

学校编码: 10384
学号: 23120101152998

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦门大学

硕士学位论文

掺铥双包层光纤激光器的理论与实验研究

Theoretical and Experimental Investigation of Tm^{3+} -doped
Double-clad Fiber Lasers

郑勇龙

指导教师姓名: 叶陈春 教授

专业名称: 物理电子学

论文提交时间: 2013 年 5 月

论文答辩日期: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: 董文旺

评阅人: _____

2013 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

郑勇龙

2013年6月4日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

郑勇龙

2013年6月4日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

掺铥光纤激光器工作波长可在 $1.7\sim 2.1\mu\text{m}$ 范围调谐, 该波段对人眼安全, 且包含大气传输窗口, 在激光遥感、环境污染监测、激光雷达、激光测距、光谱分析、自由空间通信、医疗及材料加工等方面具有很重要的应用价值。因此, 掺铥光纤激光器具有极高的研究意义, 成为国内外的研究热点。本文从理论和实验两方面对包层泵浦 $2\mu\text{m}$ 连续波输出掺铥光纤激光器进行了初步研究。

理论上, 根据铥离子的能级速率方程组和泵浦光、激光的传输方程, 理论分析了泵浦光和激光在增益光纤中的分布情况以及激光输出功率与掺铥光纤长度、腔镜反射率及铥掺杂浓度等参数的关系, 并数值计算了激光阈值和斜效率。

实验上, 采用中心波长为 788 nm 的半导体激光器作为泵浦源, 利用光纤尾端 4% 的菲涅尔反射和 $2\mu\text{m}$ 波段全反镜构成线型谐振腔, 实现了斜效率为 33.8% 、波长在 2066 nm 的激光输出。实验结果较好地验证了理论模型。

关键词: 光纤激光器; 数值模拟; 速率方程

Abstract

Thulium-doped fiber laser exhibits a broad laser wavelength tuning range(1.7~2.1 μm), including the 2 μm eye-safe wavelengths and the atmospheric transmission window. It has very important application value in laser remote sensing, environment pollution monitoring, laser radar, laser ranging, spectrum analysis, free space laser communications, medicine and material processing. That's why the Tm-doped fiber laser is paying high attention from researchers all over the world. The theoretical analysis and experimental investigation of CW Tm³⁺-doped double-clad fiber lasers are represented in this paper.

Based on rate equations and power propagation equations of Tm-doped fiber laser, characteristics of the laser operation are numerically simulated. The power distributions of the pump light and laser along the Tm-doped fiber are analyzed. The dependency of the output laser power on the length of Tm-doped fiber, the concentration of thulium in the fiber core and the reflectivity of coupling mirror is investigated, respectively. The laser threshold and slope efficiency are also studied.

The experimental research has also been carried out. Using 788 nm laser diode as the pump source, cw operation of a Tm³⁺-doped fiber laser at the central wavelength of 2066 nm has been achieved with an output laser power of 1.38W and a slope efficiency of 33.8%. The numerical simulation results match well with the experimental ones.

Key words: fiber laser; Numerical simulation; Rate equations

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	III
Contents.....	V
第一章 绪论	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 本文的主要研究内容.....	5
第二章 掺铥双包层光纤激光器的基本原理	7
2.1 Tm^{3+} 离子特性.....	7
2.1.1 Tm^{3+} 离子的基本特性.....	7
2.1.2 Tm^{3+} 离子的能级结构.....	8
2.1.3 Tm^{3+} 离子的光谱特性.....	11
2.2 掺铥双包层光纤激光器的关键技术.....	12
2.2.1 增益介质.....	12
2.2.2 泵浦耦合技术.....	15
2.2.3 常用谐振腔结构.....	21
2.3 本章小结.....	24
第三章 掺铥双包层光纤激光器的理论分析与数值模拟.....	26
3.1 掺铥双包层光纤激光器的泵浦方案及速率方程组.....	27
3.1.1 $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$ 泵浦方式的理论模型.....	27
3.1.2 $^3H_6 \rightarrow ^3H_5$ 泵浦方式的理论模型.....	29
3.1.3 $^3H_6 \rightarrow ^3H_4$ 泵浦方式的理论模型.....	31
3.2 理论模型中所用参数.....	34

