

脊形掺铒 Al_2O_3 光波导放大器级联特性的模拟计算*

李成仁^{1,2} 宋昌烈² 李淑凤² 宋琦² 李建勇²

(1 辽宁师范大学物理系, 辽宁大连 116029)
(2 大连理工大学物理系, 辽宁大连 116024)

摘 要 利用有限元法分析了脊形掺铒 Al_2O_3 光波导放大器内信号光和抽运光的场模式分布、速率方程求解铒离子五能级系统的粒子数分布. 数值模拟了光波导净增益与信号光功率的关系和多个放大器级联的净增益特性. 结果表明: 级联系统存在着净增益亏损. 低掺铒浓度的光波导作前级放大器的组合方式, 级联系统总净增益最大.

关键词 脊形 $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 光波导放大器; 模拟计算; 级联; 信号功率; 净增益亏损

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

稀土元素铒 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 能级间跃迁辐射出的 $1.54 \mu\text{m}$ 波段光谱, 对应着通信光纤的最低损耗窗口. 1996 年, Hoven 等人制成掺铒 Al_2O_3 平面光波导放大器, 获得 2.3 dB 净增益^[1], 使掺铒光波导放大器 (EDWA: erbium-doped waveguide amplifier) 成为世界范围内的研究热点之一^[2~4]. EDWA 具有小型化、高增益的特点, 是集成光学、光电一体化研究的基础. 但由于合作上转换、激发态吸收和交叉弛豫等效应影响^[5,6], 导致单级 EDWA 的净增益有限. 若需高增益光信号放大, 将多个 EDWA 进行级联无疑是一个可行的方法^[7]. 本文用有限元方法分析脊形 $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 光波导放大器内部信号光和抽运光电磁场的模式分布, 用速率方程求解 Er^{3+} 离子五能级系统的粒子数分布, 数值模拟了单级脊形 $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 光波导放大器净增益与信号功率的关系和多级放大器级联的净增益特性. 结果表明: 信号功率增强, 放大器的净增益下降; 两级或三级光波导放大器级联时, 总净增益与光波导的排列方式有关. 低掺铒浓度的光波导作前级放大器的组合方式, 总净增益大. 模拟结果与文献^[8]的实验测量相吻合.

1 理论分析

脊形掺铒 Al_2O_3 光波导截面的选取如图 1. 导波层是掺铒 Al_2O_3 , 衬底为 SiO_2 , 上包层是空气. 有限元方法求出抽运光 E_{11}^- , E_{21}^- , E_{31}^- , E_{11}^+ , E_{21}^+ , E_{31}^+ 六个模式的场分布和信号光 E_{11}^- , E_{11}^+ 二个模式的场分布, 并求得信号光和抽运光的归一化光强 $\Psi_s(x, y)$,

$$\Psi_s(x, y)^{[9]}.$$

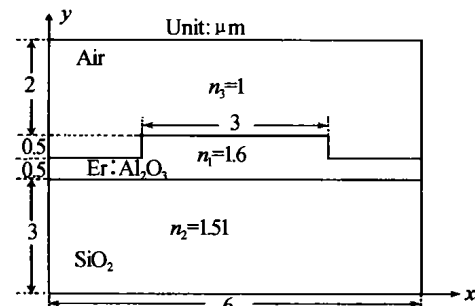


图 1 脊形 $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 光波导截面
Fig. 1 Cross-section of rib $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3$ waveguide

图 2 是 980 nm 激光器抽运下三价铒离子的五

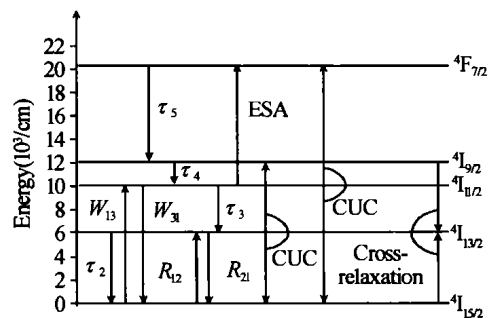


图 2 铒离子能级跃迁
Fig. 2 Energy level transition of Er^{3+} ions

能级跃迁简图. 能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$ 、 $^4\text{I}_{11/2}$ 、 $^4\text{I}_{9/2}$ 和 $^4\text{F}_{7/2}$ 对应的铒粒子数浓度分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 和 N_5 . 计算中考虑了能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{I}_{11/2}$ 上铒粒子间的合作上转换 (CUC)、能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 上的激发态吸收 (ESA) 及基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 与能级 $^4\text{I}_{9/2}$ 间的交叉弛豫 (cross relaxation) 等效应. 相应的速率方程为

