

文章编号:1004-4213(2010)s1-0088-4

Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂铝锆酸盐玻璃条形光波导的光路设计与增益预期

阮鑫栋,赵睿途,柳鸣,姜妍彦,林海,赵昕

(大连工业大学 无机非金属材料研究所,辽宁 大连 116034)

摘 要:以 $6 \times 8 \text{ cm}^2$ 的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺铝锆酸盐玻璃作为光波导基底材料,设计出 S 型,U 型和 F 型三种平面光波导.通过光束传播法对所设计的波导进行仿真模拟运算,S 型,U 型和 F 型三种结构波导在 1528~1559 nm 范围内获得有效内增益,计算出其最大内增益分别为 7.27、14.06 和 22.55 dB,分别比直波导(6.42 dB)高 0.85、7.64 和 16.13 dB.研究表明合理的波导结构设计可以保证在较小尺寸的基片上获得较高的信号增益.

关键词:平面光波导;光束传播法;光路设计;信号增益

中图分类号:TQ133.3, TN814

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0088

0 引言

近年来,全光通信网络的飞速发展,对光通讯元器件的小型化和集成化提出了更高的要求,其中光波导放大器越来越引起人们的关注.与光纤放大器相比,光波导器件具有增益系数大,结构紧凑,体积小,便于集成等优点,使其得到广泛应用^[1-10].稀土离子 Er³⁺ 在泵浦光作用下的辐射跃迁 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 处于 C 波段(1 530~1 565 nm)的光通讯传输窗口,正是由于 Er³⁺ 的高效辐射跃迁使得波导放大器可以实现信号光的放大作用,同时基于 Yb³⁺/Er³⁺ 离子间的能量传递,使得泵浦效率显著提高,有效增大了相应波导放大器的光学增益,使 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光波导放大器(EYCDWA)在光通讯及集成光电子领域获得成功应用^[11-13].

由于波导放大器放大路径较短,使放大器的信号增益的进一步提高受到限制.在 EYCDWA 中提高 Er³⁺ 的掺杂浓度和增加光波导的放大路径长度是提高波导放大器增益性能的两种方法.但过高的掺杂浓度会产生严重的离子聚集现象,引起 Er³⁺ 的荧光淬灭^[14],这使研究的焦点集中在增加光波导放大路径的长度上.由于器件集成度的限制,在尺寸有限的基片上设计弯曲的波导结构,延长波导信号光的有效放大长度,成为提高集成光波导增益能力的重要途径.

本文选取了具备集成潜质的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺的 UV 光敏型铝锆酸盐玻璃作为波导基底^[15],设计了 S 型、U 型和 F 型三种弯曲结构波导.采用光束传播法(Beam Propagation Method, BPM)对这三种结构进行仿真模拟,得到各结构波导的光学增益,并对其增益能力进行对比分析^[16].结果表明,波导结构的合理设计对提高信号放大效果明显,进而在较小尺寸基片上获得较高的信号增益.

1 实验基础

以 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺铝锆酸盐玻璃作为平面光波导的基底材料.利用 Metricon 2010 型棱镜耦合仪测得基质玻璃在 632.8 nm 和 1 536 nm 波长处的折射率分别为 $n_1 = 1.580 91$ 和 $n_2 = 1.564 01$.基质玻璃在其它波长下的折射率通过柯西公式 $n = A + B/\lambda^2$ 获得,其中 $A = 1.560 56$, $B = 8 151 \text{ nm}^2$.在 1 536 nm 波长下,基模和基质材料之间折射率差值 $\Delta n = 0.003 35$,而此差值对波长的变化并不敏感,故此值可应用于 1 534 nm 波长.实验中测得 K⁺-Na⁺ 离子交换铝锆酸盐条形玻璃波导横向和纵向的模场直径分别为 9.5 μm 和 10.3 μm ,其平均模场直径为 9.9 μm .