3.3 理论模拟结果及分析.....	36
3.3.1 三种抽运方式对激光特性的影响	36
3.3.2 激光输出功率与入纤泵浦光功率的关系.....	40
3.3.3 激光输出功率与腔镜反射率的关系	41
3.3.4 激光输出功率与掺铥光纤长度的关系	43
3.3.5 激光输出功率与纤芯铥掺杂浓度的关系.....	44
3.4 本章小结	47
第四章 掺铥双包层光纤激光器的实验研究	49
4.1 实验相关器件及设备.....	50
4.1.1 泵浦源	50
4.1.2 增益介质.....	52
4.1.3 双色镜	54
4.1.4 光纤合束器.....	55
4.1.5 测量设备.....	56
4.2 实验结果及分析	57
4.3 本章小结	58
第五章 结论与展望	60
5.1 本文工作总结	60
5.2 未来工作展望	61
参考文献	63
攻读硕士学位期间取得的科研成果	68
致谢	69

Contents

Abstract (in Chinese)	I
Abstract	II
Contents (in Chinese)	III
Contents	V
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Research progress of Tm-doped fiber laser	2
1.3 Main research content	5
Chapter 2 The basic principle of Tm-doped fiber laser	7
2.1 Features of thulium ion	7
2.1.1 Basic features of thulium ion	7
2.1.2 Energy level structure of thulium ions	8
2.1.3 Spectral characteristics of thulium ions	11
2.2 Key technology of thulium doped double clad fiber laser	12
2.2.1 Gain medium	12
2.2.2 Pump coupling technology	15
2.2.3 Common cavity structure	21
2.3 Summary of this chapter	24
Chapter 3 Theoretical analysis and numerical simulation	26
3.1 Pumping scheme and rate equations	27
3.1.1 Theory of $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$ pump mode	27
3.1.2 Theory of $^3H_6 \rightarrow ^3H_5$ pump mode	29
3.1.3 Theory of $^3H_6 \rightarrow ^3H_4$ pump mode	31
3.2 Parameters used in the theoretical model	34
3.3 Theoretical simulation results and analysis	36

3.3.1 Influence of pump mode on laser behavior	36
3.3.2 Relation of laser output power and pump power	40
3.3.3 Relation of laser output power and cavity mirror reflectivity	41
3.3.4 Relation of laser output power and Tm-doped fiber length.....	43
3.3.5 Relation of laser output power and Tm-doped concentration.....	44
3.4 Summary of this chapter	47
Chapter 4 Experimental study of Tm-doped fiber laser	49
4.1 Experiment devices and related equipment	50
4.1.1 Pump source.....	50
4.1.2 Gain medium.....	52
4.1.3 Dichroic Mirror	54
4.1.4 Fiber combiner	55
4.1.5 Measurement equipment.....	56
4.2 Experiment results and analysis	57
4.3 Summary of this chapter	58
Chapter 5 Conclusions & outlook	60
5.1 Main achievement	60
5.2 Future work	61
Reference.....	63
Publication.....	68
Acknowledgements	69

第一章 绪论

自上世纪六十年代光纤激光器出现以来,光纤激光器以其结构紧凑灵活、光束质量好、转换效率高、稳定性强、调谐范围广、使用寿命长等优点,发展非常迅猛^[1]。双包层光纤的出现以及固体泵浦技术和半导体工艺的发展,为高功率光纤激光器的研制提供了条件,使光纤激光器在工业加工、光传感、光纤通讯、激光医疗器械仪器设备、军事国防安全等领域的应用更加广泛^[2]。光纤激光器是用掺稀土元素玻璃光纤作为增益介质的一类激光器,其中掺铥(Tm^{3+})光纤激光器的工作波长可在 $1.7\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 范围调谐,具有优良的性能和广泛的应用前景,成为近几年来光纤激光器的研究热点^[3-7]。

