

文章编号: 0253-2239(2004)03-351-5

Er³⁺-Yb³⁺ 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*

陈海燕^{1,2} 戴基智¹ 杨亚培¹ 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重点实验室, 成都 610054)
(² 江汉石油学院理学院, 荆州 434023)

摘要: 研究大信号工作状态下的 Er³⁺-Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的增益与量子转换效率。从量子转换效率的定义出发, 得出了增益、抽运光功率以及量子转换效率三者之间关系的解析表达式。通过数值求解大信号工作状态下的 Er³⁺-Yb³⁺ 共掺系统的速率方程与光功率传输方程, 讨论了 Er³⁺ 浓度、Yb³⁺ 浓度、Yb³⁺ 与 Er³⁺ 浓度比率、抽运光功率以及放大器长度等因素对量子转换效率的影响。结果表明提高 Er³⁺ 浓度与增加放大器长度均有助于提高量子转换效率, 高 Er³⁺ 浓度掺杂需要相应的高 Yb³⁺ 浓度与之相匹配以减小由于高浓度 Er³⁺ 掺杂引起的上转换效应, Yb³⁺ 浓度的提高将降低器件的量子转换效率, Yb³⁺-Er³⁺ 浓度之比取 1~2 较好。

关键词: 光纤通信技术; 光放大器; Er³⁺-Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器; 大信号; 量子转换效率

中图分类号: TN722.3+2 文献标识码: A

Gain and Quantum Conversion Efficiency of Er³⁺-Yb³⁺ Codoped Phosphate Glass Amplifier Operating at Large Signal

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

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

² School of Science, Jiangnan Petroleum University, Jingzhou 434023

(Received 2 December 2002; revised 17 March 2003)

Abstract: Gain and quantum conversion efficiency(QCE) of Er³⁺-Yb³⁺ codoped phosphate glass waveguide amplifier at large signal operation are studied. From the definition of quantum conversion efficiency the analytical expression relating gain, pump power and quantum conversion efficiency is obtained. By solving the rate and optical power propagation equations describing the Er³⁺-Yb³⁺ codoped system, the effects of Er³⁺-concentration, Yb³⁺-concentration, the ratio of Yb³⁺-to Er³⁺-concentration, pump power and amplifier length on quantum conversion efficiency are discussed. It is shown that increase of Er³⁺-concentration and of amplifier length can improve quantum conversion efficiency, in order to reduce up-conversion caused by high Er³⁺-concentration, high Er³⁺-concentration must match corresponding high Yb³⁺-concentration, improvement of Yb³⁺-concentration reduces quantum conversion efficiency, the rate of 1~2 of Er³⁺-Yb³⁺ codoped concentration is available.

Key words: optical fiber communication technology; optical amplifier; Er³⁺-Yb³⁺ codoped phosphate glass waveguide amplifier; large signal; quantum conversion efficiency (QCE)

* 国防预研基金(51402040303DZ02)资助课题。

E-mail: uestchy0470@sina.com.cn

收稿日期: 2002-12-02; 收到修改稿日期: 2003-03-17

1 引 言

由于工作于 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器(EYCDWA)在城域网中有潜在应用,近些年来这一器件一直是研究的热门课题^[1~4]。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的光有线电视系统中,高功率二极管固体激光器抽运的 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器将在功率放大中起重要作用,主要目的是补偿无源光器件的损耗和提高发送光功率。当 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器用作功率放大时,其工作于大信号状态。虽然 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的数值分析已经有了很多,但都局限于研究小信号工作状态^[5,6],就作者所知,对大信号输入时的 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器特性还没见相关报道。

本文对大信号工作时 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的增益特性和量子转换效率(QCE)进行研究。讨论 Er^{3+} 浓度、 Yb^{3+} 浓度、 Er^{3+} 与 Yb^{3+} 浓度比率、抽运光功率以及放大器长度等因素对量子转换效率的影响。

2 理论模型

2.1 大信号工作状态下的 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器速率与功率传输方程

功率放大是指将放大器放在发射光源之后对信号进行放大的应用形式。图 1 为带 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的有线电视系统结构示意图,光发射机(Tx)发出毫瓦量级光信号,经放大器进行功率放大,以提高发送光功率、补偿无源器件(如分束器)的损耗和提高到达接收机(Rx)的光功率,系统中的 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器处于大信号工作状态。理论和实验表明^[4,6,7],在 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃系统中, Yb^{3+} 离子的敏化作用可以有效地克服放大器中的上转换现象。忽略放大自发辐射(ASE),描述 $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸

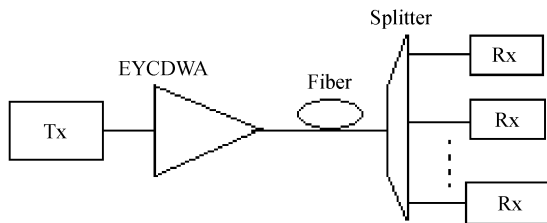


Fig. 1 Schematic diagram of optical CATV system with EYCDWA

盐玻璃波导放大器稳态速率方程^[6]可简化为

$$-dn_1 + (e + A_{21})n_2 + C_r n_3 n_2 N_{\text{Er}} = 0, \quad (1)$$

$$n_1 + n_2 = 1, \quad (2)$$

$$-(a + b)n_3 + (A_{43} + c)n_3 - C_r n_2 n_3 N_{\text{Yb}} = 0, \quad (3)$$

$$n_3 + n_4 = 1, \quad (4)$$

其中

$$a = \frac{\sigma_{\text{as}}}{h\nu_s} I_s(z) \Gamma_s, \quad b = \frac{\sigma_{\text{ap}}}{h\nu_p} I_p(z) \Gamma_p$$

$$c = \frac{\sigma_{\text{cs}}}{h\nu_s} I_s(z) \Gamma_s, \quad d = \frac{\sigma_{\text{ap}}^{\text{Yb}}}{h\nu_p} I_p(z) \Gamma_p$$

$$e = \frac{\sigma_{\text{ep}}^{\text{Yb}}}{h\nu_p} I_p(z) \Gamma_p,$$

$$\Gamma_p = \iint \psi_p(x, y) n(x, y) dx dy,$$

$$\Gamma_s = \iint \psi_s(x, y) n(x, y) dx dy,$$

$$I_s(z) = A \cdot P_s(z), \quad I_p(z) = A \cdot P_p(z),$$

$\sigma_{\text{as}}, \sigma_{\text{cs}}$ 分别是铒离子对频率为 ν_s 的信号光的吸收和发射截面; σ_{ap} 是铒离子对频率为 ν_p 的抽运光的吸收截面; $\sigma_{\text{ap}}^{\text{Yb}}, \sigma_{\text{ep}}^{\text{Yb}}$ 分别是 Yb^{3+} 离子对频率为 ν_p 的抽运光的吸收和发射截面; I_s, I_p 分别是信号光和抽运光的强度, N_{Er} 和 N_{Yb} 分别为 Er^{3+} 与 Yb^{3+} 的总的粒子浓度, $h\nu_p, h\nu_s$ 分别表示抽运光和信号光光子的能量, $A_{43} = 1/\tau_{43}, A_{21} = 1/\tau_{21}, \tau_{43}$ 和 τ_{21} 分别是 Er^{3+} 能级⁴ $I_{13/2}$ 和 Yb^{3+} 能级² $F_{5/2}$ 上的荧光寿命, n_1, n_2 分别是 Yb^{3+} 能级² $F_{7/2}$ 和能级² $F_{5/2}$ 上的离子数密度占总离子数的百分比, n_3 和 n_4 分别是 Er^{3+} 能级⁴ $I_{15/2}$ 、⁴ $I_{13/2}$ 上的离子数密度占总离子数地百分比, C_r 是从 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量传递过程的能量交叉弛豫系数, A 为光波导的横截面面积, $P_p(z), P_s(z)$ 分别为放大器中,沿光传播方向上任一位置的抽运光和信号光功率, $\psi_p(x, y), \psi_s(x, y)$ 分别是抽运光和信号光横向光场强度分布的归一化强度, $n(x, y)$ 是 Er^{3+} 离子横向归一化分布。

在前向抽运方式下,忽略光波导的损耗, $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器系统的光功率传输方程为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p \{ \sigma_{\text{ap}} n_3(z) N_{\text{Er}} + [\sigma_{\text{ap}}^{\text{Yb}} n_1(z) - \sigma_{\text{ep}}^{\text{Yb}} n_2(z)] N_{\text{Yb}} \} P_p(z), \quad (5)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{\text{cs}} n_4(z) - \sigma_{\text{as}} n_3(z)] N_{\text{Er}} P_s(z, \nu_s), \quad (6)$$

