

铒镱共掺光波导放大器增益特性模拟和性能优化

尹向宝, 李晓萍

黑龙江科技学院数学力学系, 哈尔滨 150027

摘要 在分析铒镱共掺系统的能级结构和相关跃迁的基础上, 根据速率方程和传输方程, 建立了 EY-CDWA 的增益模型, 给出了 EY-CDWA 的增益公式, 对增益特性进行了模拟, 并对影响放大器增益的波导长度及泵浦功率等相关条件进行了优化。模拟计算中建立了参数优化方案, 实现了放大器泵浦波长、泵浦功率和增益的同步优化, 得到最佳长度下的最大增益, 该理论模型应用于实际制作的 Yb-Er 共掺 Al_2O_3 光波导放大器, 结果与实验数据相符。

关键词 铒镱共掺光波导放大器; 净增益; 泵浦功率; 波导长度

中图分类号 TN911.74

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)15-0097-04

Simulation of Gain Characteristics of Erbium Ytterbium Adulterates Fiber Waveguide Amplifier and Functional Optimization

YIN Xiangbao, LI Xiaoping

*Department of Mathematics and Mechanics, Heilongjiang
Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China*

Abstract Optical integration is the development trend of modern optical communication technologies. Waveguide amplifier is a new type of integrated optical devices, after the semiconductor laser amplifiers and the erbium-doped fiber amplifiers. The use of rare-earth element ytterbium due to some salient features of the as-sensitized elements can improve the performance of the erbium-doped waveguide amplifier. EY-CDWA, due to its high gain per unit length and the easiness to be integrated, can very easily be integrated with any device. Optical integration paves a way for a wide range of active components. Therefore, EY-CDWA is being paid more and more attention. This paper analyzes the impact of various factors on the gain of amplifiers and how to improve the

amplifiers. The analysis of co-doped Yb-doped structure in the system-level forms the basis of the relevant transition by solving the rate equation and the amplifier transfer equation. A gain model is built for EY-CDWA with related formula for the gain. Gain characteristics are simulated. The waveguide length, pump power and other related conditions are optimized with respect to the amplifier gain. With a parameter optimization program, the amplifier pump wavelength, pump power and gain are optimized at the same time, with the maximum gain in the best length. The theoretical model can be applied to the actual production of the Yb-Er co-doped Al_2O_3 optical waveguide amplifier, with a good agreement with the experimental data. Analysis of the impact of various factors on the gain of amplifier improves the methods and helps to develop a more reasonable parameter optimization program.

Keywords Yb-Er co-doped waveguide amplifier; net increase of benefit; pump power; duct length

0 引言

光通信器件的集成化是现代光通信的发展方向, 光波导放大器是一种新型的集成光学器件, 它是继半导体激光放大器、掺铒光纤放大器(EDFA)之后又一新型光放大器。虽然国外已有掺铒光波导放大器产品问世^[1-2], 如美国 Nohrtstar 光子公司、法国 Teem 光子公司等先后推出商业化产品, 增益在 10~20 dB 之间, 但性能、参数并非十分理想, 功能比较单一。国内掺铒光波导放大器研究起步较晚, 许多基础工作还有待

收稿日期: 2009-07-03

基金项目: 黑龙江省教育厅 2008 年度科学技术研究项目(11533065)

