

学校编码: 10384
学 号: 200430034

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

级联掺铒光纤超荧光光源特性研究

The investigations on characteristics of cascaded Er^{3+} -doped
superfluorescent fiber sources

孙明皓

指导教师姓名: 许惠英教授 黄文财副教授

专 业 名 称: 通信信息与系统

论文提交日期: 2007 年 4 月

论文答辩时间: 2007 年 5 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2007 年 4 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

本文主要研究了为光纤通信、光纤无源器件测试、光纤光栅传感系统、光纤陀螺等提供光信号的掺铒光纤光源。从理论和实验两个方面以单双级结构对比的形式分析了参数变化对以掺铒光纤为增益介质的光纤光源性能的影响。在理论模拟方面主要研究了C波段双程后向结构与级联双程后向结构，L波段双程前向结构与级联双程前向结构的特性；在实验方面主要研究了级联双程前向结构L波段超荧光光源的特性。实验测试结果和理论模拟结果相符合。本文的分析研究对掺铒光纤宽带光源的设计和制作具有一定的指导和参考意义。

本文第一章简单回顾了光纤通信的发展历史和目前所存在的瓶颈问题以及对未来发展的展望，然后对超荧光光源的研究背景和应用特色做了较为详细的介绍。第二章从原理方面加以说明超荧光光源产生的机理，并对超荧光光源的四种基本结构以及衍生出来的几种级联结构做了介绍说明。第三章主要从理论模拟方面对低浓度掺铒光纤单双级后向结构构成的C波段超荧光光源对比分析，结果表明双级结构与单级结构相比在线宽、效率以及中心波长的稳定性方面没有明显的优点。第四章对高浓度掺铒光纤单双级前向结构构成的L波段超荧光光源进行理论模拟分析，结果表明在双级双程结构比单级双程结构在综合中心波长、线宽、输出功率考虑下具有明显优势，并且具有中心波长的稳定性的潜在优点。第五章则从实验方面对第四章的理论分析加以证实，发现实验结果和理论模拟结果相符合。第六章则是对全文的总结。

本论文主要以福建省自然科学基金项目为背景，论文的研究成果为项目的顺利完成起了重要作用。

[关键词]: 超荧光光源；放大自发辐射；掺铒光纤

Abstract

In this paper, Er^{3+} -doped superfluorescent fiber sources (Er-SFS) are investigated to provide the optical signals for applications in many fields, such as optical communications, optical passive devices test, optical fiber grating sensor, optical fiber gyro. Compared the one-stage with two-stage configurations, we analysis theoretically and experimentally a few significant parameters effect on the characteristics of Er-SFS. Numerical simulations are performed to obtain the performance of double-pass backward and cascade double-pass backward C-band configurations, respectively. Moreover, we also simulate numerically and obtain the performance of double-pass forward and cascade double-pass forward L-band configurations, respectively. In experimentally, cascade double-pass forward L-band Er-SFS is mainly investigated. Compared the experimental with theoretical results, a good agreement is demonstrated. Our researches in this paper will be useful for design and analysis of Er-SFS in practice.

In chapter 1, the simple historical review, those present bottlenecks and potential development for optical communications are given. The research background and application features of SFS are introduced in details. In chapter 2, the fundamental principles for generating superfluorescence in optical fiber are illustrated. Moreover, the four kinds of basical configurations and a few of their derivative configurations for SFS are introduced. In chapter 3, using the numerical simulations, we compare the one-stage with two-stage double-pass backward low-dopant Er-SFS. The results show that advantagements between them embodied in their bandwidth, conversion efficiency and stability of central wavelength is unobvious. In chapter 4, comparing the one-stage with two-stage double-pass forward high-dopant Er-SFS, we numerically investigated their performance of bandwidth, central wavelength and output power. The results demonstrate that the two-stage configure is superior to that of one-stage, especially, the stability of central wavelength is very good. In chapter 5, some

experiments are performed to verify our theoretical results. The experimental and numerical simulation results are in better agreement with each other. Chapter 6 is a conclusion about this thesis.