边界条件

$$P_p(0) = P_{p0}, \quad P_s(0, \nu_s) = P_{s0}(\nu_s), \quad (7)$$

这里 P_{p0} 为抽运光的入射光功率, P_{s0} 为信号光的入射光功率。

将放大器沿长度 L 方向分成 M 等份, 由边界条件(7)式和速率方程(1)~(4)式利用龙格-库达(Runge-Kutta)算法求解(5)式、(6)式, 即可求得信号光功率沿光波导长度方向的分布, 有关参量为^[8]

$$\begin{aligned}\sigma_{ap} &= 2.58 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \\ \sigma_{as} &= 6.8 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \\ \sigma_{es} &= 7.9 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \\ \tau_{43} &= 8.50 \text{ ms}, \\ N_{\text{Er}} &= 1.51 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}, \\ A &= 4.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2, \\ N_{\text{Yb}} &= 1.95 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}, \\ C_{\text{cr}} &= 2.1 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}, \\ \sigma_{ap}^{\text{Yb}} &= 1.0 \times 10^{-24} \text{ m}^2, \\ \sigma_{ep}^{\text{Yb}} &= 1.0 \times 10^{-24} \text{ m}^2, \\ \tau_{21} &= 2.0 \text{ ms}.\end{aligned}$$

此外, 信号光波长为 1535 nm, 抽运光波长为 980 nm, $P_{s0}=1 \text{ mW}$, $\Gamma_p=\Gamma_s=0.8$, 放大器长度 $L=5 \text{ cm}$ (除特殊说明外)。

2.2 大信号工作状态下 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的增益与量子转换效率

在大信号工作状态下 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的增益与小信号工作状态下的定义相同, 即

$$G = P_s(z=L)/P_{s0}, \quad (8)$$

量子转换效率(QCE)是描述功率放大器特性的一个重要参量, 其定义是增加的信号光光子数和输入的抽运光光子数的比值^[9]

$$E_{\text{QC}} = \frac{P_s(z=L) - P_s(z=0)}{h\nu_s} \cdot \frac{h\nu_p}{P_{p0}}, \quad (9)$$

由(8)式、(9)式不难得出放大器的增益与其量子转换效率之间的关系为

$$G = 1 + E_{\text{QC}} \frac{\nu_s P_{p0}}{\nu_p P_{s0}}, \quad (10)$$

当 $G \gg 1$ 时, (10) 式可化简为

$$G = K \cdot E_{\text{QC}} \cdot P_{p0}, \quad (11)$$

其中 $K = \nu_s / (\nu_p \cdot P_{s0})$ 。

3 数值计算结果

图 2 为大信号工作状态下 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的增益与量子转换效率随抽运光功率变化关系曲线, Er^{3+} 浓度 $N_{\text{Er}} = 1.51 \times$

10^{26} m^{-3} , Yb^{3+} 浓度 $N_{\text{Yb}} = 1.95 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, 放大器长度 $L=5 \text{ cm}$ 。从图上可以看出在一定 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 浓度和放大器长度下, Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的增益随抽运光功率的增加并不是线性增加而是逐渐达到饱和, 且和小信号工作模式相比^[6], 在其它条件相同的情况下, 大信号的光增益小于小信号的光增益, 这是由信号光引起的增益饱和; Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的量子转换效率随抽运光功率的增加并不是线性增加而是出现一个极大值之后迅速减小, 其峰值量子转换效率约为 19%, 这说明在 121 mW 抽运光功率作用下, 约有 19% 的抽运光光子转换为信号光光子。此外, 在深饱和区 ($121 \text{ mW} < P_{p0} < 200 \text{ mW}$), 放大器的量子转换效率与输入抽运光功率成反比, 这与(11)式一致。

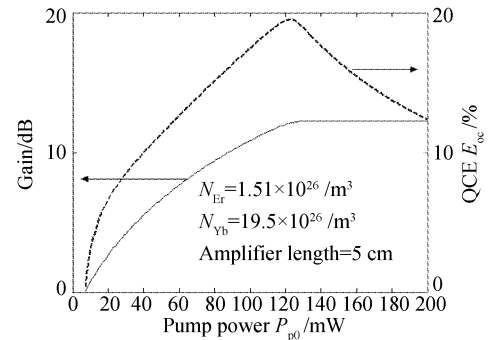


Fig. 2 Gain and QCE as a function of pump power: $N_{\text{Er}} = 1.51 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}} = 1.95 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, $L=5 \text{ cm}$

图 3 为大信号工作状态下 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的量子转换效率随抽运光功率变化关系曲线, Er^{3+} 浓度 $N_{\text{Er}} = 1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, Yb^{3+} 浓度分别为 $N_{\text{Yb}} = 5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $10 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $20 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 放大器长度 $L=5 \text{ cm}$ 。从图上可以看出在一定 Er^{3+} 浓度和放大器长度下, 随着 Yb^{3+} 浓度的增加 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的峰值量子转换效率减小, 且曲线向抽运光功率增

