

钇镱共掺磷酸盐玻璃波导放大器及上转换性质*

张 丹¹ 刘 克² 张大明^{1,†} 程传辉¹ 张希珍¹ 张海明¹ 潘裕斌²

(1 集成光电子学国家重点实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

(2 香港城市大学电子工程系, 香港 00852)

摘要: 研究了采用离子交换和电场辅助退火法制作的钇镱共掺磷酸盐波导放大器的增益特性, 测量了 Er_2O_3 , Yb_2O_3 掺杂浓度分别为 2.2wt% 和 4.7wt%, 长度为 1.2cm 的器件增益, 在 130mW, 976nm 泵浦光泵浦下, 输入信号光功率小于 1mW 时, 在 1535nm 处得到 8.5dB 的小信号相对增益; 当泵浦功率为 30mW 时, 可观测到绿色的上转换辐射光, 发光强度随泵浦功率增加而增大; 通过单色仪和光电倍增管接收此光, 确定是钇粒子由 $^2H_{11/2}$ 和 $^4S_{3/2}$ 能级分别跃迁至基态的上转换辐射光.

关键词: 钇镱共掺波导放大器; 光增益; 上转换

PACC: 4280L

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)10-1857-04

1 引言

近年来, 工作于 1550nm 光通信波段的掺钇波导放大器(EDWA)以其结构紧凑、体积小、可产生高增益、适合短距离传输等优点备受关注, 目前用于制作 EDWA 的材料分为无机和有机聚合物两大类. 无机基质材料主要有磷酸盐和硅酸盐玻璃^[1], 1997 年荷兰 Yan 等人^[2]制备了具有 4.1dB/cm 增益的磷酸盐 EDWA; 2002 年韩国 Han 等人^[3]制备的硅酸盐 EDWA 获得了 7dB/cm 的增益. 用无机材料制作 EDWA 具有波导损耗低、基质材料是钇的良好宿主^[4]等优点, 但在结构和工艺上与硅基材料不是很相容, 在光集成应用方面前景不是很好^[5]; 2004 年 Wong 等人^[6]制作的钇镱共掺聚合物波导放大器获得了 7.2dB/cm 的增益. 目前用有机聚合物材料制作的 EDWA 具有工艺简单、易于耦合等优点, 但将稀土元素溶于聚合物仍是个难点, 国内外的研究大都处于材料制备阶段. 本文研究了用 976nm 半导体激光器单向泵浦钇镱共掺磷酸盐波导放大器, 报道了增益测试结果, 并研究了在测量过程中观测到的上转换现象.

2 基本原理

钇镱共掺磷酸盐波导放大器的放大机理如图 1 所示. Er^{3+} 粒子吸收 976nm 泵浦光能量从基态跃迁

到 $^4I_{11/2}$ 能级, 由此能级非辐射衰减至 $^4I_{13/2}$ 能级, 再从 $^4I_{13/2}$ 能级辐射衰减至基态, 发出 1530nm 的光, 由于 Yb^{3+} 粒子 $^2F_{5/2}$ 能级的能量与 Er^{3+} 粒子 $^4I_{11/2}$ 能级能量相当, 当 Yb^{3+} 吸收 976nm 波长的光从基态跃迁到 $^2F_{5/2}$ 能级时, 能量可以转移给临近的 $^4I_{11/2}$ 能级上的 Er^{3+} 粒子, 增加了 Er^{3+} 由高能级向基态能级跃迁的几率^[7].

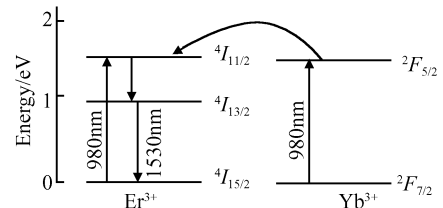


图 1 钇镱能级能量传递图

Fig.1 Energy level diagram of Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped system

影响放大器特性和泵浦效率的主要因素包括钇掺杂浓度、频率上转换等. 如图 2 所示频率上转换有三种主要的机制: 激发态吸收(excited state absorption)、能量转移(energy transfer)和光子雪崩(photon avalanche upconversion)过程. 激发态吸收是处于激发态的 Er^{3+} 粒子, 吸收声子向更高能级跃迁过程. 能量转移就是一个激发态 Er^{3+} 粒子将其能量转移给一个基态 Er^{3+} 粒子的过程. 光子雪崩过程如图 2(c)所示: 位于高能级 E_2 上的 Er^{3+} 粒子非辐射衰减到较低能级 E_1 时将能量转移给临近的基态

