

Tm³⁺ 掺杂 S 波段波导放大器的光路设计与增益预期

王 木 赵睿途 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 为实现 S 波段集成光波导放大器的高增益,以 8 cm×6 cm 尺寸的 Tm³⁺ 掺杂锗酸盐玻璃为基片设计了 S 型, U 型和 F 型弯曲结构波导。采用光束传播法(BPM)对弯曲波导进行损耗模拟,得到最优弯曲半径为 1.90 cm 时,损耗系数为 0.04 dB/cm。在 1482 nm 波长处, F 型波导的增益为 13.01 dB, 其值高于 U 型(8.21 dB)和 S 型(4.22 dB)波导, 约是普通直波导(3.84 dB)的 3 倍。结果表明合理的光路设计(F 型)可以大幅提高 Tm³⁺ 掺杂锗酸盐玻璃平面光波导的光学增益。

关键词 平面光波导; BeamPROP 模拟; 光路设计; 光学增益

中图分类号 TQ133.3; TN814 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0523002

Optical Path Design and Evaluation in Tm³⁺ Doped Glass Channel Waveguide for S-Band Amplification

Wang Mu Zhao Ruitu Lin Hai Zhao Xin

(Institute of Inorganic Nonmetal Materials, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning, 116034, China)

Abstract To achieve high-gain S-band waveguide amplifiers with integrated configuration, S-, U-, and F-bend waveguides based on Tm³⁺-doped germanate glasses have been designed in an 8 cm×6 cm substrate. Using simulated-bend method, the optimal radius for the curved structure is offered to be 1.90 cm with loss coefficient of 0.04 dB/cm. For the F-bend waveguide, the internal gain at 1482 nm is derived to be 13.01 dB, which is higher than the values of 8.21 and 4.22 dB in the U- and S-bend waveguides, respectively, and nearly three times higher than that of the straight one (3.84 dB). Simulation results indicate that the reasonable optical path design can considerably enhance the optical gain in Tm³⁺-doped germanate glass channel waveguides.

Key words planar waveguide; BeamPROP simulation; optical path design; optical gain

OCIS codes 230.3120; 130.2755; 230.4480; 230.7380

1 引 言

随着全光通信网络的迅猛发展及数据传输要求的不断提高,如何增加光通信系统光信号传输带宽一直是人们研究的热点^[1~7]。在 C 波段(1530~1565 nm)和 L 波段(1565~1625 nm)放大技术已经成熟的今天, S 波段(1460~1530 nm)已成为潜在的通讯资源空间,因而新型的 S 波段光通信放大器备受关注。Tm³⁺:³H₄→³F₄ 的 1.47 μm 跃迁辐射与 S 波段通讯窗口相吻合,使 Tm³⁺ 掺杂的光学放大器在 S 波段光学放大器中具有强劲的竞争力^[8~14]。

目前,适用于 S 波段的掺铥光纤放大器(TDFA)已取得突破性进展,而相对于光纤放大器,波导器件具有体积小,增益系数高的特点,因此在集成器件方面凸显出优势。然而波导放大器受到信号光放大路径较短的限制,使其很难获得足够高的增益来满足信号放大的要求,严重制约了波导放大器的实际应用。

提高光波导放大器增益性能的主要方法是增加 Tm³⁺ 的掺杂浓度和延长波导中光信号放大路径。但 Tm³⁺ 离子之间存在着很强的能量交叉弛豫效应

收稿日期: 2010-10-18; **收到修改稿日期**: 2010-12-13

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校科学研究基金(2009A080)资助课题。

作者简介: 王 木(1984—),女,硕士研究生,主要从事光电子材料与器件等方面的研究。E-mail: mumu1121@163.com

导师简介: 赵 昕(1968—),男,副教授,主要从事光电子材料与器件等方面的研究。E-mail: wjs@dlpu.edu.cn

(通信联系人)

($^3\text{H}_6, ^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4, ^3\text{F}_4$), 过高的掺杂浓度会降低 $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 辐射跃迁效率。因此, 延长波导中光信号放大路径来获得高增益的方法更具可行性^[15~25]。

