

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0227-03

LD 端抽运 Er-Yb 磷酸盐玻璃光波导放大器

陈海燕^{1,2}, 戴基智¹, 杨亚培¹, 黄绣江¹, 官周国^{1,3}, 刘永智¹

(¹电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054
²江汉石油学院理学院, 湖北 荆州 434023
³西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要 总结了激光二极管(LD)端抽运 Er-Yb 磷酸盐玻璃光波导放大器方面所作的工作,内容涉及 Er-Yb 共掺磷酸盐激光玻璃材料、光波导放大器结构与特性等。由于这类放大器的优良性能与低的制作成本使得其在功率放大、在线放大、光无损分路器、光有线电视(CATV)系统及城域网等方面具有广阔的应用前景。

关键词 材料实验; 激光二极管端抽运; 光波导放大器; Er-Yb 磷酸盐玻璃; 光电子器件

中图分类号 TN234.5, TN722.3

文献标识码 A

Laser Diode End-Pumped Er-Yb Co-Doped Phosphate Glass Waveguide Amplifiers

CHEN Hai-yan^{1,2}, DAI Ji-zhi¹, YANG Ya-pei¹, HUANG Xiu-jiang¹,
GUAN Zhou-guo^{1,3}, LIU Yong-zhi¹

(¹ School of Optoelectronic Information, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)
(² School of Science, Jiangnan Petroleum University, Jingzhou, Hubei 434102, China)
(³ South-west Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract A comprehensive review on laser diode end-pumped Er-Yb co-doped phosphate glass waveguide amplifiers is presented. It consists of Er-Yb co-doped phosphate glass, structure and characteristics of optical waveguide amplifiers, etc. The combination of this good performance and potential low cost makes these amplifier devices attractive for a variety of applications including boosters, in-line, optical lossless splitters, optical CATV systems and metro networks.

Key words material experiment; LD end-pumped; optical waveguide amplifier; Er-Yb co-doped phosphate glass; optoelectronic device

1 引言

随着城域光网的发展,工作在 1.55 μm 波段的小型高效的光波导放大器的需求与日巨增,它具有体积小、成本低、便于系统集成、噪声小、与偏振无关等特点。实际上,这些特点使得它将广泛应用于末端放大、前置放大、功率放大、光纤到家(FITH)和光纤到街区(FTTC)网络中的无损分路器及光有线电视(CATV)系统中。

自从 1991 年 Honkanen 等用离子交换法制作出掺铒磷酸盐单模玻璃光波导放大器^[1]以来,掺铒光波导放大器就引起极大关注,新的研究报道不断涌现,开发出硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃和 LiNbO_3 三大类不同掺杂元素(Nd, Er, Er/Yb)的激光玻璃基质以及离子交换、离子注入、射频(RF)溅射/等离子体

增强化学气相沉积、火焰水解涂覆与溶胶-凝胶技术等制作技术。尤其是 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃以其优良的光谱特性与高度的化学稳定性从诸多候选材料中脱颖而出,成为制作波导放大器的首选材料,并且可以用来制作超短光纤放大器^[2,3]。

本文全面总结了过去几年来我们课题组在激光二极管(LD)端抽运 Er-Yb 磷酸盐玻璃光波导放大器方面所作的工作,内容涉及 Er-Yb 共掺磷酸盐激光玻璃材料的制作,放大器的制作,宽带光波导放大器的结构设计,增益平坦薄膜滤波器的设计等。

2 有源材料

在此仅讨论 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃,磷酸盐玻璃基质中较大的声子能量使得其中 Yb 到 Er 的能

量转换比其他玻璃基质更加有效。众所周之,工作于 1550 nm 波段的 Er 玻璃是个典型的三能级系统,要求半数以上的基态 Er 离子跃迁到激光上能级。为了大大降低抽运阈值功率常常在 Er 玻璃中掺杂适量的 Yb 离子来敏化 Er 离子。在 Er-Yb 共掺系统中,使 Er 离子跃迁的能量主要由 Yb 离子的跃迁来提供,利用 Yb-Er 离子间的能量传递来减小 Er 离子的聚集,具有抽运效率提高、抽运光波长的选择性增强等特点。

制作出的 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃参量如表 1。图 1 为该玻璃的荧光谱,吸收谱如图 2^[4]。