* 国家自然科学基金(批准号:60507004), 新世纪优秀人才支持计划和吉林省科技发展计划(批准号:20050110)资助项目

† 通信作者. Email: zhangdm@mail.jlu.edu.cn

2006-01-13 收到, 2006-04-20 定稿

Er^{3+} 粒子,使其向 E_1 跃迁的过程,可见,光子雪崩是能量转移和激发态吸收相结合的过程. Yb^{3+} 的加入使得能量转移和激发态吸收成为铒镱共掺体系的主要上转换机制.

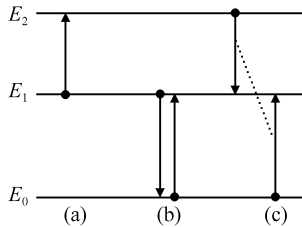


图 2 上转换机制示意图 (a) 激发态吸收; (b) 能量转移; (c) 光子雪崩

Fig. 2 Schematic of three different upconversion mechanisms in Er^{3+} (a) Excited state absorption; (b) Energy transfer; (c) Photon avalanche upconversion

3 实验

3.1 器件制备

采用两步离子交换法制作铒镱共掺波导,第一步是将 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂浓度为 $\text{Er}_2\text{O}_3 : 2.2\text{wt}\%$ 和 $\text{Yb}_2\text{O}_3 : 4.7\text{wt}\%$ 的磷酸盐玻璃用有机溶剂清洗后,在超净室使用 EDWARDS Auto 306 热蒸发器沉积铝掩膜 180nm; 然后用标准的微制作过程和湿刻蚀法制作出条宽分别为 $6\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$ 的铝薄膜波导窗口; 之后在熔融的 KNO_3 中进行 $\text{K}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换(交换温度: 385°C , 时间: 1h), 冷却至室温后去除掩膜, 并将波导端面抛光; 第二步用电场辅助退火(field-assisted annealing)的方法制作掩埋型波导以降低表面散射损耗并优化波导与光纤的耦合损耗. 具体实验过程如下: 在离子交换过的磷酸盐玻璃样品的上下表面分别用同样的热蒸发方法蒸镀 200nm 厚的铝和 150nm 厚的金薄膜作为正负电极, 在第一步离子交换温度 380°C 附近 (2°C 的控温误差), 控制加热电场, 退火时间为 30min, 然后再次冷却至室温, 完成掩埋型铒镱共掺磷酸盐玻璃波导的制备^[9]. 制作完成后在微调架上与光纤端面耦合, 测量器件的增益特性.

3.2 增益测试系统

增益测试是在室温下进行的. 实验中的信号光由可调激光器获得(Santec 公司, 型号为 TSL-210), 增益测试装置如图 3 所示, 测试系统包括泵浦源、两个隔离器、铒镱共掺玻璃波导样品、980nm/1550nm 耦合器和光谱分析仪, 泵浦光由发光波长为 976nm 的半导体泵浦激光器激发, 功率可调范围 3 ~

150mW, 光谱分析仪型号为 ANDO AQ-6315A, 用于接收输出光.

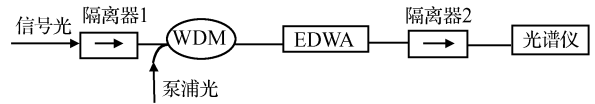


图 3 增益测试系统结构示意图

Fig. 3 Experimental setup for measuring the optical gain of the waveguide amplifiers

4 结果与讨论

4.1 增益测试

实验测量了掺杂浓度为 $\text{Er}_2\text{O}_3 : 2.2\text{wt}\%$ 和 $\text{Yb}_2\text{O}_3 : 4.7\text{wt}\%$ 的铒镱共掺磷酸盐波导放大器样品, 得出了在不同输入信号功率和泵浦功率下器件的增益变化情况. 图 4 为在不同功率的 976nm 激光器泵浦下, 增益随信号功率变化示意图.

