

学校编码: 10384

分类号_____密级

学号: 23120131153126

UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

掺杂稀土钕离子聚合物光波导放大器的基础研究

The Basic Study on Rare Earth Nd^{3+} Ion Doped
Polymer Optical Waveguide Amplifier

李小龙

指导教师姓名: 张丹 副教授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2016 年 5 月

论文答辩日期: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席:

评 阅 人:

2016 年 5 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):

年 月 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)：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

近年来,有机聚合物材料以其独特的性能、低廉的成本受到越来越多的重视。聚合物光电子器件如阵列波导光栅、电光调制器、光开关和光波导放大器等几乎已经涉及了集成光学的各个领域。光波导放大器的原理是利用掺入光波导中的稀土离子在泵浦光作用下产生受激辐射来实现信号光的放大。本论文以三元钕配合物 $\text{Nd}(\text{TТА})_3(\text{TPPO})_2$ 作为有源材料,制备了硅基聚合物光波导放大器,研究了器件在 1060 nm 波长处的增益特性。所做的具体工作如下:

1. 合成了三元钕配合物 $\text{Nd}(\text{TТА})_3(\text{TPPO})_2$ (HTTA: 2-thenoyltrifluoroacetone, TPPO: triphenylphosphine oxide), 将其掺杂到 SU-8 聚合物中, 制备了掺杂均匀、成膜性能良好的 $\text{Nd}(\text{TТА})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$ 聚合物。对其吸收光谱和荧光光谱进行了测量, 1060 nm 波长处荧光半高宽为 25 nm。

2. 根据 Judd-Ofelt 理论, 结合吸收光谱和发射光谱, 得到了 $\text{Nd}(\text{TТА})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$ 聚合物的吸收截面、发射截面和荧光寿命等发光性能参数; 建立了钕离子四能级结构的原子速率方程和光功率传输方程, 得到了掺钕聚合物光波导放大器的增益理论模型。理论分析了放大器增益性能随 Nd^{3+} 离子掺杂浓度、信号光发射截面、泵浦光吸收截面、荧光寿命等参数的变化关系。分析表明; 当钕离子掺杂浓度为 $5.86 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, 泵浦光波长为 808 nm、功率为 140 mW 时, 放大器器件在 1060nm 处可获得 4.83 dB/cm 的理论增益。

3. 研究探讨了旋涂、溅射铝掩膜层、光刻、显影、反应离子刻蚀等光波导放大器制备工艺条件, 设计并制备了以聚合物 $\text{Nd}(\text{TТА})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$ 材料作为波导芯层材料的光波导放大器器件, 表征了器件的形貌。

4. 搭建了掺钕聚合物光波导放大器的增益测试系统, 并对制备的器件进行了性能测试。采用 808 nm 波长激光器泵浦, 功率为 140 mW 时, 当输入信号光为 1060 nm 波长, 功率为 0.1 mW 时, 在波导截面尺寸为 $4\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$, 长为 20 mm 的器件上获得了 4.8 dB 增益, 即 2.4 dB/cm。

关键词: Nd^{3+} 离子; $\text{Nd}(\text{TТА})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$; 光波导放大器

ABSTRACT

In recent years, organic polymer material has been attracting more and more attention because of its unique performance and its low cost. Polymer optoelectronic devices such as arrayed waveguide gratings, electro-optic modulators, optical switches and waveguide amplifiers has been involved in almost every field of integrated optics. The waveguide amplifier make use of the rare earth ions incorporated into waveguide to generate stimulated radiation under the action of pumping by pump light, finally we achieved the amplification of the signal light. In this paper, we used neodymium ternary complexes $\text{Nd}(\text{TTA})_3(\text{TPPO})_2$ as an active material to prepared the silicon-based polymer waveguide amplifier and studied the characteristics of the device gain in the 1060 nm wavelength. The main researches in this paper are as follows:

1. A neodymium complex, $\text{Nd}(\text{TTA})_3(\text{TPPO})_2$ (HTTA: 2-thenoyltrifluoroacetone, TPPO: triphenylphosphine oxide) was synthesized and doped into the organic polymer SU-8, then the uniform doping and good film forming properties of the neodymium-doped polymer $\text{Nd}(\text{TTA})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$ was obtained. And its fluorescence half width was 25 nm at 1060 nm through measuring its absorption and fluorescence spectra.