This paper is mainly supported by a nature science program of Fujian province. The work of this thesis will have some significant advancement for excellently completing this program.

[Key words]: Superfluorescent sources; ASE; Er³⁺-doped fiber

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目录

第一章：绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 掺铒光纤超荧光光源的研究背景.....	4
1.3 本文的主要工作.....	5
第二章：超荧光光纤光源的基本原理	6
2.1 掺铒光纤超荧光光源的基本原理.....	6
2.1.1 掺铒光纤的基本概念及能级图.....	6
2.1.2 掺铒光纤超荧光光源产生的基本原理.....	7
2.1.3 传输和速率方程.....	10
2.2 超荧光光源输出特性的主要参数.....	12
2.3 超荧光光纤光源的基本结构.....	14
第三章：级联 C 波段掺铒光纤超荧光光源研究	18
3.1 基本结构的简单介绍.....	18
3.2 单级双程后向与级联双程后向结构 C-波段超荧光光源特性.....	18
3.2.1 单级双程后向结构 C-波段光源.....	18
3.2.2 光纤长度为 10m 时单双级结构的比较.....	19
3.2.3 光纤长度为 10m 左右时单双级结构的比较.....	22
3.2.4 光纤长度为 34m 时单双级结构的比较.....	26
3.2.5 光纤长度为 34m 左右时单双级结构的比较.....	28
3.3 小结.....	29
第四章：级联 L 波段掺铒光纤超荧光光源研究	30
4.1 单级双程前向结构 L-波段光源.....	30
4.2 光纤长度为 19m 时单级结构和双级结构的比较.....	31
4.3 小结.....	40
第五章：掺铒光纤超荧光光源前向结构的实验	42
5.1 关于前向结构实验的简单介绍.....	42

5.2 实验装置的介绍.....	42
5.3 实验现象.....	43
5.3.1 单级双程结构.....	43
5.3.2 双级双程结构.....	47
5.4 小结.....	55
第六章: 论文总结.....	56
参考文献.....	57
致谢.....	59

厦门大学博硕士学位论文摘要库

CONTENTS

CHAPTER 1	General Review	1
1.1	Introduction	1
1.2	Research Background of Er-SFS	4
1.3	Contributions of This Thesis	5
CHAPTER 2	Fundamental Principles of Superfluorescent Fiber Sources	6
2.1	Fundamental Principles of Er-SFS	6
2.1.1	Basical knowledge and energy level of Er ³⁺ -doped fiber	6
2.1.2	Fundamental principles for generating superfluorescence in Er ³⁺ -doped fiber	7
2.1.3	Propagation and rate equations	10
2.2	Significant Parameters for Output Performance of Er-SFS	12
2.3	Basical Configurations of SFS	14
CHAPTER 3	Research of Cascade C-band Er-SFS	18
3.1	Simple Introduction of Basical Configurations	18
3.2	Characteristics of One-stage Double-pass Backward and Cascade Double-pass Backward C-band Er-SFS	18
3.2.1	One-stage double-pass backward C-band SFS	18
3.2.2	Comparison between one-stage and two-stage configuration at fiber length L=10m	19
3.2.3	Comparison between one-stage and two-stage configuration around fiber length L=10m	22
3.2.4	Comparison between one-stage and two-stage configuration at fiber length L=34m	26
3.2.5	Comparison between one-stage and two-stage configuration around fiber length L=34m	28
3.3	Summary	29

CHAPTER 4	Research of Cascade L-band Er-SFS.....	30
4.1	One-stage Double-pass Forward L-band Er-SFS.....	30
4.2	Comparison One-stage with Two-stage Configuration for Fiber Length of 19m.....	31
4.3	Summary.....	40
CHAPTER 5	Experiments of Forward-pumped Er-SFS.....	42
5.1	Simple Introduction of Forward-pumped Configuration.....	42
5.2	Experimental Setup.....	42
5.3	Experimental Phenomena.....	43
5.3.1	One-stage double-pass configuration.....	43
5.3.2	Two-stage double-pass configuration.....	47
5.4	Summary.....	55
CHAPTER 6	Conclusions.....	56
	Reference.....	57
	Acknoeledgement.....	59

