

# 掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导放大器 噪音特性的数值模拟\*

李淑凤<sup>1</sup>, 李成仁<sup>1,2</sup>, 周松强<sup>1</sup>, 宋昌烈<sup>1</sup>

(1 大连理工大学 物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116023)

(2 辽宁师范大学 物理系, 辽宁 大连 116029)

**摘 要:**利用由速率方程、有限元场分布、传输方程构建的综合理论模型,数值求解了掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导放大器的噪音系数和正反向自发辐射功率. 结果表明,随波导长度的增加,当增益开始下降时,噪音系数显著增加. 同时显示了抽运功率和掺杂浓度对噪音系数的影响,比较了两种掺杂放大器的噪音系数,Yb-Er 共掺比只掺 Er 的约小 0.8 dB.

**关键词:**掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导放大器;噪音系数;放大的自发辐射;数值模拟

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)06-1093-5

## 0 引言

在全光通信网研究中,研制掺 Er 或 Yb-Er 共掺光波导放大器是光有源器件研究的热点<sup>[1-4]</sup>,它体积小,制造成本低,性能稳定可靠,便于集成. 本文选择 SiO<sub>2</sub>/Si 基,以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为基体材料的掺 Er 和 Yb-Er 共掺的光波导放大器(EDAWA 和 YEDAWA)作为研究对象,是因为芯层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与缓冲层(SiO<sub>2</sub>)、覆盖层(SiO<sub>2</sub> 或空气)之间的折射率差较大,导模可以高约束、低损耗传输,实现有效的抽运和放大,并可允许波导的小曲率弯曲,使制作微小的波导器件成为可能. 另外,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的原子价相同,晶体结构相似,可将 Er 和 Yb 高浓度结合进 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体结构中,从而在较短的尺寸内得到较高的增益. 掺入 Yb,是考虑到 Er<sup>3+</sup> 吸收谱与 Yb<sup>3+</sup> 发射谱间有较大的重叠<sup>[5]</sup>,并且 Yb<sup>3+</sup> 对 0.98 μm 抽运光的吸收截面要比 Er<sup>3+</sup> 的大一个量级,根据共掺杂理论<sup>[6]</sup>,通过 Yb<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup> 间的交叉弛豫机制进行能量传递,可大大提高抽运效率<sup>[7]</sup>.

1.53 μm 附近的自发辐射是掺 Er 光波导放大器中的一个重要问题. 它与 1.53 μm 光信号伴生,一起参与放大物质粒子的受激辐射,与信号竞争. 一方面,当放大的自发辐射(ASE)引起的上能级粒子数衰减与其他弛豫过程(自发辐射与无辐射跃迁)造成的衰减可以比拟时,反转粒子数将显著下降,因而增益系数也随之下降,导致放大器的总增益下降,即 ASE 造成增益饱和和效应. 另一方面,ASE 传到

接收端,对信号光进行检测时,与信号光一起形成拍频噪音. 这必将降低放大器输出信号的信噪比,限制光接收机的灵敏度,对放大器特性而言是一不利因素. 因此研究放大器的噪音特性对信息领域的应用至关重要.

本文利用构造的综合模型,对掺 Er 和 Yb,Er 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导放大器的噪音系数和正反向自发辐射功率进行数值求解,研究了抽运功率和掺杂浓度对系统噪音特性的影响.

## 1 自发辐射的传输方程

由于从不同点  $z$  处产生的自发辐射行进到输出端所经历的路程不同,所以对放大的自发辐射的贡献不同.  $z=0$  处的自发辐射对放大的自发辐射贡献最大. 为了得到放大的自发辐射输出的空间强度分布,需计算从波导入端到出端范围内各点放大的自发辐射贡献的总和. 自发辐射均分布于  $4\pi$  立体角,在  $dz$  的距离中,注入到传输光束的频率在  $\nu_j$  附近  $\Delta\nu$  频宽内的放大的自发辐射功率由两部分组成, $z$  以前产生、积累和放大并传过来的  $P_{ASE1}$  和本地  $z$  产生的  $P_{ASE2}$ ,总和为