2. According to Judd-Ofelt theory, combined with absorption and emission spectra, the absorption cross section, emission cross section, and fluorescence lifetime of $\text{Nd}(\text{TTA})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$ polymer were obtained. The atomic rate equation and the optical power transfer equation of the four level structure of Nd^{3+} ion were established, and the theoretical model of the gain of Nd^{3+} doped polymer optical waveguide amplifier was obtained. Then we analyzed the factors of influencing the gain of optical waveguide amplifier by theoretical simulation at wavelength of 1060 nm. These factors are the concentration of Nd^{3+} ion, the emitting cross section of the signal, the absorption cross section of the pump light, the cross-sectional area,

fluorescence lifetime and other parameters. The analysis showed that: when the concentration of neodymium ions was $5.86 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, the pump wavelength was 808 nm and the pump power was 140 mW, the amplifier device achieved 4.83 dB/cm of the theoretical gain at 1060 nm.

3. We studied and discussed the waveguide amplifier's preparation conditions which were spin coating, sputtering aluminum layer mask, photoetching, development and reactive ion etching. We designed and fabricated waveguide amplifier devices which used the polymer $\text{Nd}(\text{TAA})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$ as the core layer material based on the rectangular structure, finally we characterized the morphology of the device.

4. We constructed optical waveguide coupling gain testing system through which we made the performance testing of the fabricated device. Finally, we got a small-signal gain of 4.8 dB measured in a 20-mm-long sample under these concrete conditions when the concentration of Nd^{3+} was $5.86 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, the pump power was 140 mW, the signal power was 0.1 mW and the sectional dimensions was $4\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$, thus a gain of 2.4 dB/cm was obtained.

Keywords: Nd^{3+} ions; $\text{Nd}(\text{TAA})_3(\text{TPPO})_2/\text{SU-8}$; optical waveguide amplifier

目录

第一章 绪论	1
1.1 集成光学器件	1
1.2 光放大技术发展状况	1
1.3 光放大器的分类及其优缺点	2
1.4 掺铈光波导放大器的分类	5
1.5 掺铈光波导放大器的研究进展	6
1.5.1 无机 NDWA 研究进展	6
1.5.2 有机聚合物 NDWA 研究进展	8
1.6 本论文的主要工作	11
第二章 掺杂稀土铈离子聚合物光波导放大器的理论模型	13
2.1 NDWA 工作原理	13
2.1.1 铈元素的能级结构	13
2.1.2 掺杂稀土铈离子光波导放大器工作原理	14
2.2 Judd-Ofelt 理论	15
2.3 吸收截面和发射截面	16
2.4 NDWA 的理论模型	17
2.4.1 原子速率方程	17
2.4.2 光功率传输方程	19
2.4.3 增益特性计算	19
2.5 小结	21
第三章 掺杂稀土铈离子聚合物光波导放大器的理论模拟	23
3.1 掺杂稀土铈离子聚合物光波导放大器的模拟参数	23
3.2 Nd(TTA) ₃ (TPPO) ₂ 掺杂的 SU-8 聚合物光波导放大器理论模拟	24
3.3 NDWA 在 900 nm 处的增益模拟	30
3.4 小结	33
第四章 掺杂稀土铈离子聚合物光波导放大器的制备与测试	35

4.1 Nd(TTA)₃(TPPO)₂/SU-8 聚合物的制备	35
4.1.1 实验试剂与设备	35
4.1.2 Nd(TTA) ₃ (TPPO) ₂ 三元配合物的制备	36
4.1.3 掺 Nd(TTA) ₃ (TPPO) ₂ 的 SU-8 聚合物薄膜制备	37
4.2 Nd(TTA)₃(TPPO)₂ 掺杂的 SU-8 聚合物光谱特性研究	38
4.2.1 吸收光谱与发射光谱	38
4.3 硅基 Nd(TTA)₃(TPPO)₂/SU-8 聚合物光波导放大器的制备	39
4.3.1 聚合物光波导器件的衬底材料	39
4.3.2 聚合物光波导放大器的制备工艺	40
4.3.3 Nd(TTA) ₃ (TPPO) ₂ /SU-8 光波导放大器的制备工艺	41
4.4 掺钕光波导放大器增益性能测试	45
4.4.1 光波导近场光斑测试	45
3.4.2 增益测试系统	47
4.5 测试增益结果与分析	48
4.5.1 增益测试	48
4.5.2 小信号增益	49
4.5.3 问题分析	51
4.6 小结	52
第五章 总结与展望	53
5.1 本论文主要内容总结	53
5.2 前景展望	54
参考文献	56
攻读硕士学位期间发表的论文	61
致 谢	62