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -w_{13} N_1 + w_{31} N_3 + A_{21} N_2 + c_2 N_2^2 + R_{21} N_2 - R_{12} N_1 + c_3 N_3^2 - c_{14} N_1 N_4 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -A_{21} N_2 + A_{32} N_3 - 2c_2 N_2^2 - R_{21} N_2 + R_{12} N_1 + 2c_{14} N_1 N_4 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = w_{13} N_1 - w_{31} N_3 - A_{32} N_3 + A_{43} N_4 -$$

* 国家自然科学基金 (No. 69889701)、辽宁省科技厅 (No. 20022110)、辽宁省教育厅 (No. 202123198) 资助项目
Tel: 0411-84259566 Email: lshdg@sina.com.cn
收稿日期: 2004-04-07

$$2c_3 N_3^2 - w_{ESA} N_3 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_4}{\partial t} = -A_{43} N_4 + A_{54} N_5 + c_2 N_2^2 - c_{14} N_1 N_4 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_5}{\partial t} = -A_{54} + c_3 N_3 + w_{ESA} N_3 \quad (5)$$

$$N(x, y) = N_1(x, y) + N_2(x, y) + N_3(x, y) + N_4(x, y) + N_5(x, y) \quad (6)$$

$N(x, y)$ 为总的铟粒子数浓度,与信号的传播方向 z 无关,并且不随时间变化。

式(1)~(5)中, $A_{ji} = 1/\tau_{ji}$ 为能级 j 至能级 i 的无辐射跃迁速率; w_{13} 和 w_{31} 是抽运光受激吸收和受激跃迁速率; c_2 、 c_3 和 c_{14} 分别表示相应能级的合作上转换系数和交叉弛豫系数; R_{12} 、 R_{21} 为信号光受激吸收、受激跃迁速率; w_{ESA} 为 $I_{11/2}$ 能级的激发态吸收速率; 设抽运光与信号光同向、自发辐射沿 z 轴双向传输, 则 R_{12} 、 R_{21} 、 w_{13} 、 w_{31} 和 w_{ESA} 分别由下列式子给出

$$R_{12}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{a21}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t, \nu_s) + \sum_{j=1}^M \frac{\sigma_{a21}(\nu_j)}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, t, \nu_j) + I_{ASE-}(x, y, z, t, \nu_j)] \quad (7)$$

$$R_{21}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{e21}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t, \nu_s) + \sum_{j=1}^M \frac{\sigma_{e21}(\nu_j)}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, t, \nu_j) + I_{ASE-}(x, y, z, t, \nu_j)] \quad (8)$$

$$w_{13}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{a13}}{h\nu_p} I_p(x, y, z, t, \nu_p) \quad (9)$$

$$w_{31}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{e31}}{h\nu_p} I_p(x, y, z, t, \nu_p) \quad (10)$$

$$w_{ESA}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{ESA}}{h\nu_p} I_p(x, y, z, t, \nu_p) \quad (11)$$

式(7)~(11)中, σ_{aij} 为能级 i 至能级 j 的吸收截面, σ_{eij} 为能级 j 至能级 i 的发射截面, σ_{ESA} 为激发态吸收截面; I_s 、 I_p 和 I_{ESA} 分别为信号光、抽运光和自发辐射的光强; ν_s 、 ν_p 分别为信号光、抽运光的频率; M 是频率间隔 $\Delta\nu_j$ 数目; h 是 Planck 常数。