第一章 绪论

1.1 引言

我们现在所处的时代是个信息化的时代,海量信息的高速传输是信息网络化的技术基础。信息化的到来,首先归功于电子学技术的发展。但是电子学技术均受到电子载体固有特性的局限,其运行能力已表现出严重的“瓶颈”效应。为了克服电子学技术所遇到的困难,光子学技术孕育而生。光电子技术进而又与微电子技术的结合,形成了市场可观、发展潜力巨大的光电子产业,如光纤通信系统。光纤通信、卫星通信、移动通信是并列为上世纪90年代的三大通信技术。到目前光纤通信的应用已遍及长途干线、海底通信、局域网、有线电视等领域。其发展速度之快,应用范围之广,规模之大,涉及学科之多(光、电、化学、物理、材料等),是以前任何一项新技术不能与之相比的。现在光通信的新技术仍在不断涌现,显示出了强大的生命力和广阔的应用前景。

光纤是现代化通信网中传输信息的媒质^[1],以光子或光波代替电子或电磁波作为信息载体是超高速率和超大容量现代信息科技发展中的必然选择。光通信的发展历史十分悠久,早在三千多年前,周朝就有利用烽火台的火光传递信息,直到今天我们仍然可以见到依靠空气进行光信息传输的信号灯,但是这种传输方式严重受限于气候条件、地形地貌、建筑物阻挡和传输距离等等,目前已经让位于光纤通信。光纤在传输中具有良好的噪声控制、更小的信号衰减、更高的带宽以及光纤尺寸小和重量轻等无与伦比的优点,使光纤通信技术具有了通信容量大、中继距离长、抗电磁干扰等优点,并已经成为支撑全世界海量信息交换的最重要的技术支柱之一。

1970年,贝尔实验室研制出能在室温下连续工作的双异质结半导体激光器(GaAlAs)^[2]和美国康宁玻璃公司研制出的传输损耗仅为20dB/km的光纤^[3],这两项关键技术的突破,使得应用光纤进行通信从理想走向现实,从而揭开了光纤通信时代的序幕。到目前为止光纤通信系统已经经历了多次的更新换代。第一代光纤通信的工作波长为短波长850nm波段,传输光纤用多模光纤,光源使用铝镓砷(AlGaAs)半导体激光器,光电检测器为硅(Si)材料的半导体PIN光电二极管或半导体雪崩光电二极管(APD),这一代光纤通信是以1977年美国芝加哥进行的码速率为44.763Mb/s的现场实验为标志。第二代光纤通信的工作波长为1310nm,传输