CONTENTS

Chapter	1
Introduction.....	1
1.1 Integrated optics.....	1
1.2 Optical amplification technology development	1
1.3 Classification of the optical amplification.....	2
1.4 Classification of neodymium doped waveguide amplifier	5
1.5 The research progress of neodymium doped waveguide amplifier	6
1.5.1 The research progress of inorganic neodymium doped waveguide amplifier	6
1.5.2 The research progress of organic neodymium doped waveguide amplifier ..	8
1.6 Main contents.....	11
Chapter 2 The theoretical basis of neodymium doped waveguide amplifier	13
2.1 The principle of neodymium doped waveguide amplifier	13
2.1.1 The energy level structure of neodymium	13
2.1.2 The principle analysis of neodymium doped waveguide amplifier.....	14
2.2 Judd-Ofelt theory	15
2.3 Absorption and emission cross-sectional.....	16
2.4 Theoretical model of neodymium doped waveguide amplifier	17
2.4.1 Atomic rate equation.....	17
2.4.2 Optical power transmission equation	19
2.4.3 Gain characteristic calculation.....	19
2.5 Summary	21
Chapter 3 Theoretical simulation of rare earth neodymium ion doped polymer optical waveguide amplifier	23
3.1 Simulation parameters of neodymium doped waveguide amplifier	23

3.2 Theoretical calculation of Nd(TTA)₃(TPPO)₂ doped SU-8 optical waveguide amplifier	24
3.3 Gain simulation of neodymium doped waveguide amplifier at 900 nm.....	30
3.4 Summary	33
Chapter 4 Theoretical simulation of rare earth neodymium ion doped polymer optical waveguide amplifier	35
4.1 The preparation of polymer Nd(TTA)₃(TPPO)₂/SU-8	35
4.1.1 Laboratory reagents and equipment	35
4.1.2 Synthesis of Nd(TTA) ₃ (TPPO) ₂ complex.....	36
4.1.3 The preparation of polymer film of Nd(TTA) ₃ (TPPO) ₂ doped SU-8.....	37
4.2 Spectral characteristics research of Nd(TTA)₃(TPPO)₂ doped SU-8	38
4.2.1 Absorption and emission spectra	38
4.3 The preparation of silicon-based Nd(TTA)₃(TPPO)₂/SU-8 polymer waveguide amplifier device	39
4.3.1 Substrate material of polymer optical waveguide device.....	39
4.3.2 The preparation methods of polymer planar optical waveguide amplifier..	40
4.3.3 The preparation methods of Nd(TTA) ₃ (TPPO) ₂ /SU-8 optical waveguide amplifier.....	41
4.4 The gain performance testing of Neodymium doped waveguide amplifier	45
4.4.1 Optical waveguide near-field spot testing system	45
4.4.2 Gain testing system.....	47
4.5 Gain test and result analysis.....	48
4.5.1 Gain test.....	48
4.5.2 The small signal gain	49
4.5.3 Analysis of problems	51
4.6 Summary	52
Chapter 5 Summary and Outlook.....	53
5.1 The summarizes of this paper's main content	53
5.2 Prospect	54

Reference.....	56
Published Paper List.....	61
Acknowledgements	62

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 集成光学器件

集成光学是当今光学和光电子学领域的发展前沿之一，它主要研究集成在一个平面衬底上的光学器件以及光电子学领域的理论、技术和应用，是光学发展的必由之路和高级阶段。“集成光学”的概念是由美国贝尔实验室科学家 1969 年^[1]最先提出的，发展迅速，成为当今光电子学领域的发展前沿之一。1972 年 Somekh 和 Yarive 提出了在同一半导体衬底上同时集成光器件和电子器件的想法^[2]。随着信息高科技时代的到来，在“集成光学”自身理论、材料、工艺、器件及应用等诸方面飞速发展的同时，又不断地从光学、微电子学、光电子学、通讯、薄膜材料等学科的发展中汲取丰富的养料，使得“集成光学”焕发生机活力，成为 21 世纪经济新增长点之一。

