

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0358-03

# 掺铒磷酸盐玻璃波导放大器的两种模型比较研究

陈海燕 刘永智 戴基智 官周国

(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

**提要** 对 980 nm 波段抽运下的高浓度铒掺杂光波导放大器的理论模型进行了研究。描述掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器的两种模型是考虑聚集的影响与不考虑聚集的影响。通过铒掺杂浓度对放大器增益特性影响的研究将两种模型进行了比较研究。数值结果表明,在铒掺杂浓度小于  $10^{26} \text{ m}^{-3}$  时可不考虑上转换的影响,大于此浓度上转换对增益的影响很大。

**关键词** 集成光学, 掺铒磷酸盐, 光波导, 光放大器, 光通信

**中图分类号** TN252; TN929 **文献标识码** A

## Comparison Study of Two Simplified Models for Erbium-doped Phosphate Glass Waveguide Amplifiers

CHEN Hai-yan LIU Yong-zhi DAI Ji-zhi GUANG Zhou-guo

(Department of Opto-Electronic Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract** The theoretical model for erbium-doped phosphate glass waveguide amplifiers pumped at 980 nm wavelength is studied in this paper. This model is usually simplified as two models with upconversion and without upconversion. The comparison study of the two simplified models is carried out by the effect of erbium-doped concentration on amplifier gain. Numerical results demonstrate that when the erbium-doped concentration is less than  $10^{26} \text{ m}^{-3}$  the upconversion may be neglected or upconversion may be considered.

**Key words** integrated optics, erbium-doped phosphate glass, optical waveguide, optical amplifier, optical communication

### 1 引言

随着全光通信网的发展,光节点越来越多,从而带来的器件插损越来越大。近些年来,可用于补偿信号光损失的掺铒光波导放大器(EDWA's)引起人们极大的兴趣<sup>[1-3]</sup>。为了在厘米量级的尺寸上获得较高的增益,铒离子的高浓度掺杂和良好的基质材料是必须的。磷酸盐玻璃因是铒离子的好基质而倍受青睐<sup>[4]</sup>。即使在磷酸盐玻璃这样的良好基质中,铒离子的掺杂浓度也有一定的限度,超过一定范围时会引起铒离子的聚集而在相邻的铒离子间发生能量转移,即上转换过程<sup>[5]</sup>,这一过程将严重影响抽运效率和放大器增益特性。在常见文献中,为避免复杂的数值运算而采用两种模型来分析 EDWA:在较低铒掺杂浓度时,不考虑上转换的影响;在较高铒掺杂浓度时,考虑亚稳态能级上的上转换的影响。这里的所谓较高、较低浓度是个很模糊的概念,到底是一定值还是一个范围文献中未见报道。本文对这

一问题进行了有益的讨论。

### 2 掺 $\text{Er}^{3+}$ 光波导放大器的两种简化理论模型

图 1 给出在 980nm 波段的光抽运时,铒离子浓度高掺杂下,铒离子的能级跃迁图。在铒离子浓度较高的情况下,铒离子之间形成离子对,离子对之间

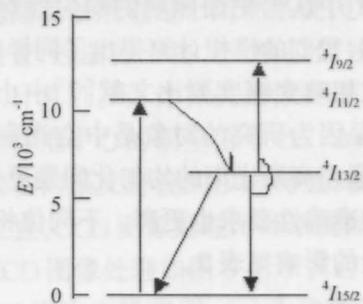


图 1 铒离子能级跃迁图

Fig. 1 Energy level transitions for  $\text{Er}^{3+}$

存在能量交换,从而发生上转换现象,即亚稳态上的离子对中的一个离子把能量传给另一个离子使其跃迁到 $^4I_{9/2}$ ,自己却回到基态<sup>[5]</sup>,如图2。

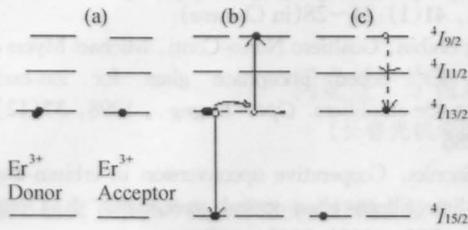


图2 掺铒波导中两个铒离子的上转换

Fig.2 Two particle upconversion in erbium-doped waveguide

在较低铒掺杂浓度时(模型 I),不考虑上转换的影响,速率方程<sup>[6]</sup>可写为

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

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

式中  $N_1$ 、 $N_2$  分别表示基态和亚稳态的粒子数密度。 $h\nu_p$ 、 $h\nu_s$  分别表示抽运光和信号光光子的能量,  $\sigma_{ap}$ 、 $\sigma_{as}$  代表基态对抽运光和信号光的吸收截面,  $\sigma_{es}$  为激发态的受激辐射截面;  $A_{21}$  为自发辐射几率,  $A_{21} = 1/\tau_{21}$ ,  $\tau_{21}$  为亚稳态粒子的寿命。 $N_T(x, y, z, t)$  为  $Er^{3+}$  掺杂粒子数密度。

在较高铒掺杂浓度时(模型 II),考虑亚稳态能级上的上转换的影响(假设上转换系数与铒离子的掺杂浓度无关),忽略放大自发辐射,则用于描述该系统的速率方程可用二能级系统的速率方程来描述<sup>[5]</sup>

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{\sigma_{ap}}{h\nu_p}(1 - n_2)I_p - \frac{n_2}{\tau_{21}} - N_T(x, y, z, t)Cn_2^2 \quad (3)$$