作者简介: 尹向宝, 讲师, 研究方向为光量子学, 电子信箱: xiaobao781219@163.com

深入探索。目前研究最多的是铒镱共掺光波导放大器 (EY-CDWA)。1996 年,荷兰科学家 Hoven 等首先用射频磁控溅射法,在已氧化了一层 SiO_2 薄膜的单晶硅基上沉积 Al_2O_3 薄膜,再用 100 keV~1.5 MeV 的能量将铒离子均匀地注入 Al_2O_3 薄膜中,用离子束成功刻蚀了脊形掺铒 Al_2O_3 光波导放大器。1.48 μm ,9 mW 的半导体激光器抽运下,4 cm 长的光波导获得了 2.3 dB 的净增益^[1]。这一成果激发了世界各国科学家和相关商业公司对掺铒光波导放大器研究的极大兴趣。由于稀土元素铒的一些显著特点,将其作为敏化元素,能够很好地改善掺铒光波导放大器的性能^[3-4]。可以预见,铒镱共掺光波导放大器(EY-CDWA)更具有发展潜力。由于 EY-CDWA 单位长度增益高、易于集成,它能够非常容易地与任何损耗器件集成在一起,从而为集成光路引进多种有源元件^[2]。凭借这些优势,EY-CDWA 正受到越来越广泛的关注。本研究分析了影响放大器增益的各种因素,提出了提高放大器增益一些方法。

1 理论分析

图 1 为 980 nm 泵浦时铒镱共掺系统的能级图。 C_{cr} 为铒镱间的交叉弛豫系数。在 980 nm 泵浦的条件下,铒的基态为 $^4I_{15/2}$ 能级,光放大能级为第一激发态 $^4I_{13/2}$,泵浦能级为 $^4I_{11/2}$ 能级,对于镱,基态和泵浦能级分别为 $^2F_{7/2}$ 和 $^2F_{5/2}$ 。

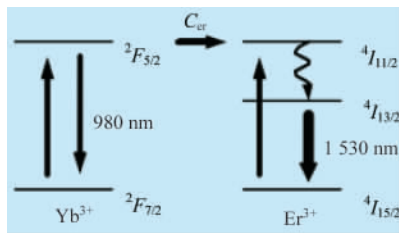


图 1 铒镱共掺系统的能级及相互间能量转换

Fig.1 Er-Yb co-doped system and inter-level energy

对铒镱共掺系统,由于镱的掺入降低了泵浦能级的激发态吸收和该能级的合作上转换,考虑放大能级的合作上转换和铒镱之间的能量转移,速率方程^[6-7]可写成

$$\begin{aligned} \frac{dN_2(x, y, z, t)}{dt} = & \frac{\sigma_{sp} I_p(x, y, z, t)}{h\nu_p} N_1(x, y, z, t) + \\ & \frac{\sigma_{as} I_s(x, y, z, t)}{h\nu_s} N_1(x, y, z, t) - \\ & \frac{\sigma_{es} I_s(x, y, z, t)}{h\nu_s} N_2(x, y, z, t) - A_{21} N_2(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$N_1(x, y, z, t) + N_2(x, y, z, t) = N_T(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中, $N_1(x, y, z, t)$, $N_2(x, y, z, t)$ 分别为基态 ($^4I_{15/2}$) 和亚稳态 ($^4I_{13/2}$) 粒子数密度; $N_T(x, y, z, t)$ 为 Er^{3+} 掺杂粒子数密度; $h\nu_p$, $h\nu_s$ 分别为抽运光和信号光光子的能量; σ_{ap} , σ_{as} 分别为基态对泵浦光和信号光的吸收截面; σ_{es} 为激发态的受激辐射截面; A_{21} 为自发辐射概率; $A_{21}=1/\tau_{21}$, τ_{21} 为亚稳态粒寿命; $I_p(x, y, z, t)$, $I_s(x, y, z, t)$ 分别为泵浦光和信号光的光强。 z 为传播方向,在

前向抽运的情况下,忽略波导损耗,在稳态情况下,泵浦光和信号光沿 z 轴的传输方程^[8]为

$$\begin{cases} \frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z) \\ \frac{dP_s(z)}{dz} = [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)]P_s(z, \nu_s) \end{cases} \quad (3)$$

边界条件为

$$\begin{cases} P_p(0) = P_{p0} \\ P_s(0, \nu_s) = P_{s0}(\nu_s) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\gamma_p(z)$, $\gamma_{12}(z, \nu_s)$, $\gamma_{21}(z, \nu_s)$ 分别为

$$\begin{cases} \lambda_p(z) = \int \int_A \Psi_p(x, y) \sigma_{ap} N_1(x, y, z) dx dy \\ \gamma_{12}(z, \nu_s) = \int \int_A \Psi_s(x, y) \sigma_{as} N_1(x, y, z) dx dy \\ \gamma_{21}(z, \nu_s) = \int \int_A \Psi_s(x, y) \sigma_{es} N_2(x, y, z) dx dy \end{cases} \quad (5)$$