表 1 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃参量

Table.1 Parameters for Er-Yb co-doped phosphate glass

Parameters /unit	Value
Er ³⁺ absorption cross-section $\sigma_{ap}(\lambda_p=980\text{ nm}) / \times 10^{-25} \text{ m}^2$	2.58
Er ³⁺ absorption cross-section $\sigma_{as}(\lambda_s=1535\text{ nm}) / \times 10^{-25} \text{ m}^2$	6.8
Er ³⁺ emission cross-section $\sigma_{es}(\lambda_s=1535\text{ nm}) / \times 10^{-25} \text{ m}^2$	7.9
Er ³⁺ lifetime τ_{21} / ms	8.50
Er ³⁺ concentration $N_{Er} / \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$	1.51
Up-conversion coefficient $C_{up} / \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$	8.0
Yb ³⁺ concentration $N_{Yb} / \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$	1.95
Cross relaxation coefficient $C_{cr} / \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$	2.1
Yb ³⁺ absorption cross-section ($\lambda_p=980\text{ nm}) / \times 10^{-24} \text{ m}^2$	1.0
Yb ³⁺ emission cross-section ($\lambda_s=980\text{ nm}) / \times 10^{-24} \text{ m}^2$	1.0
Yb ³⁺ lifetime τ_{65} / ms	2.0

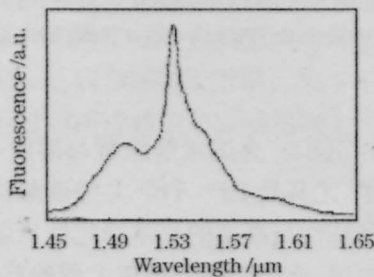


图 1 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃荧光谱

Fig.1 Fluorescence spectrum of Er-Yb co-doped phosphate glass

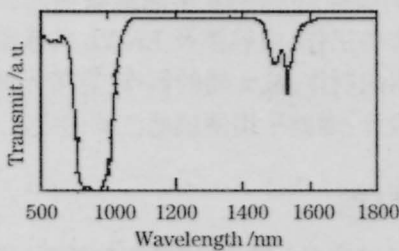


图 2 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃吸收谱

Fig.2 Absorption spectrum of Er-Yb co-doped phosphate glass

3 光波导放大器

激光二极管端抽运 Er-Yb 磷酸盐玻璃直线型光波导放大器是一种最简单的放大器结构,图 3 是这一结构的原理图。这是一种典型的流线型行波放大器,根据有关材料参量与波导参量,可以对放大器的特性进行数值模拟,模拟主要包括波导中光场的横向分布与放大器特性两部分,常用的方法有重叠积分、有限元、FD-BPM、FDTD 以及 ADI-FDTD 等并结合龙格-库塔方法。

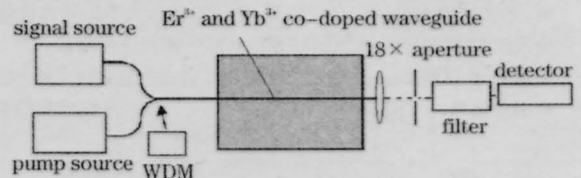


图 3 LD-端抽运直线型光波导放大器

Fig.3 LD end-pumped straight line optical waveguide amplifier

用离子交换方法在 Er-Yb 磷酸盐玻璃基片上制作出沟道波导,熔盐是 5%AgNO₃+95%KNO₃ 的混合熔盐,掩膜宽度为 8 μm,交换时间为 3.5 h,交换温度为 385 °C,图 4 其增益特性曲线。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,噪声指数是 5.1。

为了在厘米量级的长度上获得足够大的增益,这种直线型放大器中 Er-的掺杂浓度较高,由于重

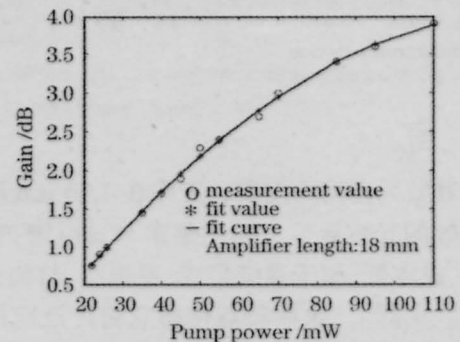


图 4 增益 vs 抽运功率

Fig.4 Gain versus pump power

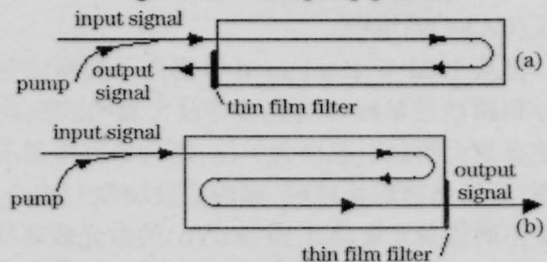


图 5 放大器结构[(a)‘∩’形 (b)‘S’形]

Fig.5 Configuration of amplifiers[(a) ‘∩’ type, (b) ‘S’ type]