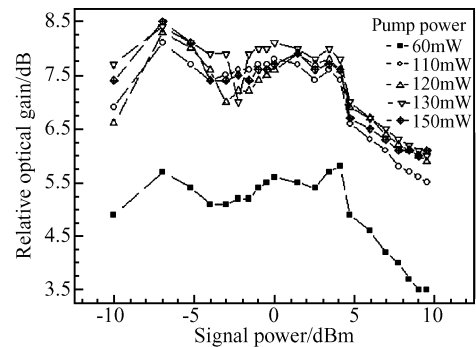


图 4 增益随信号光功率变化图 信号光波长: 1535nm; 泵浦光波长: 976nm; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+} : 1/2$; 器件长度: 1.2cm

Fig. 4 Gain versus signal power for a 1.20cm-long waveguide amplifier with different pump powers The ratio of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ is 1/2.

图 4 表明, 对于不同的泵浦功率, 信号光功率小于 1mW 时该器件可获得较大的增益. 当泵浦功率为 150mW, 输入信号功率 0.2mW 时, 可获得 8.5dB 的小信号相对增益. 这是因为信号功率较小时, 随着泵浦功率的增加, 上下能级粒子数反转度很高, 增益能够达到较高的值. 随着信号功率增加, 放大的自发辐射背景噪声增大, 较多上能级粒子数被消耗, 故增益逐渐下降^[10].

图 5 为该器件增益随泵浦功率变化示意图, 从图上看, 对于变化范围为 0.2~9mW 的输入信号光功率, 放大器增益随泵浦光功率增加而增大. 对于相同的泵浦功率, 0.2mW 的小信号输入功率可获得相对较大的增益.

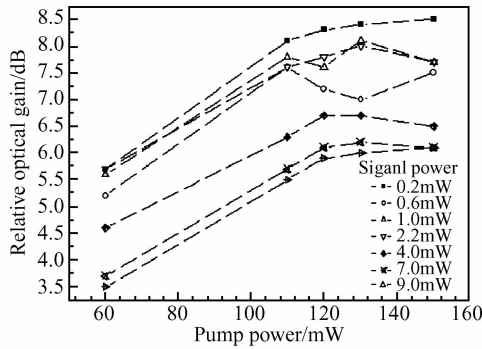


图 5 增益随泵浦光功率变化图 信号光波长:1535nm;泵浦光波长:976nm;Er³⁺/Yb³⁺:1/2;器件长度:1.2cm
Fig. 5 Gain versus pump power for a 1.20cm-long waveguide amplifier with different signal powers The ratio of Er³⁺/Yb³⁺ is 1/2;λ_s = 1535nm;λ_p = 976nm

4.2 频率上转换

在增益测量过程中,泵浦功率为 30mW 时可观测到波导中沿光传输方向有明显的绿色发光现象.图 6 为在 60mW 泵浦光泵浦下,波导中的发光照片.

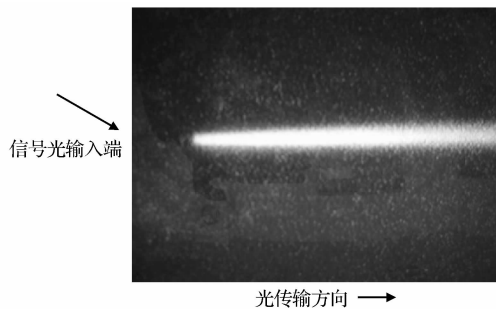


图 6 波导中的绿色上转换辐射光 信号光波长/功率:1535nm/3mW
Fig.6 Image of green emission of Er³⁺ in waveguide The signal power is 3mW at 1535nm.

采用单色仪和光电倍增管记录发光波长和强度:器件发出的绿色可见光经透镜聚焦后光线入单色仪、光电倍增管,最后由计算机记录数据^[11].图 7 为上转换发光强度随波长变化曲线,图中正方形图标曲线为测得的发光强度随波长变化曲线,空心圆形图标线为背景光.从图中可以看出在 525 和 545nm 处有较强的发光,可以推断这正是捕捉到的绿光波长.

