

纵向非均匀掺铒的光波导放大器 特性数值模拟研究*

宋 琦¹⁾ 宋昌烈¹⁾ 李成仁^{1,2)} 李淑凤¹⁾ 李建勇¹⁾

¹⁾ 大连理工大学物理系, 大连 116024)

²⁾ 辽宁师范大学物理系, 大连 116024)

(2004 年 8 月 6 日收到, 2004 年 12 月 15 日收到修改稿)

提出一种通过非均匀掺铒方法提高光波导放大器增益和抽运效率的优化设计方案,并在有限元法基础上构建了光波导放大器模型. 计算中考虑到合作上转换、交叉弛豫和激发态吸收等效应. 利用自适应法求解了两种铒离子浓度分布方案,分别使脊形光波导放大器增益在固定长度和增益最大值有 10.27% 和 5.65% 的提高. 计算结果与级联掺铒玻璃样品的实验结果相符合.

关键词: 掺铒光波导放大器, 非均匀掺杂, 增益特性, 自适应算法

PACC: 4281W, 4280L

1. 引 言

稀土元素 $\text{Er } ^4I_{15/2} - ^4I_{13/2}$ 能级跃迁辐射出 1.53 μm 波段的光谱, 对应着光纤通信的最小损耗窗口之一. 1996 年 Hoven 研制成功 4 cm 长的掺铒光波导放大器(erbium doped waveguide amplifier, EDWA). 获得了 2.3 dB 的增益, 引发了各国科学家的极大兴趣^[1-4]. 此后人们探索着在多种基质上采用各种工艺制备掺铒薄膜^[5-10], 并对掺铒光波导放大器进行了优化设计^[11, 12]. 2003 年, 李成仁等^[13]对简单的级联掺铒玻璃光致发光谱进行了测量, 并定性地得出级联样品相对于单一样品具有更强的发光谱强度的结论. 本文基于这一实验现象提出了一种通过改变光波导传输方向上铒离子的浓度分布来改善信号光增益的方法, 并在有限元法的基础上采用自适应方法, 提供以信号光增益和抽运效率为依据的两种浓度分布方案, 针对脊形波导中的抽运光和信号光的模场进行模拟^[14-17]. 计算结果表明, 得到的两种浓度纵向分布方案分别在短距离和较长距离上使增益特性得到有效的改善.

2. 数值模拟

2.1. 掺铒光波导放大器模型

图 1 为 980 nm 波长抽运光作用下, 铒离子五能级系统辐射跃迁示意图. 考虑到 $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$ 能级上的合作上转换、激发态吸收和交叉弛豫等效应, 列出铒离子的速率方程如下^[18-20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial t} = & -W_{13}N_1 + W_{31}N_3 + A_{21}N_2 + C_2N_2^2 \\ & + C_3N_3^2 + R_{21}N_2 - R_{12}N_1 - C_{14}N_1N_4, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2}{\partial t} = & A_{32}N_3 - A_{21}N_2 - 2C_2N_2^2 - R_{21}N_2 \\ & + R_{12}N_1 + 2C_{14}N_1N_4 - W_{24}N_2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_3}{\partial t} = & W_{13}N_1 - W_{31}N_3 - A_{32}N_3 \\ & + A_{43}N_4 - 2C_3N_3^2 - W_{\text{ESA}}N_3, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_4}{\partial t} = & -A_{43}N_4 + C_2N_2^2 - C_{14}N_1N_4 \\ & + W_{24}N_2, \end{aligned} \quad (4)$$

* 国家自然科学基金(批准号 69787001, 69889701)和辽宁省科技厅科研基金(批准号 20022110, 202123198)资助的课题.

$$N_{Er}(x, y, z) = N_1(x, y, z) + N_2(x, y, z) + N_3(x, y, z) + N_4(x, y, z) \quad (5)$$