取长度为 L 的直线通道、脊形 Er: Al₂O₃ 光波导放大器为模拟计算模型。抽运光、信号光和自发辐射的功率分别为 P_p 、 P_s 和 P_{ASE} , 在掺铟光波导中的传输方程分别为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z) P_p(z) \quad (12)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)] P_s(z, \nu_s) \quad (13)$$

$$\frac{dP_{ASE\pm}(z, \nu_j)}{dz} = \pm [\gamma_{21}(z, \nu_j) - \gamma_{12}(z, \nu_j)] \cdot P_{ASE\pm} \pm m h \nu_j \Delta\nu_j \gamma_{21}(z, \nu_j) \quad (14)$$

波导两端面处的边界条件为

$$P_p(0, \nu_p) = P_{p0}(\nu_p), P_s(0, \nu_s) = P_{s0}(\nu_s), P_{ASE+}(0, \nu_j) = P_{ASE-}(L, \nu_j) = 0 \quad (15)$$

式(12)~(14)中, m 是信号光激励下的导模数目; γ_p 为抽运光的吸收系数, γ_{12} 和 γ_{21} 分别为信号光的吸收系数和发射系数, 由下列式子给出

$$\gamma_p(z, \nu_p) = \iint_A \Psi_p(x, y) [\sigma_{a13} N_1(x, y, z) - \sigma_{e31} N_3(x, y, z)] dx dy \quad (16)$$

$$\gamma_{12}(z, \nu_s) = \iint_A \Psi_s(x, y) \sigma_{a12}(\nu_s) \cdot N_1(x, y, z) dx dy \quad (17)$$

$$\gamma_{21}(z, \nu_s) = \iint_A \Psi_s(x, y) \sigma_{e21}(\nu_s) N_2(x, y, z) dx dy \quad (18)$$

设输入信号光功率为 P_{s0} , 输出信号光功率为 P_s , 步长取 Δz , 步数为 k , r 为单位长度传输损耗, 则掺铟光波导放大器的净增益表达式为

$$G = 10 \log\left(\frac{P_s}{P_{s0}}\right) = \sum_{i=0}^k [\gamma_{21}(z_i, \nu_s) - \gamma_{12}(z_i, \nu_s)] \Delta z 10 \log_{10}(e) - r \Delta z k \quad (19)$$

模拟计算中所采用的各参数的典型值分别取为^[10,11]: $\sigma_{a12}(1.53 \mu\text{m}) = 5.36 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\sigma_{e21}(1.53 \mu\text{m}) = 5.41 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\sigma_{a13}(0.98 \mu\text{m}) = 2.58 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$; $\sigma_{ESA} = 0.8 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$; $c_2 = c_3 = 5.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^3/\text{s}$, $c_{14} = 3.5 \times 10^{-17} \text{ cm}^3/\text{s}$; $\tau_2 = 7.8 \times 10^{-3} \text{ s}$, $\tau_3 = 3 \times 10^{-6} \text{ s}$, $\tau_4 = 1 \times 10^{-9} \text{ s}$, $\tau_5 = 7.10^{-6} \text{ s}$; $r = 0.35 \text{ dB/cm}$ 。

2 模拟结果和讨论

单级脊形掺铟 Al₂O₃ 光波导放大器增益特性的模拟结果, 与 Marcatili 近似法^[12] 和仅用铟离子速率方程求解^[13] 的结果相似。但本文考虑了双向放大的自发辐射, 用 Bessel 分布代替 Gauss 分布求解各单元处的人射总场值, 使计算结果与实际更吻合。同时, 讨论了信号光功率对放大器净增益的影响。信号光功率增大, 净增益下降。因为, 掺铟浓度和抽运功率一定时, 铟离子反转的粒子数是有限的, 光波导放大能力和输出功率 P_s 也是有限的。若信号输入功率 P_{s0} 继续增强, 依据式(19)净增益的定义, G 则下降。掺铟浓度、抽运功率和波导长度等参量的取值不同, 净增益随信号光增强而下降的程度也不同。图3所示为掺铟浓度作参量时, 净增益与信号功率之间的关系。