光纤仍是用多模光纤，该波段是石英光纤的第二个低损耗窗口，相应的光源是长波长的铟镓砷磷/铟磷(InGaAsP/InP)半导体激光器，光电探测器采用锗(Ge)材料。1984年实现了工作波长在1310nm的单模光纤通信系统，这是第三代光纤通信。单模光纤比多模光纤色散低得多，损耗也更小，这代光纤通信广泛地用于长途干线和跨洋通信中。第四代光纤通信应该从80年代中后期开始，通信系统的工作波长为1550nm，传输光纤用单模光纤，1550nm是石英光纤的最低损耗窗口，这代系统目前正处在实用化的高潮阶段。在第四代光纤通信中，具有代表性的技术是掺铒光纤放大器(EDFA-Erbium Doped Fiber Amplifier)和波分复用(WDM-Wavelength Division Multiplex)这两项关键技术。1986年英国南安普教大学研制出的第一只掺铒光纤放大器^[4]，使得可以直接对光信号进行放大，实现全光中继，这在光纤通信发展史中具有里程碑的意义，可与当年用晶体管代替电子管相提并论。而在一根光纤中同时传输多路信号的波分复用技术的提出，充分利用了光纤的带宽资源，大大提高了光纤通信容量。EDFA + WDM使得通信容量大大增加。我们称之为第五代光纤通信则是在现行的通信设备基础上实现更大容量和更长距离的通信。目前，增加光纤通信容量的基本途径有三条：(1)增加每个通信信道的数据传输速率；(2)减少信道间隔(即在有限的带宽范围内增加信道目)；(3)增加传输带宽。其中，增加传输速率如把每个信道的数据传输速率从2.5G/s提高到10G/s，色散对系统的影响会更大，超过10G/s还会引起偏振模色散、高阶色散等不利效应^[5-8]。信道间隔的减小将会伴生非线性效应的增强，信道间隔小于50GHz，四波混频效应的影响将会引起信号在信道间的串扰，必须采取相应的抑制措施；另外，小的信道间隔还要求系统元件具有严格的波长稳定性，带来系统成本的上升。增加传输带宽，需要开发新型超宽带放大器，如增益位移掺铒光纤放大器、掺铒碲化物光纤放大器和分布拉曼光纤放大器以及其它宽带光纤无源器件等。这些问题和技术的突破都尚在研究之中，是目前电信领域研究的热点。下面是对光纤通信技术的未来的展望。

对光纤通信而言，超高速、超大容量、超长距离一直都是人们追求的目标，光纤到户和全光网络也是人们追求的梦想。(1)光纤到户FTTH。现在移动通信发展速度惊人，因其带宽有限，终端体积不可能太大，显示屏受限等因素，人们依然追求性能相对占优的固定终端，希望实现光纤到户。光纤到户的魅力在于它

有极大的带宽，它是解决从互联网主干网到用户桌面的“最后一公里”瓶颈现象的最佳方案。随着技术的更新换代，光纤到户的成本大大降低，不久可降到与DSL和HFC网相当，这使FTTH的实用化成为可能。据报道，1997年日本NTT公司就开始发展FTTH，2000年后由于成本降低而使用户数量大增。美国在2002年前后的12月中，FTTH的安装数量增加了20%以上。但对光纤到户的市场，各公司却各持己见，美国AT&T公司对FTTH并不看好，在OFC2004上该公司认为带宽不是万能，发展应用和内容才是关键，因此在相当的时间内，FTTH的市场可能很小。美国运营商Verizon、Sprint则比较积极，并在OFC2004上介绍了他们发展FTTH的计划和技术方案^[9]。在我国，光纤到户也是势在必行，光纤到户的实验网已在武汉、成都等市开展，预计2012年前后，我国从沿海到内地将兴起光纤到户建设高潮。可以说光纤到户是光纤通信的一个亮点，伴随着相应技术的成熟与实用化，成本降低到能承受的水平时，FTTH的大趋势是不可阻挡的。

(2) 全光网络。传统的光网络实现了节点间的全光化，但在网络结点处仍用电器件，限制了目前通信网干线总容量的提高，因此真正的全光网成为非常重要的课题。全光网络以光节点代替电节点，节点之间也是全光化，信息始终以光的形式进行传输与交换，交换机对用户信息的处理不再按比特进行，而是根据其波长来决定路由。全光网络具有良好的透明性、开放性、兼容性、可靠性、可扩展性，并能提供巨大的带宽、超大容量、极高的处理速度、较低的误码率，网络结构简单，组网非常灵活，可以随时增加新节点而不必安装信号的交换和处理设备。当然全光网络的发展并不可能独立于众多通信技术，它必须要与因特网、ATM网、移动通信网等相融合^[10]。目前全光网络的发展仍处于初期阶段，但已显示出了良好的发展前景。从发展趋势上看，形成一个真正的、以WDM技术与光交换技术为主的光网络层，建立纯粹的全光网络，消除电光瓶颈已成为未来光通信发展的必然趋势，更是未来信息网络的核 心，也是通信技术发展的最高级别，更是理想级别。