增益测试中通过 980 nm/1 550 nm WDM (Wavelength Division Multiplexing) 将 HP8168A 可调激光器输出的信号光和 975 nm 泵浦激光耦合

基金项目:辽宁省教育厅高等学校科学研究基金(No. 2009A080)资助

第一作者:阮鑫栋(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电子材料及器件. Email: wjs@dlpu.edu.cn

通讯作者:赵昕(1968-),男,副教授,主要研究方向为光电子材料与器件. Email: lhai@dlpu.edu.cn

收稿日期:2010-10-11; **修回日期:**2010-12-06

进 2.5 cm 长的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺铝锆酸盐玻璃条形光波导中,波导输出端由耦合光纤连接到 HP86140B 光谱仪 (OSA) 上,输出端光信号由此记录下来。

条形波导的光学增益 G_0 , 相对增益 G_R 和内增益 G_{INT} 分别表示如下

$$G_0 = 10 \log_{10} \left[\frac{P_{\text{Sig(PumpOn)}}}{P_{\text{Sig(PumpOff)}}} \right] \quad (1)$$

$$G_R = 10 \log_{10} \left[\frac{(P_{\text{Sig(PumpOn)}} - P_{\text{ASE}})}{P_{\text{Sig(PumpOff)}}} \right] \quad (2)$$

$$G_{INT} = G_R - \alpha_P - \alpha_A \quad (3)$$

式中 $P_{\text{Sig(PumpOn)}}$ 和 $P_{\text{Sig(PumpOff)}}$ 分别是在有泵浦光和无泵浦光情况下的波导输出端信号功率。 P_{ASE} 为放大的自发辐射, α_P 是传播损耗, α_A 为信号波长处由 Er³⁺ 离子引起的吸收损耗。泵浦为 250 mW 时,不同信号波长下条形波导的内增益系数示于图 1,从图中可知 1 534 nm 处波导的最大内增益系数为 0.802 6 dB/cm。

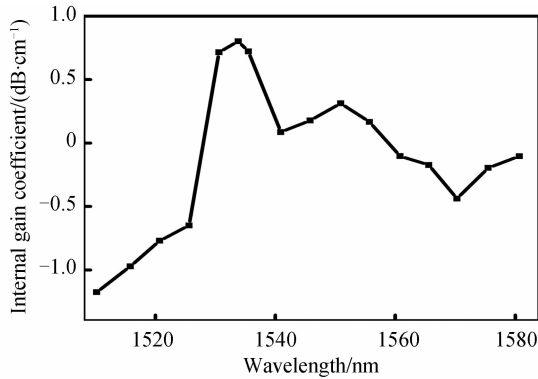


图 1 不同信号波长下条形波导的内增益系数

Fig. 1 Internal gain coefficient versus signal wavelength in channel waveguide

采用光束传播法对设计的弯曲波导进行二维仿真模拟运算,模拟出各弯曲连接部分的最优连接方式,并得到此最优连接条件下各弯曲部分及连接部分的损耗,从而得到整个弯曲波导的损耗。通过模拟运算寻找优化条件将传输过程中的损耗降至最小,从而获得高的光学增益。

2 结果讨论

本文在综合考虑基片尺寸及损耗的条件下,设计出三种光波导结构。图 2 中,(a) 所示为传统的直波导结构,其相对长度较小,即只是基片的长度 a ; (b) 所示为 S 型波导,是由两段曲率半径为 r 的呈字母“S”型连接的弯曲波导和长度为 c 的直波导组成;(c) 表示 U 型波导,由曲率半径为 r 的弯曲波导连接两段长度为 d 的直波导组成;(d) 则是 F 型的螺旋型波导,它是由 S 型的波导转变而来的,是两段

长度为 d 的直波导部分和两段曲率半径为 r 弯曲波导部分相互连接组成的,其中, a, b, c, d 和 r 的值分别为 8, 6, 2.21, 5.79 和 1.9 cm。