$$dP_{ASE}(z, \nu_j) = [\sigma_{21}(\nu_j)N_2(x, y, z) - \sigma_{12}(\nu_j) \cdot N_1(x, y, z)]P_{ASE}(z, \nu_j)dz + \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \Delta V \cdot A_{21} \tilde{g}(\nu_j, \nu_0) h\nu_j \Delta\nu N_2(x, y, z) \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{12}(\nu_j)$ ,  $\sigma_{21}(\nu_j)$  分别为 Er<sup>3+</sup> 在 1.53 μm 附近的吸收及辐射截面.  $N_1(x, y, z)$ ,  $N_2(x, y, z)$  分别代表铒离子<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级上的数密度,其大小由 0.98 μm 抽运的 Er 或 Yb-Er 共掺系统的速率方程获得<sup>[8]</sup>. 方程中对 Er 离子采用的是六能级系统,考虑了合作上转换、激发态吸收及交叉弛豫等微观动

\*国家自然科学基金(60477023)和辽宁省博士启动基金(20051081)资助  
Tel:0411-84707866 Email:sf.lee@163.com  
收稿日期:2006-12-13

力学过程. 速率方程求解中所用光学参量均取自  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作基体材料的相关实验数据<sup>[9-11]</sup>,  $\tilde{g}(\nu_j, \nu_0)$  为自发辐射的线型函数,  $A_{21}$  为自发辐射跃迁速率,  $\Delta V$  是放大器内  $dz$  长度中光占有的体积, 若波导有源区截面为  $S$ , 则  $\Delta V = Sdz$ ,  $\Delta\Omega$  是可传输的自发辐射的发散角. 经过代换可得正(+)、反(-)向传输的自发辐射的传输方程

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\text{ASE}\pm}(z, \nu_j)}{dz} &= \pm[\gamma_{21}(z, \nu_j) - \gamma_{12}(z, \nu_j)] \cdot \\ P_{\text{ASE}\pm}(z, \nu_j) &\pm mh\nu_j \Delta\nu\gamma_{21}(z, \nu_j) \mp \alpha_s P_{\text{ASE}\pm}(z, \nu_j) \\ \gamma_{12}(z, \nu_j) &= \iint_A \psi_s(x, y) \sigma_{12}(\nu_j) N_1(x, y, z) dx dy \\ \gamma_{21}(z, \nu_j) &= \iint_A \psi_s(x, y) \sigma_{21}(\nu_j) N_2(x, y, z) dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $m$  为信号光的导模个数,  $\alpha_s$  为波导的损耗系数.  $\Psi_s(x, y)$  为信号光在波导横截面上的归一化光强分布, 由电磁场的有限元方法数值计算得到<sup>[12]</sup>. 计算中选择的波导是经过优化的脊型波导<sup>[13]</sup>, 如图 1, 相应参量见表 1. 对该波导, 信号光双基模传输,  $m=2$ .

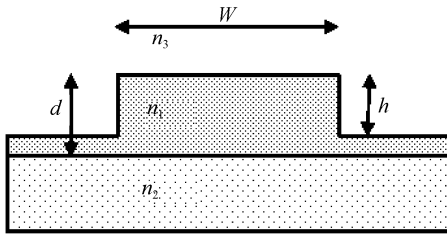


图 1 脊波导

Fig. 1 Rib waveguide

表 1 脊波导参量

$n_1 = 1.64$	Er : $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Er-Yb : $\text{Al}_2\text{O}_3$
$n_2 = 1.51$	$\text{SiO}_2$
$n_3 = 1$	Air
$D = 1 \mu\text{m}$	
$W = 3 \mu\text{m}$	
$h = 0.8 \mu\text{m}$	

## 2 噪音系数

噪音系数由伴随信号光出来的正向自发辐射功率来计算, 通过求解放大的自发辐射谱, 考虑信号与 ASE 的差拍噪音, 沿放大器各点的噪音系数表达式为<sup>[14]</sup>

$$\text{NF}(z) = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{G(z)} \left( 1 + \frac{P_{\text{ASE}+}(z, \nu_s)}{h\nu_s \Delta\nu} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (3)$$

$\nu_s$  信号频率,  $G(z)$  放大器的增益,  $\Delta\nu$  为将自发辐射谱进行离散后的频率间隔. 由于  $G$  和反转粒子数有关,  $P_{\text{ASE}}$  与上能级粒子数有关, 二者又和随波导长度变化的抽运功率有关, 结果使噪音系数, 和放大系数一样也与抽运功率和波导放大器长度有关.

