

文章编号: 0253-2239(2003)07-0815-4

Er³⁺, Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃沟道波导放大器

陈海燕^{1,2*} 戴基智¹ 杨亚培¹ 官周国^{1,3} 刘永智¹

1 电子科技大学光电信息学院宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 成都 610054
2 江汉石油学院理学院, 荆州 434023
3 西南技术物理研究所, 成都 610041

摘要: 在自行研制的 Er³⁺, Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃基质上用离子交换方法制作出沟导光波导放大器。在 110 mW 的抽运功率下(抽运光波长为 980 nm), 在 1.8 cm 长的器件上获得了 3.8 dB 的小信号(信号光波长为 1.55 μm)增益, 单位长度上的增益为 2.1 dB/cm。

关键词: 导波光学; 光波导放大器; Er³⁺, Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃; 离子交换

中图分类号: TN24; TN252 文献标识码: A

1 引 言

和电通信的发展模式相仿, 光通信器件集成化是现代光通信的发展方向。工作于 1.55 μm 光通信窗口的掺铒(Er³⁺)集成光波导放大器是继掺铒光纤放大器、半导体光放大器之后的又一新型放大器, 近些年来引起了人们极大的兴趣^[1~4]。用作集成光波导放大器的激光介质有掺铒铈酸锂、掺铒硅酸盐玻璃和掺铒磷酸盐玻璃等^[3]。

研究表明^[5~6]磷酸盐玻璃是 Er³⁺ 的良好基质, 可进行高浓度掺杂。虽然 Er³⁺ 在磷酸盐玻璃中具有较大的发射截面, 但对波长为 980 nm 的抽运光来说, 其吸收截面较小, 可用镱(Yb³⁺)与之共掺杂来弥补这一不足。因而铒、镱(Er³⁺, Yb³⁺)共掺磷酸盐玻璃波导放大器(EYCDWA)成了研究热点^[7~9], 法国 Teem Photonics 公司的产品用的就是 Er³⁺, Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃这一激光玻璃材料^[10]。本文报道我们在这一方面所做的工作。

2 Er³⁺, Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的工作原理

Er³⁺, Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃的信号放大作用是利用光波导中掺入的铒离子在抽运光作用下的受激辐射来实现的。图 1 为 Er³⁺, Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃

波导放大器工作原理图。信号光和抽运光经过波分复用器进入光纤, 然后耦合入波导(增益介质), 经过波导后, 信号光得到放大, 再经过光纤耦合输出。

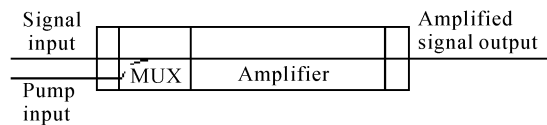


Fig. 1 Principle diagram of amplifier. MUX: Multiplexer

图 2 为 Er³⁺, Yb³⁺ 共掺系统的能级及 Er³⁺, Yb³⁺ 相互间能量转换示意图。在 Er³⁺, Yb³⁺ 共掺系统中, Yb³⁺ 吸收绝大部分抽运光能量, 然后把能量快速传递给邻近的 Er³⁺, 磷酸盐玻璃基质中较大的声子能量增加了从 ⁴I_{11/2} → ⁴I_{13/2} 的跃迁几率, 这就阻止了从 Er³⁺ → Yb³⁺ 的能量反向传递^[11]。用于 Er³⁺ 掺杂的 Yb³⁺ 离子有三个特点: 1) Yb³⁺ 是典型的二能级系统。其受激态能级 ²F_{5/2} 能有效地把能量传递给 Er³⁺ 的 ⁴I_{11/2}; 2) Yb³⁺ 的离子半径与 Er³⁺ 的离子半径相近, 每个 Er³⁺ 离子周围有几个 Yb³⁺

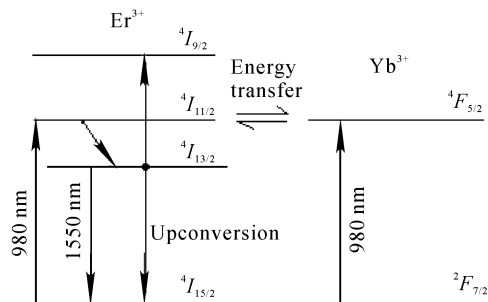


Fig. 2 Energy level diagram of the Yb³⁺, Er³⁺ codoped system

* E-mail: uestcchy0470@sina.com.cn

收稿日期: 2002-06-11; 收到修改稿日期: 2002-08-02

离子,使能量转换更有效;3) 与 Er^{3+} 一样, Yb^{3+} 也有聚集行为。由于两者相似,聚集即使发生的话,也不是在两个或多个 Er^{3+} 离子中间,而是在一个 Er^{3+} 离子和多个 Yb^{3+} 离子中间。这些特性增强了从 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量转换效率,减小了 Er^{3+} 离子的上转换。从而提高了抽运效率和系统的增益特性,降低了系统的噪声指数。

