

光纤放大器中一些问题的研究

作者：雷建设

专业：通信与电子系统

导师：黄肇明



上海大学出版社

2001 年上海大学博士学位论文

光纤放大器中一些问题的研究

作 者： 雷建设

专 业： 通信与电子系统

导 师： 黄肇明

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation(2001)

The Study of Some Problems of Optical Fiber Amplifier

Candidate: Lei Jianshe

Major: Communication and
Information System

Supervisor: Prof. Huang Zhaoming

Shanghai University Press

• Shanghai •

内容提要

《2001 年上海大学博士学位论文》内容包括：“多功能 RH 精炼过程的数学和物理模拟”“波纹管非轴对称问题研究”“电磁波在旋磁材料中的非线性传播特性”“电力市场远期合同的风险建模理论研究”“绕线式异步电机转子 IGBT 斩波调阻调速系统的研究”“无刷直流电机无位置传感器控制技术的研究”“双极化与变极化微带天线的研究”“三维空间微波毫米波集成电路的仿真研究”“硅系合金氧化精炼过程的热力学研究”“现代集成制造环境下基于 PDM 的 CAPTool 系统研究与开发”“具有分数导数型本构关系的粘弹性结构的静动力学行为分析”“数学物理中反问题与边值问题的积分方程方法”“视频对象平面分割和视频对象提取方法的研究”“多孔径拼接技术实现 360° 面形测量”“基于视窗平台的机器人控制技术研究及实现”“色散媒质的瞬态电磁特性研究”“基于小波变换和视觉系统的图像质量综合评价新算法”“圆坯连铸结晶器电磁搅拌过程数学模拟与实验研究”“高聚物凝胶驱动器及其在机器人中的应用”“机器人壁面自动清洗系统的工程研究”“基于小波变换的图象/视频压缩编码及其数字水印嵌入方法的研究”“高氮 35CrMoV 钢的制备和研究”“Non-Equilibrium Response in High Temperature Superconductors”“光纤放大器中一些问题的研究”

图书在版编目(CIP)数据

2001 年上海大学博士学位论文 /郁能文等著. —上海:
上海大学出版社, 2003.6
ISBN 7-81058-564-9

I. 2... II. 郁... III. 上海大学—博士—学位论文—汇编
—2001 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 040392 号

上海大学出版社出版发行

(上海市延长路 149 号 邮政编码 200072)

上海上大印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 137 字数 3196 千字

2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

定价: 220.00 元

上海大学

本论文经答辩委员会全体成员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：曾庆济	教授，上海交通大学	200030
委员：陈建平	教授，上海交通大学	200030
方祖捷	研究员，中国科学院上海光机所	201800
林如俭	教授，上海大学	200072
杜柏林	教授，信息产业部电子第 23 所	
导师：黄肇明	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

曾庆济	教授, 上海交通大学	200030
陈建平	教授, 上海交通大学	200030
方祖捷	研究员, 中国科学院上海光机所	201800

评议人名单:

程光谷	研究员, 中国科学院上海光机所	201800
郭振华	教授, 华中科技大学	430074
叶家骏	教授, 上海大学	200072
林如俭	教授, 上海大学	200072
方振和	教授, 上海大学	200072

答辩委员会对论文的评语

雷建设同学的论文“光纤放大器中一些问题的研究”从理论上对双包层光纤激光器,掺铒光纤放大器进行了较深入的研究,取得了一些创新性的成果。本论文选题对光通信事业的发展,国民经济和国防建设方面具有重要的理论意义和实用价值。论文的主要贡献有:

(1) 提出了双包层光纤放大器的理论模型。作者采用了分段方法,基于光子数平衡原理确定了半数理论分析模型,比 E.Miyazaki 在 1996 年所提出的方法有一定的优越性,对双包层光纤放大器优化设计有参考价值。在这基础上,作者还进一步研究了双包层光纤激光器作为泵浦源的光纤拉曼放大器,提出了一个简化设计分析模型,为光纤拉曼放大器的设计中确定光纤优化长度提供了理论依据。

(2) 很好地分析了掺铒光纤放大器的理论模型,并提出了一套基于三级系统的设计方案。其设计结果与实验所测量的数据相吻合,作者还设计出一套使用方便,计算精度高的掺铒光纤放大器设计软件。

(3) 对激光在空间光通信特别是卫星间光通信应用方面进行了研究。在高功率光纤放大器的主要部分——光纤发射系统以及光接收机的前置放大部分设计方面提出了较为合理的技术方案。在空间激光通信中,对通信波长,激光器的选择和信号调制方式以及通信系统光链路计算等方面作了论述和分析。