式中, N_1, N_2, N_3 和 N_4 分别为 $^4I_{15/2}, ^4I_{13/2}, ^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{9/2}$ 能级的铒离子粒子数浓度, 总的铒离子浓度 N_{Er} 是随 z 方向变化的函数; $A_{ji} = 1/\tau_{ji}$ 为能级 j 至能级 i 的跃迁速率; C_2, C_3 和 C_{14} 分别表示相应能级的合作上转换和交叉弛豫系数; R_{12} 和 R_{21} 为信号光的受激吸收和受激发射速率; W_{13} 和 W_{31} 为 980 nm 抽运光的受激吸收和受激发射速率, W_{ESA} 为 $^4I_{11/2}$ 能级的激发态吸收速率. 以上系数表达式分别由下列各式给出:

$$R_{12}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{a12}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t, \nu_s) + \sum_{j=1}^M \frac{\sigma_{a12}(\nu_j)}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, t, \nu_j) + I_{ASE-}(x, y, z, t, \nu_j)] \quad (6)$$

$$R_{21}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{e21}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t, \nu_s) + \sum_{j=1}^M \frac{\sigma_{e21}(\nu_j)}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, t, \nu_j) + I_{ASE-}(x, y, z, t, \nu_j)] \quad (7)$$

$$W_{13}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{a13}}{h\nu_p} [I_{p+}(x, y, z, t, \nu_p) + I_{p-}(x, y, z, t, \nu_p)] \quad (8)$$

$$W_{31}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{e31}}{h\nu_p} [I_{p+}(x, y, z, t, \nu_p) + I_{p-}(x, y, z, t, \nu_p)] \quad (9)$$

$$W_{ESA}(x, y, z, t) = \frac{\sigma_{ESA}}{h\nu_p} [I_{p+}(x, y, z, t, \nu_p) + I_{p-}(x, y, z, t, \nu_p)] \quad (10)$$

式中, σ_{aij} 为能级 i 至能级 j 的吸收截面; σ_{eji} 为能级 j 至能级 i 的发射截面; σ_{ESA} 为 $^4I_{11/2}$ 能级的激发态吸收

截面, 计算中相关参量如表 1 所示. I_s, I_p 和 I_{ASE} 分别为信号光、抽运光和自发辐射的光强, 计算中考虑了信号光与抽运光的双向传输; ν_s, ν_p 分别为信号光、抽运光的频率; h 是 Plank 常数; M 是频率间隔 $\Delta\nu_j$ 数目.

设抽运光、信号光和自发辐射的功率为 P_p, P_s 和 P_{ASE} , 通过给定抽运光和信号光的功率值, 求解放大器的传输方程.

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z) \quad (11)$$

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

$$\frac{dP_{ASE}(z, \nu_j)}{dz} = \mp [\gamma_{21}(z, \nu_j) - \gamma_{12}(z, \nu_j)] \times P_{ASE}(z, \nu_j) \pm mh\nu_j \Delta\nu_j \gamma_{21}(z, \nu_j) \quad (13)$$

式中, m 为信号光激励下的导模数目; γ_p, γ_{12} 和 γ_{21} 分别为抽运光和信号光的吸收及增益系数. 本文采用的光波导模型构建于二氧化硅基底掺铒氧化铝脊形光波导. 首先利用有限元法对电磁场进行场模式分析, 将连续场离散化分成若干结点表示, 选取近似场变量模型表示真实的场变量分布, 确定单元特性并结合单元特性求解全解域的联立方程组. 将波导边界条件代入方程组求解得出未知结点的场变量值. 通过求解各个结点值得到模型内任一点的信号光与抽运光传输场模式. 由于考虑到实际问题中抽运光和信号光往往是由光纤耦合入波导中, 计算中采用 Bessel 函数分布求解各单元处的入射总场值和各传输模式相关系数, 结合以上速率方程及传输方程, 最后得到增益值表达式如下:

$$G = 10 \log(P_s/P_{s0}) = \sum_{i=0}^k [\gamma_{21}(z_i, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)] \times \Delta z 10 \log_{10}(e) - r \Delta z k \quad (14)$$

式中, 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.