3 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的制作

3.1 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃的制备

铒,镱共掺磷酸盐玻璃采用纯度为 99.5% 的 P_2O_5 , 99.95% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ 为原料,原料中的铁、钴、镍和铜等过渡金属离子的含量均在 10^{-6} 量级。其中 R_2O 为 Na, K 碱金属氧化物。为获得三元系统玻璃的形成区,先确定二元系统的形成区,然后以质量分数每次增加 0.05 的 R_2O 进行玻璃形成实验。按配方精确称料总量 50 g,将其混合均匀后加入石英坩锅中,经充分反应、干燥后,置于 $1250\sim 1350\text{ }^\circ\text{C}$ 的硅碳电阻炉内熔融通入氮气和氧气以及 PClO_3 , 并加以搅拌、澄清。

同时对铒离子的荧光寿命进行监测,当铒离子的荧光寿命增加到 7.5 ms 时,将制得的玻璃液浇注到预热的模具中,然后放入预热的马弗炉中恒温放置 40 min,再以 $10\sim 15\text{ }^\circ\text{C/h}$ 的速率降温到 $300\text{ }^\circ\text{C}$,断电自然冷却到室温。取出玻璃优选光学均匀性好的部分进行精密退火,退火后的玻璃毛坯加工成实验所需的尺寸。

将上述熔制的玻璃加工成样片。用排水法测定玻璃样品的密度,用 V 型棱镜折射仪测其折射率 n ,用差热分析法测得其转变温度。测得玻璃样品的密度为 2.9 g/cm^3 ; 折射率为 1.5288, 转变温度为

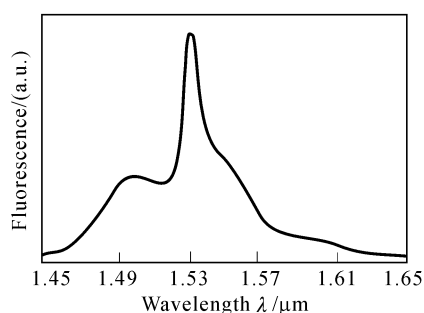


Fig. 3 Fluorescent spectrum of Er^{3+} , Yb^{3+} codoped phosphate glass

$426\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 3 为 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃的荧光谱,图 4 为 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃的吸收谱。

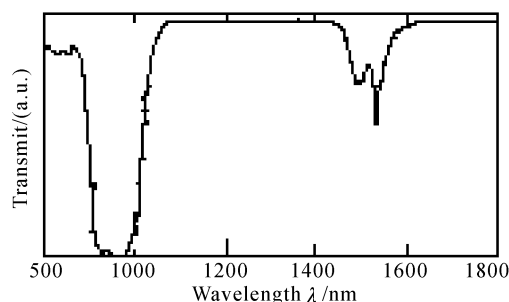


Fig. 4 Absorption spectrum of Er^{3+} , Yb^{3+} codoped phosphate glass

3.2 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃沟道波导的制作

将铒,镱共掺磷酸盐玻璃基片表面进行精细抛光和严格清洗。图 5 是 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃沟道波导制作的流程图。主要分以下几个步骤: (i) 蒸铝: 在基片表面上镀 100 nm 厚的铝膜。(ii) 光刻: 用常规光刻技术在铝膜上刻蚀出 $8\text{ }\mu\text{m}$ 宽的波导(图 5 中的 1)。(iii) 离子交换: 将基片放在熔盐(质量分数 0.05 $\text{AgNO}_3 + 0.95\text{KNO}_3$ 混合熔盐)中进行离子交换。(iv) 去铝膜: 将离子交换之后的基片放入腐蚀液中将铝膜去掉,再用去离子水清洗干净,端面抛光。这样表面沟道波导就制作完成。这样制作的波导损耗较大,且不利于和光纤对接耦合。掩埋波导可以有效地解决这一问题。制作方法是在 $\text{K}^+ + \text{Ag}^+$, Na^+ 离子交换工序之后加入制作掩埋波导的工艺。