噪音系数可为光通信系统中集成放大器的使用提供重要信息. 在充分抽运的情况下,  $\text{NF} = 3 \text{ dB}$ ,

这是最小噪音系数, 属理想情况. 一般的放大器,  $\text{NF} > 3 \text{ dB}$ . 一个光放大器, 希望它有尽可能低的噪音系数, 它是系统的重要限制因素.

正反向总 ASE 功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{ASE}+}(z) &= \sum_{j=1}^M P_{\text{ASE}+}(z, \nu_j), \\ P_{\text{ASE}-}(z) &= \sum_{j=1}^M P_{\text{ASE}-}(z, \nu_j) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $M$  是将  $\text{Er}^{3+}$  吸收谱和自发辐射谱<sup>[10]</sup> 带宽 ( $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ ) 进行离散化后的样条数目,  $\nu_j$  为样条中心频率, 如图 2.

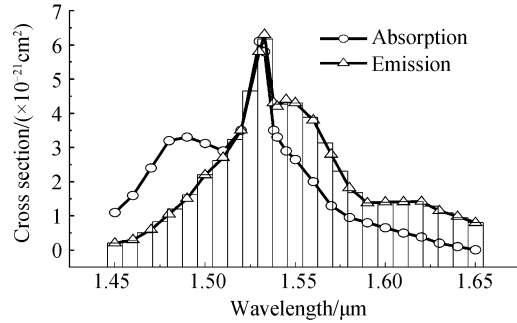


图 2  $\text{Er}^{3+}$  辐射和吸收截面谱及其离散化

Fig. 2  $\text{Er}^{3+}$  Emission and absorption cross-section spectrum and the frequency slot used to compute noise

## 3 模拟结果与分析

抽运波长在  $0.98 \mu\text{m}$  条件下, 利用由速率方程、分析波导场分布的有限元法及信号光、抽运光、正反向 ASE 的场传输方程构建的综合理论模型, 数值求解  $\text{NF}$ 、 $P_{\text{ASE}\pm}(z)$  及放大器的增益  $G(z)$ .

波导放大器的边界条件为: 初始抽运功率  $P_p(0) = P_p$ , 初始信号功率  $P_s(0) = P_s = 1 \mu\text{W}$ ,  $P_{\text{ASE}+}(0, \nu_j) = P_{\text{ASE}-}(L, \nu_j) = 0$ ,  $L$  为波导长度. 计算步长取  $10 \mu\text{m}$ , 波导损耗取参考值  $0.35 \text{ dB/cm}$ <sup>[15]</sup>. 计算包括 EDWA 和 YEDWA 两种放大器.

比较自发辐射谱离散化样条数目  $M$  取 50 ( $\Delta\lambda = 4 \text{ nm}$ ,  $\Delta\nu = 512 \text{ GHz}$ ) 和 200 ( $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ ,  $\Delta\nu = 128 \text{ GHz}$ ) 的结果. 当掺 Er 浓度  $N_{\text{Er}} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $P_p = 50 \text{ mW}$ ,  $L = 15 \text{ cm}$  时, 随着信号的传输, 相对增益偏差  $(G_{200} - G_{50})/G_{200}$  从  $1 \times 10^{-6}$  增至  $1 \times 10^{-3}$ , 但仍然非常小, 因此离散化 50 个区间就够了.

图 3 是 EDWA 在不同的抽运功率下, 噪音系数  $\text{NF}$  随放大器长度的变化. 随抽运功率的增大, 充分抽运, 粒子数反转度提高,  $\text{NF}$  减小. 结合图 4 显示的正、反向自发辐射功率和增益随放大器长度的变化规律, 一定的抽运功率下, 噪音系数沿传输方向的变化, 可分为三个阶段, 初始时,  $G$  增大, 正向自发辐射功率也增大, 式(3)中主要是第二项起作用,  $\text{NF}$  增加较快. 第二阶段, 光波传输一定距离后, 随

信号光不断增强,饱和效应使增益系数不断下降,增益增长变缓,式(3)中第一项的作用与第二项相当,使 NF 变化的也非常缓慢. 第三阶段,随增益系数的继续下降,以及抽运功率减小到不足以实现粒子数反转,G 快速减小,正向自发辐射功率也减小. 这时式(3)中第一项起主要作用, $1/G$  快速增大,从而导致很高的噪音系数.