在 976nm 泵浦光泵浦下,铒能级上转换主要是由激发态吸收和能量转移造成的,位于⁴I_{11/2}能级上的 Er³⁺ 粒子,将能量传递给相邻粒子,使其跃迁到²H_{11/2}和⁴F_{7/2}能级,由于⁴F_{7/2},²H_{11/2},⁴S_{3/2}小的能量间隔,Er³⁺ 粒子很快由⁴F_{7/2}能级非辐射衰减到²H_{11/2},⁴S_{3/2}能级,位于⁴S_{3/2}能级上 Er³⁺ 粒子可直接

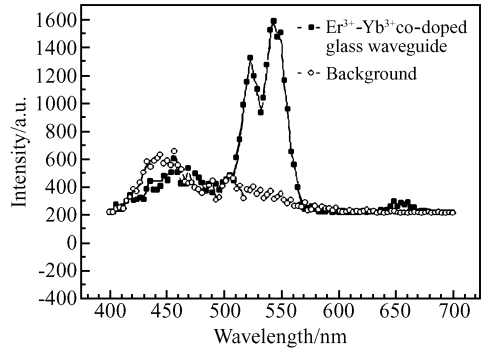


图 7 上转换发光强度随波长变化曲线 泵浦光波长/功率:976nm/60mW;信号光波长/功率:1535nm/3mW
Fig.7 Luminescence spectra of upconversion in Er³⁺-Yb³⁺ co-doped phosphate glass waveguide pumped with 976nm laser at 60mW The signal power is 3mW at 1535nm.

辐射衰减至基态发出波长为 545nm 的光;位于²H_{11/2}能级上的 Er³⁺ 粒子部分辐射衰减至基态时发出 520nm 的光,部分非辐射衰减至⁴S_{3/2}和⁴F_{9/2}能级,再由此二能级辐射衰减至基态,发出 545 和 660nm 的光^[8],对于铒镱共掺磷酸盐体系,Yb³⁺ 吸收 976nm 泵浦光能量,跃迁到²F_{5/2}能级,辐射跃迁回基态时部分能量使⁴I_{15/2}能级上的 Er³⁺ 被激发到⁴I_{11/2}能级,部分能量传递给临近的铒⁴I_{11/2}能级,完成从⁴I_{11/2}到²H_{11/2}能级的上转换,再由²H_{11/2}到⁴S_{3/2},⁴F_{9/2}能级的非辐射衰减以及由²H_{11/2},⁴S_{3/2},⁴F_{9/2}到基态能级的辐射衰减过程,可见,Yb³⁺ 的引入增加了 Er³⁺ 由激发态向基态跃迁的同时也增加了 Er³⁺ 的上转换几率,如图 8 所示.

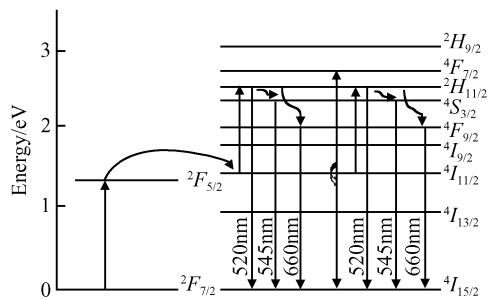


图 8 Er³⁺-Yb³⁺ 上转换能级图
Fig. 8 Possible upconversion mechanisms of Er³⁺-Yb³⁺ co-doped system

实验中基本没有探测到由⁴F_{9/2}辐射跃迁到基态发出的 660nm 红光,考虑其原因是由于 Er³⁺ 在⁴I_{13/2}的弛豫时间为毫秒量级,Er³⁺ 在⁴I_{11/2}的激发态吸收几率远大于在⁴I_{13/2}能级上的,而 660nm 的光大都是由⁴I_{13/2}吸收声子或能量,跃迁到⁴F_{9/2}能级,再辐射衰减到基态发出的.

5 结 论

研究了用离子交换和电场辅助退火法制备的钇镱共掺磷酸盐波导放大器在室温下的增益放大和频率上转换现象. 对于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂浓度为 Er_2O_3 : 2.2wt% 和 Yb_2O_3 : 4.7wt%, 长度为 1.2cm 的器件, 输入信号光功率为 0.2mW, 泵浦功率为 150mW 时, 在 1535nm 处获得 8.5dB 的小信号相对增益. 当泵浦功率为 30mW 时, 可观测到明显的频率上转换现象, 采用单色仪和光电倍增管接收此光, 分析波长, 可以肯定的是 Er^{3+} 粒子由 $^2H_{11/2}$ 和 $^4S_{3/2}$ 能级分别跃迁至基态发出的上转换辐射光.