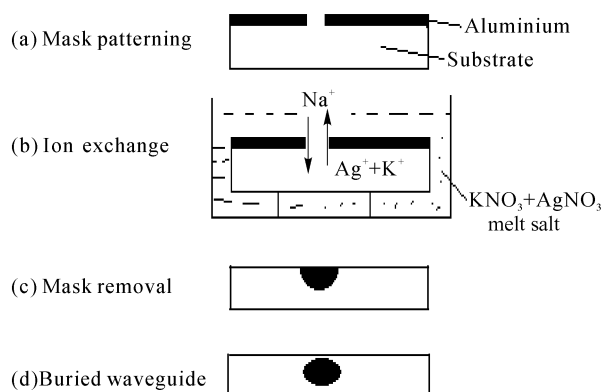


Fig. 5 Flow chart of ion exchange

常用的方法有两种^[12]: (i) 反交换: 将表面波导放入熔盐(NaNO_3)中进行反交换; (ii) 利用外加电场。这时交换离子继续向玻璃基质内扩散,玻璃基质中的 Na^+ 离子则向基质表面运动,这样就在波导表面附近形成了一层基质层,波导就被掩埋起来

了。掩埋波导的优点是克服了离子交换对波导表面的损伤,降低了波导损耗。掩埋波导基本上属于对称波导,有利于与光纤的耦合,减少了光纤-波导、波导-光纤的耦合损耗。

我们所制作的有关波导参量为: Er^{3+} 浓度 $\rho = 1.51 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, Yb^{3+} 浓度 $N_{\text{Yb}} = 1.95 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, 掩膜宽度为 $8 \mu\text{m}$, 为 $\text{K}^+ + \text{Ag}^+, \text{Na}^+$ 离子交换波导, 交换时间为 3.5 h, 交换温度为 $385 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃沟道波导放大器增益特性测试及结果

图 6 是测试 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器增益特性的实验装置示意图。抽运光和信号光经过复用器之后通过光纤耦合进入波导, 经过波导后的光波通过波导-光纤耦合进入滤波器, 将剩余的 980 nm 波长的光滤掉, 然后输入到光谱仪。实验中, 我们所用的仪器为: 信号光源为德国 Tuioptics 公司生产的 $1.55 \mu\text{m}$ 波段激光器, 抽运光源 Multiplex 公司生产的 CA0896-MTX9P18B2F2-Jull7 高功率 980 nm 波段激光器, $980 \text{ nm}/1550 \text{ nm}$ 耦合器是昂纳光通信公司生产的 WDM-2* 2-980/1550-0; 滤波器是昂纳光通信公司生产的 FWDM980/1550; 光谱仪为日本 Tokyo 公司的 AQ-1425 光谱分析仪。在实验操作时先用可见光 (650 nm 激光二极管, 接复用器的 980 nm 输入端) 将光路对准, 然后换上 980 nm 波长的抽运源开始测试。

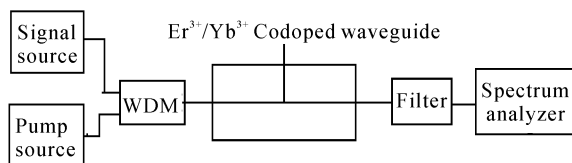


Fig. 6 Measurement diagram of the gain of Er^{3+} , Yb^{3+} codoped phosphate glass waveguide amplifier

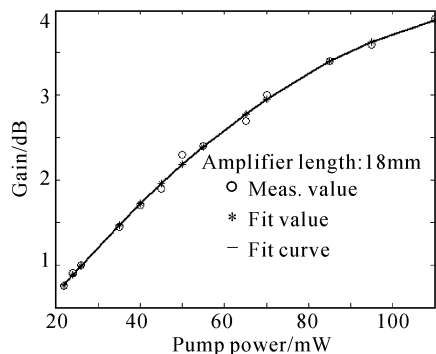


Fig. 7 Gain versus pump power

图 7 为 1.8 cm 长 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器增益随抽运功率变化的曲线。从测量结果来看, 实际制作的 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃的转换效率没有理论显示的效率高, 在 110 mW 抽运功率下, 增益的测量值比理论值约低 $1 \text{ dB}^{[13]}$ 。这是由于我们在数值计算中忽略了激发态吸收的影响, 而我们在实验中发现了激发态吸收 (即有 550 nm 的绿光产生), 故转换效率和增益较计算值小。所用信号光波长与该激光材料的荧光峰值波长 (1535 nm) 不匹配, 也导致了相应抽运功率下增益的减小。此外, 所制作波导的损耗可能较大。