两级脊形 Er: Al₂O₃ 光波导放大器级联时的模型如下: 两光波导放大器均由 980 nm、100 mW 的激光器抽运。初始信号 S_0 经第一级光波导放大后, 其输出信号 S_1 作为第二级光波导放大器的输入信号。模拟计算过程中忽略了两个光波导之间的耦合损耗。

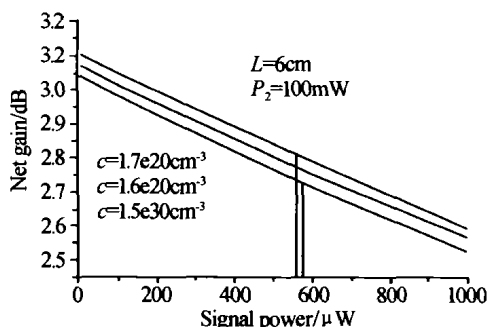


图3 净增益与信号功率关系(掺铒浓度为参量)
Fig. 3 Net gain vs. signal power (concentration is parameter)

首先数值模拟两个相同光波导放大器级联时净增益特性. 设每个放大器单独工作时的净增益为 N_A , 理想情况下总的净增益应为 $2N_A$; 但模拟计算的总的净增益的值为 N_c . 取纵坐标为两者差值的百分比, 表示为: $\delta = [(2N_A - N_c) / 2N_A] \times 100\%$

从图4中可以看出: 1) $\delta > 0$, 即两个相同光波导放大器级联后, 实际的总净增益值 N_c 小于两个光波导放大器单独工作时净增益值的代数和 $2N_A$, 产生了第一类净增益亏损. 原因是初始输入的光信号 S_0 经第一级光波导放大后, 功率增强, 即 $S_1 > S_0$. 依图3计算结果, 以 S_1 为输入信号的第二级光波导放大器, 其净增益将下降, 也导致了级联系统总的净增益下降. 2) δ 与光波导的掺铒浓度有关, 在最佳掺杂浓度时 δ 最大. 3) 输入信号功率增强, 第一类净增益亏损 δ 明显增大.

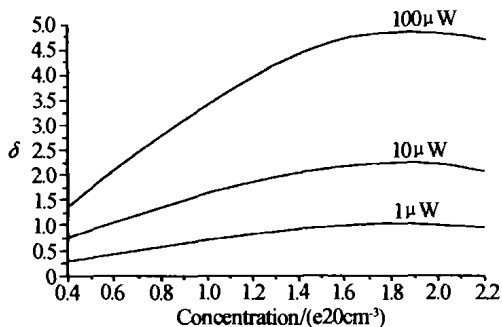


图4 两个相同光波导级联时的净增益亏损
Fig. 4 Gain loss of two same waveguides in series

其次计算两个不相同光波导放大器级联时净增益特性. 保持前级光波导放大器的掺铒浓度不变 ($c = 0.4e20 \text{ cm}^{-3}$), 后级光波导放大器的掺铒浓度变化 ($c = 0.4 \sim 1.8e20 \text{ cm}^{-3}$), 即 F0.4Bxx 组合, 其总增益的计算结果为 N_1 ; 同理, 保持后级光波导的掺铒浓度不变 ($c = 0.4e20 \text{ cm}^{-3}$), 前级光波导的掺铒浓度变化 ($c = 0.4 \sim 1.8e20 \text{ cm}^{-3}$), 即 FxxB0.4 组合, 其总增益的模拟结果为 N_2 . 取 $\Delta N = N_1 - N_2$. 比较两种组合: 1) $\Delta N > 0$, 如图5. 说明低掺铒浓度的光波导作为前级放大器, 总的净增益大于低掺铒浓度的光波导作为后级放大器的总净增益. 即两级不同增益的放大器级联时, 由于彼此排列方式的不同, 总净增益不同, 产生第二类净增益亏损, 与文献

[8]实验结果一致. 原因是, 初始信号 S_0 经第一级的低掺铒浓度光波导放大后 S_1 较小, 在经第二级放大时, 由信号功率而引起的放大器增益下降的影响也较小. 2) ΔN 随掺铒浓度(小于最佳掺铒浓度时)的增加而变大. 3) ΔN 随信号功率的增强而变大.