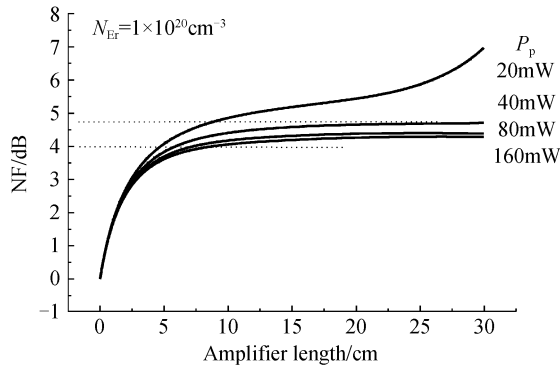


图3 不同泵浦功率下,噪音系数与掺铒波导放大器长度的关系

Fig. 3 Noise figure versus waveguide length at different pump powers for EDAWA

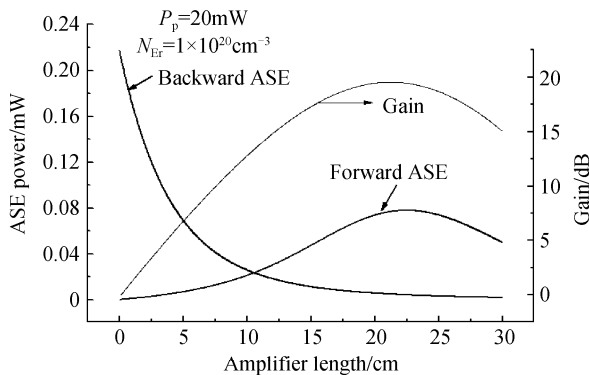


图4 在信号光频率处  $\Delta\nu$  频宽内的正、反向自发辐射功率及增益随 EDAWA 长度的变化

Fig. 4 Forward and backward ASE noise powers with  $\Delta\nu$  width at signal frequency along EDAWA

在确定的抽运功率和掺杂浓度下,通常将能获得的最大增益对应的波导长度设为最佳长度,但这时的噪音系数已经开始迅速增加,因此这一长度并不是波导放大器的理想长度. 设计波导放大器时需考虑噪音系数这一限制因素.

一般  $0.98 \mu\text{m}$  抽运的掺铒光纤放大器理想的量子极限噪音是  $3 \text{ dB}$ <sup>[16]</sup>,与其相比,波导放大器的噪音要高一些.

图5是 YEDAWA 在不同的抽运功率条件下, NF 随放大器长度的变化规律,其中掺铒浓度与前面 EDAWA 的相同. 与 EDAWA 相比, YEDAWA 除抽运效率提高、放大器的长度缩短外,噪音系数也相应降低. 掺铒浓度同样是  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 抽运功

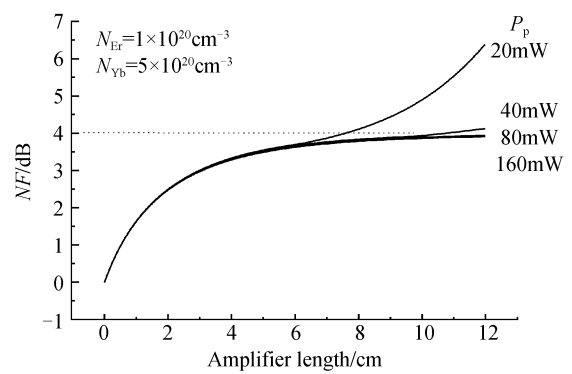


图5 噪音系数与 YEDAWA 长度的关系

Fig. 5 Noise figure versus waveguide length for YEDAWA

率  $40 \text{ mW}$  以上时,放大器长度  $10 \text{ cm}$  左右,噪音系数均低于  $4 \text{ dB}$ ,比 EDAWA 约低  $0.8 \text{ dB}$ .

掺 Er 或 Yb-Er 共掺波导放大器噪音系数的实验数据,以磷酸盐玻璃为基质材料的,有文献给出噪音系数低于  $5 \text{ dB}$ (波导长  $3.1 \text{ cm}$ )<sup>[17]</sup>,噪音系数低于  $5.5 \text{ dB}$ (波导长  $4 \text{ cm}$ )<sup>[18]</sup> 等等. 而以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为基质材料的,目前还未见报道,只有关于增益测量的相关文献<sup>[19]</sup>,因此该模拟结果还无法与实验作对比分析. 但利用本理论模型模拟的增益特性与实验结果是相符的<sup>[20]</sup>.