结论 在自行研制的 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃基质上用离子交换方法制作出沟道光波导放大器。在 110 mW 的抽运功率下 (抽运光波长为 980 nm), 在 1.8 cm 长的器件上获得了 3.8 dB 的小信号 (信号光波长为 $1.55 \mu\text{m}$) 增益, 单位长度上的增益为 2.1 dB/cm 。如果调整激光材料组分, 克服激发态吸收、选择与 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃荧光谱的峰值波长相同的信号光波长, 制作性能优良的波导, 将会改善放大器的抽运效率和增益特性。

感谢周元庆老师、庞涛老师、宋健全博士后在制作工艺方面所做的工作。

参 考 文 献

- Shmulovich J, Wong A, Wong Y H *et al.*. Er^{3+} glass waveguide amplifier at $1.5 \mu\text{m}$ on silicon. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(13):1181~1182
- Choi Y B, Cho S H, Moon D C. Er-Al-codoped silicate planar light waveguide-type amplifier fabricated by radio-frequency sputtering. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4):263~265
- Chen Haiyan, Guan Zhouguo, Liu Yongzhi. Recent progress in erbium doped glass optical waveguide amplifiers. *Semiconductor Optoelectronics* (半导体光电), 2000, **21**(6):381~383 (in Chinese)
- Chen Haiyan, Liu Yongzhi, Guan Zhouguo *et al.*. Rate equation analysis of Erbium-doped optical waveguide amplifiers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):174~177 (in Chinese)
- Jiang Shibin, Nunzi-Conti G, Myers M *et al.*. New Er^{3+} -doped phosphate glass for ion-exchanged waveguide amplifiers. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(12):3282~3286
- Honkanen S, Ohtsuki T, Jiang S. High Er concentration phosphate glasses planar waveguide amplifiers. *Proc. SPIE*, 1997, **2996**:32~40
- Bor-Chyuan Hwang, Jiang Shibin, Luo Tao *et al.*. Cooperative upconversion and energy transfer of new high Er^{3+} - and Yb^{3+} - Er^{3+} -doped phosphate glasses. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2000, **17**(5):833~839

- 8 Wong S F, Pun E Y B, Chung P S. Er^{3+} - Yb^{3+} codoped phosphate glass waveguide amplifier using Ag^+ - Li^+ ion exchange. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14** (1): 80~82
- 9 Liu Zhuping, Hu Lili, Dai Shixun *et al.*. Er^{3+} , Yb^{3+} codoped phosphate glass laser pumped by LD. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22** (9): 1129 ~ 1131 (in Chinese)
- 10 Barbier D, Bruno P, Cassagnettes C *et al.*. Net gain of 27 dB with a 8.6-cm-long Er/Yb-doped glass-planar-amplifier. *Opt. Fiber Commun. Conf., OFC '98 Technical Digest*, San Jose, California, 45~46
- 11 Artemev E F, Murzin A G, Federov Y K *et al.*. Some characteristics of population inversion of the $^4I_{13/2}$ level of erbium-ions in ytterbium-erbium glasses. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1981, **11**(8):1266~1268
- 12 Chen Haiyan. *Design and Fabrication Study of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-Doped Phosphate Glass Waveguide Amplifier* ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的设计与制作研究). [MS dissertation], Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2002 (in Chinese)
- 13 Chen Haiyan, Liu Yongzhi, Dai Jizhi *et al.*. Design of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass (LGS-L) waveguide amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23** (6): (to be published) (in Chinese)

Er^{3+} , Yb^{3+} Codoped Phosphate Glass Channel Waveguide Amplifiers

Chen Haiyan^{1,2} Dai Jizhi¹ Yang Yapei¹ Guan Zhouguo^{1,3} Liu Yongzhi¹

¹ College of Optoelectronic Information, National Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054

² School of Science, Jiangnan Petroleum University, Jingzhou, Hubei Province 434023

³ South-West Institute of Technical Physics, Chengdu 610041

(Received 11 June 2002; revised 2 August 2002)

Abstract: An Er^{3+} , Yb^{3+} codoped phosphate glass waveguide amplifier is reported, which is fabricated by Ag^+ , K^+ - Na^+ ion exchange and the process is demonstrated. This 1.8 cm length channel glass waveguide amplifier produces a net gain of ~ 2.1 dB/cm at signal wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ with input power of 110 mW at 980 nm.

Key words: guiding wave optics; optical waveguide amplifier; Er^{3+} , Yb^{3+} codoped phosphate glass; ion exchange