论文的立论正确,理论推导严谨,文字较为流畅,计算结果合理。表明了作者具有坚实而宽广的理论基础和深入系统的专业知识,在答辩中能基本正确地回答所提问题,具有独立从事科学研究的能力。答辩委员会一致认为论文已达到博士论文水平。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决，全票同意通过雷建设同学的博士学位论文答辩，建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**曾庆济**

2001 年 10 月 16 日

摘 要

近年来光纤放大器向大功率、大增益带宽以及低噪声方向发展,以满足密集波分复用系统、光纤 CATV 系统、空间光通信系统的应用。超大功率、超宽带、参数优化、低噪声越来越成为光纤放大器追求的目标和国内外关注的焦点,是当今光纤放大器发展的几个热点问题。本文大胆尝试对这些热点,也是难点和关键问题作一些探索。本文从理论上和实验上对掺铒光纤放大器进行了研究。主要从理论上研究了高功率双包层光纤放大器、双包层光纤拉曼激光器泵浦的拉曼光纤放大器。研究了空间光通信系统的几个关键问题,重点研究高功率光纤放大器在发射系统的应用以及低噪声光纤放大器在接收系统中的应用。本论文主要包括五个部分。

首先,用速率方程和光功率传播方程导出掺铒光纤放大器理论模型。对 C 波段的掺铒光纤放大器(EDFA)进行了 980nm 泵浦和 1480nm 泵浦两组实验,光谱仪测得 1500~1600nm 波长范围的输出功率谱与模型计算得到的功率谱相吻合。分析了掺铒光纤放大器的噪声特性。

第二,研究了掺铒光纤放大器设计软件,对低噪声前置放大器进行了优化设计。

第三,本文用光射线传输理论,研究了双包层光纤内包层截面形状对包层泵浦的吸收效率的影响。得出了一些对双包层光纤设计有指导意义的结果;研究了双包层光纤放大器的泵浦方式;采用分段方法,首次利用光子数平衡原理建立了半数值双包层掺稀土放大器理论模型。利用模型对双包层光纤放大器

进行了初步的优化设计.

第四, 研究了空间光通信的几个关键问题. 研究了工作波长的选择、激光器的选用与调制技术、进行了星间激光通信系统的光链路计算. 研究高功率光纤放大器用作功放的主振功放光发射系统的实验方案, 低噪声光纤放大器用作光接收机的前置放大器的实验方案.

第五, 研究了双包层光纤拉曼激光器泵浦的拉曼光纤放大器. 提出了双包层光纤激光器简化的理论模型. 由模型可以求出多模泵浦功率阈值与光纤长度的关系, 当泵浦功率阈值最小时, 对应的光纤长度为最佳光纤激光器的腔长. 高功率的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器输出, 注入单模频移光纤, 通过拉曼频移, 级联地将泵浦光的能量移动至所希望达到的波长处, 形成拉曼激光输出. 级联的次数由频移量和希望输出的波长决定, 由光纤光栅的对数实现. 高功率双包层光纤拉曼激光器是拉曼光纤放大器合适的泵浦源之一.

关键词 掺铒光纤放大器 双包层光纤放大器 拉曼光纤放大器 空间光通信

Abstract

Fiber amplifiers with high-power, big-gain bandwidth and low-noise figure are required for their application to DWDM system, fiber CATV system and space laser communication system. High-power, big-gain bandwidth, optimal parameters and low-noise figure are becoming the goals the fiber amplifier pursues for and the focus both at home and abroad. They are also the hot topics today in the development of fiber amplifier. This paper makes an attempt to explore these hot, difficult and key problems. Erbium doped fiber amplifier(EDFA) is studied theoretically and experimentally in this dissertation. Double-cladding fiber amplifier and Raman fiber amplifier pumped by double-cladding fiber Raman laser are mainly under investigation theoretically. Several key problems of space laser communication system, especially the application of high power fiber amplifier in transmitter and low noise figure amplifier in receiver, are also studied.

First of all, EDFA model is set up by using rate equations and propagation equations for signals, pumps, and ASE. Experiments for C band EDFA have been made by using 980nm pumping and 1480nm pumping, respectively. The experimental results show that output power spectrum density between 1500~1600nm agrees well with calculated results based on the model. EDFA noise characteristic is analyzed, too.

Secondly, EDFA designing software is studied. Low noise preamplifier is designed by using optimization method.