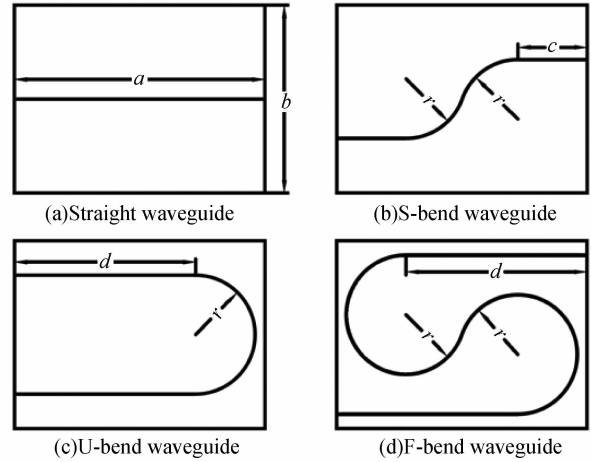


图 2 波导结构设计图

Fig. 2 Schematic diagram of waveguide structures

S 型、U 型和 F 型光波导的内部增益减去其弯曲损耗和连接处的损耗得到各光波导的增益,表达式如下

$$G'_{INT} = L \times \gamma - \alpha - \alpha_T \quad (4)$$

式中 L 表示传播路径的长度, γ 是波导的内增益系数, α 和 α_T 分别为弯曲损耗和连接损耗。

在不同的曲率半径下会产生不同的弯曲损耗,其弯曲损耗 α 的值是随放大路径的增长而增大,图 3 所示为曲率半径为 1.9 cm 时的弯曲损耗情况。

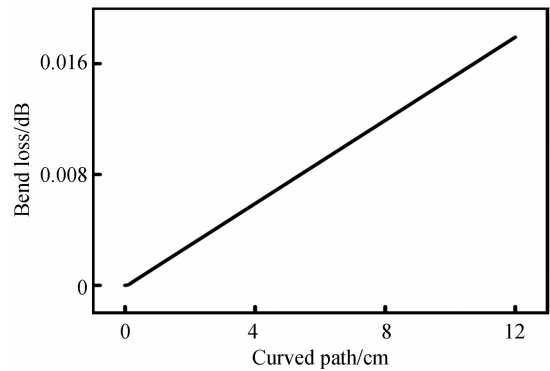


图 3 曲率半径为 1.9 cm 时弯曲损耗与传输路径的变化关系

Fig. 3 Bend loss versus the curved path in radius of 1.9 cm

弯曲波导的弯曲损耗由下式表达

$$\alpha(x) = -10 \log_{10} [\eta(x)] = -10 \log_{10} \frac{I_{\text{Out}}(x)}{I_{\text{In}}} \exp(-\beta x) \quad (5)$$

式中 I_{In} 和 $I_{\text{Out}}(x)$ 是输入与输出的信号强度, β 是与弯曲波导半径和折射率有关的常数。

损耗系数 k (单位: dB/cm) 由下式得到

$$k = \frac{\alpha}{x} = \frac{-10 \log_{10} [\eta(x)]}{x} = 4.34\beta \quad (6)$$

计算得到曲率半径 $r = 1.90$ cm 时,损耗系数 k

为 0.001 5 dB/cm.

连接损耗 α_T 指不同形状波导连接处产生的损耗,不同的偏移距离会对连接损耗产生影响^[17-18].图 4 所示为曲率半径为 1.9 cm,直波导与弯曲波导以及两弯曲波导之间的连接损耗,当 $S_1 = 0.7 \mu\text{m}$, $S_2 = -1.4 \mu\text{m}$ 时连接损耗会达到最小值,分别为 0.004 2和 0.013 8 dB.

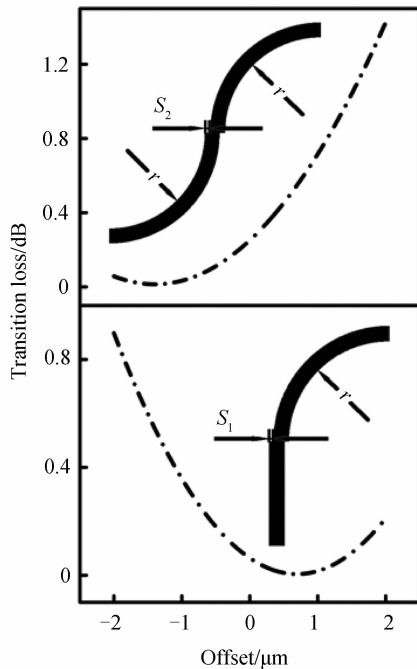


图 4 连接损耗和两段波导偏移位移的关系;插图表示两段波导连接部分的偏移位移
Fig. 4 Transition loss versus offset between two waveguide channels; Inset: junctions of two waveguide channels showing offsets

采用光束传播法对所设计的波导结构进行模拟,各波导结构的传输功率如图 5 所示.

