20 世纪 80 年代,采用单模二极管作泵浦源,在单模光纤中获得数十毫瓦的激光输出,其中工作波长为 1 550 nm 的掺铒光纤放大器成为光通信中十分有用的信号放大元件。由于单模光纤纤芯直径十分细小,一般在 10 μm 以下,要将更大的功率注入到光纤芯中技术上遇到了困难,为此,1988 年出现了双包层光纤,它可以保持细小的纤芯尺度,而使泵浦光进入数百微米量级的内包层中,这一技术上的突破使光纤激光的输出功率在十余年内迅速上升,目前连续输出的单根光纤激光输出功率已达千瓦以上。为了对光纤激光有一个深入的了解,首先介绍光在光纤中的传输特性。

1.1.1 光纤中光的反射

一般而言,对于单包层光纤,它由纤芯和包围在外面的折射率较低的包层组成。二者界面上折射率发生阶跃变化。令纤芯的折射率为 n_1 ,包层的折射率为 n_2 ,当入射角为 θ_i 的光入射到界面上时,出射角为 θ_r ,如图 1.1 所示,折射光线满足

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (1.1)$$

定义临界反射角 ϕ_c 。

$$\sin \phi_c = n_2 / n_1 \quad (1.2)$$

此时,在界面上发生全反射。当入射角 $\theta_i > \phi_c$ 时,在界面上均会出现全反射。

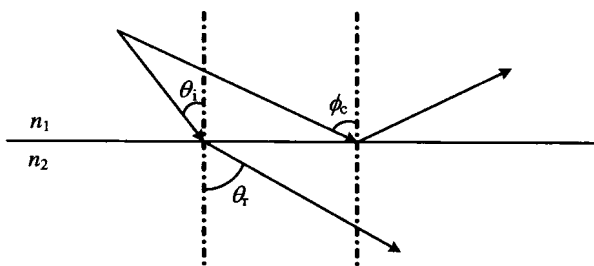


图 1.1 全反射原理图

因此,在一根折射率为 n_1 的石英纤维芯外包一层折射率为 n_2 ($n_2 < n_1$) 的包层,光线经过多次全反射可以沿着它从一端传到另一端。当光纤细到一定程度时,传光的过程不能完全用几何光学全反射概念来描述,可以把光纤看成是传输电磁波的微型波导。

1.1.2 光纤的数值孔径

图 1.2 为一段圆柱形的光纤,纤芯折射率为 n_1 ,包层折射率为 n_2 ,光纤端面是空气,其折射率为 n_0 ,要使得在 θ_0 角度下入射光纤的光束在光纤内发生全反射传输,入射光纤的最大孔径角 θ_0 要满足

$$NA = n_0 \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3)$$

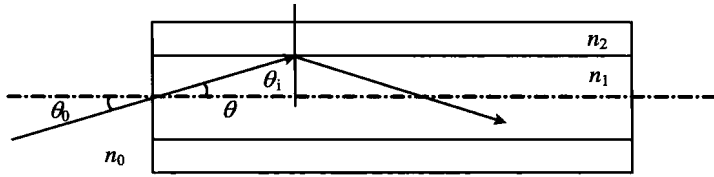


图 1.2 光纤的数值孔径

这里我们定义 NA 为光纤的数值孔径。当 $n_1 \approx n_2$ 时，

$$NA = n_1 \sqrt{\frac{2(n_1 - n_2)}{n_1}} \quad (1.4)$$

数值孔径和光纤直径乘积表征光纤的集光能力。

实际上的光纤常弯成圈，如图 1.3 所示，当弯曲半径为 r 时，和光纤轴平行的光束与光纤包层表面相交夹角为 $\Delta\theta$ 。

当 $\Delta\theta$ 很小时， $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ ，它引起数值孔径的变化 ΔNA 为

$$\Delta NA = \Delta\theta \approx \left(\frac{2d}{r}\right)^{1/2} \quad (1.5)$$

例如，当光纤纤芯直径为 $30 \mu\text{m}$ ，光纤弯曲半径为 10 cm 时，引起 ΔNA 的变化为 0.024 。

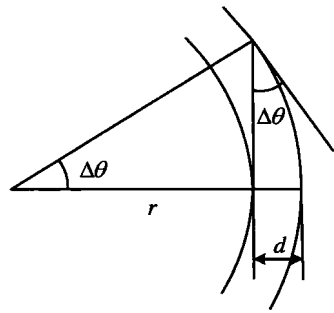


图 1.3 光纤弯曲时光束传输特性

1.1.3 光在光纤中的传播

光作为一种电磁波在光纤中的传播可以用麦克斯韦方程来描述。对于没有空间电荷的非导体介质，光纤中光波的方程可表达为

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

式中 c 为真空中的光速， $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$ 。而 μ_0 和 ϵ_0 分别为真空中的磁导率和介电常数。 \mathbf{E} 为电磁波的电场强度，而 \mathbf{P} 则为电磁波的极化强度，上述波动方程的解要求满足一定的边界条件。它的空间场分布要求光在光纤中的传播满足所谓的光纤模。光纤模可以分为导波模、泄漏模和辐射模。