噪音系数还与掺杂浓度有关系,图6是 EDAWA 在抽运功率  $80 \text{ mW}$ ,放大器长  $20 \text{ cm}$ ,掺铒浓度分别是  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  时的噪音系数沿波导的变化情况,随浓度的增加,噪音系数也增加,在放大器输出端依次为  $4.2 \text{ dB}$ 、 $4.8 \text{ dB}$ 、 $5.8 \text{ dB}$ . 任何器件都存在物理上的局限性,在波导技术中亦是如此. 为在较短光路上获得高增益,需提高掺杂浓度;但另一方面,高掺杂浓度会导致增益与噪音参量的恶化,因此需要在这二者之间进行折衷. 比较合适的折衷是,对 EDAWA,每厘米获得  $2$  到  $3 \text{ dB}$  的增益即可,这意味着制作一个 EDAWA 需要  $5 \sim 10 \text{ cm}$  长的波导. 而对 YEDAWA,每厘米可获得  $4 \text{ dB}$  左右的增益,波导长度会更短.

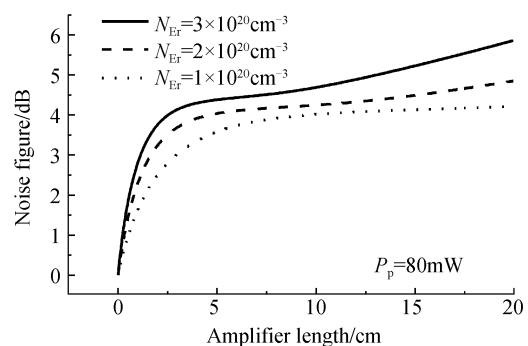


图6 不同掺铒浓度,EDAWA 噪音系数比较

Fig. 6 Noise figure comparison of EDAWA for different Er concentration

## 4 结论

本文考虑正、反向自发辐射的影响,利用速率方程、有限元场分布、传输方程,数值求解了 EDAWA 和 YEDAWA 噪音系数以及正、反向放大的自发辐射功率. 给出了噪音系数与泵浦功率、波导长度以及掺铒浓度的关系. 随波导长度的增加,当增益开始下降时,噪音系数显著增加. 大功率泵浦时噪音系数较低,对 EDAWA,一般在 4~4.8 dB 之间,而 YEDAWA 的噪音特性好于 EDAWA,噪音系数低于 4 dB. 另外,高浓度掺铒会增大放大器的噪音系数.