本文以 $8\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的 Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃为基片, 基于增加波导中信号光放大路径的理念, 设计出 S 型, U 型和 F 型三种弯曲结构波导, 并对波导的光学增益进行理论预期。结果表明设计合理的波导结构 (S, U 和 F 型), 可使波导的增益性能显著提高。波导的弯曲结构设计为 S 波段高增益 Tm^{3+} 掺杂玻璃波导放大器件的实际应用提供了思路。

2 理论基础

光束传播法 (BPM) 作为光传播的建模方法, 已在光纤和光波导的仿真模拟中得到应用, 同时光波导中的弯曲损耗也可通过 BPM 方法模拟获得^[26~28]。BeamPROP^[29] 仿真模拟基于亥姆霍兹方程

$$\nabla_{x,y,z}^2 \Phi(x,y,z) + k^2(x,y,z)\Phi(x,y,z) = 0, \quad (1)$$

式中 $\Phi(x,y,z)$ 为在 $+z$ 方向上光的传播波函数, $\nabla_{x,y,z}^2$ 是拉普拉斯算子:

$$\nabla_{x,y,z}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (2)$$

式中 $k(x,y,z) = k_0 n(x,y,z)$ 作为空间波数函数引入, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 表示自由空间波数, $n(x,y,z)$ 为折射率。

在进行弯曲模拟过程中, 波导的宽度和曲率半径分别由 w 和 r 表示, 当 $w \ll r$ 时, 可将弯曲波导转化为等效直波导进行模拟^[29]。忽略 y 方向上的标量, 得到二维标量的波动方程^[30,31]

$$\nabla_{x,z}^2 \Phi(x,z) + k^2(x,z)\Phi(x,z) = 0, \quad (3)$$

用修正后的等效直波导来表示弯曲波导, 修正后的折射率函数为 $n'(x,z)$ 可表示为

$$n'(x,z) = n(x,z)\exp(x/r) \approx n(x,z)(1+x/r), \quad (4)$$

由(3)式和(4)式, 得到修正方程

$$\nabla_{x,z}^2 \Phi(x,z) + k_0^2 n^2(x,z)(1+x/r)^2 \Phi(x,z) = 0, \quad (5)$$

将 $E(x,z)\exp(-jkn_0 z)$ 代入(5)式, 得到近轴波动方程

$$\frac{\partial E(x,z)}{\partial z} = \frac{1}{2kn_0} \times \left\{ \frac{\partial^2 E(x,z)}{\partial x^2} + k[n^2(x,z)(1+x/r)^2 - n_0^2] \right\}, \quad (6)$$

式中 $E(x,z)$ 是场强分布, x 和 z 表示横向和纵向传播的距离, n_0 为有效折射率。(6)式即为 BeamPROP 仿真模拟的理论基础。

3 实验基础

利用 Metricon 2010 型棱镜耦合仪测得 Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃基片在 632.8 nm 和 1536 nm 波长处的折射率分别为 $n_1 = 1.57804$ 和 $n_2 = 1.56132$ 。基片玻璃在其它波长的折射率通过柯西公式 $n = A + B/\lambda^2$ 获得, 其中 $A = 1.55790$, $B = 8064\text{ nm}^2$, 计算得到基片玻璃在 1482 nm 处的折射率为 1.56157。在 1536 nm 波长处, 玻璃波导基模和基片之间的折射率差 $\Delta n = 0.00315$, 因 Δn 在约 50 nm 范围内的变化不明显, 故该值可用于 S 波段的模拟。 $\text{K}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换 Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃波导的横向和纵向的模场直径分别为 7.24 μm 和 6.89 μm , 平均模场直径 7.065 μm 。

Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃波导的增益通过 HP86140B 光谱仪 (OSA) 进行测试。带尾纤的 792 nm 半导体激光器作为抽运光源, HP8168F 可调谐激光器作为信号光源, 抽运光与信号光由波分复用耦合仪 (WDM) 进行耦合。采用 BPM 方法对弯曲波导的损耗进行评估。通过场强模式分布计算波导的弯曲损耗和连接损耗, 进而对 3 种结构波导的内增益进行预期。

4 结果讨论

Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃波导放大器的光学增益 G_0 , 相对增益 (信号增益) G_R 和内增益 G_{INT} 表示为^[32]

$$G_0 = 10 \lg [P_{\text{Sig(PumpOn)}} / P_{\text{Sig(PumpOff)}}], \quad (7)$$

$$G_R = 10 \lg [(P_{\text{Sig(PumpOn)}} - P_{\text{ASE}}) / P_{\text{Sig(PumpOff)}}], \quad (8)$$

$$G_{\text{INT}} = G_R - \alpha_P, \quad (9)$$

式中 $P_{\text{Sig(PumpOn)}}$ 和 $P_{\text{Sig(PumpOff)}}$ 分别是在有抽运光和无抽运光情况下的波导输出端信号功率。 P_{ASE} 是放大的自发辐射功率, α_P 为传输损耗, 测得 3.15 cm 长的 Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃波导中 $\alpha_P = 0.25\text{ dB/cm}$ ^[33]。当抽运功率增加到 110 mW 时, 直波导在 1482~1502 nm 的内增益系数如图 1 所示, 直波导的内增益接近于一条平坦的直线, 并在 1482 nm 处得到最大内增益 1.51 dB, 内增益系数 $\gamma = 0.48\text{ dB/cm}$ 。波导的内增益主要受光信号放大路径长度的影响, 延长波导中的有效放大路径是提高波导增益性能的重要途径。因此在有限面积的基片上设计出合理的波导结构可使光波导在宽带集成放大器上的应用更具

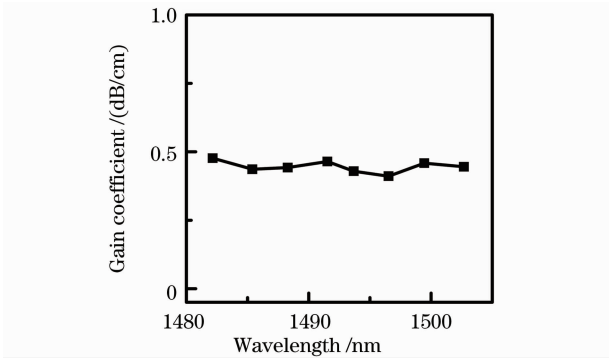


图 1 Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃波导在各信号波长下的内增益系数

Fig. 1 Internal gain coefficient versus signal wavelength in straight Tm^{3+} -doped germanate glass waveguide 实用化。

基于集成器件对波导基片尺寸和波导损耗两方面的要求,在 $8\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 尺寸的 Tm^{3+} 掺杂锗酸盐玻璃基片上设计出 S 型、U 型和 F 型三种具有潜在应用价值的弯曲结构波导。图 2 为曲率半径 $r=1.90\text{ cm}$ 时的波导结构设计图,其中图 2(a) 是传统直波导,它的信号放大路径仅限基片的长度 a ; 图 2(b) 为 S 型波导,是由两个曲率半径为 r 的弯曲波导呈“S”型连接,末端分别连接两段长度为 b 的直波导组成; 图 2(c) 表示 U 型波导,是曲率半径为 r 的弯曲波导的两端分别连接两段长度为 c 的直波导组成; 图 2(d) 为 F 型波导,它是由 S 型的波导演变而来的螺旋型波导。 a, b, c, d 和 r 的值分别为 $8.00, 2.16, 5.84, 6.00$ 和 1.90 cm 。