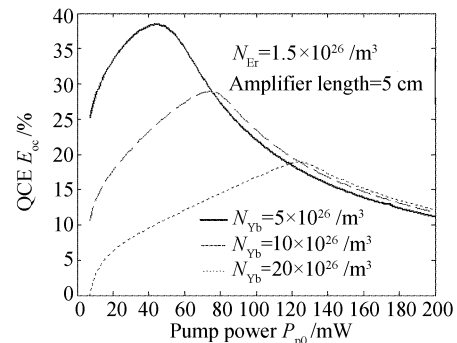


Fig. 3 QCE as a function of pump power: $N_{\text{Er}} = 1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}} = 5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $10 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $20 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $L=5 \text{ cm}$

大的方向移动。这说明在 Er^{3+} 浓度一定的情况下, 提高 Yb^{3+} 的掺杂浓度并不能提高放大器的量子转换效率, 相反会降低峰值量子转换效率。这是因为放大器的峰值增益由其长度和 Er^{3+} 掺杂浓度决定, 为 $G = \sigma_{es} N_{\text{Er}} L (10 \lg e)^{[5]}$ ($e = 2.71828$), 而在 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共掺系统中, Yb^{3+} 吸收大部分抽运光, Yb^{3+} 浓度的增加 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器吸收的抽运光功率也增加。

图 4 为大信号工作状态下 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的量子转换效率随抽运光功率变化关系曲线, Yb^{3+} 浓度 $N_{\text{Yb}} = 10 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 放大器长度 $L = 5 \text{ cm}$, Er^{3+} 浓度分别为 $N_{\text{Er}} = 1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $2.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 。从图上可以看出在一定 Yb^{3+} 掺杂浓度和放大器长度下, 随着 Er^{3+} 掺杂浓度的提高放大器的峰值量子转换效率也增加且曲线向右移动, 这是由于在一定抽运光功率作用下, Er^{3+} 掺杂浓度增加放大器的增益也随着增加, 此时 Er^{3+} 的吸收损耗^[5]也增加, 因此抽运光功率增加, 曲线右移。

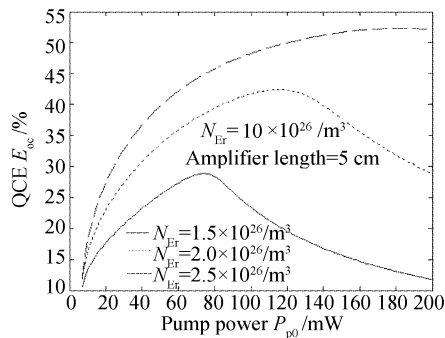


Fig. 4 QCE as a function of pump power: $N_{\text{Yb}} = 10 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{Er}} = 1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $2.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $L = 5 \text{ cm}$

图 5 为大信号工作状态下 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的量子转换效率随抽运光功率变化关系曲线, Er^{3+} 浓度 $N_{\text{Er}} = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 放大器长度 $L = 5 \text{ cm}$, Yb^{3+} 浓度与 Er^{3+} 浓度之比 $r = 1, 2, 4, 10$ 。从图上可以看出在一定放大器长度下, 随着 Yb^{3+} 与 Er^{3+} 浓度之比的提高曲线向右移动, 在 $r = 1, 2$ 范围内放大器的峰值量子转换效率基本不变, 且为最大; 超过这一范围放大器的量子转换效率迅速减小, 这说明 r 存在一个最佳值, 一般取 $1 \sim 2$ 较好。

图 6 为大信号工作状态下 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的量子转换效率随抽运光功率变化关系曲线, Er^{3+} 浓度 $N_{\text{Er}} = 2.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, Yb^{3+} 浓度 $N_{\text{Yb}} = 10 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 放大器长度分别为 $L = 3,$

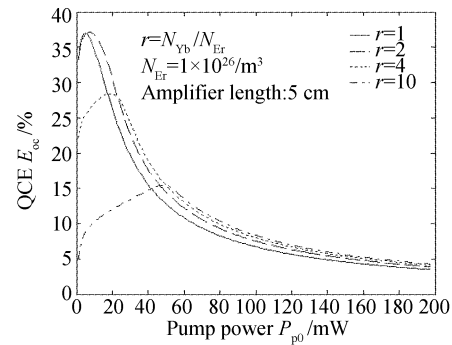


Fig. 5 QCE as a function of pump power: $N_{\text{Er}} = 1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}} : N_{\text{Er}} = 1, 2, 4, 10$, $L = 5 \text{ cm}$