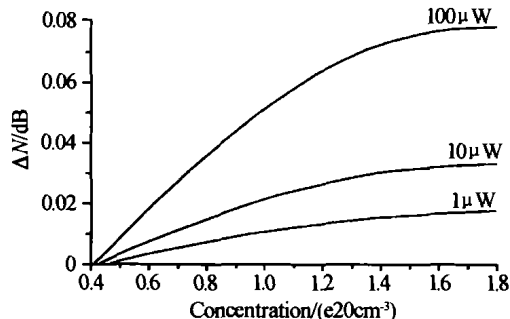


图5 F0.4Bxx 与 FxxB0.4 级联组合的净增益差
Fig. 5 Net gain loss of two different waveguides in series

需说明的是, 上述计算与文献[8]实验结果(高掺杂浓度样品面向抽运源时总信号强)不一致. 这是因为, 实验时是一个激光器对两个样品进行抽运, 而数值模拟时是两级放大器均有激光器抽运. 曾数值模拟一个激光器抽运单级非均匀掺铒光波导的净增益特性, 如图6. 曲线a 掺铒浓度由 $1.4e20 \text{ cm}^{-3}$ 线性降到 $0.1e20 \text{ cm}^{-3}$, 曲线b 掺铒浓度由 $0.1e20 \text{ cm}^{-3}$ 线性升到 $1.4e20 \text{ cm}^{-3}$. 可以看到, 曲线a 的净增益明显大于b 的净增益值, 与实验结论吻合.

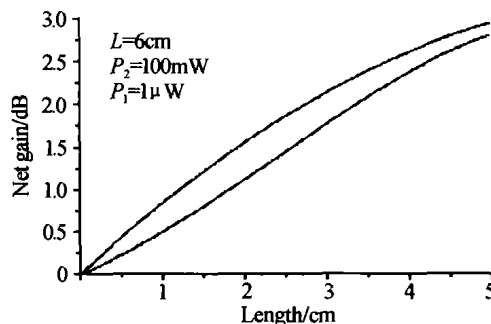


图6 纵向非均匀掺铒光波导放大器的净增益
Fig. 6 Net gain of EDWA with non-uniform dopant

表1是初始输入信号为 $1 \mu\text{W}$, 三种掺铒浓度分别为 $0.4e20 \text{ cm}^{-3}$ 、 $0.6e20 \text{ cm}^{-3}$ 、 $0.8e20 \text{ cm}^{-3}$ 的光波导放大器在不同级联组合时, 各种组合的总净增益值 (N_c) 及其与最小总净增益的差值 (ΔN). A&B&C 表示: A 为前级放大器、B 为中级放大器、C 为后级放大器. 显然, 每种组合的实际总净增益计算值 N_c 均小于三个放大器单独工作时净增益的代数和 3.699784 dB (第一类净增益亏损); 同时, 每种组合的总净增益 N_c 又不同 (第二类净增益亏损). 低掺铒浓度的光波导为前级放大器、高掺铒浓度的光波导作后级放大器时的组合, 即 $0.4 \& 0.6 \& 0.8$ 形式, 总的净增益最大; 而其倒序组合, $0.8 \& 0.6 \& 0.4$ 形式, 总的净增益最小; 其它四种组合的总净增益介于中间. 因此, 应选择合适的组合方式, 避免不必要的第二类增益亏损.

表 1 输入信号 1 μW、掺钕浓度为(0.4、0.6、0.8)e20 cm⁻³三个放大器不同组合时的净增益 (3.699784 dB)

组合方式	0.4&0.6&0.8	0.4&0.8&0.6	0.6&0.4&0.8	0.6&0.8&0.4	0.8&0.4&0.6	0.8&0.6&0.4
N _c /dB	3.674534	3.670473	3.672776	3.660412	3.663408	3.656657
ΔN/dB	0.017877	0.013816	0.016119	0.003755	0.006751	

表 2 和表 3 与表 1 结论相似。但比较后发现，1 μW 的 0.017877 dB 增大为 10 μW 的 0.035643 dB 随初始输入信号功率的增强，净增益亏损变大，由和 100 μW 的 0.084574 dB。