### 参考文献

- [1] POLMAN A. Erbium implanted thin film photonic materials [J]. *J Appl Phys*, 1997, **82**(1): 1-39.
- [2] CHRYSSOU C E, PASQUALE F D, PITT C W. Improved gain performance in Yb<sup>3+</sup>-sensitized Er<sup>3+</sup>-doped alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) channel optical waveguide amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 2001, **19**(3): 345-349.
- [3] ORIGNAC X, BARBIER D, DU Xin-Min, *et al.* Sol-gel silica/titania-on-silicon Er/Yb-doped waveguides for optical amplification at 1.5 μm[J]. *Optical Materials*, 1999, **12**(1): 1-18.
- [4] NIE Qiu-hua, GAO Yuang, XU Tie-feng, *et al.* Spectroscopic properties and thermal stability of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped TeO<sub>2</sub>-Li<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub> glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 773-777.  
聂秋华, 高媛, 徐铁峰, 等. Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 TeO<sub>2</sub>-Li<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub> 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.
- [5] GAPONTSEV V P, MTISIN S M, ISINEEV A A. Erbium glass lasers and their applications[J]. *Opt & Laser Technol*, 1989, **14**(4): 189-196.
- [6] SHI W Q, BASS M, BIRNBAUM M. Effects of energy transfer among doped Er : Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. *JOSA B: Opt Phys*, 1990, **7**: 1456-1462.
- [7] LI Jian-yong, WANG Li-ge, LI Cheng-ren, *et al.* Optimization of photoluminescence for Yb<sup>3+</sup> / Er<sup>3+</sup> Co-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1746-1751.  
李建勇, 王丽阁, 李成仁, 等. 铽铒共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜光致发光特性优化[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1746-1751.
- [8] LI Shu-feng. Theoretical design of Er-doped and Yb-Er<sup>c</sup>-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguide amplifier on SiO<sub>2</sub>/Si substrate [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004: 32-71.  
李淑凤. 掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si 光波导放大器的理论设计[D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2004: 32-71.
- [9] HOVEN G V D, SNOEKS E, POLMAN A. Upconversion in Er-implanted Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguides [J]. *J Appl Phys*, 1996, **79**(3): 1258-1270.
- [10] HOVEN G V D, ELSKEN J A V. Absorption and emission cross sections of Er<sup>3+</sup> in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguides [J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(15): 3338-3341.
- [11] STROHHOFER C, POLMAN A. Absorption and emission spectroscopy in Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> doped aluminum oxide waveguides [J]. *Opt Mater*, 2003, **21**: 705-712.
- [12] LI Shu-feng, SONG Chang-lie, LI Cheng-ren, *et al.* Theoretical model of Er-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguides amplifier [C]. *SPIE*, 2002, **4927**: 263-270.
- [13] LI Shu-feng, SONG Chang-lie, LI Cheng-ren. Coupling of fiber-waveguide amplifier [C]. *SPIE*, 2004, **5644**: 250-258.
- [14] PASQUALE F D, FEDERIGHI M. Modeling of uniform and pair-induced upconversion mechanisms in high-concentration erbium-doped silica waveguides [J]. *J Lightwave Technol*, 1995, **13**(9): 1858-1864.
- [15] HOVEN G V D, RJIM K, POLMAN A. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguides on silicon [J]. *Appl Phys Lett*, 1996, **68**(14): 1886-1888.
- [16] CHENG Cheng, ZHANG Hang. A semiconductor nanocrystal PbSe quantum dot fiber amplifier [J]. *Acta Phys Sin*, 2005, **55**(8): 4139-4144.  
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.
- [17] 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.
- [18] JIN G L, SHAO G W, MU H, *et al.* Gain and noise figure of a double-pass waveguide amplifier based on Er/Yb-doped phosphate glass [J]. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(11): 2862-2864.
- [19] KIK P G, POLMAN A. Upconversion as the gain limiting factor in Er doped miniature Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> optical waveguide amplifiers [J]. *J Appl Phys*, 2003, **93**(9): 5008-5012.
- [20] LI Cheng-ren, LI Shu-feng, SONG Qi, *et al.* Characteristics of Net Gain of Yb:Er Co-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> waveguide amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 650-654.  
李成仁, 李淑凤, 宋琦, 等. 铽铒共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导放大器的净增益特性 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 650-654.

## Numerical Simulation of Noise Characteristic of Er-doped and Yb-Er Co-doped $\text{Al}_2\text{O}_3$ Waveguide Amplifier

LI Shu-feng<sup>1</sup>, LI Cheng-ren<sup>1,2</sup>, ZHOU Song-qiang<sup>1</sup>, SONG Chang-lie<sup>1</sup>

(1 School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

(2 Physics Department, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Received date: 2006-12-13

**Abstract:** Noise characteristic of Er-doped and Yb-Er Co-doped  $\text{Al}_2\text{O}_3$  waveguide amplifier (EDAWA and YEDAWA) are numerically calculated by multi theory model founded through rate equations, finite element field distribution, propagation equations. The influence of Er concentration, pump power and amplifier length on the noise figure is discussed. Forward and backward direction ASE power evolution along the propagation distance is also shown. The noise figure of YEDAWA is approximate 0.8 dB less than that of EDAWA.

**Key words:** Er-doped and Yb-Er co-doped  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Waveguide Amplifier; Noise figure; Amplified spontaneous emission (ASE); Numerical simulation



**LI Shu-feng** was born in 1966. She received the B. S. degree from Dalian University of Technology (DUT) in 1988, M. S. degree from Jilin University in 1991 and D. E. degree from DUT in 2004. She has been working at Physics Department of DUT since 1991. Her research interests focus on numerical calculateion of rare-earth doped waveguide amplifiers, electro-magnetism field theory and spectral analysis.