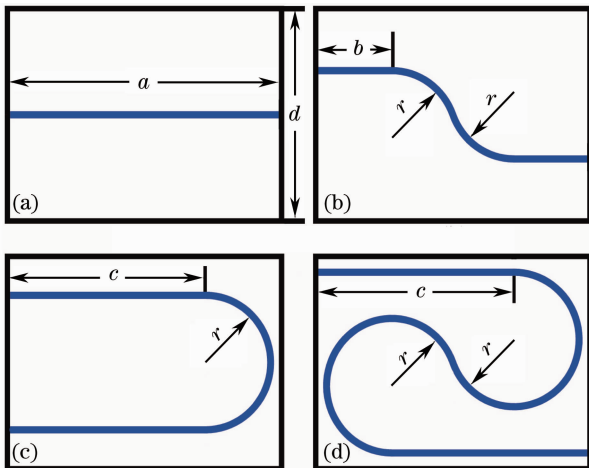


图 2 波导结构设计图。(a) 直波导, (b) S 型波导, (c) U 型波导, (d) F 型波导

Fig. 2 Schematic diagram of waveguide structures. (a) straight waveguide; (b) S-bend waveguide, (c) U-bend waveguide, (d) F-bend waveguide

S 型、U 型和 F 型弯曲光波导的内增益由相同路径长度直波导的内增益减去弯曲损耗和连接损耗得到^[34,35], 表达式为

$$G'_{\text{INT}} = L\gamma - \alpha - \alpha_{\text{TRA}}, \quad (10)$$

式中 L 表示信号光传播路径的长度, γ 是波导的内增益系数, α 和 α_{TRA} 分别为弯曲损耗和连接损耗。

不同的曲率半径会产生不同的弯曲损耗 α , 将弯曲波导转换成等效直波导并对所设计的结构波导进行模拟。波导中信号光的强度随弯曲路径的增大而减弱。弯曲波导的弯曲损耗表示为

$$\alpha(x) = -10 \lg \eta(x) = -10 \lg \frac{I_{\text{out}}(x)}{I_{\text{in}}} = \exp(-\beta x), \quad (11)$$

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 可表示为

$$k = \frac{\alpha}{x} = \frac{-10 \lg \eta(x)}{x} = 4.34\beta. \quad (12)$$

波导弯曲部分的弯曲损耗反映传输过程中信号强度衰减情况, 不同曲率半径对应的弯曲损耗系数如图 3 所示。 $r=1.90\text{ cm}$ 时, 常数 $\beta=0.009$, 损耗系数 $k=0.04\text{ dB/cm}$ 。随着曲率半径 r 的进一步增大, 弯曲损耗可以忽略, 受到基片的尺寸限制, 曲率半径选择 1.90 cm 。图 3 中插图表示曲率半径为 1.90 cm 时弯曲损耗值与弯曲路径长度的关系, 弯曲损耗 α 的值随弯曲传输路径的增长呈线性变化。

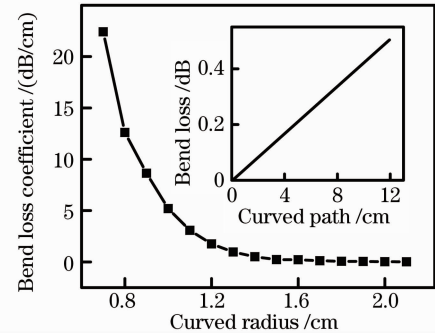


图 3 弯曲损耗系数与半径的关系, 插图: 半径 1.90 cm 时弯曲损耗与传输路径的关系

Fig. 3 Bend loss coefficient versus curved radius, inset: bend loss versus the curved path with radius of 1.90 cm

波导的连接损耗 α_{TRA} 是由于两波导连接部分模式的急剧变化导致的^[36,37]。通过 BPM 方法模拟直波导与弯曲波导的连接损耗以及两弯曲波导之间的连接损耗分别如图 4(a), (b) 所示。当 $r=1.90\text{ cm}$ 时, 通过二重积分得到 1482 nm 波长处直波导与弯

曲波导以及弯曲波导与弯曲波导连接处的最低连接损耗分别为 0.01 dB 和 0.03 dB, 此时两种波导连接的位错位移为 $P_1 = 0.5 \mu\text{m}$ 和 $P_2 = -1.0 \mu\text{m}$ 。当位错位移为 0 时, 两种不同连接形式波导的连接损耗分别是 0.05 dB 和 0.18 dB。结果表明, 通过优化设计的 S 型波导, 其总连接损耗可从 0.28 dB 降低至 0.05 dB。