1.1 课题背景

1960年7月,美国休斯公司实验室从事红宝石荧光研究的梅曼先生,成功演示了世界第一台红宝石固态激光器^[8, 9]。自第一台激光器出现以来,激光技术发展迅猛,科学家们相继又发明了不同类型的激光器。例如气体原子($\text{He}-\text{Ne}$ 等)激光器,气体分子(CO_2 等)激光器,气体离子(Ar^+ 等)激光器,固体(Nd:YAG 等)激光器,半导体(GaAs , InP 等)激光器,可调谐染料激光器,光纤激光器,光纤参量振荡及放大器等等。各种激光器虽然材料和形态大相径庭,但工作基本原理是相同的,都包括:泵浦源,激光工作介质和谐振腔。在泵浦光的激发下,工作介质在谐振腔内形成粒子集居数反转,并在腔内形成振荡输出激光^[3, 4, 10]。

光纤激光器是指用掺稀土元素(如 Nd^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} , Pr^{3+} , Sm^{3+} 等)光纤作为增益介质的激光器,与其他传统的激光器相比,光纤激光器具有无可比拟的优势^[11]:

- 1、激光阈值低,转换效率高,输出光束质量好。激光在直径很小的具有圆对称波导结构的纤芯中产生和传输,在小芯径纤芯波导的限制下,激光可获得理想的光束质量和极小的出光光斑直径。纤芯直径小,光纤内容易形成高功率密度,从而引起激光工作物质能级间的粒子数反转,构成的光纤激光器具有激光阈值低、

转换效率高、光束质量好等优点^[12, 13]。

2、散热性好。光纤激光器采用光纤做增益介质，光纤具有很大的表面积/体积比，这使其具有非常好的散热性能，即使非常高功率的光纤激光器，增益介质也不会受到热损害，一般无需对增益介质采取特别的散热措施，而其他种类的激光器，增益介质的散热问题需要重点考虑^[14, 15]。

3、输出激光可调谐范围广。由于稀土离子能级宽及玻璃光纤具有较宽的荧光谱，使得光纤激光器具有一定的可调谐性^[16]。

4、成本低，结构简单，寿命长。光纤激光器的泵浦源可以采用高功率带尾纤输出的高寿命小巧半导体激光器，并以光纤光栅构成光学谐振腔，实现全光纤结构的激光器。光纤具有很好的柔绕性，光纤激光器可设计得相当小巧灵活，易于系统集成，同时可在恶劣环境下工作，工作寿命长。

其中 2 μm 掺铥 (Tm^{3+}) 光纤激光器工作波长可在 1.7~2.1 μm 范围调谐。该波段对人眼安全，且包含大气传输窗口，也包括水分子和 CO_2 等的强吸收峰，因此掺铥光纤激光器在激光遥感、环境污染监测、激光雷达、激光测距、光谱分析、自由空间通信、医疗及材料加工等方面具有很重要的应用。而且 2 μm 波段掺铥光纤激光器被认为是 3 ~ 5 μm 光参量振荡的有效泵浦源^[17]。与目前发展最成熟、应用最广泛的高功率掺镱 (Yb^{3+}) 光纤激光器相比，掺铥光纤激光器具有独特优势：由于掺铥光纤激光的工作波长比掺镱光纤激光几乎大一倍，可使用更大模场面积来获得更高功率的单模激光输出，其损伤阈值和非线性阈值功率均更高。此外，掺铥光纤可直接采用已非常成熟的 0.79 μm 波段高功率激光二极管 (LD) 泵浦 ($^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 泵浦方式)^[18, 19]，交叉迟豫过程的存在使其总体泵浦效率非常高。因此，近几年来，掺铥光纤激光器成为国内外研究者、世界各大激光器制造商的重点研究项目，发展迅猛。本文主要从理论和实验两方面对包层泵浦 2 μm 连续波输出掺铥光纤激光器进行了初步研究。

1.2 国内外研究现状

在国外，掺铥光纤激光器的研究起步早，并已经取得很大的进展。

早在 20 世纪 60 年代初期，研究者通过在 CaWO_4 和 YAG 晶体中参杂铥元素证实铥是种很有发展潜力的激光工作物质^[20-23]。但直到二十世纪八十年代随着

光纤拉制工艺的逐渐成熟，掺铥光纤激光器才得到发展。1988年，英国南安普敦大学的 D.C.Hanna 和 I.M.Jauncey 等人制作了世界第一台掺铥光纤激光器。他们采用 797nm 的染料激光器泵浦掺杂浓度为 830 ppm，数值孔径为 0.15，截止波长为 1.7 μm ，芯径为 9 μm 的掺铥单模石英光纤，在 1.88 μm ~1.96 μm 之间观察到了激光振荡，泵浦阈值功率为 21 mW，斜率效率为 13 %^[24]。