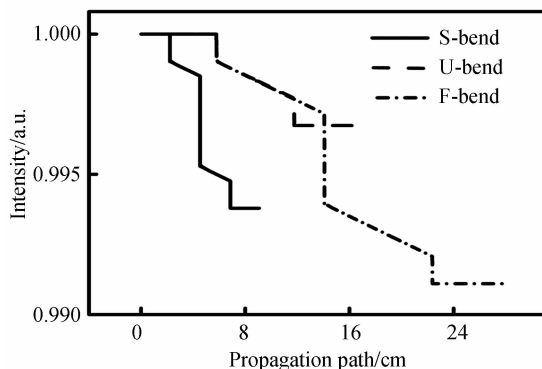


图 5 三种波导结构下信号输出相对功率与传输长度的关系
Fig. 5 Relative output power versus propagation path in three types of waveguide structures

根据以上模拟仿真结果,推导出不同波段下各结构波导的增益值,如图 6 所示.从图中可看出设计优化后,各波导结构在 1 528~1 559 nm 的波长范围内获得了正的内增益,并在 1 534 nm 下得到最大

增益 22.55 dB.

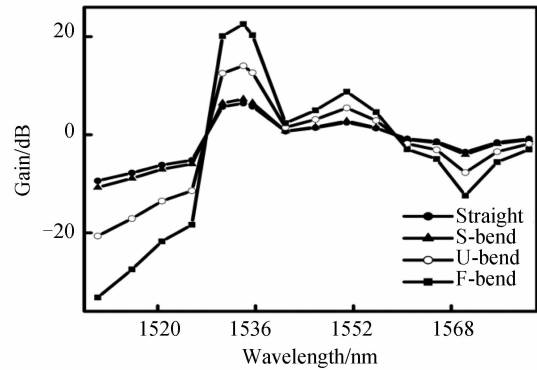


图 6 不同信号波长下四种结构波导的内增益
Fig. 6 Internal gain versus signal wavelength in four channel configurations

3 结论

以 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺铝磷酸盐玻璃为基底进行平面光波导结构设计,在 $6 \times 8 \text{ cm}^2$ 的基片区域内设计了 S 型、U 型以及 F 型三种结构波导,在 1 528~1 559 nm 的波长范围内得到这三种结构波导的最大内增益分别为 7.27、14.06 和 22.55 dB.结果表明,F 型平面光波导结构在较小的尺寸基片上获得的信号增益可达直波导的 3.5 倍以上.通过合理的结构设计, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺的铝磷酸盐玻璃平面光波导在 1 528~1 559 nm 波段内获得了理想的正增益效果,为宽带集成光波导的结构设计优化提供了参考依据,也为特殊波段(O-波段,S-波段和 U-波段)的 Pr^{3+} , Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 掺杂玻璃平面光波导信号放大器的设计提供了开拓性的思路.

参考文献

- [1] ZHAO Shi-long, CHEN Bao-yu, HU Jun-jiang, *et al.* Properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass for waveguide amplifiers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32** (3):375-378.
赵士龙,陈宝玉,胡俊江,等.用于波导放大器的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃的性能研究[J]. *中国激光*, 2005, **32** (3):375-378.
- [2] BO Shu-hui, HU Jin, ZHEN Zhen, *et al.* Optical properties of Er^{3+} -doped polymers and fabrication of channel waveguides [J]. *Optics Communications*, 2009, **282** (13):2465-2469.
- [3] JIANG Chun, ZENG Qing-ji. Optimization of erbium-doped waveguide amplifier [J]. *Optics Laser Technology*, 2004, **36** (1):167-171.
- [4] LI Shan-feng, ZHANG Min, ZHAO Ming-shan, *et al.* Rate equation model analysis on the infrared and upconversion emission of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped borate-silicate glass [J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, **28** (2):237-242.
- [5] WANG Ying, YANG Tian-xin, SUN Wei-cheng, *et al.* Analysis of channel erbium-doped glass waveguide amplifiers [J]. *Optical Communication Technology*, 2003, **9** (27):42-44.
王颖,杨天新,孙伟成,等.条形掺 Er^{3+} 波导光放大器的理论分析[J]. *光通信技术*, 2003, **9** (27):42-44.
- [6] LOU Na, JIN Guo-liang, DAI Ya-jun, *et al.* Gain characteristics of forward-backward pumped waveguide