表 2 输入信号 10 μW、掺钕浓度为(0.4、0.6、0.8)e20 cm⁻³三个放大器不同组合的增益 (3.663216 dB)

组合方式	0.4&0.6&0.8	0.4&0.8&0.6	0.6&0.4&0.8	0.6&0.8&0.4	0.8&0.4&0.6	0.8&0.6&0.4
N _c /dB	3.614012	3.605603	3.606254	3.585974	3.590555	3.578369
ΔN/dB	0.035643	0.027234	0.027885	0.007605	0.012186	

表 3 输入信号 100 μW、掺钕浓度为(0.4、0.6、0.8)e20 cm⁻³三个放大器不同组合的增益 (3.606650 dB)

组合方式	0.4&0.6&0.8	0.4&0.8&0.6	0.6&0.4&0.8	0.6&0.8&0.4	0.8&0.4&0.6	0.8&0.6&0.4
N _c /dB	3.492059	3.472047	3.473408	3.425265	3.436026	3.407485
ΔN/dB	0.084574	0.064552	0.065923	0.017780	0.028541	

比较表 2、表 4 和表 5 可以发现，当输入信号 S₀ 浓度的提高，最佳组合与最差组合之间的总净增益均为 10 μW 时，随着组成级联的光波导放大器掺钕差值变得越来越小，与文献[8]实验结果一致。

表 4 输入信号 10 μW、掺钕浓度为(0.8、1.0、1.2)e20 cm⁻³三个放大器不同组合的增益 (6.94767 dB)

组合方式	0.8&1.0&1.2	0.8&1.2&1.0	1.0&0.8&1.2	1.0&1.2&0.8	1.2&0.8&1.0	1.2&1.0&0.8
N _c /dB	6.69656	6.68676	6.68894	6.68935	6.67648	6.66384
ΔN/dB	0.03270	0.02392	0.02510	0.02551	0.01264	

表 5 输入信号 10 μW、掺钕浓度为(1.4、1.6、1.8)e20 cm⁻³三个放大器不同组合的增益 (9.10154 dB)

组合方式	1.4&1.6&1.8	1.4&1.8&1.6	1.6&1.4&1.8	1.6&1.8&1.4	1.8&1.4&1.6	1.8&1.6&1.4
N _c /dB	8.65141	8.64970	8.64812	8.64628	8.64734	8.64507
ΔN/dB	0.00634	0.00463	0.00305	0.00121	0.00427	

3 结论

利用有限元方法分析了脊形截面掺钕 Al₂O₃ 光波导放大器内部信号光、抽运光的电磁场模式分布；结合三阶钕离子五能级系统的速率方程和信号光、抽运光、双向放大的自发辐射等传输方程，模拟计算了单级脊形 Er : Al₂O₃ 光波导放大器净增益与信号功率的关系。输入信号增强，放大器的净增益下降。同时数值模拟了两级、三级脊形 Er : Al₂O₃ 光波导放大器级联的净增益特性。结果表明级联放大系统的总净增益值：1)明显高于单级放大器的净增益值；2)其值小于每个光波导放大器单独工作时各放大器净增益的代数和，产生了第一类净增亏损；3)级联放大系统的净增益值与光波导的排列方式有关，既有可能产生第二类净增益亏损。低掺钕浓度的光波导作为前级放大器、高掺钕浓度的光波导作为后级放大器的组合方式，级联放大系统总净增益值最大。

参考文献

- 1 Van den Hoven G N, Koper R J I M, Polman A. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al₂O₃ waveguides on silicon. *Appl Phys Lett*, 1996, **68**(14):1886~1888
- 2 Slooff L H, Blaaderen A V, Polman A, et al. Rare-earth doped polymers for planar optical amplifiers. *J*