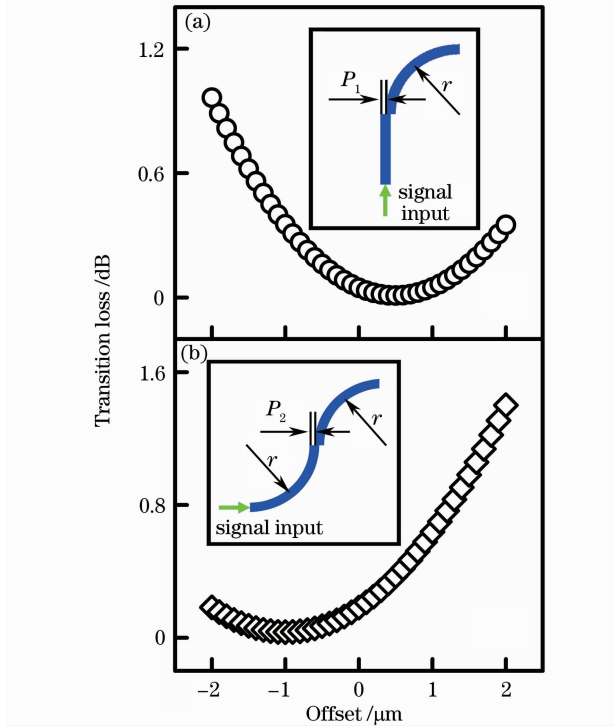


图 4 连接损耗与波导连接位错位移的关系
Fig. 4 Junction loss versus offset of the waveguide's junction dislocation

将所设计的弯曲波导相对于直波导产生的附加损耗进行评估, 各弯曲波导输出信号光相对强度与传播路径的关系如图 5 所示。S 型, U 型和 F 型波

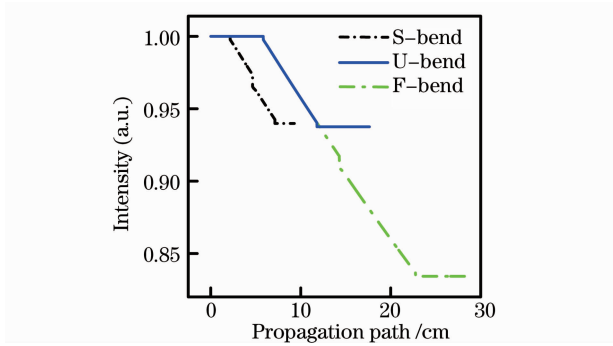


图 5 各结构波导中输出信号的相对强度与传播路径的关系
Fig. 5 Relative output signal intensity of various waveguide versus propagation path

导中光强随弯曲传播路径增长呈指数下降, 并在波导节点处出现急剧的连接损耗。三种弯曲结构波导中, F 型波导弯曲路径最长, 信号光经过 3 个节点, 因此光强损耗最多。

图 6 是 4 种结构波导在 1482~1502 nm 波段针对各信号波长的内增益谱图。其中直波导的内增益通过实验测得的增益系数获得, 如曲线 1 所示。曲线 2, 3 和 4 分别表示模拟计算得到的 S 型, U 型和 F 型结构波导的内增益。S 型波导对增益的提高并不显著, 但具有更长放大路径的 U 型和 F 型波导则体现出较大的增益优势。其中 F 型波导的增益性能最佳, 在 1482 nm 波长处获得最大内增益 13.01 dB。