式中 A 为波导区的横截面面积; $\Psi_p(x, y)$, $\Psi_s(x, y)$ 分别为泵浦光和信号光的归一化强度。

引入光波模场与 Er^{3+} 掺杂分布之间的重叠因子

$$\Gamma_{ps} = \int \int \Psi_{ps}(x, y) f(x, y) dx dy \quad (6)$$

其中, $f(x, y)$ 为归一化的掺杂 (横向) 分布函数。

在稳态情况下,由速率方程可以得到光波导放大器的增益公式^[9]为

$$\begin{aligned} [G(z)]^{\gamma} \exp(-\gamma \Gamma_{es} \sigma_{es} N_T z) = & 1 - \frac{\nu_p P_{s0}}{\nu_s P_{p0}} [G(z) - 1] - \\ & \frac{[\ln G(z) + \Gamma_{as} \sigma_{as} N_T z] A h \nu_p}{\tau_{21} \Gamma_{s} (\sigma_{as} + \sigma_{es}) P_{p0}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\gamma = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap}}{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})}$, $G(z) = \frac{P_s(z)}{P_{s0}}$ 为放大器增益; P_p , P_s 分别为泵浦光和信号光的功率。

由式(7)可以看出,光波导放大器的增益与铒离子的掺杂浓度、光波导的长度、泵浦功率、波导的横截面积、重叠因子等因素有关。在此主要介绍光波导的长度及泵浦功率对放大器增益的影响。

2 数值结果

2.1 铒镱共掺 Al_2O_3 光波导放大器净增益与泵浦功率关系

图 2 给出了泵浦功率 P_{p0} 与增益 G 的关系曲线。可以看出,在不同泵浦功率情况下,泵浦功率小于 18 mW 时,放大器增益低于光波导的损耗,净增益为负值;泵浦功率大于 18 mW 时,净增益大于零,并随泵浦功率增强近似线性增加。图 2 中 b 线是在上述薄膜参数和刻蚀参数下,铒镱共掺 Al_2O_3 光波导放大器净增益与抽运功率关系的数值模拟曲线。计算首先用有限元法解析矩形截面内铒镱共掺 Al_2O_3 导波层内的电磁场分布^[8,10],再结合铒离子能级 ($^2F_{7/2}$, $^2F_{5/2}$) 和铒离子能级 ($^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$) 及其相互耦合的速率方程^[11-12] 1530 nm 信号光和 980 nm 泵浦光的传输方程,进行数值模拟计算。

从图 2 可以看到,实验测量数据与数值计算结果的总体

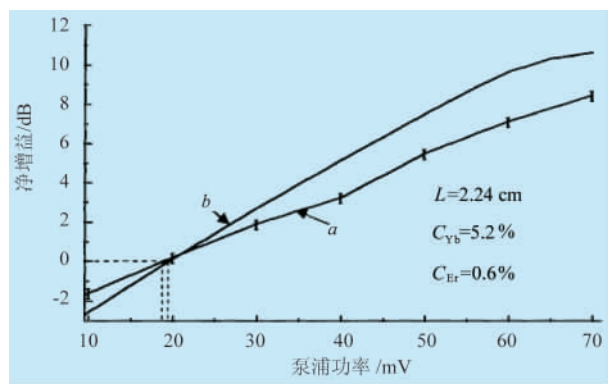


图2 光波导放大器净增益与泵浦功率的关系
Fig. 2 Relationship between optical waveguide amplifier's net gain and the pump power