- Appl Phys*, 2002, **91**(7):3955~3980
- 3 徐静,戴道铎,何赛灵. 基于 PML 边界的有限差分法及其在光波导泄漏损耗计算中的应用. *光子学报*, 2003, **32**(12):1426~1429
- Xu J, Dai D Z, He S L. *Acta Photonics Sinica*, 2003, **32**(12):1426~1429
- 4 李成仁,宋昌烈,李淑凤,等. 溶胶-凝胶(sol-gel)法制作掺钕 Al₂O₃ 薄膜及其光致发光光谱特性测量. *光子学报*, 2003, **32**(12):1514~1517
- Li C R, Song C L, Li S F, et al. *Acta Photonics Sinica*, 2003, **32**(12):1514~1517
- 5 Van den Hoven G N, Snoeks E, Polman A, et al. Upconversion in Er-implanted Al₂O₃ waveguides. *J Appl Phys*, 1996, **79**(3):1258~1265
- 6 Pasquale F D, Federighi M. Modeling of uniform and pair-induced upconversion mechanisms in high concentration erbium-doped silica waveguides. *J of Lightwave Techno*, 1995, **13**(9):1858~1864
- 7 Chengren Li, Changlie Song, Shufeng Li, et al. Experimental investigation of photoluminescence spectra of Yb³⁺ sensitized Er³⁺-doped glass samples in series. *Chin Opt Lett*, 2003, **1**(11):664~667
- 8 李成仁,宋昌烈,饶文雄,等. 两片掺钕玻璃样品级联荧光光谱的实验研究. *物理学报*, 2003, **52**(3):751~755
- Li C R, Song C L, Li S F, et al. *Acta Phys Sin*, 2003, **52**(3):751~755

- 9 Selleri S, Petráček J. Model analysis of rib waveguide through finite element and mode matching methods. *Optical and Quantum Electronics*, 2001, **33**: 373~386
- 10 Pasquale F D, Fedeighi M. Analysis of erbium-doped waveguide amplifiers by a full-vectorial finite-element method. *J of Lightwave Technol*, 1993, **11**(10): 1565~1573
- 11 Li Shufeng, Song Changlie, Li Chengren, et al. Theoretical model of Er-doped Al_2O_3 waveguide amplifier. *Proc of SPIE*, 2002, **4927**: 263~270
- 12 冉冰, 宋昌烈, 熊前进, 等. 掺 Er^{3+} : Al_2O_3 光波导放大器增益特性. *光电子·激光*, 2001, **12**(4): 347~350
- Ran B, Song C L, Xiong Q J, et al. *J Optoelectro Laser*, 2001, **12**(4): 347~350
- 13 李淑凤, 宋昌烈, 巢明. 不同波长泵浦的掺铒 Al_2O_3 光波导的荧光特性. *光电子·激光*, 2001, **12**(1): 14~18
- Li S F, Song C L, Chao M. *J Optoelectro Laser*, 2001, **12**(1): 14~18

Simulation for Net Gain Characteristics of Rib Er-doped Al_2O_3

Li Chengren^{1,2}, Song Changlie², Li Shufeng², Song Qi², Li Jianyong²

1 Physics Department of Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029

2 Physics Department of Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024

Received date: 2004-04-07

Abstract The modes configuration of the electromagnetic field of the signal light and the pump light within rib Er-doped Al_2O_3 waveguide amplifiers were analyzed using the finite element method. The population distribution of the five-levels system for Er^{3+} with 980 nm pump was solved using its rate equations. The relationship between the net gain of the waveguide and the signal power, and net gain characteristics of two or three rib Er-doped Al_2O_3 waveguide amplifiers in series were numerically simulated. The results show that there are two kinds of net gain losses. In the series system, the better total amplification ability can be obtained when the waveguide amplifiers with low-concentration is taken as a preamplifier than it is taken as a post-amplifier.

Keywords Rib Er-doped Al_2O_3 waveguide amplifiers; Numerical simulation; Series; Signal power; Net gain loss



Li Chengren was born in 1962, in Shenyang. He received the B. S. degree from Liaoning Normal University, the M. E. degree from Dalian University of Technology (DUT). Since 2000 he has been attending the doctoral studies in department of physics at DUT. He has been working at department of physics, Liaoning Normal University since 1985. His research interests are in rare-earth doped waveguide amplifiers, nonlinear optics and chaos. He has published more than 30 papers.