2.2. 自适应方法

理论分析和数值模拟结果均证明: 一定长度的光波导存在一个最佳掺杂浓度. 在抽运光输入功率减小时 (信号光输入功率不变), 对应的最佳掺杂浓度值也随之下降. 图 2 为 5 cm 长的光波导最佳铒离子浓度随抽运功率变化曲线. 从图 2 可以看出, 当

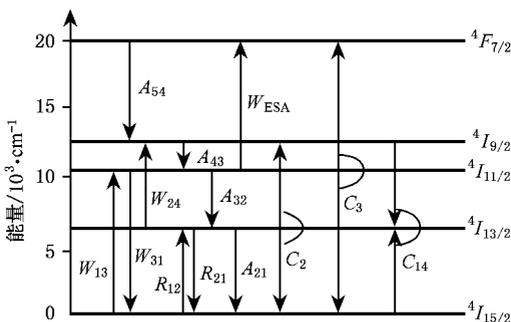


图 1 980 nm 波长抽运下的简化铒离子跃迁能级图

表 1 计算中相关参量的取值

参 量	取 值
$\sigma_{12}(1.53 \mu\text{m})10^{-21} \text{cm}^2$	5.36
$\sigma_{21}(1.53 \mu\text{m})10^{-21} \text{cm}^2$	5.41
$\sigma_{13}(0.98 \mu\text{m})10^{-21} \text{cm}^2$	2.58
$C_2(^4I_{13/2})10^{-17} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	5.0
$C_3(^4I_{11/2})10^{-17} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	5.0
$C_{14}(^4I_{15/2} \text{和} ^4I_{9/2})10^{-17} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	3.5
$\tau_2/10^{-3} \text{s}$	7.8
$\tau_3/10^{-5} \text{s}$	3.0
$\tau_4/10^{-9} \text{s}$	1.0

抽运功率从 10 mW 增加到 70 mW, 最佳掺杂浓度近似成线性变化。

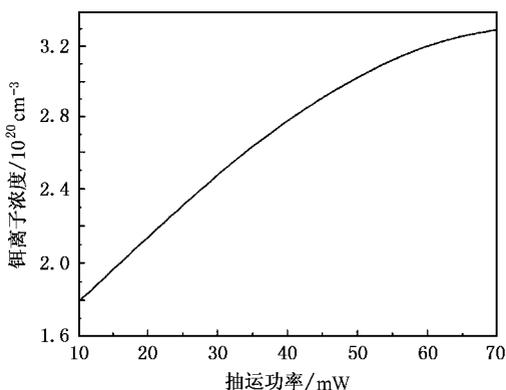


图 2 波导抽运功率与最佳浓度关系曲线

改善增益输出的一个有效途径是提高放大器的抽运效率。通过以上计算可知, 抽运功率下降时, 波导的最佳掺杂浓度也有所下降。在传输过程中, 抽运光功率在光波导内是随着波导长度增加而衰减的, 设计中设想通过改变光波导的纵向掺杂浓度来匹配抽运功率变化, 以达到提高抽运效率, 获得更好的增益的目的。

定义变量 $\eta = -\Delta P_s / \Delta P_p$ 为抽运光效率, ΔP_s 为每一步信号光功率变化的大小, ΔP_p 为抽运光功率变化的大小。通过比较 η 值的大小, 可以知道抽运光的转化率。光波在波导中传输的过程, 抽运能量会随着波导的长度增加而逐步减小。抽运光的消耗一部分来自于波导本身固有的传输损耗, 另一部分转化成能级跃迁释放的热能和受激辐射的光子能量。波导的掺杂钕离子浓度决定了后一种的抽运光消耗和输出的信号增益的大小。较高的钕离子浓度

会带来较大的增益, 但同时也存在较强的合作上转换, 消耗了大部分抽运光使抽运效率下降, 增益效果反而下降。计算中所得到的最佳掺杂浓度正是恒定浓度下抽运效率最高所对应的情况, 这一点被视为增益增长与合作上转换效应损失的平衡点。