Thirdly, the effect of different inner cladding section shape on pump absorb efficiency has been studied using ray-optics. Some

instructive conclusions for double-cladding fiber designing are obtained. Pump methods of double-cladding fiber amplifier are also studied. Dividing the fibre into sections, a novel semi-numeral model for double-cladding fibre amplifier is set up according to the principle of photon balance. Then double-cladding fibre amplifier design has been optimized according to this model.

Fourthly, some key problems of space laser communication are studied including the selection of working wavelength, laser and modulation technology, as well as the calculation of optical link for inter-satellite optical communication. Two experiment designs have been studied, which are about MOPA transmitter using high-power fiber amplifier as power amplifier and the receiver using low-noise fiber amplifier as preamplifier.

Finally, Raman fiber amplifier pumped by double-cladding fiber Raman laser has been studied. A simplified theoretical model of double-cladding fiber laser is presented. The relationship between multimode pumping power threshold and fiber length has been obtained according to this model. When the threshold pumping power reaches its minimum, the cavity length of fiber laser is then optimized. High-power output of Yb^{3+} -doped double-cladding fiber laser is injected into single mode frequency-shift fiber, through, and the energy of pumping laser could be transferred to the expected wavelength in cascaded way. The times of cascade are decided by the quantity of frequency-shift and the expected wavelength and they are realized by the number of fiber grating. The conclusion is that High-power double-cladding fiber Raman laser can be the appropriate pumping source of fiber Raman laser.

Key words Erbium doped fiber amplifier, Double-cladding fiber amplifier
Raman fiber amplifier, Space laser communication

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 光纤放大器的历史和发展	1
1.2 双包层光纤放大器的提出	5
1.3 空间光通信与光纤放大器	7
1.4 论文的主要意义	9
1.5 论文的主要内容和安排	10
第二章 掺铒光纤放大器的理论	12
2.1 引 言	12
2.2 铒光纤特性	13
2.3 噪声分析	16
2.4 掺铒光纤放大器模型与数值计算	21
2.5 结 论	35
第三章 掺铒光纤放大器的设计软件研究及应用	36
3.1 引 言	36
3.2 放大器的主要性能参数	36
3.3 元器件及其传输方程	38
3.4 掺铒光纤放大器的设计软件	41
3.5 前置掺铒光纤放大器的优化设计	43
3.6 结 论	53
第四章 双包层光纤放大器研究	55
4.1 引 言	55

4.2	双包层光纤结构及特点	56
4.3	内包层截面形状的研究	57
4.4	双包层光纤放大器的泵浦方式的研究	64
4.5	非线性的影响分析	67
4.6	双包层放大器的理论模型	68
4.7	双包层光纤放大器的优化设计	79
4.8	结 论	81
第五章	光纤放大器在空间光通信中的应用研究	82
5.1	引 言	82
5.2	工作波长选择	84
5.3	激光器与调制技术	86
5.4	星间光通信链路计算	87
5.5	光发射系统的结构与高功率光纤放大器 的实验研究方案	89
5.6	光纤放大器(EDFA)用作光接收机的前置放大器 的实验方案	99
5.7	结 论	101
第六章	宽带光纤放大器研究	102
6.1	引 言	102
6.2	拉曼放大器理论	105
6.3	拉曼放大器的泵浦源研究	110
6.4	结 论	118
第七章	结束语	119
参考文献		120
致 谢		131

第一章 绪 论

1.1 光纤放大器的历史和发展

自从 1989 年掺铒光纤放大器 (EDFA) 用于光通信的试验成功后, 可以说十多年来光通信与 EDFA 互为推动, 都得到了空前的发展. 掺铒光纤放大器不仅可以用作中继放大器, 还可以用作发送端的功率放大器和接收端的低噪声预放大器. EDFA 与其他放大器比较, 具有输出功率大、增益高、工作带宽宽、与偏振无关、噪声指数低、放大特性与系统比特率及数据格式无关、无串扰等特点, 它已成为大容量、高速率光纤通信系统中不可缺少的关键器件之一.