参 考 文 献

- [1] Li Weinan, Zou Kuaisheng, Shen Hua, et al. Investigation on spectrum characteristic of basic glass applied to EDWA. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6): 693 (in Chinese) [李玮楠, 邹快盛, 沈华, 等. EDWA 用基础玻璃的光谱特性研究. *光子学报*, 2004, 33(6): 693]
- [2] Yan Y C, Faber A J, de Waal H, et al. Erbium-doped phosphate glass waveguide on silicon with 4.1dB/cm gain at 1.535 μm . *Appl Phys Lett*, 1997, 71(20): 2922
- [3] Han H S, Seo S Y, Shin J H, et al. Coefficient determination related to optical gain in erbium-doped silicon-rich silicon oxide waveguide amplifier. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(20): 3720
- [4] Tian Hebin, Yang Tianxin, Wang Yongqiang, et al. Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped glass waveguide amplifiers for optical communication system. *Study on Optical Communications*, 2002, 113(5): 58 (in Chinese) [田贺斌, 杨天新, 王永强, 等. 光通信用 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺玻璃波导放大器. *光通信研究*, 2002, 113(5): 58]
- [5] Slooff L H, van Blaaderen A, Polman A, et al. Rare-earth doped polymers for planar optical amplifiers. *J Appl Phys*, 2002, 91(7): 3955
- [6] Wong W H, Pun E Y B, Chan K S, et al. Er^{3+} - Yb^{3+} codoped polymeric optical waveguide amplifiers. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(2): 176
- [7] Zou Kuaisheng, Lu Min, Li Weinan, et al. Absorption and luminescence properties of Er^{3+} : Yb^{3+} lithium silicate glasses. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 842 (in Chinese) [邹快盛, 陆敏, 李玮楠, 等. 钇镱共掺锂硅酸盐玻璃的光谱性质. *光子学报*, 2004, 33(7): 842]
- [8] Van den Hoven G N, Snoeks E, Polman A, et al. Upconversion in Er-implanted Al_2O_3 waveguides. *J Appl Phys*, 1996, 79(3): 1258
- [9] Liu Ke, Pun E Y B. K^+ - Na^+ ion-exchanged waveguides in Er^{3+} - Yb^{3+} codoped phosphate glasses using field-assisted annealing. *Appl Opt*, 2004, 43(15): 3179
- [10] Yang Xianglin. *Optical amplifier and its application*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000 (in Chinese) [杨祥林. 光放大器及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2000]
- [11] Song Jien, Guo Yong, Yang Guangqiang, et al. Experiment of upconversion luminescence based on Er^{3+} - Yb^{3+} codoped fiber gratings. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 357 (in Chinese) [宋继恩, 郭勇, 杨广强, 等. 基于钇镱共掺光纤光栅光学上转换的实验研究. *光学技术*, 2005, 31(3): 357]

Optical Gain and Upconversion in Er^{3+} - Yb^{3+} Co-Doped Phosphate Glass Waveguide Amplifiers*

Zhang Dan¹, Liu Ke², Zhang Daming^{1,†}, Cheng Chuanhui¹, Zhang Xizhen¹,
Zhang Haiming¹, and Pan Yubin²

(1 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 00852, China)

Abstract: An Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped phosphate glass waveguide for applications in optical amplifiers is studied. The optical gain at the wavelength of 1535nm is measured, and an 8.5dB relative gain in a 1.2cm device is observed when the waveguide is pumped with a 976nm laser with 130mW of power. In this case, the device shows strong green luminescence, and the intensity increases as the power of the pump laser increases. Also, upconversion from $^2H_{11/2}$ and $^4S_{3/2}$ levels is confirmed by using a photomultiplier and a monochromator.

Key words: Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped waveguide amplifier; optical gain; upconversion

PACC: 4280L

Article ID: 0253-4177(2006)10-1857-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60507004), the Joint Program of New Century Excellent Talents in University, and the Science & Technology Development Program of Jilin Province (No. 20050110)

† Corresponding author. Email: zhangdm@mail.jlu.edu.cn

Received 13 January 2006, revised manuscript received 20 April 2006