对于纵向钕离子浓度分布的计算, 存在两个初始问题。一是钕离子浓度变化规律的确定, 二是钕离子浓度变化范围与初始值的选择, 本文采用自适应方法解决了这两个问题。首先把一定长度的波导沿纵向分成 m 个小单元, 确定初始抽运光和信号光能量, 通过计算所分割的第一个小单元波导的相应增益特性参数, 并与预先设定的判据进行比较, 得到优化的掺钕浓度, 再以这一小单元的抽运光和信号光输出值作为下一小单元的初始值, 最后通过将 m 个小单元的结果串联起来得到整段光波导的浓度分布和增益输出。自适应方法在计算过程中解决了变化规律的选择和初始值范围的确定问题, 具体计算流程如图 3 所示。

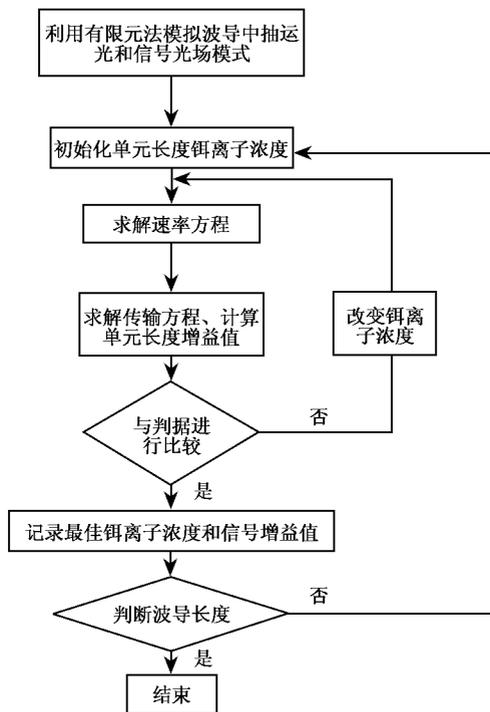


图 3 自适应算法流程图

计算中假设沿纵向改变钕离子掺杂浓度, 对波导芯层的折射率影响可以忽略不计, 对波导中传输的抽运光和信号光的场模式也不产生影响。考虑到计算的速度和精度, 浓度变化单元长度取 0.01 cm。

通过改变判据, 本文中计算了两种不同的浓度

分布方案. 在第一种方案中, 选取单元长度内所得到的输出增益作为计算判据. 第二种方案中, 选取单元长度内得到的抽运效率作为计算判据. 计算中分别比较了两种方案得到的铒离子浓度分布、信号光增益、抽运光功率和抽运效率随波导长度变化关系.

3. 计算结果及讨论

计算中取抽运光和信号光的功率初始值分别为 50 mW 和 $1 \mu\text{W}$, 传输损耗为 0.35 dB/cm. 波导几何参数如图 4 所示, 图中 $n_1 = 1.64$, $n_2 = 1.51$, $n_3 = 1.0$ 分别是芯层、基底和包层的折射率. 首先计算了两种恒定掺杂浓度分布的情况, 在有限波导长度(截止到 5 cm)上的最佳浓度为 $3.6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 在 5 cm 处得到的增益最大值为 10.13 dB. 不限制波导长度所得到的最佳浓度为 $1.9 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 这是恒定浓度, 固定抽运光、信号光功率条件下抽运效率最高的情况, 增益最大值 24.77 dB 出现在 18.66 cm.

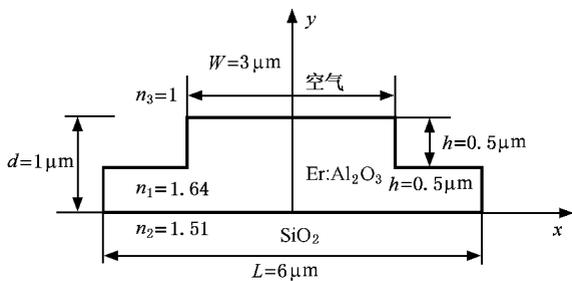


图 4 脊形波导截面示意图

由于两种优化方案的增益最大值分别在 18.86 和 23.50 cm, 选取波导截止长度为 23.50 cm. 沿波导纵向铒离子浓度分布和增益曲线分别如图 5、图 6 所示. 方案一中, 波导长度从 0 增加到 23.50 cm 相对应的铒离子浓度从 $4.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 下降到 $0.6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. 在波导开始阶段增益增大趋势显著, 在 5 cm 处增益值达到 11.17 dB. 随着波导长度的增加, 增益增大趋势减缓. 在 18.86 cm 处, 增益达到最大值 21.09 dB.