式中  $n_2$  表示亚稳态 $^4I_{13/2}$ 上的铒离子数占总数的百分比,  $C$  为上转换系数,  $I_p$  为抽运光光强。

设光线沿  $z$  方向传播,在前向抽运的情况下,忽略波导损耗,在稳态情况下,抽运光和信号光沿轴的

传输方程为<sup>[6]</sup>

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z) \quad (4)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} = [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)]P_s(z, \nu_s) \quad (5)$$

其中

$$\gamma_p(z) = \iint \psi_p(x, y)\sigma_{ap}N_1(x, y, z)dxdy \quad (6)$$

$$\gamma_{12}(z, \nu_s) = \iint \psi_s(x, y)\sigma_{as}N_1(x, y, z)dxdy \quad (7)$$

$$\gamma_{21}(z, \nu_s) = \iint \psi_s(x, y)\sigma_{es}N_2(x, y, z)dxdy \quad (8)$$

式中  $\psi_p(x, y)$ 、 $\psi_s(x, y)$  分别是抽运光和信号光的归一化强度。 $P_p$ 、 $P_s$  分别为抽运光与信号光功率。边界条件

$$P_p^+(0) = P_{p0} \quad P_s(0, \nu_s) = P_{s0}(\nu_s) \quad (9)$$

### 3 两种简化模型比较研究

取文献[7]中的有关数据:  $C = 1.0 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ , 980 nm 抽运光的吸收截面为  $2 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 1.532  $\mu\text{m}$  信号光的吸收与发射截面分别为  $6.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  和  $5.7 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ ,  $A = 3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,  $\tau_{21} = 8.4 \text{ ms}$ ,  $\nu_p = 3.061 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $\nu_s = 1.9595 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ , 波导长度为 4 cm, 入射信号光光强为 -30 dBm, 抽运功率 100 mW。图3给出了在一定抽运功率下,小信号增益随铒离子掺杂浓度变化的关系曲线。从图上可以看出,在铒离子浓度较高时,由于铒离子的聚集上转换作用,使得放大器的增益大大降低,且铒离子浓度愈高,上转换对放大器的影响愈大;在铒离子浓度较低时(在  $10^{26} \text{ m}^{-3}$  以下),可以不考虑上转换对放大器性能的影响。 $(3 \sim 4) \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$  的掺杂浓度是一个较好的掺杂范围。

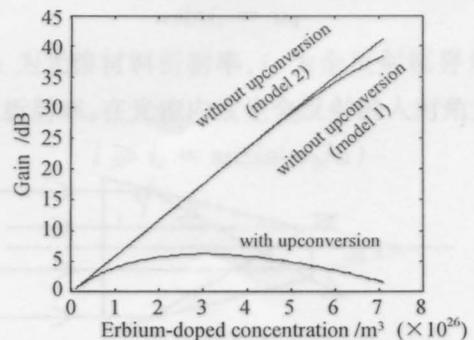


图3 小信号增益随铒离子掺杂浓度变化  
Fig.3 Small signal gain versus erbium-doped

这一结论与文献[8]中的有关实验结果一致。从图上还可以看出,在不考虑上转换的情况下,两模型的结果一致。

### 4 结 论

上转换过程是严重制约光波导放大器的因数。当铒离子浓度大于  $1 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$  时,系统应用考虑上转换的模型来分析,  $3 \sim 4 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$  的掺杂浓度是一个较好的掺杂范围。这一结论对光波导放大器的设计具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

1 T. Ohtsuki, S. Honkanen, S. I. Najafi *et al.*. Gain characteristics of a high concentration  $\text{Er}^{3+}$ -Doped phosphate glass waveguide. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78** (6):3617~3621  
 2 Chen Haiyan, Guan Zhouguo, Liu Yongzhi. Recent progress in Er-doped optics glass waveguide amplifiers. *Semiconductor Optoelectronics* (半导体光电), 2000, **21**

(6):381~383(in Chinese)  
 3 Chao Ming, Li Shufeng, Song Changlie. Theoretical calculation of  $\text{Er}^{3+}$  doped  $\text{Al}_2\text{O}_3$  waveguide amplifier. *J. Dalian University of Technology* (大连理工大学学报), 2001, **41**(1):24~28(in Chinese)  
 4 Jiang Shibin, Gualtiero Nunzi-Conti, Michael Myers *et al.*. New  $\text{Er}^{3+}$ -doped phosphate glass for ion-exchanged waveguide amplifiers. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(12):3282~3286  
 5 E. Snonks. Cooperative upconversion in erbium-implanted soda-lime silicate glass optical waveguides. *J. Opt. Am. (B)*, 1995, **12**(8):1468~1474  
 6 Fabrizio Di Pasquale, Maurizio Zoboli. Analysis of Erbium-Doped Waveguide Amplifiers by a Full-Vectorial Finite-Element Method. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1993, **11** (10):1565~1573  
 7 Pasquale F. Di, Federighi M. Improved gain characteristics in high-concentration  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped waveguided amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(9):2127~2131  
 8 S. Honkanen, T. Ohtsuki, S. Jiang. High Er concentration phosphate glasses planar waveguide amplifiers. *Proc. SPIE*, 1997, **2996**:32~40



图 3 不同掺杂浓度下光波导放大器的增益特性

... (faint, mostly illegible text in the right column)