光纤中的导波模可以用归一化频率 ν 参量来描述。

$$\nu = k_0 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} < u_m \quad (1.7)$$

式中 $k_0 = \pi d / \lambda$, λ 为波长, d 为纤芯直径, u_m 为一阶贝塞尔函数 $J_m(u)$ 的 m 阶根。当 $m=1$ 时, 第一阶根 $u_m = 2.405$ 。因此, 当某一根光纤满足

$$0 < \nu < 2.405$$

该光纤中只能传输基模 (HE₁₁)。上述一般被定义为单模条件。当 $\nu > 2.405$ 时, 光纤中传播的模不止一个, 即多模光纤。

一般而言, 光纤中光场可表达为

$$E_z = J_m(k_g^2 \rho) \exp(im\phi) \exp(i\beta z) \quad (1.8)$$

式中传播常数 β 和 k_g 之间满足下列关系

$$k_g^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (1.9)$$

显然, 光纤中光场的分布与自由空间有很大的不同。

光纤中基模的场分布一般可用高斯分布来近似:

$$E_z = A \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega^2}\right) \exp(i\beta z) \quad (1.10)$$

这里要注意的是只有基模才能用高斯分布作近似描述, 大部分情况下, 高阶模不能用高阶高斯光束来描述。

1.2 双包层光纤的结构和特性

在光纤通讯中广泛应用的单模光纤只有一个纤芯和一个包层, 要满足 $\nu < 2.405$, 纤芯的直径一般为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 。这种单模光纤能够在几百公里距离内传输 10^9 比特的信号。但是, 当这类光纤应用于光纤激光器时, 遇到了功率不能提高的困难。其原因是对于 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 直径的纤芯, 很难将高功率的泵浦功率输入进去。无论是闪光灯泵浦源, 还是半导体激光泵浦源, 由于亮度的限制, 很难会聚到 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 尺度。

为此, 科学家们提出了双包层概念。双包层光纤和常规的单模通讯光纤相比, 多了一个可以传光的内包层, 它由纤芯、内包层、外包层和保护层四部分组成。纤芯由掺稀土元素的 SiO_2 构成, 它作为激光介质成为激光振荡

的通道；内包层由横向尺寸和数值孔径都比纤芯大得多而折射率比纤芯小的 SiO_2 构成，由于它的尺寸在几百微米量级是一个多模光纤，它可以承受比较高的泵浦功率；外包层由折射率比内包层小的材料构成；保护层则由有机材料组成，由于有机材料有良好的弯曲特性，它可以保护光纤防止折断。如图 1.4 所示，泵浦光进入尺寸较大的内包层，在内包层内多次反射并多次穿越纤芯被掺杂离子吸收，由于内包层的折射率小于纤芯，可以保证激光振荡在纤芯中实现。一般而言，如果纤芯直径为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ ， $\text{NA}\sim 0.1$ ，内包层尺寸为几百微米 ($200\sim 650\ \mu\text{m}$)， $\text{NA}\sim 0.4$ 。为此与单包层光纤相比，双包层光纤可承受的泵浦功率可提高两个数量级左右。

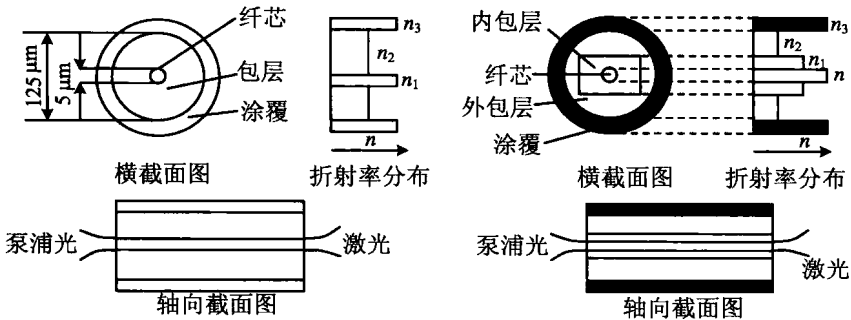


图 1.4 矩形双包层光纤结构示意图

初期的内包层结构是圆柱对称的，部分泵浦光在内包层中会多次内反射而不向纤芯传播，这种光束俗称“螺旋光”，它导致纤芯吸收效率十分低。为此，必须破坏内包层圆柱对称结构。图 1.5 给出各种各样的内包层结构，包括矩形、正方形、D 型、梅花型、六角形，还包括上海光机所王之江院士提出的非稳腔结构。在实际应用中，使用最多的是 D 型结构，其原因是加工工艺比较简单。

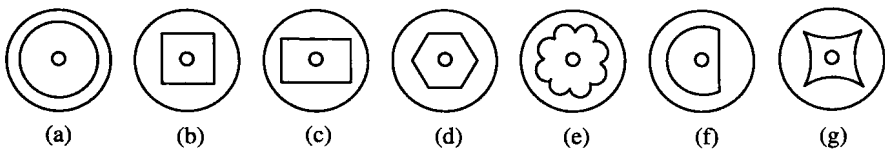


图 1.5 各种内包层结构示意图

泵浦光束在双包层内的传播可以表达为