- amplifier based on Er/Yb-doped phosphate glass[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8):139-144.
- 娄娜,金国良,戴亚军,等.前后双泵钕共掺磷酸盐玻璃波导放大器增益特性[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8):139-144.
- [7] WANG Yu-hai, MA Chun-sheng, ZHANG Da-ming, *et al.* Effects of pumped styles on power conversion efficiency and gain characteristics of phosphate glass Er³⁺/Yb³⁺ co-doped waveguide amplifiers[J]. *Optics Laser Technology*, 2009, **41**(5):545-549.
- [8] LI Shu-feng, LI Chen-ren, ZHOU Song-qiang, *et al.* Numerical simulation of noise characteristic of Er-doped and Yb-Er co-doped Al₂O₃ waveguide amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1095-1097.
- 李淑凤,李成仁,周松强,等.掺Er及Yb-Er共掺Al₂O₃光波导放大器噪声特性的数值模拟[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6):1095-1097.
- [9] SU Jie-mei, DAI Ji-zhi, YANG Ya-pei. Review of the new development of optical waveguide amplifier [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(6):604-608.
- 苏洁梅,戴基智,杨亚培.光波导放大器的研究进展[J]. *激光技术*, 2004, **28**(6):604-608.
- [10] YANG Yan-min, CHEN Bao-jiu, REN Guo-zhong, *et al.* Spectroscopic properties of Er³⁺ doped Bi₂O₃-B₂O₃-SiO₂ glasses[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2006, **27**(4):469-473.
- 杨艳民,陈宝玖,任国仲,等. Er³⁺掺杂的Bi₂O₃-B₂O₃-SiO₂玻璃的光谱性质[J]. *发光学报*, 2006, **27**(4):469-473.
- [11] LIU Zhu-ping, QI Chang-hong, HU Li-li, *et al.* Spectra and laser properties of Er³⁺, Yb³⁺: phosphate glasses [J]. *Optical Materials*, 2003, **21**(4):789-794.
- [12] DAI Shi-xun, ZHANG Jun-jie, HU Li-li, *et al.* Effect of hydroxyl groups on nonradiative decay of Er³⁺: ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2} transition in zinc tellurite glasses [J]. *Materials Letters*, 2005, **59**(17):2333-2336.
- [13] XIAO Kai, YANG Zhong-min. Thermal stability and optical transitions of Er³⁺/Yb³⁺-codoped barium gallogermanate glass[J]. *Optical Materials*, 2007, **29**(11):1475-1480.
- [14] CHEN Hai-yan, LIU Yong-zhi. Recent progress in optical waveguide amplifiers at 1.55 μm[J]. *Laser Infrared*, 2005, **35**(7):463-465.
- 陈海燕,刘永智.1.55 μm光波导放大器最新发展[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(7):463-465.
- [15] QIN Guan-shi, QIN Wei-ping, WU Chang-feng, *et al.* Infrared-to-visible upconversion luminescence of Er³⁺ and Yb³⁺ co-doped germanate glass [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, **347**(1-3):52-55.
- [16] XIAO Jin-bao, SUN Xiao-han. A modified full-vectorial finite-difference beam propagation method based on H-fields for optical waveguides with step-index profiles[J]. *Optical Communications*, 2006, **266**(2):505-511.
- [17] ROSS T S, JAMES H C. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(10):899-909.
- [18] ZHAO R T, LIU W H, PUNE Y B, *et al.* Optical path design and evaluation in Tm³⁺ doped glass channel waveguide for S-band amplification[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, **49**(1):52-56.

Gain Evaluation of Optical Designing on Er³⁺/Yb³⁺ Co-doped Aluminum Germanate Glass Channel Waveguide

RUAN Xin-dong, ZHAO Rui-tu, LIU Ming, JIANG Yan-yan, LIN Hai, ZHAO Xin
(Institute of Inorganic Nonmetal Materials, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

Abstract: Three types of planar waveguides with S-, U- and F-bend waveguide structures have been designed based on Er³⁺/Yb³⁺ co-doped aluminum germanate glass substrates of 6 × 8 cm². The beam propagation method (BPM) was employed to simulate the designed waveguides, and the efficient internal gains were obtained in the wavelength range of 1 528~1 559 nm. The maximum internal gains were derived to be 7.27, 14.06 and 22.55 dB for S-, U- and F-bend waveguides, which were 0.85, 7.64 and 16.13 dB higher than the value of straight one (6.42 dB), respectively. These results indicate that the reasonable designing of the waveguide configurations brings perspective in obtaining higher gain on smaller size waveguide substrate.

Key words: Planar waveguide; Beam propagation method; Optical path designing; Signal gain