趋势一致。但数值模拟的 2.24 cm 长、矩形截面的铒镱共掺 Al_2O_3 光波导放大器的净增益为 10.6 dB, 单位长度的净增益为 4.73 dB/cm, 大于实验的实际测量值 3.77 dB/cm。同时, 理论计算的阈值泵浦功率 19 mW 也略大于实验测量值 18 mW。存在差异的可能原因在于: 即使同种基体材料, 但不同制备方法, 参量值会有所不同^[13]。另外, 计算时波导损耗取 0.35 dB/cm, 而实际波导损耗估计要大一些, 如芯层与包层界面的凹凸不平产生散射损耗等, 这可通过制膜和刻蚀工艺的提高而得到改善。

2.2 铒镱共掺 Al_2O_3 光波导放大器净增益与波导长度的关系

图 3 给出了 980 nm 泵浦下波导长度与增益 G 的关系曲线, 其中入射信号功率为 $1 \mu\text{W}$ 。

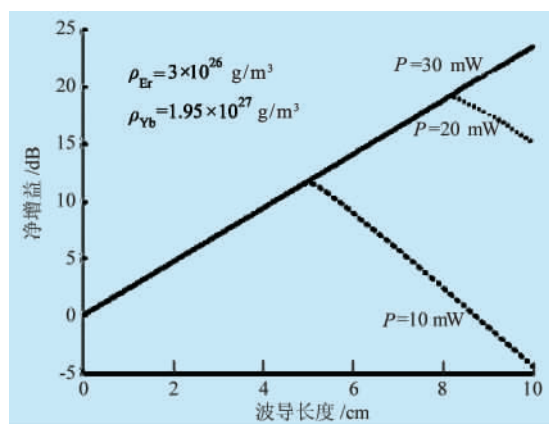


图3 光波导放大器净增益与波导长度的关系
Fig. 3 Relationship between optical waveguide amplifier's net gain and the length of waveguide

由图 3 可以看出, 并不是波导越长增益越大, 一般情况下, 对一泵浦功率, 存在一个最佳的波导长度。随着波导长度的增大, EY-CDWA 的增益首先几乎是线性地增大, 但当波导长度增大到一定值时, 增益达到最大值。若波导长度继续增大, 增益反而会下降。若波导长度过长, 还会出现增益小于零

的情况。这是因为泵浦功率一定的情况下, 波导太短, 泵浦功率不能充分利用, 达不到最大增益, 而波导长度超过了一定的范围, 泵浦光功率将消耗到阈值泵浦功率以下, 其能量不足以使波导中的粒子数反转, 波导将消耗其信号光功率, 使增益下降因此需要对其进行优化。另外, 掺杂浓度一定的情况下, 获得最大可能增益的最佳波导长度取决于输入泵浦功率。

图 3 可用作选择最佳波导长度, 可以看到存在一个最佳的波导长度, 在掺铒质量浓度为 $3 \times 10^{26} \text{ g/m}^3$ 、镱离子质量浓度为 $1.95 \times 10^{27} \text{ g/m}^3$ 、泵浦功率为 10 mW 时波导的最佳长度为 5 cm, 此时达到最大增益 11.612 dB; 泵浦功率为 20 mW 时波导的最佳长度为 8.2 cm, 最大增益为 19.109 dB; 泵浦功率为 30 mW 时波导的最佳长度超过了 10 cm, 最大增益超过 25 dB。随着泵浦功率的升高, 它可以为更多的铒离子提供跃迁, 优化长度变长, 增益随之变大。当其他条件相同时, Yb^{3+} 的引入可使 EY-CDWA 的最佳波导长度变短。这说明 EY-CDWA 在尺寸上更有利于器件小型化、集成化。

不像光纤放大器, 波导放大器一旦刻制出来, 长度就不能改变。对一定的泵浦功率, 放大器的最佳长度设计应使残余的泵浦功率达到使增益系数为 0 时的值, 这时放大器获得的增益最大。