4, 5 cm。从图上可以看出在一定 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 掺杂浓度下, 放大器的峰值量子转换效率随放大器长度的增加而增加, 且曲线向抽运光功率增大方向移动。这是由于放大器长度增加峰值增益和吸收损耗均随之增加, 这需要大功率的抽运光源。

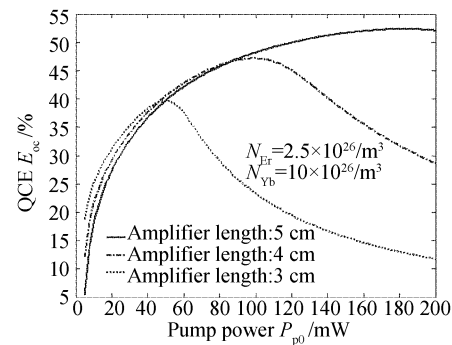


Fig. 6 QCE as a function of pump power: $N_{\text{Er}} = 2.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}} = 10 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, $L = 3, 4, 5 \text{ cm}$

结论 从放大器增益和量子转换效率的定义出发, 得出当放大器工作于深饱和区时, 其量子转换效率与抽运光功率成反比。提高 Er^{3+} 浓度与增加放大器长度均有助于提高器件的量子转换效率, 高 Er^{3+} 浓度掺杂需要相应的高 Yb^{3+} 浓度与之相匹配以减小由于高浓度 Er^{3+} 掺杂引起的上转换效应, Yb^{3+} 浓度的提高将降低器件的量子转换效率, $\text{Yb}^{3+} - \text{Er}^{3+}$ 浓度之比取 $1 \sim 2$ 较好, 这对放大器的设计具有一定的指导作用。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Barbier D. The present and future of EDWA technology. *Technical Program Committee OFC ' 2002*, Anaheim

- California, TuB3
- 3 Iannone C, Reichmann K C, Birk M *et al.*. A 160-km transparent metro WDM ring network featuring cascaded erbium-doped waveguide amplifiers. *OSA Optical Fiber Communications (OFC) Proceedings*, CA 2001, Anaheim, March, 17~22
- 4 Chen Haiyan, Dai Jizhi, Yang Yapei *et al.*. Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped phosphate glass channel waveguide amplifiers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(7): 815~818 (in Chinese)
- 5 Shooshtari A, Touam T, Najafi S I. Yb^{3+} sensitized Er^{3+} -doped waveguide amplifiers; a theoretical approach. *Proc. SPIE*, 2000, **3278**: 149~165
- 6 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): 697~701 (in Chinese)
- 7 Liu Zhuping, Hu Lili, Dai shixun *et al.*. Er^{3+} , Yb^{3+} co-doped phosphate glass laser pumped by LD. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1129~1131 (in Chinese)
- 8 Guan Zhouguo. *Study and Fabrication of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-Doped Phosphate Glasses* ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃的研究与制作). [MS dissertation], Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2002 (in Chinese)
- 9 Pedersen B, Bjarklev A, Povlsen J H. The design of erbium-doped fiber amplifier. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(8): 1105~1112

《光学学报》重要通告

为了加快稿件的处理速度,促进期刊的电子化、网络化,本刊从2003年5月1日起一律采用电子邮件(E-mail)方式投稿。单位证明原件通过传统邮件方式寄过来。

未曾给《光学学报》编辑部留过电子邮件地址的《光学学报》审稿专家,请尽快把你们的电子邮件地址发给本刊编辑部,以便实行电子邮件方式审稿。

本刊的主网站是 <http://gxxb.chinajournal.net.cn>。网站上的“本刊动态”栏有以下内容,敬请广大作者、读者、审稿专家等各方面人士留意:

本刊最新的征稿简则——《光学学报》征稿简则(2004年1月1日版);为了使《光学学报》发表的文章包容更多的信息量,《征稿简则》(2004年1月1日版)作了较大的修改。因此自本通告发布之日起,新稿和修改稿都按最新版《征稿简则》执行。

《版权转让协议》

《光学学报》清样发送预告(每月刊登一次);

《光学学报》2002年22卷第6~12期,2003年23卷第1期~近期的目录(这对查找、阅读、引用《光学学报》近期的文章时是很方便的);

科技论文写作方面的信息;

以及其他紧急信息都可从本刊动态及时获得。

电 话:021-69918011, 69918428

E-mail:gxxb@mail.shcnc.ac.cn

传 真:021-69918011

《光学学报》编辑部

2004年1月1日