20 世纪 70 年代后期，伴随着一些新材料与新工艺的涌现，集成光学逐渐地由实验室走入人们生活应用中。这些新工艺与新材料包括：低损耗光纤和接头的发展、GaInAsP 激光二极管的问世，以及制作更小尺寸如亚微米线宽的光刻微加工新技术。集成光学有以下优点：1. 集成光学集中发展了光学和微电子学的固有技术优势；2. 将传统的由分立器件构成的庞大的光电系统变革为集成光学系统；3. 集成光学系统具有高宽度、高速、高可靠性、体积小、重量轻、抗电磁干扰等优点；4. 可以被广泛用于光通信、光信息处理、光传感技术、电子对抗、光子对抗、光子计算机等高技术领域。

将大量的光学器件像集成电路中三极管一样集成在半导体或者光学波导等晶片衬底上，能促进集成光学领域的发展，其中，光放大器能够补偿各类光学器件的损耗，因此在集成光路中起着重要的信号放大作用。

1.2 光放大技术发展状况

光通信作为一门新兴技术，应用非常广泛，是未来信息社会中各类信息的关键传输工具。随着全光通信的进一步研究，全光通信网的实现必将有利于高速、大容量的数字通信。而在光通信中，光放大器技术有着能够弥补在光传输系统中存在的损耗的关键作用。

与有线通信系统一样，在光通信系统中，每隔一定间距就需要用中继器来放大信号，用来补偿光信号的色散和散射等各种损耗。在传统的光波系统中，这一放大功能是通过这样方式来实现的：首先用光探测器(也叫光检测器)将光信号转变为电信号，然后对其进行电放大有助于传输，最后用激光器或者高速发光二极管即 LED 将电信号变回光信号，即需要通过光-电-光两个转换过程来完成的。这种电光-光电放大需要用到额外的部件，降低了信号传输系统的稳定性和可靠性，这是因为每个部件都会有过早损坏的概率出现，另外电放大还会限制光纤系统的总带宽^[3]。为了克服这个过程出现的难题，研究人员研究并开发了一系列不同类型的光放大器，这些种类放大器可以直接放大光信号而不需要将它们转变为电信号。最为广泛使用的光放大器有：掺铒光纤放大器 (EDFA: Er-Doped Fiber Amplifier)、半导体光放大器 (SOA: the Semiconductor Optical Amplifier)和拉曼光纤放大器 (FRA: Raman Fiber Amplifier)。

其中 EDFA 已经实现了大规模商用化，它的诞生是光通信领域具有革命性的发展突破，具有长距离、大容量、高速率等优点，是全光网络不可或缺的重要器件。它是 Mears 等人在 1987 年研制出的，可以极大提高光通信的传输距离。EDFA 工作波长为 1550 nm，和光纤的低损耗波段范围一致并且技术成熟能被广泛运用；EDFA 是一种全光放大器，不需要光电-电光的这种中间转换过程，可以对光信号直接放大，避免了传输过程中的各种损耗。

1.3 光放大器的分类及其优缺点

目前光放大器主要分为掺稀土元素光纤放大器、非线性光纤放大器、半导体放大器和光波导放大器四类。近些年来国内外的科研工作者在光放大器领域尤其是稀土元素光纤放大器展开了广泛而深入的理论研究与实验过程，不仅在实验阶段，而且在实际应用中都取得了很多成果。

(一) 半导体光放大器

半导体光放大器是以半导体材料作为增益介质，能对外来光子进行放大或提供增益的光电子器件。具体是：在 PN 结区，前向注入电流产生电子空穴对，在导带和价带之间实现粒子数反转；而后的载流子复合引起辐射发光，这个过程是由信号波长的光子受激辐射激发的；由于受激辐射，导带中的一个电子和价带中的一个空穴复合发射一个光子，这样就放大了输入信号。

半导体光放大器和半导体激光器的主要区别之处在于产生光的过程不同。在放大器里,从外部的光源产生信号光从而导致受激辐射;而在一个普通的激光器中,用到的则是产生于本身的自发辐射。半导体光放大器具有以下优点:体积小,泵浦结构简单,功耗低,反应速度快,具有很大的增益带宽,可与其他有源和无源光电子器件进行混合或者单片集成,可批量生产。其缺点主要是:与光纤进行耦合时,芯片两端与光纤的耦合损耗比较大,均在 3 dB 以上;不同波长的通道间存在较强的交叉增益调制与非线性,很容易受到环境的影响,从而其应用领域会受到限制^[4]。随着全光网络发展应用,半导体光放大器技术必将会有越来越广泛的应用。