吸收、上转换等因素的影响,将会使噪声指数增加,器件性能恶化。为解决这一问题,可以在不增加基质长度的情况下,通过改变光波导形状来增加放大器的有效长度,可将光波导做成“ \cap ”,“S”等形状^[6],如图5。这样在较低的 Er^{3+} 的掺杂浓度下也可以获得较大的增益,同时放大器的噪声指数也较低。

4 宽带光波导放大器

Er-Yb 磷酸盐玻璃光波导放大器的增益谱是不均匀的,除了在 1532 nm 波长处有个较大的增益峰之外,还有一些小的增益峰。为了能用于 C-波段(1528~1560 nm)的密集波分复用(DWDM)光通信系统,必须采取一定措施,在不改变激光玻璃组份情况下,利用多层介质薄膜滤波器是一个较好的方法^[6,7],结构如图5,这种结构的特点是滤波器与放大器集成在一起,增加了系统的稳定性,器件体积小、插入损耗也低。

多层介质薄膜滤波器的滤波特性可由 n 阶巴特渥斯(Butterworth)滤波函数近似^[7]:

$$\text{Trans}(\lambda, \lambda_i, \lambda_{ci}, n_i) = \frac{a}{1 + [(\lambda - \lambda_i) / \lambda_{ci}]^{2n_i}} \quad (1)$$

式中 $\text{Trans}(\lambda, \lambda_i, \lambda_{ci}, n_i)$ 为任意薄膜滤波单元的透射函数, a 为滤波器的插入损耗, λ_i 为中心波长, λ_{ci} 为增益平坦半峰全宽, n_i 为巴特渥斯滤波器透射函数的阶数。级联多层介质薄膜滤波的透射函数可表示为

$$T = \sum_{i=1}^N \text{Trans}(\lambda, \lambda_i, \lambda_{ci}, n_i) \quad (2)$$

对于波长为 λ 的输出信号光,其增益是

$$G(\lambda) = \text{Gain}(\lambda) + T(\lambda) \quad (3)$$

式中 $G(\lambda)$, $\text{Gain}(\lambda)$, $T(\lambda)$ 分别表示在波长 λ 处 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的平坦增益谱、本征增益谱以及级联薄膜滤波器的透射谱。

利用级联多层介质薄膜滤波可以根据需求对具有任意本征增益谱的放大器进行平坦处理。

5 光波导放大器的应用

随着光通信器件、系统向集成化方向的发展,高增益、宽带宽、低噪声、低成本、小体积、小插损、高稳定性的光波导放大器将得到广泛应用。

- 1) 多波长放大,用于密集波分复用系统
- 2) 光波导放大器阵列,用于城域网/接入网和光有线电视系统
- 3) 无损分路器, $1 \times N$ 分路/合路,用于光有线电视系统。
- 4) 光传感器

参 考 文 献

- 1 S. Honkanen, S. Najafi, P. Poyhonen. Silver-film ion-exchanged singlemode waveguides in Er doped phosphate glass[J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27 (23):2167-2168
- 2 M. Lange, E. Bryant, M. Myers *et al.*. High gain short length phosphate glass erbium-doped fiber amplifier materia[C]. OFC proceedings, March, 17-22, Anaheim, CA2001
- 3 Hu Yongdan, Jiang Shibin, Luo Tao *et al.*. Performance of High-concentration Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped phosphate fiber amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(7):657-659
- 4 Chen Haiyan, Dai Jizhi, Yang Yapei *et al.*. Er^{3+} , Yb^{3+} Co-Doped Phosphate Glass Channel Waveguide Amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(7):815-818
陈海燕,戴基智,杨亚培等. Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃沟道波导放大器[J]. *光学学报*, 2003, 23(7):815-818
- 5 Chen Haiyan, Dai Jizhi, Zeng Xuefei *et al.*. Design of structure for broad-band integrated optical waveguide amplifiers[J]. *J. UESTC*, 2003, 32(2): 264-266
陈海燕,戴基智,陈雪飞等. 宽带光波导放大器结构设计[J]. *电子科技大学学报*, 2003, 32(2):264-266
- 6 Chen Haiyan, Liu Yongzhi, Dai Jizhi *et al.*. Wideband Erbium-Ytterbium Co-Doped Phosphate Glass Waveguide Amplifier [C]. The 8th optoelectronics and communications conference (OECC'2003), 2003, Oct13-16, Shanghai, P3-28
- 7 Jin Yaohui, Zeng Qinji. The ASE noise accumulation in a WDM all optical network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(2):195-200
金耀辉,曾庆济. WDM 全光网中的自发辐射噪声的累积[J]. *光学学报*, 2000, 20(2):195-200