对于方案二, 铒离子浓度随波导长度从 $2.1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 下降到 $1.6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 在 5 cm 处增益值为 9.63 dB. 在较长的距离上(大于 18.06 cm), 增益值开始大于 $1.9 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. 在 23.50 cm 处得到增益最大值 26.17 dB.

由初始条件可知, 抽运光与信号光的输入能量值之间差 4 个数量级. 这说明抽运光被用于对信号

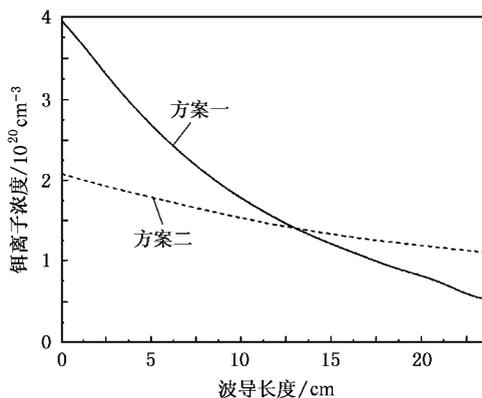


图 5 掺铒浓度随波导长度变化曲线

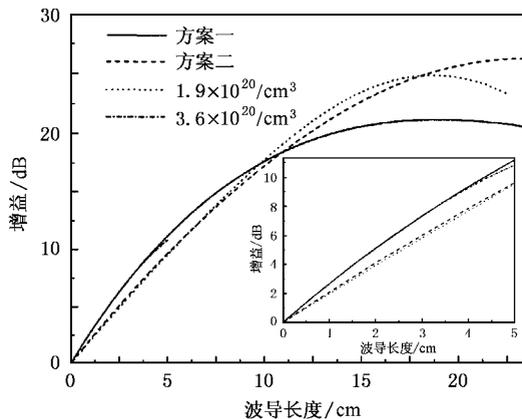


图 6 增益随波导长度变化曲线

光放大的部分是十分有限的, 提高增益的一个有效途径就是尽可能地提高抽运光的转化率. 计算中通过对光波导传输方向掺杂浓度的控制, 有效地抑制了合作上转换效应, 信号光的增益有明显的改善.

如图 6 的内插图所示, 第一种方案相对于固定 5 cm 长的波导, 增益优势体现在大于 3.5 cm 的传播距离上, 在 5 cm 处增益值比 $3.6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 的增益值有 10.27% 的提高. 这是因为波导初始阶段的高浓度带来增益的快速增长, 而变化的浓度相对于 $3.6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 的合作上转换效应有所减小, 提高了抽运效率, 如图 7 中内插图所示. 但随着波导长度继续增长, 第一种方案由于初始阶段铒离子浓度高, 抽运光消耗很大(如图 8 所示), 导致后半段信号光增益增长速度下降, 抑制了增益值的进一步提高.

第二种方案在波导的整个传输过程中, 信号增益得到均匀的增长. 如图 6 中内插图所示, 其在固定长度上小于第一种方案和 $3.6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 略高于 $1.9 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. 在较长距离上, 第二种方案的增益