(二) 非线性光纤放大器

非线性光纤放大器(NFA: Nonlinear fibre amplifier)^[5]是固体激光放大器的一种,在对光纤注入泵浦光时,会使得声子数目增加,当激光信号通过非线性光纤时,其中的光子与声子相互作用,最终使得光子数量增多。非线性光纤放大器可分为受激拉曼光纤放大器和受激布里渊光纤放大器两种。

其中受激拉曼光纤放大器是一种可在光纤全波长段内放大的放大器,可以利用多个泵浦,合理选择泵浦功率和波长能够实现比较宽而且平坦的增益谱。受激拉曼光纤放大器其优点主要是: 1. 因其增益介质就是传输光纤本身,降低了成本; 2. 能够实现分布式放大,实现长距离传输和远程泵浦,特别适合海底、沙漠等偏远的地方; 3. 可以减少非线性效应、并且进行色散补偿。正是由于这些优点,受激拉曼光纤放大器具有较好的应用前景,近年来引起人们广泛地关注,正逐步实现商业化。

(三) 掺稀土元素光纤放大器

掺稀土元素光纤放大器是将浓度很小的稀土元素通过特殊工艺掺入光纤的纤芯之中,稀土元素主要是镧系元素如铒(Er)、镨(Pr)、钕(Nd)、镱(Yb)或铥(Tm)等元素。它的原理是掺杂离子的光纤受到泵浦光激励之后跃迁到高激发态,受信号光的触发下,产生受激辐射现象,使辐射叠加到信号光上而实现对信号光的直接放大^[6]。由于掺稀土元素光纤放大器具有制备工艺简单、工作波长位于光通信的最佳波长区域范围(1.3~1.6 μm)、噪声低、增益高、频带宽、耦合损耗也小、所需泵浦功率较低等显著优点,在近几十年来获得了高速迅猛发展。

同时,掺稀土元素光纤放大器的成熟与商用化很大程度上促进了远距离传输的光通信系统以及波分复用系统等重要技术的长远发展^[7]。其中,掺铒光纤放大器应用最广泛,也已经实现了商业化,它的工作波长大概在 1530~1560 nm,波长对应于第三个“通信窗口”,而且其泵浦光源很方便获得。

EDFA、掺铥光纤放大器 (TDFA: Thulium Doped Fiber Amplifier)、掺镨光纤放大器 (PDFA: Praseodymium Doped Fiber Amplifier)等^[8,9]是当前掺稀土元素光纤放大器研究的重点。EDFA 发射波长处于光通信最低损耗窗口(1550 nm),它们在通信领域有着非常巨大的应用潜力。EDFA 是光纤通信领域具有革命性的研究成果,具有较高的增益和效率,泵浦阈值和噪声均比较低,且对偏振串扰不敏感,线性输出饱和,温度稳定性高,光纤接入性能优越;是密集型光波复用系统及全光网络不可或缺的重要器件。EDFA 作为理想的中继放大器和功率放大器已广泛应用于通信领域^[10]。EDFA 波长固定,增益带宽不平坦,需要增益补偿,且集成模块的尺寸大,在光电子集成和集成光路领域的应用受到限制。

TDFA 主要应用在 1450 nm 波段,在未来光纤接入网稀疏波分复用器系统具有非常大的潜力。2005 年,加拿大皇后大学教授 Scott S.-H. Yam 等人^[11]通过制备一种新型氟化 TDFA,使用 42 mW 的 690 nm 和 80 mW 的 1050 nm 双波长的泵浦方式,在输入信号功率为 35 dBm 的条件下获得了近 20 dB 的信号增益。随着光通信网络系统容量的不断扩大,人们对于光网络提出多功能化的需求,对于开发 1450 nm 波段的实际应用寄予厚望。

PDFA 发光波长 1300 nm,恰好处于光通信的零色散窗口;PDFA 能够满足 1300 nm 波导的放大要求,这对于遍及世界的工作在 1.3 um 波长零色散窗口的光通信网络来说,具有重要的现实意义。PDFA 的进一步深入研究发展对宽带多波长光纤网络系统领域具有重大作用。

(四) 掺稀土光波导放大器

集成光学领域中,研究人员对于在特定介质材料上集成各种光学器件更感兴趣,因此,光波导应用而生。1969 年,Miller 首先提出在介质材料上实现复杂的集成光学器件的设想^[12]。之后光波导放大器的研究也越来越深入,尤其是掺稀土元素光波导放大器 (RDWA: Rare earth doped waveguide Amplifier),成为了当前光放大器的研究热点之一。RDWA 是将稀土元素离子作为增益介质掺杂到玻

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.