1990年，D.C.Hanna 课题组又首次报导了输出波长在 1780~2056 nm 可调谐掺铥光纤激光器，可调谐范围达到了 276 nm^[25]。同年，此课题组采用 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器作为泵浦源泵浦单包层掺铥光纤，首次实现了在 2 μm 波段瓦级激光输出^[26]。随着 90 年代中期，光纤包层泵浦技术和大功率半导体激光器技术的发展，掺铥光纤激光器的输出功率大幅提高，进入新的发展阶段。

1998年，英国曼切斯特大学的 S.D.Jackson 和 T. King 采用 793 nm 二极管激光器 (LD) 采用双包层泵浦技术泵浦掺杂浓度为 1.85 wt.% ($1.45 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$) 双包层掺铥光纤，在 2 μm 波段获得了 5.4 W 的激光输出，斜效率为 31 %。且通过调整掺铥双包层光纤的长度，输出波长可在 1.880~2.033 μm 间调谐^[27]。

2000年，英国南安普顿大学的 Hayward, RA 等采用输出波长为 787 nm，最大输出功率 36.5 W 的激光二极管作为泵浦源泵浦掺铥双包层硅基光纤。单模连续运转情况下得到的激光最大输出功率为 14 W，中心波长 2 μm ，泵浦斜效率为 46 %^[28]。2002年该研究小组又采用衍射光栅作为波长调节器件实现了激光波长在 1860 ~ 2090 nm 的可调谐激光输出，并在 1870 ~ 2040 nm 波段范围获得了大于 5 W 的连续波功率输出，采用的掺铥光纤内包层为 D 型，直径 200 μm 其中纤芯直径为 20 μm ^[29]。

2004年，S.D.Jackson 等报道了 LD 单端泵浦掺铥石英双包层光纤激光器，其中双包层光纤铥掺杂浓度 2.5 wt% (Al^{3+} 、 Tm^{3+} 离子掺杂浓度比为 10: 1)，输出激光功率达到 118 W，斜率效率为 59 %^[30]。

2005年，澳大利亚的 Frith. G 等人采用 793 nm 的 LD 泵浦掺铥氟硅酸盐光纤，在入纤泵浦光功率为 160 W 时，获得了 85 W 的连续激光输出，激光工作中心波长为 2.04 μm ，激光器阈值为 11 W，泵浦斜效率为 56 %^[31]。

2008年，英国南安普顿大学光电子研究中心的 L. Pearson 和 D. Shen 等人采用主控振荡器的功率放大器 (MOPA) 系统结构，实现了 100 W 的激光输出，通

过调节体光栅可以实现激光输出波长在 1820~2010 nm 可调谐, 调谐范围达到 190 nm。受限于种子光源的调谐范围和泵浦功率, 不然可以获得更宽的调谐和更高功率输出^[32]。

2010 年 Q - Peak 公司 Ehrenreich 等人利用 MOPA 技术, 采用 12 个 0.79 μm 半导体激光器作为两级放大器的泵浦源, 主振荡器 (MO) 输出功率为 50 W 的激光经过两级放大后, 实现了大于 1 kW 的连续激光输出, 工作波长为 2045 nm, 斜率效率达到 53.2 %^[19]。

在我国, 对掺铥光纤激光器的研究工作起步较晚, 与国外相比存在不小的差距。一是高掺杂的双包层掺铥光纤研制相对落后, 光纤芯部的铥离子掺杂浓度低、均匀性差。二是用于 2 μm 波段的光纤光栅研制技术一直没有得到发展和突破。三是 793 nm 波段的高功率半导体激光器仍然没有实现国产化, 进口产品价格居高不下。

1998 年杜戈果、刘东峰等采用连续输出工作波长为 1053 nm 的 Nd : YAG 激光器作为泵浦源, 测试了不同光纤长度下输出激光的中心波长。在光纤长度分别为 1.7 m、1 m、0.7 m、0.5 m 时, 输出激光的中心波长分别为 1.850 μm 、1.871 μm 、1.889 μm 、1.891 μm ^[33]。