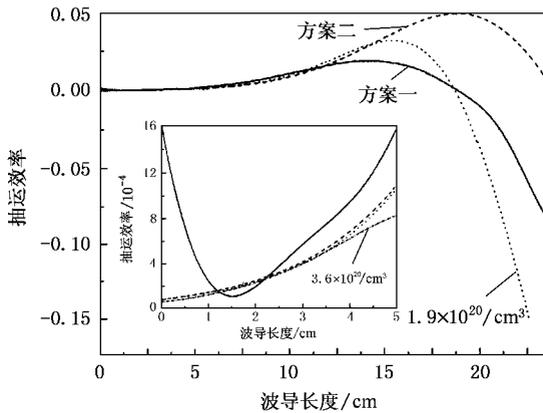


图 7 抽运效率随波导长度变化曲线

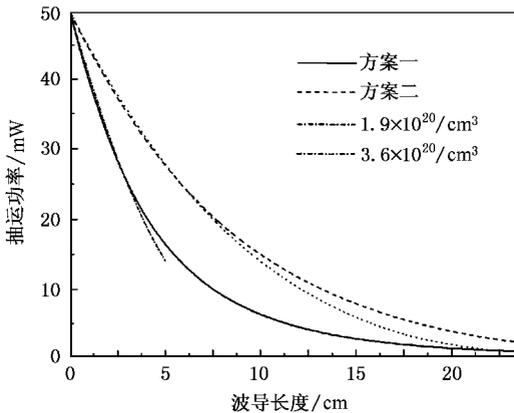


图 8 抽运功率随波导长度变化曲线

最大值为四种情况中最高,所获得的增益最大值比 $1.9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的增益最大值有 5.65% 的提高. 这是因为第二种方案是通过抽运效率作为判据,从抽运效率与波导长度曲线看,其得到总的抽运效率是最佳的,最后抽运能量的剩余也最多. 可见选用不同判据得到的两种增益改善方案的效果完全不同,方案一相对于较短固定长度的波导增益有所改善,而方案二有效地提高了波导输出增益最大值. 两种优化方案的钕离子浓度变化趋势都是由开始阶段的高浓度逐渐下降到较低浓度. 这种规律在一定程度上抑制了合作上转换,提高了抽运效率.

计算中还比较了 1.2 cm 处的波导两种方案的增益效果. 如图 9 所示,方案一所得到的增益曲线

几乎与 $3.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的增益曲线相重合,而方案二得到的增益曲线明显高于 $1.9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 增益曲线. 这说明在短距离上高浓度组合对增益的提高要弱于低浓度组合对增益的提高. 从放大器增益与光致发光谱成比例的关系看,这一结论与两片级联玻璃样品在 1.2 cm 厚度下的光致发光谱强度变化规律相同. 另外,级联玻璃样品浓度从高到低的最佳排列顺序也与计算中所得到的浓度变化趋势相符.

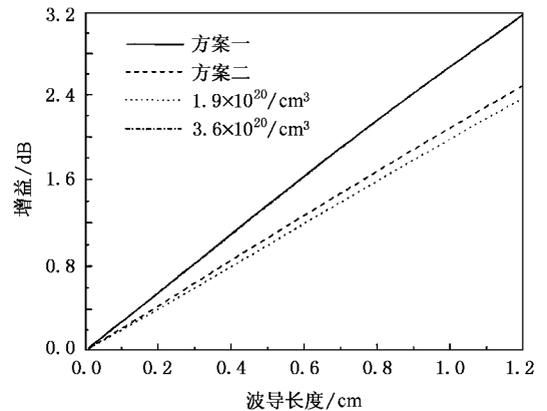


图 9 增益随波导长度变化曲线

4. 结 论

本文提出了一种通过非均匀掺钕方法提高光波导放大器增益的设计方案,并在有限元法的基础上建立了纵向非均匀掺杂光波导的数值模型. 利用自适应方法求解了两种不同的浓度分布方案下的增益值. 结果表明:以增益值为判据的方案得到的浓度分布使增益在固定的距离上得到了改善;不考虑波导长度限制,以抽运效率为判据的方案得到的浓度分布使增益最大值得到了提高. 两种方法分别相对于固定长度和不限长度的恒定浓度掺杂,其增益值最大值和抽运效率都有不同程度的提高. 在 1.2 cm 距离上,模型的计算结果与掺钕玻璃样品级联荧光谱定性的测量结果相一致.