衰减是光纤最重要的传输特性之一，引起衰减的原因有光纤对光能量的吸收损耗、散射损耗和辐射损耗。光纤是熔融SiO₂制成的，光信号在光纤中传输时，由于吸收、色散和波导缺陷等机理产生功率半导体激光二极管损耗，从而引起衰减。从单模光纤的衰减谱(即表示衰减和波长的关系)可以看出1500-1650nm波段是衰减最低的一段范围，因此光纤通信主要用的为这一范围，而掺铒光纤的荧光

谱恰好处于这一低损耗窗口,因此使得掺铒光纤光源与相关的理论与技术得到了广泛研究并在光纤通信及光纤传感等相关领域得到了大量应用。

1.2. 掺铒光纤超荧光光源的研究背景

在掺铒光纤超荧光光源出现以前,主要用LED(半导体激光二极管),SLD(超荧光半导体激光二极管)等作为光源,它们有光谱窄或功率极低,或稳定度较低等一些缺点。在光纤无源器件生产测试及众多光纤传感器和光纤探测器中,一般都需要时间相干性低的宽带光源,超荧光具有相干性低的特点。目前商用的宽带光源多为超荧光二极管(SLD),但SLD的寿命较短、波长稳定性差、输出功率低,并且由于空间相干性差,与单模光纤的耦合也受到了限制。由此,人们转向寻求新的光源,而掺稀土光纤光源因此得到提出和研究。由于稀土离子在SiO₂中的固有特性,外界环境的变化,对其光谱特征的影响很小,可望掺稀土光纤光源具有很高的稳定性。此外,光纤光源将输出单模光信号,能与单模光纤进行有效地耦合,从而得到较高的信号功率。通信领域技术的迅猛发展,为掺稀土光纤光源研究,提供了便利的技术基础。例如,早在1985年,掺稀土光纤已问世,而己有的半导体激光二极管,为掺稀土光纤光源提供了理想的泵浦光源,并使光纤光源在结构上具有紧凑性。

掺稀土元素光纤技术的日益成熟,以及泵浦机制的快速发展,为人们提供了一种方便可靠的宽带光纤光源。与SLD相比,掺稀土元素光纤中产生的放大自发辐射(ASE)光源具有温度稳定性强、荧光谱线宽、输出功率高,使用寿命长等特点,在光纤传感系统(如光纤陀螺仪)和某些信号处理、光学层析和医用光学等领域有广泛应用,称之为超荧光光纤光源(SFS)。而通过在光纤中掺杂不同的稀土元素,如Er³⁺、Nd³⁺、Yb³⁺、Pr³⁺、Tm³⁺等,可以很方便地获得众多波段的超荧光输出,以满足各种不同应用的需要。人们最早研究的掺稀土光纤光源是掺钕光纤光源,其输出信号波长在1060nm左右,然而到了1989年,人们则转向了掺铒光纤光源,因为这种光源的输出信号波长在1550nm左右,引言中有提到,单模光纤的衰减谱(即表示衰减和波长的关系)可以看出1500-1650nm波段是衰减最低的一段范围,因此光纤通信主要用的为这一范围,同时在1550nm左右使光纤陀螺系统具有抗辐射的优越性。

由于光源是所有光纤通信和光纤传感中的最基本的源头部分,所以人们一直

未曾停止对其的研究。掺铒光纤光源^[11-15]包括许多种,从大的范围讲,EDFA和掺铒光纤激光器大致上都与之有相同原理及结构,而我们所关注的主要是称之为掺铒超荧光光源(ED-SFS)^[16],也称之为ASE(Amplified Spontaneous Emission)光源,是伴随着掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier-EDFA)出现的一种新型光源,与传统的超发光二极管(SLD)相比具有很好的温度稳定性、输出功率高、光谱稳定、谱线宽、偏振相关性低、受环境影响小、使用寿命长和易于单模光纤传感系统耦合等特点,因此在光纤陀螺、信号处理、光学层析、医学诊断等众多光传感、光探测及DWDM光通信系统、光谱测试以及低成本接入网等领域得到了广泛的应用。