3 结论

在分析铒镱共掺系统的能级结构和相关跃迁的基础上通过求解放大器的速率方程及其传输方程, 对铒镱共掺 Al_2O_3 光波导放大器的增益特性进行了模拟, 模拟计算中建立了更为合理的参量优化方案, 并对一些相关条件进行了优化。应放大器集成的目的, 选择波导长度为 5 cm, 在 980 nm 泵浦时, 通过对各种条件的优化, 在掺铒浓度为 $3 \times 10^{26} \text{ m}^3$ 、镱离子浓度为 $1.95 \times 10^{27} \text{ m}^3$ 、泵浦功率为 10 mW 条件下, 得到了 11.612 dB 的增益。模拟结果表明, Yb^{3+} 的敏化作用有效地抑制了 Er^{3+} 离子簇的形成, 减小了 Er^{3+} 的合作上转换、激发态吸收等非线性效应所带来的负面影响, 从而提高了放大器的增益。实现了放大器泵浦功率、波导长度和增益的同步优化, 得到最佳长度下的最大增益, 绘制出了优化设计曲线。将该理论模型应用于实际的 Yb-Er 共掺 Al_2O_3 光波导放大器, 结果与实验数据相符。

参考文献 (References)

- [1] van den Hoven G N, Koper R J I M, Polman A. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al_2O_3 wave guides on silicon [J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 68(14): 1886-1888.
- [2] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser [J]. *Appl Opt*, 1964, 3(9): 182-186.
- [3] 陈海燕, 刘永智, 戴基智, 等. Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃(LGS-L)波导放大器设计[J]. *光学学报*, 2003, 23(6): 697-701.
Chen Haiyan, Liu Yongzhi, Dai Jizhi, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23

- (6): 697-701.
- [4] Righini G C, Brenci M, Forastiere M A, *et al.* Rare-earth-doped glasses and ion-changed integrated optical amplifiers and lasers[J]. *Philosophical Magazine B*, 2002, 82(6): 721-734.
- [5] Shoostari A, Touam T, Najafi S. Yb³⁺ sensitized Er³⁺ doped wave guide amplifiers: A theoretical approach[J]. *Opt Quan Ele*, 1998, 30: 249.
- [6] Valle G D, Taccheo S, Sorbello G, *et al.* Compact high gain erbium-ytterbium doped waveguide amplifier fabricated by Ag-Na ion exchange [J]. *Electron Lett*, 2006, 42(11): 632-633.
- [7] Bastien S P, Sunak H R D. Comparision of forward and, bidirectional pumping at 805 and 819 nm in erbium-doped silica fiber amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(5): 456-458.
- [8] Polman A. Erbium implanted thin film photonic materials [J]. *J Appl Phys*, 1997, 82(1): 1-39.
- [9] 聂秋华, 高媛, 徐铁峰, 等. Er³⁺/Yb³⁺共掺 TeO₂-Li₂O-B₂O₃-GeO₂ 玻璃系

- 统的光谱性质和热稳定性研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(5): 773-777.
- Nie Qiuhua, Gao Yuan, Xu Tiefeng, *et al.* *Photon Journal*, 2005, 34(5): 773-777.
- [10] 张晓春. 激光超声技术及其应用[J]. *大学物理*, 1998(2): 31-33.
- Zhang Xiaochun. *College Physics*, 1998(2): 31-33.
- [11] Fabrizio Di Pasquale. Analysis of erbium-doped wave guide amplifiers by a full-vectorial finite-element method [J]. *J Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1565.
- [12] 程成, 张航. 半导体纳米晶体 PbSe 量子点光纤放大器 [J]. *物理学报*, 2005, 55(8): 4139-4144
- Cheng Cheng, Zhang Hang. *Physics*, 2005, 55(8): 4139-4144.
- [13] Kik P G, Polman A. Cooperative upconversion as the gain-limiting factor in Er doped miniature Al₂O₃ optical waveguide amplifiers [J]. *J Appl Phys*, 2003, 93(9): 5008-5012.

(责任编辑 陈广仁)



25th
International
Symposium on
Ballistics
A
2010 Beijing

时间: 2010年5月17-21日
地点: 中国·北京

第25届 国际弹道大会

The 25th International Symposium on Ballistics

主 办: 中国兵工学会
协 办: 南京理工大学

电 话: 010-68963154
网 址: www.isb2010.com