另外,本方法还可以用于掺钕共掺光波导放大器镜、钕离子浓度之间的比例优化,以更好地提高抽运效率. 目前这方面的问题正在进一步研究中^[21].

- [1] Polman A 1997 *Appl. Phys. Rev.* **82** 1
- [2] Van den Hoven G N , Snoeks E , Polman A 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 3065
- [3] Van den Hoven G N , Koper R J I M , Polman A 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1886
- [4] Van den Hoven G N , Snoeks E , Polman A *et al* 1996 *J. Appl. Phys.* **72** 1258
- [5] Yong H H , Kim S H 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 287
- [6] Choi Y B 2000 *Opt. Lett.* **25** 263
- [7] Park O H , Seo S Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2787
- [8] Zhang L , Zhang J J , Qi C H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1620 (in Chinese) [张 龙、张军杰、祁长鸿等 2000 物理学报 **49** 1620]
- [9] Zhao Q , Wang B , Yan H *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 151 (in Chinese) [赵 谦、王 波、严 辉等 2004 物理学报 **53** 151]
- [10] Yang J H , Dai S X , Wen L *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 508 (in Chinese) [杨建虎、戴世勋、温 磊等 2003 物理学报 **52** 508]
- [11] Feng Y , Chen X B , Hao Z *et al* 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 2454 (in Chinese) [冯 衍、陈晓波、郝 昭等 1997 物理学报 **46** 2454]
- [12] Zhang L , Lin F Y , Hu H F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1378 (in Chinese) [张 龙、林凤英、胡和方 2001 物理学报 **50** 1378]
- [13] Li C R , Song C L , Rao W X *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 751 (in Chinese) [李成仁、宋昌烈、饶文雄等 2003 物理学报 **52** 751]
- [14] Yuan F C , Ran G Z , Chen Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2487 (in Chinese) [袁放成、冉广照、陈 源等 2001 物理学报 **50** 2487]
- [15] Fabrizio D P , Maurizio Z 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 1565
- [16] Giles C R , Desurvire E 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 271
- [17] Xiao Z S , Xu F , Zhang T H *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 164 (in Chinese) [肖志松、徐 飞、张通和等 2001 物理学报 **50** 164]
- [18] Li S F , Song C L , Chao M 2001 *J. Optoelectron · Laser* **12** 15 (in Chinese) [李淑凤、宋昌烈、巢 明 2001 光电子 · 激光 **12** 15]
- [19] Ran B , Song C L , Li S F 2001 *J. Optoelectron · Laser* **12** 347 (in Chinese) [冉 冰、宋昌烈、李淑凤 2001 光电子 · 激光 **12** 347]
- [20] Christof S , Polman A 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 4314
- [21] Li C R , Song C L , Li S F *et al* 2003 *Chin. Opt. Lett.* **1** 664

Numerical simulation of erbium non-uniformly doped waveguide amplifier in the propagation direction *

Song Qi¹⁾ Song Chang-Lie¹⁾ Li Cheng-Ren¹⁾²⁾ Li Shu-Feng¹⁾ Li Jian-Yong¹⁾

¹⁾ Department of Physics , Dalian University of Technology , Dalian 116024 , China)

²⁾ Department of Physics , Liaoning Normal University , Dalian 116024 , China)

(Received 6 August 2004 ; revised manuscript received 15 December 2004)

Abstract

Design of the waveguide amplifier nonuniformly doped with Er along the propagating direction is presented. The model of waveguide amplifier is constructed by using the finite element method , including cooperative upconversion , cross relaxation and excited state absorption. The gain performances at a given length and at maximum are improved to be 10.27% and 5.65% , respectively. Calculation results agree qualitatively with the experimental data of cascaded Er-doped glass samples.

Keywords : erbium doped waveguide amplifier , non-uniformly doped , gain characteristic , adaptive method

PACC : 4281W , 4280L

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 69787001 , 69889701) and the Science Foundation of the Science and Technology Bureau of Liaoning Province , China (Grant Nos. 20022110 , 202123198).