1.3 本文的主要工作

本文的主要工作是从理论和实验两个方面分析单程前向结构和双程前向结构的区别。第一章简单回顾了光纤通信的发展历史和目前所存在的瓶颈问题以及对未来发展的展望,然后对超荧光光源的研究背景和应用特色做了较为详细的介绍。第二章从原理方面加以说明超荧光光源产生的机理,并对超荧光光源的四种基本结构以及衍生出来的几种级联结构做了介绍说明。第三章主要从理论模拟方面对低浓度掺铒光纤单双级后向结构构成的C波段超荧光光源对比分析,结果表明双级结构与单级结构相比在线宽、效率以及中心波长的稳定性方面没有明显的优点。第四章对高浓度掺铒光纤单双级前向结构构成的L波段超荧光光源进行理论模拟分析,结果表明在双级双程结构比单级双程结构在综合中心波长、线宽、输出功率考虑下具有明显优势,并且具有中心波长的稳定性的潜在优点。第五章则从实验方面对第四章的理论分析加以证实,发现实验结果和理论模拟结果相符合。第六章则是对全文的总结。

第二章 超荧光光纤光源的基本原理

2.1 掺铒光纤超荧光光源的基本原理

2.1.1 掺铒光纤的基本概念及能级图

自从1961年E. Snitzer首次发现Nd在玻璃中的激光现象^[19], 稀土离子在晶体中的激光形成受到了人们广泛的研究。目前研究已从Nd推广到了Er, Tm和Yb等离子^[20-22]。稀土元素易形成三价离子, 三价稀土离子的发光主要来自4f电子的跃迁。Er离子4f电子数为11, 虽然其4f电子的能量比5s和5p电子高, 却在原子的内层, 由于在4f电子外面有5s²5p⁶共有8个电子, 两壳层电子均满壳层, 形成较好的电屏蔽, 使基质的配位场对离子影响较小, 这导致了三价稀土离子独特的光谱性质(如掺铒光纤超荧光光源具有较高的内在温度稳定性)。对于稀土离子, 电子间的库仑相互作用和自旋-轨道耦合相当^[23], 因此稀土离子介于L-S耦合和J-J耦合之间。然而对于某一个稀土离子无论处于哪一个能级都具有相同的宇称, 具有相同宇称的两态间的电偶极子矩阵为零(量子数l不变), 这样任意两能级间的偶极子跃迁被禁止, 但对于磁偶极子和电四极子, 虽然光谱强度要弱好几个数量级, 但却是可能的跃迁。当三价稀土离子处在晶体或玻璃中时, 情况就发生了变化, 配位场对激活离子的能级会产生劈裂, 虽然因为5s5p外壳层的屏蔽作用, 使stark能级劈裂较小(其实在SiO₂玻璃中这种劈裂也可大于1000 cm⁻¹), 但它的重要作用在于破坏了离子周围的反演对称性, 而使电偶极子跃迁变为可能, 从而使谱线大大增强。

掺铒光纤是作为一种活性介质而非传输介质, 其制作方法与常规光纤相同, 只是纤芯掺有很多铒离子, 因为ASE辐射及放大是由铒离子完成, 所以使硅光纤中的铒离子的浓度尽可能高是必要的。为了增加铒离子的浓度, 即增加单位硅光纤体积中的铒离子的数目, 制作时尽可能减少掺铒硅光纤的纤芯直径, 就是减少了其模场直径(Mode Field Diameter, MFD, 单位为Pm, 有时掺铒光纤厂商指定的是纤芯直径)。掺铒光纤的模场直径范围大约为3-6pm(常规光纤的MFD的典型范围是9-12um)左右, 在掺杂光纤MFD较小的地方(即有较小的纤芯直径的地方), 作为掺铒光纤放大器时, 铒离子和信号光子之间的碰撞机会增加了, 使得小的纤芯直径增大了放大过程的效率。

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