光纤放大器和光纤激光器都是利用掺稀土元素光纤中的光放大效应, 它们的发展是密不可分的. Snitzer 和 Koester 在 1963 年和 1964 年分别发表了多组份玻璃光纤中光放大结果^[1,2], 当时他们正为美国光学公司工作. 在光纤放大器方面的早期工作还有前苏联的 Letokhov 和 Pavlik^[3]. 在 20 世纪 80 年代中后期的几年中, 英国南安普敦大学的电子工程系和物理系也卷入了这个领域的研究^[4,5], 他们在其中扮演了非常重要的角色, 他们用 MCVD 方法制作掺杂单模光纤, 并由此构成激光器, 从而再度唤起人们对这个领域的兴趣. 此后该校的这两个研究小组先后报道了光纤激光器的调 Q、锁模, 单纵模输出及光纤放大器方

面的研究工作. 英国通信研究实验室 (BTRL) 于 1987 年首次报道了其研究成果^[6,7]. BTRL 的研究人员在增益和激发态吸收等研究领域做了大量的基础工作, 最重要的成果是制成了利用半导体激光器作为泵浦源的光纤激光器和放大器. 其他在这个领域内发表过研究成果的研究机构还有德国汉堡的技术大学、NTT、Hoya、日本的三菱、美国的 Polaroid Corporation、斯坦福大学和 GTE 等. 国内从 20 世纪 80 年代末和 90 年代初, 在上海硅酸盐研究所、北京建材研究院、天津 46 所及武汉邮电研究院等都先后开展掺铒光纤的研制. 同时在清华大学、北京邮电大学、武汉邮电科学研究院及上海科大也开始了光纤放大器的研究, 并取得了一些阶段性的成果.

光纤远距离传输的两大障碍是色散和损耗. 补偿光信号在光纤远距离传输中的损耗, 增加光传输的无中继距离和延长光传输的距离, 是人们一直追求的目标. 光放大器是解决这个问题的最佳途径之一. 光放大器的出现以及实现实用化是光纤通信系统、CATV 光纤传输系统和其他光纤传输系统的一场真正的革命.

光放大器有半导体光放大器(SOA)和光纤放大器(OFA)两大类. 对于 SOA, 由于载流子寿命短、增益饱和、交叉增益调制等因素, 性能比不上 EDFA. 此外, SOA 的耦合损耗大, 增益对偏振敏感, 难于实用化、商品化. 然而, 半导体放大器仍有独特的应用场合, 它们有可能广泛应用于信号处理和光子交换等场合, 另外, 它们易于与其他光子器件和光波导集成在同一芯片, 有必不可少的优点, 有发展前途, 值得继续研究^[8]. OFA 包括应用于 1550 nm 波长的掺铒光纤放大器(EDFA)和应用于 1310 nm 波长的掺镨或掺钕的光纤放大器

(PDFA 或 NDFA)以及拉曼光纤放大器(SRA). EDFA 的泵浦光波长为 980nm 和 1480nm, PDFA 的泵浦光波长为 1010 ~ 1040 nm. 众所周知, 大功率的泵浦用的 980 nmLD 和 1480 nmLD 最早有商品出售, 因此, EDFA 获得优先的发展, 已实现实用化、商品化. 其他的 OFA 也在积极研究中, 拉曼放大器由于其巨大的带宽正引起浓厚的兴趣, 大功率的 1010 ~ 1040 nmLD 的研究开发使拉曼光纤放大器即将实用化、商品化. EDFA 技术已日臻成熟, 它不仅能极大地提高光传输的无中继距离和延长光传输的距离, 而且对光发射机和光接收机的高速化以及迅速扩大波分复用(WDM)通信系统的传输能力都具有强大的促进作用.

EDFA 按功能要求将其分为功率放大器 (Booster)、前置放大器(Pre-amplifier)和线路放大器(In-line Amplifier). 按应用领域又可分为数字通信用 EDFA 和 CATV 用 EDFA. EDFA 作功率放大时, 要求 EDFA 是输出大功率、高饱和功率的器件. 当 EDFA 作前置放大时, 为改善接收机灵敏度, 要求 EDFA 是低噪声器件.

密集波分复用系统 (DWDM) 是目前大容量光纤通信的首选系统. 在 DWDM 系统中, 光纤放大器是非常关键的器件. EDFA 的实用化及其性能的改善直接推动了 DWDM 系统的发展. 近年来, DWDM 技术已经有很大突破. 新的高水平的商用系统不断涌现. 波分复用试验系统的最高速率已达 10.6 Tbit/s. DWDM 技术之所以发展十分迅速, 得益于掺铒光纤放大器的研制成功和功率均衡技术的应用. 迄今为止, 几乎所有的 DWDM 系统, 不管是试验系统, 还是商用系统都使用了光纤放大器. 采用 DWDM 系统成本之所以低, 其一是因为多个及多种信号都