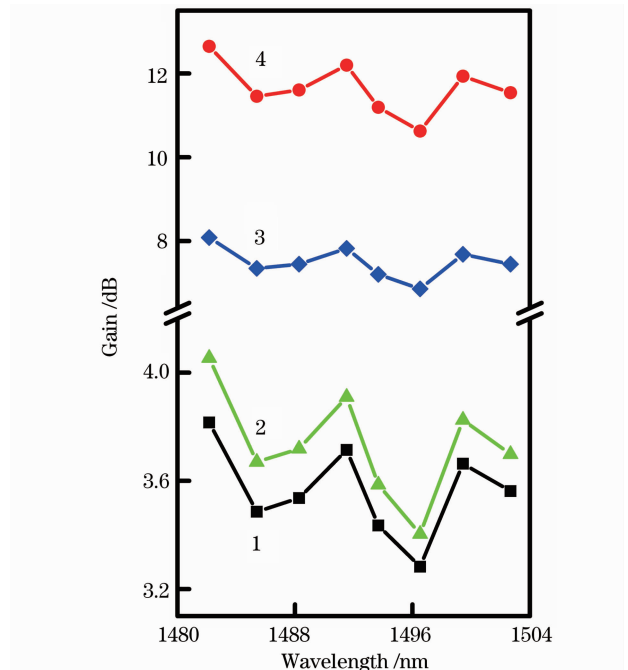


图 6 4 种结构波导在不同信号波长下的内增益
Fig. 6 Internal gains versus different signal wavelengths in four types of waveguides

在高集成器件的波导结构设计中, 曲率半径决定了弯曲波导的弯曲损耗, 连接损耗以及光信号放大路径的长度, 因此曲率半径的选择将直接影响波导结构的增益性能。表 1 列出曲率半径 $r = 1.80, 1.90$ 和 2.00 cm 时 4 种波导结构的增益和相关损耗。曲率半径增大, 弯曲损耗降低, 内增益随之提高, 但是综合平衡高集成度、低损耗以及波导制作难度等多方面的要求, $8 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 的 Tm^{3+} 掺杂铈酸盐玻璃基片上的曲率半径优选为 1.90 cm 。

5 结 论

通过弯曲结构的波导设计, 在 $8 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 的铈

表 1 1482 nm 波长处不同结构弯曲波导的附加损耗和内增益比较

Table 1 Comparison of extra loss and internal gain for different types of waveguides at 1482 nm wavelength

Waveguide parameters	$r=1.80$ cm			$r=1.90$ cm			$r=2.00$ cm		
	S-bend	U-bend	F-bend	S-bend	U-bend	F-bend	S-bend	U-bend	F-bend
Gain coefficient in straight waveguide / (dB/cm)	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
Total length /cm	9.02	17.04	27.10	9.23	17.65	28.62	9.19	18.55	30.28
Curved length /cm	4.41	5.65	15.72	5.00	6.00	16.94	5.14	6.60	18.33
Bend loss coefficient / (dB/cm)	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
Total transition loss /dB	0.09	0.04	0.09	0.05	0.02	0.05	0.07	0.03	0.07
Internal gain /dB	3.97	7.81	11.98	4.22	8.21	13.01	4.21	8.71	14.01

酸盐玻璃基片上将弯曲和连接损耗控制在较小范围内,进而获得较高的信号增益。通过 BPM 方法模拟得到最佳的弯曲半径($r=1.90$ cm)和连接方式($P_1=0.5 \mu\text{m}$, $P_2=-1.0 \mu\text{m}$),并对设计的 S 型, U 型和 F 型结构波导的增益进行预期。其中 F 型波导具有最长的放大路径(28.62 cm),其内增益达到 13.01 dB,远高于 U 型(8.21 dB)和 S 型(4.22 dB)波导,是相同条件下直波导(3.84 dB)的 3 倍。结果表明, F 型波导有望使 Tm^{3+} 掺杂玻璃波导在 S 波段集成放大器件中得到广泛应用。