2004 年, 中科院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室的董淑福、陈国夫等人用铥钛共掺石英光纤, 在钛宝石激光泵浦下, 获得了波长为 1870 nm、最大功率为 240 mW 的单模激光输出, 斜率效率接近 31 %。这是当时此类光纤获得的最高转换效率^[34]。

2008 年, 深圳大学电子科学与技术学院的杜戈果, 黎大军等采用波长为 791 nm 的半导体激光器, 进行包层泵浦铥掺杂浓度为 1.846 wt% 的双包层光纤。在 2 μm 波段获得了 6 W 的连续激光输出, 泵浦斜率效率达到了 50 %, 光束质量 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.26 和 1.32^[35]。

2009 年, 哈尔滨工业大学光电子研究所的张云军等进行了全光纤掺铥放大器的研究。该课题组采用 MOPA 结构, 由一个半导体激光器 (LD) 包层泵浦的全光纤单模掺铥光纤激光器产生最高输出功率为 2.4 W, 谱线宽度为 0.1 nm 的窄线宽种子光, 经过放大器后输出功率为 30.6 W, 中心波长 1947.6 nm, 谱宽 0.2 nm 的连续激光, 斜率效率为 39.1 %^[36]。

2010年,赵晓波,沈德元等通过对石英玻璃光纤芯径组分及 Tm^{3+} 掺杂浓度的优化,有效地提高了铥离子间的交叉驰豫过程,实现了掺铥光纤激光器的高功率、高效率运转。当耦合的790 nm泵浦光功率为137 W时,产生了81.5 W的2.03 μm 连续激光输出,相对于耦合泵浦光的激光斜效率达到62.5%,为斯托克斯极限效率的1.7倍^[37]。

2012年,上海交通大学物理系的唐玉龙等报道了输出功率为137 W的全光纤结构窄带宽掺铥光纤激光器。激光器采用793 nm的半导体激光器作为泵浦源,泵浦Nufern公司设计的掺杂浓度为4 wt.%双包层掺铥光纤,并使用专门设计的匹配增益光纤的光纤布拉格光栅作为谐振腔镜,获得137 W激光输出,激光中心波长稳定在2019 nm,光谱线宽小于3 nm^[38]。

1.3 本文的主要研究内容

本论文主要从基本理论、数值分析、实验研究三个方面进行对掺铥双包层光纤激光器的研究。本论文的主要内容和章节安排如下:

第一章:绪论。介绍了光纤激光器相比于传统的固体激光器所具有的优势。并介绍了掺铥光纤激光器的特点及应用前景。分析介绍了掺铥光纤激光器的国内外研究进展。概述本论文的选题依据和研究内容。

第二章:掺铥双包层光纤激光器的基本原理。介绍掺铥双包层光纤激光器的基本原理、铥离子的能级结构以及光谱特性。对双包层光纤的结构、泵浦耦合技术以及谐振腔的结构进行归纳和阐述。

第三章:掺铥双包层光纤激光器的理论分析与数值模拟。通过综合多篇相关文献,建立2 μm 波段掺铥双包层光纤激光器的三种泵浦方案所对应的理论模型,并对实验中所采用的 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 泵浦方案进行数值模拟。根据铥离子的能级速率方程组和泵浦光、激光的传输方程,运用MATLAB软件进行仿真模拟:分析了泵浦光和激光在增益光纤中的分布情况以及激光输出功率与掺铥光纤长度、腔镜反射率、纤芯掺杂浓度等参数的关系,数值计算了激光阈值和斜效率等连续激光运行参数。为后面的实验设计和研究提供一定理论参考。

第四章:掺铥双包层光纤激光器的实验研究。本章为实验内容介绍,我们综合第三章的理论分析,设计了掺铥双包层光纤激光器系统。利用788 nm LD激

光器的泵浦光通过尾纤与合束器熔接进入掺铥双包层光纤 (Nufern SM – TDF – 10P / 130 – HE), 利用光纤尾端 4 % 的菲涅尔反射和 2 μm 波段全反镜构成线型谐振腔, 得到激光输出。最后使用光谱仪测量输出激光的中心波长、半高全宽等参数, 使用光功率计确定光纤激光器系统的斜率效率。

第五章: 结论与展望。汇总本论文的工作及初步研究成果, 提出有待进一步开展的工作。

厦门大学博硕士论文摘要库

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库