参 考 文 献

- X. S. Wang, Q. H. Nie, T. F. Xu *et al.*. $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped tellurite glass for broadband optical amplifying over S+L bands[J]. *Spectrochim. Acta Part A*, 2009, **72**(3): 543~546
- Z. Z. Chen, F. Song, C. G. Zou *et al.*. Numerical investigation of gain characteristics of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2009, **40**(13): 1021~1031
- H. Chen, Y. H. Liu, Y. F. Zhou *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} doped $\text{TeO}_2\text{-BaO}(\text{Li}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O})\text{-La}_2\text{O}_3$ glasses for 1.5- μm optical amplifiers[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2005, **351**(37-39): 3060~3064
- J. B. Qiu, Z. G. Song. Nanocrystals precipitation and up-conversion luminescence in $\text{Yb}^{3+}\text{-Tm}^{3+}$ co-doped oxyfluoride glasses[J]. *J. Rare Earth*, 2008, **6**(26): 919~923
- Lin Qiongfai, Xia Haiping, Wang Jinhao *et al.*. Spectral properties of Tm^{3+} -doped $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-PbF}_2\text{-AlF}_3$ glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 306~310
林琼斐, 夏海平, 王金浩等. Tm^{3+} 掺杂 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-PbF}_2\text{-AlF}_3$ 玻璃的光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 306~310
- G. S. Qin, W. P. Qin, C. F. Wu *et al.*. Infrared-to-visible upconversion luminescence of Er^{3+} and Yb^{3+} co-doped germanate glass[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2004, **347**(1-3): 52~55
- S. X. Dai, B. Peng, P. J. Zhang *et al.*. The near- and mid-infrared emission properties of Tm^{3+} -doped GeGaS-CsI chalcogenide glasses[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2010, **356**(44-49): 2424~2428
- L. Xu, B. Song, S. C. Xiao *et al.*. Up-conversion luminescence of $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped oxy-fluoride glasses[J]. *J. Rare Earth*, 2010, **28**(2): 194~197
- Zhao Yaxun, Wang Jun, Chen Fen *et al.*. Preparation and spectral properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ codoped bismuth-germanate glass and the fibers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(2): 208~211
周亚训, 王 俊, 陈 芬等. $\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ 共掺铋锗酸盐玻璃及其
- 光纤的制备和光谱性质[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(2): 208~211
- L. Y. Zhang, N. K. Chen, L. L. Hu. High Er^{3+} concentration low refractive index fluorophosphate glass for evanescent wave optical amplifiers[J]. *Physica B*, 2008, **403**(19-20): 3470~3472
- H. Y. Meng, W. Q. Gao, Y. G. Liu *et al.*. The gain and noise figure improvement of reflection L-band erbium-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **288**(1-3): 85~89
- S. H. Xu, Z. M. Yang, Z. M. Feng *et al.*. Efficient fibre amplifiers based on a highly $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped phosphate glass-fibre[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 047806
- J. F. Li, K. L. Duan, Y. S. Wang *et al.*. Modeling and optimizing of high-concentration erbium-doped fiber amplifiers with consideration of ion-clusters [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(1): 143~149
- Yin Bing, Yang Zhongmin, Yang Gangfeng *et al.*. Characteristic of 2.0 μm fluorescence dominated by the cross-relaxation of Tm^{3+} in $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ co-doped tellurite glasses[J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2007, **35**(7): 913~917
印 冰, 杨中民, 杨钢锋等. $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺碲酸盐玻璃中 Tm^{3+} 交叉弛豫主导的 2.0 μm 发光特性[J]. *硅酸盐学报*, 2007, **35**(7): 913~917
- X. L. Liang, S. L. Yuan, Y. X. Yang *et al.*. The luminescence properties of Er^{3+} -doped and $\text{Er}^{3+}\text{-Tm}^{3+}$ -co-doped phosphate glasses for white light emitting diode[J]. *J. Lumin.*, 2010, **130**(3): 429~433
- Q. Qian, Y. Wang, Q. Y. Zhang *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} -doped $\text{Na}_2\text{O-Sb}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2008, **354**(18): 1981~1985
- Y. H. Wang, C. S. Ma, D. L. Li *et al.*. Effects of styles on power conversion efficiency and gain characteristics of phosphate glass $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ -co-doped waveguide amplifiers [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(5): 545~549
- H. Ping, D. Q. Chen, Y. L. Yu *et al.*. Judd-ofelt analyses and luminescence of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped transparent glass ceramics containing NaYF_4 nanocrystals[J]. *J. Alloys Compd.*, 2010, **490**(1-2): 74~77
- G. Lakshminarayana, H. C. Yang, S. Ye *et al.*. Co-operative downconversion luminescence in $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-LiF-GdF}_3$ glasses[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**(17): 175111
- J. Chang, Q. P. Wang, G. D. Peng *et al.*. Gain improvement by internal laser cavity in $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped tellurite fiber amplifier pumped by 980-nm laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(19): 8535~8539
- Sun Jiangting, Zhang Jiahua, Luo Yongshi *et al.*. Spectra and its bandwidth of the 1.5 μm emission in Er^{3+} -doped glass[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(9): 992~995
孙江亭, 张家骅, 骆永石等. Er^{3+} 掺杂玻璃的 1.5 μm 发射光谱及其带宽[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(9): 992~995

- 22 D. M. Shi, Q. Qian. Spectroscopic properties and energy transfer in $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-PbO-GeO}_2$ glasses doped with Er^{3+} and Tm^{3+} [J]. *Physica B*, 2010, **405**(11): 2503~2507
- 23 Chen Haiyan, Dai Jizhi, Yang Yapei *et al.*. Gain and quantum conversion efficiency of $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ codoped phosphate glass amplifier operating at large signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 351~355
陈海燕, 戴基智, 杨亚培 等. $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃放大器的大信号增益与量子效率理论分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 351~355
- 24 Chen Baojiu, Lü Shaozhe, Qin Weiping *et al.*. Calculation of optical properties of Tm^{3+} in MFT glass by JO theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(7): 667~670
陈宝玖, 吕少哲, 秦伟平等. Tm^{3+} 掺杂的 MFT 玻璃材料的升频转换发光及光学性质的 JO 计算[J]. *光子学报*, 1999, **28**(7): 667~670
- 25 S. Q. Man, S. F. Wong, E. Y. B. Pun *et al.*. 1. $47\text{-}\mu\text{m}$ emission and multiphonon relaxation of Tm^{3+} ions in potassium bismuth gallate glasses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(2): 313~317
- 26 R. Scarmozzino, R. M. Osgood. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integratedoptics applications[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(5): 724~731
- 27 W. J. Song, G. H. Song, B. H. Ahn *et al.*. Scalar BPM analyses of TE and TM polarized fields in bent waveguides[J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2003, **51**(6): 1185~1197
- 28 C. Ma, E. V. Keuren. A three-dimensional wide-angle BPM for optical waveguide structures[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 402~407
- 29 BeamPROP (Rsoft Incorporated, 2003)
- 30 R. T. Schermer, J. H. Cole. Improved bend loss formula verified for optical fiber simulation and experiment[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(10): 899~909
- 31 M. Heiblum, J. H. Harris. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, **QE11**(2): 75~83
- 32 R. Baets, P. E. Lagasse. Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(2): 177~182
- 33 D. L. Yang, E. Y. B. Pun, N. Q. Wang *et al.*. Radiation and gain behaviors in Tm^{3+} -doped aluminum germanate substrate glasses and thermal ion-exchanged waveguide[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(5): 1~7
- 34 V. Astley, J. Scheiman, R. Mendis *et al.*. Bending and coupling losses in terahertz wire waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(4): 553~555
- 35 R. K. Navalakhe, N. D. Gupta, B. K. Das. Fabrication and characterization of straight and compact S-bend optical waveguides on a silicon-on-insulator platform[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(31): G125~G130
- 36 A. H. Liang. Relation between transition loss and mode-field half-width for curved noncircular weakly-guiding single-mode waveguides[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11): 2075~2077
- 37 T. Kitoh, N. Takato, M. Yasu *et al.*. Bending loss reduction in silica-based waveguides by using lateral offsets[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 555~562